



Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα της Κρήτης

Πτυχιακή Εργασία

«Λεπτομερής μελέτη για την επίπτωση της σκόνης στην
απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων»

Σπουδαστής

Χαλαμπαλάκης Γεώργιος

Υπεύθυνος Καθηγητής

Μαυροματάκης Φώτης

Ηράκλειο Κρήτης 2014

Εγκρίθηκε από την εξεταστική επιτροπή την 31/03/2014

.....

Φ. Μαυροματάκης

.....

Λ. Ναουμίδης

.....

Δ. Χρηστάκης

.....
ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ε. ΧΑΛΑΜΠΑΛΑΚΗΣ

Απόφοιτος του Τμήματος Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Ιδρύματος Κρήτης.

© ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ε. ΧΑΛΑΜΠΑΛΑΚΗΣ 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος μου.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τεχνολογικού Ιδρύματος της Κρήτης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θεωρώ τιμή και υποχρέωση να αναφέρω τους ανθρώπους οι οποίοι βρέθηκαν δίπλα μου, συμπαριστάμενοι στο απαιτητικό έργο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Μαυροματάκη Φώτη για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Φωτοβολταϊκών και Ενέργειας στο χώρο του Τ.Ε.Ι. Ηρακλείου.

Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τους κυρίους Στεφανάκη Ιωάννη και Σιδεράκη Κυριάκο για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Ακόμα ευχαριστώ τους γονείς μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης για τις παροχές του με εργαστηριακό εξοπλισμό.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του παράγοντα ρύπανσης με σκόνη που εμφανίζεται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι εκτεθειμένα σε εξωτερικούς χώρους και επηρεάζονται από τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες είτε φυσικά φαινόμενα είτε ανθρώπινες παρεμβάσεις. Συγκεκριμένα η συσσωρευμένη ρύπανση προκαλεί μείωση της παραγόμενης ημερήσιας ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με αυτή που θα απέδιδε αν η επιφάνεια ήταν καθαρή. Για τη μελέτη του φαινομένου αυτού δημιουργήθηκαν πειραματικές διατάξεις στο χώρο του εργαστήριο «Φωτοβολταϊκό Πάρκο» του ΤΕΙ Κρήτης ώστε να καταγραφούν οι απώλειες ενέργειας που οφείλονται στην ύπαρξη κόκκων σκόνης.

Η πρώτη πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία έχουν τοποθετηθεί στην ίδια κλίση και το ένα από τα δύο παραμένει μόνιμα καθαρό και το άλλο σε συνθήκες περιβάλλοντος. Τα δύο πλαίσια βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους ώστε να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια υπό τις ίδιες συνθήκες. Υπάρχει κατάλληλη μετρητική διάταξη η οποία καταγράφει την παραγόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης ημερησίως ώστε να γίνεται η μεταξύ τους σύγκριση.

Η δεύτερη πειραματική διάταξη είναι μία συσκευή μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας για δύο περιπτώσεις με σκόνη και χωρίς. Αυτό υλοποιείται με τη βοήθεια μηχανισμού κίνησης ο οποίος μεταφέρει ένα μετρητικό όργανο ηλιακής ακτινοβολίας πίσω από ένα λεπτό τζάμι. Το τζάμι έχει χωριστεί σε δύο κατάστασης

όπου το μισό παραμένει μόνιμα καθαρό και το άλλο με τη σκόνη του περιβάλλοντος.

Τέλος υπάρχει μία τρίτη διάταξη η οποία αποτελείται από μικρές γυάλινες επιφάνειες οι οποίες είναι εκτεθειμένες στον ίδιο χώρο με τις ίδιες συνθήκες. Αυτό έγινε για να μπορεί να παρατηρηθεί η σκόνη που επικάθεται επάνω στις επιφάνειες αν διαστήματα. Επίσης, έγιναν κάποιες προσπάθειες υπολογισμού της μάζας της σκόνης που επικάθεται.

Η ανάλυση των μετρήσεων και τα συμπεράσματα που προέκυψαν για χρονικό διάστημα της παρούσας μελέτης δίνουν αξιόλογα αποτελέσματα και παράλληλα αφήνουν περιθώρια για την βαθύτερη μελέτη του φαινομένου. Η ρύπανση που επικάθεται στα πλαίσια αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα κυρίως για τα ξηρά κλίματα. Σε περιοχές με σπάνιες κατακρημνίσεις παρατηρείται συσσώρευση της σκόνης και οι απώλειες ενέργειας είναι εντονότερες.

Abstract

The objective of this thesis is to study the soiling effect observed on photovoltaic panels. It is known that anything exists on PV module surface prevents the maximum electrical power is produced. The reason is that sun light is scattered and it cannot reach the PV cells that produce electricity. In this work three innovative experiments have been done in order to cover this phenomenon widely.

The first experiment consists of two same type PV modules placed with the same angle. The first PV module is constantly clean and the second is free on soiling effect. There is digital device that measures there output current and temperature instantly, so it is able the comparison to be done.

The second experiments is automatic device that has mechanical and electrical parts and it is able to move a solar cell under a thin glass. The glass simulates the PV module surface where the soiling effect takes place. The half glass is protected from soiling but the other is constantly uncovered. Therefore, the solar cell takes down measures for two cases of the soiling and clean glass surface.

The scope of the last experiment was the soiling effect to be observed on small glass surfaces and simultaneously the mass of the soiling to be measured. The calculation are extremely difficult because the mass is very low and the glasses need constantly observation. The experiments provide useful results and can help significantly in power losses calculations. Power production and the losses are very important factors in designing PV systems because they are directly linked to the profit.

Πίνακας περιεχομένων

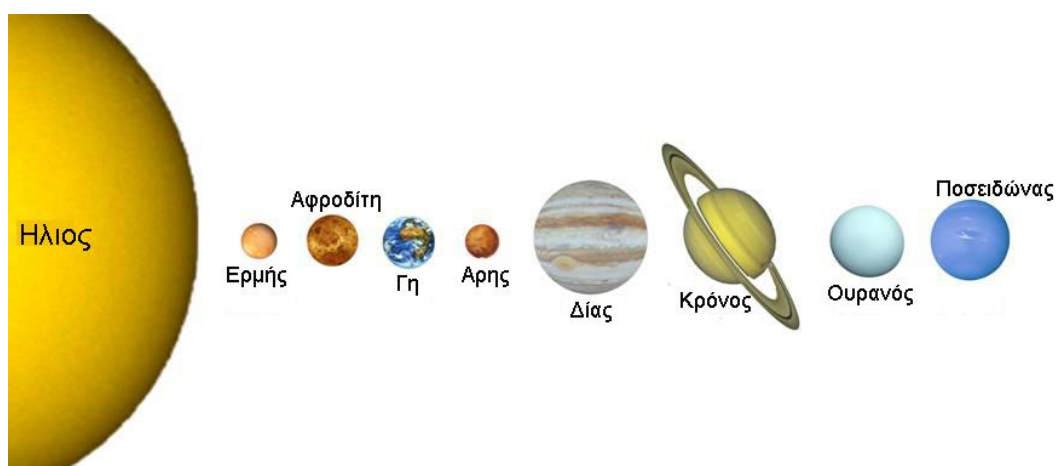
1. Εισαγωγή	11
1.1. Ηλιακή Ενέργεια	11
1.2. Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	13
1.3. Απόδοση Φωτοβολταϊκών.....	15
1.4. Επίδραση θερμοκρασίας στη λειτουργία των ΦΒ πλαισίων	22
1.5. Επίδραση ρύπανσης – σκόνης στα ΦΒ πλαίσια	24
2. Πειραματικές Διατάξεις.....	37
2.1. Περιγραφή	37
2.2. Φωτοβολταϊκά Πλαίσια Σύγκρισης.....	38
2.3. Μέτρηση Μάζας Σκόνης	39
2.4. Συσκευή Αυτόματης Καταγραφής Σκόνης	40
2.4.1. Σχεδιασμός – Υλοποίηση Συσκευής	41
2.4.2. Ηλεκτρολογικός πίνακας	50
3. Αυτοματισμός Πειραματικής Διάταξης.....	51
4. Καταγραφή Δεδομένων.....	52
5. Ανάλυση Αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα	57
5.1. Σύγκριση απόδοσης.....	57
5.2. Υπολογισμός μάζας σκόνης	61
6. Βελτιώσεις Πειραματικών διατάξεων	64
7. Βιβλιογραφία.....	65
8. Παράρτημα Α.....	67

8.1.	Πρόγραμμα ελέγχου λειτουργίας Data Logger CR10	67
8.2.	Πρόγραμμα για τον υπολογισμό μετρήσεων	70

1. Εισαγωγή

1.1. Ηλιακή Ενέργεια

Ο Ήλιος είναι το πλησιέστερο αστέρι στον ουρανό με μάζα ίση με $1.99 \times 10^{30} \text{kg}$ και σε σύγκριση με την μάζας του ηλιακού συστήματος κατέχει το 99.86%. Βρίσκεται περίπου 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα μακριά από τη Γη, μία απόσταση η οποία δεν παραμένει σταθερή λόγω της εκλειπτικής τροχιάς του. Αν η τροχιά της γης ήταν τέλειος κύκλος και ο άξονας της γη κάθετος στο επίπεδο της τροχιάς τότε δε θα είχαμε εποχές και η διάρκεια της ημέρας και της νύχτας θα παρέμενε σταθερή για όλο το έτος. Όμως κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει και ο άξονας της γης έχει κλίση ως προς το επίπεδο της τροχιάς, αυτό σημαίνει ότι για κάποιο παρατηρητή στο βόρειο ημισφαίριο ο ήλιος το καλοκαίρι κατά το μεσημέρι βρίσκεται πιο ψηλά ενώ το χειμώνα πιο χαμηλά.



Εικόνα 1 Το ηλιακό σύστημα με επίκεντρο τον ήλιο να ξεχωρίζει σε διαστάσεις.

Η τροχιά της γης είναι έλλειψη και η γη κινείται με διαφορετική ταχύτητα σε κάθε θέση της τροχιάς. Η κλίση του άξονα και το σχήμα της τροχιάς μαζί κάνουν τον ήλιο το καλοκαίρι να ανατέλλει πιο νωρίς το πρωί και να δύει πιο αργά το βράδυ και αντίθετα με το χειμώνα.

Υπάρχουν βέβαια 4 κομβικά σημεία στο ημερολόγιο, τα οποία για το βόρειο ημισφαίριο είναι α) στις 21-22 Δεκεμβρίου το χειμερινό ηλιοστάσιο δηλαδή τη μικρότερη μέρα και τη μεγαλύτερη νύχτα, β) η ημέρα αρχίζει να μεγαλώνει και η νύχτα να μικραίνει μέχρι τις 20-21 Μαρτίου που εξισώνονται και τότε έχουμε την εαρινή ισημερία, γ) στη συνέχεια η μέρα εξακολουθεί να μεγαλώνει μέχρι το θερινό ηλιοστάσιο 20-21 Ιουνίου με την μεγαλύτερη μέρα και την μικρότερη νύχτα, δ) τέλος η ημέρα μικραίνει μέχρι να ισοφαρίσει τη νύχτα στην φθινοπωρινή ισημερία 22-23 Σεπτεμβρίου όπου συνεχίζει να μικραίνει μέχρι το χειμερινό ηλιοστάσιο (Φραγκιαδάκης, 2009).

Ο υπολογισμός του έτους των 365,25 ημερών έγινε από την αρχαιότητα με την παρατήρηση της επίδρασης που έχει πάνω στην Γη η περιφορά της γύρω από τον Ήλιο. Παρόλο που ο Ήλιος είναι ακίνητος, οπτικά φαίνεται ότι κινείται, από την Ανατολή προς τη Δύση, λόγω ακριβώς της κίνησης της Γης πάνω στην τροχιά της. Κάθε μέρα η Γη βρίσκεται σε διαφορετική θέση - γωνία από αυτήν που βρισκόταν την προηγούμενη. Έτσι κάθε φορά που η Γη συμπληρώνει μία πλήρη περιφορά γύρω από τον Ήλιο, φαίνεται ότι ήταν ο Ήλιος αυτός που συμπλήρωσε έναν κύκλο γύρω από τη Γη, πάνω στην εκλειπτική. Η εκλειπτική δηλαδή δεν είναι τίποτε άλλο παρά η απεικόνιση, ή η προέκταση πάνω στην ουράνια σφαίρα, της γήινης τροχιάς γύρω από τον Ήλιο.

Από τη σύγκριση της εκλειπτικής με τον ουράνιο ισημερινό (την προέκταση δηλαδή του ισημερινού της Γης και την αποτύπωσή του πάνω στον ουράνιο θόλο) φαίνεται ότι οι δύο αυτοί κύκλοι δε συμπίπτουν, αλλά αντίθετα τέμνονται, σχηματίζοντας γωνία ίση με 23 μοίρες και 27 πρώτα λεπτά, λόγω της κλίσης που έχει ο άξονας της Γης σε σχέση με το επίπεδο που σχηματίζει η εκλειπτική. Η γωνία αυτή ονομάζεται «λόξωση της εκλειπτικής», και τα δύο σημεία στα οποία τέμνονται οι δύο κύκλοι ονομάζονται «ισημερινά σημεία».

1.2. Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

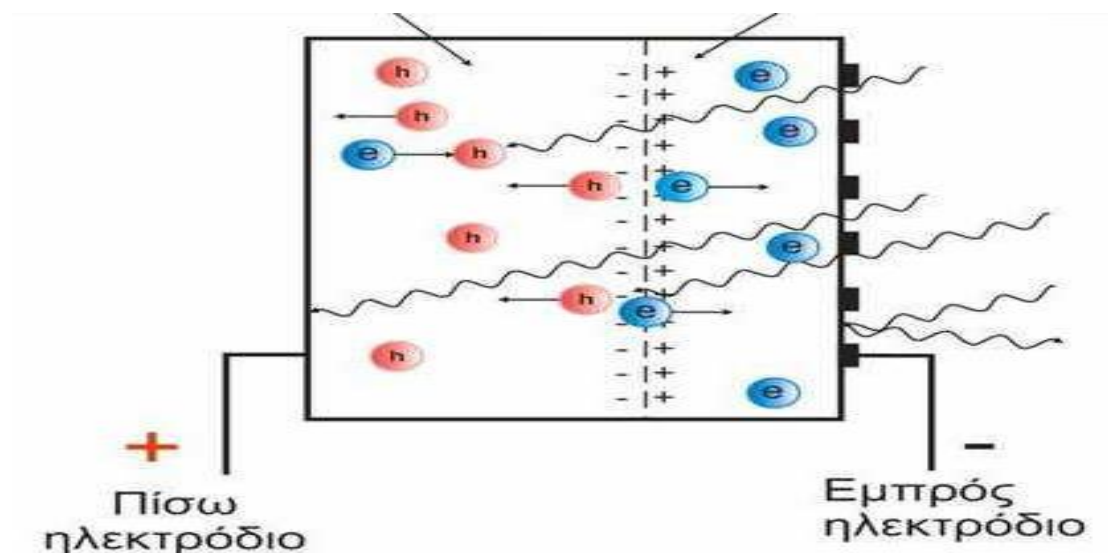
Η πρώτη γνωριμία του ανθρώπου με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε το 1839 όταν ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel (1820 - 1891) ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά την διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν οι Adams (1836 - 1915) και ο φοιτητής του Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο Se όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός Czochralski (1885 - 1953) πρόσθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου Si με την σχετική έρευνα του και η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα. Μια σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949 όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell το 1954 από

τους Charin, Fuller και Pearson. Η απόδοση του ήταν 6 % εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Όταν το φως προσπίπτει σε μια Φωτοβολταϊκή κυψέλη είτε ανακλάται, είτε την διαπερνά, είτε απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός ουσιαστικά σημαίνει την μετατροπή του σε μια άλλη μορφή ενέργειας (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας) η οποία συνήθως είναι η θερμότητα. Η ηλιακή ακτινοβολία έρχεται με την μορφή πακέτων ενέργειας ή φωτονίων. Μέρος των φωτονίων που προσπίπτουν σε μια διάταξη φωτοβολταϊκού κελιού απορροφούνται σε όλη τη διάταξη δημιουργώντας «ελεύθερα» ηλεκτρόνια και οπές. Αυτά που δημιουργούνται στην περιοχή της επαφής και εκτός αυτής αλλά πολύ κοντά της, βρίσκονται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο της επαφής. Με την επίδραση του πεδίου της επαφής τα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται προς τις περιοχές με όμοιους φορείς: τα ηλεκτρόνια προς την περιοχή n και οι οπές προς την περιοχή p.

Στο κομμάτι της επαφής τύπου n πλέον έχουμε μια περίσσεια ηλεκτρονίων και στη μεριά του ημιαγωγού τύπου p περίσσεια οπών. Αυτή η περίσσεια των ηλεκτρονίων μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα εάν τοποθετήσουμε δύο μεταλλικά πλέγματα, στο πάνω μέρος της επαφής n και στο κάτω της επαφής p και συνδέσουμε τα ηλεκτρόδια αυτά με ένα καταναλωτή, ώστε να κλείσει ένας αγωγίμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται. Τα ΦΒ στοιχεία συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα μεταξύ τους, δημιουργούμενης μιας μονάδας, που ονομάζεται ΦΒ πλαίσιο. Συνήθως ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες μεγάλου φόρτου. Έτσι δημιουργούνται μεγαλύτερες μονάδες με σύνδεση ΦΒ πλαισίων σε

σειρά ή και παράλληλα, ανάλογα με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα, που ονομάζονται συστοιχίες.



Εικόνα 2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθώς τα φωτόνια προσπίπτουν στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου θέτουν σε κίνηση τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του υλικού.

1.3. Απόδοση Φωτοβολταϊκών

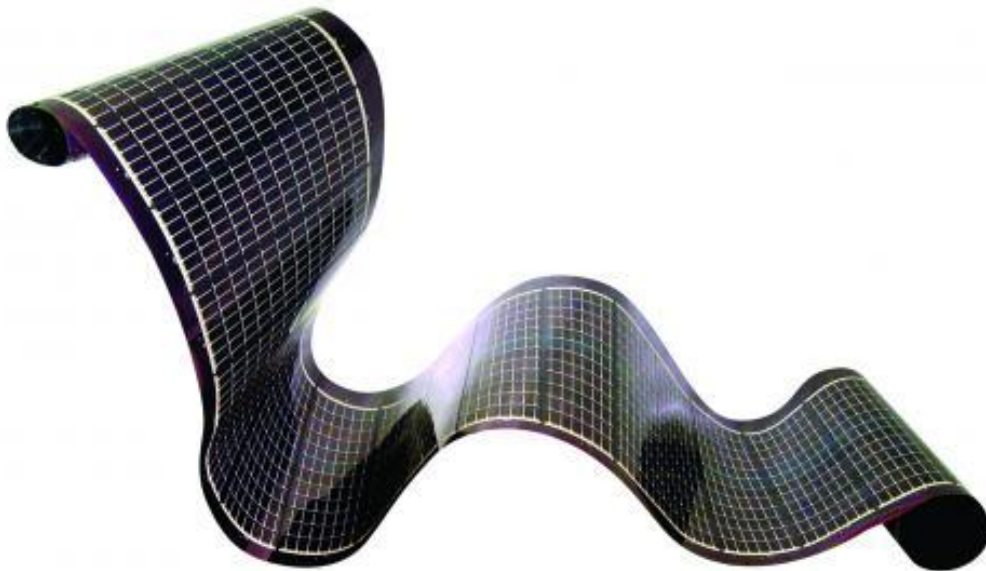
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που κυκλοφορούν στο εμπόριο και χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είναι κυρίως τριών τύπων, α) Τα ΦΒ στοιχεία μονοκρυσταλλικού Πυριτίου, β) Τα ΦΒ στοιχεία πολυκρυσταλλικού Πυριτίου και γ) Τα ΦΒ στοιχεία άμορφου Πυριτίου. Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%.



