

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ

ΕΡΓΑΣΙΑ

Τίτλος: ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ
ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ
ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ.

ΑΔΙΚΗΜΕΝΑΚΗΣ ΑΔΑΜ

Επιβλέπων καθηγητής: Π. Τζανετάκης

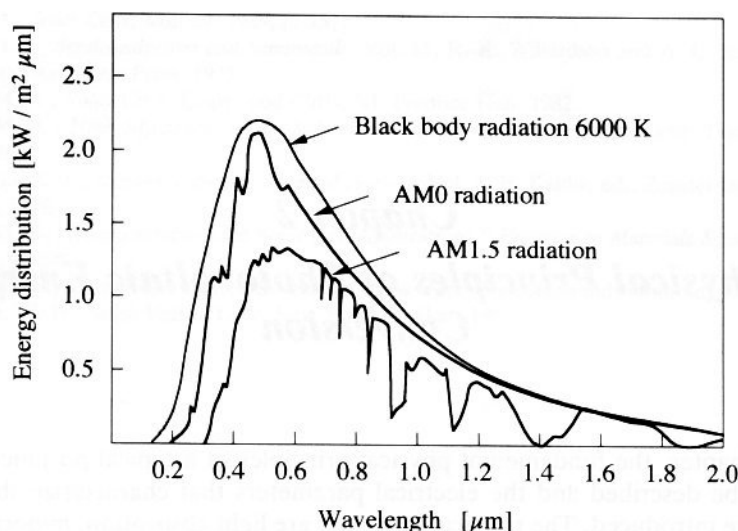
Ιούλιος 2001

ΜΕΡΟΣ 1^ο : ΘΕΩΡΙΑ

Α΄ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Γενικά

Η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ήλιο καθορίζεται από τη θερμοκρασία της επιφάνειάς του, που είναι περίπου 6000 °K. Μπορούμε να θεωρήσουμε κατά προσέγγιση ότι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ακολουθεί την κατανομή μέλανος σώματος σ' αυτή τη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1

Με τον όρο Air mass 1 (AM1) εννοούμε ότι οι ακτίνες του ήλιου θα περάσουν κάθετα τη γήινη ατμόσφαιρα μια φορά και εκεί θα μετρηθεί η έντασή τους ή οποιοδήποτε άλλο μέγεθος θελήσουμε. Επομένως με AM0 εννοούμε ότι η ηλιακή ακτινοβολία μετριέται έξω από την ατμόσφαιρα της γης, πρακτικά σε πολύ μεγάλο ύψος από την επιφάνειά της. Όμοια με τον όρο AM1.5 εννοούμε ότι οι ακτίνες του ήλιου διασχίζουν απόσταση τέτοια που να ισοδυναμεί με 1.5 φορές την ατμόσφαιρα της γης. Μετρήσεις που έγιναν σε πολύ μεγάλα ύψη κατέληξαν στην ευρέως αποδεκτή τιμή των 1.353 KW/m² για την ηλιακή ακτινοβολία έξω από την επιφάνεια της γης (δηλαδή για AM0).

Οι αποκλίσεις σε συγκεκριμένα μήκη κύματος για AM0 οφείλονται σε απορροφήσεις στην επιφάνεια του ήλιου. Οι αποκλίσεις για AM1 ή AM1.5 οφείλονται σε απορροφήσεις από τη γήινη ατμόσφαιρα, κυρίως από υδρατμούς, από το όζον και από το μονοξείδιο του άνθρακα. Επίσης οφείλονται και στη σκέδαση των φωτονίων από τα μόρια του αέρα, καθώς και από τη σκόνη και διάφορα άλλα σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, όπως αεροζόλ, χημικά, προωθητικά αέρια κτλ. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι ακόμα και με εντελώς καθαρό ουρανό, η ένταση του φωτός πέφτει κατά 30% σε σχέση με αυτή έξω από την ατμόσφαιρα. Κι αυτό βέβαια για κάθετη πρόσπτωση. Για οποιαδήποτε γωνία θ που σχηματίζεται μεταξύ της θέσης του ήλιου και της κάθετης στην επιφάνεια της γης το μήκος που έχουν να διανύσουν οι ηλιακές ακτίνες σε σχέση

με το μήκος h_0 για κάθετη πρόσπτωση δίνεται από τον τύπο: $h=h_0/\cos\theta$ και ο δείκτης air mass δίνεται από τον τύπο: AMm με $m=1/\cos\theta$. Επομένως με τον όρο $AM1.5$ εννοούμε ότι έχουμε πρόσπτωση υπό γωνία 45° .

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται μερικές μέσες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας ανά χρόνο για διάφορες χώρες:

Χώρα	KW/m ² ανά χρόνο
ΗΠΑ	1100-2200
Πρώην Σοβιετική ένωση	800-1400
Ευρώπη	800-1700
Ιαπωνία	1200-1400
Κίνα	1100-1700
Σαουδική Αραβία	2200

Πίνακας 1

ΟΛΙΚΗ, ΑΜΕΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΤΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Global horizontal irradiance (GHI) είναι η ολική ένταση της ακτινοβολίας του ήλιου που προσπίπτει κάθετα στο επίπεδο της γήινης επιφάνειας όπως αυτή μετράται με διάφορα όργανα, για παράδειγμα τα πυρανόμετρα. *Diffuse horizontal irradiance (DHI)* είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προέρχεται από σκεδάσεις και διάχυση στην ατμόσφαιρα. Στη μελέτη των φωτοβολταϊκών στοιχείων μας ενδιαφέρει μόνο η άμεση ακτινοβολία, δηλαδή το $GHI-DHI$, γιατί αυτή είναι που προκαλεί την εμφάνιση ρεύματος στις φωτοβολταϊκές κυψελίδες. Η DHI είναι περίπου το 20% της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για καθαρό ουρανό και κάθετη πρόσπτωση, αλλά το ποσοστό αυτό μπορεί να αυξηθεί πολύ περισσότερο για ημέρες με συννεφιά ή με σκόνη στην ατμόσφαιρα, καθώς και για μεγάλες γωνίες προσπτώσεως. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που χρησιμοποιούν συγκεντρωτικούς φακούς και μπορούν να δεχτούν ακτινοβολία μόνο από μια στενή περιοχή γωνιών. Έτσι χάνουν όλη την ακτινοβολία από διάχυση και δεν αποδίδουν καλά. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα παρακολούθησης του ήλιου για να έχουμε τη μέγιστη απόδοση. Στοιχεία για την ηλιακή ακτινοβολία είναι διαθέσιμα για τις περισσότερες περιοχές του πλανήτη μας με αρκετά καλή ακρίβεια για ένα ολόκληρο χρόνο. Παρ' όλα αυτά όμως υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα και αβεβαιότητες για την ηλιακή ακτινοβολία σε μια συγκεκριμένη περιοχή, καθώς θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι εκάστοτε γεωγραφικές και κλιματολογικές συνθήκες για την περιοχή στην οποία θα εγκατασταθεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Β' ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ SOLAR CELL

Απορρόφηση φωτός από ημιαγωγούς.

Γνωρίζουμε από την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία ότι ένα μέσο που περιέχει ευκίνητους φορείς με συγκέντρωση N , έχει μια χαρακτηριστική συχνότητα που ονομάζεται *συχνότητα πλάσματος* και δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_p = \left(\frac{4\pi N q_e^2}{m^* E} \right)^{1/2}$$

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος μεγαλύτερο από c/ω_p ανακλάται από το μέσο και δε διαδίδεται σ' αυτό. Η συχνότητα πλάσματος που αντιστοιχεί στις συγκεντρώσεις φορέων μετάλλων βρίσκεται συνήθως στο υπεριώδες. Οι τυπικές συχνότητες φορέων που συναντάμε στους ημιαγωγούς τοποθετούν τη συχνότητα πλάσματος από το βαθύ υπέρυθρο ($\sim 10\mu\text{m}$ για $N=10^{19}\text{cm}^{-3}$) μέχρι μικροκυματικές συχνότητες για μικρότερες συγκεντρώσεις φορέων. Η ανακλαστικότητα ενός μέσου σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συχνότητα μικρότερη από τη συχνότητα πλάσματος είναι τόσο πλησιέστερη στη μονάδα όσο η αγωγιμότητα του μέσου είναι μεγαλύτερη.

Το κύριο φαινόμενο οπτικής απορρόφησης στους ημιαγωγούς είναι η συντονιστική απορρόφηση με διέγερση ηλεκτρονίου από μια ζώνη σε μια άλλη. Με καλή προσέγγιση μπορούμε να πούμε ότι κάθε ημιαγωγός είναι διαφανής σε φως με ενέργεια φωτονίων μικρότερη από το εύρος του ενεργειακού χάσματος E_g , ενώ απορροφά ισχυρά φωτόνια με $h\nu > E_g$. Το εύρος του ενεργειακού χάσματος καθορίζει την περιοχή μηκών κύματος που ονομάζεται *θεμελιώδης ακμή απορρόφησης* και χαρακτηρίζεται από δραστική αλλαγή του συντελεστή οπτικής απορρόφησης. Η θεμελιώδης απορρόφηση φωτονίων στους ημιαγωγούς έχει σαν αποτέλεσμα τη μετάβαση ηλεκτρονίων από καταστάσεις της ζώνης σθένους σε καταστάσεις της ζώνης αγωγιμότητας, δηλαδή τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίου-οπής. Σε μια τέτοια μετάβαση θα πρέπει να διατηρείται η συνολική ενέργεια και η ορμή, δηλαδή το κυματόνισμα. Αν με f συμβολίσουμε την τελική κατάσταση του φωτονίου και με i την αρχική, τότε θα ισχύει για κάθε μετάβαση:

$$E_f - E_i = \pm h\nu$$

$$K \text{ μικρό}$$

$$K_f - K_i = \pm K_{ph}$$

Οι οπτικές μεταβάσεις που γίνονται με συμμετοχή μόνο ηλεκτρονίου και φωτονίου θα πρέπει να διατηρούν το κυματόνισμα του ηλεκτρονίου. Αυτές οι μεταβάσεις λέγονται *άμεσες* και είναι πολύ πιθανές σε ημιαγωγούς άμεσου χάσματος στους οποίους οι καταστάσεις κοντά σε ενέργεια E_C και εκείνες κοντά σε ενέργεια E_V έχουν πολύ γειτονικά κυματόνισμα. Σε ημιαγωγούς εμμέσου χάσματος, όπως είναι το πυρίτιο, θα πρέπει να γίνει και ταυτόχρονη εκπομπή ή απορρόφηση φωνονίου ώστε να διατηρηθεί το κυματόνισμα, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$E_f - E_i = \pm h\nu \pm E_q$$

$$K_f - K_i = \pm K_{ph} \pm q$$

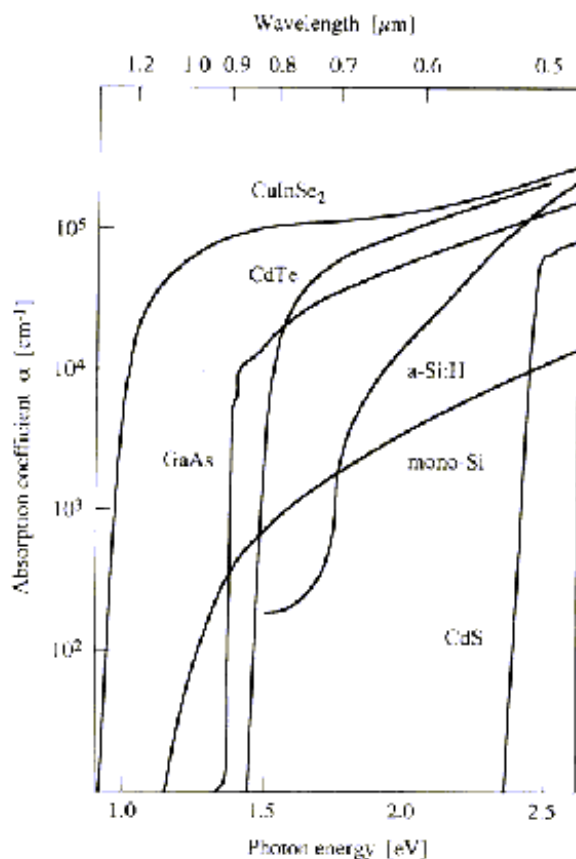
Όπου E_q η ενέργεια του φωνονίου και q το κυματόνισμά του.

Για φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα, τα δημιουργούμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών αποκτούν την περίσσεια κινητική ενέργεια του φωτονίου. Γρήγορα όμως θα τη δώσουν στο πλέγμα και θα καταλάβουν καταστάσεις κοντά στα όρια των ζωνών. Αν η κινητική αυτή ενέργεια είναι αρκετά μεγάλη θα παραχθούν και άλλα ηλεκτρόνια μέσω ιονισμού από κρούσεις. Αυτό συμβαίνει στο πυρίτιο για ενέργειες φωτονίου μεγαλύτερες από $3E_g$ και συνεπώς δεν είναι και τόσο σημαντικό για τις ενέργειες που έχουν τα φωτόνια του ορατού φάσματος. Η περίσσεια κινητική ενέργεια, λοιπόν δε συνεισφέρει καθόλου στο φωτόρευμα και γίνεται θερμική ενέργεια του πλέγματος του ημιαγωγού.

Ορίζουμε το συντελεστή απορρόφησης $\alpha(\nu)$ ως εξής:

$$S(\chi, \nu) = S(0) \exp(-\alpha \chi)$$

Όπου με S συμβολίζεται η πυκνότητα ροής φωτονίων. Ο συντελεστής απορρόφησης α εξαρτάται από τη δομή των ζωνών του ημιαγωγού (αν είναι αμέσου ή εμμέσου χάσματος), καθώς και από την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στον ημιαγωγό. Φυσικά εξαρτάται και από το είδος του ημιαγωγού. Αυτό φαίνεται καθαρά και από το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2

Ρυθμός μεταβολής συγκεντρώσεων σε ομοιόμορφο φωτισμό

Έστω ένας ημιαγωγός που βρίσκεται κάτω από ομοιόμορφο φωτισμό. Ισχύει γενικά ότι φως με ενέργεια φωτονίων μικρότερη από το ενεργειακό χάσμα E_G δεν θα απορροφηθεί από τον ημιαγωγό, ενώ για την αντίθετη περίπτωση θα έχουμε απορρόφηση. Για φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το χάσμα του

ημιαγωγού η κβαντική απόδοση της δημιουργίας φορέων, δηλαδή ο αριθμός ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται δια του αριθμού φωτονίων που απορροφούνται, είναι πολύ κοντά στη μονάδα.

Η διέγερση ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού με απορρόφηση φωτονίου είναι δυνατό να καταλήξει σε κατάσταση με ενέργεια σημαντικά μεγαλύτερη από την περιοχή, της τάξεως μερικών κΤ πάνω από την E_C , μέσα στην οποία βρίσκονται τα ηλεκτρόνια ισορροπίας. Μπορεί επίσης να αφήσει οπή στη ζώνη σθένους σε ενέργεια σημαντικά μικρότερη από την E_V . Η διαθεσιμότητα καταστάσεων στις ζώνες επιτρέπει την ταχύτατη θερμοποίηση των διεγερμένων φορέων με τρόπο ώστε η κατανομή τους στις ενεργειακές καταστάσεις των ζωνών να περιγράφεται από τη στατιστική Fermi-Dirac στη θερμοκρασία του ημιαγωγού, αλλά με διαφορετικές για κάθε φορέα στάθμες Fermi E_{fn} , E_{fp} για ηλεκτρόνια και οπές αντίστοιχα. Η E_{fn} βρίσκεται κοντύτερα στην E_C και η E_{fp} κοντύτερα στην E_V . Οι στάθμες αυτές ονομάζονται ψευδοστάθμες Fermi.

Κάτω από φωτισμό, οι συγκεντρώσεις και των δυο τύπων φορέων αυξάνονται σε σχέση με τις τιμές ισορροπίας. Η απορρόφηση φωτονίων αυξάνει με τον ίδιο ρυθμό τις συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών. Αν όμως ο ημιαγωγός έχει προσμίξεις τύπου p ή n, μπορεί ο φωτισμός να προκαλέσει αξιόλογη αύξηση μόνο στους φορείς μειονότητας. Η συγκέντρωση των φορέων πλειονότητας δε μεταβάλλεται αξιόλογα. Έτσι από τις γενικότερες εξισώσεις συνέχειας θα έχουμε:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G - a_r np + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

η οποία γίνεται:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_{th} + G_{ph} - a_r np$$

όπου G_{th} είναι ο θερμικός ρυθμός γένεσης φορέων και G_{ph} ο ρυθμός γένεσης που οφείλεται στα φωτόνια. Αν θεωρήσουμε ότι το n_0 δε μεταβάλλεται αξιόλογα κάτω από φωτισμό έχουμε μια αύξηση Δp για τους φορείς μειονότητας που μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση ισορροπίας p_0 και μεταβάλλεται χρονικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{\partial (p_0 + \Delta p)}{\partial t} = G_{th} + G_{ph} - a_r n_0 (p_0 + \Delta p)$$

η οποία με βάση το γεγονός ότι $G_{th} - a_r n_0 p_0 = 0$ γίνεται:

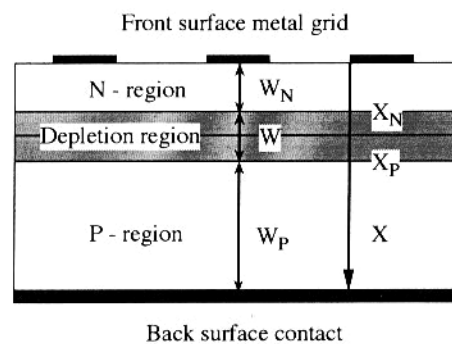
$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = G_{ph} - a_r n_0 \Delta p = G_{ph} - \frac{\Delta p}{\tau_p}$$

Η σχέση αυτή ορίζει και την παράμετρο τ_p που ονομάζεται *χρόνος ζωής* των οπών και είναι το αντίστροφο του γινομένου της σταθεράς επανασύνδεσης και της συγκέντρωσης των φορέων πλειονότητας. Αν κάποια δεδομένη χρονική στιγμή διακοπεί απότομα ο φωτισμός τότε η επιστροφή στην κατάσταση ισορροπίας θα γίνει σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\Delta p}{\tau_p} \Rightarrow \Delta p(t) = \Delta p(0) e^{-\frac{t}{\tau_p}}$$

Χαρακτηριστικά και απόδοση ενός solar cell.

