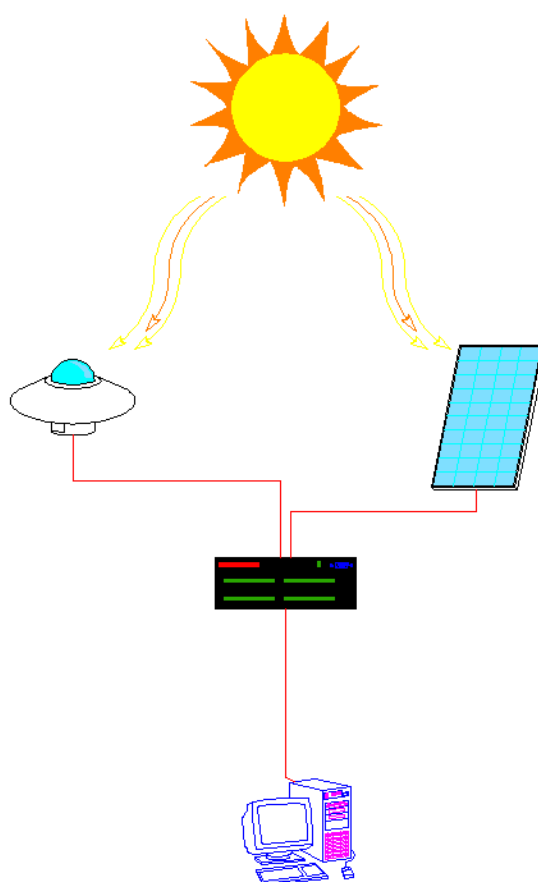




ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ  
Σ.Τ.ΕΦ.  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη της επίπτωσης της εξωτερικής θερμοκρασίας  
στην απόδοση φωτοβολταϊκών πλαισίων.**

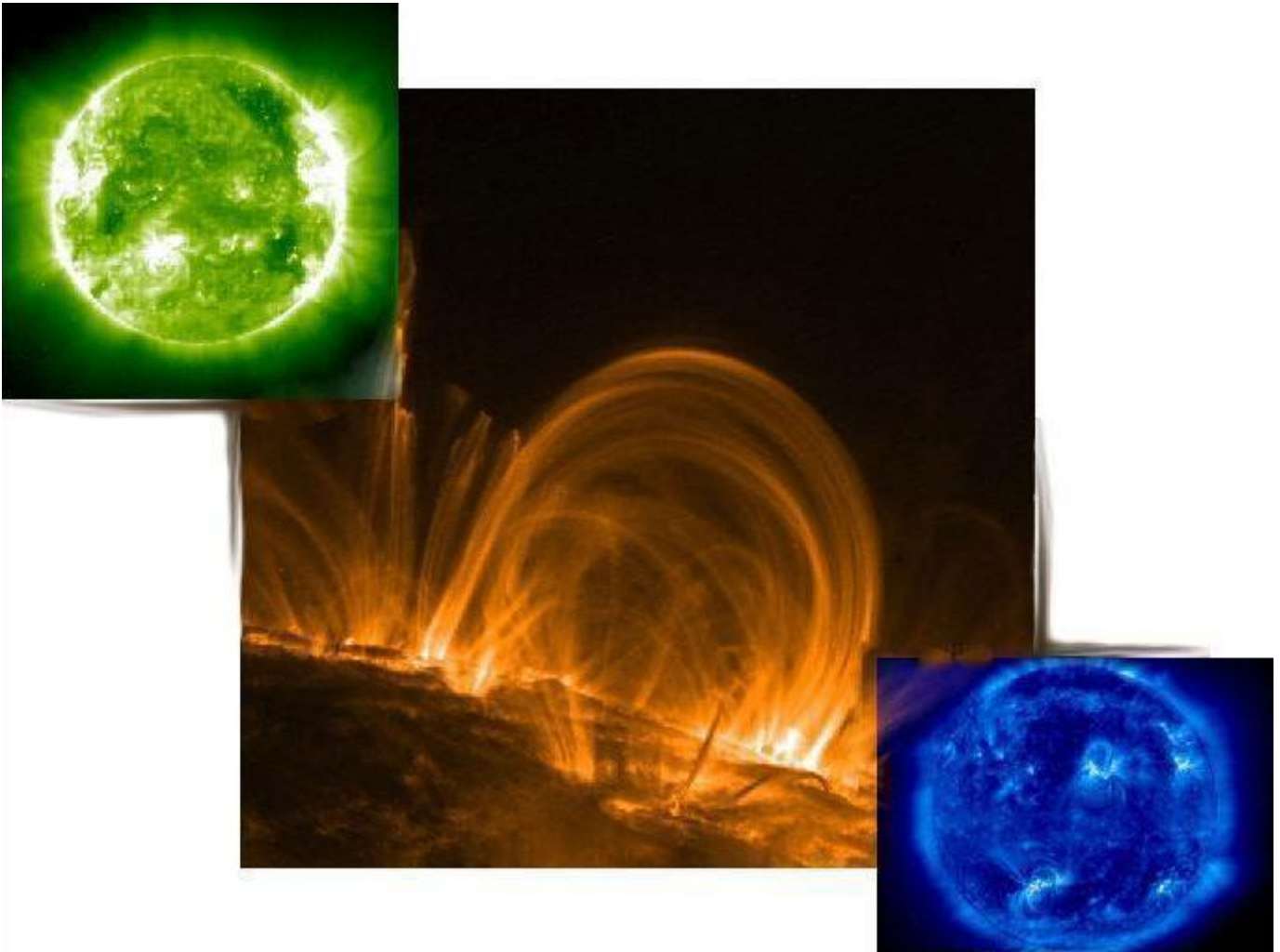


ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:  
ΚΟΥΡΑΣΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ  
ΟΡΦΑΝΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΦΩΤΗΣ ΜΑΥΡΟΜΑΤΑΚΗΣ

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΑΡΚΟ  
2007

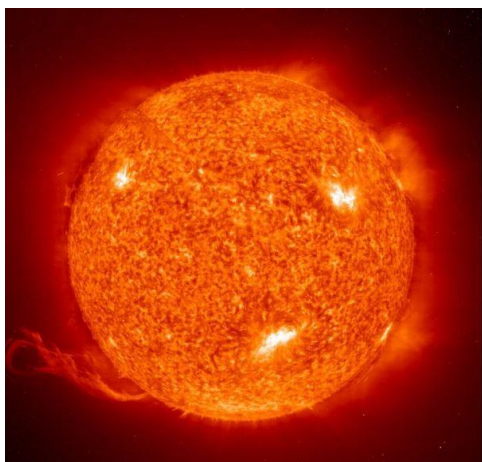
# ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Ο Ήλιος, η Ηλιακή Ακτινοβολία και το φάσμα της

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

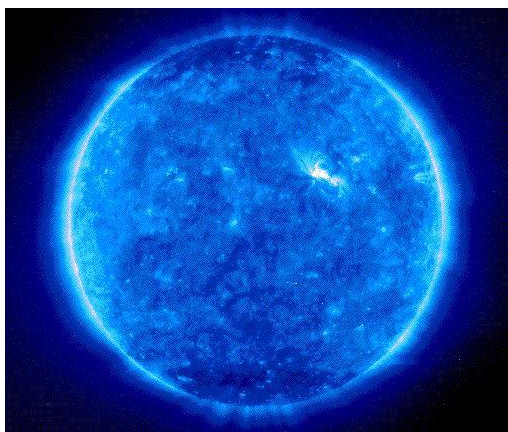
## Γενικά για τον ήλιο ως άστρο



Εικόνα 1. Ο Ήλιος, η πηγή της ηλιακής ενέργειας

θα μετατραπεί σε έναν κόκκινο γίγαντα σε 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια και κατόπιν θα καταλήξει σε λευκό νάνο.

Ο ήλιος μας αποτελείται, ως επί το πλείστον, από υδρογόνο (70%), ήλιο (28%) και το υπόλοιπο 2%, από βαρέα στοιχεία. Φυσικά είναι το μόνο αστέρι αρκετά κοντά μας, ώστε να εξετάσουμε τα εξωτερικά και τα εσωτερικά στρώματά του. Ο Ήλιος είναι ένας συνηθισμένος νάνος αστέρας δεύτερης γενιάς, που παράγει ενέργεια από



Εικόνα 2. Ο Ήλιος σε UV μήκη κύματος

kg και με ακτίνα  $7 \cdot 10^5$  km. Η μάζα του ήλιου αντιπροσωπεύει το 99.86% όλης της μάζας του ηλιακού συστήματος. Ο Ήλιος δεν είναι ένα στερεό σώμα. Είναι μια «περιστρεφόμενη μπάλα» θερμού πλάσματος. Το κέντρο του είναι ένας ισχυρός

Ο Ήλιος και το ηλιακό σύστημα γεννήθηκαν, σύμφωνα με την επικρατέστερη σήμερα θεωρία, πριν από 4.5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια από ένα περιστρεφόμενο αρχικό νεφέλωμα αερίου και σκόνης. Η κεντρική μεγάλη συμπύκνωση αποτέλεσε τον πρώτο-ήλιο, ενώ από κομμάτια της υπόλοιπης ύλης σχηματίστηκαν οι πρώτο-πλανήτες. Σύμφωνα με την επικρατούσα θεωρία για την εξέλιξη των αστεριών, ο Ήλιος

σύντηξη υδρογόνου στο εσωτερικό του. Πιο συγκεκριμένα με την αλυσιδωτή αντίδραση πρωτονίου-πρωτονίου, με την οποία καταναλώνει το υδρογόνο του με ένα ρυθμό 4.000.000 τόνων, ανά δευτερόλεπτο, παράγοντας ήλιο. Συγκεκριμένα για κάθε γραμμάριο υδρογόνου που μετατρέπεται σε ήλιο αποδίδεται ενέργεια  $1.67 \cdot 10^5$  kWh.

Ο ήλιος είναι ένα άστρο με μάζα  $2 \cdot 10^{30}$

θερμοπυρηνικός αντιδραστήρας, ο οποίος βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία και εκπέμπει τεράστιες ποσότητες φωτονίων και σωματιδίων προς όλες τις κατευθύνσεις.

Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του είναι περίπου 5800K ενώ στο εσωτερικό του  $15 \cdot 10^6$  K. Ο ήλιος έχει διάφορα στρώματα, το πιο εσωτερικό του είναι ο πυρήνας, που είναι περίπου 400.000 km σε διάμετρο και περιέχει περίπου το 60% της μάζας του ήλιου και λιγότερο από το 2% τον όγκο του. Το επόμενο στρώμα από τον πυρήνα, είναι η ζώνη της ακτινοβολίας. Ένας σφαιρικός φλοιός με πάχος το 40% της ηλιακής ακτίνας και η θερμοκρασία της είναι

περίπου 2 έως 8.000.000 K. Στο επόμενο στρώμα που είναι το στρώμα μεταφοράς, το πάχος φθάνει στο 15% της ακτίνας του ήλιου και επικρατούν θερμοκρασίες της τάξεως των 2.000.000 K.

Προχωράμε προς την δομή της ατμόσφαιρας του ήλιου. Πρώτα συναντάμε στο εσωτερικό της, τη φωτόσφαιρα, αυτό το φωτεινό επιφανειακό στρώμα που βρίσκεται μεταξύ της αδιαφανούς ζώνης μεταφοράς και της χρωμόσφαιρας. Το λαμπρό ορατό στρώμα, έχει μέσο πάχος μόνο 2.000 km και από το οποίο η περισσότερη ενέργεια ακτινοβολείται στο διάστημα. Η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας είναι περίπου 6.000 βαθμοί K στο βαθύτερο σημείο της και 4.000 βαθμοί K κοντά στην επιφάνεια. Την χρωμόσφαιρα την βλέπουμε με λαμπρό κόκκινο χρώμα σε περιόδους έκλειψης ηλίου και ανυψώνεται επάνω από τη φωτόσφαιρα μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα. Η θερμοκρασία της είναι μεταξύ 4.000 K (στην περιοχή που βρίσκεται πλησιέστερα στη φωτόσφαιρα) έως 50.000 K.

Πάνω από τη χρωμόσφαιρα βρίσκεται το εντυπωσιακό στέμμα (κορώννα) και στο φάσμα της βρίσκουμε μερικές λαμπρές γραμμές, που προέρχονται από έντονα ιονισμένα άτομα στοιχείων. Η υψηλή θερμοκρασίας του στέμματος, είναι η αιτία της εκπομπής ακτίνων X από εκεί. Η θερμοκρασία της ανεβαίνει από 500.000 K έως και 2.000.000 K. Και τέλος ο ηλιακός άνεμος, που είναι ηλιακή ακτινοβολία μαζί με έντονο ρεύμα πρωτονίων, ηλεκτρονίων και πυρήνων ηλίου, που εκτοξεύονται από την ατμόσφαιρα με ταχύτητες εκατοντάδων χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο.

Ο Ήλιος είναι το μόνο άστρο που επηρεάζει φανερά τη ζωή μας, όχι μόνο την ημέρα αλλά και τη νύκτα, με ηλιοφάνεια αλλά και τις νεφοσκεπείς ημέρες. Η ακτινοβολία του Ηλίου παρέχει σχεδόν όλη την ενέργεια που χρησιμοποιούμε στη Γη. Ακόμη και ο άνεμος και τα νέφη είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της ηλιακής ενέργειας στη Γη. Από την ηλιακή ακτινοβολία προέρχεται η αιολική ενέργεια, ο κύκλος του νερού, η βιολογική ενέργεια, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, ο άνθρακας

και σχεδόν όλη η ενέργεια στο ηλιακό σύστημα. Εξάιρεση αποτελεί η πυρηνική ενέργεια, που παράγεται από χημικά στοιχεία που δημιουργήθηκαν ως αποτέλεσμα εκρηκτικών φαινομένων που έγιναν κατά τον θάνατο ορισμένων μεγάλων άστρων.

Η μελέτη και η ανάπτυξη ηλιακών συστημάτων και εφαρμογών απαιτεί την γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας και μετεωρολογικών στοιχείων. Η ηλιακή ακτινοβολία έχει ορισμένα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τις μεταβολές που συμβαίνουν στα διάφορα υλικά.

### **Ηλιακή Ακτινοβολία – Ηλιακή σταθερά**

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μία ακτινοβόλος ενέργεια που εκπέμπεται από τον ήλιο η οποία είναι μία αντίδραση πυρηνικής τήξης που δημιουργεί την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Το φάσμα της ηλιακή ακτινοβολίας είναι κοντά σε αυτό ενός μέλαν σώματος της θερμοκρασίας των 5800 K. Περίπου η μισή από την ακτινοβολία είναι ορατή στο μικρό μήκος των κυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το άλλο μισό είναι κοντά στο υπέρυθρο μέρος και μερική στο υπεριώδες μέρος του φάσματος. Η υπεριώδης ακτινοβολία που δεν απορροφάται από την ατμόσφαιρα ή από κάποιο άλλο απορροφητικό σώμα είναι υπεύθυνο για την αλλαγή του χρώματος των χρωστικών ουσιών των δερμάτων.

Η απόσταση γης ηλίου μεταβάλλεται περιοδικά στην διάρκεια του έτους από  $152 \cdot 10^6$  km (1<sup>η</sup> Ιουλίου) ως  $147 \cdot 10^6$  km (1<sup>η</sup> Ιανουαρίου), δηλαδή από το αφήλιο ως το περιήλιο. Η μέση απόσταση των δύο αυτών ουρανίων σωμάτων είναι  $150 \cdot 10^6$  km και ονομάζεται αστρονομική μονάδα (AU). Αποτελεί την μονάδα μήκους για τις διαστημικές αποστάσεις.

**Ηλιακή Σταθερά** ενός πλανήτη είναι η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που αντιστοιχεί στη μέση απόσταση πλανήτη-ήλιου, ενός ηλιακού συστήματος. Για τη Γη η πρότυπη τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι  $1367 \text{ W/m}^2$ . Η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ ήλιου και γης, από την εμφάνιση ηλιακών κηλίδων και από την περιστροφή του ήλιου γύρω από τον άξονά του.

Η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης του σημείου που μετράται. Μονάδα της είναι το  $1 \text{ W/m}^2$  που προκύπτει από τη σχέση:

$$J = \frac{dP}{dS}$$

Και για την περίπτωση της ομόκεντρης σφαιρικής επιφάνειας ακτίνας  $R$  και εμβαδού  $S=4\pi R^2$ , η σχέση γίνεται ως εξής:

$$J = \frac{P}{4\pi R^2}$$

Όπου  $P=H$  ολική ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εκπεμπόμενη από όλη την επιφάνεια του σε όλα τα μήκη κύματος.

Η ηλιακή ακτινοβολία μετριέται συνήθως με ένα πυρανόμετρο ή ένα πυρηλιόμετρο. Πυρανόμετρο (**Εικόνα 3**) είναι ένας τύπος ακτινόμετρου που χρησιμοποιείται για να μετρήσει την ευρυζωνική ηλιακή ακτινοβολία σε μία επίπεδη επιφάνεια. Είναι εφοδιασμένο με ένα θερμικό ανιχνευτή ο οποίος έχει σχεδιαστεί για να μετρήσει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (Watt ανά τετραγωνικό μέτρο). Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο.

Πυρηλιόμετρο (**Εικόνα 4**) είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας



**Εικόνα 3. Πυρανόμετρο**



**Εικόνα 4. Πυρηλιόμετρο**

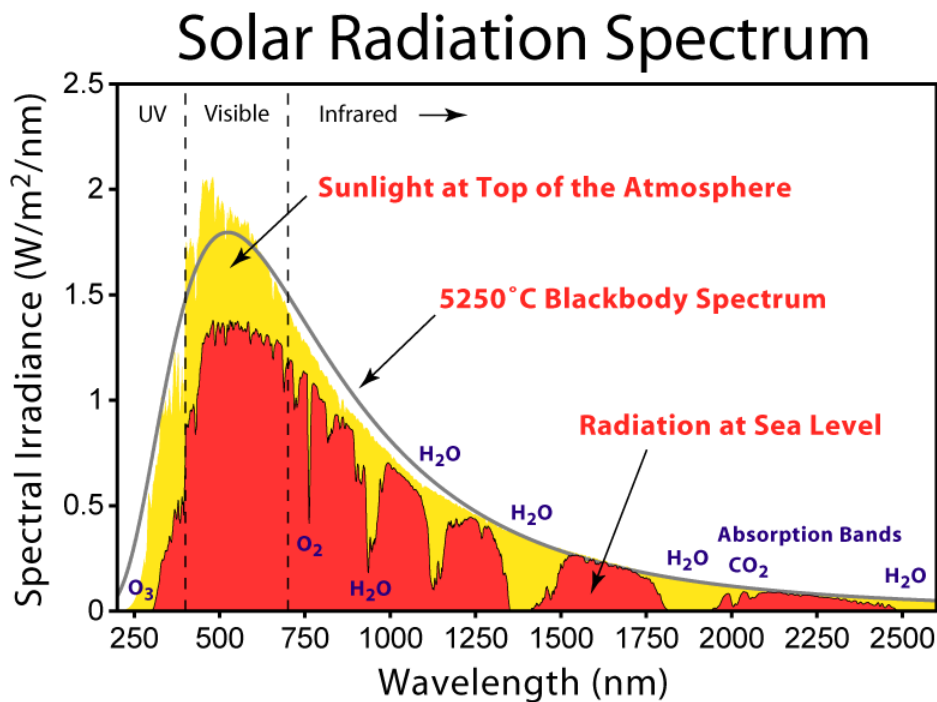
### **Φάσμα Ηλιακής ακτινοβολίας.**

Η διαμόρφωση του φάσματος που εκπέμπει ο ήλιος προσομοιάζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος, θερμοκρασίας περίπου 5800 K, όση είναι κατά μέσο όρο, η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ηλίου. Η προσέγγιση αυτή είναι επαρκής για την μελέτη των θερμικών εφαρμογών της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως π.χ. η θέρμανση νερού.

