



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

*Μελέτη της επίδρασης αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης  
στη λειτουργία φωτοβολταϊκών πλαισίων*

**Διπλωματική εργασία**

**της Τσεσμελή Χρυσοβαλάντης**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Μπουντουβής Ανδρέας**

Αθήνα, 2013

# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με την εταιρεία NanoPhos A.E.

Σκοπός της εργασίας είναι η εξέταση της συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού (φ/β) πλαισίου μετά από την επίστρωση της επιφάνειάς του με το εμπορικό προϊόν *SurfaShield G* της εταιρείας NanoPhos A.E., μια επίστρωση που καθιστά την επιφάνεια του πλαισίου αυτοκαθαριζόμενη. Η εγκατάσταση και η μελέτη έγινε στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο του Λαυρίου κατά το διάστημα Μάρτιος 2012 έως Δεκέμβριος 2012.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα Καθηγητή Α. Μπουντουβή για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη που μου παρείχε. Επίσης, τον Δρ. Ν. Στεφανάκη για την πολύτιμη και συνεχόμενη βοήθειά του στο θεωρητικό και υπολογιστικό μέρος της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα στελέχη της εταιρείας NanoPhos A.E. και ιδιαίτερα τον Δρ. Ι. Αραμπατζή, τον Δρ. Β. Θεοχαράκη και την Δρ. Ι. Φασάκη που πρότειναν το θέμα της εργασίας και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον Καθηγητή Ι. Πασπαλιάρη της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών για την παροχή της φ/β διάταξης στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου, καθώς και τον Δρ. Α. Πέππα. Σημαντική ήταν και η βοήθεια από τον Λ. Καραλή που ανέπτυξε τον ισότοπο καταγραφής των μετρήσεων και τον Δρ. Π. Μπενάρδο για την άμεση τεχνική υποστήριξη σ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική παρουσιάζει έναν εναλλακτικό τρόπο συντήρησης των φ/β πλαισίων, όσον αφορά τον καθαρισμό των επιφανειών τους, μέσω μιας αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης.

Η αυτοκαθαριζόμενη επίστρωση είναι ένα εμπορικό προϊόν (SurfaShield G) της εταιρείας NanoPhos A.E. Πρόκειται για μια ανόργανη νανοδομημένη επίστρωση που δένει χημικά στο υπόστρωμα (γυάλινη επιφάνεια). Αποτελείται από μίγμα οξειδίων μετάλλων (κυρίως  $\text{TiO}_2$ ) και το πάχος της είναι της τάξης των 150 nm. Εναποτίθεται σε γυάλινες επιφάνειες με ειδικό ψεκαστικό. Η επίστρωση μετατρέπει την γυάλινη επιφάνεια σε αντιστατική, αντιανακλαστική (κατά 3% σε σχέση με το απλό γυαλί), υπερυδρόφιλη (γωνία επαφής ίση με  $5^\circ$ ), και την απαλλάσσει από οργανικούς ρύπους μέσω του φωτοκαταλυτικού φαινομένου.

Αρχικά, έγινε προσπάθεια ενίσχυσης α) της ανακλαστικότητας της επίστρωσης στο υπέρυθρο, καθώς είναι μια μορφή ακτινοβολίας που δεν εκμεταλλεύεται το φ/β, και β) της αντιστατικότητας. Εξετάστηκε η προσθήκη των ουσιών  $\text{SnO}_2$  και  $\text{ZrSiO}_4$  που εμφανίζουν ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο και εξετάστηκαν τρία εμπορικά προϊόντα που διατίθενται ως αντιστατικά και περιέχουν διάφορα οξείδια μετάλλων. Οι παραπάνω προσπάθειες δεν οδήγησαν σε θετικό αποτέλεσμα διότι στην πρώτη περίπτωση, μετά την προσθήκη των δύο παραπάνω ουσιών, η επίστρωση εμφάνιζε αυξημένη ανακλαστικότητα όχι μόνο στην περιοχή του υπέρυθρου αλλά και του ορατού. Στη δεύτερη περίπτωση, η επίστρωση έπειτα από την προσθήκη του ενός εμπορικού αντιστατικού προϊόντος εμφάνιζε καλύτερη συμπεριφορά έναντι της σκόνης αλλά δεν επελέγη γιατί μείωνε τη διαπερατότητα της επιφάνειας. Τα άλλα δύο αντιστατικά εμπορικά προϊόντα δεν ήταν συμβατά με το διάλυμα του αρχικού προϊόντος.