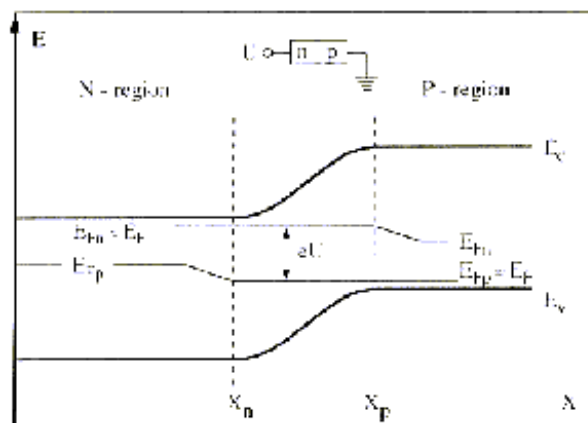
Για να έχουμε απόδοση σε μια φωτοβολταϊκή κυψελίδα απαιτείται χωρισμός των ηλεκτρονίων και των οπών από ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Συνήθως για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δίοδοι pn που φτιάχνονται από ένα ημιαγωγό τύπου p και ένα τύπου n σε επαφή και δύο ωμικές επαφές στα άκρα τους για τη ροή του ρεύματος προς το εξωτερικό κύκλωμα. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3

Το αναπτυσσόμενο εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο στη δίοδο οδηγεί σε μια ανομοιογενή κατανομή ηλεκτρονίων και οπών προκαλώντας μια περιοχή απογύμνωσης από ευκίνητους φορείς και ένα αναπτυσσόμενο δυναμικό $\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right)$

Αυτό είναι και η μέγιστη τάση που θα εμφανιστεί στα άκρα μιας pn φωτοδίοδου. Αν το ρεύμα στη φωτοδίοδο είναι μικρό τότε ισχύει η προσέγγιση πλήρους απογύμνωσης και οι δύο στάθμες Fermi είναι ίσες. Αν όμως έχουμε μεγάλα ρεύματα τότε διαφοροποιούνται και γίνονται όπως στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4

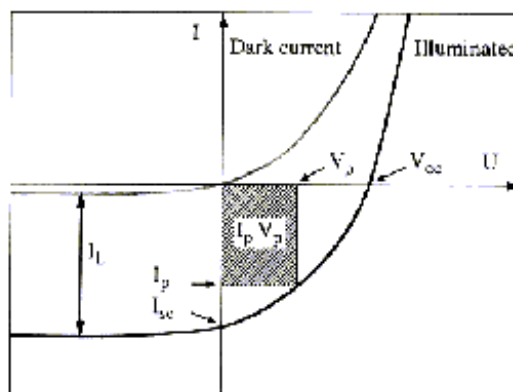
Τα ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών που θα δημιουργηθούν από φωτογένεση επιταχύνονται από το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο και δημιουργούν ένα ρεύμα που ρέει από την n περιοχή στην p περιοχή μέσα στη δίοδο. Αν ενώσουμε εξωτερικά με αγωγίμο σύρμα τη διάταξη θα ρέει ρεύμα που είναι ανάλογο της έντασης του προσπίπτοντος φωτός. Και επειδή απαιτείται ηλεκτρικό πεδίο για να μετακινηθούν οι φορείς, θα πρέπει το φως να προσπίπτει στην περιοχή απογύμνωσης κυρίως. Δηλαδή χρειαζόμαστε μια επαφή pn που να έχει μεγάλη περιοχή απογύμνωσης μιας και αυτή παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο φωτόρευμα. Το μήκος της περιοχής απογύμνωσης εξαρτάται από τις προσμίξεις του ημιαγωγού και δίνεται από τον τύπο:

$$W = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 V_B \frac{N_D + N_A}{N_D N_A}} \quad \text{όπου} \quad V_B = kT \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right)$$

Το ολικό ρεύμα που θα προκαλείται στη δίοδο δίνεται από την εξίσωση:

$$I = I_S \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad \text{με } I_L \text{ το ολικό φωτόρευμα και } I_S \text{ το ρεύμα κορεσμού.}$$

Οι I-V χαρακτηριστικές για μια φωτοδίοδο δίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5

Εδώ φαίνεται καθαρά ότι $I_{SC} = I_L$ για μηδέν αντίσταση, δηλαδή για βραχυκυκλωμένη δίοδο. Επίσης φαίνεται και η V_{OC} για μηδέν ρεύμα ($R = \infty$), που δίνεται από την εξίσωση:

$$V_{OC} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_L}{I_S} + 1\right)$$

Ο συντελεστής απόδοσης η ενός solar cell δίνεται από τον τύπο:

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{P_{in}}$$

Όπου FF είναι μια παράμετρος που ονομάζεται Fill Factor και P_{in} είναι η ισχύς του φωτορεύματος που προσπίπτει στη δίοδο. Φυσικά όσο μεγαλύτερη είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος και όσο μεγαλύτερο είναι

το ρεύμα βραχυκύκλωσης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση του στοιχείου. Στην πράξη η τάση ανοιχτού κυκλώματος καθορίζεται από το προφίλ των προσμίξεων και την απόσταση της επαφής pn από τη μπροστινή επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Τυπικά το πάχος ενός solar cell είναι περίπου 300 με 400 μm .

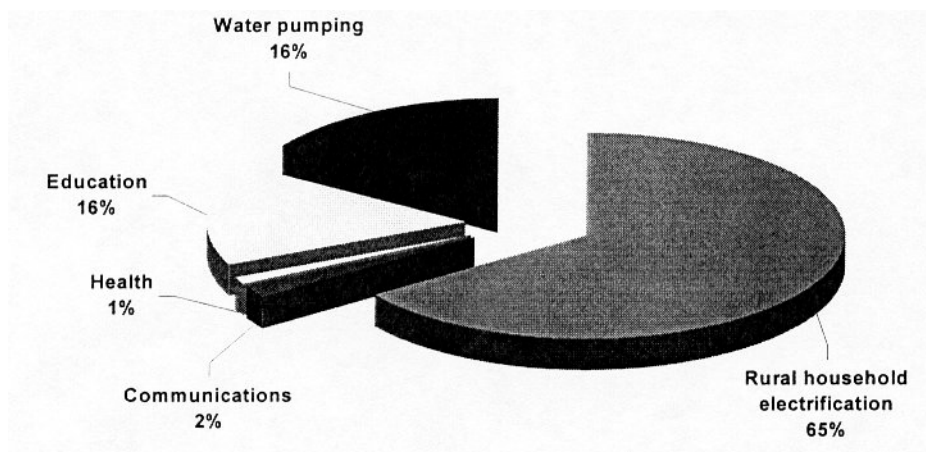
Γ' ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ

Σκοπός του προγράμματος και ανάπτυξη της αγοράς.

Σκοπός του προγράμματος *Αρχιμήδης* είναι η δημιουργία και η ανάλυση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σχεδιασμένο και δοκιμασμένο ειδικά για άντληση νερού, το οποίο θα πλεονεκτεί οικονομικά και αποδοτικά σε σχέση με τα σημερινά συμβατικά συστήματα άντλησης νερού με σταθερές φωτοβολταϊκές κυψελίδες. Αυτός ο σκοπός μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιώντας τις παρακάτω δύο προϋποθέσεις:

1. Αύξηση του ενεργειακού κέρδους (σε kWh/kW_p) με παθητική παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου, κάτοπτρα συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, και παθητική ψύξη του συστήματος.
2. Μείωση του κόστους (σε Ευρώ/kW_p) με τη χρήση modules και προσεκτικής σχεδίασης του συστήματος ώστε να μπορεί να μπει σε μαζική παραγωγή με χαμηλό κόστος.

Οι σημερινές ανάγκες τη παγκόσμιας αγοράς σε ηλεκτρική ενέργεια είναι σίγουρα πολύ μεγάλες. Ένα μεγάλο ποσοστό (~16%) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιείται για άντληση νερού όπως προκύπτει από τα στοιχεία που φαίνονται στο *σχήμα 6*. Υπολογίζεται ότι χρειάζονται περίπου 16 GW_p για να καλυφθούν αυτές οι ανάγκες, άρα περίπου 2.6 GW_p για άντληση νερού.



Σχήμα 6

Σήμερα λειτουργούν περίπου 10000 φωτοβολταϊκά συστήματα για άντληση νερού παγκοσμίως, με παραγόμενη ισχύ ανά στοιχείο περίπου 1 kW_p με 2 kW_p. Οι πωλήσεις αντλιών νερού υπολογίζονται σε 5000 ανά έτος και αυξάνουν με ρυθμό της τάξης του 30 με 40% ετησίως. Η πρόβλεψη για το έτος 2010 εκτιμά ότι η παραγόμενη ισχύς από φωτοβολταϊκά στοιχεία θα φτάσει τα 4000 MW_p σε όλο τον κόσμο, και η παραγωγή

ενέργειας για άντληση νερού θα φτάσει τα 45 MW_p ή 7% της συνολικά παραγόμενης ενέργειας. Καθίσταται λοιπόν προφανές ότι υπάρχει μεγάλη παγκόσμια ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια και αυτόν ακριβώς το σκοπό έρχεται να καλύψει το σύστημα *Αρχιμήδης* με έμφαση όμως στην άντληση νερού με χαμηλό κόστος και μεγάλη απόδοση. Υπολογίζεται ότι το κέρδος από το σύστημα αυτό σε σχέση με τα σημερινά συμβατικά συστήματα θα είναι περίπου 35 με 40% για την κατασκευή και την τοποθέτησή του. Για άντληση νερού με ηλιακή ενέργεια το κόστος είναι περίπου 7 με 8 Ευρώ/w_p με κόστος φωτοβολταϊκών κυψελίδων περίπου το μισό του όλου συστήματος. Η μείωση του κόστους στο σύστημα *Αρχιμήδης* μπορεί να αποφέρει κέρδος της τάξης των 2000 Ευρώ ανά σύστημα.

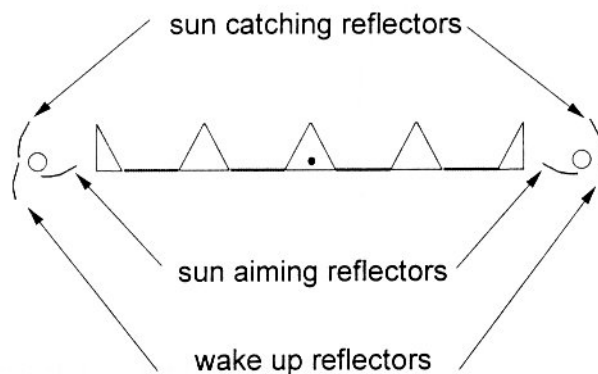
Λειτουργία και ανάλυση του συστήματος Αρχιμήδης.

Στο σημείο αυτό θα αναλυθούν 3 βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος, θα εξηγηθεί η λειτουργία τους και το κέρδος που αυτά αποφέρουν για το όλο πρόγραμμα. Θα αναλυθούν τα εξής: Παθητική παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου (passive solar tracking), 2X συγκέντρωση με τη βοήθεια ειδικών κατόπτρων σχήματος V (V trough concentration) και παθητική ψύξη (passive cooling).

Passive solar tracking

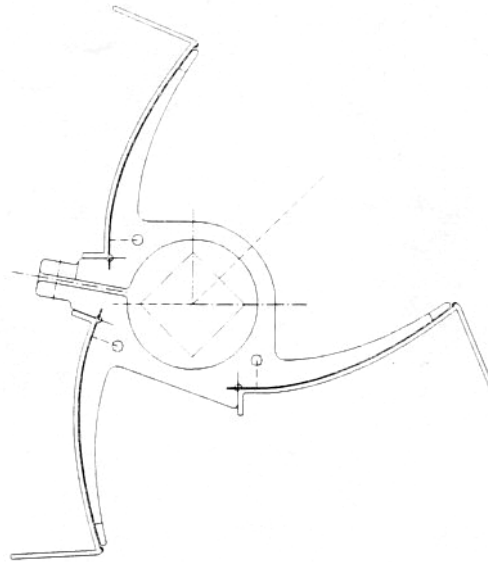
Για να επιτευχθεί η αναγκαία απόδοση του συστήματος *Αρχιμήδης* επιβάλλεται η παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου κατά τον ένα άξονα (Ανατολή-Δύση). Στον άλλο άξονα το σύστημα έχει μόνιμη κλίση 30° προς το Νότο (όσο περίπου και το γεωγραφικό πλάτος) για βέλτιστη απόδοση. Όμως για να επιτευχθεί η αναγκαία μακροζωία (>20 χρόνια) για το όλο σύστημα δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μηχανικός τρόπος για την περιστροφή στον άξονα του ήλιου. Έτσι αναπτύχθηκε από την ZSW ένα σύστημα παθητικής παρακολούθησης του ήλιου που δε χρησιμοποιεί καθόλου κινούμενα εξαρτήματα και έχει αρκετά καλή ακρίβεια ώστε να πετυχαίνει το σκοπό του. Παράλληλα είναι σε θέση να λειτουργεί για περισσότερο από 20 χρόνια χωρίς να χρειάζεται παρακολούθηση και συντήρηση. Και φυσικά είναι αρκούντως απλό και οικονομικό στην κατασκευή του ώστε να δικαιολογεί το επιπλέον κέρδος που θα προσφέρει σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα.

Το σύστημα παρακολούθησης του ήλιου αποτελείται από ένα υδραυλικό σύστημα μετακίνησης του φωτοβολταϊκού πιάτου το οποίο συνδέεται με δύο φιάλες που περιέχουν ειδικό υγρό και εκτείνονται κατά μήκος όλου του πιάτου στις δυο του άκρες. Γύρω από τις φιάλες έχουν προσαρτηθεί ειδικοί ανακλαστήρες ώστε να συγκεντρώνουν το φως του ήλιου, όπως στο παρακάτω σχήμα:



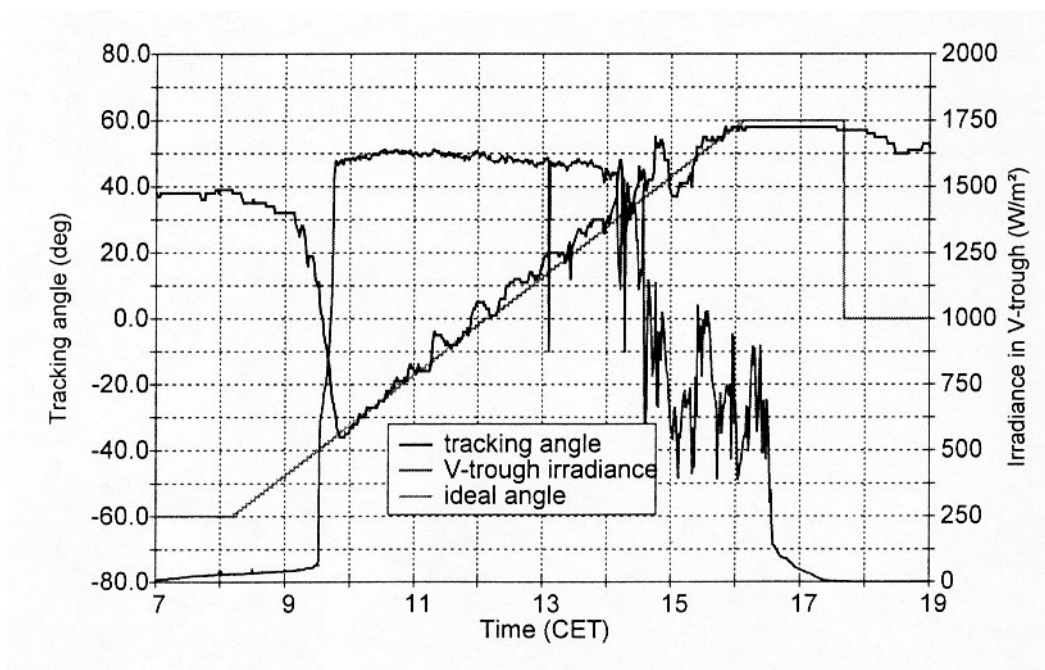
Σχήμα 7

Θερμαινόμενο το υγρό μετακινεί το πιάτο ανάλογα με τη θέση του ήλιου, δηλαδή ανάλογα με ποια γωνία βλέπει ο ήλιος τις δυο φιάλες. Όπως φαίνεται και στο σχήμα υπάρχουν 3 είδη ανακλαστήρων: Ανακλαστήρες για τον επαναπροσανατολισμό του συστήματος στη σωστή θέση παρακολούθησης, ανακλαστήρες προσανατολισμού και ανακλαστήρες που ωθούν το συλλέκτη προς το ζενίθ. Οι θέσεις τοποθέτησης των ανακλαστήρων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 8

Αν απεικονίσουμε σε ένα σχήμα τη θέση του tracker, τη θέση του ήλιου, και την ολική ακτινοβολία του ήλιου θα πάρουμε το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 9

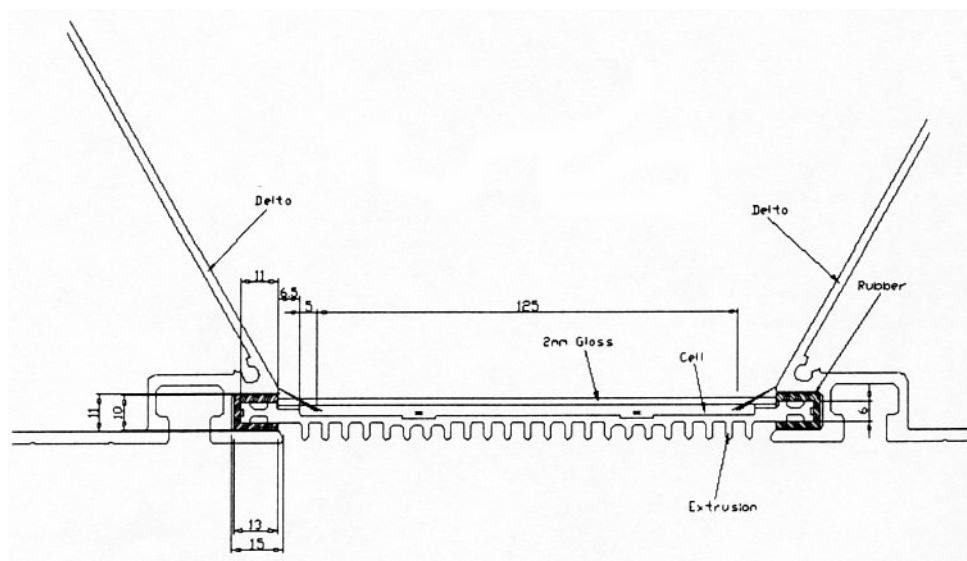
Εδώ φαίνεται καθαρά ότι το σύστημα ακολουθεί την πορεία του ήλιου στο ουρανό με ένα μικρό μόνο σφάλμα της τάξης του 3%. Μόλις βγει ο ήλιος το σύστημα τον ακολουθεί μέχρι να δύσει σχεδόν, με την προϋπόθεση να έχουμε πλήρη σχεδόν ηλιοφάνεια, δηλαδή να μην υπάρχουν σύννεφα. Τα σφάλματα οφείλονται κυρίως σε ταλαντώσεις του συστήματος λόγω ανέμων και σε φαινόμενα κολλήματος και γλιστρήματος του συστήματος του αποσβεστήρα κραδασμών. Το συνολικό κέρδος από την παρακολούθηση του ήλιου είναι περίπου 30%.

V trough concentration

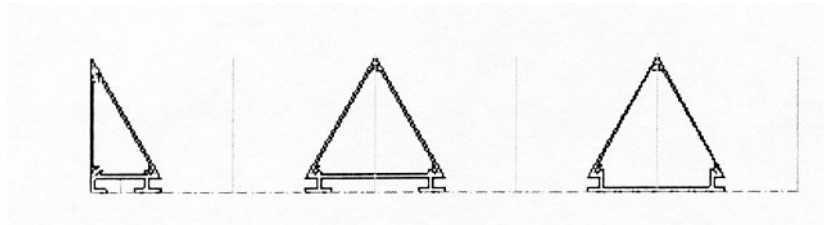
Ο δεύτερος παράγοντας που συμβάλλει στην απόδοση του συστήματος *Αρχιμήδης* είναι η 2X συγκέντρωση στις φωτοβολταϊκές κυψελίδες. Αντί δηλαδή να γεμίσει όλη η επιφάνεια του πιάτου με φωτοβολταϊκά στοιχεία, γεμίζει μόνο η μισή και χρησιμοποιούνται κάτοπτρα για να διπλασιάσουν τη συγκέντρωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό οδηγεί σε μείωση του κόστους κατασκευής στο μισό, μιας και χρησιμοποιούνται τα μισά φωτοβολταϊκά στοιχεία και τα μισά χημικά για την κατασκευή του module. Για το υπόλοιπο χρησιμοποιούνται κοινοί καθρέφτες που είναι αρκετά οικονομικοί.

Για τις φωτοβολταϊκές κυψελίδες χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία LGBG της εταιρίας BP Solarex λόγω της μεγάλης αποδοτικότητας που προσφέρει. Οι κυψελίδες ξανασχεδιάστηκαν για συγκέντρωση 2X προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση και να ελαττωθεί το κόστος κατασκευής. Σ' αυτή την ηλιακή συγκέντρωση το παραγόμενο ρεύμα είναι το διπλάσιο απ' ότι για συγκέντρωση 1X, συνεπώς έχουμε και τετραπλασιασμό των απωλειών. Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό οι κυψελίδες κόπηκαν στη μέση και έτσι οι απώλειες μειώθηκαν κατά ένα παράγοντα 4.