Εικόνα 3 Μονοκρυσταλλικές κυψέλες κατάλληλα συνδεδεμένες για την δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται για την καλύτερη ενεργειακή απόδοση (απόδοσης/επιφάνειας) αλλά από την άλλη έχουν υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, είναι της SunPower με απόδοση πλαισίου 18,5%. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία. Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές

περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου (χύτευση) και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.



Εικόνα 4 Φωτοβολταϊκό στοιχείο λεπτού υμενίου (thin film) το οποίο βρίσκεται επάνω σε εύκαμπτη επιφάνεια.

Τα άμορφα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως

γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά (thin films) λεπτού υμενίου πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6-8% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειάζονται σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας εξολοκλήρου καθίσταται πρακτικά αδύνατο, για τον απλό λόγο ότι το κάθε ημιαγώγιμο υλικό απορροφά διαφορετικά μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Κάποια υλικά απορροφούν σε ευρύτερα φάσματα ακτινοβολίας από κάποια άλλα. Έτσι ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιούμε μπορούμε να εκμεταλλευτούμε μόνο εκείνο το φάσμα της ακτινοβολίας που αφορά

το συγκεκριμένο υλικό. Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια συμβολίζει τον συντελεστή απόδοσης του υλικού. Οι δύο βασικοί παράγοντες για την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού υλικού είναι το ενεργειακό χάσμα του υλικού και ο συντελεστής μετατροπής.

Ο βαθμός απόδοσης εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία, που σχεδιάστηκαν τον 19ο αιώνα, δεν είχαν παρά 1-2% απόδοση, ενώ το 1954 τα εργαστήρια Bell Laboratories δημιούργησαν τα πρώτα ΦΒ στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6% . Στην πορεία του χρόνου όλο και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης: η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μια ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών.

Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13-16%, ο οποίος συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος συμβατικού αιολικού, παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Ωστόσο, η απόδοση ενός δεδομένου συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών σε ηλιοστάτη. Οι προϋποθέσεις αξιοποίησης των ΦΒ συστημάτων στην Ελλάδα είναι από τις καλύτερες στην Ευρώπη, αφού η συνολική ενέργεια που δέχεται κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας στην διάρκεια ενός έτους κυμαίνεται από 1400-1800 kWh.

Η απόδοση ενός ΦΒ συστήματος εξαρτάται κυρίως από κλιματολογικούς παράγοντες, δηλαδή σε περιοχές με λίγες ημέρες ηλιοφάνειας όπως συμβαίνει στην

δυτική Ελλάδα μειώνεται η απόδοση τους. Στην περίπτωση όμως με χαμηλές θερμοκρασίες και αρκετή ηλιοφάνεια που συναντάμε περισσότερο στην βόρεια Ελλάδα η απόδοση ανεβαίνει σημαντικά, άρα και η θερμοκρασία επηρεάζει την απόδοση. Ακόμα σημαντικό ρόλο έχει το γεωγραφικό πλάτος (ϕ) της περιοχής, αυτό σημαίνει ότι οι νότιες περιοχές είναι περισσότερο ευνοημένες σε σχέση με τις πιο βόρειες. Η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών είναι από τους παράγοντες που συμβάλουν στην μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας και είναι ιδιαίτερα σημαντικός διότι είναι ελεγχόμενος από τον άνθρωπο. Αυτός ήταν και ο βασικό λόγος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφού η τοποθέτηση ΦΒ συστοιχιών σε σειρές η μία πίσω από την άλλη προκαλούν σκίαση κάτι το οποίο θέλουμε να γνωρίζουμε πόσο επηρεάζει την απόδοση. Βέβαια η τοποθέτηση αφορά ακόμα τον προσανατολισμό και την κλίση (β) των ΦΒ συστοιχιών, όπου σύμφωνα με τις επικρατέστερες μελέτες τοποθετούνται προς το νότο και συνήθως σε κλίση που σχετίζεται με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Ένας εμπειρικός κανόνας για τη γωνία κλίσης των ΦΒ συστοιχιών, με απαίτηση βέλτιστης αποδοτικότητας ετησίως, είναι $\beta = \phi - 5^\circ$ έως 10° . Τέλος, η απόδοση δεν παραμένει σταθερή με την πάροδο του χρόνου, υπολογίζεται ότι τα ΦΒ στοιχεία έχουν διάρκεια ζωής περισσότερο των είκοσι (20) ετών, με απόδοση που παραμένει συνήθως πάνω από το 80% της ονομαστικής τιμής.

Ένας βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της ΦΒ συστοιχίας είναι η σκίαση και η ρύπανση της επιφάνειας του. Τα ΦΒ πλαίσια συνηθίζεται να τοποθετούνται σε παράλληλες συστοιχίες, κάτι που όπως μπορούμε να σκεφτούμε προκαλεί σκίαση διαδοχικά από την νοτιότερη προς την άμεσος βορειότερη. Η

σκίαση μπορεί να αφορά: α) στην απευθείας ακτινοβολία και β) στη διάχυτη ακτινοβολία. Η πρώτη είναι αυτή που παρατηρείται εύκολα ως ίσκιος στην πίσω συστοιχία και επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των σκιαζόμενων ΦΒ πλαισίων. Η σκίαση της διάχυτης μπορεί να γίνει κατανοητή αφού κάθε ΦΒ συστοιχία πίσω από τη νοτιότερη δέχεται μικρότερη πυκνότητα ισχύος διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας εξ αιτίας της μικρότερης στερεάς γωνίας «όρασης» του ουρανού από τη συστοιχία αυτή, λόγω της παρουσίας της προηγούμενης συστοιχίας, σε σχέση με τη συστοιχία που δεν έχει μπροστά της άλλη.

Όταν κάποιο τμήμα ενός ΦΒ πλαισίου σκιάζεται ή καλύπτεται από ρύπους, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά δεν είναι ικανά να παράγουν το ίδιο ρεύμα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Όμως όλα τα στοιχεία ενός πλαισίου είναι συνδεδεμένα σε σειρά, με αποτέλεσμα, σε ομοιόμορφο φωτισμό τους, όλα τα ΦΒ στοιχεία να διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα. Στην περίπτωση όμως της σκίασης ενός ΦΒ στοιχείου στο σύνολο των στοιχείων του ΦΒ πλαισίου, αφενός το σκιαζόμενο δεν παράγει ηλεκτρικό ρεύμα αφού δεν φωτίζεται, αφετέρου τα ασκίαστα στοιχεία εφαρμόζουν υψηλή ανάστροφη τάση στο σκιαζόμενο, κατάσταση που οδηγεί στην καταστροφή του. Τα σκιασμένα στοιχεία απορροφούν ισχύ και λειτουργούν ως καταναλώσεις. Με άλλα λόγια, τα σκιασμένα στοιχεία δαπανούν ισχύ και θερμαίνονται υπερβολικά, προκαλώντας έτσι τα λεγόμενα hot spots. Για την πρόληψη της εκδήλωσης του φαινομένου αυτού, γίνεται χρήση παρακαμπτήριων διόδων (Διόδων παράκαμψης). Όταν ένα ΦΒ στοιχείο σκιάζεται, η αντίστοιχη δίοδος πολώνεται ορθά και όλο το πλεονάζον ρεύμα σε σχέση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του σκιασμένου στοιχείου διοχετεύεται διαμέσου της διόδου. Έτσι, η δίοδος μειώνει

δραματικά την ελάττωση απόδοσης που προκαλείται τοπικά στη σκιασμένη περιοχή. Από την άλλη μεριά, η δίοδος διατηρεί την τάση της ομάδας των σκιασμένων στοιχείων στην οποία συνδέεται σε περίπου -0,6V, περιορίζοντας με τον τρόπο αυτό τη μείωση της ισχύος εξόδου της συστοιχίας. Στην πράξη, δεν τοποθετούνται δίοδοι παράκαμψης σε κάθε ΦΒ στοιχείο ενός ΦΒ πλαισίου, αλλά συνήθως, δύο χωρίζοντας το σύνολο των ΦΒ στοιχείων σε δύο ομάδες. Έτσι, η μερική σκίαση ενός ΦΒ πλαισίου προκαλεί μερική έως ισχυρή υστέρηση στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Επίσης, για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της σκίασης σε ένα σύνολο ΦΒ πλαισίων μιας ΦΒ συστοιχίας, κάθε ΦΒ πλαίσιο εφοδιάζεται από μια δίοδο παράκαμψης.

1.4. Επίδραση θερμοκρασίας στη λειτουργία των ΦΒ πλαισίων

Ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η θερμοκρασία. Η θερμοκρασία αυξάνεται καθώς προσπίπτει επάνω στην επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου η ακτινοβολία. Μέρος αυτής της ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια και αυξάνει την θερμοκρασία της κάθε κυψελίδας σχεδόν γραμμικά με την πυκνότητα της (E) ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (Φραγκιαδάκης, 2009). Στην ύπαιθρο ισχύει η σχέση:

$$\frac{\theta_{\text{κυψελίδας}} - \theta_{\text{αέρα}}}{E} \approx 30^{\circ}C / \left(\frac{kW}{e^2}\right)$$

Ακόμα, η θερμοκρασία επιδρά στην τάση ανοικτού κυκλώματος και ρεύματος βραχυκύκλωσης του ΦΒ πλαισίου. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται το ρεύμα

βραχυκύκλωσης (I_{sc}) αυξάνεται ελαφρά ενώ μειώνεται η τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}). Για θερμοκρασίες μεταξύ -10°C και 60°C ισχύουν η σχέσεις (Φραγκιαδάκης, 2009, p. 197):

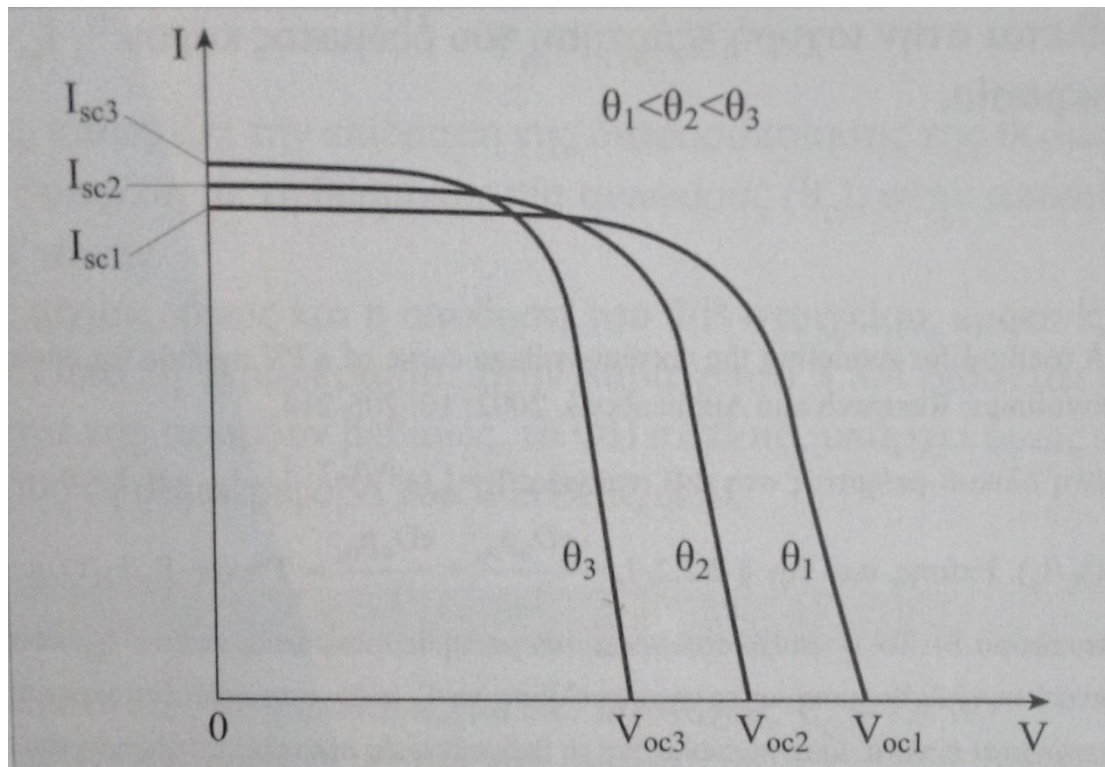
$$I_{sc} = \frac{E}{E_{STC}} \cdot I_{sc,STC} \cdot (1 + a_{I_{sc}} \cdot (\theta_c - \theta_{STC}))$$

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

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

$a_{I_{sc}}$: θερμικός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης

E_{STC} : πυκνότητα ισχύος $1000\text{W}/\text{m}^2$



Εικόνα 5 Η επίδραση της θερμοκρασίας στην καμπύλη ισχύος της ΦΒ κυψελίδας (Φραγκιαδάκης, 2009, p. 197).

1.5. Επίδραση ρύπανσης – σκόνης στα ΦΒ πλαίσια

Ένα πολύ συχνό πρόβλημα που παρουσιάζεται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι η συσσώρευση ρύπων – σκόνης στην επιφάνειά τους. Οι ρύποι αυτοί μειώνουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία που απορροφάτε από τα ΦΒ πλαίσια και αυξάνουν τη σκέδαση με αποτέλεσμα να μειώνεται και η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Οι ρύποι αυτοί οφείλονται στο γεγονός ότι τα ΦΒ πλαίσια πρέπει πάντα να βρίσκονται σε εξωτερικό χώρο για να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να έρχονται αντιμέτωπα με τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Μεγάλη σημασία στην επίπτωση της απόδοσης έχει ο τύπος των ρύπων και πόσο έντονη είναι η συσσώρευση.

Στην επιφάνειά τους συσσωρεύεται ένα μέρος των αιρούμενων σωματιδίων που μεταφέρονται στην ατμόσφαιρα και παραμένουν εκεί έως ότου απομακρυνθούν με φυσικό ή τεχνητό τρόπο. Το πιο αποτελεσματικό φυσικό φαινόμενο που απομακρύνει τη ρύπανση από την επιφάνεια των ΦΒ είναι οι κατακρημνίσεις όπως είναι η βροχή. Σε διαφορετική περίπτωση με τεχνητό τρόπο απαιτείται ειδικό σύστημα καθαρισμού ή χειροκίνητα με κάποιο εργαλείο.

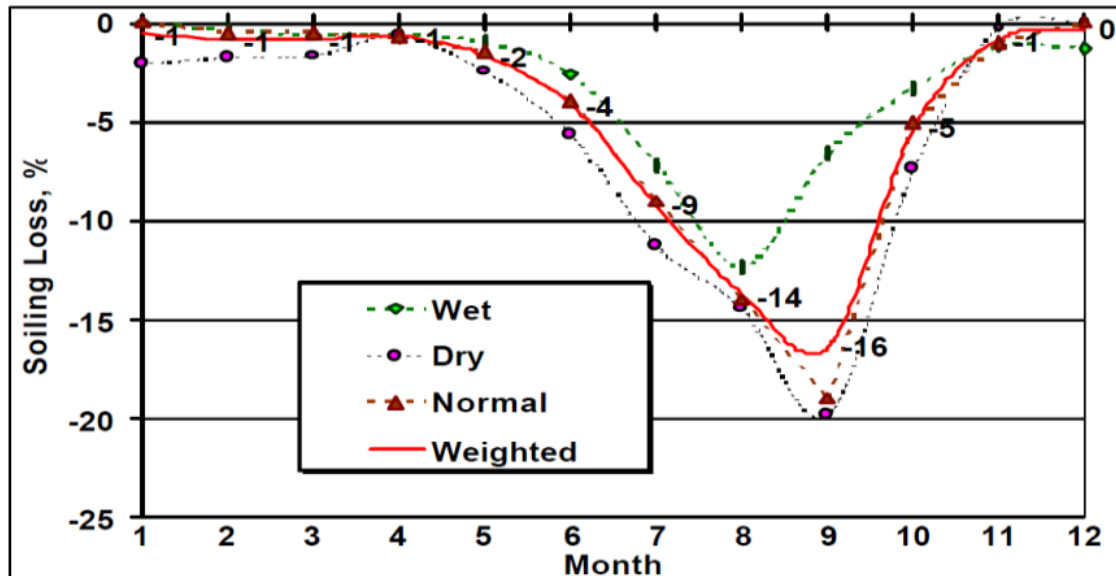


Εικόνα 6 Πειράματα στην Αίγυπτο με πολύ υψηλά επίπεδα σκόνης οι απώλειες έφτασαν το 35% σε περίοδο ενός έτους.