Στις περιπτώσεις αυτές ενδιαφέρει συνήθως η συνολική θερμική ισχύς της ακτινοβολίας και ο μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας όπως π.χ. στους ηλιακούς θερμοσυφωνικούς συλλέκτες ή τους θερμοσυσσωρευτικούς τοίχους των κτιρίων κ.λ.π. δεν είναι όμως το ίδιο και για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας, αφού αυτή καθορίζεται από την λεπτομερειακή φωτονική σύσταση της ακτινοβολίας.

Βλέπουμε ότι το ηλιακό φως αποκτά μία ανώμαλη φασματική κατανομή, που οφείλεται σε απορροφήσεις και σκεδάσεις από τα συστατικά της ατμόσφαιρας που διασχίζει.

Το φάσμα του ηλιακού φωτός στα όρια της ατμόσφαιρας της γης, χαρακτηρίζεται από την έκφραση AM0 και εκτείνεται πρακτικά, από 0,1  $\mu\text{m}$  (ακτίνες X), μέχρι τα 100 m (τα μακρά ραδιοκύματα). Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, το φάσμα αυτό έξω από τη ατμόσφαιρα της γης, προσεγγίζεται με το φάσμα του μέλανος σώματος ( $T_H \approx 5800\text{ K}$ ) και με μέγιστο στο μήκος κύματος  $\lambda_{\text{μεγ}} \approx 480\text{ nm}$ . Στα όρια της ατμόσφαιρας αλλά και στην επιφάνεια της γης, υπάρχουν γραμμές απορρόφησης, που οφείλονται σε χαμηλής θερμοκρασίας αέρια στοιχεία, όπως Fe, Mg, Ca, της χρωμόσφαιρας του ηλίου. Οι απορροφήσεις στο δεξιό τμήμα των φασμάτων προέρχονται από τα αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας της γης δηλαδή, υδρατμοί,  $\text{CO}_2$ , οξείδια του αζώτου κ.α.

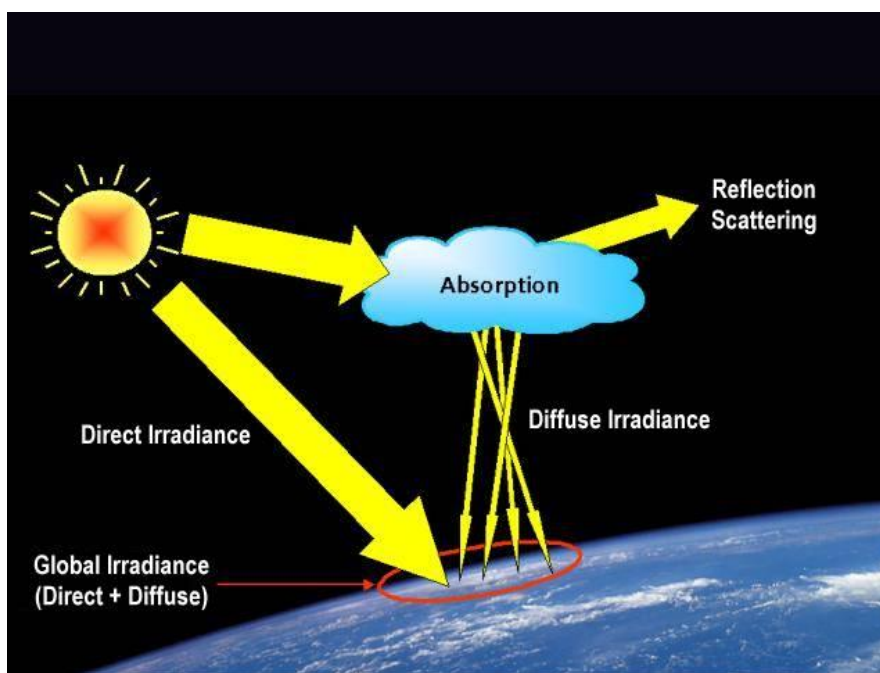




Το όζον είναι άφθονο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας και απορροφά έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία, με συνέπεια να ελαττώνεται ισχυρά η πυκνότητα ισχύος της διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, στην περιοχή των μηκών κύματος  $0.3 \div 0.4 \mu\text{m}$ , το μοριακό οξυγόνο απορροφά κυρίως στην περιοχή του ερυθρού π.χ.  $0.63$  και  $0.69 \mu\text{m}$ , το διοξείδιο του άνθρακα στο υπέρυθρο  $2.7$  και  $4.3 \mu\text{m}$ , και οι υδρατμοί στο ερυθρό και στο υπέρυθρο.

Το τμήμα του φάσματος του ηλιακού φωτός που αφορά άμεσα τις κατάλληλες συνθήκες, για την ανάπτυξη της ζωής αλλά και κάποιες πρακτικές εφαρμογές στην γη, βρίσκεται στο διάστημα των  $0.3 \div 5 \mu\text{m}$  και από το οποίο αποτελείται ένα μικρό μέρος του ορατού φάσματος στα  $0.4 \div 0.75 \mu\text{m}$  και εδώ παρατηρείται ότι η απορρόφηση μειώνεται, με αποτέλεσμα την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας προς την γη. Η πιο ισχυρή απορρόφηση του ηλιακού φωτός είναι μεταξύ των  $5 \mu\text{m}$  και των  $8 \mu\text{m}$  και μετά τα  $14 \mu\text{m}$ , ενώ η απορρόφηση μεταξύ των  $8 \mu\text{m}$  και  $14 \mu\text{m}$  παρουσιάζεται σχετικά μειωμένη.

Επίσης από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης, που συνήθως λιγότερο από το 60 % είναι άμεση, σε μορφή δέσμης ακτινών φωτός, που μπορούν π.χ. να εστιάσουν σε κάτοπτρα ή φακούς. Η υπόλοιπη είναι διάχυτη, διότι έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με την σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα σε αυτήν.



Εικόνα 5. Τα είδη της ηλιακής ακτινοβολίας: η απευθείας (Direct), η διάχυτη (Diffuse) και η ολική (Global).



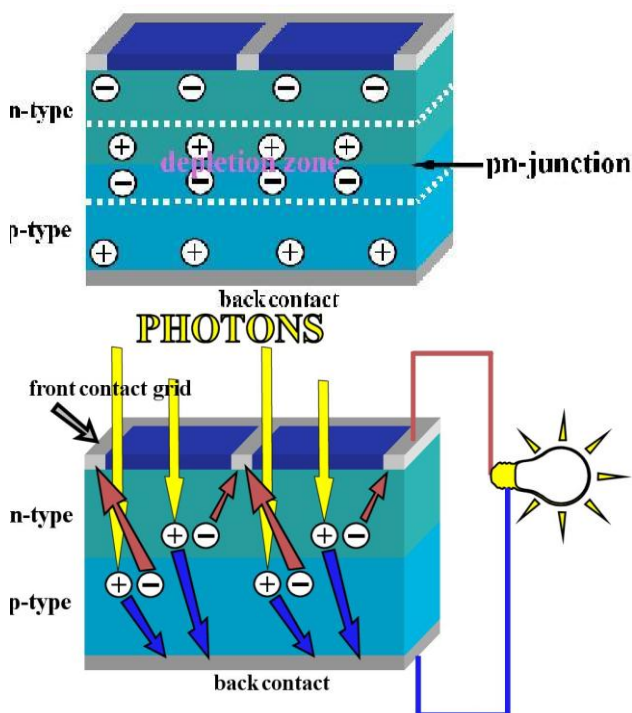
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1



ΦΒ στοιχεία, απόδοση και παράγοντες που την  
επηρεάζουν

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1 Τι είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο;



Εικόνα 1.1. Η επαφή pn σε ηρεμία και όταν φωτίζεται

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία σήμερα είναι στην ουσία δύο ημιαγωγικά στρώματα σε επαφή, τα οποία είναι τύπου p και τύπου n, και εξωτερικά αυτών τοποθετούνται ηλεκτρόδια.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν συνήθως τετραγωνική μορφή, ώστε η εσωτερική επαφή

των ημιαγωγών να καταλαμβάνει την όλη την επιφάνεια του πλακιδίου. Για να έχουμε μια συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) 17V με 22V συνδέουμε πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία μεταξύ τους σε σειρά και έτσι δημιουργούμε μια φωτοβολταϊκή διάταξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιλέγεται ώστε να ταιριάζει με την τάση φόρτισης ενός συσσωρευτή ( $Pb/H_2SO_4$ ) με ονομαστική τάση 12V.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια προσφέρουν την ανανεώσιμη ενέργεια από μια απεριόριστη πηγή ενέργειας, τον ίδιο τον ήλιο. Μία ερώτηση στην φωτοβολταϊκή βιομηχανία είναι πώς να επιτευχθούν χαμηλότερες δαπάνες χωρίς να επηρεαστεί η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων η οποία καθορίζει την ισχύ που δίνουν τα ΦΒ πλαίσια. Οι κατασκευαστικές εταιρίες για να αντιμετωπίσουν το προηγούμενο πρόβλημα αναπτύσσουν συνέχεια την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών κυψελών.

Πριν όμως ένα καινούργιο ΦΒ πλαίσιο εισαχθεί στην αγορά είναι σημαντικό από τους κατασκευαστές να μάθουν πόση ενέργεια παράγουν τα καινούργια πλαίσια σε

διαφορικές περιβαντολογικές συνθήκες και πώς διατηρούν την απόδοσή τους κατά την διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων.

Η θερμοκρασία είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (PV Module), η οποία εξαρτάται από την εισερχόμενη ακτινοβολία, από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος καθώς και από άλλους παράγοντες οι οποίοι αναλύονται στην συνέχεια.

Οι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών πλαισίων παρέχουν τις χαρακτηριστικές ποσότητες των πλαισίων ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $n$ ,  $I_{p_{max}}$ ,  $V_{p_{max}}$ ,  $P_{max}$ ) σε συγκεκριμένες συνθήκες (Standard Test Conditions) που για την θερμοκρασία είναι οι 25 βαθμοί Κελσίου. Σε πραγματικές συνθήκες είναι λογικό ότι η θερμοκρασία θα διαφέρει σημαντικά από την θερμοκρασία αναφοράς, π.χ. σε μια καλοκαιρινή ημέρα η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να φτάσει στους 50 βαθμούς Κελσίου και άνω ανάλογα με την στήριξη του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Στη αυτή την πτυχιακή εργασία ασχοληθήκαμε σε πρώτη φάση με την θεωρητική μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς φωτοβολταϊκών πλαισίων τόσο κρυσταλλικών, πολυκρυσταλλικών όσο και άμορφων. Η εξάρτηση της παραγόμενης ενέργειας από την εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια, τη γωνία πρόσπτωσης της απευθείας ακτινοβολίας, τη σκόνη και την θερμοκρασία του πλαισίου είναι κάποια θέματα τα οποία μελετήθηκαν. Επίσης μελετήθηκαν και χαρακτηριστικές ποσότητες όπως η τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ), το ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ) για να καθοριστεί πειραματικά η εξάρτησή τους από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και να συγκριθούν με τις αντίστοιχες του κατασκευαστή.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων πραγματοποιήσαμε μηχανικές και ηλεκτρονικές κατασκευές, οι οποίες περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια, που ήταν απαραίτητες για την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων.

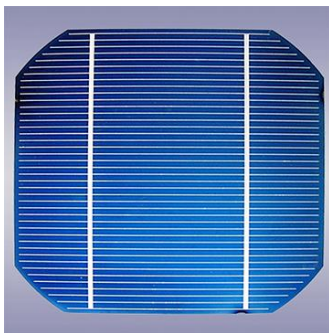
## 1.2 Τύποι Φωτοβολταϊκών Στοιχείων Πυριτίου

Σήμερα οι βιομηχανίες που παράγουν φωτοβολταϊκά πλαίσια χρησιμοποιούν το πυρίτιο ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών κυψελών. Το πυρίτιο προέρχεται από την άμμο η οποία όταν υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία τότε παράγεται το πυρίτιο που στην τελική του μορφή χαρακτηρίζεται από την υψηλή του καθαρότητα (99,99999%).

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες (τύπους) :

- i)** Πολυκρυσταλλικά (polycrystalline Silicon)
- ii)** Μονοκρυσταλλικά (single-crystal Silicon)
- iii)** Ταινίας (Ribbon Silicon), και τα
- iv)** Άμορφα (amorphous or thin film Silicon)

### 1.2.1 Πολυκρυσταλλικά Στοιχεία Πυριτίου (Multicrystalline Silicon mc-Si)



**Εικόνα 1.2.1.**  
**Πολυκρυσταλλικό στοιχείο**

Με αυτά τα στοιχεία έχουμε τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε μεγάλες επιφάνειες φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία κόβονται συνήθως σε μικρά τετράγωνα τα οποία συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους στο εσωτερικό του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

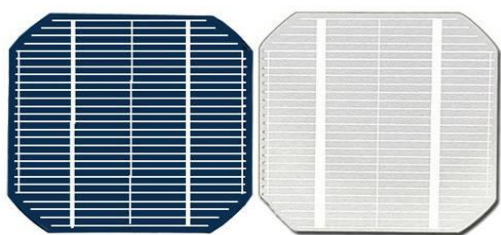
Αυτού του είδους τα στοιχεία αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα, πάχους 10  $\mu\text{m}$  έως 50  $\mu\text{m}$ . Στην επιφάνεια της πολυκρυσταλλικής κυψελίδας, διακρίνονται οι διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές στις οποίες τα όριά τους αποτελούν θέσεις παγίδευσης των φορέων, οπότε όσο μικρότερο είναι το συνολικό μήκος αυτών των ορίων τόσο καλύτερη θα είναι η αγωγιμότητά τους. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι το ορθογώνιο ή τετραγωνικό σχήμα που έχουν οι μονοκρυσταλλικές περιοχές έτσι ώστε να έχουμε καλύτερη χρησιμοποίηση της περιοχής ενότητας σε σύγκριση με τις στρογγυλές μονοκρυσταλλικές περιοχές.

Από τα προηγούμενα συμπεραίνουμε ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού ΦΒ στοιχείου, τόσο υψηλότερη είναι η απόδοσή του. Σε εργαστηριακής μορφής κυψελίδα η απόδοση

κυμαίνεται από 17% έως περίπου 20% ενώ σε βιομηχανικής μορφής ΦΒ πλαισίου από 10% έως και 14%.

Τα πολυκρυσταλλικά ΦΒ πλαίσια χαρακτηρίζονται από την υψηλή χρονική σταθερότητα που έχουν, το χαμηλό κόστος παραγωγής τους (χαμηλότερο από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο) και από το χρώμα τους το οποίο είναι γαλάζιο.

### 1.2.2 Μονοκρυσταλλικά Στοιχεία (Single-crystal Silicon)



Εικόνα 1.2.2. Μονοκρυσταλλικά στοιχεία

Το βασικό υλικό αυτών των στοιχείων είναι μονοκρυσταλλικό του οποίου το πάχος είναι περίπου 300μm. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από περίπου 21% έως περίπου 24% όταν έχουν μορφή κυψελίδας ενώ όταν

έχουν μορφή κυψελίδων η απόδοσή τους κυμαίνεται από 13% έως 16%.

Τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το υψηλό κόστος κατασκευής τους και το χρώμα τους είναι σκούρο μπλε.

### 1.2.3 ΦΒ Στοιχεία Ταινίας (Ribbon Silicon)

Τα ΦΒ στοιχεία ταινίας είναι στην ουσία μια λεπτή ταινία από τηγμένο υλικό το οποίο είναι πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με απόδοση 13%. Προς το παρόν το συγκεκριμένο είδος φωτοβολταϊκού στοιχείου έχει πολύ υψηλό κόστος κατασκευής και για το λόγο αυτό είναι περιορισμένης βιομηχανικής παραγωγής.

### 1.2.4 ΦΒ Στοιχεία Άμορφου πυριτίου (Amorphous Silicon)



Εικόνα 1.2.4. Στοιχείο a-Si

Πιο συγκεκριμένα για την δημιουργία αυτών των στοιχείων χρησιμοποιείται μία τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων η οποία έχει πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής λόγω της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού. Το λεπτό επίστρωμα σχηματίζεται πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους. Στα αρχικά

στάδια φωτισμού του συγκεκριμένου είδους φωτοβολταϊκών στοιχείων η απόδοσή τους μειώνεται πάρα πολύ από 6% έως 8%. Η απόδοσή τους πέφτει τον χειμώνα και



ανακτάται κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Το ενεργειακό χάσμα του άμορφου πυριτίου ταιριάζει καλύτερα στο ηλιακό φάσμα απ'ότι το ενεργειακό χάσμα του κρυσταλλικού πυριτίου.

Σήμερα η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων φωτοβολταϊκών στοιχείων με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος. Με σταθεροποιημένη απόδοση σε εργαστηριακές συνθήκες φτάνει στα 13%. Ένα χαρακτηριστικό τους είναι η δημιουργία διαδοχικών ΦΒ στοιχείων σε μεγάλες επιφάνειες ΦΒ πλαισίων οπότε τα καθιστά θελκτικά για εφαρμογές προσόψεων.

### **1.3 Απόδοση ΦΒ πλαισίων και παράγοντες που την επηρεάζουν**

#### **1.3.1 Γενικά για τον συντελεστή απόδοσης**

Ο συντελεστής απόδοσης ενός ΦΒ πλαισίου είναι το πηλίκο της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο, ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας  $G \cdot S$ .

$$\eta_m = \frac{P_m}{G \cdot S}$$

όπου  $P_m$  η αποδιδόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύς

$G$  η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου  
 $S$  το εμβαδόν του πλαισίου.