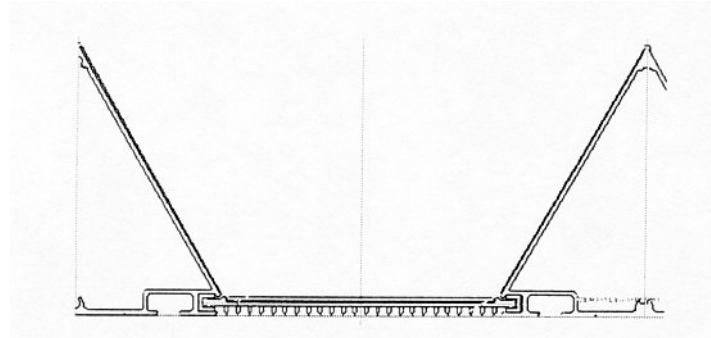
Δέκα σειρές από πανομοιότυπες μονάδες v-trough χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός πλήρους συστήματος. Οι καθρέφτες προσαρτούνται σε τριγωνικό σχήμα *ΔΕΛΤΑ* όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 10



Σχήμα 11

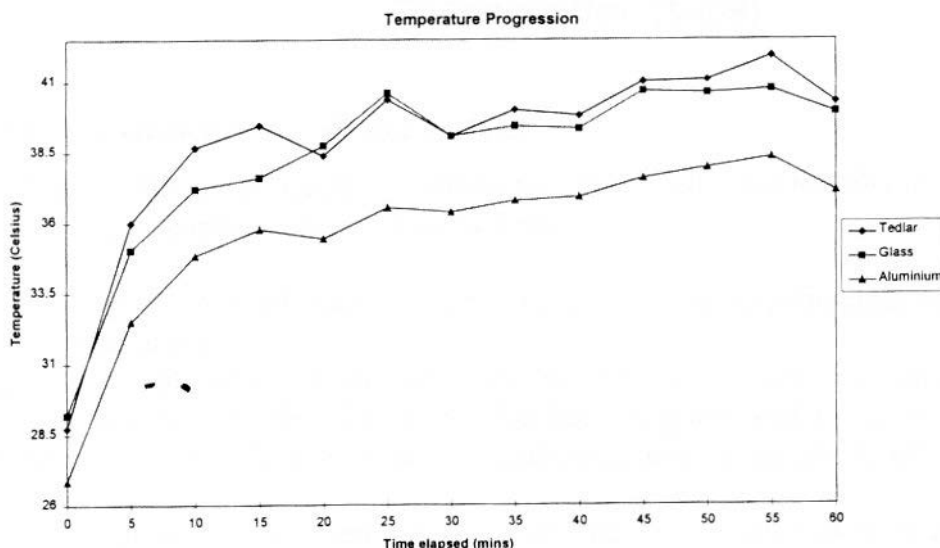


Σχήμα 12

Η απόδοση του συστήματος συγκέντρωσης αυτού είναι λιγότερη από τον παράγοντα 2 που καθορίζεται από τη γεωμετρία, λόγω απωλειών οφειλόμενων σε ατέλειες των ανακλαστήρων και σε περιθλάσεις Fresnel στο μπροστινό τζάμι της κατασκευής. Πρακτικά το όφελος από τη διπλή συγκέντρωση είναι περίπου 1.6X, δηλαδή 60% σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα.

Παθητική ψύξη

Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι πολύ καθοριστική για την απόδοσή του. Πιο συγκεκριμένα για κάθε αύξηση ενός βαθμού Κελσίου σε ένα LGBG solar cell έχουμε μια πτώση της απόδοσής του κατά ένα παράγοντα 0.4%. Είναι λοιπόν προφανές ότι θα πρέπει η θερμότητα να διαχέεται όσο το δυνατόν περισσότερο στο περιβάλλον, ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση. Έτσι πρέπει η «πλάτη» των solar cells να επιστρωθεί με ένα λεπτό στρώμα θερμοαγωγικού υλικού, ικανού να απάγει τη δημιουργούμενη από τον ήλιο θερμότητα. Δοκιμάστηκαν διάφορα υλικά και όπως φαίνεται από το παρακάτω σχεδιάγραμμα (σχήμα 13) επιλέχθηκε το αλουμίνιο πάχους 1mm ως η καλύτερη λύση.



Σχήμα 13

Η θερμοκρασία στο module εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο πιο εύκολα απάγεται η θερμότητα από την αλουμινένια πλάτη και συνεπώς από τις φωτοβολταϊκές κυψελίδες, άρα ανάλογα αυξάνεται και η απόδοση.

ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΚΕΡΔΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Αν λάβουμε υπόψη όλα τα παραπάνω έχουμε ένα κέρδος 60% από τη συγκέντρωση 2X με τη χρήση καθρεπτών. Ένα επιπλέον κέρδος 30% επιτυγχάνεται από την παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου σε 1 άξονα, ανεβάζοντας το συνολικό κέρδος κατά ένα παράγοντα $1.6 \times 1.3 = 2.08$. Για τις Μεσογειακές χώρες μια μέση απολαβή της τάξης των 3000 με 3500 kWh_{dc} ανά kW_p μπορεί να επιτευχθεί.

Επίσης από την τυποποίηση και την ευκολία κατασκευής επιτυγχάνεται σημαντικό οικονομικό όφελος που μπορεί να βοηθήσει στην πλήρη αντικατάσταση των συμβατικών συστημάτων από το σύστημα *Αρχιμήδης*. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται στοιχεία για σύγκριση, καθώς και το υπολογιζόμενο κόστος κατασκευής σε Ευρώ.

	Conventional 1kW _p System	ARCHIMEDES equiv. to 1 kWp fixed system (0,48 kW _p inst. PV power)	ARCHIMEDES equiv. to 1 kWp fixed PV pumping system (0,425 kW _p inst. PV)		
Technical Potential¹⁾					
Tracking gain	1	1,3		1,3	
Concentr. gain	1	1,6		1,6	
add. pump gain	1			1,15	
Total gain	1	2,08		2,39	
Economic Potential					
PV Module ²⁾ cost [Euro/W _p]	Costs [Euro/W _p]	Costs [Euro/W]	Cost Advantage	Costs [Euro/W]	Cost Advantage
4 (Today)	6	3,77	37,2 %	3,33	44,5 %
1 (EU goal)	3	2,33	22,3 %	2,06	31,5 %
Assumptions					
apert. area [m ²]	8	6,35		5,6	
Structure [Euro]	1000 ³⁾	1080 ⁴⁾		950 ⁴⁾	
Inverter power [W]	1000	770		680	
Inverter ⁵⁾ costs [Euro]	1000	770		680	
1) Gain is defined as ratio of the yields of ARCHIMEDES versus fixed tilted system; yield is defined as kWh/kW _p or m ⁴ /kW _p for pumping systems (W _p =real installed PV module power).					
2) LGBG cell technology at about 16 % efficiency					
3) Structure costs of fixed tilted conventional system 125 Euro/m ²					
4) PV V-trough costs including tracker, reflectors: 170 Euro/m ²					
5) Module oriented inverter technology at 1 Euro/W _p ,					

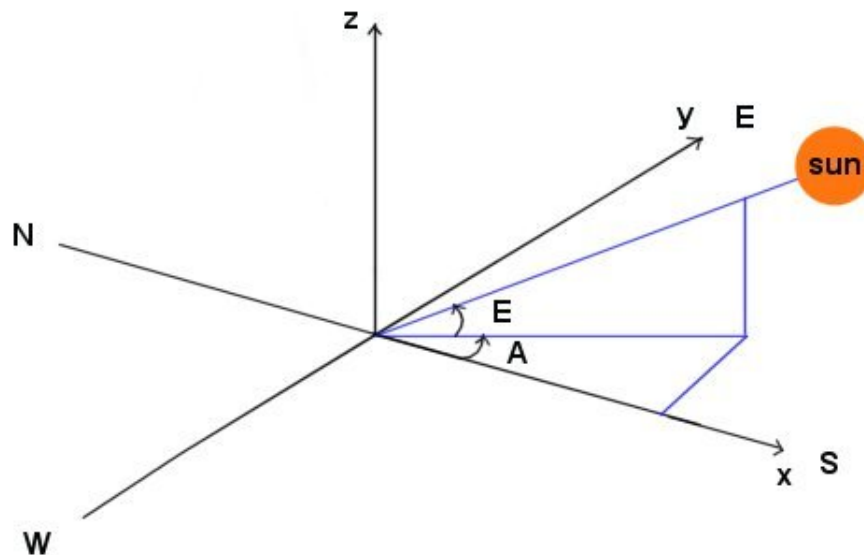
Πίνακας 2

ΜΕΡΟΣ 2^ο : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Δ΄ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Ως γνωστόν ο ήλιος, κατά τη διάρκεια της ημέρας, ακολουθεί μια πορεία από την ανατολή μέχρι τη δύση, διαγράφοντας ένα τόξο στον ουρανό. Κρίνεται λοιπόν σκόπιμο να γνωρίζουμε την ακριβή θέση του. Βολεύει πολύ να χρησιμοποιήσουμε πολικές συντεταγμένες, δηλαδή *Αζιμούθιο (azimuth)* και *ύψος (elevation)*. Αυτά μετρούνται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

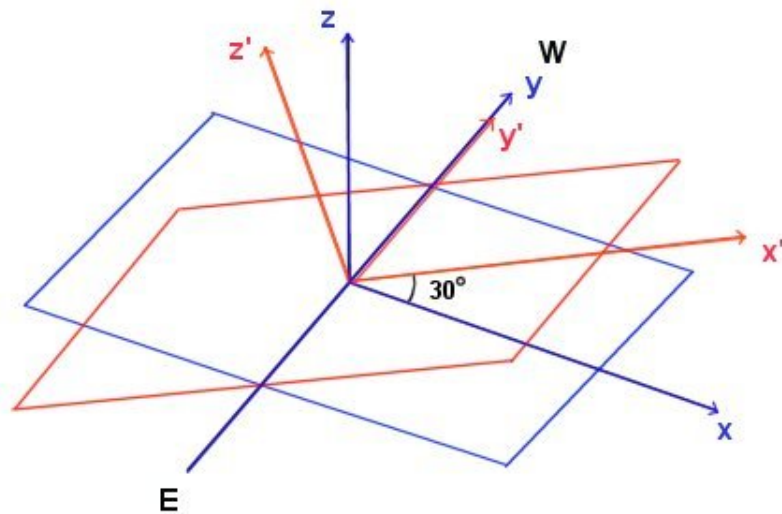


Σχήμα 14

Για να υπολογιστούν οι γωνίες αυτές αναπτύχθηκε πρόγραμμα στον υπολογιστή σε γλώσσα *Quick Basic*, το οποίο γνωρίζοντας την ακριβή θέση της τοποθεσίας που βρίσκεται το φωτοβολταϊκό σύστημα, την ακριβή ημερομηνία, καθώς και το time zone που βρισκόμαστε (GMT -2) υπολογίζει και καταγράφει σε αρχείο την ημερομηνία (σε format Ιουλιανού ημερολογίου), το αζιμούθιο και το elevation για όσες μέρες του ζητηθεί από το χρήστη. Το πρόγραμμα αυτό βασίζεται στον αλγόριθμο του Walraven και η κύρια υπορουτίνα υπολογισμού φαίνεται στο παράρτημα. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες για την τοποθεσία *Λιβάδι* όπου βρίσκεται το σύστημα είναι οι εξής:

Latitude : 35.2482°
 Longitude : -24.9350°
 Time zone : GMT -2

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία όμως βρίσκονται σε κλίση 30° προς το Νότο για καλύτερη απόδοση του συστήματος όπως εξηγήθηκε στο θεωρητικό μέρος. Επομένως θα πρέπει να υπολογιστούν οι ανωτέρω γωνίες ως προς ένα επίπεδο με κλίση 30° σε σχέση με το οριζόντιο, όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 15

Το κεκλιμένο επίπεδο είναι το σύστημα αναφοράς του *Αρχιμήδη*. Θεωρούμε ότι η στροφή γίνεται γύρω από τον άξονα y (East-West) κατά γωνία θ . Έστω E_1 , A_1 το Elevation και το Αζιμούθιο στο σύστημα 1, δηλαδή στο οριζόντιο επίπεδο, και έστω E_2 και A_2 το Elevation και το Αζιμούθιο στο σύστημα 2, δηλαδή στο κεκλιμένο επίπεδο (σύστημα αναφοράς του *Αρχιμήδη*). Τότε τα E_2 και A_2 θα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

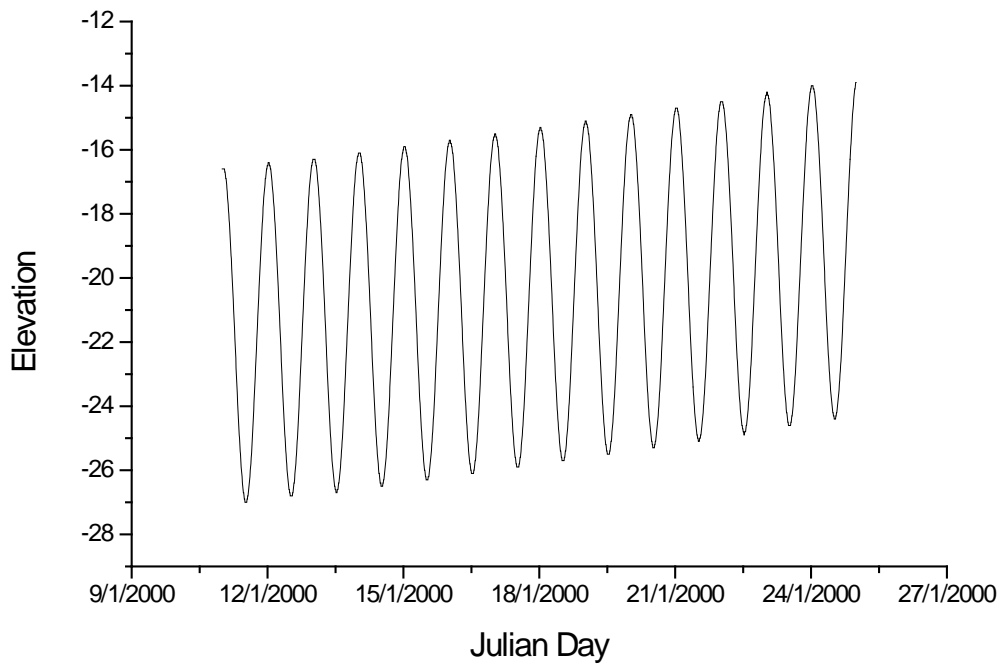
$$E_2(E_1, A_1, \theta) = \text{ASIN} [\text{COS}(\theta) \text{SIN}(E_1) - \text{SIN}(\theta) \text{COS}(E_1) \text{COS}(A_1)]$$

$$A_2(E_1, A_1, \theta) = \text{ATAN2} [\text{COS}(E_1) \text{SIN}(A_1), \text{COS}(\theta) \text{COS}(E_1) \text{COS}(A_1) + \text{SIN}(\theta) \text{SIN}(E_1)]$$

Όπου $\text{ASIN}(X)$ είναι το αντίστροφο ημίτονο του X και ATAN2 είναι η συνάρτηση που δίνει την αντίστροφη εφαπτομένη μιας γωνίας με το σωστό τρόπο για όλο τον κύκλο (2π ακτίνια). Γι' αυτό το σκοπό χρειάζονται 2 ορίσματα που να δίνουν το ημίτονο και το συνημίτονο. Το υποπρόγραμμα που υλοποιεί αυτή τη συνάρτηση φαίνεται στο δεύτερο μέρος του παραρτήματος. Το αντίστοιχο υποπρόγραμμα για τη συνάρτηση αντίστροφο ημίτονο δίνεται στο τρίτο μέρος του παραρτήματος.

Με μία προσθήκη μερικών γραμμών στο κυρίως πρόγραμμα κατέστη δυνατός ο υπολογισμός του Αζιμουθίου και του Elevation για το σύστημα αναφοράς του *Αρχιμήδη*, δηλαδή για 30° κλίση. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται μαζί με τις άλλες δυο γωνίες και την ημερομηνία σε ένα text file που προκύπτει αφού τρέξουμε το πρόγραμμα και του δώσουμε τις ημέρες εκείνες για τις οποίες θέλουμε να ξέρουμε την ακριβή θέση του ήλιου. Έτσι μπορούμε να τις φορτώσουμε σε οποιοδήποτε πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων θέλουμε και να τις χρησιμοποιήσουμε στους υπολογισμούς μας.

Παρατηρώντας τις τιμές του Elevation στο σύστημα του *Αρχιμήδη* για μερικές μέρες φαίνεται μια καμπύλη όπως στο παρακάτω σχήμα:



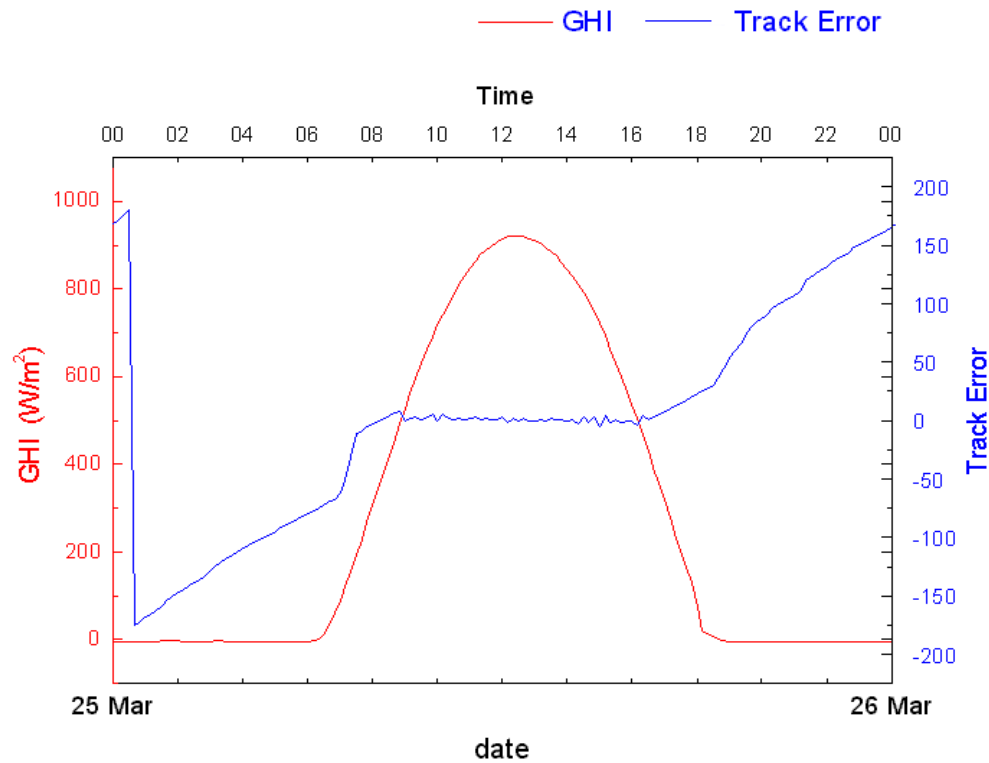
Σχήμα 16

Η γωνία ύψους (elevation) αυξάνει μέχρι μια μέγιστη τιμή και κατόπιν μειώνεται και πάλι μέχρι μια ελάχιστη τιμή. Τα μέγιστα και τα ελάχιστα όμως αυξάνονται συνεχώς όσο περνούν οι μέρες. Κάνοντας διάγραμμα για όλο το χρόνο παρατηρούμε ότι τα μέγιστα (και τα ελάχιστα) αυξάνονται μέχρι τις 21 Ιουνίου που είναι το θερινό ηλιοστάσιο και κατόπιν μειώνονται πάλι μέχρι και τις 21 Δεκεμβρίου που είναι το χειμερινό ηλιοστάσιο. Αυτό εξηγείται ως εξής: Ο ήλιος στην καθημερινή του πορεία ακολουθεί ένα τόξο που φαίνεται ως μια ημιτονοειδής συνάρτηση στο σχήμα. Όμως «κινείται» και κατά τον άξονα Βοράς – Νότος ελάχιστα κάθε μέρα λόγω της μεταπτωτικής κίνησης της γης στον άξονα περιστροφής της. Έτσι κάθε μέρα εμφανίζεται και λίγο πιο πέρα από την προηγούμενη, ανάλογα την εποχή. Τους καλοκαιρινούς μήνες είναι σχεδόν κατακόρυφα προς την επιφάνεια της γης, και τους χειμερινούς έχει κλίση περίπου 30° νότια. Είναι λογικό επομένως να εμφανίζεται αυτή η συμπεριφορά στο διάγραμμα και να έχουμε μέγιστη απόκλιση στις 21 Ιουνίου αφού ο *Αρχιμήδης* έχει 30° κλίση προς το Νότο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