Αυτό το αντικείμενο έρευνας, της ρύπανσης των ΦΒ συστημάτων, έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον αρκετών μελετητών ανά τον κόσμο (Detrick & Kimber, 2005). Αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια κυρίως σε περιοχές με λίγες κατακρημνίσεις. Για παράδειγμα, ερευνητές στην Αίγυπτο

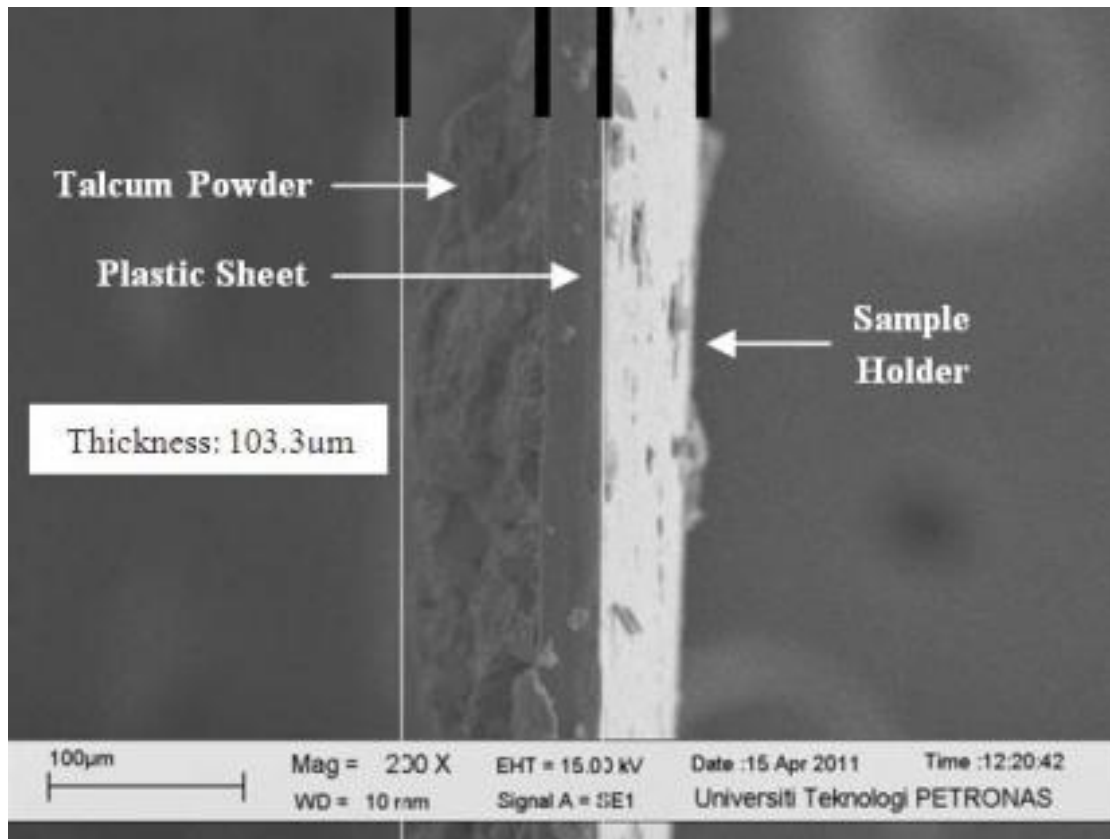
μελέτησαν τις απώλειες λόγω ρύπανσης σε ΦΒ συστήματα για δεδομένο χρονικό διάστημα. Τα αποτελέσματα συγκρινόμενα με ΦΒ συστήματα τα οποία παρέμειναν καθαρά την ίδια περίοδο ενός έτους, έδειξαν ότι υπήρχε 35% χαμηλότερη απολαβή ηλεκτρικής ενέργειας (Ibrahim, και συν., March 2009). Αυτά βέβαια τα νούμερα διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή διότι εξαρτώνται σημαντικά από τις εκάστοτε τοπικές καιρικές συνθήκες. Ακόμα, άλλες έρευνες που έχουν γίνει σε άλλες χώρες όπως στην Ελλάδα αποδεικνύουν ότι οι ετήσιες απώλειες κυμαίνονται στο 5,86% (Kymakis & Kalykakis, 2009). Αξίζει να αναφερθεί ότι σε περιοχές με συχνές βροχοπτώσεις οι ετήσιες απώλειες μειώνονται σημαντικά στο 1%, περίπου. (Detrick & Kimber, 2005).

Μια ενδιαφέρουσα μελέτη που λαμβάνει υπόψιν τις καιρικές συνθήκες στην περιοχή μελέτης στο Ντέιβις της Καλιφόρνιας, διαχωρίζει το κλίμα σε τρεις ζώνες, Υγρό (Wet), Ξηρό (Dry) και Φυσιολογικό (Normal) (Hutchinson, 2000). Μπορεί να παρατηρηθεί στο παρακάτω διάγραμμα ότι και στις τρεις περιπτώσεις η καμπύλες ακολουθούν την ίδια πορεία. Όπως ήταν αναμενόμενο οι μεγαλύτερες απώλειες παρουσιάζονται σε ξηρό κλίμα και κατά το τέλος του καλοκαιριού μέχρι να αρχίσουν οι κατακρημνίσεις.



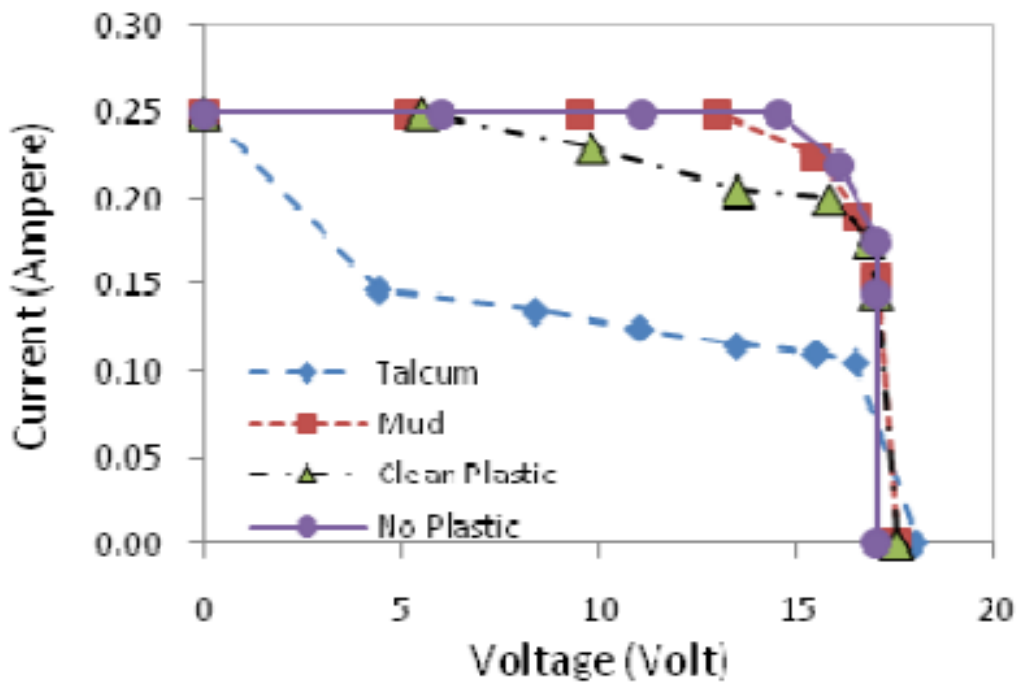
Εικόνα 7 Διάγραμμα απωλειών σε συνάρτηση με τους μήνες ενός έτους για την περιοχή Ντέιβις της Καλιφόρνιας. Οι μετρήσεις χωρίζονται για τρία διαφορετικά είδη κλίματος Υγρό (Wet), Ξηρό (Dry) και Φυσιολογικό (Normal) (Hutchinson, 2000).

Ερευνητές από την Μαλαισία διεξήγαγαν πειράματα σε εργαστήριο δημιουργώντας τεχνητή ρύπανση σε πλαστική μεμβράνη πάχους 28μm οποία τοποθετούνταν επάνω σε φωτοβολταϊκά στοιχεία. Με αυτό τον τρόπο δοκίμασαν ταλκ σκόνη και ξηρή λάσπη πως επηρεάζει την απόδοση. Χρησιμοποίησαν ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για τον έλεγχο της ομοιογένειας της ρύπανσης και τον υπολογισμό του πάχους όπως φαίνεται παρακάτω (Shaharin A. Sulaiman, 2011).

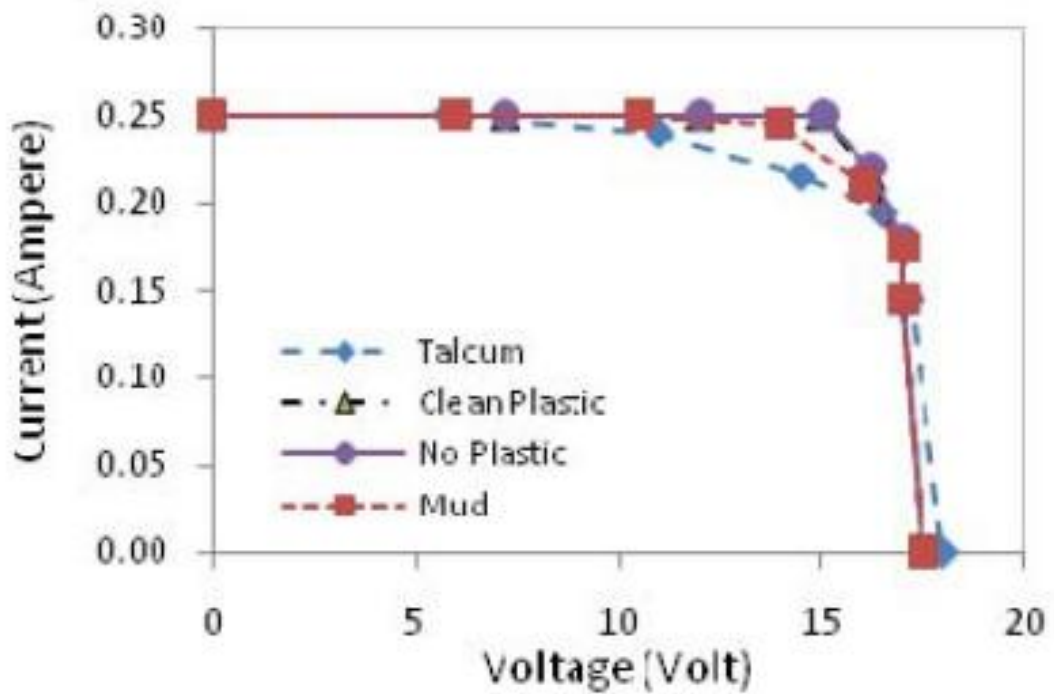


Εικόνα 8 Λεπτές πλαστικές διαφάνειες εναπόθεσης ρύπανσης – σκόνης για τον υπολογισμό των απωλειών όπως φαίνονται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Shaharin A. Sulaiman, 2011).

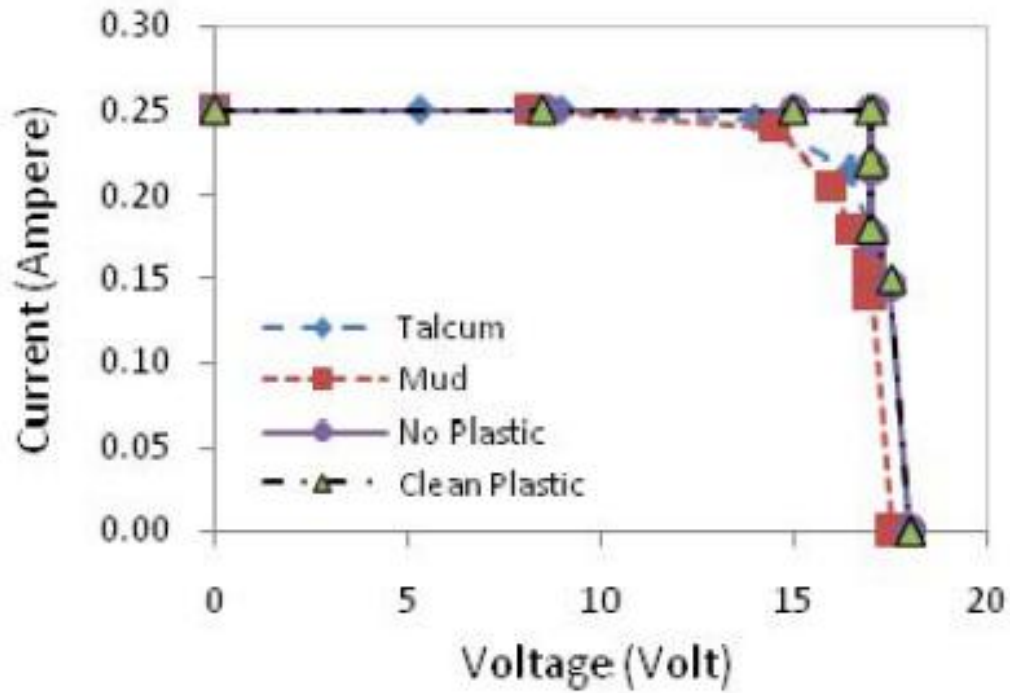
Τα πειράματα αυτά με τις λεπτές διαφάνειες πλαστικού παρουσίασαν διαφορές σε συγκριτικές δοκιμές με καθαρές μεμβράνες ιδιαίτερα σε ακτινοβολίες με υψηλή ισχύ ανά επιφάνεια. Αυτό χρειάζεται περεταίρω μελέτη για την διευκρίνιση πως επηρεάζει η πλαστική μεμβράνη την απόδοση του φωτοβολταϊκού (Shaharin A. Sulaiman, 2011). Από τα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη για τρεις διαφορετικές πυκνότητες ισχύος 340, 301 και 255 W/m^2 . Για 340 W/m^2 με καθαρή μεμβράνη η αρχική καμπύλη δεν ακολουθεί αυτή με την καθαρή μεμβράνη οπότε τα αποτελέσματα δεν είναι συγκρίσιμα.



Εικόνα 9 Για 340 W/m^2 οι χαρακτηριστικές καμπύλες για τις τέσσερις περιπτώσεις χωρίς μεμβράνη, με καθαρή μεμβράνη, με ξηρή λάσπη και σκόνη ταλκ.



Εικόνα 10 Για 301 W/m^2 οι χαρακτηριστικές καμπύλες για τις τέσσερις περιπτώσεις χωρίς μεμβράνη, με καθαρή μεμβράνη, με ξηρή λάσπη και σκόνη ταλκ.



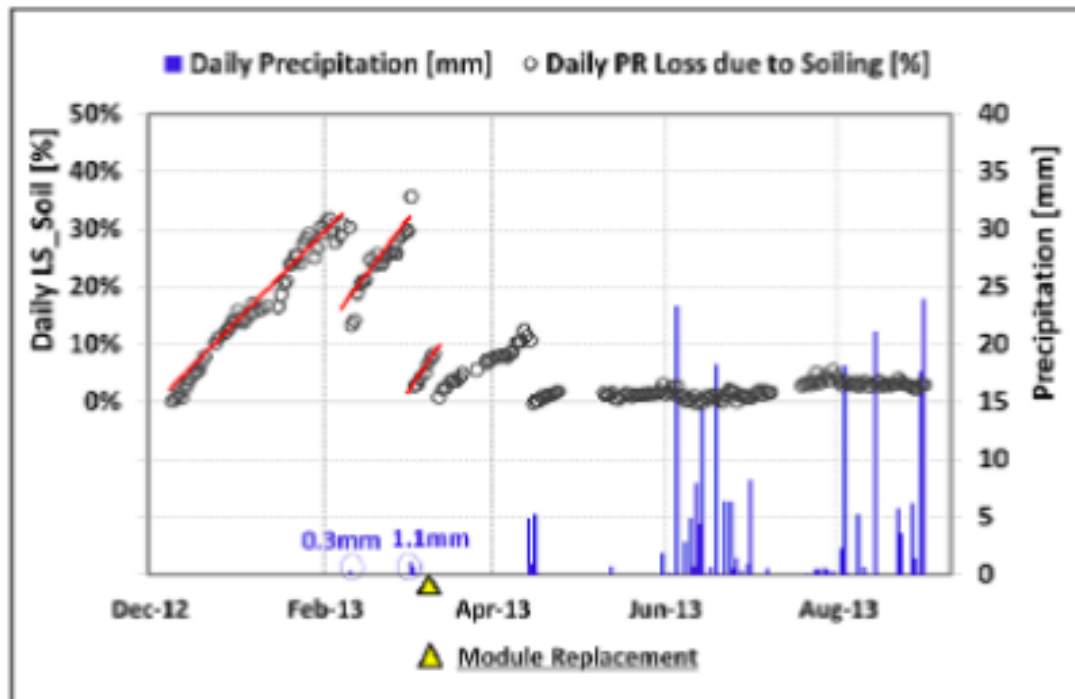
Εικόνα 11 Για 255 W/m^2 οι χαρακτηριστικές καμπύλες για τις τέσσερις περιπτώσεις χωρίς μεμβράνη, με καθαρή μεμβράνη, με ξηρή λάσπη και σκόνη ταλκ.

Μια πειραματική διάταξη με παρόμοια κεντρική ιδέα όπως της παρούσας πτυχιακής εργασίας κατασκευάστηκε και εγκαταστάθηκε στην Ταϊλάνδη. Η συσκευή αυτή διαθέτει δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια πανομοιότυπα στην ίδια κλίση και κάποια μετρητικά συστήματα. Ακόμα, υπάρχει μηχανισμός ο οποίος διατηρεί συνεχώς καθαρό το ένα από τα δύο πλαίσια ώστε να μπορεί να γίνεται σύγκριση της απόδοσης (Chin Yin Lee1*).



Εικόνα 12 Πειραματική διάταξη για σύγκριση δύο πανομοιότυπων ΦΒ πλαισίων όπου το ένα διατηρείται μονίμως καθαρό με ειδικό μηχανισμό και το άλλο δέχεται την ρύπανση από τον αέρα (Chin Yin Lee1).*

Η διάταξη αυτή είναι κατάλληλη για να τοποθετηθεί σε μεγάλες ΦΒ εγκαταστάσεις για να παρατηρούνται οι απώλειες που προέρχονται από τους ρύπους – σκόνη που επικάθεται επάνω σε αυτά. Στην συγκεκριμένη έρευνα παρατήρησαν μηνιαίες απώλειες που κυμαίνονται από 0% έως 21,8%.



Εικόνα 13 Μετρήσεις από την πειραματική διάταξη στην Ταϊλάνδη όπου φαίνεται η επίδραση της βροχής στην μείωση των απωλειών που οφείλονται στη σκόνη ή τους ρύπους (Chin Yin Lee1*).

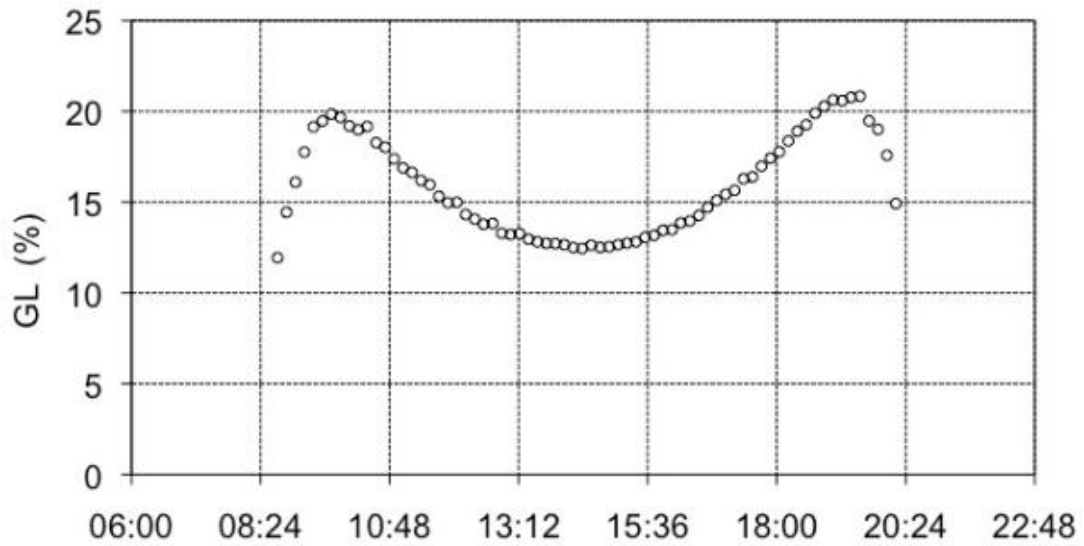
Ερευνητές από την Ισπανία με παρόμοια πειραματική εγκατάσταση μελέτησαν το φαινόμενο συγκρίνοντας την απόδοση σε δύο ίδια φωτοβολταϊκά πλαίσια όπως φαίνεται παρακάτω. Σε αυτή την μελέτη έγιναν παρατηρήσεις για τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η απόδοση των φωτοβολταϊκών κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι προέκυψε το διάγραμμα που φαίνεται παρακάτω το οποίο δείχνει ότι οι απώλειες λόγω σκόνης είναι λιγότερο έντονες κατά την διάρκεια της ημέρας όπου ο ήλιος είναι ψηλά δηλαδή κοντά στο μεσημέρι ενώ οι απώλειες γίνονται μέγιστες λίγο μετά το ξημέρωμα και την δύση.