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής τους, τη θερμοκρασία των κυψελίδων και την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Άλλος παράγοντας είναι το φαινόμενο της θερμής κηλίδας σύμφωνα με το οποίο όταν μία κυψελίδα υποστεί βλάβη επιφέρει ολική αχρήστευση του φωτοβολταϊκού πλαισίου διότι η σκιασμένη κυψελίδα λειτουργεί όπως η απλή δίοδος p-n, η οποία όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τις άλλες μια υψηλή ανάστροφη τάση με αποτέλεσμα την καταστροφή της.

Άλλοι παράγοντες είναι η εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό των ΦΒ πλαισίων και οι συνακόλουθες αλλοιώσεις δομής της ΦΒ κυψελίδας, οι σκόνες και άλλα σώματα στην επιφάνεια όψης των πλαισίων.



### 1.3.2 Αναλυτική παρουσίαση παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση ΦΒ πλαισίων

#### ***i) Παράγοντας γήρανσης ΦΒ πλαισίου***

Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσης ΦΒ πλαισίου λόγω της γενικότερης αλλοίωσης της ΦΒ κυψελίδας η οποία οφείλετε κυρίως στην υπερθέρμανση κάποιων ΦΒ στοιχείων ή τμημάτων του πλαισίου. Η απόδοση του ΦΒ πλαισίου μειώνεται τυπικά 1% το χρόνο λόγω της γήρανσης του υλικού και για αυτό το λόγο οι εταιρίες δίνουν εγγύηση 25 χρόνων.

#### ***ii) Οπτικές ενεργειακές απώλειες***

Αυτές καθορίζονται από την απόκλιση της απόδοσης σε σχέση με αυτή των πρότυπων συνθηκών, λόγω των επόμενων αιτιών:

- **Διαφοροποίηση ανακλαστικότητας ΦΒ πλαισίου σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC.**

Δηλαδή η αύξηση της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στην επιφάνειά του. Σε γωνίες πρόσπτωσης πάνω από τις 60° έχουμε αυξημένη ανακλαστικότητα ενώ για μικρότερες γωνίες είναι η μεταβολή είναι ασήμαντη.

- **Επίδραση διαφοροποίησης φάσματος ακτινοβολίας σε σχέση με το AM1,5**  
Αφορούν στην επίδραση της διαφοροποίησης του φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας.

- **Απώλειες διαφοροποίησης της πόλωσης.**

Διαφοροποίηση της πόλωσης της προσπίπτουσας-διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας.

- **Επίδραση διαφοροποίησης φάσματος ακτινοβολίας σε σχέση με το AM1.5.**

Αφορά την επίδραση που έχει η διαφοροποίηση του AM κατά την διάρκεια της ημέρας σε σχέση με το AM1.5 των προτύπων συνθηκών.

- **Απώλειες διαφοροποίησης της πόλωσης.**

Διαφοροποίηση της πόλωσης της προσπίπτουσας-διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας. Η μέση ετήσια επίδραση του παράγοντα αυτού προσδιορίζεται σε ~2%.

- **Απώλειες χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.**  
Σε χαμηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται η απόδοση της φωτοβολταϊκής κυψελίδας και κυρίως σε ηλιακή ακτινοβολία κάτω της τιμής των 200W/m<sup>2</sup>. Οι συγκεκριμένες απώλειες υπολογίζονται σε 3% κατά μέσο όρο το έτος.
- **Καθαρότητα όψεως του ΦΒ πλαισίου.**  
Η καθαρότητα της γυάλινης επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι σημαντική διότι η επικάλυψη σκόνης και λοιπών άλλων σωματιδίων προκαλεί μείωση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

### **iii) Επίδραση θερμοκρασίας ΦΒ κυψελίδας**

Περιγράφει την διαφοροποίηση της απόδοσης του πλαισίου, λόγω της διαφοράς μεταξύ της θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψελίδας και της θερμοκρασίας της σε πρότυπες συνθήκες (STC). Ο παράγων θερμοκρασίας της φωτοβολταϊκής κυψελίδας περιγράφεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$n_T = 1 + \gamma_{P_m} \cdot (\theta_C - \theta_{STC})$$

Όπου  $\theta_C$  = θερμοκρασία κυψελίδας,

$\gamma_{P_m}$  = Θερμικός συντελεστής της απόδοσης

Για το πυρίτιο ο θερμικός συντελεστής είναι περίπου -0,0045/K στη περιοχή θερμοκρασιών κυψελίδας 20-60 °C. Αυτή η εξάρτηση της θερμοκρασίας της φωτοβολταϊκής κυψελίδας από τις συνθήκες περιβάλλοντος του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να δοθεί με μια πιο αναλυτική έκφραση η οποία είναι:

$$\theta_C = \theta_a + \frac{G_t}{G_{STC}} \cdot (T_1 \cdot e^{B \cdot ws} + T_2 + \Delta\theta)$$

Όπου  $\theta_a$  = θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα

$G_t$  = πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου,

$B$  = εμπειρικός συντελεστής

$ws$  = ταχύτητα ανέμου,

$T_1$  και  $T_2$  = εμπειρικοί συντελεστές που προσδιορίζονται με βάση τις οριακές τιμές της θερμοκρασίας κυψελίδας σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμου,

$\Delta\theta$  = η διαφορά θερμοκρασιών κυψελίδας και της πίσω επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

#### **iv) Συντελεστής απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής, $n_D$ .**

Είναι ένας συντελεστής ο οποίος εκφράζει τις απώλειες ενέργειας στη δίοδο αντεπιστροφής οι οποίες εκτιμώνται σε ~1% άρα ο συντελεστής απωλειών είναι  $n_D = 0.99$ .

### **1.4 Συγκριτικά στοιχεία και επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτά**

Τα ηλεκτρικά στοιχεία που θα τεθούν υπό σύγκριση είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ , η τιμή του ρεύματος του πλαισίου  $I_m$ , η τάση  $V_m$  στο σημείο μέγιστης ισχύος και η μέγιστη ισχύς του,  $P_m$ . Τα ηλεκτρικά στοιχεία αυτά θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα που δίνει ο κατασκευαστής σε πρότυπες συνθήκες (STC).

#### **1.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού στοιχείου**

Η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια στην κυψελίδα και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της. Σε συνθήκες χρήσης στο ύπαιθρο, όπου το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ενσωματωμένο σε ΦΒ πλαίσιο, η διαφορά θερμοκρασιών λειτουργίας της κυψελίδας και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντα αέρα αυξάνεται γραμμικά, ως συνάρτηση της πυκνότητας της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή:

$$\frac{\theta_C - \theta_a}{G} = 30^\circ C / \left( \frac{kW}{m^2} \right)$$

Όπου  $\theta_C$  = θερμοκρασία λειτουργίας κυψελίδας

$\theta_a$  = θερμοκρασία περιβάλλοντα αέρα

$G$  = πυκνότητα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας

Εφόσον μεταβάλλεται λοιπόν αυτή η διαφορά, μεταβάλλονται το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ . Γενικά παρατηρείται μια σταθερή ποσοστιαία αύξηση του  $I_{sc}$  από τους  $-10^\circ C$  έως τους  $60^\circ C$  της θερμοκρασίας της φωτοβολταϊκής κυψελίδας. Αυτή η αύξηση αποδίδεται ως εξής:

$$I_{sc} = \frac{E}{E_{STC}} \cdot I_{sc,STC} \cdot (1 + \alpha_{I_{sc}} \cdot (\theta_C - \theta_{STC}))$$

Όπου  $a_{I_{sc}} = \frac{dI_{sc}}{I_{sc}dT}$  = θερμικός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης του

φωτοβολταϊκού στοιχείου,

$I_{sc,STC}$  = η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε STC,

$E$  = η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας,

$E_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$

$T = 273 + \theta$ .

Από τον προηγούμενο τύπο βλέπουμε ότι έχουμε αναλογική εξάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης από την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας. Ο συντελεστής  $a_{I_{sc}}$  έχει τιμές στο διάστημα  $0.0001 \div 0.001K^{-1}$ , με τιμή αναφοράς  $a_{I_{sc}} = 0.0005K^{-1}$ . Η τάση ανοικτού κυκλώματος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της κυψελίδας. Αυτή την εξάρτηση την βλέπουμε αναλυτικά στην παρακάτω έκφραση:

$$V_{oc} = V_{oc,STC} \cdot \left(1 + \beta_{V_{oc}} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})\right) \cdot \left(1 + \delta(\theta_c) \cdot \ln\left(\frac{E}{E_{STC}}\right)\right)$$

Όπου  $V_{oc,STC}$  = τάση ανοικτού κυκλώματος σε STC,

$\delta(\theta_c)$  = διορθωτικός παράγοντας της εξάρτησης της  $V_{oc}$  από την  $E$ ,

$\beta_{V_{oc}} = \frac{dV_{oc}}{V_{oc}dT}$  = θερμικός συντελεστής τάσης ανοικτού κυκλώματος του

φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Το  $\beta_{V_{oc}}$  έχει τιμές στο διάστημα  $-0.003 \div -0.005K^{-1}$  με τιμή αναφοράς  $\beta_{V_{oc}} = -0.004K^{-1}$ .

Αυτή η ελάττωση οφείλεται στην εξάρτηση του ρεύματος κόρου της διόδου από τη θερμοκρασία.

Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν αυτό λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_m = V_m \cdot I_m \approx \frac{E}{E_{STC}} \cdot P_P \cdot \left(1 + \gamma_{P_m} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})\right)$$

Όπου  $\gamma_{P_m} = \frac{dP}{P_m dT}$  = θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού

στοιχείου,

$P_p = V_{m,STC} \cdot I_{m,STC} =$  μέγιστη ηλεκτρική ισχύς σε πρότυπες συνθήκες.

Ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος είναι προσεγγιστικά ίσος με  $\gamma_{P_m} \approx -0.0045K^{-1}$  για το c-Si.

Επομένως, ο παράγων θερμότητας που καθορίζει την επίδραση της θερμοκρασίας στην τιμή της ισχύς αιχμής και στο συντελεστή απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου δίνεται ως εξής:

$$n_T = 1 + \gamma_{P_m} \cdot (\theta_C - \theta_{STC})$$

Όπως βλέπουμε από τον παραπάνω τύπο η ισχύς αιχμής και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου εμφανίζουν γραμμική εξάρτηση από τη θερμοκρασία.

#### 1.4.2 Εξάρτηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του πλαισίου από την θερμοκρασία κυψελίδας

Οι σχέσεις των  $I_{SC}$  και  $V_{OC}$  που προαναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.3.1 οι οποίες περιγράφουν την εξάρτηση αυτών των στοιχείων από τη θερμοκρασία της φωτοβολταϊκής κυψελίδας ισχύουν και στην περίπτωση του φωτοβολταϊκού πλαισίου με τη διαφορά όμως ότι η  $V_{OC}$  προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους τάσεων των στοιχείων που βρίσκονται συνδεδεμένα σε σειρά.

Οι σχέσεις που περιγράφουν την εξάρτηση του ρεύματος και της τάσεως του φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν αυτό λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος του είναι οι εξής:

$$I_m(\theta_C, E) = \frac{E}{E_{STC}} \cdot I_{m,STC} \cdot (1 + a_{I_m} \cdot (\theta_C - \theta_{STC})) + C_0$$

$$V_m = V_{m,STC} \cdot (1 + \beta_{V_m} \cdot (\theta_C - \theta_{STC})) + C_1 \cdot \ln\left(\frac{E}{E_{STC}}\right) + C_2 \cdot \left(\ln\left(\frac{E}{E_{STC}}\right)\right)^2$$

Όπου  $a_{I_m}$  = θερμικός συντελεστής ρεύματος στην κατάσταση του σημείου λειτουργίας,

$\beta_{V_m}$  = θερμικός συντελεστής τάσης στην κατάσταση του σημείου λειτουργίας,

$I_{m,STC}$  = ρεύμα σε πρότυπες συνθήκες,

$V_{m,STC}$  = τάση σε πρότυπες συνθήκες,

$C_0, C_1, C_2$  = εμπειρικοί συντελεστές προσαρμογής στα πειραματικά δεδομένα.

Οι θερμικοί συντελεστές της τάσης και του ρεύματος εξαρτώνται από το υλικό των φωτοβολταϊκών στοιχείων, από τη θερμοκρασία και από την πυκνότητα ισχύος. Η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο υπολογίζεται σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις ως εξής:

$$P_m(\theta_C, E) = I_m(\theta_C, E) \cdot V_m(\theta_C, E)$$

Η ισχύς αυτή στην περίπτωση του c-Si (κρυσταλλικό πυρίτιο) περιγράφεται από τη σχέση:

$$P_m(\theta_C, E) = \frac{E}{E_{STC}} \cdot P_P \{1 + \gamma_{P_m} \cdot (\theta_C - \theta_{STC})\}$$

Όπου  $\gamma_{P_m}$  είναι ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία της φωτοβολταϊκής κυψελίδας, το υλικό της και την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



## 1.5 Η καμπύλη I-V

Μελετώντας τις εξισώσεις μεταφοράς των φορέων φορτίου στην περιοχή μετάβασης, ο αποκαλούμενος ιδανικός νόμος της διόδου μπορεί να εξαχθεί για μια επαφή pn στο σκοτάδι, όταν κανένα φορτίο δεν παράγεται από το φως του ήλιου. Αυτός ο νόμος γράφεται ως εξής:

$$I = I_0 (e^{qV/kBT} - 1), \quad (1.5.1)$$

Όπου  $I$  = ρεύμα της διόδου

$I_0$  = ρεύμα κορεσμού

$q$  = στοιχειώδες φορτίο

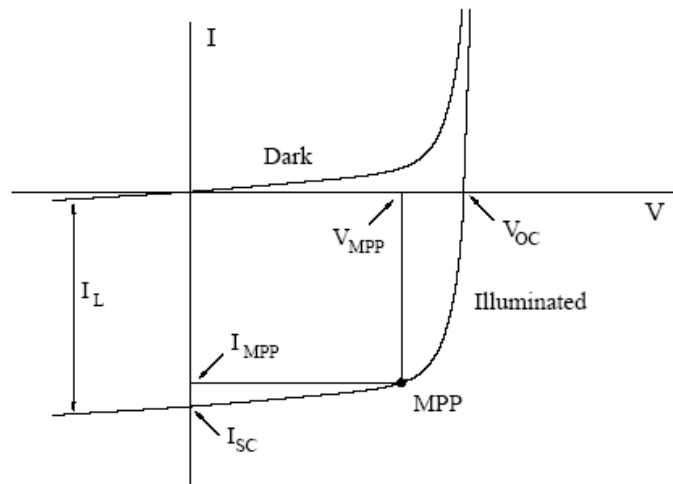
$V$  = η τάση της διόδου

$T$  = θερμοκρασία

Όταν ο φωτισμός λαμβάνεται υπόψη, η εξίσωση τροποποιείται ως εξής:

$$I = I_0 (e^{qV/kBT} - 1) - I_L, \quad (1.5.2)$$

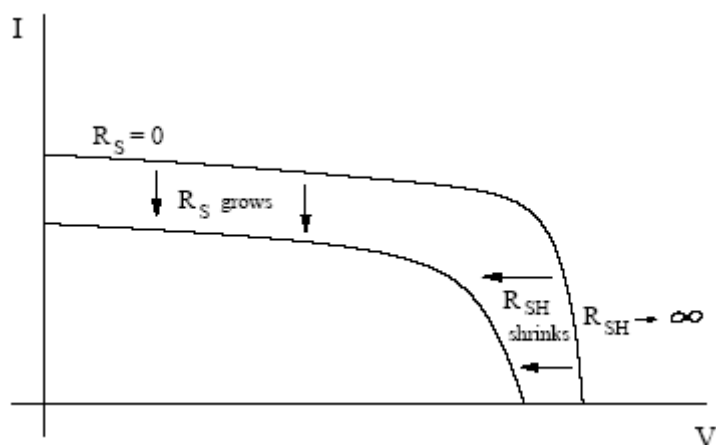
Όπου  $I_L$  = το φωτο-παραγόμενο ρεύμα. Η παραπάνω εξίσωση καθορίζει την σχέση ρεύματος-τάσης μιας ιδανικής φωτοβολταϊκής κυψελίδας με σειριακή αντίσταση (Series resistance)  $R_s = 0$  και  $R_{SH} \rightarrow \infty$  (Shunt resistance). Τις χαρακτηριστικές I-V που αντιστοιχούν στις εξισώσεις (1.5.1) και (1.5.2) τις βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα:



**Εικόνα 1.5.1.** Η χαρακτηριστική IV μιας φωτισμένης επαφής pn είναι στην ουσία η σκοτεινή καμπύλη IV που μετατοπίζεται προς τα κάτω από το ρεύμα  $I_L$ . Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$  και το ρεύμα βραχυκύκλωσης βρίσκονται εκεί όπου η καμπύλη εφάπτεται με τους άξονες. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εξαχθεί από το ΦΒ στοιχείο βρίσκεται στο σημείο  $(V_{MPP}, I_{MPP})$ .

Βλέπουμε από την παραπάνω εικόνα ότι η σκοτεινή χαρακτηριστική της διόδου βρίσκεται στο πρώτο και στο τρίτο τεταρτημόριο, ενώ η καμπύλη IV μιας φωτισμένης διόδου, η οποία αντιπροσωπεύει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο σε λειτουργία, περνάει από το τέταρτο τεταρτημόριο. Αυτό το τεταρτημόριο, όπου το ρεύμα είναι αρνητικό και η τάση θετική, είναι το τεταρτημόριο όπου το φωτοβολταϊκό στοιχείο παράγει ισχύ. Τέσσερις σημαντικές παράμετροι έχουν χαρακτηριστεί στην παραπάνω εικόνα. Το ρεύμα σε μηδενική τάση καλείται **ρεύμα βραχυκύκλωσης** ( $I_{SC}$ ), ενώ η τάση σε μηδενικό ρεύμα καλείται **τάση ανοικτού κυκλώματος** ( $V_{OC}$ ). Το σημείο στην χαρακτηριστική IV όπου η παραγόμενη ισχύς είναι στο μέγιστο δεν είναι κανένα από αυτά τα σημεία, αλλά είναι μάλλον κάπου στο τόξο. Αυτό το σημείο ονομάζεται **σημείο μέγιστης ισχύος**. Οι αντίστοιχες τιμές του ρεύματος και της τάσης καλούνται σημείο μέγιστης ισχύος ρεύματος ( $I_{MPP}$ ) και μέγιστης ισχύος τάσης ( $V_{MPP}$ ). Δεδομένου ότι μόνο το μέρος της χαρακτηριστικής IV που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο είναι σχετικό για εφαρμογές με φωτοβολταϊκά στοιχεία, η καμπύλη IV είναι αντιστραμμένη ως προς άξονα της τάσης και κομμένη και στους δύο άξονες, έτσι ώστε και το ρεύμα και η τάση να έχουν μόνο θετικές τιμές.