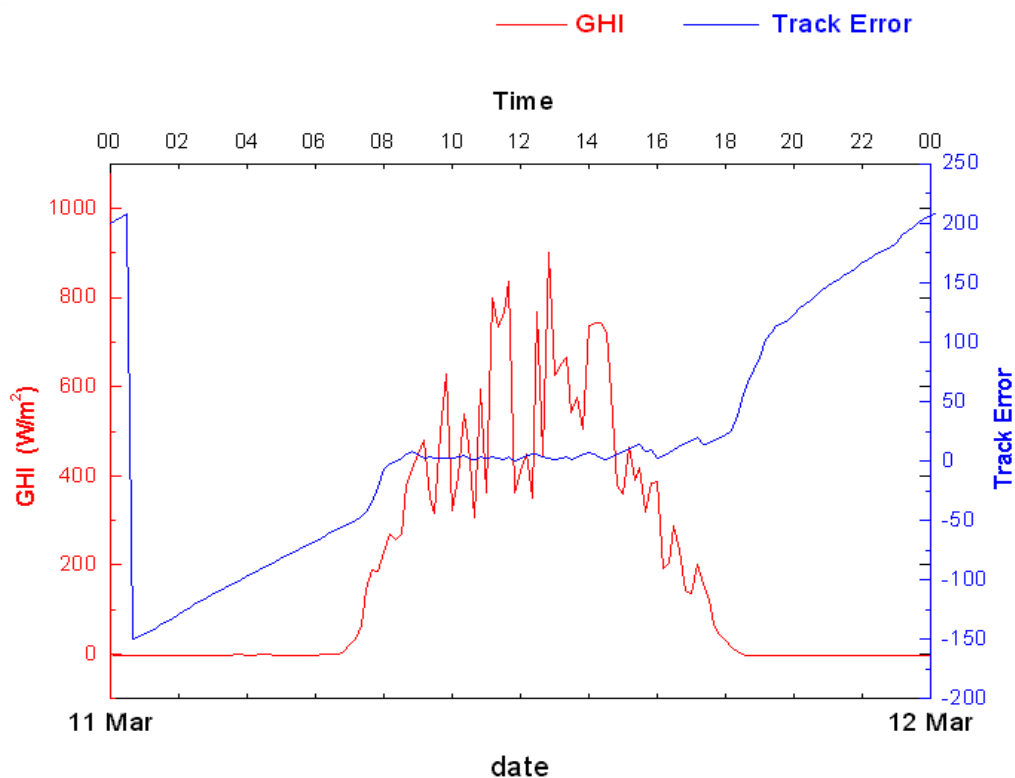
Για να δούμε πόσο ακριβές είναι το σύστημα παρακολούθησης του ήλιου θα χρειαστούμε τις μετρήσεις που παίρνονται από τον *Αρχιμήδη* και τα διάφορα όργανα, όπως πχ. τα πυρανόμετρα. Οι διάφορες τιμές των μεγεθών που καταγράφονται (όπως για παράδειγμα η ακτινοβολία, η γωνία του *Αρχιμήδη*, οι τάσεις και τα ρεύματα κτλ.) γράφονται σε μνήμες *flash* με τη βοήθεια ενός *data logger*. Κατόπιν διαβάζονται με ηλεκτρονικό υπολογιστή (μέσω κάποιας θύρας επικοινωνιών) και καταγράφονται σε αρχείο. Ακολουθεί η επεξεργασία και η ταξινόμησή τους και τελικά αποθηκεύονται σε ένα αρχείο τύπου *text*. Από εκεί και πέρα φορτώνονται σε προγράμματα επεξεργασίας μετρήσεων, όπως το Microsoft Excel και το Microcal Origin και πραγματοποιούνται οι αναλύσεις, οι υπολογισμοί και τα τελικά διαγράμματα ή ο,τιδήποτε άλλο θέλουμε. Τα διαγράμματα που ακολουθούν έχουν γίνει με τη βοήθεια του Origin 5.0 σε ένα βοηθητικό φύλλο εργασίας που κατασκευάστηκε ειδικά για το σκοπό αυτό και προσφέρει ορισμένες διευκολύνσεις.

Ας δούμε τώρα μερικά διαγράμματα που δείχνουν το tracking error και το GHI (Global Horizontal Irradiance) ταυτόχρονα. Ως tracking error ορίζουμε το track angle (γωνία στροφής του *Αρχιμήδη*) μείον το Αζιμούθιο (όπως υπολογίζεται από το πρόγραμμα που αναφέρθηκε πιο πριν). Αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι το GHI είναι μια κατευθείαν εκτίμηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.



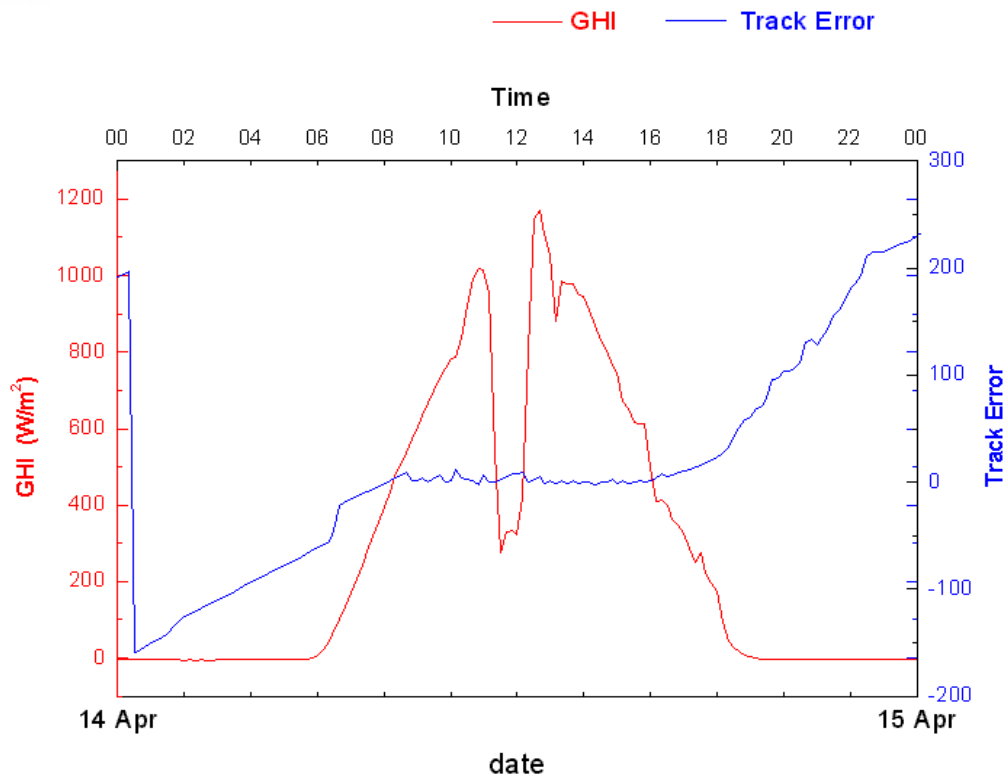
Σχήμα 17

Όπως παρατηρούμε στο *σχήμα 17* για μια μέρα με πλήρη ηλιοφάνεια η παρακολούθηση είναι πάρα πολύ καλή και σχεδόν σταθερή. Υπάρχουν βέβαια και μερικές αποκλίσεις που εμφανίζονται στο διάγραμμα σαν «παίζιμο» γύρω από τη σταθερή οριζόντια γραμμή του tracking error, οι οποίες οφείλονται στον άνεμο που φυσάει εκείνη τη χρονική στιγμή και στη μικρή χρονική καθυστέρηση που απαιτείται μέχρι να αντιδράσει το σύστημα στη μεταβολή της θέσης του ήλιου. Πάντως αυτές οι αποκλίσεις δεν είναι σε θέση να επηρεάσουν την απόδοση του συστήματος, οπότε θεωρούμε ότι έχουμε επιτυχή παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου.



Σχήμα 18

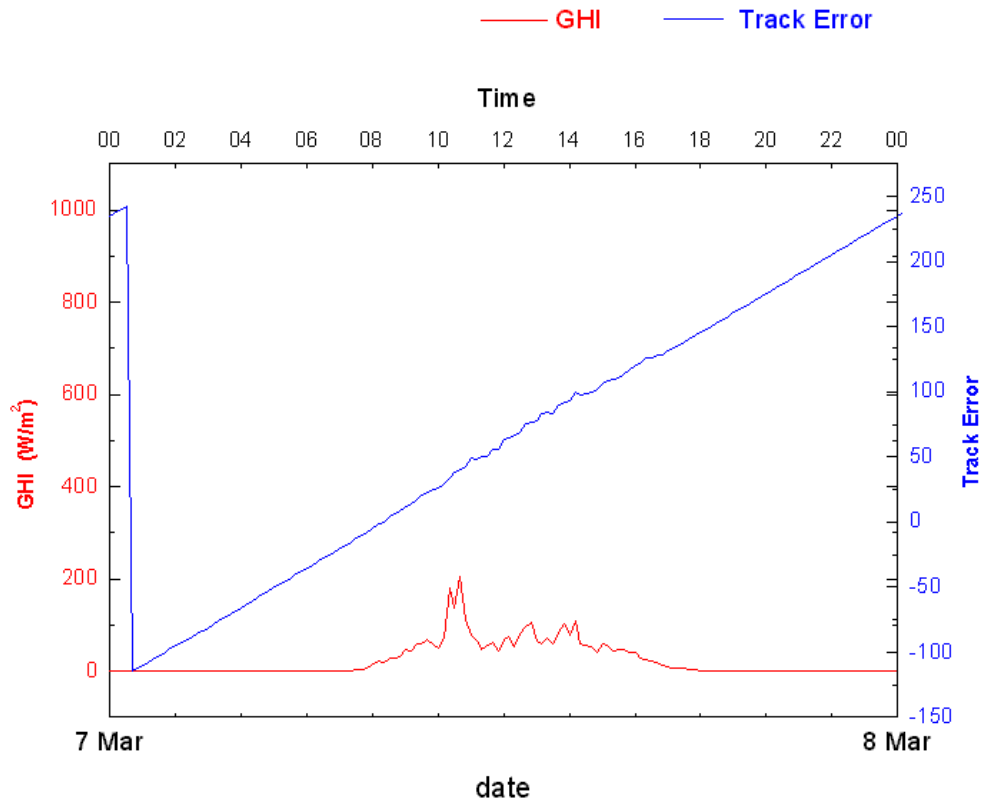
Στο *σχήμα 18* φαίνεται ότι ακόμα κι αν η ένταση του ήλιου δεν είναι τόσο ισχυρή, όσο είναι σε μια ηλιόλουστη ημέρα, η παρακολούθηση είναι επιτυχής. Παρατηρούμε ότι η ένταση της ακτινοβολίας μεταβάλλεται πολύ καθώς περνάει ο χρόνος λόγω συννεφιάς και φτάνει τα 300 W/m^2 σε ορισμένες περιπτώσεις. Παρά το γεγονός αυτό όμως ο *Αρχιμήδης* δε χάνει την τροχιά παρακολούθησης και επιτυγχάνει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Έτσι και σε περιόδους με σύννεφα και άστατο καιρό, το σύστημα αποδίδει αρκετά.



Σχήμα 19

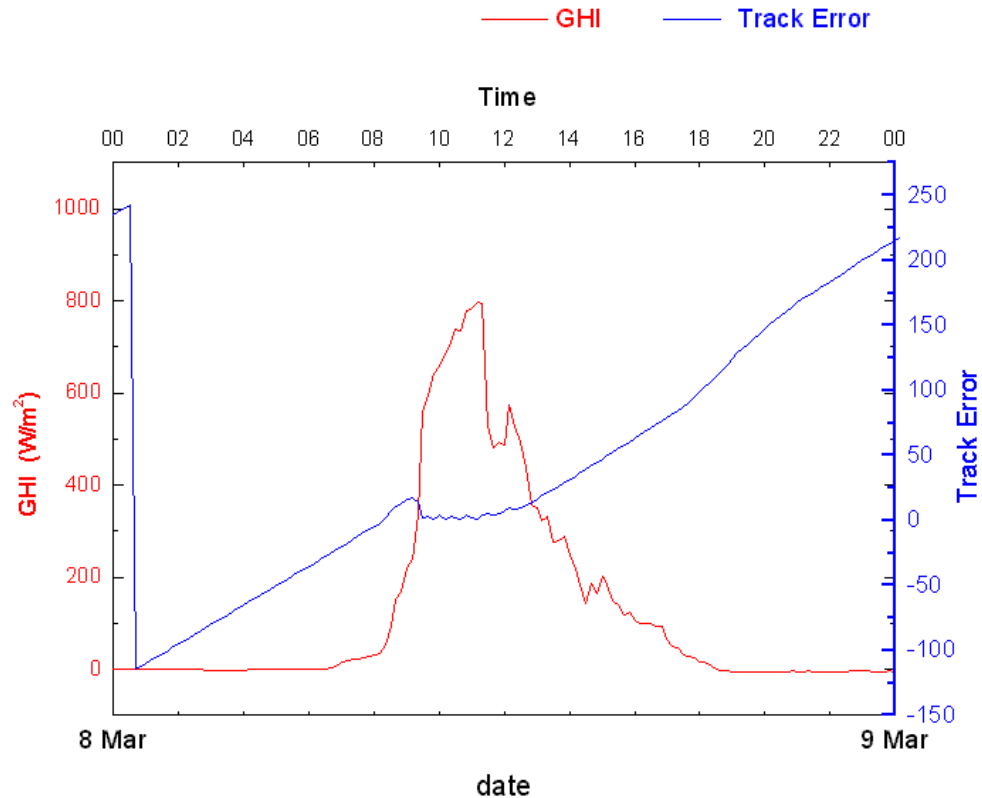
Στο *σχήμα 19* φαίνεται καθαρά ότι ακόμα και αν κάποια χρονική στιγμή μειωθεί απότομα η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, για 1-2 ώρες, χωρίς όμως να πέσει κάτω από τα 300 περίπου W/m^2 , τότε το σύστημα δε χάνει την παρακολούθηση. Έτσι ακόμα και αν υπάρξει τοπική νέφωση για περιορισμένο χρονικό διάστημα, διατηρείται το tracking. Από τα διαγράμματα επίσης φαίνεται να υπάρχει κάποια κατώτατη τιμή για επιτυχή παρακολούθηση. Αυτή με μια πρώτη ματιά εντοπίζεται περίπου στα 300 W/m^2 .

Στο *σχήμα 20* φαίνεται μια ημέρα με ελάχιστο ή καθόλου, άμεσο ηλιακό φως. Σε μια τέτοια ημέρα όπου τα σύννεφα σκεπάζουν πλήρως τον ουρανό, το σύστημα δεν είναι σε θέση να ακολουθήσει την τροχιά του ήλιου. Προφανώς βέβαια αυτό δεν έχει και πολύ σημασία, μιας και δεν υπάρχει καθόλου άμεσο ηλιακό φως ώστε να αποδώσει το σύστημα. Ο *Αρχιμήδης* παραμένει προσκολλημένος στη θέση που ήταν και πριν και δεν κινείται καθόλου. Παρατηρούμε και εδώ ότι χρειάζεται κάποια κατώτατη ένταση ακτινοβολίας προκειμένου να αρχίσει η παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου. Εδώ η ένταση μόλις ξεπερνάει τα 200 W/m^2 , βρίσκεται κάτω δηλαδή από το όριο των 300 W/m^2 που καθορίσαμε προηγουμένως ως κατώφλι παρακολούθησης.



Σχήμα 20

Τέλος στο σχήμα 21 φαίνεται μια ημέρα με αρκετά ισχυρό ηλιακό φως στην αρχή, ενώ κατά τη διάρκειά της αυτό μειώνεται συνεχώς λόγω αυξανόμενης συννεφιάς. Παρατηρούμε ότι η παρακολούθηση αρχικά είναι επιτυχής, ενώ αργότερα, όταν η ένταση πέσει κάτω από τα $300 W/m^2$ περίπου το σύστημα δε μπορεί να παρακολουθήσει άλλο την τροχιά του ήλιου και μένει σταθερό σε μια γωνία, αυξάνοντας έτσι το tracking error.



Σχήμα 21

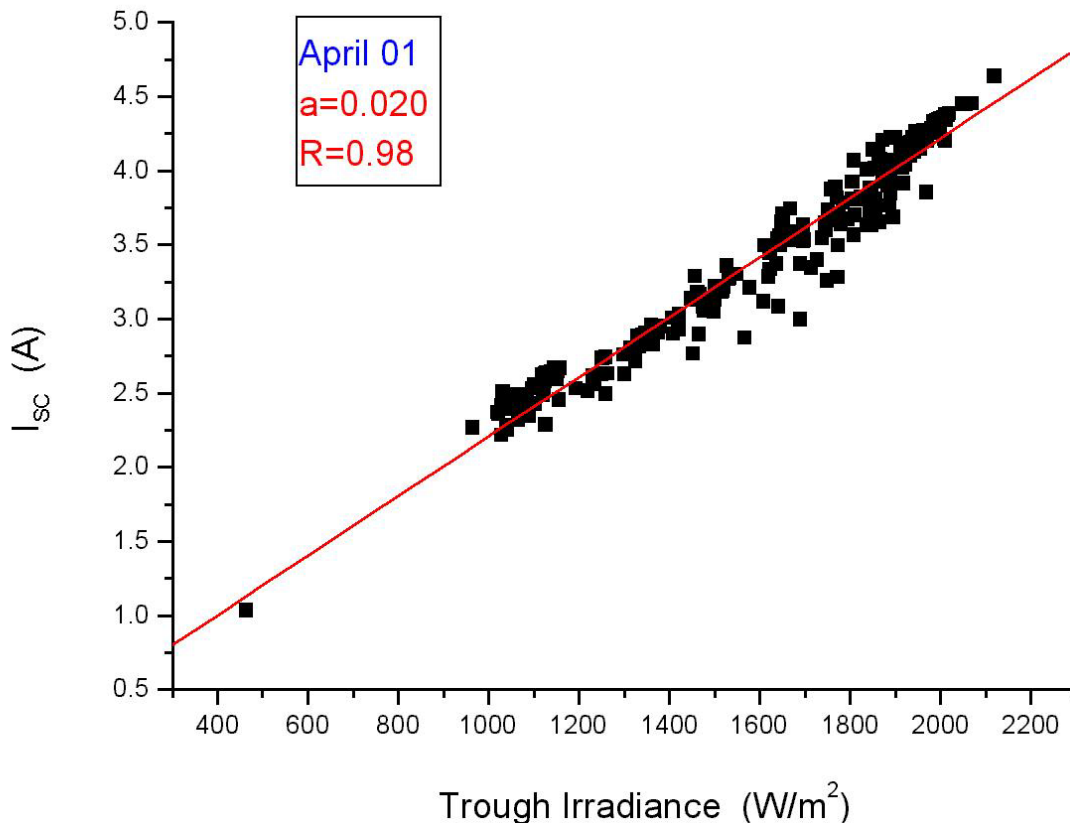
Ε΄ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΩΝ MODULES

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν 3 παράμετροι που αφορούν τα modules και τα solar cells. Αυτές είναι: Η εξάρτηση της I_{sc} από την ακτινοβολία, η εξάρτηση της U_{oc} από τη θερμοκρασία λειτουργίας, και η εξάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας μείον τη θερμοκρασία περιβάλλοντος από την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Λέγοντας module εννοούμε μια σειρά από solar cells συνδεδεμένα σε σειρά έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα ενιαίο σύνολο, σαν ένα μεγάλο solar cell, που όμως θα είναι πιο εύκολο να τοποθετηθεί και να χρησιμοποιηθεί. Προφανώς όσα θα αναφερθούν για τα modules ισχύουν και για τα solar cells μιας και σαν διάταξη δεν έχουν διαφορά ως προς τις βασικές τους παραμέτρους.