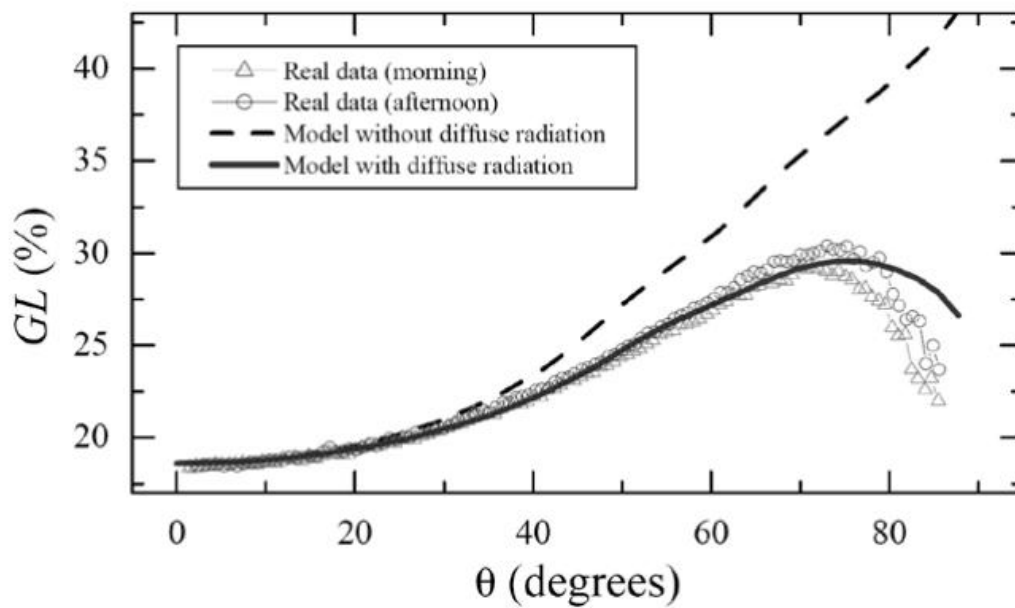
*Εικόνα 14 Πειραματική διάταξη στην Ισπανία για την μελέτη του φαινομένου ρύπανσης. Τα πλαίσια βρίσκονται στην ίδια κλίση και στον ίδιο χώρο ώστε να επικρατούν οι ίδιες συνθήκες (J. Zorrilla-Casanova *, 2011).*

Από τα δεδομένα που ανέλυσαν προέκυψαν απώλειες περίπου 4.4% μέσα στο έτος ενώ έφτασαν το 20% ημερησίως σε περιόδους χωρίς βροχή. Ακόμα, παρατήρησαν ότι βροχή ενός χιλιοστού είναι ικανή να καθαρίσει τα ΦΒ πλαίσια ώστε να λειτουργούν κανονικά. Σημαντικές παρατηρήσεις έγιναν στην γωνία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας η οποία σχετίστηκε με τις απώλειες που προέκυψαν. Παρατηρήθηκε ότι οι απώλειες γινόντουσαν μέγιστες όταν η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας ήταν 75 μοίρες ενώ ελαχιστοποιούνταν το μεσημέρι. Με βάση αυτών των παρατηρήσεων και μετρήσεων δημιουργήθηκε μοντέλο το οποίο περιγράφει ικανοποιητικά τις απώλειες λόγω του φαινομένου αυτού. Σημαντικό

παράγοντα στο μοντέλο έχει η επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 15 Από τα πειραματικά δεδομένα στην Ισπανία προέκυψαν ότι για σε μεγάλες γωνίες $\theta=75$ μοίρες πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας οι απώλειες γίνονται μέγιστες (J. Zorrilla-Casanova *, 2011)



Εικόνα 16 Πειραματικές μετρήσεις σε σύγκριση με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην Ισπανία. Αξίζει να παρατηρηθεί η σημαντικότητα της διάχυτης ακτινοβολίας στις απώλειες (J. Zorrilla-Casanova *, 2011).

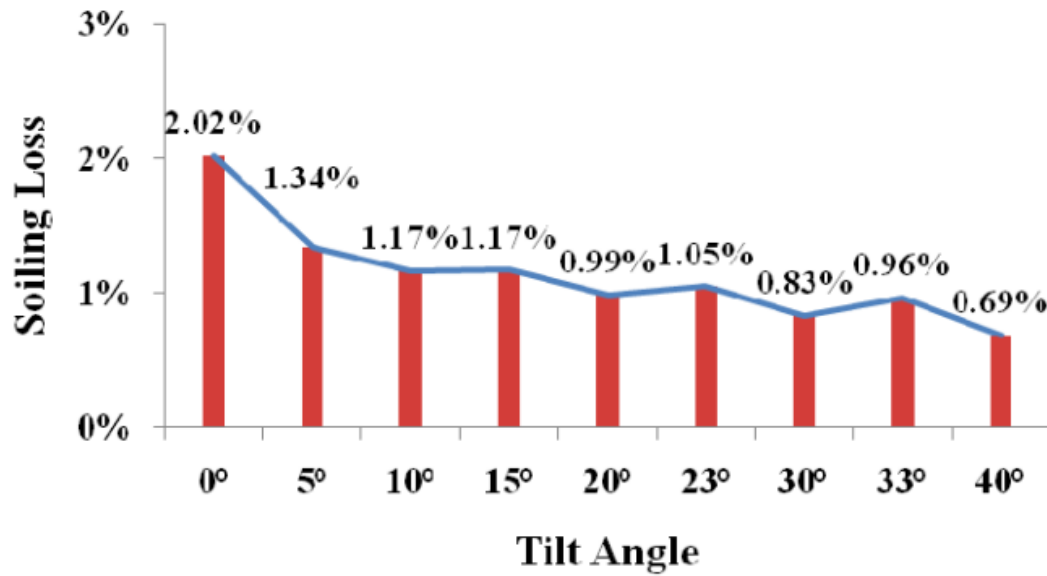
Η σκόνη – ρύπανση που επικάθεται επάνω στα φωτοβολταϊκά εξαρτάται και από την κλίση που είναι τοποθετημένα. Μία τέτοια έρευνα έγινε στην Αριζόνα όπου τοποθέτησαν εννιά ΦΒ πλαίσια σε διαφορετικές κλίσεις 0° , 5° , 10° , 15° , 23° , 30° , 33° και 40° τα οποία ήταν μονίμως καθαρά. Από την άλλη πλευρά τοποθετήθηκαν εννιά φωτοβολταϊκά πλαίσια στις ίδιες κλίσεις αλλά δέχονταν της συσσώρευση σκόνης στην επιφάνειά τους. Η πειραματική διάταξη φαίνεται παρακάτω με τα μικρά ΦΒ πλαίσια ίδιου τύπου τοποθετημένα σε διαφορετικές κλίσεις.



Εικόνα 17 Πειραματική διάταξη (Cano, 2011)

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδωσαν την αναμενόμενη εξάρτηση των απωλειών με την κλίση στην οποία είναι τοποθετημένα όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι μία μικρή κλίση μόλις 10 μοιρών μειώνει τις απώλειες στο μισό σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Όμως οι απώλειες

παραμένουν κοντά στο 1% για μεσαίες γωνίες από 10 έως 33 μοίρες. Για να μειωθεί η επίδραση της συσσωρευμένης ρύπανσης πρέπει να αυξηθεί η κλίση πέραν των 40 μοιρών.



Εικόνα 18 Πειραματικά αποτελέσματα για την περίοδο Ιανουαρίου – Μαρτίου στην Αριζόνα 2011 (Cano, 2011)

2. Πειραματικές Διατάξεις

2.1. Περιγραφή

Για την μελέτη της επίδρασης της σκόνης στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δημιουργήθηκαν τρεις πειραματικές διατάξεις. Οι διατάξεις αυτές είναι α) μία αυτόματη συσκευή καταγραφής ηλιακής ακτινοβολίας δύο καταστάσεων με ρύπανση και χωρίς, β) δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια όπου το ένα παραμένει καθαρό ενώ το άλλο επιδέχεται την σκόνη της ατμόσφαιρας και γ) ειδικά τοποθετημένα γυάλινα δοκίμια για την μέτρηση της μάζας της ρύπανσης.



Εικόνα 19 Πειραματικές διατάξεις για τη μελέτη του φαινομένου ρύπανσης επιφάνειας φωτοβολταϊκών. Α) επάνω, τα δύο ΦΒ πλαίσια για σύγκριση απόδοσης όταν το ένα επιδέχεται ρύπανση ενώ το άλλο όχι. Β) στη μέση, αυτόματη συσκευή καταγραφής ρύπανσης επάνω σε γυάλινη επιφάνεια. Γ) κάτω, γυάλινα δοκίμια για παρατήρηση και υπολογισμού της μάζας της ρύπανσης.

Οι διατάξεις αυτές βρίσκονται εντός του φωτοβολταϊκού πάρκου του εργαστηρίου στο χώρο του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Ηρακλείου. Ακόμα οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι πολύ κοντινές ώστε να βρίσκονται υπό τις ίδιες καιρικές συνθήκες και τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Η κλίση τους με το οριζόντιο επίπεδο είναι σταθερή 30° διότι είναι μία τυπική κλίση για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε γεωγραφικό πλάτος 35° όπως είναι της πόλης του Ηρακλείου Κρήτης.

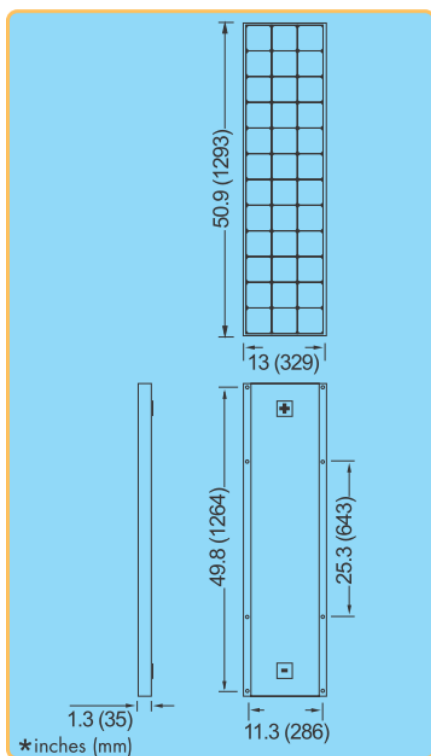
2.2. Φωτοβολταϊκά Πλαίσια Σύγκρισης

Για την σύγκριση της αποδιδόμενης ενέργειας από φωτοβολταϊκά με ή χωρίς σκόνη, χρησιμοποιήθηκαν δύο ίδιου τύπου φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τα πλαίσια αυτά τοποθετήθηκαν δίπλα δίπλα και συνεχώς το ένα ήταν μονίμως χωρίς σκόνη, αφού γινόταν τακτικός καθαρισμός με μαλακό πανί. Ενώ το δεύτερο δεχόταν την σκόνη – ρύπους από το περιβάλλον.



Εικόνα 20 Τα δύο ΦΒ πλαίσια ίδιου τύπου για σύγκριση της απόδοσής τους υπό ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες αλλά μόνο το ένα δέχεται ρύπανση στην επιφάνεια του.

Τα φωτοβολταϊκά που χρησιμοποιήθηκαν είναι μονοκρυσταλικά τύπου Shell SM55 με ρεύμα βραχυκύκλωσης 3.45 Ampere και τάση ανοιχτού κυκλώματος 21.7 Volt.



Εικόνα 21 Οι διαστάσεις του φωτοβολταϊκού πλαισίου τύπου Solar World S80

2.3. Μέτρηση Μάζας Σκόνης

Για την μέτρηση της μάζας της σκόνης που επικάθεται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από γυαλί. Τα δοκίμια αυτά τοποθετήθηκαν σε ειδικές βάσεις ώστε να μπορούν να τοποθετούνται εύκολα και γρήγορα όταν χρειάζεται να γίνεται μέτρηση. Τα υλικά της βάσης είναι ξύλο με μεταλλικά στηρίγματα. Τα δοκίμια αποτελούνται από επτά τζαμάκια διαστάσεων 12x12cm και επτά ίδιας διάστασης καθρεφτάκια. Ακόμα χρησιμοποιήθηκε μια ζυγαριά ακριβείας δέκατου

του χλιοστού του γραμμαρίου διότι οι μεταβολές της μάζας της σκόνης ανά μικρά χρονικά διαστήματα είναι δύσκολο να μετρηθούν.



Εικόνα 22 Γυάλινα δοκίμια για την μέτρηση της μάζας σκόνης - ρύπανσης που επικάθεται. Τα δοκίμια στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε νέα βάση που κατασκευάστηκε μαζί με τον υπόλοιπο εξοπλισμό.

2.4. Συσκευή Αυτόματης Καταγραφής Σκόνης

Η συσκευή αυτή σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο εργαστήριο φωτοβολταϊκό πάρκο ΤΕΙ Κρήτης, ώστε να καταγράφεται η σκόνη που επικάθεται σε μία γυάλινη επιφάνεια μετρώντας την ηλιακή ακτινοβολία στις δύο καταστάσεις με και χωρίς σκόνη – ρύπανση. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μία γυάλινη επιφάνεια η οποία εν μέρη καλύπτεται ώστε να μένει προστατευμένη από τη σκόνη – ρύπανση του περιβάλλοντος ενώ η άλλη είναι μόνιμα ακάλυπτη. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται δύο καταστάσεις με ρύπανση – σκόνη και χωρίς.

Η συσκευή διαθέτει μηχανισμό ώστε να γίνονται ταυτόχρονα τρεις εργασίες, πρώτον κινείται αυτόματα στις δύο καταστάσεις για τον προγραμματισμένο χρόνο. Δεύτερον, διατηρεί την μία πλευρά μόνιμα καθαρή καλύπτοντάς την και τρίτον καταγράφει τις μετρήσεις σε ειδική ψηφιακή συσκευή μετρήσεων. Για την κατασκευή του μηχανισμού έγινε προσπάθεια αξιοποίησης μεταχειρισμένων

εξαρτημάτων ώστε να μην υπάρχει επιπλέον επιβάρυνση του περιβάλλοντος με καινούρια υλικά και συγχρόνως τη μείωση του κόστους κατασκευής στο ελάχιστο.



Εικόνα 23 Η τελική μορφή της συσκευής όπως φαίνεται εξωτερικά, διακρίνεται το φωτοβολταϊκό κελί για την μέτρηση της πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας στις δύο περιπτώσεις του γυαλιού με ρύπανση και χωρίς.

2.4.1. Σχεδιασμός – Υλοποίηση Συσκευής

Για την εξωτερική προστασία της συσκευής και την στήριξη του μηχανισμού χρησιμοποιήθηκε κέλυφος από παλιά ηλεκτρονική συσκευή. Το μεταλλικό κέλυφος έχει διαστάσεις 39cm X 15cm X 23cm και είναι κατασκευασμένο από λεπτή λαμαρίνα με προστασία από την οξείδωση.



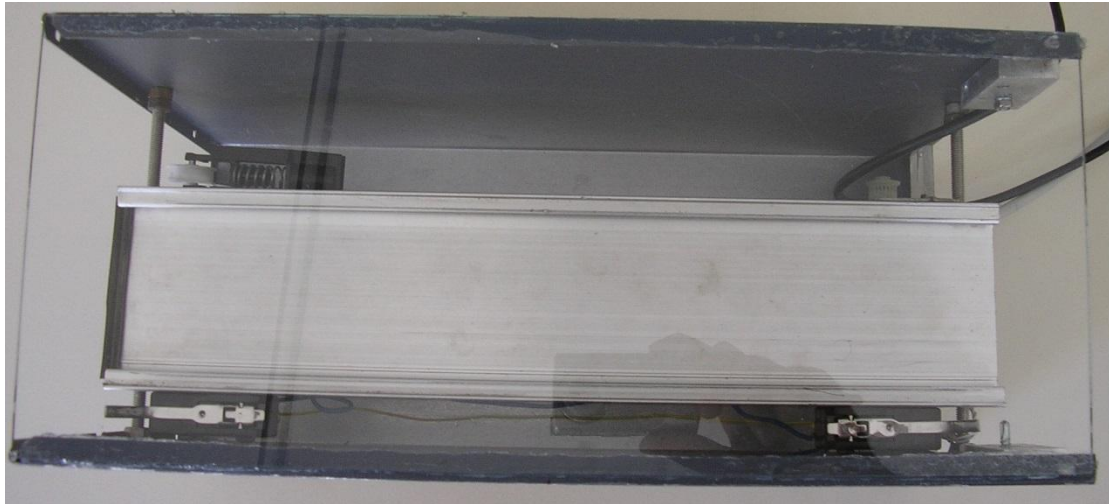
Εικόνα 24 Πλάγια όψη το μεταλλικό κέλυφος για την προστασία του μηχανισμού της συσκευής.



Εικόνα 25 Πλάγια όψη το μεταλλικό κέλυφος για την προστασία του μηχανισμού της συσκευής.

Εσωτερικά του μεταλλικού κελύφους τοποθετήθηκε ο μηχανισμός που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Προσαρμόστηκαν ειδικά στηρίγματα δεξιά και αριστερά για την εύκολη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση όταν αυτό απαιτείται. Μεγάλη

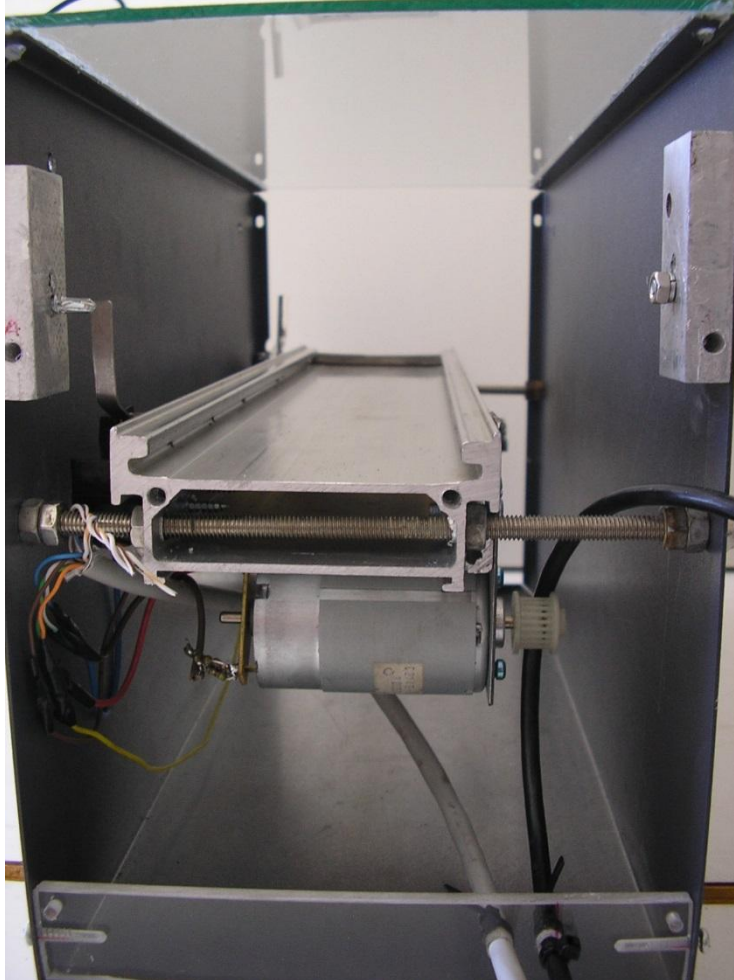
προσοχή δόθηκε στο επίπεδο κίνησης του φωτοβολταϊκού ώστε να μην επηρεάσει τις μετρήσεις. Πέρα από το μηχανολογικό μέρος χρειάστηκε και ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου της κίνησης το οποίο αποτελείται από τον κινητήρα, τους τερματικούς διακόπτες και τον προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή. Έγιναν οι κατάλληλες συνδέσεις στον κινητήρα και στα υπόλοιπα μέρη και οδηγήθηκαν τα καλώδια από συγκεκριμένα σημεία ώστε να μην εμποδίζουν.