Στη συνέχεια, εγκαταστάθηκαν δύο πανομοιότυπα φ/β πλαίσια στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο του Λαυρίου και αφού αφέθηκαν να λειτουργούν επί 2 μήνες περίπου (15/03/12-31/05/12), εφαρμόστηκε η επίστρωση την 1<sup>η</sup> Ιουνίου 2012 στην επιφάνεια του ενός πλαισίου ενώ η επιφάνεια του άλλου πλαισίου παρέμεινε χωρίς τροποποίηση. Από την 1<sup>η</sup> Ιουνίου μέχρι

την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2012 έγινε σύγκριση της ημερήσιας παραγόμενης ισχύος των δύο πλαισίων. Από τη σύγκριση, προέκυψε ότι το πλαίσιο που είχε την επίστρωση εμφάνιζε υπεροχή στην παραγωγή ισχύος έναντι του μη τροποποιημένου (περίπου 4%). Αυτό διαπιστώθηκε ότι οφειλόταν στην αυτοκαθαριζόμενη ιδιότητα της επίστρωσης (καλύτερη συμπεριφορά στην επίδραση της σκόνης), στην αύξηση της διαπερατότητας της επιφάνειας του τροποποιημένου πλαισίου χωρίς την ύπαρξη σκόνης και στην υπερυδροφιλικότητα της επιφάνειας. Επιπλέον, από την μελέτη προέκυψε ότι το τροποποιημένο πλαίσιο εμφάνιζε μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος από το μη τροποποιημένο όταν λειτουργούσαν με τη διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά, πρωινές και απογευματινές ώρες).

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια οικονομοτεχνική μελέτη. Έγινε σύγκριση δύο φ/β συστημάτων, εκ των οποίων το ένα είχε την επίστρωση στην επιφάνειά του ενώ το άλλο όχι. Με δεδομένο ότι το σύστημα που είχε την επίστρωση παρουσιάζει μια αύξηση 4% της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας (αποτέλεσμα της πειραματικής μελέτης που διεξήχθη) προέκυψε ότι η ΚΠΑ σ' όλο το χρόνο ζωής των συστημάτων (25 έτη) είναι 18,08 €/m<sup>2</sup>. Επίσης, η απόσβεση του συστήματος που έχει την επίστρωση θα γίνει ένα χρόνο νωρίτερα. Τέλος, υπολογίστηκε ότι η απόσβεση του προϊόντος (επίστρωσης) είναι 10 μήνες.

## A study of the effect of a self-cleaning coating in the performance of photovoltaics

---

### Abstract

In this diploma thesis is presented an alternative way of maintaining photovoltaics (PV), with regard to the cleaning of their surfaces, by means of a self-cleaning coating.

The self-cleaning coating is a commercial product (SurfaShield G) of the company NanoPhos S.A. It is an inorganic, nanostructured coating that binds chemically to the substrate (glass surface). It consists of a mixture of metal oxides (mainly of  $\text{TiO}_2$ ) and its thickness is about 150 nm. The coating is applied on glass surfaces with a special spray and it converts them into antistatic, antireflective (by 3%, compared with plain glass) and superhydrophilic surfaces (contact angle of  $5^\circ$ ). Moreover, it removes organic pollutants away from them via the photocatalytic effect.

Initially, an attempt was made to enhance a) the reflectivity of the coating in the infrared radiation (IR), since it is a form of radiation not utilized by the photovoltaic cells, and b) its antistatic property. Substances like  $\text{SnO}_2$  and  $\text{ZrSiO}_4$  (exhibiting reflectivity in IR) had been added and three commercial antistatic products had been tested (they contain various metal oxides). These efforts were not finally successful: In the first case, after the addition of these two substances, the coating showed increased reflectivity not only in the IR but also in the visible light. In the second case, the coating, after the addition of the first commercial product, had a better antistatic behavior but it reduced the transmittance of the surface it was applied to. The other two antistatic commercial products were not compatible with the solution of the first product.