Η καμπύλη IV, σε ένα κανονικό φωτοβολταϊκό στοιχείο με  $R_S$  και αντιστάσεις shunt  $R_{SH}$ , μετατοπίζεται πιο κοντά στους άξονες του ρεύματος και της τάσης. Μεγάλες τιμές  $R_S$  προκαλούν μείωση του ρεύματος, ενώ οι μικρές τιμές  $R_{SH}$  μειώνουν την τάση όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Μηχανισμοί απωλειών είναι επίσης υπεύθυνοι που η καμπύλη IV γίνεται πιο επίπεδη, και ο αποκαλούμενος **παράγων πλήρωσης** ( $FF$ ) είναι ένα μέτρο προσέγγισης αυτής. Ορίζεται ως:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

Ο παράγων πλήρωσης αντιστοιχεί στην αναλογία μεταξύ της παραχθείσας ισχύος και της ισχύος σε μια ιδανική περίπτωση όπου η καμπύλη IV έχει ορθογώνια μορφή χωρίς απώλειες. Ο **παράγων πλήρωσης, η απόδοση και οι παράμετροι της καμπύλης IV** είναι πολύ σημαντικοί στη μελέτη των φωτοβολταϊκών, διότι οι τιμές τους μας αποκαλύπτουν το πόσο καλά λειτουργεί ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Η καμπύλη IV ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου<sup>1</sup> είναι όμοια με αυτή ενός μόνο ΦΒ στοιχείου, αλλά συνήθως είναι πιο επίπεδη λόγω απωλειών. Το σημείο της καμπύλης IV που πρέπει να λειτουργεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος ( $MPP$ ). Σε πρακτικές εφαρμογές, το σημείο λειτουργίας καθορίζεται από το φορτίο στο κύκλωμα, παραδείγματος χάριν από την μπαταρία που φορτίζεται.

---

<sup>1</sup> Το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει γενικά μία περιοχή γύρω στα 100 cm<sup>2</sup> ή λιγότερο. Ένα ΦΒ πλαίσιο, από την άλλη μεριά, περιέχει πολλά ΦΒ στοιχεία. Δεδομένου ότι τα ΦΒ στοιχεία συνδέονται σε σειρά, η απόδοση του πλαισίου καθορίζεται από το χειρότερο στοιχείο του πλαισίου, και επομένως η απόδοση είναι χαμηλότερη από την μέση απόδοση των ΦΒ στοιχείων.

## 1.6 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standart Test Conditions, STC) των χαρακτηριστικών των ΦΒ στοιχείων. Η έννοια της ισχύος αιχμής.

Τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ελέγχονται σε ένα εργαστηριακά παρασκευασμένο ΦΒ στοιχείο καθώς επίσης και στο τελικά διατιθέμενο βιομηχανικό προϊόν (φωτοβολταϊκό πλαίσιο), είναι:

- i.** η ενεργειακή απόδοση **n**,
- ii.** ο παράγων πλήρωσης **FF**,
- iii.** το ρεύμα βραχυκύκλωσης **I<sub>SC</sub>**,
- iv.** και η τάση ανοικτού κυκλώματος **V<sub>OC</sub>**,

σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού (πυκνότητα ισχύος και φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας) και θερμοκρασίας του στοιχείου. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών μεγεθών επιτρέπει τον έλεγχο της αποδοτικότητας του φωτοβολταϊκού στοιχείου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, που να αντιπροσωπεύουν τυπικές καταστάσεις εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό, καθορίστηκαν διεθνώς, οι ακόλουθες **πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standard Test Conditions, STC)** των χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου.

<b>ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ</b>	
<b>Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας</b>	<b>1 kW/m<sup>2</sup></b>
<b>Ηλιακό φάσμα</b>	<b>AM1.5</b>
<b>Θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου</b>	<b>25°C ± 2°C</b>

Στα ειδικά εργαστήρια ελέγχου και πιστοποίησης των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ο χώρος ελέγχου βρίσκεται στην προκαθορισμένη θερμοκρασία των 25°C. Το φάσμα εκπομπής της χρησιμοποιούμενης πηγής φωτισμού, προσομοιάζει προς το ηλιακό, του συγκεκριμένου φάσματος (AM1.5). Η πηγή αυτή λειτουργεί στιγμιαία, ώστε η θερμοκρασία του υλικού του ΦΒ στοιχείου να παραμένει στα προκαθορισμένα όρια των προτύπων συνθηκών. Επιπλέον, η ακτινοβολία από την τεχνητή πηγή προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην πράξη, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, ενσωματωμένα στη μονάδα που ονομάζεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο, λειτουργούν κάτω από φυσικό ηλιακό φως, του οποίου τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της

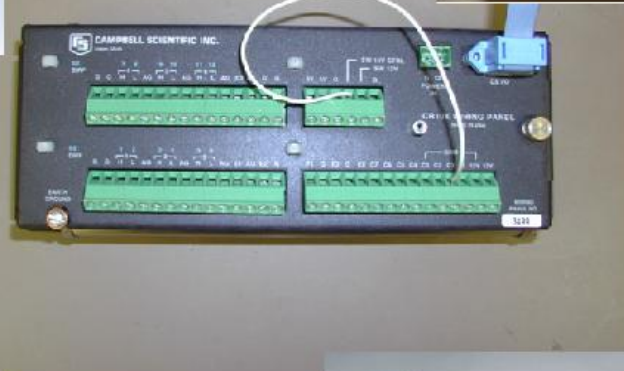
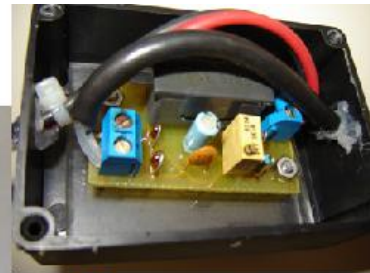
ημέρας καθ' όλο το έτος και η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και από τις ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες του τόπου εγκατάστασης. Σε μερικά εργαστήρια, πραγματοποιούνται μετρήσεις χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων-πλασιών χρησιμοποιώντας φυσικό ηλιακό φως με τα χαρακτηριστικά των πρότυπων συνθηκών.

Με βάση τις πρότυπες συνθήκες, εισάγεται η έννοια της ισχύος αιχμής ( $P_p$ ), ως χαρακτηριστικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου, η δε μονάδα της στο SI είναι  $W_p$ .

**Ισχύς αιχμής** ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που μπορεί να αποδώσει, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC).

Η έννοια αυτή χρησιμοποιείται ομοίως, για το χαρακτηρισμό ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Αποτελεί το χαρακτηριστικό στοιχείο με βάση το οποίο προσδιορίζεται το μέγεθος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2



## Πειραματικός Εξοπλισμός



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Πειραματικός εξοπλισμός

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια αναφορά στον εξοπλισμό, στα πλαίσια και στις λοιπές κατασκευές που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των μετρήσεων. Θα γίνει αναφορά στα χαρακτηριστικά των πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις καθώς επίσης αναφορά στις συνθήκες μέτρησης αυτών.

#### 2.1 Πολύμετρα

Κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήσαμε πολύμετρα της METEX και συγκεκριμένα το μοντέλο M-4650 (B) για να μετρήσουμε ρεύματα και τάσεις, καθώς και για να βρούμε διάφορες βλάβες που εμφανίστηκαν σε όργανα κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Τα γενικά χαρακτηριστικά αυτού του πολυμέτρου είναι τα ακόλουθα:

- ❖ **Max Display** : 19999 counts (4½ digit) with automatic polarity indication.
- ❖ **Max Input Current of AC & DC** : 20A (Max 15 minutes)
- ❖ **Reading Time** : 1-2 readings per second
- ❖ **Operating Temperature** : 0°C to 40°C
- ❖ **Storage Temperature** : -10°C to 50°C
- ❖ **Temperature for Guaranteed Accuracy** : +23°C ± 5°C
- ❖ **Battery Type** : NEDA 1604 9V or 6F22 9V
- ❖ **Size (H x W x L cm)** : 3.6 x 9.0 x 17.6
- ❖ **Net Weight** : 380g ± 10g (Incl 9V Battery)  
400g ± 10g (for bar models)
- ❖ **Accessories supplied** : Operating Manual, a pair of test lead, spare fuse, 9V battery.



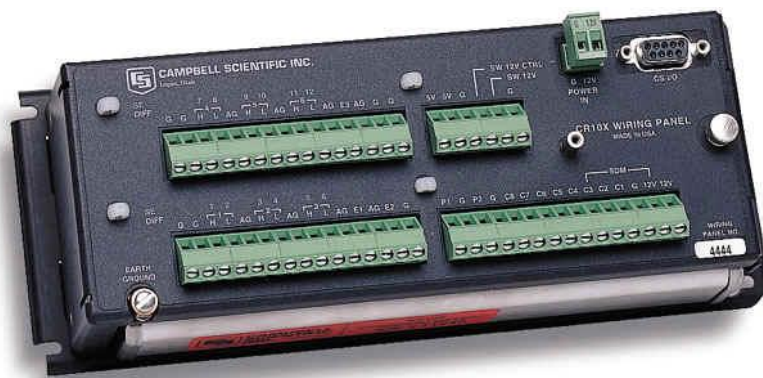
Εικόνα 2.1. Πολύμετρο M-4650

Ακολουθεί ένας πίνακας με τα ειδικά χαρακτηριστικά της σειράς πολυμέτρων METEX M-4600 :

SPECIAL CHARACTERISTICS					
	FUNCTION	RANGE	ACCURACY	RESOLUTION	
<b>M-4600 (B) SERIES</b>	<b>DC VOLTAGE</b>	200mV 2V 20V 200V	$\pm 0.05\%$ of rdg + 3 dgt	10 $\mu$ V 100 $\mu$ V 1mV 10mV 100mV	
		1000V	$\pm 0.1$ of rdg + 5 dgt		
	<b>AC VOLTAGE</b>	200mV 2V 20V 200V	$\pm 0.5\%$ of rdg + 10 dgt	10 $\mu$ V 100 $\mu$ V 1mV 10mV 100mV	
		750V	$\pm 0.8$ of rdg + 10 dgt		
	<b>DC CURRENT</b>	200 $\mu$ A 2mA *20mA	$\pm 0.3$ of rdg + 3 dgt	10nA 100nA 1 $\mu$ A	
		200mA *2A	$\pm 0.5$ of rdg + 3 dgt	10 $\mu$ A 100 $\mu$ A	
		20A	$\pm 0.8$ of rdg + 5 dgt	1mA	
	<b>AC CURRENT</b>	*200 $\mu$ A 2mA *20mA	$\pm 0.8$ of rdg + 10 dgt	10nA 100nA 1 $\mu$ A	
		200mA *2A	$\pm 1.0$ of rdg + 10 dgt	10 $\mu$ A 100 $\mu$ A	
		20A	$\pm 1.2$ of rdg + 15 dgt	1mA	
	<b>RESISTANCE</b>	200 $\Omega$	$\pm 2.0$ of rdg + 10 dgt	0.01 $\Omega$	
		2K $\Omega$ 20K $\Omega$ 200K $\Omega$ 2M $\Omega$	$\pm 0.15$ of rdg + 3 dgt	0.1 $\Omega$ 1 $\Omega$ 10 $\Omega$ 100 $\Omega$	
			2M $\Omega$	$\pm 0.5$ of rdg + 5 dgt	1K $\Omega$
	<b>M-4630 (B)</b>	<b>CAPACITANCE</b>	2000pF 20nF 200nF	$\pm 2.0$ of rdg + 20 dgt	0.1pF 1pF 10pF
2 $\mu$ F 20 $\mu$ F			$\pm 3.0$ of rdg + 30 dgt	100pF 1nF	
<b>M-4650 (B)</b>	<b>FREQUENCY</b>	20KHz 200KHz	$\pm 2.0$ of rdg + 5 dgt	1Hz 10Hz	
	<b>CAPACITANCE</b>	2000pF 200nF	$\pm 2.0$ of rdg + 20 dgt	0.1pF 10pF	
		20 $\mu$ F	$\pm 3.0$ of rdg + 20 dgt	1nF	

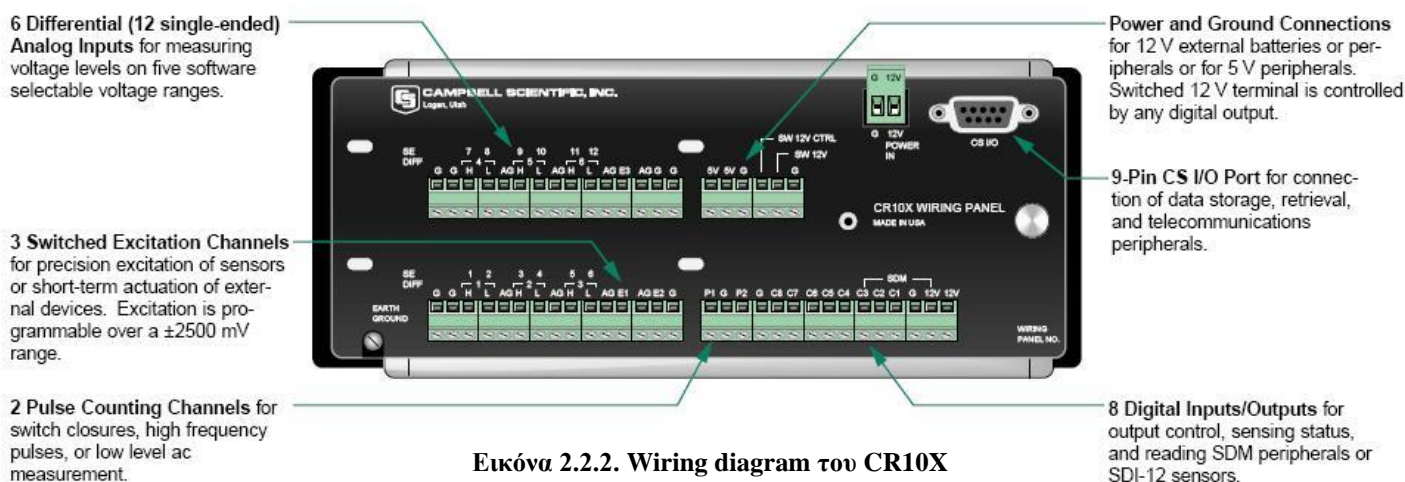
## 2.2 Logger CR10X της CAMPBELL SCIENTIFIC Inc.

Για την καταγραφή μετρήσεων χρησιμοποιήσαμε ένα logger και συγκεκριμένα τον CR10X της Campbell Scientific Inc..



Εικόνα 2.2.1. Logger CR10X της Campbell Scientific

Ο CR10X είναι ένας πλήρως προγραμματιζόμενος datalogger/controller με εσωτερική μνήμη, ρολόι και μπαταρία. Ο συνδυασμός αξιοπιστίας, μεταβλητότητας και της υποστήριξης επικοινωνίας με υπολογιστή το καθιστούν ιδανική επιλογή για παρόμοιες εφαρμογές. Ακολουθεί μια εικόνα με το wiring diagram του CR10X.



Εικόνα 2.2.2. Wiring diagram του CR10X

Όπως βλέπουμε από την παραπάνω εικόνα ο logger αποτελείται από:

- 6 διαφορικά κανάλια ή 12 αναλογικά για τη μέτρηση μέχρι και πέντε επιπέδων τάσης τα οποία έχουν οριστεί από το λογισμικό.
- 3 διακοπτόμενα κανάλια διέγερσης για την ακριβή διέγερση αισθητήρων.

- 2 κανάλια μέτρησης παλμών για μέτρηση παλμών υψηλής συχνότητας ή για μέτρηση χαμηλού επιπέδου εναλλασσομένου ρεύματος.
- Συνδέσεις τροφοδοσίας και γείωσης για εξωτερικές μπαταρίες ή περιφερειακά ή για 5V περιφερειακά.
- 9Pin σειριακή θύρα σύνδεσης για την αποθήκευση ή ανάκτηση δεδομένων.
- 8 ψηφιακά κανάλια Inputs/Outputs.

## **2.3 Αντιστάσεις SHUNT**



60mV – 40A.

Οι αντιστάσεις shunt είναι ειδικές αντιστάσεις χαμηλής αντίστασης που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση εναλλασσομένων ή συνεχών ηλεκτρικών ρευμάτων. Τοποθετείται σε σειρά. Για την μέτρηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης συνδέσαμε στον logger μια αντίσταση shunt

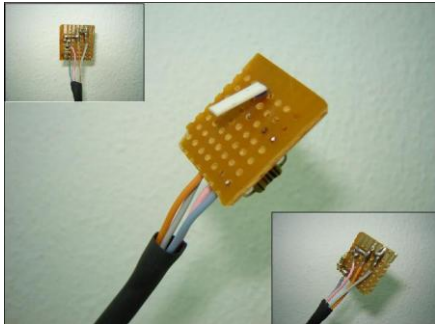
## **2.4 Αισθητήρες θερμοκρασίας**

### **2.4.1 Thermistor PT100**

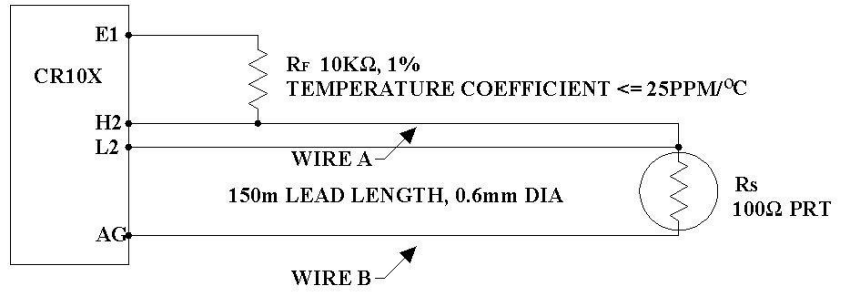


Το PT100 είναι ο πιο κοινός τύπος αισθητήρα θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία. Έχει αντίσταση γύρω στα 100 Ω στους 0°C και είναι κατασκευασμένο από λευκόχρυσο. Υπάρχουν ακόμα δύο είδη PT100, το ένα που δίνει 138.5 Ω στους 100°C και το άλλο που δίνει 139 Ω στους 100°C. Οι αισθητήρες PT100 αρχικά κατασκευάζονταν από καλώδιο λευκόχρυσου το οποίο τυλιγόταν πάνω σε ένα κεραμικό υλικό, τώρα όμως κατασκευάζονται πιο φτηνά με την εναπόθεση μιας ταινίας λευκόχρυσου πάνω σε ένα κεραμικό υπόστρωμα.