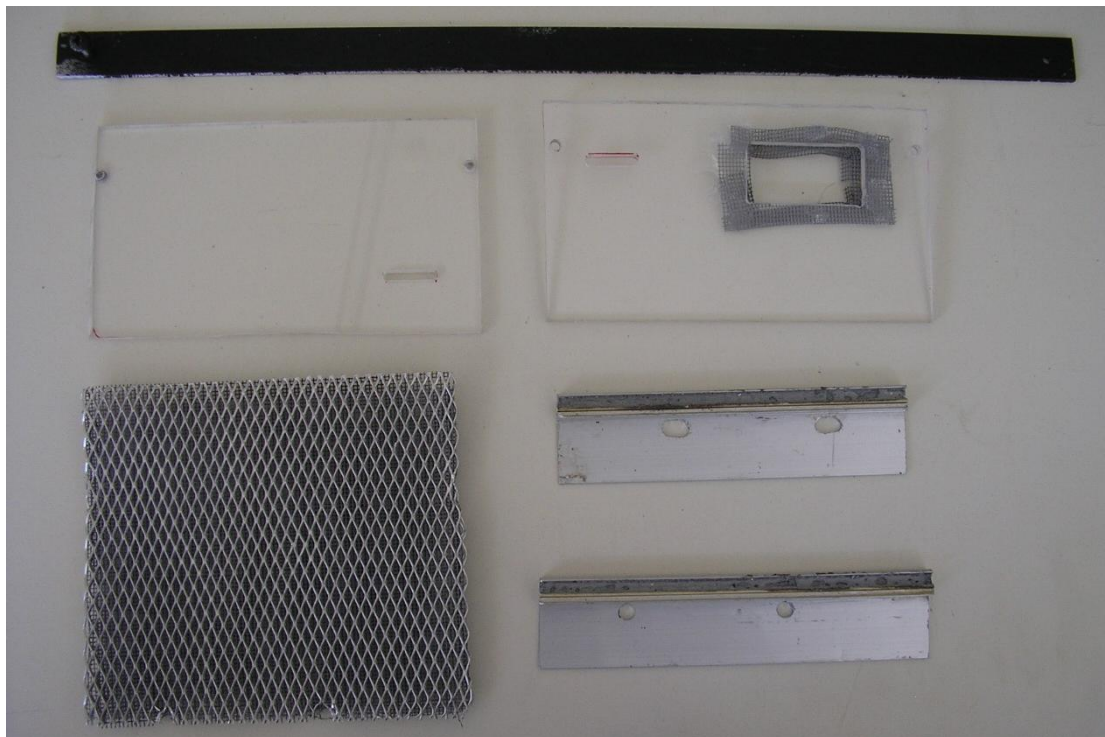
Εικόνα 26 Η συσκευή όπως φαίνεται από επάνω με την γυάλινη επιφάνεια.

Χρειάστηκε να κατασκευαστούν επιπλέον εξαρτήματα για την σφράγιση του και την προστασία του μηχανισμού από εξωτερικούς παράγοντες. Έτσι κυρίως τοποθετήθηκε διαφανές πλαστικό ώστε να υπάρχει οπτική επαφή με το εσωτερικό και αλουμίνιο διότι έχει αντοχή στο χρόνο. Σε ορισμένα σημεία τοποθετήθηκαν πολλά επίπεδα

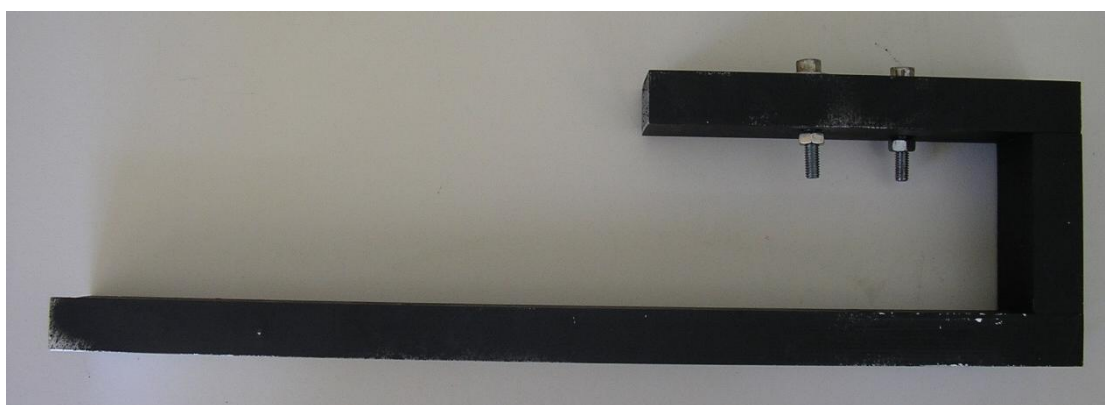
από ειδικό πλέγμα το οποίο επιτρέπει τον αερισμό του μηχανισμού αλλά εμποδίζει την διόδο τόσο σε σκόνη αλλά και μεγαλύτερα αιωρούμενα σωματίδια.



Εικόνα 27 Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος για την κίνησης του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ακόμα διακρίνεται ο διάδρομος κύλισης για τη μείωση των τριβών.

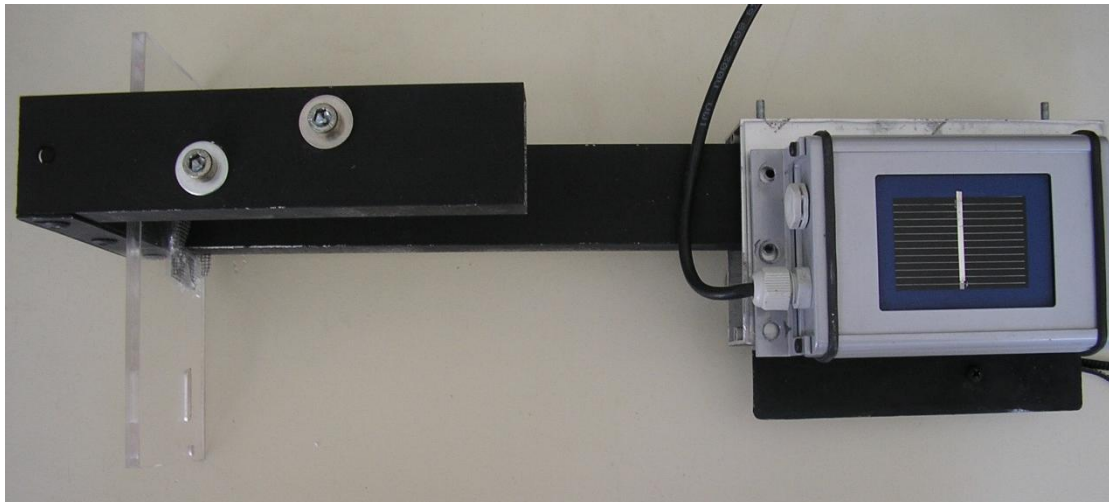


Εικόνα 28 Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται τα καλύμματα που χρησιμοποιήθηκαν για στα πλάγια της συσκευής.

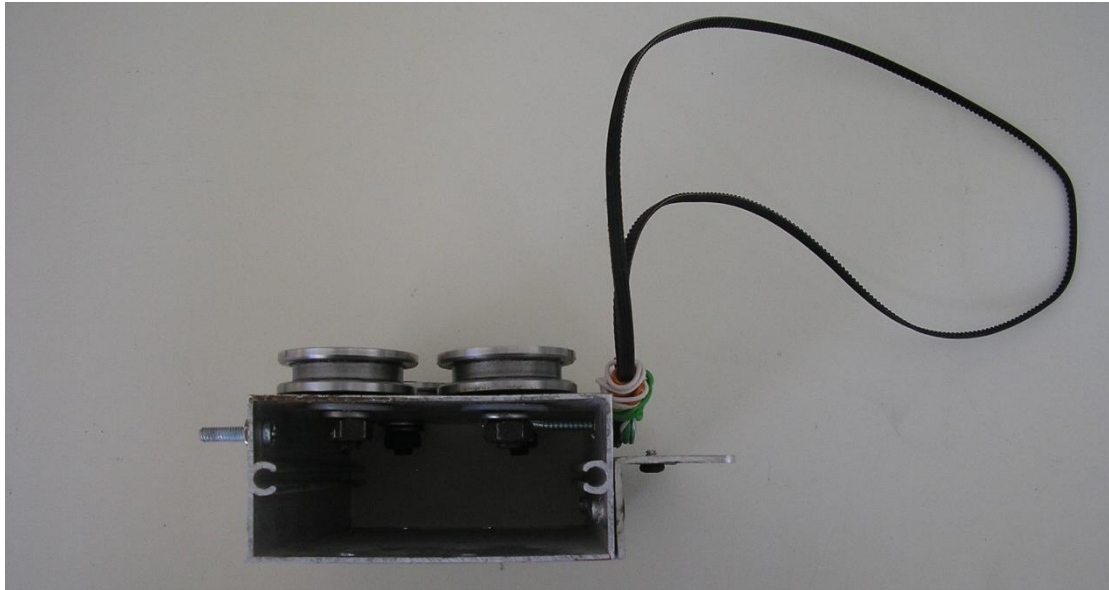


Εικόνα 29 Βραχίονας στήριξης φωτοβολταϊκού κελιού και του ειδικού πετάσματος για κάλυψη του γυαλιού. Είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο και έχει χρωματιστεί μαύρος για τον περιορισμό των ανακλάσεων ώστε να μην επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις.

Στο μέσο περίπου του κελύφους υπάρχει ένας βραχίονας επάνω στον οποίο είναι τοποθετημένα η Φωτοβολταϊκή κυψέλη και το ειδικό πέτασμα κάλυψης της γυάλινης επιφάνειας. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο χρησιμοποιείται για την μέτρηση της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι τοποθετημένο ώστε να βρίσκεται πολύ κοντά στην γυάλινη επιφάνεια και στη μέση μεταξύ των πλευρών. Έτσι επιτυγχάνεται ομοιόμορφη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας και μειώνεται η σκέδαση λόγω του πάχους της γυάλινης επιφάνειας.



Εικόνα 30 Ο βραχίονας μαζί με το φωτοβολταϊκό στοιχείο τοποθετημένα.

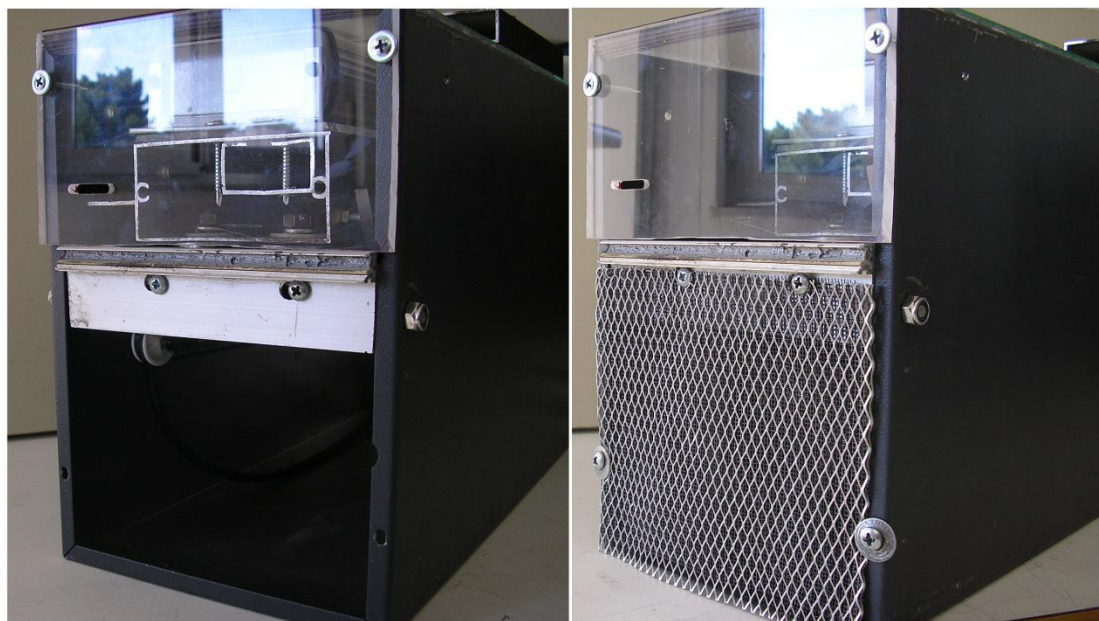


Εικόνα 31 Η βάση του φωτοβολταϊκού στοιχείου με ρουλεμάν για ομαλή κίνηση. Ακόμα φαίνεται ο ιμάντας μεταφοράς κίνησης.

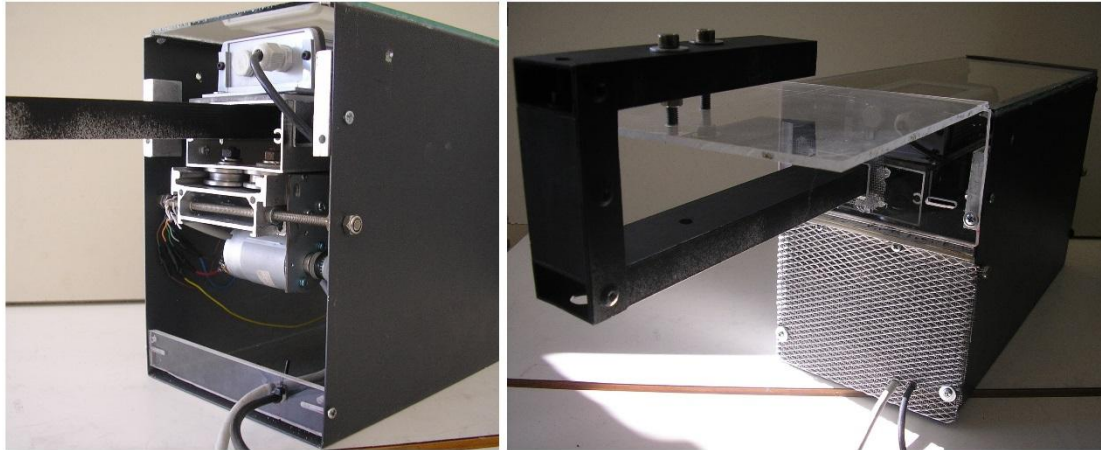
Στην πάνω πλευρά του κελύφους τοποθετήθηκε γυάλινη επιφάνεια με ειδική στεγανωτική σιλικόνη ώστε να μην μπορεί να εισχωρήσει υγρασία και να παραμείνει εκεί το μέγιστο δυνατό διάστημα. Έπειτα τοποθετήθηκαν όλα τα μέρη στο εσωτερικό του κελύφους όπως ο μηχανισμός κίνησης, τα στηρίγματα και τα προστατευτικά.



Εικόνα 32 Αριστερά ο μηχανισμός κίνησης του φωτοβολταϊκού στοιχείου και δεξιά η συσκευή καταγραφής μαζί με τον προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή.



Εικόνα 33 Η πρώτη πλάγια όψη σε βήματα συναρμολόγησης των ειδικών καλυμάτων.



Εικόνα 34 Η δεύτερη πλάγια όψη σε θήματα συναρμολόγησης των ειδικών καλυμμάτων.

Για την ομαλή λειτουργία της συσκευής έγιναν αρκετές δοκιμές μέσα στο εργαστήριο ώστε να αντιμετωπιστούν μικρά προβλήματα προτού εκτεθεί σε εξωτερικές συνθήκες. Σε μικρό σχετικά διάστημα μικρές κατασκευαστικές ατέλειες επιλύθηκαν και η καινοτόμα συσκευή ήταν έτοιμη για την καταγραφή των μετρήσεων. Όπως είναι αναμενόμενο χρειάζεται συνεχή παρακολούθηση και συντήρηση ώστε να λειτουργεί με τον επιθυμητό τρόπο.

2.4.2. Ηλεκτρολογικός πίνακας

Για την προστασία του συστήματος ελέγχου κίνησης της συσκευής και των συνδέσεων δημιουργήθηκε ένας ηλεκτρολογικός πίνακας ο οποίος φαίνεται παρακάτω. Σε αυτό τον πίνακα τοποθετήθηκε και η καταγραφική συσκευή Data Logger CR10. Η τάση λειτουργίας είναι ίδια σε όλες τις συσκευές 12 Volt. Έχουν ληφθεί όλα τα μέτρα προστασίας των συσκευών με αυτόματη ασφάλεια και ασφάλειες τήξεως σε περίπτωση βραχυκυκλώματος ή μπλοκάρισμα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος.