Following these attempts, two identical PV panels were installed in the Technological Park of Lavrio and after being left to operate for about 2 months (03/15/12 to 05/31/12), the coating was applied on the surface of one of them at 1<sup>st</sup> June 2012, while the other one remained

untreated. From June 1<sup>st</sup> until December 21<sup>st</sup> 2012 the daily output power of the two panels was compared. The comparison showed that the treated panel had superiority in power production over the untreated panel (about 4%). This was attributed to the self-cleaning property of the coating (better behavior against the effect of dust), to the increasing of the transmittance of the surface without having taken apart the effect of dust and to the superhydrophilicity of the surface. Moreover, the study showed that the treated panel produced higher power than the untreated one, when they operated under conditions of diffuse radiation (cloudiness, morning and afternoon hours).

Finally, an economical study was made regarding the comparison of two PV systems. It was based on the experimental finding that one of the systems, that has the coating on its surface (treated system), exhibits a 4% increase in the annual energy production. It was found that the NPV during the whole lifetime of the system (25 years) is 18.08 €/m<sup>2</sup>. Also, the depreciation of the treated system will be completed a year earlier than the untreated one. Furthermore, the depreciation time of the product (coating) was estimated to be about 10 months.

# Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| Πρόλογος.....   | 1  |
| Περίληψη.....   | 2  |
| Abstract .....  | 4  |
| Περιεχόμενα .....                                     | 6  |
| 1. Βιβλιογραφική Επισκόπηση .....                     | 9  |
| 1.1. Γενικά για τα Φ/β.....                           | 9  |
| 1.2. Ηλιακή Ενέργεια .....                            | 10 |
| 1.3. Ημιαγωγοί .....                                  | 14 |
| 1.4. Επαφή p-n (p-n junction) .....                   | 16 |
| 1.5. Φ/β Φαινόμενο (Photovoltaic Effect) .....        | 19 |
| 1.6. Χαρακτηριστικά φ/β κελιών.....                   | 22 |
| 1.7. Συντήρηση των φ/β συστημάτων.....                | 27 |
| Καθαρισμός πλαισίων .....                             | 27 |
| Έλεγχος στηρίξεων .....                               | 27 |
| Συντήρηση των μπαταριών.....                          | 27 |
| Έλεγχος των αντιστροφών .....                         | 27 |
| 1.8. Επίδραση της σκόνης στη λειτουργία των φ/β ..... | 28 |
| 1.9. Αυτοκαθαριζόμενη Επίστρωση .....                 | 38 |

|  |    |
|--|----|
| Φύση της επίστρωσης .....                                      | 38 |
| Χαρακτηριστικά του Οξειδίου του Τιτανίου.....                  | 39 |
| Μηχανισμός Επίστρωσης .....                                    | 41 |
| Ιδιότητες της επίστρωσης.....                                  | 44 |
| Εφαρμογή Επίστρωσης.....                                       | 47 |
| 2. Μεθοδολογία.....  | 49 |
| 2.1. Βελτίωση Προϊόντος .....                                  | 49 |
| Ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο.....                              | 49 |
| Αντιστατικότητα .....  | 52 |
| 2.2. Εφαρμογή Προϊόντος σε Φ/β Πλαίσιο .....                   | 54 |
| Τόπος διεξαγωγής πειραματικής διαδικασίας.....                 | 54 |
| Χαρακτηριστικά φ/β πλαισίων.....                               | 55 |
| Εγκατάσταση φ/β πλαισίων και βαθμονόμηση.....                  | 57 |
| Σύστημα καταγραφής μετρήσεων .....                             | 58 |
| Εφαρμογή της αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης (SurfaShield G)..... | 66 |
| Επεξεργασία των μετρήσεων.....                                 | 66 |
| 3. Αποτελέσματα.....   | 69 |
| 3.1. Βελτίωση του προϊόντος .....                              | 69 |
| Ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο.....                              | 69 |
| Αντιστατικότητα .....  | 70 |



|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.2. | Βαθμονόμηση Φ/β Πλαισίων.....  | 75 |
| 3.3. | Εφαρμογή της αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης.....   | 79 |
|      | Μέση Ημερήσια Διαφορά Παραγόμενης Ισχύος.....  | 79 |
|      | Υπολογισμός διαφοράς της παραγόμενης ισχύος κατά τη διάρκεια της ημέρας, ΔΡm%<br>..... | 81 |
|      | Αύξηση της διαπερατότητας της επιφάνειας.....  | 86 |
|      | Γωνία Πρόσπτωσης της Ηλιακής Ακτινοβολίας – Διαφορά Ισχύος.....                        | 87 |
| 4.   | Οικονομοτεχνική Μελέτη .....   | 89 |
| 4.1. | Σύγκριση Φ/β Συστημάτων .....  | 89 |
| 4.2. | Απόσβεση Προϊόντος.....  | 95 |
| 5.   | Συμπεράσματα-Προτάσεις.....  | 96 |
| 6.   | Βιβλιογραφία .....   | 99 |