Και στις 3 παρακάτω περιπτώσεις έχουν ληφθεί υπόψη μόνο τιμές για In Trough Irradiance (2X συγκέντρωση) μεγαλύτερη από 1000 W/m^2 . Αυτό έγινε γιατί σε αντίθετη περίπτωση δεν έχουμε αρκετή ηλιοφάνεια, συνεπώς δεν παράγεται αρκετό ρεύμα και επίσης η θερμοκρασία των modules δεν ανεβαίνει αισθητά ώστε να έχουμε τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα που θέλουμε. Οι συσχετισμοί που ακολουθούν έχουν νόημα μόνο για διαστήματα με ηλιοφάνεια και τέτοια μόνο έχουν ληφθεί υπόψη.

Εξάρτηση του I_{sc} από την ακτινοβολία

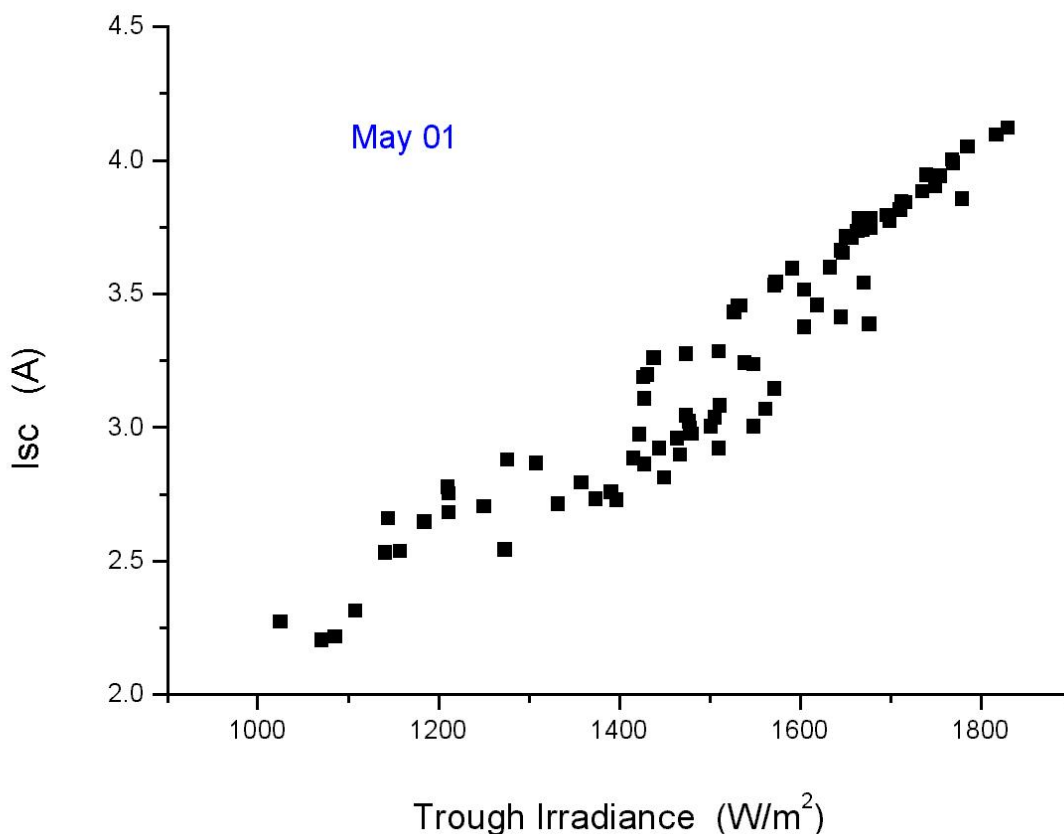
Με τη βοήθεια *Scripts* στο Origin επιλέγουμε μόνο εκείνες τις τιμές για τις οποίες η Trough Irradiance είναι μεγαλύτερη από 1000 W/m^2 και κατασκευάζουμε ένα διάγραμμα. Παρακάτω (σχήμα 22) φαίνεται το διάγραμμα του I_{sc} (ρεύμα βραχυκύκλωσης) σαν συνάρτηση της ακτινοβολίας πάνω στα solar cells (2X συγκέντρωση) για το μήνα Απρίλιο. Στο διάγραμμα αυτό, καθώς και στα επόμενα θα συμβολίζουμε με a την κλίση της προσαρμοζόμενης ευθείας και με R τη ρίζα του συντελεστή προσδιορισμού (αριθμός που μας δείχνει πόσο καλό είναι το fit μιας ευθείας).



Σχήμα 22

Από το διάγραμμα αυτό είναι προφανές ότι υπάρχει γραμμική εξάρτηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης από την ακτινοβολία σε μια φωτοβολταϊκή κυψελίδα. Το αρκετά καλό fit της ευθείας μας επιτρέπει να είμαστε ακόμα πιο σίγουροι για το συμπέρασμα αυτό. Όσο περισσότερη ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, τόσο περισσότερο ρεύμα παράγεται. Αυτό είναι αναμενόμενο και από τη θεωρία: Περισσότερη ακτινοβολία σημαίνει περισσότερα φωτόνια άρα και περισσότερα ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής, κατά συνέπεια περισσότερο ρεύμα διαμέσου του στοιχείου. Και η σχέση αυτή είναι γραμμική. Επομένως έχουμε εδώ μια επαλήθευση της θεωρίας από πειραματικά αποτελέσματα και άμεσα μετρούμενες ποσότητες. Η κλίση της καμπύλης δεν είναι τίποτα άλλο παρά μια απόδοση του στοιχείου. Για κάθε W/m^2 προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια των solar cells έχουμε 0.020 A ρεύμα ανά module (αφού η ένταση του ρεύματος αναφέρεται σε ένα reference module) με την προϋπόθεση να είναι οι ακροδέκτες του βραχυκυκλωμένοι. Πολλαπλασιάζοντας την τιμή αυτή με τον αριθμό των modules που είναι τοποθετημένα παράλληλα μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική ένταση του ρεύματος που θα διαρρέει το σύστημα που μας ενδιαφέρει. Επομένως είναι ένα σημαντικό στοιχείο που θα πρέπει να γνωρίζουμε.

Παρακάτω φαίνεται το ίδιο διάγραμμα, αλλά για το μήνα Μάιο (σχήμα 23). Παρατηρούμε ότι και εδώ η σχέση του ρεύματος βραχυκύκλωσης με την προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι γραμμική, πράγμα που είναι απολύτως αναμενόμενο.

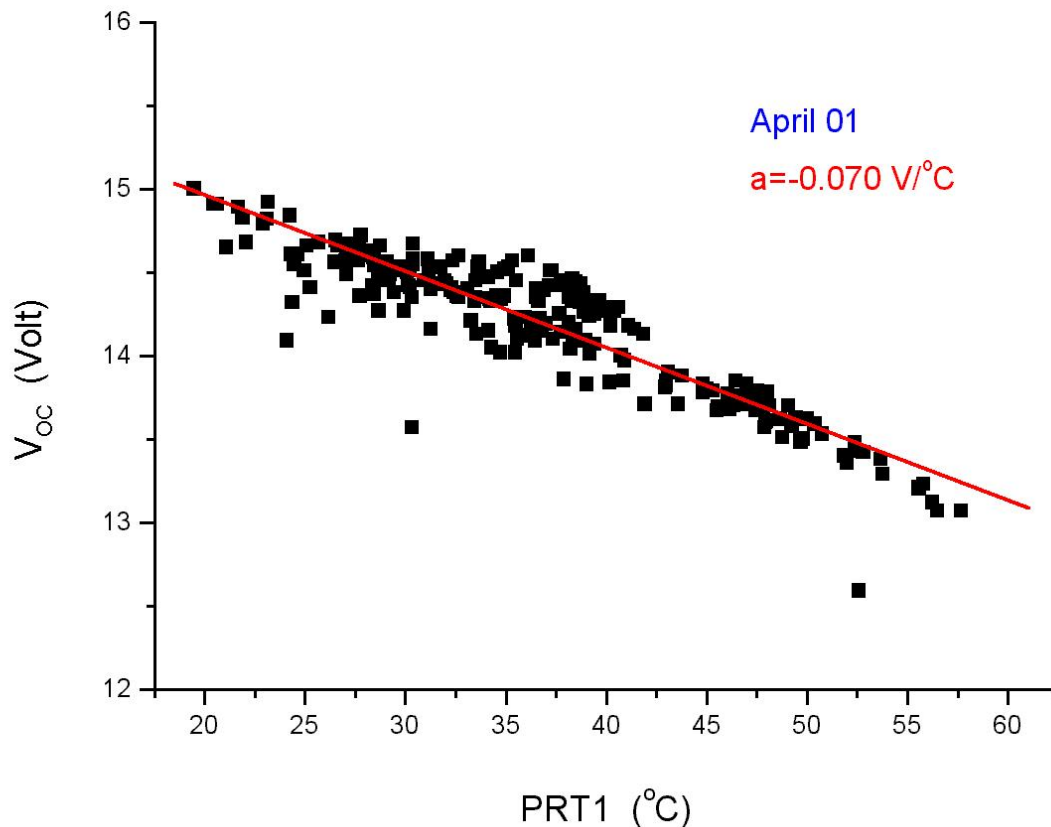


Σχήμα 23

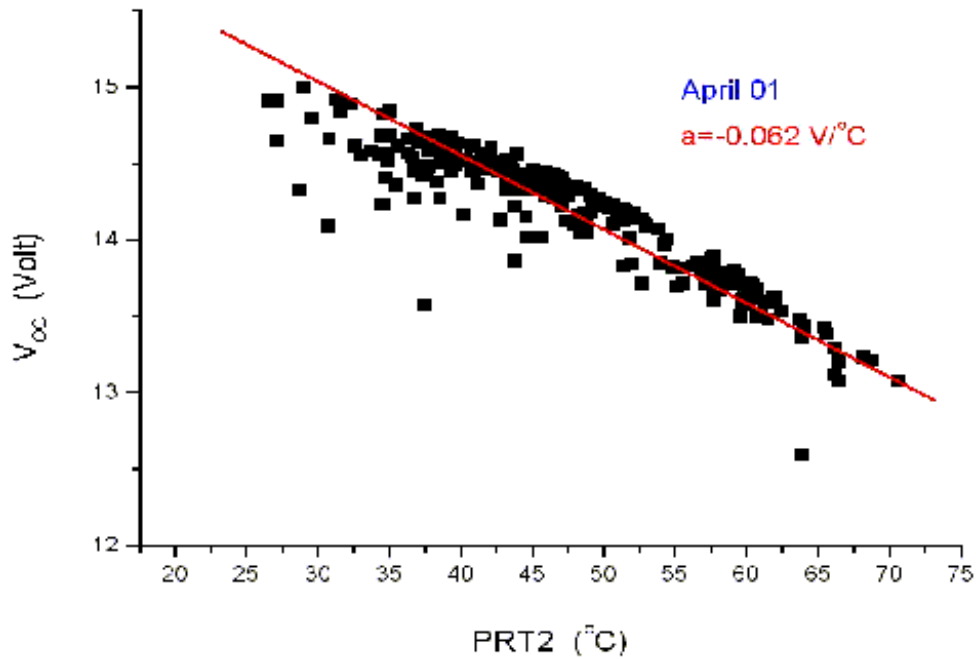
Εξάρτηση του V_{OC} από τη θερμοκρασία λειτουργίας.

Κάνουμε τα ίδια όπως και παραπάνω για τις τιμές της V_{OC} (τάση ανοιχτού κυκλώματος στο Reference module) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας. Έχουμε εδώ δυο θερμοκρασίες: Την PRT1 και την PRT2. Τα αρχικά αυτά προκύπτουν από τις λέξεις: Platinum Resistance Thermometer και είναι ειδικά θερμομέτρα τοποθετημένα το μεν PRT1 στην άκρη ενός module, και το δε PRT2 πίσω από μία κυψελίδα. Θα δούμε την εξάρτηση του V_{OC} και από τις δύο θερμοκρασίες.

Στα παρακάτω διαγράμματα (σχήματα 24 και 25) φαίνεται η εξάρτηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος από τη θερμοκρασία και για τα δύο θερμομέτρα για το μήνα Απρίλιο. Παρατηρώ ότι και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει ξεκάθαρη γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και θερμοκρασίας λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα για κάθε $^{\circ}\text{C}$ αύξησης της θερμοκρασίας στην άκρη των modules έχουμε μια πτώση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος κατά 0.070 Volt. Και για κάθε $^{\circ}\text{C}$ αύξησης της θερμοκρασίας στις φωτοβολταϊκές κυψελίδες έχουμε μια πτώση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος κατά 0.062 Volt. Είναι επομένως εμφανές ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του συστήματος, όπως είχε τονιστεί αναλυτικά στη θεωρία. Για ημέρες με πλήρη ηλιοφάνεια μπορεί να έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας μέχρι και 25-30 $^{\circ}\text{C}$ πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, πράγμα που συνεπάγεται μια πτώση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος κατά 2.1 Volt. Αυτό μπορεί να μειώσει αρκετά την απόδοση του συστήματος, αν δεν υπάρχει αρκετή ψύξη ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία λειτουργίας σε χαμηλά επίπεδα. Γι' αυτό το σκοπό επινοήθηκε η παθητική ψύξη των modules όπως αναφέρεται στη θεωρία. Αποδεικνύεται πάντως και με τα πειραματικά στοιχεία ότι η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του συστήματος και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό οποιουδήποτε φωτοβολταϊκού συστήματος, αν θέλουμε αυτό να αποδίδει τα μέγιστα.



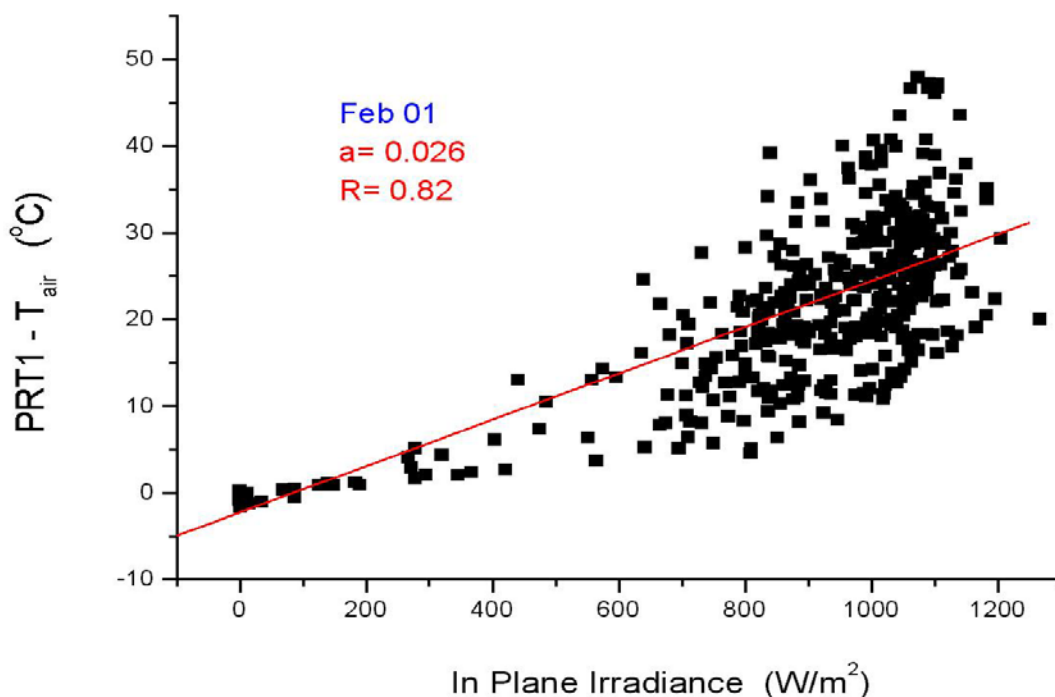
Σχήμα 24



Σχήμα 25

Εξάρτηση της ($T_{\lambda.ειτ.} - T_{\text{περιβ.}}$) από την ακτινοβολία.

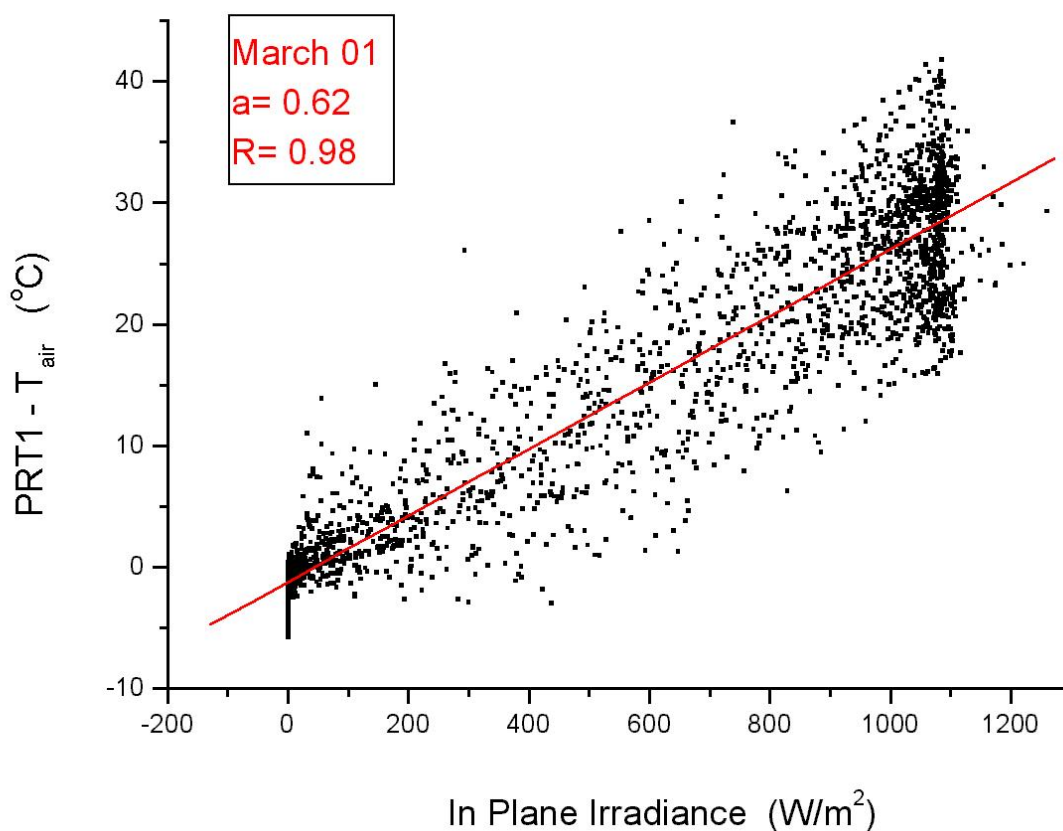
Με τη βοήθεια του Origin αφαιρούμε από τη θερμοκρασία λειτουργίας τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και αποθηκεύουμε τις τιμές σε μια νέα στήλη. Κατόπιν κάνουμε διάγραμμα ως προς την In Plane Irradiance. Το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 26) αναφέρεται σε τιμές για τις οποίες η In Trough Irradiance (2X συγκέντρωση) είναι μεγαλύτερη από 1000 W/m^2 .



Σχήμα 26

Παρατηρούμε ότι υπάρχει εξάρτηση της επιπλέον θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στα modules σε σχέση με την ακτινοβολία. Αυτό είναι λογικό, μιας και η θερμότητα που αναπτύσσεται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι ανάλογη του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά τους, δηλαδή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι όσο περισσότερη ηλιοφάνεια έχουμε τόσο ανεβαίνει η θερμοκρασία των modules πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τόσο λιγότερη απόδοση έχουν αυτά. Όμως η απόδοσή τους αυξάνεται με την αύξηση της ακτινοβολίας. Επομένως είναι απαραίτητη η όσο το δυνατόν καλύτερη ψύξη για να αποδώσουν τα μέγιστα.