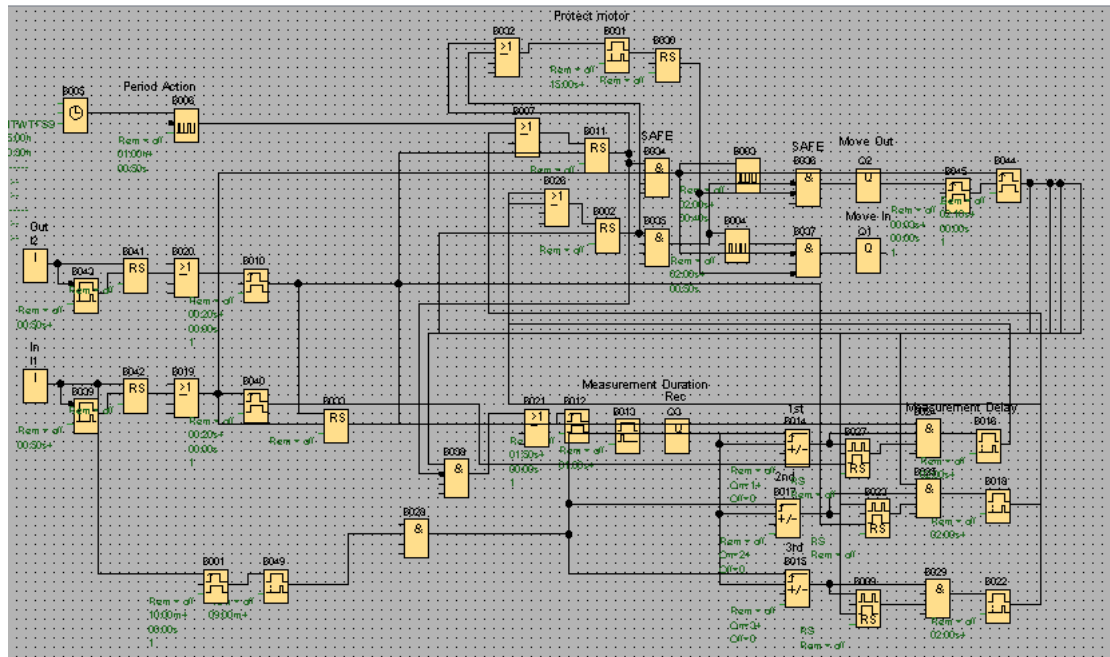
Εικόνα 35 Ο ηλεκτρολογικός πίνακας όπου βρίσκονται η συσκευή καταγραφής δεδομένων και ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής. Ο πίνακας είναι καλά μονωμένος για την προστασία από την υγρασία των συσκευών και των συνδέσεων.

3. Αυτοματισμός Πειραματικής Διάταξης

Για τον συντονισμό του πειράματος και τη λειτουργία της συσκευής καταγραφής ρύπανσης που επικάθεται σε γυάλινη επιφάνεια χρειάστηκε να προγραμματισθεί ειδική συσκευή. Η συσκευή αυτή είναι ένας προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής ο οποίος έχει



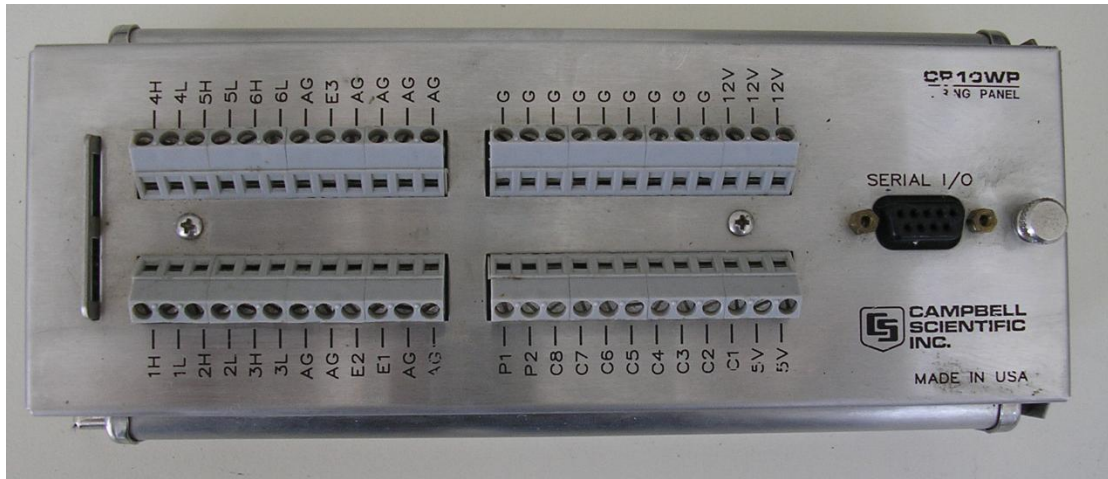
Εικόνα 36 Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής για τον συντονισμό των μετρήσεων και την λειτουργία της συσκευής καταγραφής ρύπανσης στην επιφάνεια του γυαλιού.



Εικόνα 37 Ο Κώδικας με λογικές πύλες για τον έλεγχο των μετρήσεων.

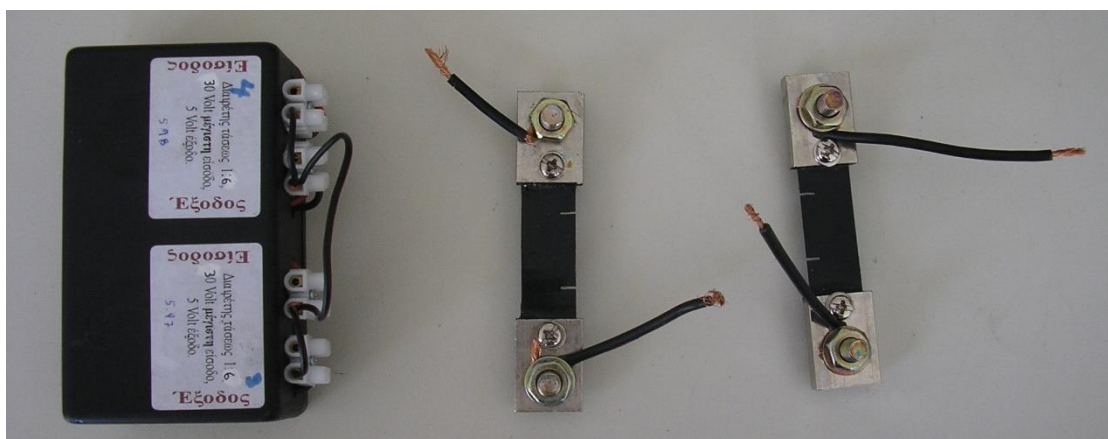
4. Καταγραφή Δεδομένων

Η καταγραφή των μετρήσεων γίνεται κυρίως μέσω της συσκευής Logger CR10. Η συσκευή αυτή έχει προγραμματιστεί κατάλληλα ώστε να καταγράφει την θερμοκρασία των πλαισίων, το ρεύμα βραχυκύκλωσης των πλαισίων και την πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας. Χρειάστηκαν να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις ώστε να δέχεται εξωτερικές εντολές από τον προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή ώστε να καθορίζεται η στιγμή της μέτρησης. Επιπλέον έγιναν κάποιες χειροκίνητες μετρήσεις με πολύμετρο ώστε να διασταυρωθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων.



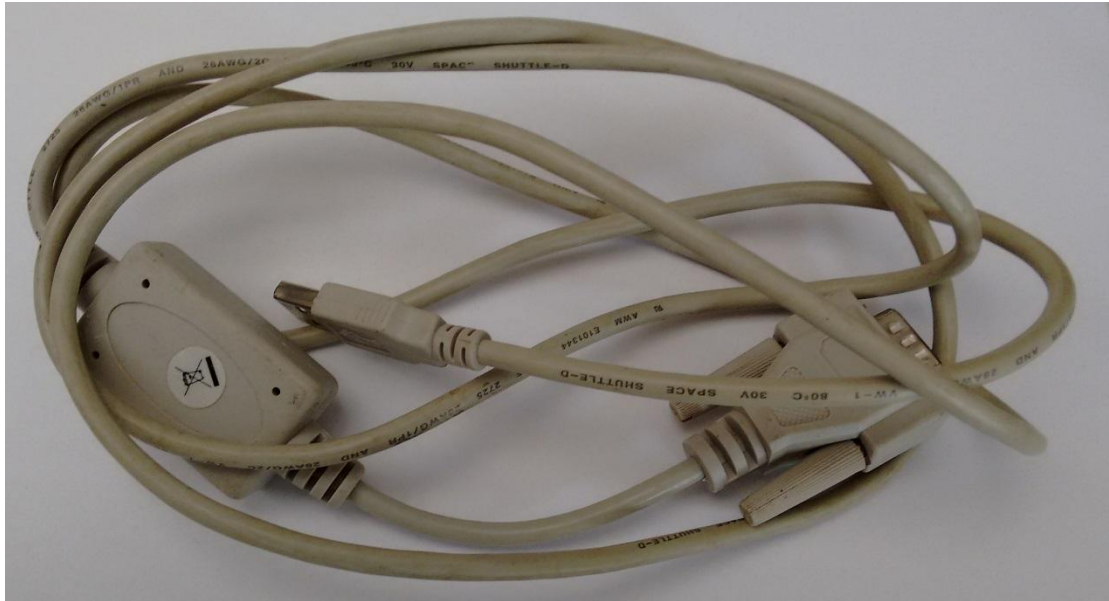
Εικόνα 38 Ο data logger για την καταγραφή των μετρήσεων ως αναλογικά σήματα που είναι συνδεδεμένα στις εισόδους του.

Για την μέτρηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης των πλαισίων χρησιμοποιήθηκαν δύο αντιστάσεις πολύ μικρής αντίστασης ώστε η τάση που προκύπτει να μπορεί να μετρηθεί από τον Data Logger. Οι αντιστάσεις αυτές συνδέθηκαν σε σειρά βραχυκυκλώνοντας τους ακροδέκτες του κάθε πλαισίου αντίστοιχα. Στη συνέχεια, συνδέθηκαν οι αντιστάσεις με τον Data Logger στα ειδικά σημεία που ορίζονται από τον κατασκευαστή.



Εικόνα 39 Αριστερά φαίνεται ο διαιρέτης τάσης που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή της τάσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου στα όρια της καταγραφικής συσκευής. Συναρμολόγησης

Για τη διασύνδεση του Data Logger CR10 χρησιμοποιήθηκε το κατάλληλο καλώδιο και η συσκευή. Με αυτό τον τρόπο έγινε ο προγραμματισμός του και η λήψη των μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα.



Εικόνα 40 Καλώδιο μετατροπής σειριακής επαφής σε θύρα usb για την επικοινωνία Η/Υ με τη συσκευή Data Logger CR10



Εικόνα 41 Η συσκευή αυτή βρίσκεται στο ενδιάμεσο της επικοινωνίας Η/Υ με τον Data Logger CR10.

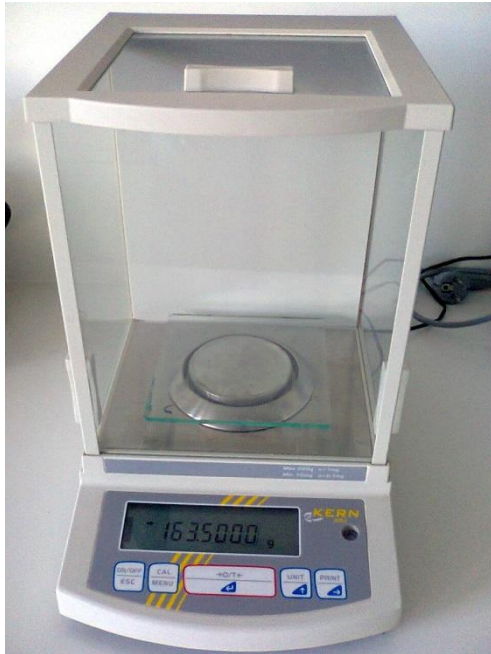


Εικόνα 42 Αισθητήριο θερμοκρασίας τύπου PT 100 το οποίο συνδέεται απευθείας επάνω στον Data Logger CR10



Εικόνα 43 Αισθητήριο πυκνότητας ισχύος ανά επιφάνεια

Από την άλλη πλευρά για την μέτρηση της μάζας της ρύπανσης – σκόνης. που επικάθεται στα γυάλινα δοκίμια, χρησιμοποιήθηκε ζυγαριά ακριβείας και η καταγραφή της ένδειξης της ζυγαριάς έγινε χειρόγραφα. Η ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε είναι εργαστηριακού τύπου της εταιρίας KERN-ABS/ABJ 220-4N με ακρίβεια μέτρησης 0.0001 gr. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή με τα λογισμικά Ms Office και Matlab.



Εικόνα 44 Ζυγαριά υψηλής ακριβείας για τον υπολογισμό της μάζας της ρύπανσης.

5. Ανάλυση Αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

5.1. Σύγκριση απόδοσης

Οι απώλειες δεν είναι σταθερές κατά τη διάρκεια του έτους άλλα διαφέρουν ανάλογα με την εποχή και τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες. Με τη βοήθεια της φωτοβολταϊκής κυψελίδας μπορεί να γίνει εκτίμηση των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ακόμα, μετρώντας το ρεύμα βραχυκύκλωσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να υπολογιστεί η παραγόμενη ισχύς από την παρακάτω σχέση.

$$I_{sc} = I_{sc, stc} \frac{G_t}{G_{stc}} (1 + a\Delta\theta)$$

I_{sc} : ρεύμα βραχυκύκλωσης

$\Delta\theta$: θερμοκρασία κυψελίδας

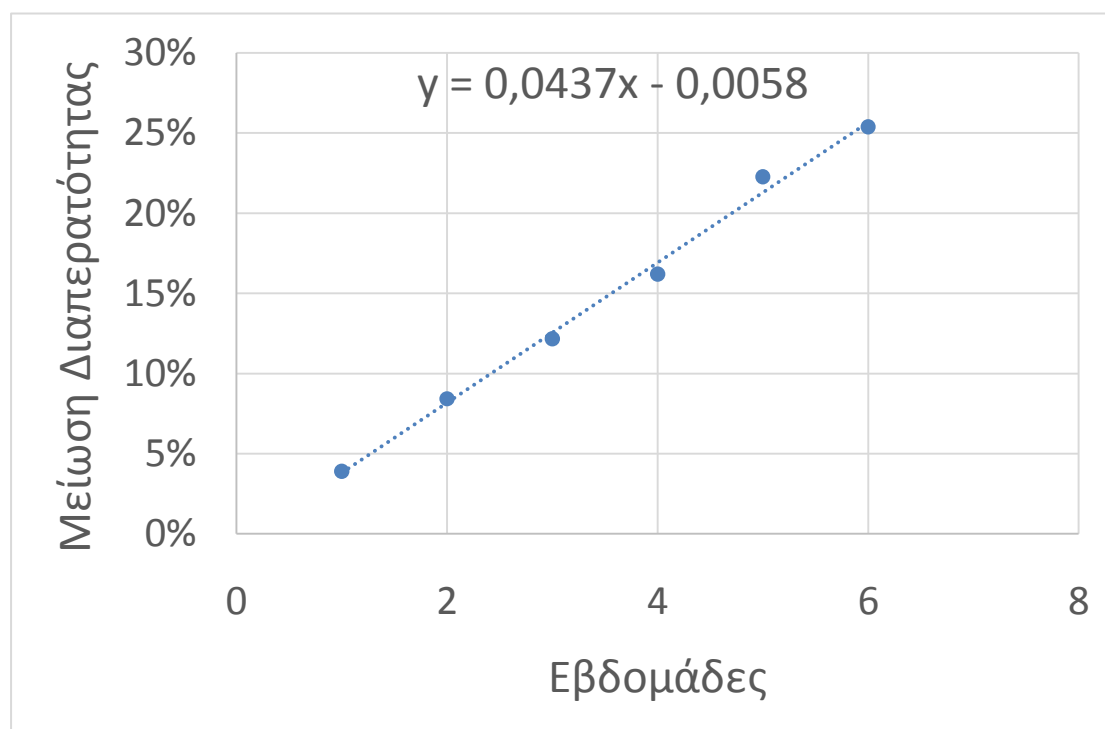
a : θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης

G_T : Πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας

G_{stc} : $1000\text{W}/\text{m}^2$

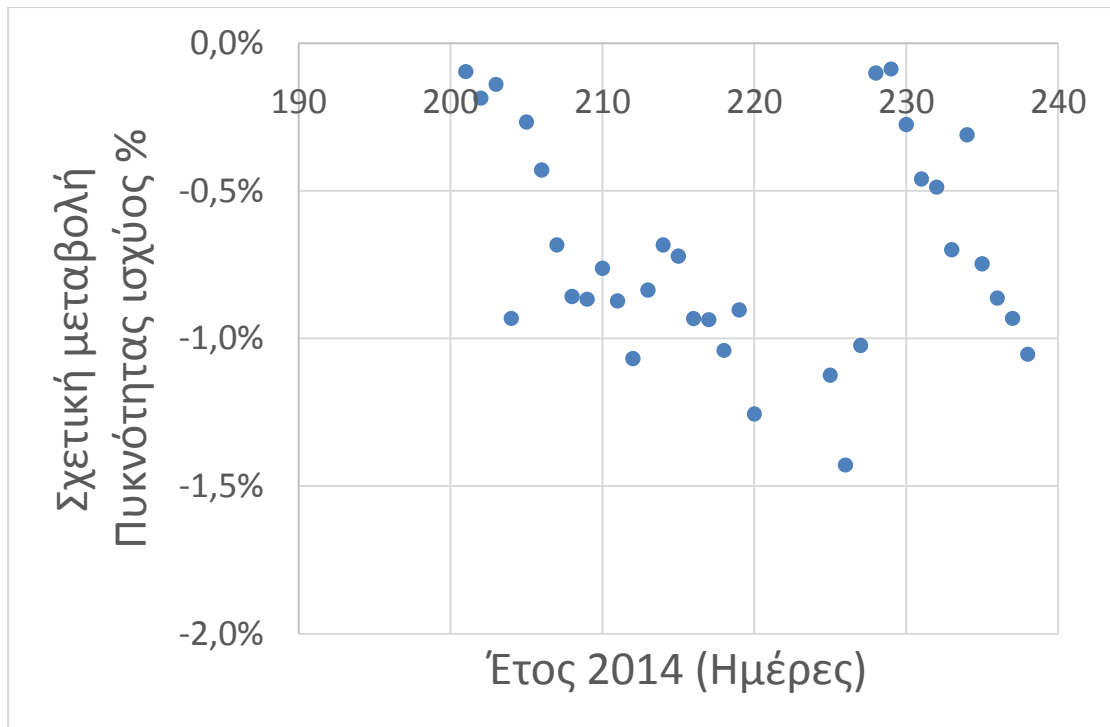
Τα πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδιου τύπου αλλά παρατηρήθηκαν κάποιες διαφορές στην απόδοση κοντά στο 0.9% που οφείλονται στην κατασκευή τους. Αυτό διορθώθηκε με συντελεστές οι οποίοι φέρνουν την καμπύλη λειτουργίας του κάθε πλαισίου πιο κοντά μεταξύ τους ώστε να είναι συγκρίσιμα.

Πειραματικές μετρήσεις της απευθείας συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας επάνω σε γυάλινα δοκίμια έδειξαν ότι οι απώλειες αυξάνονται περίπου 4% ανά εβδομάδα (δεδομένα αρχείου του εργαστηρίου Ενεργειακών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων).