Το κύκλωμα που κατασκευάσαμε για αυτόν τον αισθητήρα καθώς και την σύνδεσή του με τον datalogger CR10X τα βλέπουμε στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.4.1.1. Η πλακέτα με το PT100



Εικόνα 2.4.1.2. Το κυκλωματικό διάγραμμα της πλακέτας

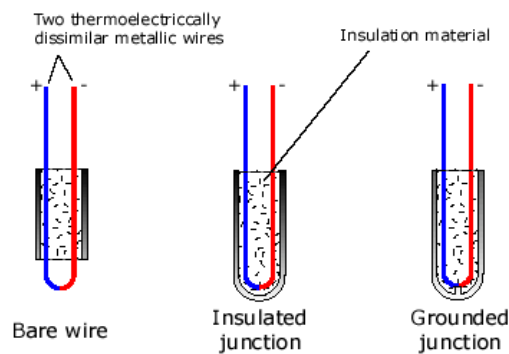
Η τάση διέγερσης υπολογίζεται έτσι ώστε να είναι η μέγιστη δυνατή. Η αντίσταση 10KΩ έχει μια ανοχή 1%, η μικρότερη αντίσταση που δεχόμαστε είναι 9.9KΩ. Υπολογίζουμε την μέγιστη τάση διέγερσης ( $V_x$ ) για να κρατήσουμε την πτώση τάσης στο PRT λιγότερο από 25mV:

$$0.025V > V_x \cdot 115.54 / (9900 + 115.54) \Rightarrow V_x < 2.17V$$

Η χρησιμοποιούμενη τάση διέγερσης επομένως είναι 2.1V.

### 2.4.2 Θερμοζεύγη τύπου T

Ένα **θερμοζεύγος** αποτελείται από δύο αγωγούς από διαφορετικά μέταλλα ή κράματα μετάλλων. Όταν δυο διαφορετικά μέταλλα έρθουν σε επαφή αναπτύσσεται μεταξύ τους μια διαφορά δυναμικού E(Seebeck) που εξαρτάται από την θερμοκρασία T και το είδος των μετάλλων. Για μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας  $\Delta T$  ισχύει ο τύπος  $E = \alpha \Delta T$ , όπου  $\alpha$  ο συντελεστής Seebeck σε  $\mu V/^\circ C$ .



Εικόνα 2.4.2.1. Θερμοζεύγιοι τύπου T

Πίνακας μετάλλων και κραμάτων για κατασκευή θερμοζεύγων (αλφαβητική σειρά)		
Μέταλλο /Κράμα	Σύσταση	Συνδυάζεται με
Alumel	95% Ni, 2% Mn, 2% Al	Chromel
Chromel	90% Ni, 10% Cr	Alumel, Constantan
Constantan	55% Cu, 45% Ni	Fe, Cu, Chromel
Κράμα Βολφραμίου - Ρηνίου	74% W, 26% Re / 95% W, 5% Re / 97% W, 3% Re	W
Κράμα Λευκόχρυσου – Ροδίου	70% Pt, 30% Rh / 87% Pt, 13% Rh / 90% Pt, 10% Rh / 94% Pt, 6% Rh	Pt

Τυποποιημένα θερμοζεύγη που υπάρχουν στο εμπόριο (αλφαβητική σειρά)			
Τύπος	Αποτελείται από	Θερμοκρασία λειτουργίας	Συντελεστής(Seebeck) / θερμοκρασία
B	(94%Pt / 6%Rh)(+) / (70%Pt / 30%Rh)(-)	0 - 1820 °C	6.0 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
C	(95%W / 5%Re)(+) / (74%W / 26%Re)(-)	0 - 2320 °C	19.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
D	(97%W / 3%Re)(+) / (75%W / 25%Re)(-)	0 - 2320 °C	19.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
E	Chromel(+)/ Constantan(-)	270 - 1000 °C	58.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 0 °C
G	W(+)/ (74%W / 26%Re)(-)	0 - 2320 °C	19.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
J	Fe(+)/ Constantan(-)	210 - 760 °C	50.2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 0 °C
K	Chromel(+)/ Alumel(-)	270 - 1370 °C	39.4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 0 °C
R	(87%Pt / 13%Rh)(+) / Pt(-)	50 - 1768 °C	11.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
S	(90%Pt / 10%Rh)(+) / Pt(-)	50 - 1768 °C	10.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 600 °C
T	Cu(+)/ Constantan(-)	270 - 400 °C	38.0 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ / 0 °C

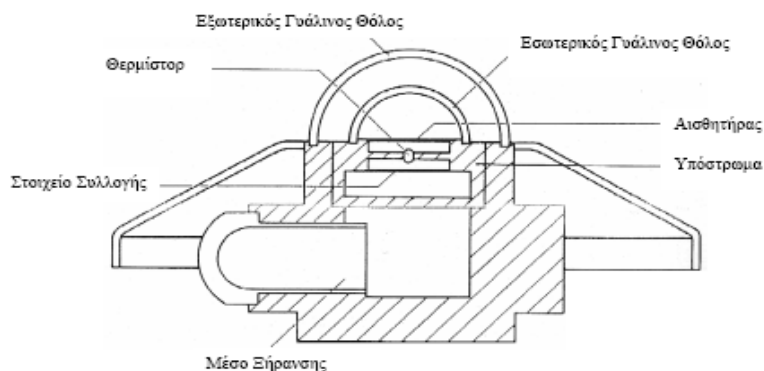
Η μέτρηση της θερμοκρασίας με το θερμοζεύγος γίνεται βάζοντας το στη περιοχή ή το σώμα που θέλουμε και μετράμε την τάση στα άκρα του. Οι επαφή των αγωγών της συσκευής μέτρησης της τάσης με τους αγωγούς του θερμοζεύγους δημιουργεί επιπλέον δυναμικά επαφής E. Για να αυξήσουμε την ευαισθησία συνήθως συνδέουμε πολλά θερμοζεύγη σε σειρά.



## 2.5 Αισθητήρες μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας



Για τη μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο των πλαισίων χρησιμοποιήσαμε ένα πυρανόμετρο. Είναι ένας τύπος ακτινομέτρου με ένα θερμικό ανιχνευτή. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Όπως φαίνεται από το σχήμα το πυρανόμετρο έχει μια αισθητήρια κεραμική επιφάνεια. Εκατό θερμοζεύγη που σχηματίζουν μια θερμοστήλη (thermopile) είναι αποτυπωμένα επάνω σε αυτήν. Μόνο το μπροστινό μέρος του δίσκου είναι σε καλή θερμική επαφή με το κυρίως σώμα του πυρανομέτρου και κατά μήκος αυτού του άκρου βρίσκονται 100 “ κρύες “ ενώσεις. Οι 100 θερμές ενώσεις βρίσκονται στο μέσο σε μια κυκλική συμμετρική διάταξη. Όταν το πυρανόμετρο εκτίθεται στον ήλιο η ακτινοβολία που απορροφάται, θερμαίνει το μπροστινό μέρος του αισθητήρα. Η θερμοκρασία στο κέντρο του δίσκου θα ανυψωθεί λόγω της θερμικής του αντίστασης. Η θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος της θερμικής αντίστασης μετατρέπεται σε μια διαφορά δυναμικού.



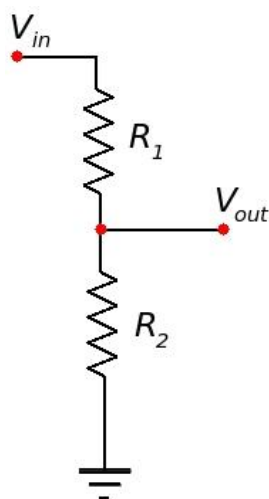
Η θερμοκρασία είναι άμεσα εξαρτώμενη από τον αέρα, τη βροχόπτωση και τις απώλειες ηλιακής ακτινοβολίας στο περιβάλλον. Έτσι, ο αισθητήρας είναι προφυλαγμένος μέσω δύο γυάλινων θόλων. Οι γυάλινοι θόλοι επιτρέπουν ισόποση μεταφορά της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο. Χρησιμοποιείται στη μετεωρολογία, κλιματολογία και σε όλες τις εφαρμογές που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία.

Το συγκεκριμένο πυρανόμετρο είναι της Kipp&Zonen τύπου CM11. Τα συγκεκριμένα έχουν ευαισθησία από 7 έως 14  $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$  και χρόνο απόκρισης στο 95% 5s. Επίσης έχουν εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας  $-40^\circ\text{C}$  έως  $80^\circ\text{C}$ , μέγιστη ακτινοβολία  $4.000 \text{ W}/\text{m}^2$  και οπτική γωνία  $180^\circ$ .

## 2.6 Διαιρετής τάσης

Ο Διαιρέτης Τάσης ή Διαιρέτης Δυναμικού είναι μία απλή κυκλωματική διάταξη η οποία αποτελείται από δύο αντιστάσεις συνδεδεμένες εν σειρά, στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η τάση εισόδου. Ως τάση εξόδου λαμβάνεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της μίας εκ των δύο αντιστάσεων. Οι τιμές που μπορεί να πάρει η τάση εξόδου κυμαίνονται από το 0 έως την τάση εισόδου.

Η ανάλυση του κυκλώματος ενός διαιρέτη τάσης είναι αρκετά απλή. Σύμφωνα με την θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα των δύο αντιστάσεων εν σειρά προκύπτει από τη διαίρεση της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του κυκλώματος προς το άθροισμα των τιμών των εν σειρά αντιστάσεων. Η τάση εξόδου είναι ουσιαστικά η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της δεύτερης αντίστασης. Η τάση αυτή μπορεί να βρεθεί εάν πολλαπλασιάσουμε το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση επί την τιμή της. Ο συλλογισμός αυτός μπορεί να δοθεί μαθηματικά με τους ακόλουθους τύπους:



$$\text{Ρεύμα κυκλώματος: } I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Τάση εξόδου: } V_{out} = I \cdot R = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in}$$

Εικόνα 2.6.1. Το κυκλωματικό διάγραμμα ενός διαιρέτη τάσης:

$V_{in}$ : Τάση εισόδου

$V_{out}$ : Τάση εξόδου

$R_1, R_2$ : Ηλεκτρικές αντιστάσεις

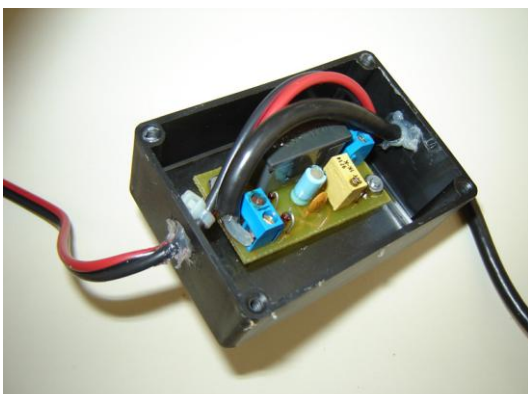
Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει πως, με κατάλληλη εκλογή των ηλεκτρικών αντιστάσεων του κυκλώματος, μπορούμε να πάρουμε στην έξοδο οποιαδήποτε τιμή τάσης ανάμεσα στο 0 και την τάση εισόδου.

Στην περίπτωση που η αντίσταση  $R_1$  είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την  $R_2$ , η τάση στην έξοδο θα είναι περίπου ίση με την τάση εισόδου. Επίσης, στην περίπτωση που η αντίσταση  $R_2$  είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την  $R_1$ , η τάση εξόδου θα πλησιάζει το 0. Τέλος, εάν θεωρήσουμε ότι οι δύο αντιστάσεις είναι ίσες ( $R_1 = R_2$ ), τότε η τάση εξόδου θα είναι ακριβώς το μισό της τάσης εισόδου.

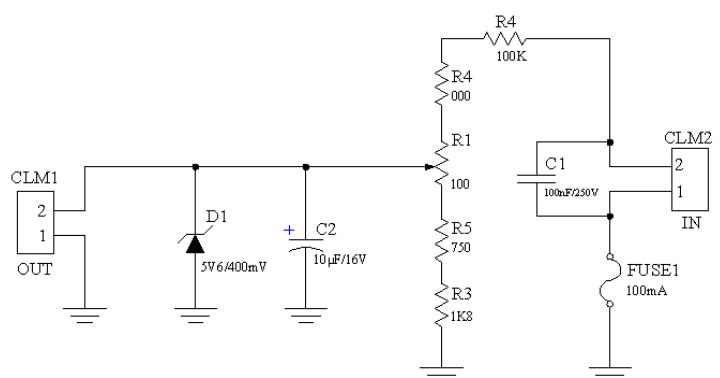
Εάν θέλουμε να προσθέσουμε φορτίο στο διαιρέτη τάσης, τότε αντί της αντίστασης  $R_2$  θα πρέπει να εισάγουμε στους τύπους τον παράλληλο συνδυασμό της αντίστασης  $R_2$  και της αντίστασης  $R_{in}$ , όπου η δεύτερη είναι η αντίσταση εισόδου του κυκλώματος που έχουμε θεωρήσει ως φορτίο.

Ο διαιρέτης τάσης χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να προσαρμόσουμε την τάση εισόδου μιας διάταξης (π.χ. μιας ενισχυτικής διάταξης) ή ενός ηλεκτρονικού εξαρτήματος (π.χ. ενός τρανζίστορ) έτσι ώστε να τροφοδοτήσουμε το κύκλωμα είτε με τάση που βρίσκεται μέσα στα όρια ασφαλούς λειτουργίας του ή με τάση που θα μας δώσει μια επιθυμητή τάση εξόδου και τον επιθυμητό συντελεστή απολαβής.

Στην περίπτωσή μας χρησιμοποιήσαμε ένα διαιρέτη τάσης για να προστατέψουμε την είσοδο του datalogger με τον οποίο θα μετράγαμε την τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$  των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι εισοδοί του datalogger μπορούν δεχτούν μία τάση μέχρι 2.5V, εφόσον λοιπόν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που χρησιμοποιήσαμε έβγαζαν τάση άνω των 2.5V, χρησιμοποιήσαμε ένα διαιρέτη και τον ρυθμίσαμε να έχει κλίμακα 1÷10. Έτσι ο datalogger κατέγραφε μετρήσεις μέχρι 2V. Ακολουθούν δύο εικόνες με το διαιρέτη που χρησιμοποιήσαμε.



Εικόνα 2.6.2. Η πλακέτα του διαιρέτη



Εικόνα 2.6.3. Το κύκλωμα του διαιρέτη

Όπως βλέπουμε στο σχηματικό ο διαιρέτης αποτελείται από μία δίοδο zener για την προστασία της εισόδου του datalogger, από τέσσερις αντιστάσεις εκ των οποίων η μία είναι ένα ποτενσιόμετρο καθέτου άξονα έτσι ώστε να μπορούμε να το ρυθμίζουμε στην κλίμακα που θέλουμε και δύο πυκνωτές για ελάττωση θορύβου.

## 2.7 IV Tracer

Για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός ΦΒ πλαισίου υπό πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιήσαμε ένα IV tracer ο οποίος καταγράφει τη χαρακτηριστική IV και υπολογίζει τη μέγιστη ισχύ, την τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$  και το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$  του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Ο IV tracer που χρησιμοποιήσαμε είναι μια κατασκευή του Φωτοβολταϊκού Πάρκου. Πριν τη χρησιμοποίηση του δοκιμάστηκε και βαθμονομήθηκε έτσι ώστε να καταγράφονται οι σωστές τιμές.



Εικόνα 2.7.1. Ο IV Tracer

## 2.8 Πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήσαμε διάφορα είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων (a-Si, mc-Si, pc-Si) από διάφορες εταιρίες κατασκευής φωτοβολταϊκών πλαισίων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε πλαίσια από τις εταιρίες **KYOCERA, SCHOTT SOLAR, SIEMENS** και **ARCO SOLAR**.

Οι εταιρίες κατασκευής, καθώς και τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή την πτυχιακή εργασία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

COMPANIES	MODELS
KYOCERA	LA361J48
SCHOTT SOLAR	ASE 50 ETF/17
SIEMENS	SM55
ARCO SOLAR	G50
	G408
	M25
	M55

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια εκτός από την διαφορά που είχαν στην ισχύ, είχαν και διαφορά στη ηλικία. Όπως προείπαμε ο ρυθμός γήρανσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι ~1% κατ' έτος χρήσης.

### 2.8.1 SCHOTT SOLAR - ASE 50 ETF/17



Το συγκεκριμένο πλαίσιο το οποίο αναπτύσσεται από την SCHOTT SOLAR ανταποκρίνεται στα πιο πρόσφατα τεχνικά πρότυπα. Η χρήση τελευταίας τεχνολογίας υλικών εξασφαλίζει μεγάλη διάρκεια ζωής, ακόμα και υπό ακραίες κλιματολογικές συνθήκες.

Το πλαίσιο είναι εύκολο στο χειρισμό, γερό και είναι κατάλληλο για μια ευρεία σειρά εφαρμογών. Οι διαστάσεις του είναι **975mm x 452mm** προβλέπουν την απλή επέκταση υπαρχόντων ΦΒ συστημάτων. Το ΦΒ πλαίσιο παραδίδεται με ένα πλαίσιο από αλουμίνιο το οποίο έχει και τέσσερις τρύπες για την εύκολη τοποθέτηση του.

Το ΦΒ πλαίσιο έχει κατασκευαστεί με την τεχνολογία EFG που είναι μία ευρεσιτεχνία της Schott Solar η οποία προβλέπει την οικονομική παραγωγή wafers και τη μικρή κατανάλωση πρώτων υλών.

Ακολουθεί ένας πίνακας με τα χαρακτηριστικά του **ASE 50 ETF/17** τα οποία δίνει ο κατασκευαστής :

<b>ASE-50-ETF/17</b>	
<b>Ppeak</b>	<b>50</b>
<b>Isc</b>	<b>3.2</b>
<b>Voc</b>	<b>20</b>
<b>Imp</b>	<b>2.9</b>
<b>Vmp</b>	<b>17.2</b>
<b>alsc (% / C)</b>	<b>0.1</b>
<b>aVoc (% / C)</b>	<b>-0.38</b>
<b>γPower (% / C)</b>	<b>-0.47</b>
<b>Length (mm)-Width (mm)-Depth (mm)</b>	<b>975x452x34,5</b>

### 2.8.2 SIEMENS SM55



Κατασκευασμένα σύμφωνα με τα πιο αυστηρά ποιοτικά πρότυπα, τα ΦΒ πλαίσια της Siemens είναι σχεδιασμένα να αντέχουν στις πιο σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες και χαρακτηρίζονται από μεγάλο χρόνο ζωής τους.