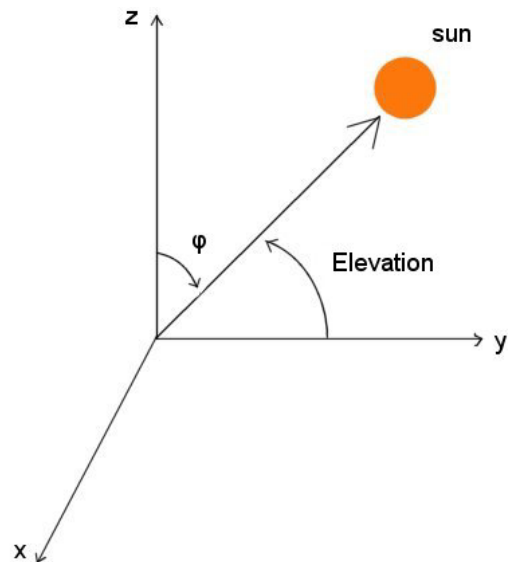
Στο επόμενο διάγραμμα (σχήμα 27) φαίνεται το ίδιο, αλλά για το μήνα Μάρτιο και για όλες τις τιμές της In Plane Irradiance. Παρατηρώ ότι και εδώ υπάρχει γραμμική περίπου εξάρτηση της επιπλέον θερμοκρασίας από την ακτινοβολία, πράγμα απολύτως αναμενόμενο και λογικό.



Σχήμα 27

ΣΤ΄ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΥ ΑΡΧΙΜΗΔΗ

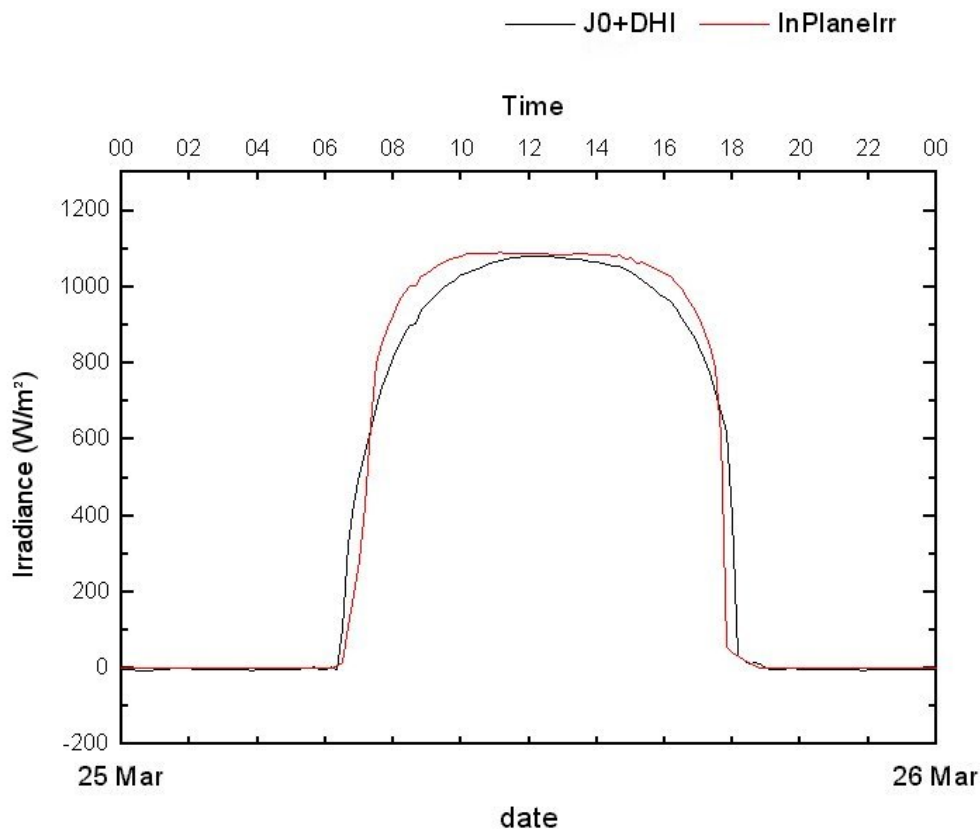
Θα επιχειρήσουμε τώρα να υπολογίσουμε την ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα κεκλιμένο, στρεφόμενο προς τον ήλιο επίπεδο με βάση τα : GHI, DHI, και τη γωνία ύψους (elevation). Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα που αναφέρθηκε πιο πάνω υπολογίζουμε το elevation για ένα οριζόντιο επίπεδο στο γεωγραφικό πλάτος και μήκος του Αρχιμήδη. Κατόπιν με βάση το παρακάτω σχήμα κάνουμε τα εξής:



Σχήμα 28

$$Direct = GHI - DHI = J_0 \cos \phi \Rightarrow J_0 = \frac{GHI - DHI}{\cos \phi} = \frac{GHI - DHI}{\cos(90^\circ - Elevation)} \Rightarrow J_0 = \frac{GHI - DHI}{\sin(Elevation)}$$

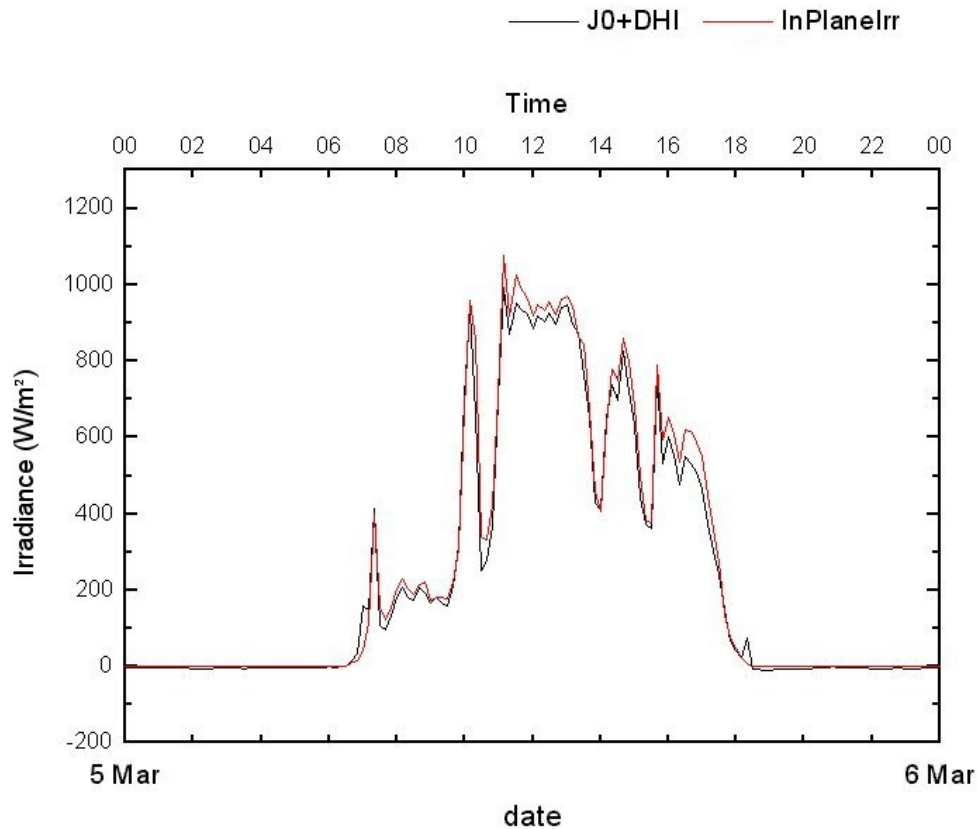
Υπολογίζουμε έτσι άλλη μια στήλη στις μετρήσεις μας που έχει το J_0 και κατόπιν προσθέτουμε σε αυτό το DHI για να βρούμε την ακτινοβολία στο επίπεδο του Αρχιμήδη. Αυτή θα πρέπει να ισούται με το In Plane Irradiance που είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στο επίπεδο του Αρχιμήδη, η οποία μετράται με ένα πυρανόμετρο τύπου Licor τοποθετημένο στην ακμή των κατόπτρων ανάκλασης. Θα μας δοθεί έτσι η ευκαιρία να ελέγξουμε την ακρίβεια των μετρήσεών μας με βάση τις θεωρητικές προβλέψεις και υπολογισμούς. Με τη βοήθεια του Origin απεικονίζουμε ταυτόχρονα τις δυο ποσότητες (In Plane Irradiance και $J_0 + DHI$) και κάνουμε σύγκριση.



Σχήμα 29

Παρατηρούμε με βάση το πιο πάνω διάγραμμα (σχήμα 29) ότι οι δυο ποσότητες δε συμπίπτουν ακριβώς, αλλά έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Αυξάνονται κατά τη διάρκεια της ημέρας μέχρι μια μέγιστη τιμή, μένουν για λίγο σταθερές και κατόπιν μειώνονται πάλι μέχρι το μηδέν κατά τη διάρκεια του απογεύματος. Το διάγραμμα αυτό είναι για πλήρως καθαρό ουρανό, δηλαδή για μια ηλιόλουστη ημέρα του Μαρτίου.

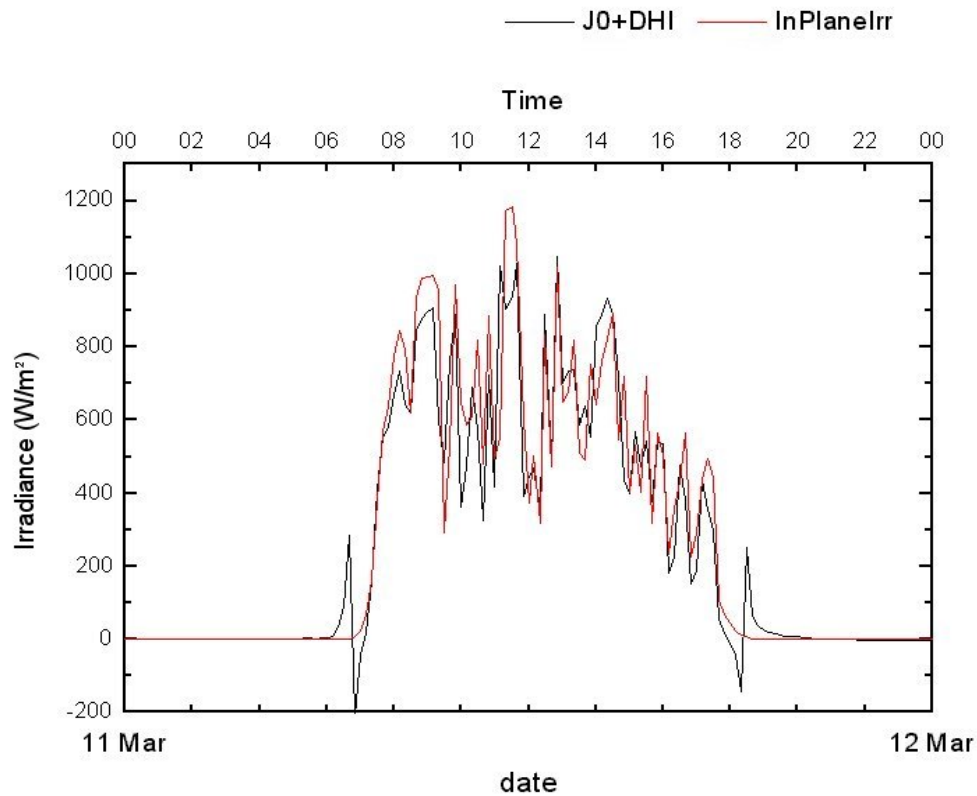
Ας δούμε τώρα το διάγραμμα για κάποιες άλλες ημέρες:



Σχήμα 30

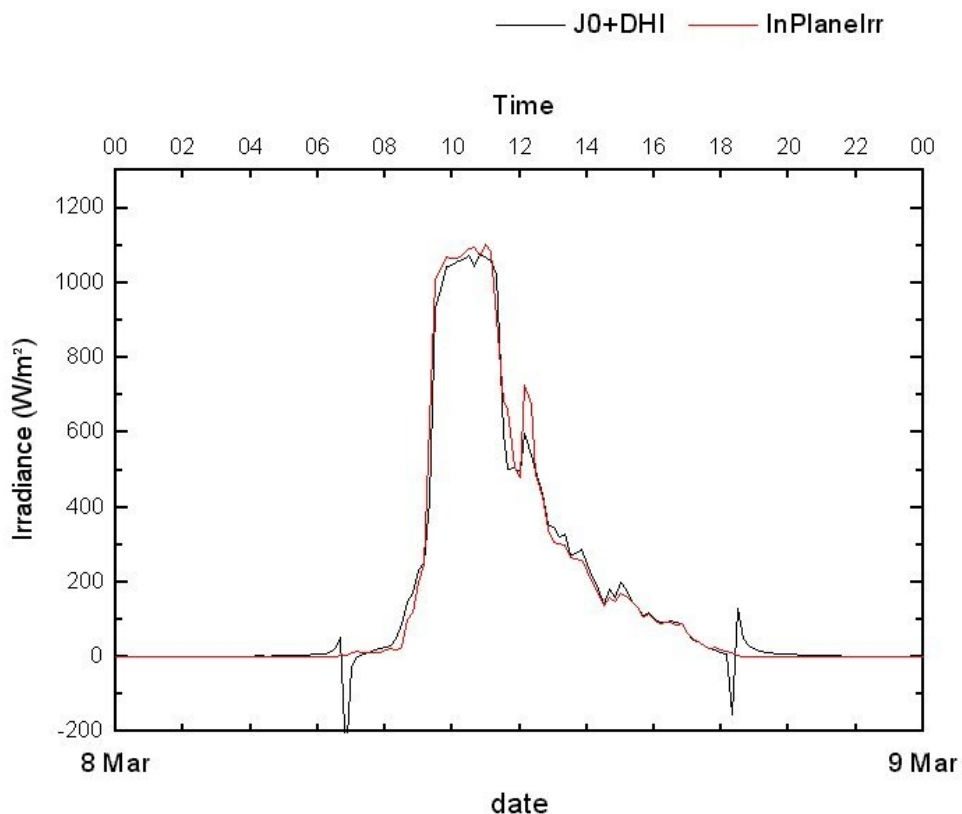
Σ' αυτή τη μέρα του Μαρτίου είχε σποραδική συννεφιά με αποτέλεσμα να έχουμε το παραπάνω διάγραμμα (σχήμα 30) με τις πολλές μεταβολές της ακτινοβολίας. Παρατηρούμε ότι η σύμπτωση των δυο καμπυλών είναι σχεδόν πλήρης, γεγονός που φανερώνει την καλή ακρίβεια των υπολογισμών μας. Οι μετρήσεις που παίρνονται από τα πυρανόμετρα στο φωτοβολταϊκό είναι σε συμφωνία με τις θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές.

Στο σχήμα 31 φαίνεται επίσης μια άστατη ημέρα του Μαρτίου. Και εδώ φαίνεται ότι η σύμπτωση των δυο καμπυλών είναι αρκετά καλή. Οι απότομες και ανεξήγητες μεταβολές στην τιμή του $J_0 + DHI$ στις 6 το πρωί και στις 7 περίπου το απόγευμα οφείλονται σε λάθη λόγω των πολύ μικρών γωνιών που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς μας κατά τις ώρες αυτές και δε θα πρέπει να μας απασχολήσουν καθόλου.



Σχήμα 31

Τέλος στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 32) φαίνεται μια ακόμα ημέρα με αρκετές διαφοροποιήσεις ως προς τη συνεφιά και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Και πάλι η σύμπτωση είναι πάρα πολύ καλή, γεγονός που φανερώνει την καλή ακρίβεια των υπολογισμών μας. Δε θα πρέπει φυσικά να λάβουμε υπόψη μας την «περίεργη» συμπεριφορά κατά την αυγή και τη δύση του ήλιου όπως εξηγήθηκε και παραπάνω, αλλά να περιοριστούμε στη διάρκεια της ημέρας.

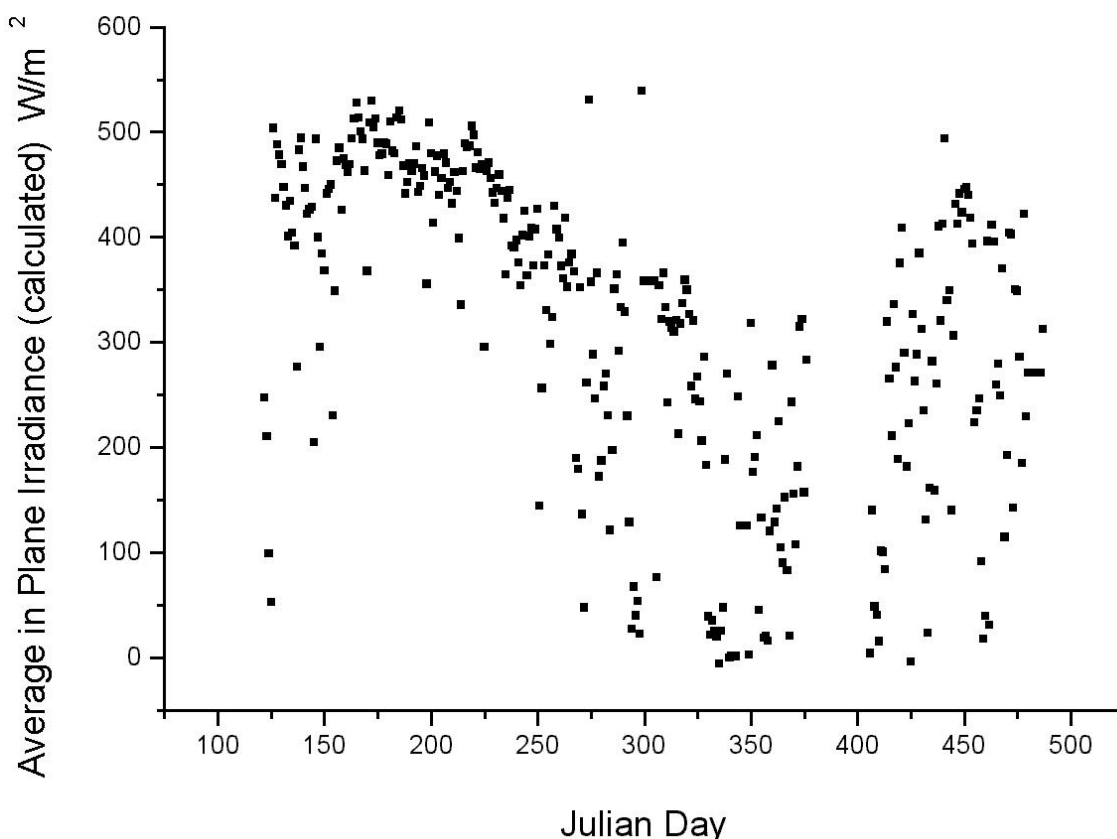


Σχήμα 32

Ζ΄ ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Με βάση τα όσα συζητήθηκαν παραπάνω μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε τη μέση ημερήσια ενέργεια στο κεκλιμένο στρεφόμενο προς τον ήλιο επίπεδο του *Αρχιμήδη*. Για το σκοπό αυτό θα χρειαστούμε μετρήσεις ενός ολόκληρου έτους, από το Μάιο του 2000 έως το Μάιο του 2001. Χρησιμοποιώντας το Origin φορτώνουμε τις τιμές για ένα ολόκληρο μήνα και έπειτα δίνοντας εντολές υπό τη μορφή *script* υπολογίζουμε το μέσο όρο των τιμών για μια ολόκληρη μέρα, δηλαδή για 144 τιμές κάθε φορά. Έτσι προκύπτει μια νέα στήλη που περιέχει τις μέσες ημερήσιες τιμές σε KW/m^2 για κάθε ημέρα του μήνα. Έπειτα για να υπολογίσουμε την ημερήσια ενέργεια στο επίπεδο του *Αρχιμήδη* πολλαπλασιάζουμε την τιμή αυτή με το 24 και βρίσκουμε KWh/m^2 . Στους υπολογισμούς θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές των GHI, DHI με τη μέθοδο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές για την In Plane Irradiance. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι το ίδιο και για τις δυο μεθόδους, μιας και όπως είδαμε το σφάλμα είναι πολύ μικρό. Ένα μικρό επίσης σφάλμα υπεισέρχεται από τη διόρθωση που θα πρέπει να κάνουμε κατά τη διεύθυνση Βοράς-Νότος λόγω του ότι ο *Αρχιμήδης* έχει σταθερή κλίση 30° προς το Νότο. Θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε με το συνημίτονο του Elevation στο επίπεδο του *Αρχιμήδη*. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε την In Plane Irradiance δε χρειάζεται τέτοια διόρθωση.