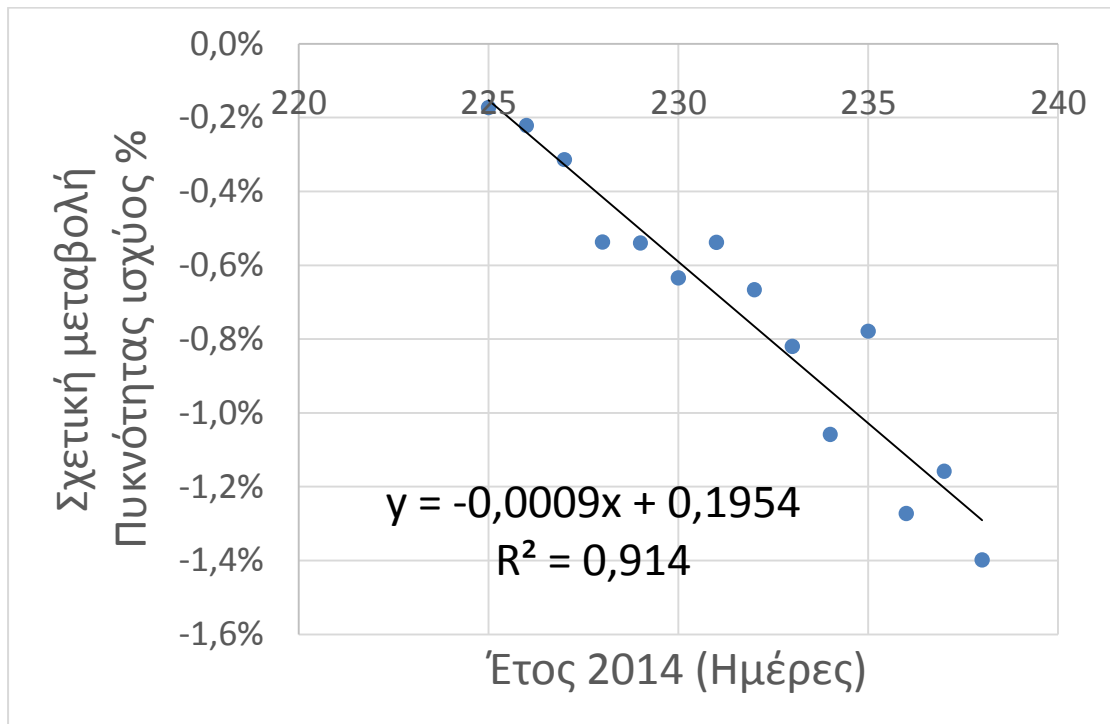


Εικόνα 45 Εβδομαδιαία μείωση διαπερατότητας βασισμένη σε μετρήσεις με τη βοήθεια της απευθείας συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολία εξαιτίας της συσσώρευσης σκόνης.

Οι μετρήσεις της αυτόματης συσκευή μέτρησης της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας για την περίοδο Ιουλίου – Αυγούστου έδειξε μια σχετικά γραμμική ελάττωση των μεταβολών. Για τον έλεγχο της συσκευής έγιναν δύο κύκλοι μετρήσεων όπου στην αρχή του κάθε κύκλου όλες οι επιφάνειες καθαρίστηκαν πολύ καλά. Οι μέρες έναρξης των πειραμάτων φαίνεται στην 200^η ημέρα και την 225^η.



Εικόνα 46 Ημερήσια δεδομένα από τη συσκευή μέτρηση πυκνότητας ισχύος με σκοπό τη σύγκριση καθαρού - σκονισμένου δοκιμίου.

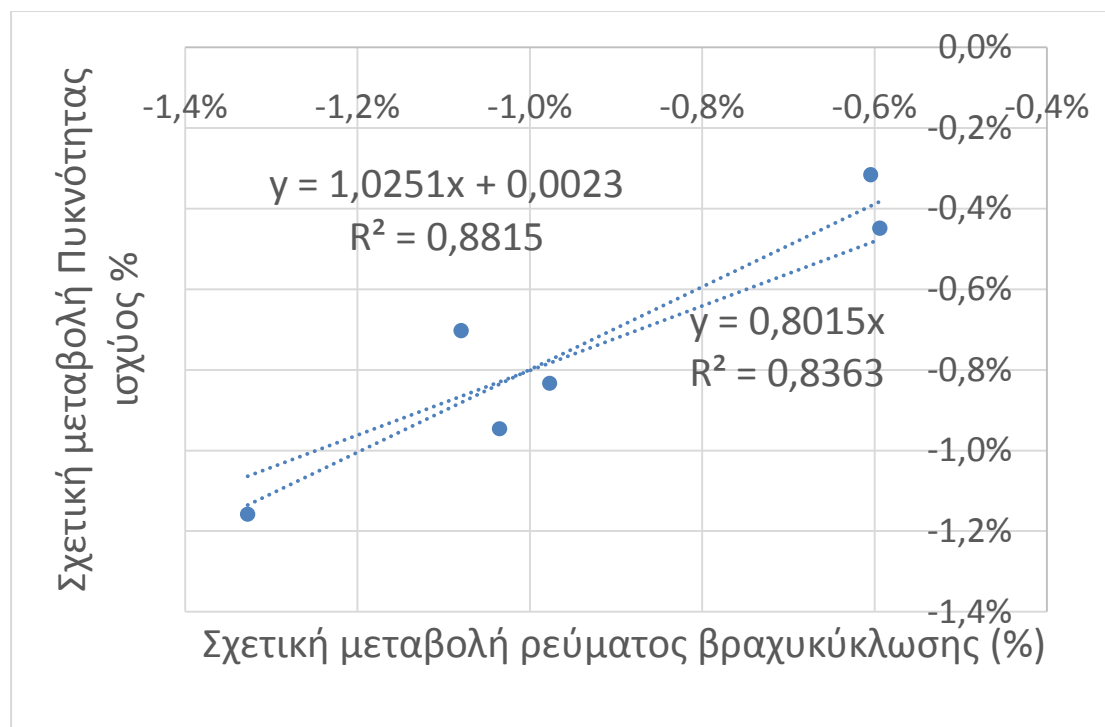


Εικόνα 47 Στιγμαία δεδομένα από τη συσκευή μέτρηση πυκνότητας ισχύος με σκοπό τη σύγκριση καθαρού - σκονισμένου δοκιμίου. (Μία μέτρηση ανά ημέρα).

Οι μεταβολές της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας μετρούνται από την ηλιακή κυψελίδα. Θεωρούμε ότι οι μεταβολές της φωτοβολταϊκής ενέργειας είναι ανάλογες των μεταβολών της πυκνότητας ισχύος.

$$\text{Σχετική μεταβολή πυκνότητα ισχύος} = \frac{\text{Πυκνότητα Ισχύος με Σκόνη}}{\text{Πυκνότητα Ισχύος χωρίς Σκόνη}} - 1$$

Αυτό που μας ενδιαφέρει συσχετιστούν οι απώλειες φωτοβολταϊκής ενέργειας με τις απώλειες πυκνότητας ισχύος. Έτσι το παρακάτω διάγραμμα δείχνει επιλεγμένες μετρήσεις για μερικές ημέρες τον μήνα Αύγουστο. Η διαδικασία αυτή απαιτεί εξοπλισμό με υψηλή ακρίβεια και φωτοβολταϊκά πλαίσια τις ίδιες σειρές ώστε να είναι δυνατή η μεταξύ τους σύγκριση.



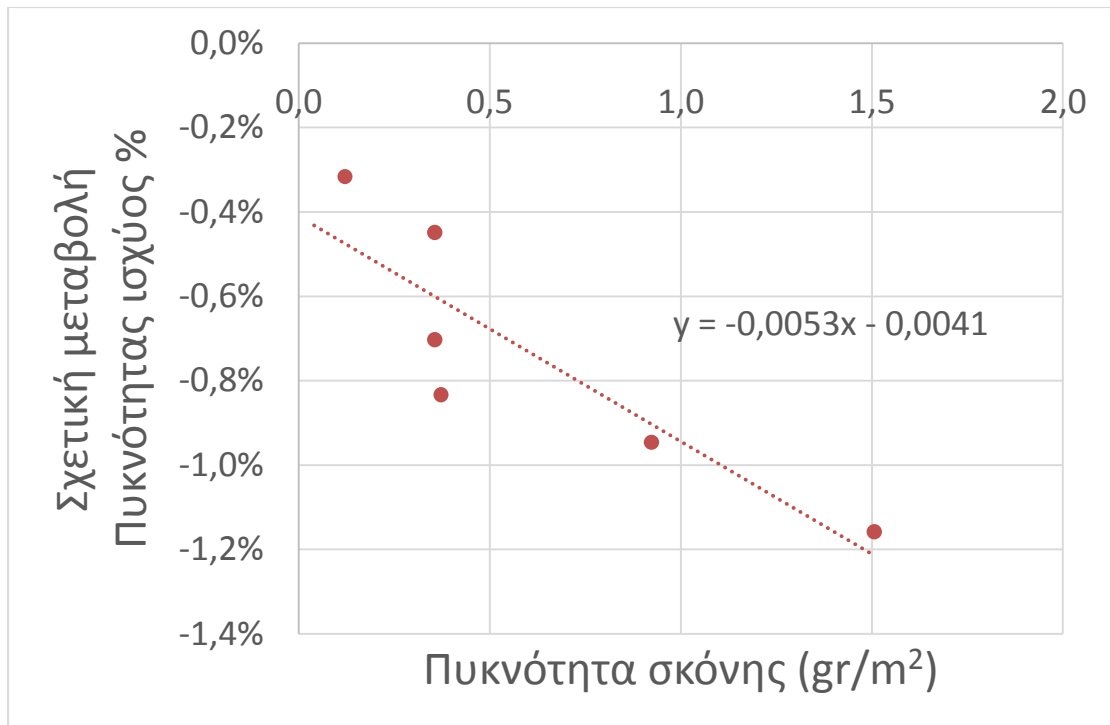
Εικόνα 48 Οι απώλειες στα ΦΒ πλαίσια σε συνάρτηση με την σχετική μεταβολή πυκνότητας ισχύος που καταγράφηκε από την αυτόματη συσκευή.

5.2. Υπολογισμός μάζας σκόνης

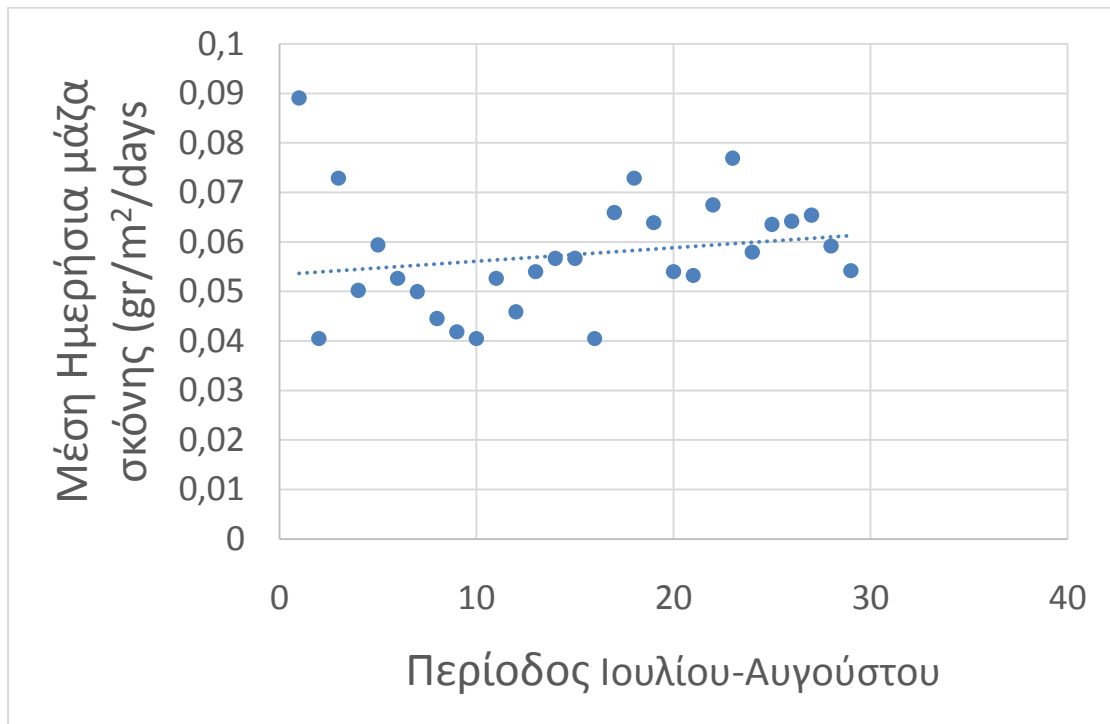
Το αντικείμενο που εξετάζεται σε αυτό το πειραματικό μέρος είναι η καταγραφή της σκόνης που συσσωρεύεται επάνω σε γυάλινα δοκίμια τα οποία εκτέθηκαν κατά διαστήματα σε εξωτερικές καιρικές συνθήκες. Συγκεκριμένα έγινε προσπάθεια μέτρησης της μάζας της σκόνης – ρύπανσης αν μικρές σχετικά χρονικές περιόδους των 2-3 ημερών. Τα πειράματα έγιναν κατά τους θερινούς μήνες ώστε το φαινόμενο να είναι πιο έντονο λόγω της απουσίας κατακρημνίσεων που απομακρύνουν τη σκόνη. Τέτοια πειράματα απαιτούν ειδικούς ζυγούς μεγάλης ακρίβειας διότι οι ποσότητες σκόνης είναι πολύ χαμηλές σε μικρές περιόδους.

Η ημερήσια συσσωρευόμενη σκόνη επάνω στα γυάλινα δοκίμια για τη θερινή περίοδο Ιουλίου – Αυγούστου 2014 κυμάνθηκε μεταξύ 0.09 – 0.04 gr/m²/ημέρα. Αυτές οι τιμές είναι πολύ μικρότερες από 2.5 g/m²/ημέρα οι οποίες παρατηρήθηκαν στη μελέτη του Sayigh στο Κουβέιτ μεταξύ Απριλίου και Ιουνίου (Sayigh, 1978, pp. 960-964).

Η έρευνα των Burton και King έδειξε ότι οι απώλειες που εμφανίζονται λόγω της συσσώρευσης μάζας επάνω στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι γραμμικές σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση μάζας ανά επιφάνεια. Τα πειράματά που έκαναν έγιναν μέσα στο εργαστήριο με τεχνητό ήλιο Spectrolab XT-10 με λαμπτήρα 1 kW Xenon το οποίο αποδίδει φάσμα AM 1.5.

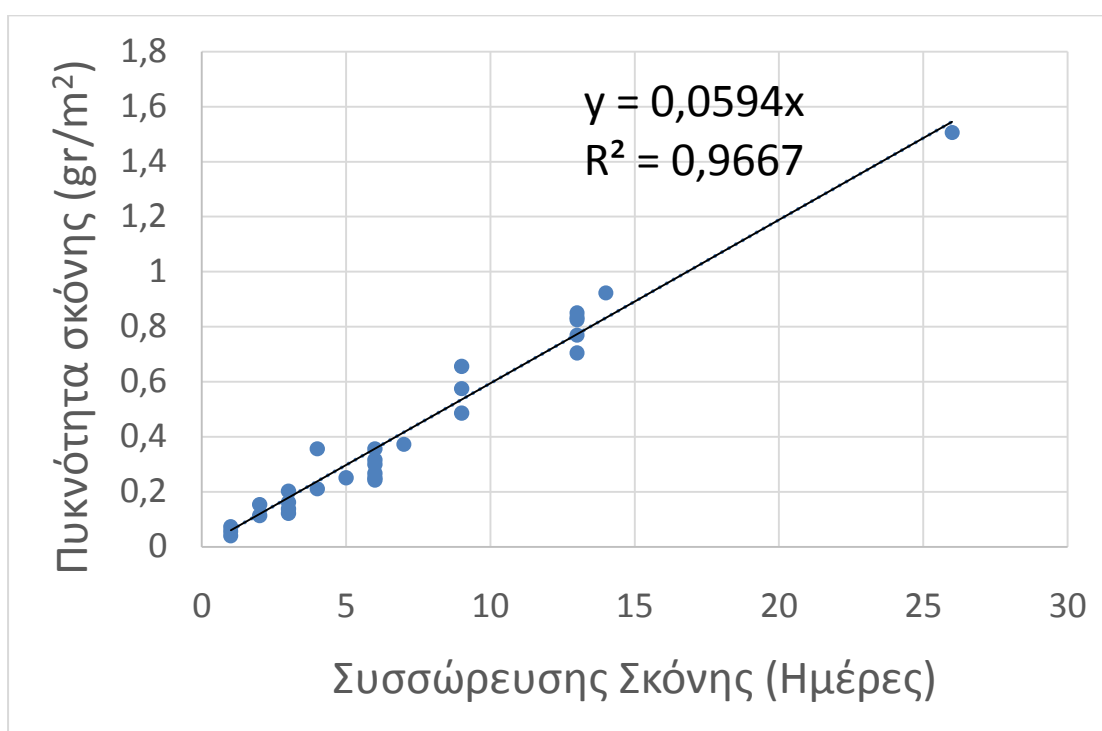


Εικόνα 49 Η πυκνότητα σκόνης σε συνάρτηση των απωλειών στα ΦΒ πλαίσια παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά.



Εικόνα 50 Ημερήσια συσσώρευση σκόνης επάνω στα δοκίμια γυαλιού.

Τα δεδομένα όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις της αυτόματης συσκευής καταγραφής σε συνδυασμό με τα δεδομένα από την μέτρηση της πυκνότητας σκόνης έδειξε ενδεικτικά ότι για πυκνότητα σκόνης 1 gr/m^2 . Από τις μετρήσεις πυκνότητας σκόνης φάνηκε ότι η ημερήσια συσσώρευση σκόνης βρίσκεται περίπου στα 60 mgr/m^2 για την περίοδο Ιουλίου- Αυγούστου.



Εικόνα 51 Η συσσώρευση σκόνης - ρύπων στα γυάλινα δοκίμια παρουσίασε γραμμική συμπεριφορά για συνεχόμενες ημέρες.

Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι η ημερήσια συσσώρευση σκόνης αυξάνεται γραμμικά σύμφωνα με την εξίσωση $y=0.0594x$. Με άλλα λόγια καθημερινά προστίθενται 59.4 mgr/m^2 περίπου για της επικρατούσες συνθήκες αυτές.

6. Βελτιώσεις Πειραματικών Διατάξεων

Το γεγονός ότι τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν τη μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων από τη συσσώρευση σκόνης – ρύπων επάνω στην επιφάνειά τους, καθιστά αναγκαία την γνώση της απώλειας αυτής σε κάθε περίπτωση. Το μεγάλο πρόβλημα με την συσσώρευση σκόνης είναι ότι παρουσιάζει μεταβολές που εξαρτώνται από τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες καθώς και από την κλίση των φωτοβολταϊκών. Ιδιαίτερα στην Κρήτη οι τοπικές συνθήκες επηρεάζονται σημαντικά από την μεταφορά σκόνης από την Βόρεια Αφρικής με την βοήθεια ισχυρών βόρειων ανέμων. Υπάρχει μεγάλη δυσκολία γενίκευσης της γνώσης σε πολλές περιοχές της υδρογείου.