# 1. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

## 1.1. Γενικά για τα Φ/β

Τα φ/β συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η ονομασία τους προκύπτει από τις εξής δύο λέξεις: «φωτο», που σημαίνει φως και «βολταϊκό» ή «βολτ», η οποία είναι η μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής ισχύος. Στην ουσία πρόκειται για ηλεκτρογεννήτριες που συγκροτούνται από πολλά φ/β στοιχεία σε επίπεδη διάταξη που έχουν ως βάση λειτουργίας το φ/β φαινόμενο. Φ/β φαινόμενο είναι η εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στα άκρα μιας διόδου, η οποία ακτινοβολείται με ηλεκτρική ενέργεια. Για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η ακτινοβολία παράγεται συνεχές ρεύμα από την διόδο, το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει ένα οποιοδήποτε φορτίο συνεχούς ρεύματος και κατά συνέπεια να έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Όταν διακοπεί η ακτινοβολήση της διόδου, σταματά και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα φ/β πλαίσια, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι συσκευές στερεάς κατάστασης που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια, η οποία είναι μια πηγή ενέργειας που βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία στη φύση, απ'ευθείας σε ηλεκτρική χωρίς να παρεμβαίνουν θερμικές μηχανές. Τα φ/β συστήματα συνήθως δεν περιέχουν κινητά μέρη, απαιτείται ελάχιστη συντήρηση και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Η παραγωγή ηλεκτρισμού ολοκληρώνεται χωρίς την εκπομπή ρύπων που συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ή άλλων ρύπων. Η λειτουργία τους είναι σχεδόν αθόρυβη. Τα φ/β συστήματα είναι δυνατό να κατασκευαστούν σχεδόν σε οποιοδήποτε μέγεθος (από mill watt έως megawatt), και είναι αρθρωτά, δηλαδή υπάρχει δυνατότητα να προστεθούν περισσότερα πλαίσια, ώστε να αυξηθεί η παραγόμενη ισχύς. Είναι αξιόπιστα και δεν απαιτούν πολλή συντήρηση. Τέλος, μπορούν να είναι και αυτόνομα. [1]

## 1.2. Ηλιακή Ενέργεια

Από τα προϊστορικά χρόνια, οι άνθρωποι είχαν συνειδητοποιήσει ότι η καλή χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι ευεργετική. Ο Ξενοφώντας είχε καταγράψει στα Απομνημονεύματά του διδασκαλίες του Σωκράτη (470-399 π.χ.) όσον αφορά τον σωστό προσανατολισμό των κατοικιών ώστε να είναι δροσερά το καλοκαίρι και ζεστά το χειμώνα.

Το βασικότερο πλεονέκτημα που προσφέρει η ηλιακή ενέργεια σε σχέση με τις άλλες μορφές ενέργειας είναι ότι είναι μια καθαρή πηγή ενέργειας χωρίς να προκαλεί ρύπανση του περιβάλλοντος. Κατά τον τελευταίο αιώνα, τα ορυκτά καύσιμα παρέχονταν για το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας μας, επειδή ήταν φθηνότερα και περισσότερο εύχρηστα από τις υπόλοιπες εναλλακτικές μορφές ενέργειας, και μέχρι πρόσφατα, η περιβαλλοντική ρύπανση δεν αποτελούσε αντικείμενο ενδιαφέροντος.

Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θέρμανση και ψύξη των κτιρίων (ενεργητικά και παθητικά), τη θέρμανση νερού για οικιακή και βιομηχανική χρήση, για την αφαλάτωση νερού, για τη λειτουργία μηχανών και αντλιών, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για χημικές εφαρμογές, και για πολλές ακόμα λειτουργίες.