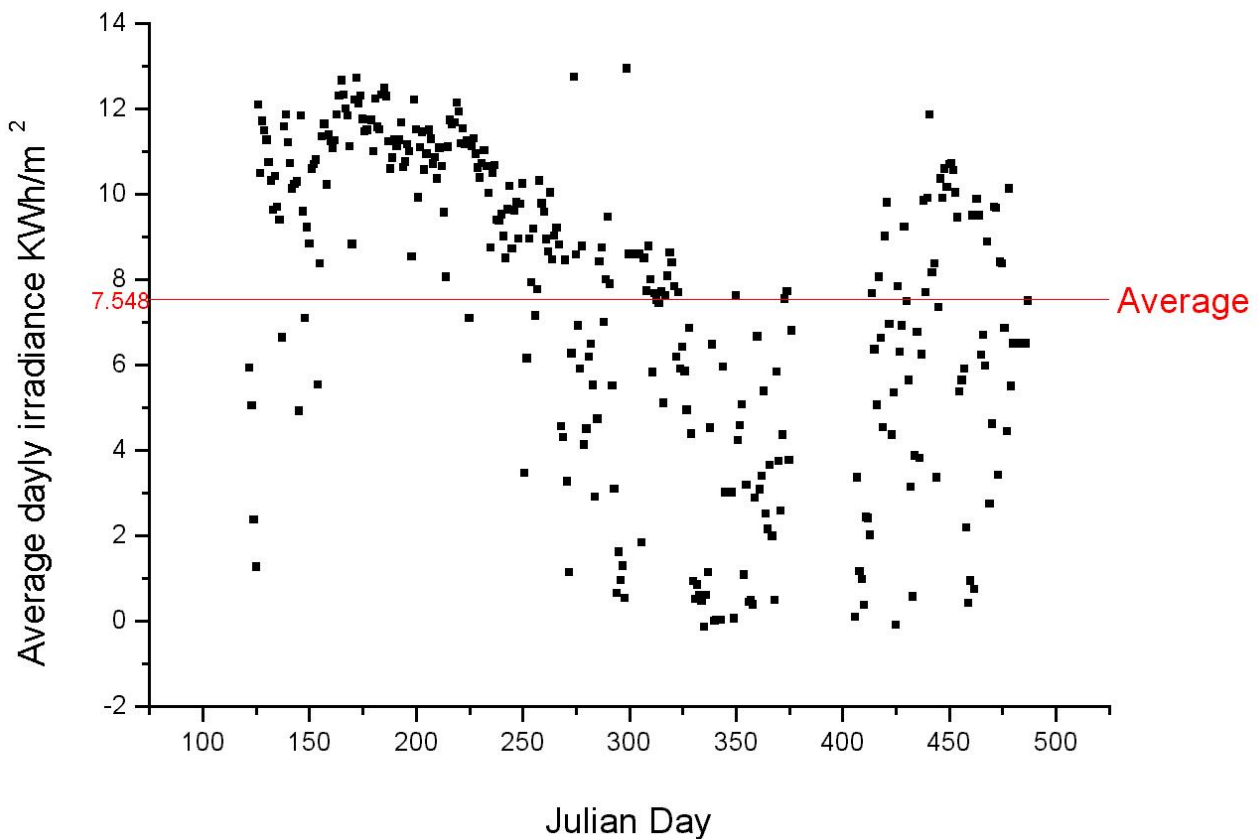
Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 33) φαίνεται η μέση ημερήσια ενέργεια στο κεκλιμένο στρεφόμενο επίπεδο σαν συνάρτηση της Ιουλιανής ημέρας. Οι μέρες αρχίζουν από το 122 (Μάιος 2000) και τελειώνουν στο 487 (τελευταία ημέρα του Απριλίου 2001), δηλαδή για ένα ολόκληρο χρόνο.



Σχήμα 33

Όπως παρατηρούμε για τους πρώτους μήνες (Μάιος και μετά) υπάρχει πολύ έντονη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο του *Αρχιμήδη* (μερικές φορές μεγαλύτερη από 500 W/m^2). Δε θα πρέπει να ξεχνάμε βέβαια ότι αυτές είναι μέσες τιμές και είναι απόλυτα λογικό να έχουμε τέτοια ένταση ακτινοβολίας, μιας και συμπεριλαμβάνεται ολόκληρη η μέρα και η νύκτα στον υπολογισμό. Κατόπιν για τους χειμερινούς μήνες έχουμε αισθητή μείωση στην ένταση της ημερήσιας ακτινοβολίας και πολλές μέρες με συννεφιά. Από το Μάρτιο όμως και μετά έχουμε πάλι έντονα ηλιόλουστες ημέρες και λιγότερα διαστήματα με συννεφιά. Το κενό στο διάγραμμα που παρατηρείται από την ημέρα 377 έως και την ημέρα 405 οφείλεται σε προβλήματα των πυρανομέτρων και δε θα πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Στο *σχήμα 34* φαίνεται η ολική ημερήσια ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο επίπεδο του *Αρχιμήδη* για το ίδιο χρονικό διάστημα. Οι τιμές για την ακτινοβολία έχουν υπολογιστεί σε KWh/m^2 πολλαπλασιάζοντας τις αντίστοιχες τιμές της μέσης ημερήσιας ενέργειας με το 24. Από το διάγραμμα αυτό είναι πολύ εύκολο να δούμε τη μεγάλη διαφορά της προσπίπτουσας ενέργειας στις διάφορες εποχές του χρόνου και να υπολογίσουμε μια μέση τιμή ολικής ημερήσιας ακτινοβολίας για όλο το έτος ή για κάθε μήνα χωριστά. Προκύπτει ότι η μέση ημερήσια τιμή για όλο το χρόνο είναι 7.528 KW/m^2 .



Σχήμα 34

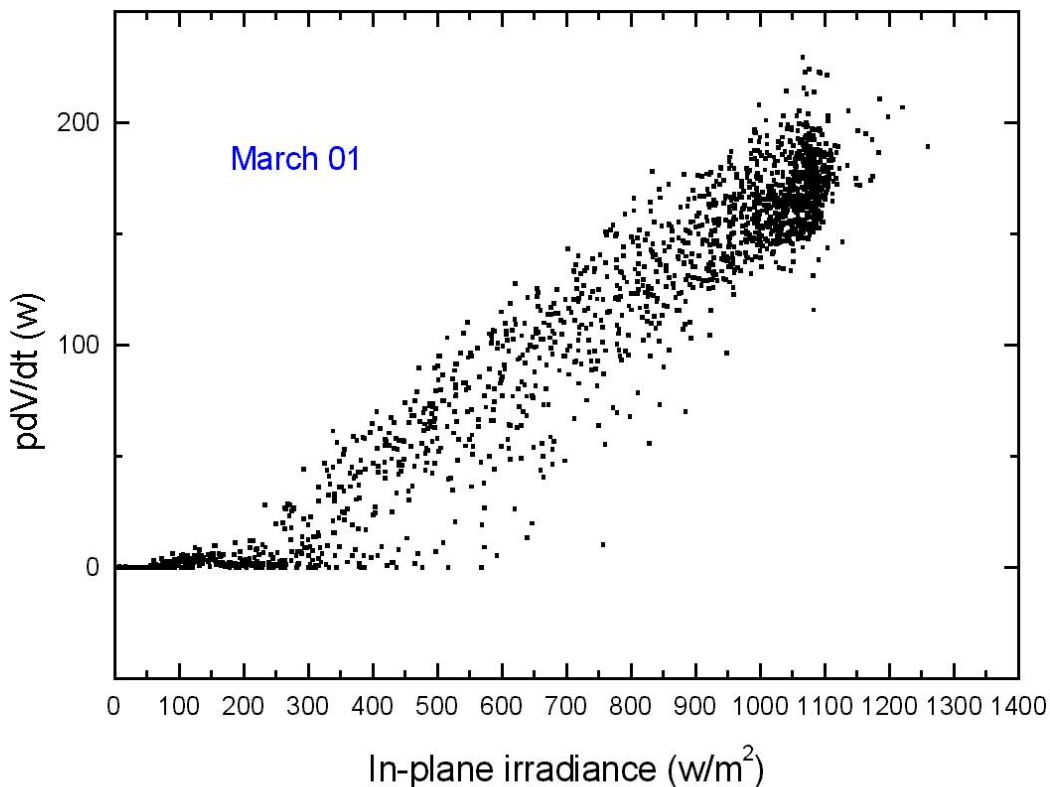
Θα επιχειρήσουμε τώρα να υπολογίσουμε την απόδοση του συστήματος. Για το σκοπό αυτό θα χρειαστούμε μερικές νέες ποσότητες. Αυτές είναι:

- Το μηχανικό έργο $PdVdt$ που είναι το έργο που παράγεται από την αντλία του νερού, δηλαδή το τελικό έργο του όλου συστήματος. Αυτό μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση: $PdVdt = (\text{Water Pressure} + 0.3) * (\text{Water Flow}) * 27.8$ όπου Water Pressure είναι η μετρούμενη πίεση από ένα μανόμετρο, Water

Flow η ροή του αντλούμενου νερού σε m^3/h και ο παράγοντας 27.8 για να μετατρέψουμε τις μονάδες σε Watt. Ο παράγοντας 0.3 διορθώνει το λάθος που υπεισέρχεται από την υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης νερού στο πηγάδι και του σημείου μέτρησης της πίεσης. Για τους χειμερινούς μήνες είναι 0,3 για τους μήνες Μάιο και Ιούνιο 0.5 και για τον Αύγουστο και το Σεπτέμβριο 0.7.

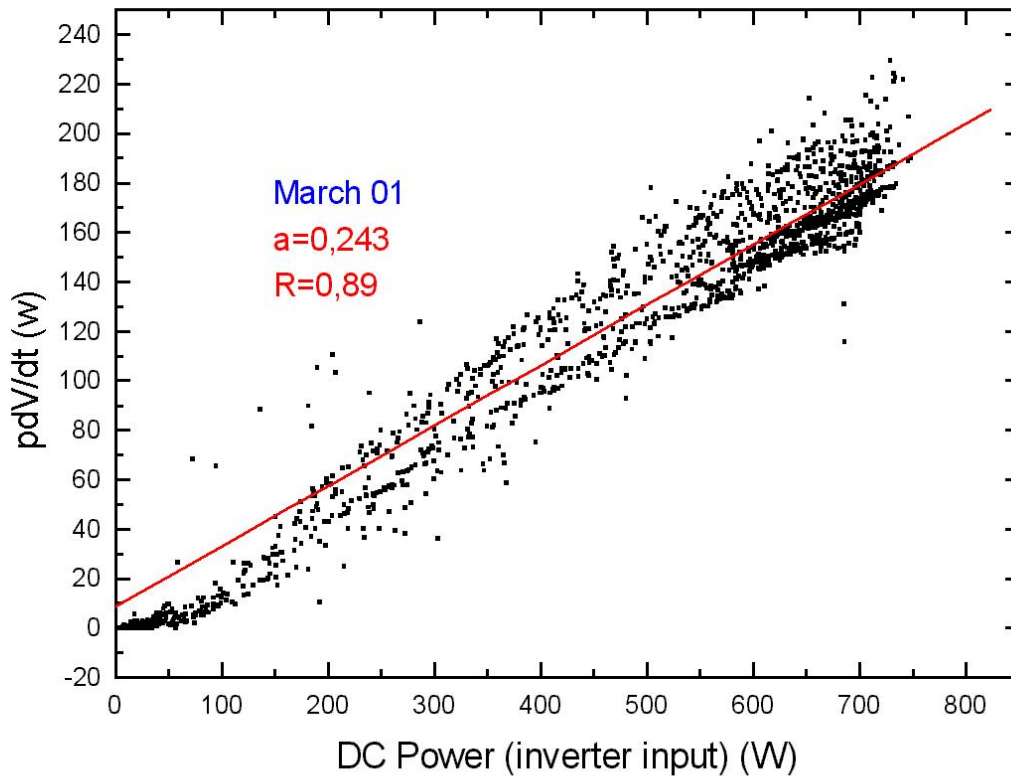
- DC POWER: Είναι η ηλεκτρική είσοδος στον inverter μετρημένη σε Watt. Αυτή προκύπτει από το γινόμενο $I_{Gen} * V_{Gen}$ που είναι το γινόμενο της έντασης του ρεύματος στην είσοδο του inverter επί τη μετρούμενη τάση στα άκρα του.
- In Plane Solar energy: Είναι η ολική ημερήσια ενέργεια που προσπίπτει στο κεκλιμένο στρεφόμενο προς τον ήλιο επίπεδο. Μετριέται σε KWh/m^2 και υπολογίζεται παίρνοντας το μέσο όρο της In Plane Irradiance (ακτινοβολία στο επίπεδο του Αρχιμήδη) και πολλαπλασιάζοντας με το 24. Όλες οι ανωτέρω ποσότητες υπολογίζονται με τη βοήθεια *scripts* σε υπολογιστικά φύλλα του Origin για συστηματοποίηση και ευκολία.

Στο *σχήμα 35* φαίνεται το μηχανικό έργο $PdVdt$ σαν συνάρτηση της In Plane Irradiance για το μήνα Μάρτιο. Παρατηρούμε ότι για τιμές της In Plane Irradiance μικρότερες από $300 W/m^2$ δεν παράγεται καθόλου μηχανικό έργο ή παράγεται ελάχιστο. Πάνω όμως από αυτό το «όριο» της ακτινοβολίας η σχέση είναι περίπου γραμμική, με το έργο να αυξάνεται ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα solar cells. Αυτό συμβαίνει γιατί το ρεύμα και κατά συνέπεια η ισχύς είναι ανάλογα της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επομένως όσο μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας έχουμε, τόσο μεγαλύτερη ισχύς αποδίδεται στην αντλία του νερού, και τόσο περισσότερο έργο παράγεται. Για τιμές μικρότερες από $300W/m^2$ δεν παράγεται έργο γιατί δεν έχουμε καθόλου direct ακτινοβολία, δηλαδή όλη η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι από σκέδαση (πλήρης συννεφιά) και τα solar cells δε μπορούν να αποδώσουν ρεύμα ικανό να περιστρέψει την αντλία του νερού. Επομένως δεν παράγεται καθόλου έργο από την αντλία.



Σχήμα 35

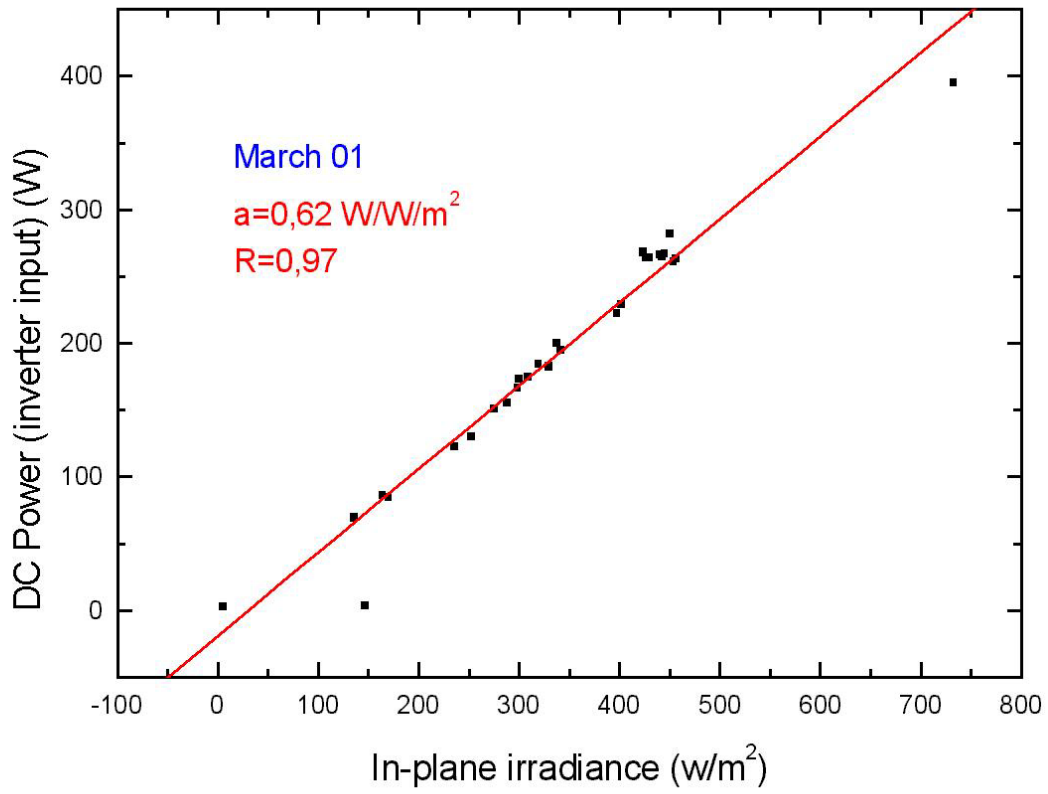
Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 36) φαίνεται το μηχανικό έργο της αντλίας σαν συνάρτηση την εξόδου του inverter για το μήνα Μάρτιο. Παρατηρούμε ότι η σχέση είναι γραμμική και προσαρμόζουμε μια ευθεία στα πειραματικά δεδομένα. Προκύπτει έτσι η απόδοση της αντλίας που είναι **0.243** ή **24.3%**. (συμπεριλαμβανομένου και του inverter, αφού στην ουσία αποτελούν ένα ενιαίο σύστημα).



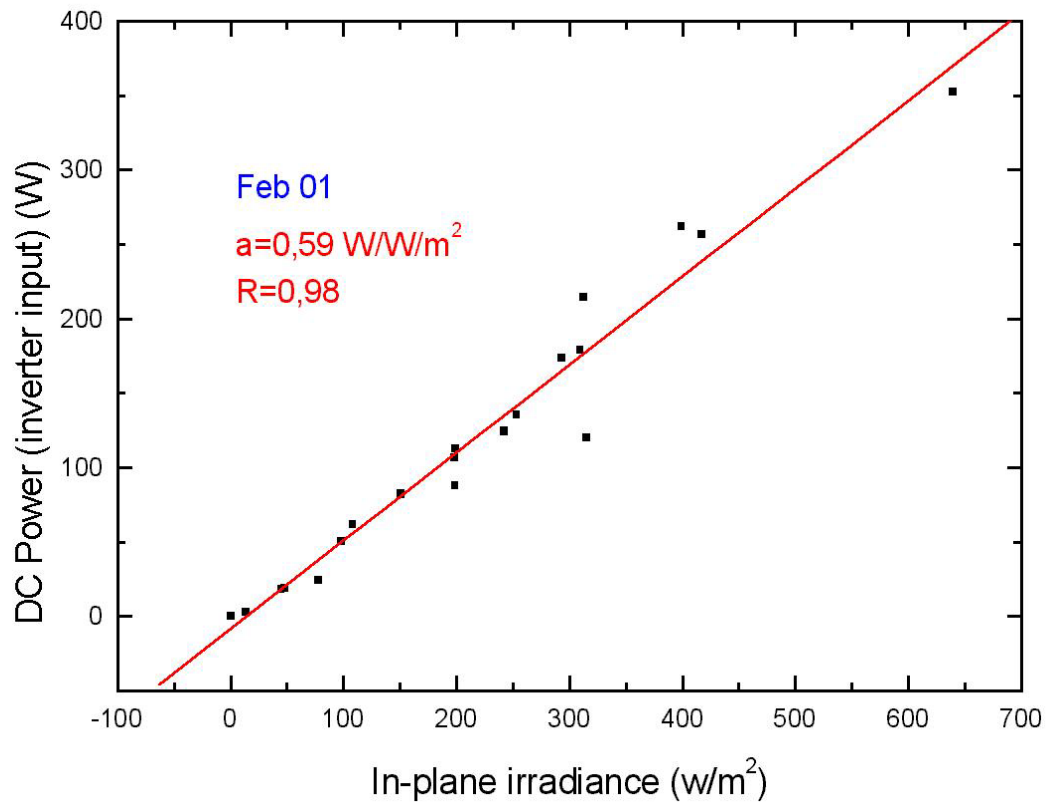
Σχήμα 36

Στο σχήμα 37 απεικονίζεται η είσοδος στον inverter σαν συνάρτηση της In Plane Irradiance για το μήνα Μάρτιο. Προσαρμόζοντας μια ευθεία στα δεδομένα προκύπτει η απόδοση για το φωτοβολταϊκό σύστημα που είναι **0.62 W/W/m²** ή **62%**. Αυτό δε θα πρέπει να μας παραξενεύει, μιας και δεν είναι ακριβώς η απόδοση των solar cells, αλλά μια ποσότητα που δε λαμβάνει υπόψη της την επιφάνεια (εμβαδόν) των φωτοβολταϊκών κυψελίδων. Πράγματι το DC Power μετριέται σε Watt, ενώ η In Plane Irradiance σε Watt/m². Έτσι αν θα θέλαμε να υπολογίσουμε την απόδοση των solar cells θα έπρεπε να διαιρέσουμε με το συνολικό εμβαδόν τους. Εδώ όμως υπολογίζουμε μια απόδοση που έχει να κάνει με όλο το σύστημα ανεξάρτητα από το εμβαδόν του. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι οι τιμές που φαίνονται στο διάγραμμα είναι μέσες ημερήσιες τιμές και όχι τιμές ανά 10 λεπτά.