Οι πειραματικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής έχουν πολλαπλούς στόχους. Πρώτος σκοπός ήταν η απόκτηση εμπειρίας στο εργαστήριο των Ενεργειακών και Φωτοβολταϊκών Συστημάτων επάνω στο φαινόμενο ρύπανσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων και η μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας. Ο δεύτερος στόχος ήταν η δημιουργία καινοτόμων αυτοματοποιημένων συστημάτων που θα μπορούν να εγκατασταθούν σε διαφορετικά περιβάλλοντα και θα επέτρεπαν την καλύτερη μελέτη του φαινομένου. Τελικός στόχος ήταν να προκύψουν συμπεράσματα τα οποία να βοηθήσουν στην καλύτερη εκτίμηση των απωλειών που οφείλονται στην ρύπανση της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

7. Βιβλιογραφία

- Cano, J. (2011). Photovoltaic Modules: Effect of Tilt Angle on Soiling . *Thesis for the degree Master of Science*.
- Chin Yin Lee^{1*}, J. K. (n.d.). An innovative approach to examine soiling impact on photovoltaic module performance. *Solar photovoltaics* .
- Detrick, A., & Kimber, A. &. (2005). Performance Evaluation Standards for Photovoltaic Modules and Systems. *Proceedings of the 31 st IEEE Photovoltaics Specialists Conference*, 1581-1586.
- Hutchinson, T. U. (2000). Soiling Analysis at PVUSA,. *Proceedings of ASES-2000*.
- Ibrahim, M., Zinsser, B., El-Sherif, H., Hamouda, E., Makrides, G., & Georghiou, G. (March 2009). Advanced Photovoltaic Test Park in Egypt for Investigating the Performance of Different Module and Cell Technologies. *Proceedings of the 24 th Symposium Photovoltaic Solar Energy,Staffelstien, Germany* , .
- J. Zorrilla-Casanova *, M. P.-L.-d.-C. (2011). Analysis of dust losses in photovoltaic modules. *World Renewable Energy Congress*.
- King, P. D. (n.d.). Artificial Soiling of Photovoltaic Module Surfaces.
- Kymakis, E., & Kalykakis, S. &. (2009). Performance Analysis of a Grid Connected Photovoltaic Park on the Island of Crete. *Energy Conversion and Management*, 433–438.

Sayigh, A. A. (1978). Effect of dust on flat plate collectors. *International Solar Energy Congress, New Delhi.*

Shaharin A. Sulaiman, H. H. (2011). Effects of Dust on the Performance of PV Panels. *World Academy of Science, Engineering and Technology.*

Φραγκιαδάκης, Ι. (2009). *Φωτοβολταϊκά συστήματα*. 3η εκδ.

8. Παράρτημα Α

8.1. Πρόγραμμα ελέγχου λειτουργίας Data Logger CR10

```

;{CR10}
*Table 1 Program
  01: 1.0000      Execution Interval (seconds)

;Battery Measurement
1:  Batt Voltage (P10)
  1: 1           Loc [ BattV      ]

;Program signature every 24 hours
2:  If time is (P92)
  1: 0           Minutes (Seconds --) into a
  2: 1440        Interval (same units as above)
  3: 30          Then Do

3:  Signature (P19)
  1: 2           Loc [ ProgSig    ]

4:  End (P95)

;Voltage measurements
5:  Volt (Diff) (P2)
  1: 1           Reps
  2: 35          2500 mV 50 Hz Rejection Range
  3: 1           DIFF Channel
  4: 3           Loc [ CellTemperature ]
  5: 1.0        Mult
  6: 0.0        Offset

6:  Volt (Diff) (P2)
  1: 1           Reps
  2: 35          2500 mV 50 Hz Rejection Range
  3: 2           DIFF Channel
  4: 4           Loc [ SolarCell  ]
  5: 1.0        Mult
  6: 0.0        Offset

7:  Volt (Diff) (P2)
  1: 1           Reps
  2: 33          25 mV 50 Hz Rejection Range
  3: 3           DIFF Channel
  4: 5           Loc [ PVClean   ]
  5: 1.0        Mult
```

```

6: 0.0      Offset

8: Volt (Diff) (P2)
1: 1       Reps
2: 33      25 mV 50 Hz Rejection Range
3: 4       DIFF Channel
4: 6       Loc [ PVDusty ]
5: 1.0     Mult
6: 0.0     Offset

9: 3W Half Bridge (P7)
1: 1       Reps
2: 33      25 mV 50 Hz Rejection Range
3: 9       SE Channel
4: 1       Excite all reps w/Exchan 1
5: 2100    mV Excitation
6: 7       Loc [ TempClean  ]
7: 100     Mult
8: 0       Offset

10: Temperature RTD (P16)
1: 1       Reps
2: 7       R/R0 Loc [ TempClean  ]
3: 7       Loc [ TempClean  ]
4: 1.0     Mult
5: 0.0     Offset

11: 3W Half Bridge (P7)
1: 1       Reps
2: 33      25 mV 50 Hz Rejection Range
3: 11      SE Channel
4: 1       Excite all reps w/Exchan 1
5: 2100    mV Excitation
6: 8       Loc [ TempDusty  ]
7: 100     Mult
8: 0       Offset

12: Temperature RTD (P16)
1: 1       Reps
2: 8       R/R0 Loc [ TempDusty  ]
3: 8       Loc [ TempDusty  ]
4: 1.0     Mult
5: 0.0     Offset

;If port 1 is High then trigger CR10X to store
measurements
13: If Flag/Port (P91)
1: 41      Do if Port 1 is High
2: 10      Set Output Flag High (Flag 0)

;Store Year/Day/Hour-Minute of measurement

```

```

14: Real Time (P77)^20731
   1: 1221      Year,Day,Hour/Minute,Seconds (midnight =
2400)

;Store the 1st measurement
15: Sample (P70)^15789
   1: 1      Reps
   2: 3      Loc [ CellTemperature ]

;Store the 2nd measurement
16: Sample (P70)^26620
   1: 1      Reps
   2: 4      Loc [ SolarCell ]

;Store the 3rd measurement
17: Sample (P70)^26302
   1: 1      Reps
   2: 5      Loc [ PVClean ]

;Store the 4th measurement
18: Sample (P70)^7631
   1: 1      Reps
   2: 6      Loc [ PVDusty ]

;store 1st Temperature
19: Sample (P70)^11653
   1: 1      Reps
   2: 7      Loc [ TempClean ]

;Store 2nd Temperature
20: Sample (P70)^13246
   1: 1      Reps
   2: 8      Loc [ TempDusty ]

;store the battery
21: Sample (P70)^30150
   1: 1      Reps
   2: 1      Loc [ BattV ]

*Table 2 Program
  01: 10.0000 Execution Interval (seconds)

1: Serial Out (P96)
  1: 71      Storage Module

*Table 3 Subroutines

End Program

```

8.2. Πρόγραμμα για τον υπολογισμό μετρήσεων

```
#include<iostream>
#include<sstream>
#include<fstream>
#include<vector>
#include<string>
#include<ctime>
#include<iomanip>
#include<cstdlib>
#include<windows.h>
#include<stdio.h>
#include<dir.h>
#include<cstddef>
#include<cstdio>
#include <cstring>

void diaxorismosModule ();
void AverageValue ();
void CheckMissingMeasurements ();

using namespace std;

int main()
{
//*****Arxeia
Dedomenwn*****

    int y=2;
    int x=0;

//*****
*****
    while (y!=0)
    {

        cout<<"dose 1 run diaxorismos se 4 arxeia!"<<endl;
        cout<<"dose 2 Meses times kai ypologismoi "<<endl;
        cout<<"dose 3 Elegxos metrhsewn pou leipoun, swstes
tetradas"<<endl;
        cout<<"dose 0 gia exit"<<endl;
        cin>>y;

        if (y==1) diaxorismosModule ();
        if (y==2) AverageValue ();
        if (y==3) CheckMissingMeasurements ();

    }
//system("pause");
    return 0;

}
//diabazei ena arxeio me oles tis 8eseis twn 2 plaisiwn kai tis
diaxorizei se 6 fakelous

void diaxorismosModule ()
{
    system("rm -r MeasurementsFixed");
```

```

        CreateDirectory("MeasurementsFixed", NULL);
        std::stringstream inputTXT, LoggerMeasurementsInput;
        //diatrexw ola ta arxeia dedomenwn
        cout<<"to arxeio diabastike ";
        std::ifstream
imeasure("CR10_final_storage_All_WithComma.dat");
        std::ofstream
omeasure1("MeasurementsFixed/FileName1.txt");
        std::ofstream
omeasure2("MeasurementsFixed/FileName2.txt");
        std::ofstream
omeasure3("MeasurementsFixed/FileName3.txt");
        std::ofstream
omeasure4("MeasurementsFixed/FileName4.txt");
        std::string
FirstLine, SecondLine, ThirdLine, FourthLine;

        while(imeasure>>FirstLine)
        {
            imeasure>>SecondLine;
            imeasure>>ThirdLine;
            imeasure>>FourthLine;

            while(FirstLine.find(",")>0 && FirstLine.find(",")<60)
            {FirstLine=FirstLine.replace(FirstLine.find(","), 1, " ");}

            while(SecondLine.find(",")>0 && SecondLine.find(",")<60)
            {SecondLine=SecondLine.replace(SecondLine.find(","), 1, " ");}

            while(ThirdLine.find(",")>0 && ThirdLine.find(",")<60)
            {ThirdLine=ThirdLine.replace(ThirdLine.find(","), 1, " ");}

            while(FourthLine.find(",")>0 && FourthLine.find(",")<60)
            {FourthLine=FourthLine.replace(FourthLine.find(","), 1, " ");}

            omeasure1<<FirstLine<<"\n";
            omeasure2<<SecondLine<<"\n";
            omeasure3<<ThirdLine<<"\n";
            omeasure4<<FourthLine<<"\n";
        }

    }

    void AverageValue()
    {
        //diatrexw ola ta arxeia dedomenwn
        cout<<"to arxeio diabastike ";
        std::ofstream
outPVall("MeasurementsFixed/AveragePVall.dat");
        std::ofstream
outDustChecker("MeasurementsFixed/AverageDustChecker.dat");
        std::ofstream
outPVWeek("MeasurementsFixed/AveragePVWeek.dat");
    }

```

```

        std::ofstream
outDustCheckerWeek ("MeasurementsFixed/AverageDustCheckerWeek.dat");

        std::ifstream
imeasure1 ("MeasurementsFixed/FileName1.txt");
        std::ifstream
imeasure2 ("MeasurementsFixed/FileName2.txt");
        std::ifstream
imeasure3 ("MeasurementsFixed/FileName3.txt");
        std::ifstream
imeasure4 ("MeasurementsFixed/FileName4.txt");
        std::string
Table1, Year1, Day1, Time1, Second1, SolarCell1, TempCell1, mVClean1, mVDusty
1, TempPVClean1, TempPVDusty1, Batt1;
        std::string
Table2, Year2, Day2, Time2, Second2, SolarCell2, TempCell2, mVClean2, mVDusty
2, TempPVClean2, TempPVDusty2, Batt2;
        std::string
Table3, Year3, Day3, Time3, Second3, SolarCell3, TempCell3, mVClean3, mVDusty
3, TempPVClean3, TempPVDusty3, Batt3;
        std::string
Table4, Year4, Day4, Time4, Second4, SolarCell4, TempCell4, mVClean4, mVDusty
4, TempPVClean4, TempPVDusty4, Batt4;

        double
AverCellmVTempCleaR, AverCellTempCleaR, AvermVSolarCleaR, AverSolarCleaR
;

        double
AverCellmVTempDusty, AverCellTempDusty, AvermVSolarDusty, AverSolarDusty
;

        double AvermVClean, AverIscClean, AverPVTempClean;
        double AvermVDusty, AverIscDusty, AverPVTempDusty;
        double TempPVClean, TempPVDusty;

        while (imeasure1>>Table1)
        {
imeasure1>>Year1;
imeasure1>>Day1;
imeasure1>>Time1;
imeasure1>>Second1;
imeasure1>>SolarCell1;
imeasure1>>TempCell1;
imeasure1>>mVClean1;
imeasure1>>mVDusty1;
imeasure1>>TempPVClean1;
imeasure1>>TempPVDusty1;
imeasure1>>Batt1;

imeasure2>>Table2;
imeasure2>>Year2;
imeasure2>>Day2;
imeasure2>>Time2;
imeasure2>>Second2;
imeasure2>>SolarCell2;
imeasure2>>TempCell2;
imeasure2>>mVClean2;
imeasure2>>mVDusty2;
imeasure2>>TempPVClean2;
imeasure2>>TempPVDusty2;
imeasure2>>Batt2;

```



```

imeasure3>>Table3;
imeasure3>>Year3;
imeasure3>>Day3;
imeasure3>>Time3;
imeasure3>>Second3;
imeasure3>>SolarCell3;
imeasure3>>TempCell3;
imeasure3>>mVClean3;
imeasure3>>mVDusty3;
imeasure3>>TempPVClean3;
imeasure3>>TempPVDusty3;
imeasure3>>Batt3;

imeasure4>>Table4;
imeasure4>>Year4;
imeasure4>>Day4;
imeasure4>>Time4;
imeasure4>>Second4;
imeasure4>>SolarCell4;
imeasure4>>TempCell4;
imeasure4>>mVClean4;
imeasure4>>mVDusty4;
imeasure4>>TempPVClean4;
imeasure4>>TempPVDusty4;
imeasure4>>Batt4;

//Check correct match!
if(Day1!=Day2 || Day1!=Day3 || Day1!=Day4) cout<<
"problem Day "<<Day1<<","<<Day2<<","<<Day3<<","<<Day4<<endl;
if(Time1.substr(0,2)!=Time2.substr(0,2) ||
Time1.substr(0,2)!=Time3.substr(0,2) ||
Time1.substr(0,2)!=Time4.substr(0,2)) cout<<"problem Time
"<<Day1<<","<<Time1<<","<<Time2<<","<<Time3<<","<<Time4<<endl;

AvermVSolarCleaR=(atof(SolarCell1.c_str())+atof(SolarCell3.c_str()))/
2;
AverSolarCleaR=AvermVSolarCleaR*6*1200/10/1000;

AvermVSolarDusty=(atof(SolarCell2.c_str())+atof(SolarCell4.c_str()))/
2;
AverSolarDusty=AvermVSolarDusty*6*1200/10/1000;

AverCellmVTempCleaR=(atof(TempCell1.c_str())+atof(TempCell3.c_str()))
/2;
AverCellTempCleaR=(AverCellmVTempCleaR*0.006-1.84)/0.092;

AverCellmVTempDusty=(atof(TempCell2.c_str())+atof(TempCell4.c_str()))
/2;
AverCellTempDusty=(AverCellmVTempDusty*0.006-1.84)/0.092;

AvermVClean =
(atof(mVClean1.c_str())+atof(mVClean2.c_str())+atof(mVClean3.c_str())
+atof(mVClean4.c_str()))/4;
AverIscClean = AvermVClean*100/75;
if(AverIscClean<0)AverIscClean=0;

```

```

        AvermVDusty =
(atof(mVDusty1.c_str())+atof(mVDusty2.c_str())+atof(mVDusty3.c_str())
+atof(mVDusty4.c_str()))/4;
        AverIscDusty = AvermVDusty*100/75;
        if(AverIscDusty<0)AverIscDusty=0;

TempPVClean=(atof(TempPVClean1.c_str())+atof(TempPVClean2.c_str())+at
of(TempPVClean3.c_str())+atof(TempPVClean4.c_str()))/4;

TempPVDusty=(atof(TempPVDusty1.c_str())+atof(TempPVDusty2.c_str())+at
of(TempPVDusty3.c_str())+atof(TempPVDusty4.c_str()))/4;

if(Time1.substr(0,2)=="10" || Time1.substr(0,2)=="11" ||
Time1.substr(0,2)=="12" || Time1.substr(0,2)=="13" ||
Time1.substr(0,2)=="14" || Time1.substr(0,2)=="15")
{
    //Day Year Time IscClean IscDusty TempClean TempDusty

outPVall<<setprecision(7)<<Day1<<","<<Year1<<","<<Time1<<","<<AverIsc
Clean<<","<<AverIscDusty<<","<<TempPVClean<<","<<TempPVDusty<<"\n";
    //Day Year Time SolarCellClear SolarCellDusty CellTempClear
CellTempDusty

outDustChecker<<setprecision(7)<<Day1<<","<<Year1<<","<<Time1<<","<<A
verSolarCleaR<<","<<AverSolarDusty<<","<<AverCellTempCleaR<<","<<Aver
CellTempDusty<<"\n";
}
if(Time1.substr(0,2)=="12")
{
    //Day Year Time IscClean IscDusty TempClean TempDusty

outPVWeek<<setprecision(7)<<Day1<<","<<Year1<<","<<Time1<<","<<AverIs
cClean<<","<<AverIscDusty<<","<<TempPVClean<<","<<TempPVDusty<<"\n";
    //Day Year Time SolarCellClear SolarCellDusty CellTempClear
CellTempDusty

outDustCheckerWeek<<setprecision(7)<<Day1<<","<<Year1<<","<<Time1<<","
<<AverSolarCleaR<<","<<AverSolarDusty<<","<<AverCellTempCleaR<<","<<
AverCellTempDusty<<"\n";
}

    }

}

void CheckMissingMeasurements()
{

    //diatrexw ola ta arxeia dedomenwn
    std::ofstream
outProblems("MeasurementsFixed/Problems.dat");
    std::ifstream
imeasure("CR10_final_storage_All_NoComma.dat");

```

```

        std::string
Table1,Year1,Day1,Time1,Second1,SolarCell1,TempCell1,mVClean1,mVDusty
1,TempPVClean1,TempPVDusty1,Batt1;
        std::string
Table2,Year2,Day2,Time2,Second2,SolarCell2,TempCell2,mVClean2,mVDusty
2,TempPVClean2,TempPVDusty2,Batt2;
        std::string TempTime;
        int Counter=1;

        imeasure>>Table1;
        imeasure>>Year1;
        imeasure>>Day1;
        imeasure>>Time1;
        imeasure>>Second1;
        imeasure>>SolarCell1;
        imeasure>>TempCell1;
        imeasure>>mVClean1;
        imeasure>>mVDusty1;
        imeasure>>TempPVClean1;
        imeasure>>TempPVDusty1;
        imeasure>>Batt1;

        TempTime=Time1.substr(0,2);

        while (imeasure>>Table2)
        {
        imeasure>>Year2;
        imeasure>>Day2;
        imeasure>>Time2;
        imeasure>>Second2;
        imeasure>>SolarCell2;
        imeasure>>TempCell2;
        imeasure>>mVClean2;
        imeasure>>mVDusty2;
        imeasure>>TempPVClean2;
        imeasure>>TempPVDusty2;
        imeasure>>Batt2;

        //Elegxo an oi tetrades tw n metr hsewn exoun ginei, se periptwsh pou
        kapoia leipei emfanizetai arxeio problhmatwn!!!

        if (TempTime==Time2.substr(0,2))
        {
        Counter++;
        }
        else if (Counter==4)
        {
        Counter=1;
        }
        else if (Counter==3)
        {
        Counter=1;
        outProblems<< "problem Day 3 "<<Day2<<","<<Time2<<endl;
        }
        else
        {
        Counter=1;
        outProblems<< "problem Day <4 "<<Day2<<","<<Time2<<endl;
        }
        TempTime=Time2.substr(0,2);
    }}

```