Η τεχνολογία PowerMax® Siemens βελτιστοποιεί την ενεργειακή παραγωγή των μεμονωμένων κυψελών και των ηλιακών πλαισίων για όλους τους τύπους περιβαλλοντικών συνθηκών. Η διαδικασία βελτιστοποίησης PowerMax® περιλαμβάνει μία ειδική τεχνική καθαρισμού και φινιρίσματος του πυριτίου, ένα καθαρό δωμάτιο βαθμονομημένο για διαδικασία παραγωγής ημιαγωγών και μια διαδικασία διαμόρφωσης μιας πολυεπίπεδη επιφάνειας πυραμιδοειδούς υφής γνωστή και ως TOPS™ (Texture Optimized Pyramidal Surface). Η διαδικασία TOPS™ ενσωματώνει το σχηματισμό των κατασκευασμένων πυραμίδων στην επιφάνεια της ΦΒ κυψελίδας. Η διαδικασία TOPS™ μεγιστοποιεί επίσης την απορρόφηση φωτονίων από το άμεσο και το διάχυτο φως. Αυτό σημαίνει ότι η απορρόφηση φωτός είναι υψηλή ακόμα και σε χαμηλά επίπεδα φωτισμού. Οι ΦΒ κυψέλες Siemens PowerMax® αποδίδουν την μέγιστη ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Ακολουθεί ένας πίνακας με τα χαρακτηριστικά που δίνει ο κατασκευαστής:

<b>SIEMENS SM55</b>	
<b>P<sub>max</sub> (W<sub>p</sub>)</b>	<b>55</b>
<b>I<sub>sc</sub> (A)</b>	<b>3.45</b>
<b>V<sub>oc</sub> (V)</b>	<b>21.7</b>
<b>I<sub>mp</sub> (A)</b>	<b>3.15</b>
<b>V<sub>mp</sub> (V)</b>	<b>17.4</b>
<b>aI<sub>sc</sub> (mA/°C)</b>	<b>1.4</b>
<b>aV<sub>oc</sub> (V / °C)</b>	<b>-0.077</b>
<b>Length (mm)-Width (mm)-Depth (mm)</b>	<b>1293x329x34</b>

### 2.8.3 ARCO M25, M55

Τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια χρησιμοποιούν μονοκρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου υψηλής απόδοσης τα οποία είναι τοποθετημένα σε στρώματα πάνω σε ένα γυαλί. Οι κυψέλες και το γυαλί είναι αντιανακλαστικά και είναι επικαλυμμένα για την βέλτιστη αποδοτικότητα. Όλο αυτό το πακέτο είναι τοποθετημένο σε στρώματα και έχει τοποθετηθεί σε ένα μεταλλικό πλαίσιο. Το M25 είναι εξοπλισμένο με ένα καλώδιο δύο αγωγών για τη διασύνδεσή του και αποτελείται από 30 ΦΒ στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά.

Αυτό το πλαίσιο έχει σχεδιαστεί για την άμεση σύνδεση μπαταριών. Προορίζεται για εκείνους που χρειάζονται ηλεκτρική ενέργεια, κυρίως για φωτισμό, οικιακές συσκευές, και σε άλλες συσκευές σε οχήματα και πλοία. Το ΦΒ πλαίσιο παρέχει τάση κατάλληλη για συστήματα που λειτουργούν στα 12V.

Το M55 έχει 36 ΦΒ στοιχεία σε σειρά και είναι κατάλληλο για όλες τις ηλιακές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της φόρτισης μπαταριών σε ζεστά κλίματα, την άμεση σύνδεση με μια DC μηχανή και τη λειτουργία με ένα ελεγκτή σημείου μέγιστης ισχύος. Για φορτίσει ένα M55 μία μπαταρία απαιτείται ένας ρυθμιστής τάσης.

Ακολουθούν δύο πίνακες με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις του M25 και του M55 όπως τα δίνει ο κατασκευαστής:

<b>ARCO M25</b>	
<b>P<sub>peak</sub> (W<sub>p</sub>)</b>	<b>22</b>
<b>I<sub>sc</sub> (A)</b>	<b>1.65</b>
<b>V<sub>oc</sub> (V)</b>	<b>18.2</b>
<b>I<sub>mp</sub> (A)</b>	<b>1.5</b>
<b>V<sub>mp</sub> (V)</b>	<b>14.6</b>
<b>Length (mm)-Width (mm)- Depth (mm)</b>	<b>569x330x36</b>

**Πίνακας 2.8.3.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις του M25**

<b>ARCO M55</b>	
<b>P<sub>peak</sub> (W<sub>p</sub>)</b>	<b>55</b>
<b>I<sub>sc</sub> (A)</b>	<b>3.29</b>
<b>V<sub>oc</sub> (V)</b>	<b>24</b>
<b>I<sub>mp</sub> (A)</b>	<b>3.13</b>
<b>V<sub>mp</sub> (W)</b>	<b>17.6</b>
<b>Length (mm)-Width (mm)- Depth (mm)</b>	<b>1293x330x36</b>

**Πίνακας 2.8.3.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις του M55**

#### **2.8.4 ARCO G408,G50**

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια G408 είναι κατασκευασμένα από στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ποικίλα συστήματα όπως φόρτιση μπαταριών και για τροφοδοσία DC μηχανής. Όταν χρησιμοποιείται σαν φορτιστής μπαταριών μαζί με ένα ρυθμιστή τάσης πρέπει τα πλαίσια που είναι συνδεδεμένα σε σειρά να δίνουν 12V για να φορτίσουν μια μπαταρία 12V.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια G50 είναι και αυτά φτιαγμένα από στοιχεία άμορφου πυριτίου. Είναι αποτέλεσμα πολλών ετών έρευνας, μηχανικής και δοκιμών χρησιμοποιώντας σύγχρονες (τότε) τεχνολογίες για thin film στοιχεία. Τα G50 είναι σχεδιασμένα για την ασφαλή λειτουργία μόνο σε συστήματα 12V.

Ακολουθούν δύο πίνακες με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του G408 και του G50 όπως τα δίνει ο κατασκευαστής:



<b>ARCO G408</b>	
<b>P<sub>peak</sub> (W<sub>p</sub>)</b>	<b>21</b>
<b>I<sub>sc</sub> (A)</b>	<b>1.8</b>
<b>V<sub>oc</sub> (V)</b>	<b>23</b>
<b>I<sub>mp</sub> (A)</b>	<b>1.36</b>
<b>V<sub>mp</sub> (V)</b>	<b>15.5</b>
<b>Length (mm)-Width (mm)- Depth (mm)</b>	<b>1321x366x23</b>

**Πίνακας 2.8.4.1** Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις του G408

<b>ARCO G50</b>	
<b>P<sub>peak</sub> (W<sub>p</sub>)</b>	<b>2.5</b>
<b>I<sub>mp</sub> (A)</b>	<b>0.17</b>
<b>V<sub>mp</sub> (V)</b>	<b>14.5</b>
<b>Length (mm)-Width (mm)- Depth (mm)</b>	<b>252x260x10</b>

**Πίνακας 2.8.4.2** Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις του G50

### **2.8.5 KYOCERA LA361J48**

Το KYOCERA LA361J48 είναι κατασκευασμένο από πολυκρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου (pc-Si). Ακολουθεί ένας πίνακας με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του LA361J48:

<b>KYOCERA LA361J48</b>	
<b>P<sub>peak</sub> (W)</b>	<b>48 ± 5%</b>
<b>I<sub>sc</sub> (A)</b>	<b>3.1</b>
<b>V<sub>oc</sub> (V)</b>	<b>20.7</b>
<b>I<sub>mp</sub> (A)</b>	<b>2.88</b>
<b>V<sub>mp</sub> (V)</b>	<b>16.7</b>
<b>Length (mm)-Width (mm)-Depth (mm)</b>	<b>985x445x50</b>

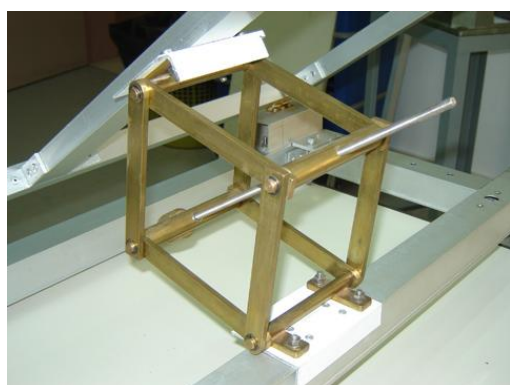
## 2.9 Φορητή βάση στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων

Για τη δική μας ευκολία κατασκευάσαμε μία φορητή βάση στήριξης φωτοβολταϊκών πλαισίων από αλουμίνιο με διαστάσεις **84.5cm x 57.5cm**. Για να ρυθμίζουμε την κλίση εύκολα τοποθετήσαμε ένα γρύλο και για να το ρυθμίζουμε σε οριζόντια θέση τοποθετήσαμε σε κάθε γωνία μια ντίζα. Επίσης έχει και υποδοχή για ένα πυρανόμετρο για να μετράμε την ακτινοβολία στο επίπεδο του πλαισίου.

Αυτή η κατασκευή μας βοήθησε σε εξωτερικές μετρήσεις που πήραμε όπως στο Αστεροσκοπείο Σκίνακα και σε ένα πιο χαμηλό υψόμετρο στις Δαφνές Ηρακλείου. Ακολουθούν μερικές φωτογραφίες της κατασκευής.



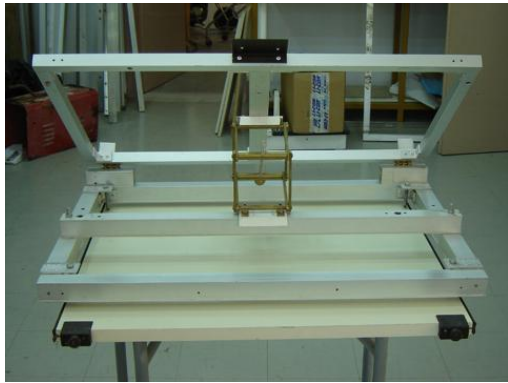
Εικόνα 2.7.5.1 Η βάση με το πυρανόμετρο και ένα ΦΒ πλαίσιο πάνω της



Εικόνα 2.7.5.2 Ο γρύλος για την ρύθμιση της κλίσης



Εικόνα 2.7.5.3 Η βάση σε πλάγια όψη

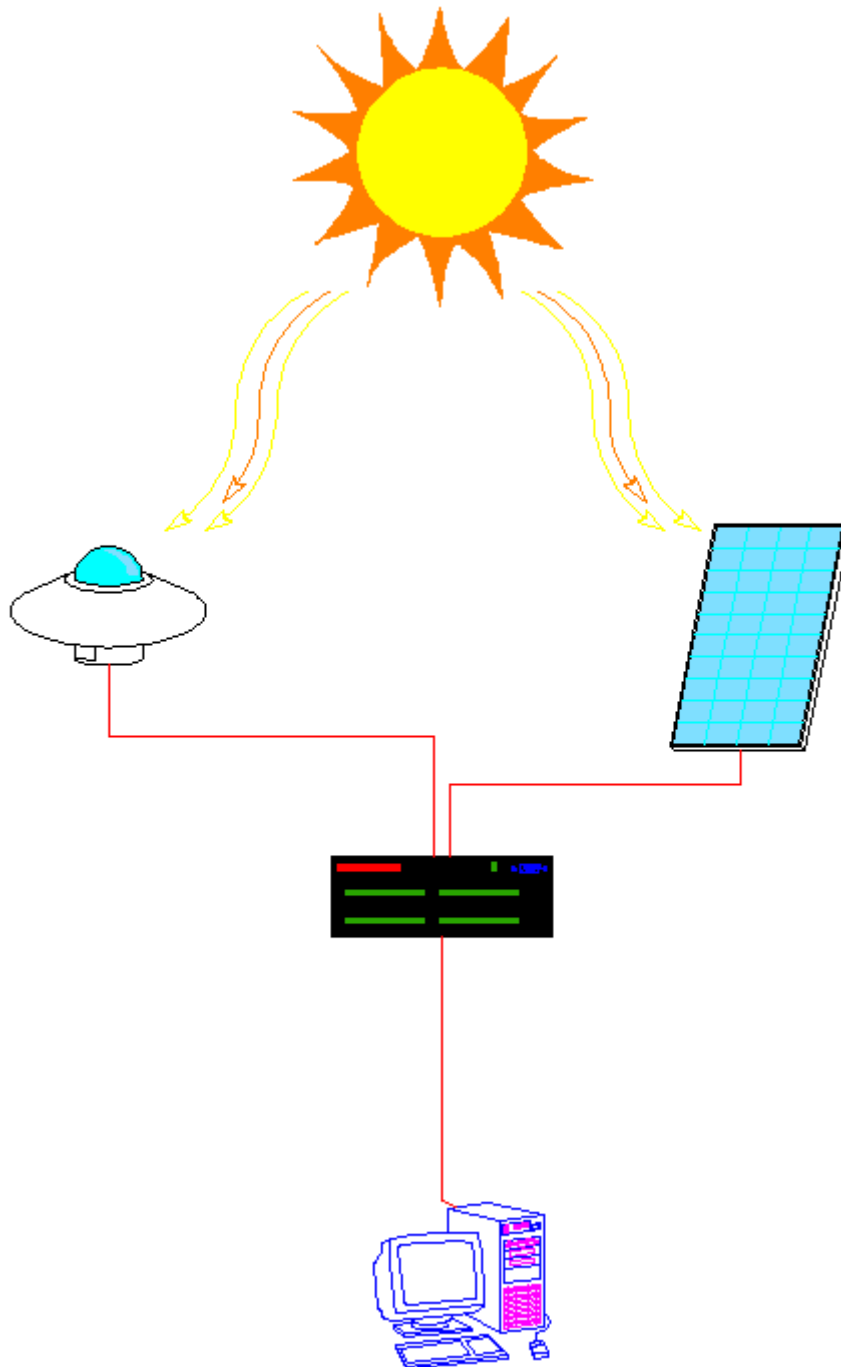


**Εικόνα 2.7.5.4 Η βάση σε πίσω όψη**



**Εικόνα 2.7.5.5 Η πρόσοψη της βάσης**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3



Λήψη και επεξεργασία μετρήσεων

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Μετρήσεις

#### 3.1 Συνθήκες μέτρησης

Για να έχουμε όσον το δυνατόν καλύτερες και αξιόπιστες μετρήσεις, η λήψη των μετρήσεων γινόταν με καθαρό ουρανό και όχι σε πολύ υψηλή ταχύτητα ανέμου και αυτό διότι τα πλαίσια θα ψύχονταν συνέχεια και δεν θα είχαμε σταθερή άνοδο της θερμοκρασίας από του 25°C έως και τους 55°C περίπου. Οι μετρήσεις λήφθηκαν σε πραγματικές συνθήκες και σε διάφορα airmass, από AM1.5 μέχρι και AM1.038. Επίσης ληφθήκανε μετρήσεις, άλλες σε διαφορετικά υψόμετρα και άλλες με σκονισμένα πλαίσια έτσι ώστε να δούμε το πόσο η σκόνη και γενικά η μη καθαρότητα της γυάλινης επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου επηρεάζει την απόδοσή του.



**Εικόνα 3.1.1** Επικάθιση σκόνης (2 μηνών) και άλλων σωματιδίων πάνω σε ΦΒ πλαίσια

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας του πλαισίου χρησιμοποιήσαμε θερμοζεύγη τύπου T τα οποία τα τοποθετήσαμε στην πίσω μεριά του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σημείο όπου είναι το κέντρο του φωτοβολταϊκού στοιχείου από την πίσω μεριά. Τα θερμομέτρα συνδέθηκαν με τον datalogger CR10X σε συγκεκριμένες θύρες. Επίσης φτιάξαμε και μία μικρή πλακέτα με ένα Thermistor PT100 το οποίο το συνδέσαμε στον datalogger και το χρησιμοποιήσαμε σαν τιμή reference για τα υπόλοιπα θερμομέτρα. Η σύνδεση του PT100 στον datalogger έγινε σε συγκεκριμένες θύρες τις



οποίας μας τις υποδείκνυε το wiring diagram του προγράμματος που φτιάξαμε. Συνολικά δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά προγράμματα για τρεις διαφορετικούς μετρήσεων, ένα για μέτρηση με IV Tracer, ένα για μέτρηση με αντίσταση SHUNT και ένα με διαιρέτη τάσης. Οι τρόποι που προαναφέρθηκαν θα αναλυθούν στην συνέχεια του κεφαλαίου μαζί με τις μετρήσεις που ελήφθησαν. Τα προγράμματα δημιουργήθηκαν με την βοήθεια του προγράμματος SCWin 1.2a το οποίο είναι ένα λογισμικό που συνεργάζεται με τον datalogger CR10X. Η επικοινωνία υπολογιστή – datalogger γίνεται μέσω σειριακής σύνδεσης και μεταξύ καλωδίου και datalogger μπαίνει ένα εξάρτημα της Campbell Scientific, το SC32A, το οποίο είναι στην ουσία μία οπτικά απομονωμένη RS232.

Για την μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου χρησιμοποιήσαμε ένα πυρανόμετρο το οποίο συνδέθηκε και αυτό στον datalogger.



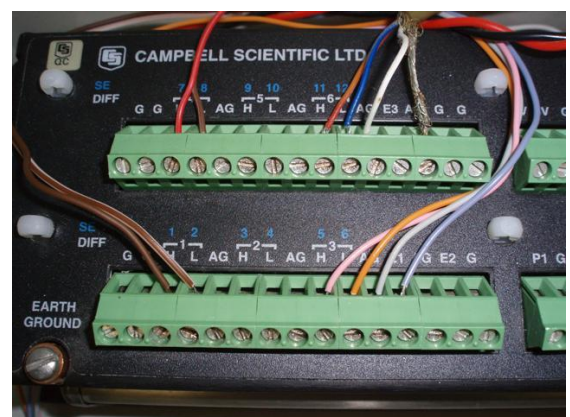
Εικόνα 3.1.2 Ο datalogger συνδεδεμένος με τη shunt



Εικόνα 3.1.3 Ο datalogger συνδεδεμένος με διαιρέτη



Εικόνα 3.1.4 Η οπτικά απομονωμένη RS232, η SC32A



Εικόνα 3.1.5 Συνδεσμολογία PT100, Thermocouple, πυρανόμετρου, SHUNT και διαιρέτη

## 3.2 Τρόποι μέτρησης

Όπως είπαμε στην προηγούμενη παράγραφο οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικές συνθήκες και με καθαρό ουρανό. Χρησιμοποιήσαμε τρεις διαφορετικούς τρόπους μετρήσεων, ένα για να μετρήσουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$ , ένα για την τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$  και ένα για την ισχύ. Από αυτά βρήκαμε επίσης και τους θερμικούς συντελεστές ρεύματος βραχυκύκλωσης, τάσης ανοικτού κυκλώματος, μέγιστης ισχύος  $\alpha I_{SC}$ ,  $\beta V_{OC}$ ,  $\gamma P_{MAX}$  αντίστοιχα όπως επίσης και το ρεύμα  $I_m$  και την τάση  $V_m$ . Στη συνέχεια οι τιμές αυτές ανάγονται σε τιμές STC και κατόπιν υπολογίζουμε το βαθμό απόδοσης του κάθε πλαισίου (Performance Ratio, PR).