Στο σχήμα 38 φαίνεται ακριβώς το ίδιο διάγραμμα, αλλά για το μήνα Φεβρουάριο. Και πάλι η απόδοση δεν αναφέρεται στα solar cells, αλλά σε ολόκληρη την επιφάνεια του συστήματος. Εδώ έχουμε μια απόδοση που φτάνει τα **0.59 W/W/m²** ή **59%** και ελάχιστα καλύτερο fit για την ευθεία.

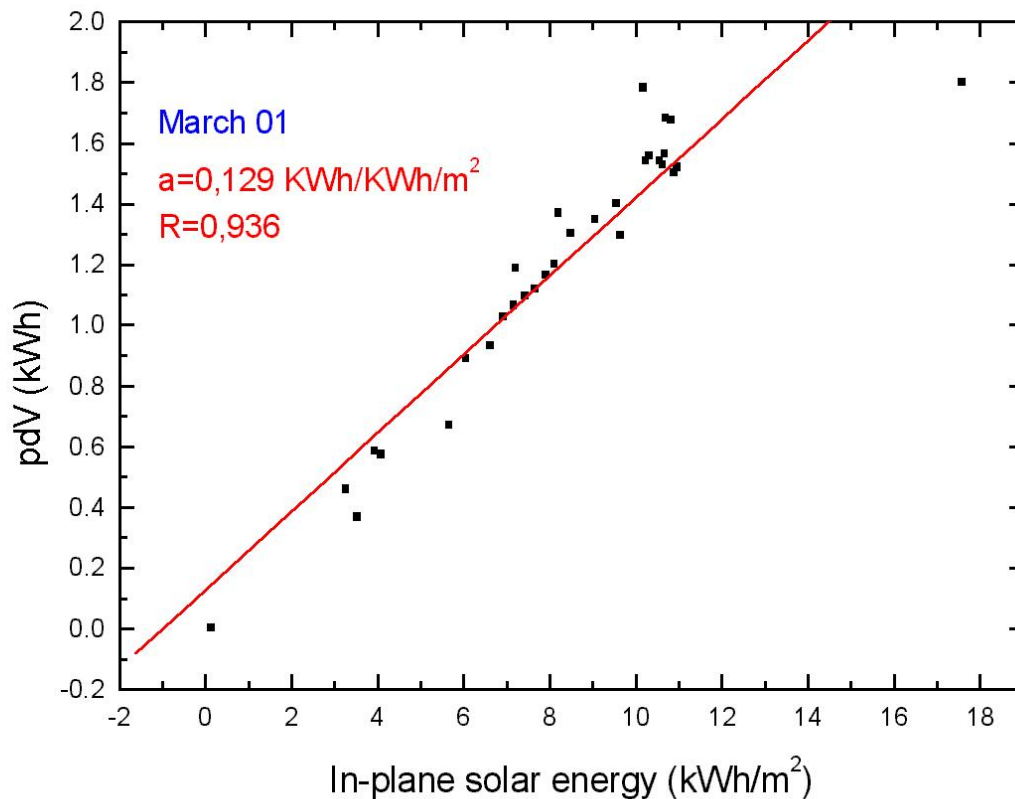


Σχήμα 37



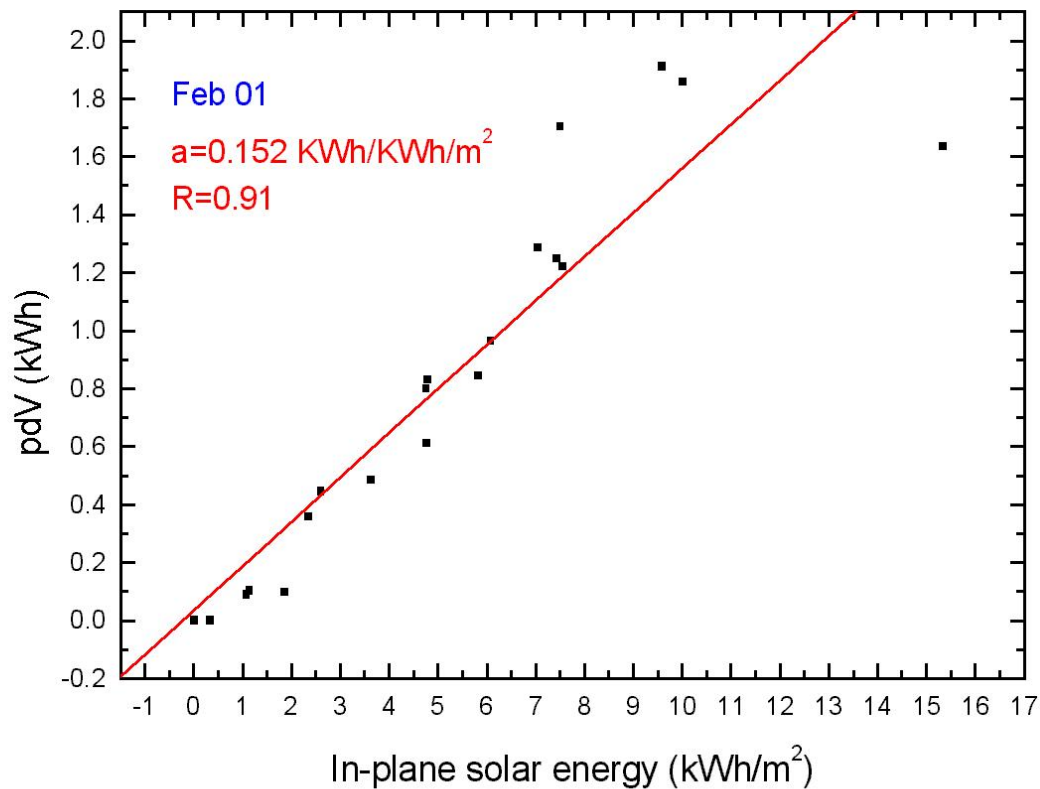
Σχήμα 38

Στο *σχήμα 39* φαίνεται το διάγραμμα του PdV σε KWh (ολική ημερήσια απόδοση) σαν συνάρτηση της ολικής ημερήσιας ακτινοβολίας στο επίπεδο του *Αρχιμήδη* (in plane solar energy), μετρημένης σε KWh/m^2 για το μήνα Μάρτιο. Προσαρμόζοντας μια ευθεία παίρνω την ολική απόδοση του συστήματος, δηλαδή το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ωφέλιμο έργο. Έτσι έχω μιαν απόδοση **0.129 KWh/KWh/m^2** ή **12.9%**. Και πάλι η απόδοση αυτή είναι για όλη την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων, επομένως δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική απόδοση ενός solar cell, αλλά όλων μαζί σαν ένα σύστημα. Δηλαδή το σύστημα μπορεί να αποδώσει 0.129 KWh ωφέλιμου έργου (άντληση νερού) για κάθε KWh/m^2 ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω του.



Σχήμα 39

Στο *σχήμα 40* φαίνεται ακριβώς το ίδιο διάγραμμα, αλλά για το μήνα Φεβρουάριο. Παρατηρούμε ότι η απόδοση είναι λίγο μεγαλύτερη, γεγονός που οφείλεται στην διαφορά ηλιοφάνειας μεταξύ Φεβρουαρίου και Μαρτίου, αλλά και στην έλλειψη στοιχείων για τη Global Irradiance κατά τις πρώτες μέρες του Φεβρουαρίου. Έτσι δε μπορούμε να υπολογίσουμε μέσες τιμές για όλο το μήνα, αλλά για περίπου 20 μέρες του μόνο. Η απόδοση εδώ είναι **0.152 KWh/KWh/m^2** ή **15.2%**.



Σχήμα 40

Τέλος θα δούμε στον πίνακα 3 μερικά συγκεντρωτικά στοιχεία που προκύπτουν από μετρήσεις ή από υπολογισμούς με βάση μετρημένες ποσότητες, όπως το GHI ή το DHI και τις γωνίες στροφής του ήλιου. Για παράδειγμα η 5^η στήλη του πίνακα (average hydraulic energy per day calculated) προκύπτει με πολλαπλασιασμό της 3^{ης} στήλης επί 0.6 (solar to DC efficiency) επί την απόδοση της αντλίας νερού. Η 7^η στήλη προκύπτει από πολλαπλασιασμό της 5^{ης} επί 360/25, όπου 25 είναι το μανομετρικό υψόμετρο. Η 8^η στήλη προκύπτει από την 7^η με πολλαπλασιασμό επί 30 (ημέρες του μήνα).

Παρατηρούμε ότι τους καλοκαιρινούς μήνες, όπως θα ήταν αναμενόμενο έχουμε αυξημένη άντληση νερού λόγω αυξημένης ακτινοβολίας και ελαττωμένης συννεφιάς. Η χαμηλότερη τιμή παρατηρείται το μήνα Δεκέμβριο, πράγμα απολύτως φυσιολογικό και αναμενόμενο για το κλίμα της Κρήτης. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς από τις τιμές των GHI, DHI και την τροχιά του ήλιου αναμένεται να αντληθούν περίπου 6372 m³ νερού σε 25m υψόμετρο μέσα σε ένα ολόκληρο χρόνο. Έτσι αν ξέρουμε το GHI και το DHI για κάποια ορισμένη τοποθεσία στην οποία θέλουμε να εγκαταστήσουμε το σύστημα *Αρχιμήδης*, για ένα ολόκληρο χρόνο, μπορούμε να υπολογίσουμε με αρκετά καλή ακρίβεια την αναμενόμενη ποσότητα νερού που θα αντληθεί. Αυτό δίνει στο σύστημα ένα σημαντικό πλεονέκτημα, καθώς με απλές μετρήσεις που μπορούν να βρεθούν εύκολα είναι δυνατόν να γνωρίζουμε την απόδοσή του σε οποιοδήποτε μέρος της γης, χωρίς να το έχουμε ακόμα εγκαταστήσει. Έτσι ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες μπορεί να επιλεγεί το κατάλληλο μέγεθος του συστήματος για το σκοπό που θέλουμε να εξυπηρετήσει. Με τον τρόπο αυτό εξοικονομούνται σημαντικά ποσά και πολύτιμος χρόνος, κάνοντας το σύστημα *Αρχιμήδης* πιο προσιτό και πιο οικονομικό.

Month	Average in-plane solar energy per day <i>measured</i> (KWh/m ²)	Average in-plane solar energy per day <i>calculated from GHI and DHI</i> (kWh/m ²)	Average hydraulic energy per day (pdV) (kWh)	Average hydraulic energy per day (pdV) (kWh) <i>calculated</i>	Average water volume pumped per day (m ³)	Average water volume pumped per day (m ³) <i>calculated</i>	Water volume pumped (m ³) <i>calculated</i>
Apr00	-	7.213		1.17		16.83	504.79
May00	-	8.928		1.45		20.83	624.82
Jun00	-	10.636		1.72		24.81	744.35
Jul00	-	10.491		1.70		24.47	734.20
Aug00	-	10.149		1.64		23.68	710.27
Sep00	-	7.929		1.28		18.50	554.90
Oct00	-	5.468		0.89		12.76	382.67
Nov00	5.229	5.781	0.795	0.94	10.36	13.49	404.58
Dec00	3.092	2.668	0.478	0.43	7.78	6.22	186.72
Jan01	3.244	2.963	0.604	0.48	10.34	6.91	207.36
Feb01	4.909	4.570	0.825	0.74	13.92	10.66	319.83
Mar01	8.195	8.001	1.186	1.30	18.04	18.66	559.94
Apr01	6.149	6.249	-	1.01	-	14.58	437.33
May01	8.344	8.445	-	1.37	-	-	-
Total							6372

Πίνακας 3

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρότυπο *Αρχιμήδης* είναι ένα πολλά υποσχόμενο φωτοβολταϊκό σύστημα, το οποίο υπερτερεί σημαντικά σε σχέση με τα κλασσικά συστήματα. Προσφέρει μεγαλύτερη απόδοση λόγω παθητικής παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου, οικονομία στα solar cells με τη χρήση κατόπτρων για 2X συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας και καλύτερη παθητική ψύξη των modules, πράγμα που ανεβάζει τη συνολική απόδοση κατά ένα παράγοντα **2.08** σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Για επιτυχή παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου απαιτούνται περισσότερα από **300 W/m²**, δηλαδή απαιτείται η παρουσία άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και όχι μόνο διαχεόμενης. Έτσι σε περιπτώσεις με αρκετή νέφωση το σύστημα δε μπορεί να παρακολουθήσει την τροχιά του ήλιου, πράγμα όχι και τόσο σημαντικό, μιας και σε τέτοιες περιπτώσεις τα solar cells δεν παράγουν ρεύμα ικανό να οδηγήσει την αντλία. Η καλή ψύξη του συστήματος εξασφαλίζει την απόδοσή του αφού με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται σημαντικά το ενεργειακό κέρδος που έχουμε από τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Επίσης με τους κατάλληλους υπολογισμούς και με τη γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας για ένα έτος μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση που αναμένεται να έχει το σύστημα σε οποιοδήποτε μέρος της γης θελήσουμε να εγκατασταθεί. Μπορεί επίσης να υπολογιστεί η αναμενόμενη ποσότητα νερού που θα αντληθεί ανά έτος (ή ανά μήνα) χωρίς να απαιτείται καμία άλλη παράμετρος, εκτός από την απόδοση της αντλίας.. Αυτό κάνει το σύστημα πολύ ευέλικτο και πολύ οικονομικό, μιας και δε χρειάζονται ιδιαίτερες μελέτες πριν από την εγκατάσταση και τη λειτουργία του. Αρκεί να επιλεγεί το κατάλληλο μέγεθος για το σκοπό που θα χρησιμοποιηθεί. Στην περίπτωση της Κρήτης (τοποθεσία *Λιβάδι*) αναμένεται να αντληθούν 6372 κυβικά μέτρα νερού σε ύψος 25m στη διάρκεια ενός έτους.

Σκοπός του προγράμματος στο μέλλον είναι να μελετηθούν περαιτέρω η απόδοσή και οι διάφορες παράμετροι του όλου συστήματος ώστε να καταστεί πλήρως αξιοποιήσιμο και εμπορικά εκμεταλλεύσιμο. Πραγματοποιείται ανάλυση της αγοράς και γίνεται σημαντική προσπάθεια για τη μείωση του κόστους κατασκευής με συστηματοποίηση και μαζική παραγωγή. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει ακόμα μεγαλύτερο οικονομικό και ενεργειακό κέρδος σε σχέση με τα σημερινά συμβατικά συστήματα και θα καλύψει πλήρως τους σκοπούς και τις προσδοκίες του προγράμματος *Αρχιμήδης*.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Π. TZANETAKΗΣ : «Εισαγωγή στη φυσική των ημιαγωγών» (Πανεπιστήμιο Κρήτης)
- HANS JOACHIM MOLLER: «Semiconductors for solar cells» (Artech house)
- Mid term assessment report and 3rd periodic progress report for *Archimedes* PV system
- R.S. MULLER & T.I. KAMINS: «Device electronics for integrated circuits» 2nd Ed. (Willey)
- S.M. SZE : «Physics of semiconductor devices»
- R. WALRAVEN «Solar Energy» (20) p. 393 (1978)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1) Ρουτίνα υπολογισμού Αζιμουθίου και Elevation σε Quick Basic

```
Sub sunae(year%, day%, hours%, minutes%, seconds%, zone%, lati, longi, A!, E!)
```

```
delyr% = year% - 1980
```

```
leap% = Int(delyr% / 4)
```

```
T = hours% + (minutes% + seconds% / 60) / 60 + zone%
```

```
Time! = delyr% * 365 + leap% + day% - 1 + T / 24
```

```
If delyr% = leap% * 4 Then Time! = Time! - 1
```

```
If delyr% < 0 And delyr% <> leap% * 4 Then Time! = Time! - 1
```

```
theta! = (360 * Time! / 365.25) * rad!
```

```
G! = -0.031271 - 0.000000453963 * Time! + theta!
```

```
e1! = 4.900968 + 0.000000367474 * Time! + (0.033434 - 0.0000000023 * Time!) * Sin(G!)
```

```
e2! = 0.000349 * Sin(2 * G!) + theta!
```

```
e! = e1! + e2!
```

```
eps! = 0.40914 - 0.0000000062149 * Time!
```

```
sel! = Sin(e!)
```

```
a1! = sel! * Cos(eps!)
```

```
a2! = Cos(e!)
```

```
ra! = atan2(a1!, a2!)
```

```
If ra! < 0 Then ra! = ra! + twopi!
```

```
decl! = asin(sel! * Sin(eps!))
```

```
st! = 1.759335 + twopi! * (Time! / 365.25 - delyr%) + 0.0000003694 * Time!
```

```
If st! > twopi! Then st! = st! - twopi!
```

```
s! = st! + (T * 15 - longi) * rad!
```

```
If s! > twopi! Then s! = s! - twopi!
```

```
H! = ra! - s!
```

```
phi! = lati * rad!
```

```
E! = asin(Sin(phi!) * Sin(decl!) + Cos(phi!) * Cos(decl!) * Cos(H!))
```

```
A! = asin(Cos(decl!) * Sin(H!) / Cos(E!)) / rad!
```

```
If Sin(E!) >= Sin(decl!) / Sin(phi!) Then GoTo exodos
```

```
If A! < 0 Then A! = A! + 360
```

```
A! = 180 - A!
```

```
exodos:
```

```
E! = E! / rad!
```

```
End Sub
```

2) Ρουτίνα υπολογισμού ATAN2

```

FUNCTION atan2 (A1, A2)
IF A1 > 0 AND A2 > 0 THEN
atan2 = ATN(A1 / A2)
ELSEIF A1 < 0 AND A2 < 0 THEN
atan2 = ATN(A1 / A2) - pi!
ELSEIF A1 > 0 AND A2 < 0 THEN
atan2 = ATN(A1 / A2) + pi!
ELSEIF A1 < 0 AND A2 > 0 THEN
atan2 = ATN(A1 / A2)
ELSEIF A2 = 0 AND A1 > 0 THEN
atan2 = pi! / 2
ELSEIF A2 = 0 AND A1 < 0 THEN
atan2 = -pi! / 2
END IF
END FUNCTION

```

3) Ρουτίνα υπολογισμού ASIN

```

FUNCTION asin (A1)
A2 = SQR(1 - A1 * A1)
IF A2 = 0 AND A1 > 0 THEN
asin = pi! / 2
ELSEIF A2 = 0 AND A1 < 0 THEN
asin = -pi! / 2
ELSE
asin = ATN(A1 / A2)
END IF
END FUNCTION

```