### 3.2.1 Μέτρηση ρεύματος βραχυκύκλωσης με την βοήθεια αντίστασης

#### Shunt

Όπως προείπαμε στο κεφάλαιο 1, το ρεύμα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία επηρεάζεται από το φάσμα του Ήλιου, το οποίο μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, και από την θερμοκρασία που αναπτύσσεται πάνω σε αυτά. Από τον παρακάτω τύπο βλέπουμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και είναι, επίσης, ανάλογο της πυκνότητας ισχύος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας:

$$I_{SC} = \frac{E}{E_{STC}} \cdot I_{SC,STC} \cdot (1 + a_{I_{SC}} \cdot (\theta_c - \theta_{STC}))$$

Όπου  $a_{I_{SC}}$ : ο θερμικός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης του ΦΒ στοιχείου

$I_{SC,STC}$ : η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης στις πρότυπες συνθήκες

$E$ : η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας

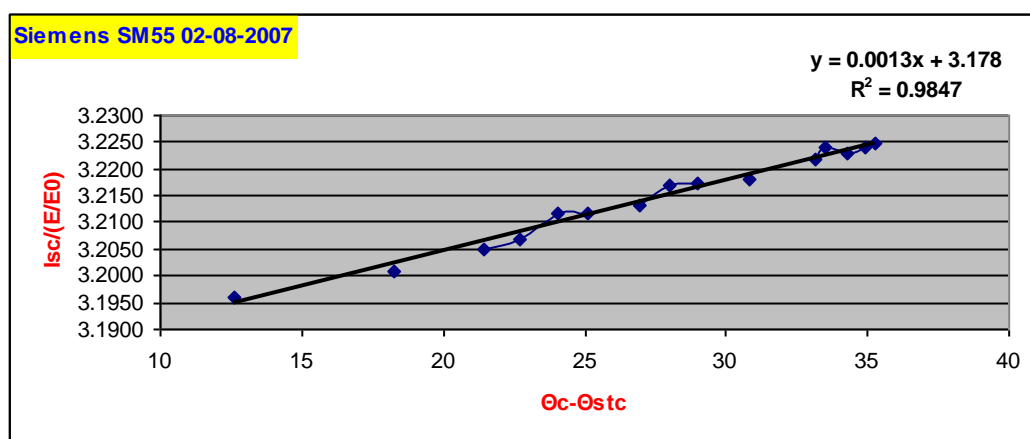
$E_{STC}$ : η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες  $1.000\text{W/m}^2$

$\theta_c$ : η θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου και

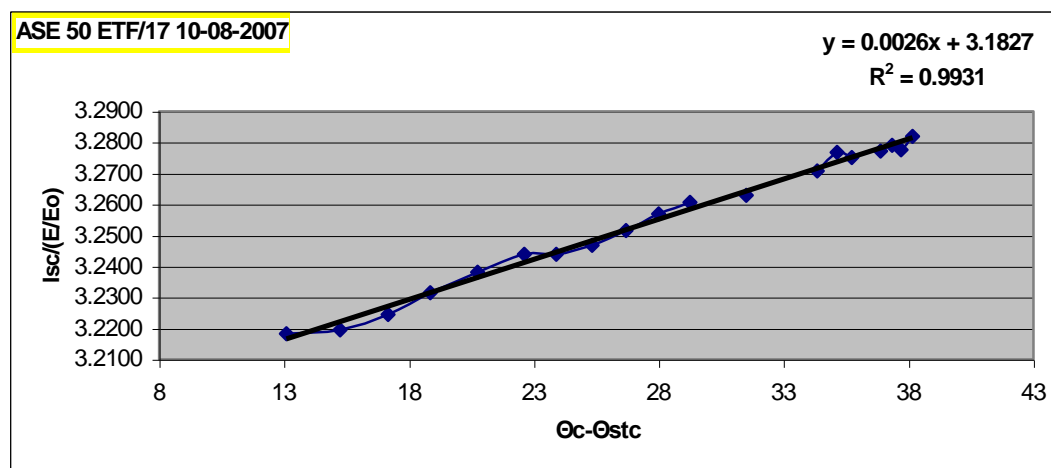
$\theta_{STC}$ : η θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου στις πρότυπες συνθήκες ( $25^\circ\text{C}$ ).

Σκοπός αυτού του πειράματος είναι να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης με τη μεταβολή της θερμοκρασίας της κυψελίδας. Για να πραγματοποιήσουμε αυτό το πείραμα συνδέσαμε μία αντίσταση SHUNT στο πλαίσιο, επίσης τοποθετήθηκε ένα θερμοζεύγος πίσω από το πλαίσιο και όλα αυτά συνδέθηκαν πάνω στον datalogger μαζί με ένα πυρανόμετρο για να μετράμε την ολική ακτινοβολία. Η τιμή της SHUNT που χρησιμοποιήσαμε είναι 60mV και 40A. Χρησιμοποιώντας όλα αυτά βρίσκουμε το  $I_{SC}$  και το θερμικό συντελεστή του ρεύματος. Στη συνέχεια θα δούμε μετρήσεις ρεύματος βραχυκύκλωσης στα πλαίσια **G50, G408, M25, M55, ASE 50 ETF/17, KYOCERA LA361J48, Siemens SM55**.

Ακολουθούν τρία γραφήματα από διαφορετικά μοντέλα πλαισίων τα οποία μετρήθηκαν σε διαφορετικές μέρες και ώρες μετρήσεων που μας δείχνουν τη μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης με τη μεταβολή της θερμοκρασίας της κυψελίδας:

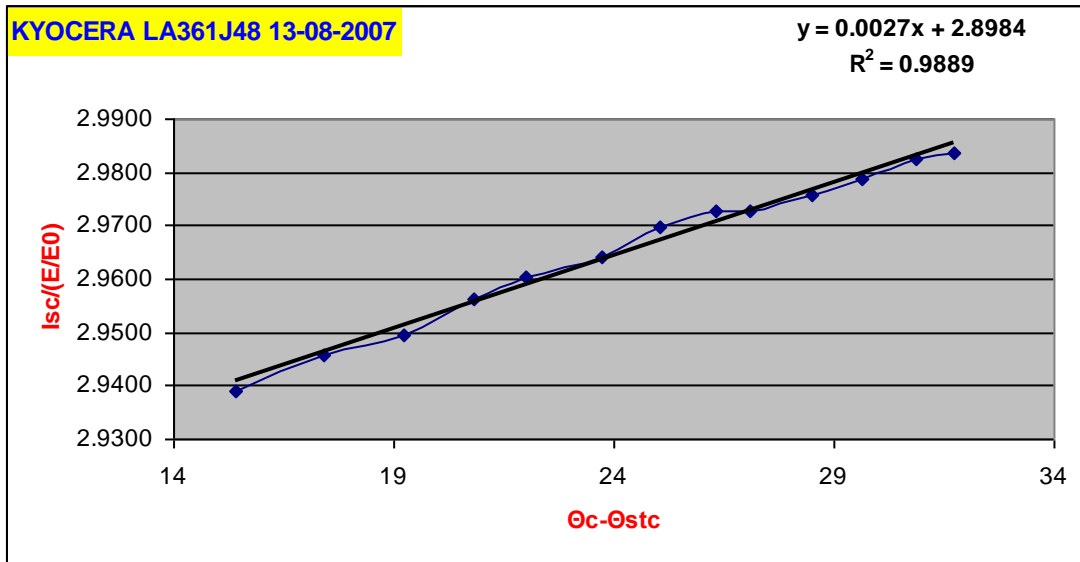


**Γράφημα 3.2.1.1** Συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης Siemens SM55 με τη μεταβολή της θερμοκρασίας στις 02-08-2007



**Γράφημα 3.2.1.2** Συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης ASE 50 ETF/17 με τη μεταβολή της θερμοκρασίας στις 10-08-2007





**Γράφημα 3.2.1.3** Συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης Kyocera LA361J48 με τη μεταβολή της θερμοκρασίας στις 13-08-2007

Από τα παραπάνω γραφήματα ρεύματος βραχυκύκλωσης,  $I_{sc}$ , των φωτοβολταϊκών πλαισίων Siemens SM55, ASE 50 ETF/17, Kyocera LA361J48, ως συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας  $\theta_c - \theta_{stc}$  παρατηρούμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου. Το  $I_{sc}$  αυξάνεται σχεδόν γραμμικά σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασίας  $\theta_c - \theta_{stc}$ .

Όπως προείπαμε, από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι ο θερμικός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης,  $\alpha_{I_{sc}}$ , δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\alpha_{I_{sc}} = \frac{dI_{sc}}{I_{sc}dT}$$

Όπως βλέπουμε στην γραφική υπάρχει μια ευθεία του τύπου  $y = ax + b$  όπου  $a$  είναι η κλίση της ευθείας και  $b$  η τιμή της μετρηθείσας ποσότητας του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Οπότε για να βρούμε τον θερμικό συντελεστή διαιρούμε την κλίση της ευθείας με το ρεύμα βραχυκύκλωσης, για παράδειγμα για τα τρία παραπάνω γραφήματα ο θερμικός συντελεστής είναι:

Panel	κλίση ευθείας	Isc	$\alpha_{I_{sc}}$
Siemens SM55	0.0013	3.178	4.09E-04
Ase 50 ETF/17	0.0026	3.183	8.17E-04
Kyocera LA361J48	0.0027	2.898	9.32E-04

Μετά από την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε βρήκαμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης και τον θερμικό συντελεστή κάθε πλαισίου, τα οποία τα βλέπουμε στον επόμενο πίνακα:

ΠΛΑΙΣΙΟ	Isc	αIsc (A/°C)
Siemens SM55	3.19	3.06E-04
Kyocera LA361J48	2.95	7.21E-04
Ase 50 ETF/17	3.15	8.20E-04
Arco M55	2.80	6.71E-04
Arco M25	1.47	5.61E-04
Arco G408	1.56	8.64E-04
Arco G50	0.19	5.16E-04

Πίνακας 3.2.1.1. Πίνακας αποτελεσμάτων Isc και αIsc

### 3.2.2 Μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος με την βοήθεια διαιρέτη τάσης

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 1, η τάση ανοικτού κυκλώματος μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της κυψελίδας. Αυτή η ελάττωση οφείλεται στην εξάρτηση του ρεύματος κόρου της διόδου από τη θερμοκρασία. Επίσης, η ποσοστιαία ελάττωσή της, ανά βαθμό θερμοκρασίας είναι σχεδόν μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη της αντίστοιχης αύξησης του ρεύματος βραχυκύκλωσης της κυψελίδας. Η παρακάτω σχέση περιγράφει την εξάρτηση της τάσης βραχυκύκλωσης από την θερμοκρασία της κυψελίδας και την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

$$V_{oc} = V_{oc,STC} \cdot (1 + \beta_{V_{oc}} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})) \cdot \left( 1 + \delta(\theta_c) \cdot \ln\left(\frac{E}{E_{STC}}\right) \right)$$

Όπου  $\beta_{V_{oc}}$ : ο θερμικός συντελεστής τάσης ανοικτού κυκλώματος του ΦΒ στοιχείου

$V_{oc,STC}$ : η τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος στις πρότυπες συνθήκες

$E$ : η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας

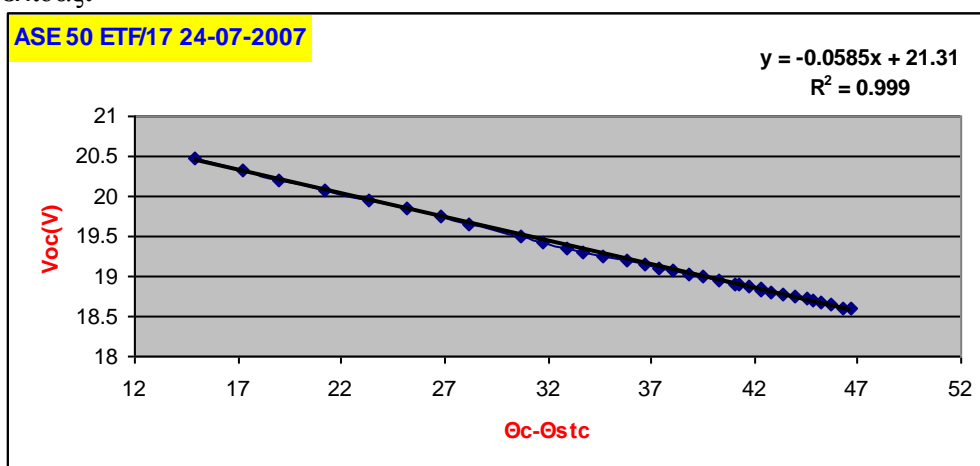
$E_{STC}$ : η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες  $1.000\text{W/m}^2$

$\theta_c$ : η θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου και

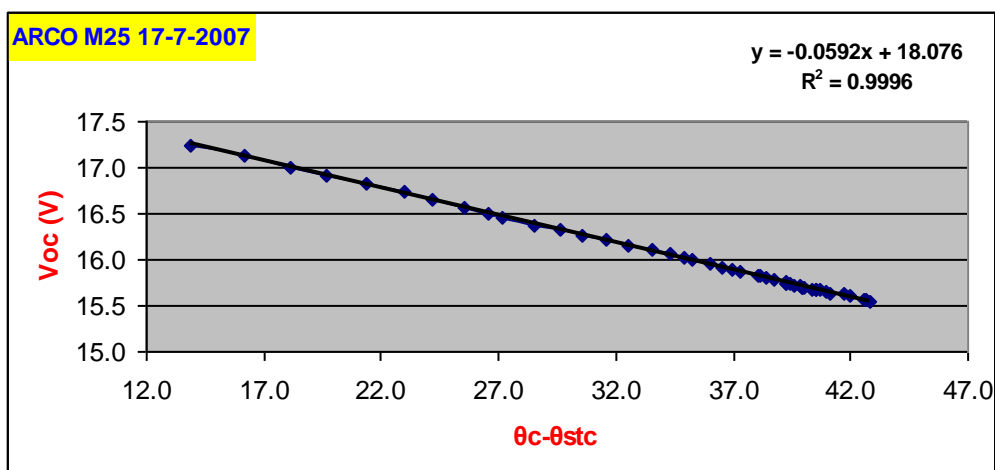
$\theta_{STC}$ : η θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου στις πρότυπες συνθήκες ( $25^\circ\text{C}$ ).

Σκοπός αυτού του πειράματος είναι να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της τάσης ανοικτού κυκλώματος του ΦΒ πλαισίου με τη μεταβολή της θερμοκρασίας της κυψελίδας. Για να πραγματοποιήσουμε αυτό το πείραμα συνδέσαμε ένα διαίρετη τάσης με κλίμακα 1÷10 στο πλαίσιο για προστατέψουμε τις εισόδους του datalogger, επίσης τοποθετήθηκε ένα θερμοζεύγος πίσω από το πλαίσιο και όλα αυτά συνδέθηκαν πάνω στον datalogger μαζί με ένα πυρανόμετρο για να μετράμε την ολική ακτινοβολία. Χρησιμοποιώντας όλα αυτά βρίσκουμε την  $V_{OC}$  και το θερμικό συντελεστή της τάσης ανοικτού κυκλώματος. Στη συνέχεια θα δούμε μετρήσεις τάσεων ανοικτού κυκλώματος στα πλαίσια **G50, G408, M25, M55, ASE 50 ETF/17, KYOCERA LA361J48, Siemens SM55**.

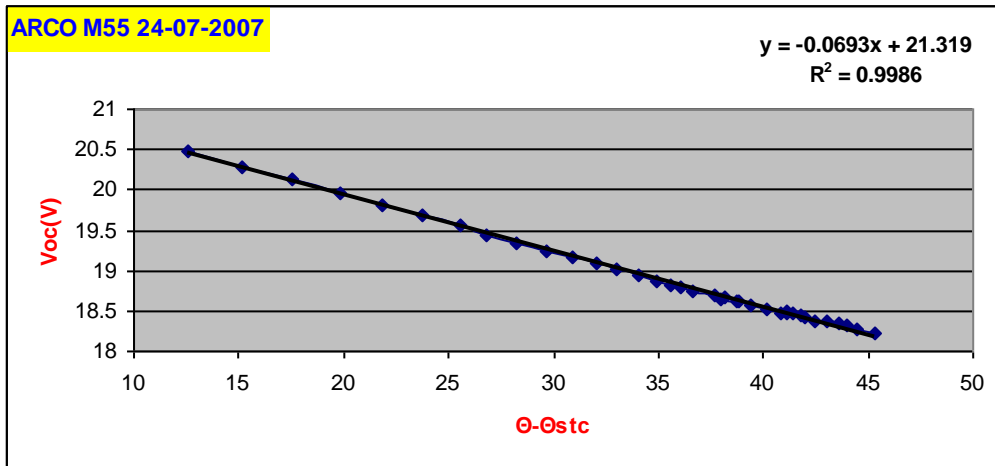
Ακολουθούν τρία γραφήματα από διαφορετικά μοντέλα πλαισίων τα οποία μετρήθηκαν σε διαφορετικές μέρες και ώρες μετρήσεων που μας δείχνουν τη μεταβολή της τάσης ανοικτού κυκλώματος με τη μεταβολή της θερμοκρασίας της κυψελίδας:



**Γράφημα 3.2.2.2** Συμπεριφορά της τάσης ανοικτού κυκλώματος ASE 50 ETF/17 με μεταβολή της θερμοκρασίας στις 24-07-2007



**Γράφημα 3.2.2.3** Συμπεριφορά της τάσης ανοικτού κυκλώματος ARCO M25 με μεταβολή της θερμοκρασίας στις 17-07-2007



**Γράφημα 3.2.2.4** Συμπεριφορά της τάσης ανοικτού κυκλώματος ARCO M55 με μεταβολή της θερμοκρασίας στις 17-07-2007

Από τα παραπάνω γραφήματα τάσεως ανοικτού κυκλώματος,  $V_{OC}$ , των φωτοβολταϊκών πλαισίων Ase 50 ETF/17, Arco M25, Arco M55, ως συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας  $\theta_C - \theta_{STC}$  παρατηρούμε ότι η τάση ανοικτού κυκλώματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου. Η  $V_{OC}$  μειώνεται σχεδόν γραμμικά σε συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας  $\theta_C - \theta_{STC}$ .

Όπως προείπαμε, από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι ο θερμικός συντελεστής της τάσης ανοικτού κυκλώματος,  $\beta_{V_{OC}}$ , δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\beta_{V_{OC}} = \frac{dV_{OC}}{V_{OC}dT}$$

Όπως βλέπουμε στην γραφική υπάρχει μια ευθεία του τύπου  $y = -ax + b$  όπου  $a$  είναι η κλίση της ευθείας και  $b$  η τιμή της μετρηθείσας ποσότητας της τάσης ανοικτού κυκλώματος. Οπότε για να βρούμε τον θερμικό συντελεστή διαιρούμε την κλίση της ευθείας με την τάση ανοικτού κυκλώματος, για παράδειγμα για τα τρία παραπάνω γραφήματα ο θερμικός συντελεστής είναι:

Panel - Date	κλίση ευθείας	Voc	$\beta_{V_{OC}}$
Ase 50 ETF/17 24-07-2007	-0.0585	21.3	-2.75E-03
Arco M25 17-07-2007	-0.0592	18.1	-3.28E-03
Arco M55 24-07-2007	-0.0693	21.3	-3.25E-03

Μετά από την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε βρήκαμε την τάση ανοικτού κυκλώματος και τον θερμικό συντελεστή κάθε πλαισίου, τα οποία τα βλέπουμε στον επόμενο πίνακα:

ΠΛΑΙΣΙΟ	Voc	βVoc (V/°C)
Siemens SM55	21.7	-3.16E-03
Kyocera LA361J48	21.1	-3.02E-03
Ase 50 ETF/17	21.4	-2.79E-03
Arco M55	21.4	-3.40E-03
Arco M25	18.0	-3.16E-03
Arco G408	20.2	-2.11E-03
Arco G50	22.1	-2.76E-03

Πίνακας 3.2.2.1. Πίνακας αποτελεσμάτων Voc και βVoc

### 3.2.3 Μέτρηση ισχύος ΦΒ πλαισίου με την βοήθεια IV Tracer

Η σχέση που μας δίνει την ηλεκτρική ισχύ που αποδίδεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο, όταν αυτό λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος είναι η εξής:

$$P_m = V_m \cdot I_m \approx \frac{E}{E_{STC}} \cdot P_P \cdot (1 + \gamma_{P_m} \cdot (\theta_c - \theta_{STC}))$$

**Όπου**  $\gamma_{P_m}$ : ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος ΦΒ στοιχείου

**$P_P$** : μέγιστη ηλεκτρική ισχύς σε πρότυπες συνθήκες ( $V_{m,STC}$  x  $I_{m,STC}$ )

**$E$** : η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας

**$E_{STC}$** : η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες  $1.000\text{W/m}^2$

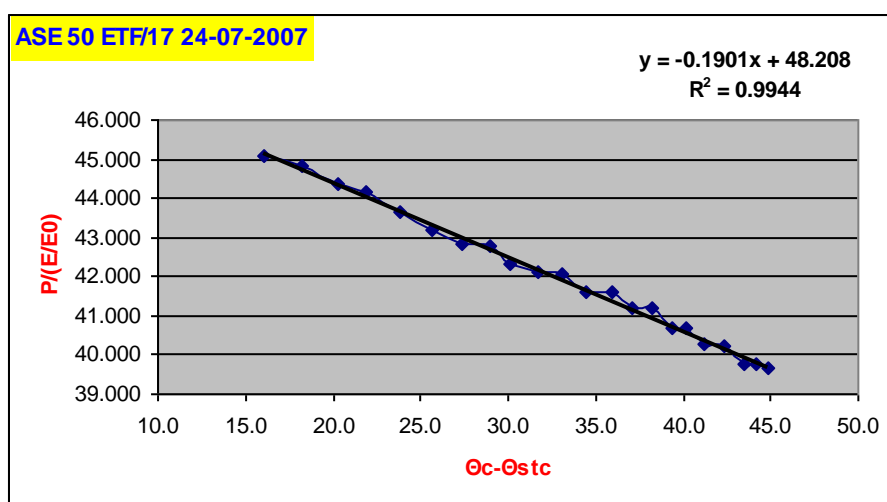
**$\theta_c$** : η θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου και

**$\theta_{STC}$** : η θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου στις πρότυπες συνθήκες ( $25^\circ\text{C}$ ).

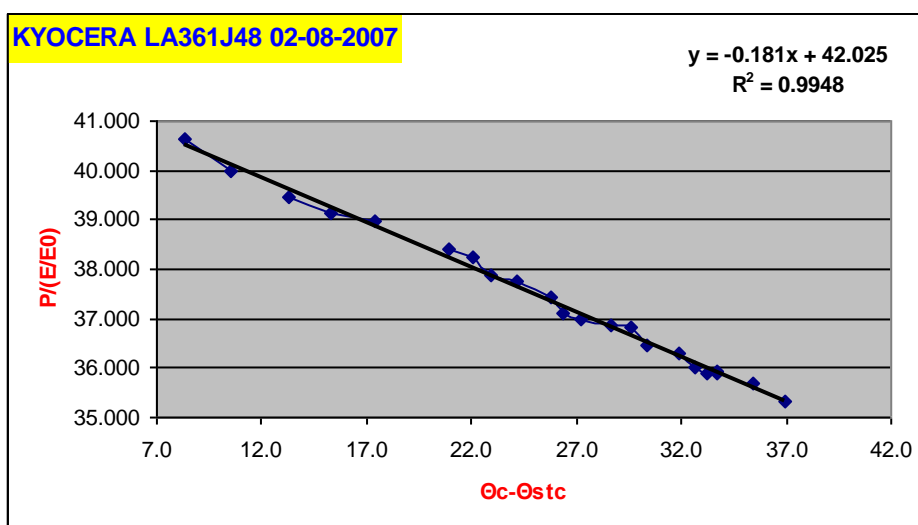
Σκοπός αυτού του πειράματος είναι να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της ηλεκτρικής ισχύς που παράγει το ΦΒ πλαίσιο καθώς και της απόδοσης του, με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Για να πραγματοποιήσουμε αυτό το πείραμα χρησιμοποιήσαμε ένα IV Tracer και κάναμε λήψη μετρήσεων από τους περίπου  $25^\circ\text{C}$

μέχρι 55°C. Επίσης συνδέσαμε στον datalogger ένα πυρανόμετρο, για να παίρνουμε την ολική ακτινοβολία στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου, και ένα θερμοζεύγος με το οποίο καταγράψαμε την θερμοκρασία του πλαισίου. Η λήψη των μετρήσεων γινόταν κάθε 30 δευτερόλεπτα περίπου, έτσι ώστε να μπορούμε να παίρνουμε μία μέτρηση σε κάθε μεταβολή κατά ένα βαθμό Κελσίου.

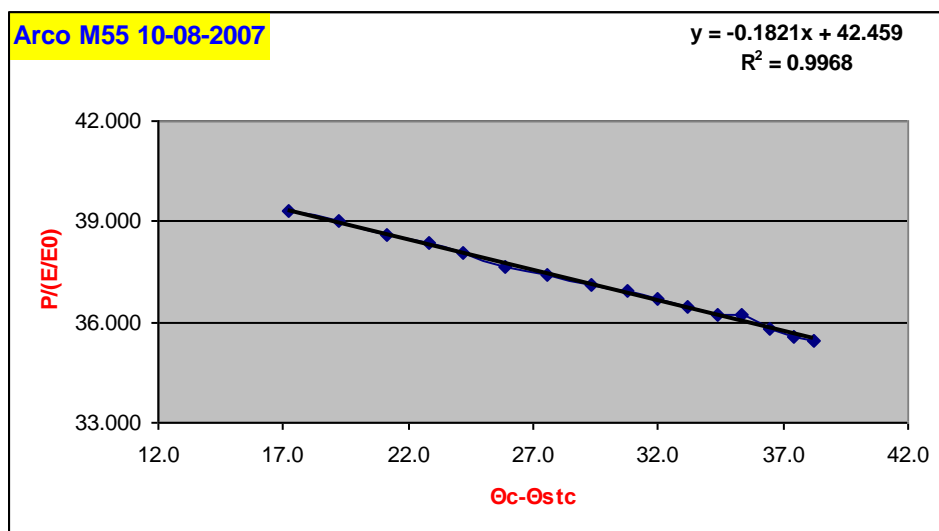
Στη συνέχεια από αυτές τις μετρήσεις (traces) βρήκαμε τα σημεία μέγιστης ισχύος και υπολογίσαμε την απόδοση του ΦΒ πλαισίου και το θερμικό συντελεστή μέγιστης ισχύος. Ακολουθούν τρία γραφήματα από διαφορετικά μοντέλα πλαισίων τα οποία μετρήθηκαν σε διαφορετικές μέρες και ώρες και μας δείχνουν πώς μεταβάλλεται η ισχύς με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του ΦΒ πλαισίου.



**Γράφημα 3.2.3.1** Συμπεριφορά της ισχύος του πλαισίου Ase 50 ETF/17 με τη μεταβολή της θερμοκρασίας στις 24-07-2007



**Γράφημα 3.2.3.2** Συμπεριφορά της ισχύος του πλαισίου Kyocera LA361J48 με τη μεταβολή της θερμοκρασίας στις 02-08-2007



**Γράφημα 3.2.3.2** Συμπεριφορά της ισχύος του πλαισίου Arco M55 με τη μεταβολή της θερμοκρασίας στις 10-08-2007

Από τα παραπάνω γραφήματα ισχύος αιχμής των φωτοβολταϊκών πλαισίων Ase 50 ETF/17, Kyocera LA361J48, Arco M55, ως συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας  $T_c - T_{STC}$  παρατηρούμε ότι η ισχύς εμφανίζει γραμμική εξάρτηση από αυτήν. Όπως προείπαμε, από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος είναι:

$$\gamma_{P_m} = \frac{dP}{P_m dT}$$

Όπως βλέπουμε στην γραφική ύπαρχει μια ευθεία του τύπου  $y = -ax + b$  όπου  $a$  είναι η κλίση της ευθείας και  $b$  η τιμή της μετρηθείσας ποσότητας της μέγιστης ισχύος. Οπότε για να βρούμε το θερμικό συντελεστή διαιρούμε την κλίση της ευθείας με τη μέγιστη ισχύ, για παράδειγμα για τα τρία παραπάνω γραφήματα ο θερμικός συντελεστής είναι:

Panel - Date	κλίση ευθείας	$P_m$	$\gamma_{P_m}$
Ase 50 ETF/17 24-07-2007	-0.1901	48.2	-3.94E-03
Arco M25 17-07-2007	-0.1810	42.0	-4.31E-03
Arco M55 24-07-2007	-0.1821	42.5	-4.29E-03

Μετά από την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήσαμε βρήκαμε την ισχύ και το θερμικό συντελεστή ισχύος κάθε πλαισίου, τα οποία τα παρατίθενται στον επόμενο πίνακα:

ΠΛΑΙΣΙΟ	Pm	γPm (W/°C)
Siemens SM55	48.2	-4.03E-03
Kyocera LA361J48	44.2	-4.38E-03
Ase 50 ETF/17	46.7	-3.93E-03
Arco M55	42.2	-4.48E-03
Arco M25	17.8	-4.51E-03
Arco G408	13.7	-3.45E-03
Arco G50	2.68	-1.30E-03

Ακολουθεί ένας πίνακας με τα τελικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τις τιμές σε STC που δίνει ο κατασκευαστής:

	Πειραματικές μετρήσεις με αναγωγή σε STC	Τιμές κατασκευαστή σε Standard Test Condition (STC)
<b>KYOCERA LA361J48</b>		
Voc	21.1	20.7
Isc	3.19	3.1
Pm	44.2	48
alsc	7.21E-04	0.0505 (%/°C)
βVoc	-3.02E-03	-0.377 (%/°C)
γPm	-4.38E-03	-0.51 (%/°C)
<b>Siemens SM55</b>		
Voc	21.7	21.7
Isc	3.19	3.45
Pm	48.1	55
alsc	3.06E-04	1.4 (mA/°C)
βVoc	-3.16E-03	-0.077 (V/°C)
γPm	-4.08E-03	
<b>ASE 50 ETF/17</b>		
Voc	21.4	20
Isc	3.15	3.2
Pm	46.9	50
alsc	8.20E-04	0.1 (%/°C)



<b><math>\beta</math>Voc</b>	-2.79E-03	-0.38 (%/°C)
<b><math>\gamma</math>Pm</b>	-3.93E-03	-0.47 (%/°C)
<b><u>ARCO M55</u></b>		
<b>Voc</b>	21.4	24
<b>Isc</b>	2.8	3.29
<b>Pm</b>	42.2	55
<b>alsc</b>	6.71E-04	
<b><math>\beta</math>Voc</b>	-3.40E-03	
<b><math>\gamma</math>Pm</b>	-4.48E-03	
<b><u>ARCO M25</u></b>		
<b>Voc</b>	18.0	18.2
<b>Isc</b>	1.47	1.65
<b>Pm</b>	17.8	22
<b>alsc</b>	5.61E-04	
<b><math>\beta</math>Voc</b>	-3.16E-03	
<b><math>\gamma</math>Pm</b>	-4.51E-03	
<b><u>ARCO G408</u></b>		
<b>Voc</b>	20.2	23
<b>Isc</b>	1.56	1.8
<b>Pm</b>	13.7	21
<b>alsc</b>	8.64E-04	
<b><math>\beta</math>Voc</b>	-2.11E-03	
<b><math>\gamma</math>Pm</b>	-3.45E-03	
<b><u>ARCO G50</u></b>		
<b>Voc</b>	22.1	
<b>Isc</b>	0.19	
<b>Pm</b>	2.68	2.5
<b>alsc</b>	5.16E-04	
<b><math>\beta</math>Voc</b>	-2.76E-03	
<b><math>\gamma</math>Pm</b>	-1.30E-03	

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε και από την επεξεργασία τους συμπεραίνουμε πως τα πλαίσια (πολυκρυσταλλικά, μονοκρυσταλλικά και άμορφα) συμπεριφέρονται όπως ακριβώς μας περιγράφουν οι κατασκευαστές τους. Επίσης η ισχύς τους συμπεριφέρεται όπως ακριβώς μας περιγράφει η σχέση:

$$P_m = \frac{E}{E_{STC}} \cdot P_P \cdot (1 + \gamma_{P_m} \cdot (\theta_C - \theta_{STC}))$$

με ακρίβεια στην πλειοψηφία των μετρήσεων περίπου 1%.

Όσον αφορά το λόγο επίδοσης του κάθε πλαισίου έχουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα:

ΠΛΑΙΣΙΟ	Δθ	P (W)	Pm (W)	E/E0	PR
Kyocera LA361J48	Δθ<40°C	48.1	43.1	1.03	0.87
	Δθ>40°C		39.9	1.03	0.81
Siemens SM55	Δθ<40°C	55	41.9	0.92	0.83
	Δθ>40°C		39.6	0.92	0.78
Ase 50 ETF/17	Δθ<40°C	50	44.9	0.92	0.97
	Δθ>40°C		41.9	0.99	0.85
Arco M55	Δθ<40°C	55	38.8	0.99	0.71
	Δθ>40°C		34.5	0.99	0.63
Arco M25	Δθ<40°C	22	17.5	1.03	0.78
	Δθ>40°C		15.9	1.02	0.71
Arco G408	Δθ<40°C	21	13.9	0.99	0.67
	Δθ>40°C		13.3	0.99	0.64

Στον παραπάνω πίνακα έχουμε τιμές του Performance Ratio, PR, σε μέτρηση μικρότερης και μεγαλύτερης των 40°C έτσι ώστε να παρατηρήσουμε την διαφοροποίηση του. Όπως παρατηρούμε ο λόγος επίδοσης μειώνεται με τη μεταβολή

της θερμοκρασίας του πλαισίου οπότε μειώνεται η ισχύς, άρα και η απόδοση του ΦΒ πλαισίου (αυτό ισχύει σε πολυκρυσταλλικά, μονοκρυσταλλικά, και άμορφα πλαίσια).

Όσον αφορά στον παράγοντα γήρανσης,  $n_{\gamma,m}$ , του κάθε πλαισίου ξέρουμε ότι ο ρυθμός γήρανσης είναι περίπου 1% κατ' έτος χρήσης. Για να ελέγξουμε αν ισχύει αυτό, κάναμε μια επαλήθευση με τις δικές μας μετρήσεις. Ο τύπος που μας δίνει την ποσοστιαία πτώση της ισχύος ενός ΦΒ πλαισίου είναι:

$$n_{\gamma,m} = \frac{P - P_{STC}}{P_{STC}}$$

Ακολουθεί ένας πίνακας με τις μεταβολές αυτές για κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο:

ΠΛΑΙΣΙΟ	P <sub>0</sub>	P	Χρόνια λειτουργίας	n <sub>γ,m</sub>	n <sub>γ,m</sub>
<b>Kyocera LA361J48</b>	48	44.2	8	-0.08	-1.0%
<b>Siemens SM55</b>	55	48.2	13	-0.12	-1.0%
<b>Ase 50 ETF/17</b>	50	46.7	6	-0.07	-1.1%
<b>Arco M55</b>	55	42.2	14	-0.23	-1.7%
<b>Arco M25</b>	22	17.8	14	-0.19	-1.4%
<b>Arco G408</b>	21	13.7	14	-0.35	-2.5%

Για εκτίμηση της γήρανσης διαιρέσαμε την ποσότητα n<sub>γ,m</sub> με την ηλικία του πλαισίου και όπως βλέπουμε από τον παραπάνω πίνακα υπάρχει μείωση της τάξης του 1-2% το χρόνο.

Όταν η ακτινοβολία του Ηλίου πέφτει κάθετα στο επίπεδο του πλαισίου παρατηρούμε πως το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτού κυκλώματος συμπεριφέρονται σχεδόν γραμμικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, και μάλιστα το ρεύμα αυξάνεται ενώ η τάση μειώνεται γραμμικά, για μικρά air mass.

Συγκρίναμε επίσης και μετρήσεις που λήφθηκαν σε διαφορετικό υψόμετρο με διαφορετική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η σύγκριση είναι μεταξύ μετρήσεων που ελήφθησαν στο Αστεροσκοπείο Σκίνακα, με μετρήσεις που ελήφθησαν στο ΦΒ Πάρκο του ΤΕΙ. Ακολουθεί ένας πίνακας με μετρήσεις:

	Αστεροσκοπείο Σκίνακα						ΦΒ Πάρκο ΤΕΙ Κρήτης					
	Υψόμετρο = 1752m						Υψόμετρο = 120m					
Πλαίσιο	Δθ (°C)	E (W/m <sup>2</sup> )	P (W)	AirT (°C)	Air Speed (Km/h)	RH (%)	Δθ (°C)	E (W/m <sup>2</sup> )	P (W)	AirT (°C)	Air Speed (Km/h)	RH (%)
<b>Kyocera LA361J48</b>	16	1027	41.4	24.5	5	60	38.2	1001	37.4	30.4	22	49
<b>Siemens SM55</b>	16	1082	46.0	25.0	5	60	39.3	927	39.0	29.9	6.8	37
<b>Ase 50 ETF/17</b>	16	1078	45.5	24.5	5	60	44.8	973	38.6	32.6	18	34

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι σε μεγάλα υψόμετρα το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποδίδει καλύτερα απ' ότι σε χαμηλά διότι το πλαίσιο βρίσκεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται στη χαμηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος λόγω υψομέτρου και/ή ανέμου και στη μεγαλύτερη πυκνότητα ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο του πλαισίου.