Η ένταση της ακτινοβολίας είναι μια στιγμιαία ποσότητα που περιγράφει τη ροή της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια ( $\text{kW/m}^2$ ). Η ισχύς της ακτινοβολίας από τον ήλιο είναι  $1373 \text{ kW/m}^2$ , αλλά η μέγιστη ισχύς της ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης είναι μόνο  $1 \text{ kW/m}^2$ . Η ηλιακή ακτινοβολία μετρά την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε μια δοθείσα επιφάνεια σε καθορισμένο χρόνο. Είναι το ολοκλήρωμα της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να εκφραστεί σε  $\text{kWh/m}^2$  ανά μέρα. Η τιμή αναφοράς για την ηλιακή ακτινοβολία είναι  $1000 \text{ W/m}^2$  εκφρασμένη συνήθως σε ώρες. [2]

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια που μεταφέρουν ενέργεια  $E_{ph}$  η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.2.1)$$

Όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος,  $h$  η σταθερά του Planck και  $c$  η ταχύτητα του φωτός.

Η ολική ακτινοβολία έχει τρεις συνιστώσεις:

- Άμεση ακτινοβολία: Είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη κατ' ευθείαν από τον ήλιο χωρίς να μεσολαβήσει διασκορπισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Η στιγμιαία τιμή σε ( $W/m^2$ ) της άμεσης ακτινοβολίας που δέχεται το οριζόντιο επίπεδο συμβολίζεται με  $G_b$  ενώ προκειμένου για κεκλιμένο επίπεδο, με  $G_{bT}$ .
- Διάχυτη ακτινοβολία: Είναι το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ύστερα από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης κατά τη διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα.
- Ανακλώμενη ακτινοβολία από το έδαφος.

Οι μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνονται χρησιμοποιώντας είτε ένα πυρανόμετρο για την ολική ακτινοβολία είτε ένα πυρηλιόμετρο για την άμεση ακτινοβολία. Το ολοκλήρωμα της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα χρονικό διάστημα είναι η ηλιακή ενέργεια.

Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι τις περισσότερες φορές διαθέσιμα για οριζόντια επιφάνεια, περιλαμβάνοντας και την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία, και μετρώνται με πυρανόμετρα. Τα περισσότερα απ' αυτά τα όργανα καταγράφουν την ακτινοβολία συναρτήσει του χρόνου και δε διαθέτουν τα μέσα ολοκλήρωσης της καταγραφής. Η ολοκλήρωση γίνεται συνήθως γραφικά. Αποκλίσεις στην ολοκλήρωση προστίθενται στις αποκλίσεις της ευαισθησίας του πυρανομέτρου. Η ηλεκτρονική πλέον ολοκλήρωση είναι η πιο συνήθης. Δύο τύποι δεδομένων για την ηλιακή ακτινοβολία είναι ευρέως διαθέσιμοι. Ο πρώτος είναι η μέση ωριαία συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και η δεύτερη η μέση μηνιαία σε οριζόντιο επίπεδο. [2]

### Άμεση ακτινοβολία σε οριζόντια και κεκλιμένη επιφάνεια

Η άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο είναι ίση με:

$$G_b = G_{bn} \cos \theta_z \quad (1.2.2)$$

Ενώ η άμεση ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια είναι ίση με:

$$G_{bT} = G_{bn} \cos \theta \quad (1.2.3)$$

Όπου  $G_{bT}$ ,  $G_{bn}$ ,  $G_b$  είναι η άμεση ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο, το κάθετο επίπεδο και το οριζόντιο επίπεδο στις ηλιακές ακτίνες. [2]

Η γωνία  $\theta$  είναι η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια. Είναι ουσιαστικά η γωνία των προσπιπτουσών ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta \quad (1.2.4)$$

Όπου  $\varphi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου,  $\beta$  είναι κλίση της επιφάνειας.

Για οριζόντιες επιφάνειες ( $\beta = 0^\circ$ ), η παραπάνω σχέση δίνει:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (1.2.5)$$

Η  $\delta$  είναι η ηλιακή απόκλιση. Είναι στην ουσία η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Ισχύει ότι  $-23.45 \leq \delta \leq 23.45$ , με θετικές τιμές προς το Βορρά. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$\delta = 23.45 \sin \frac{360 (284 + n)}{365} \quad (1.2.6)$$

Όπου  $n$  είναι η ημέρα του έτους (αν τεθεί ότι για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου ισχύει ότι  $n = 1$ ).

Η γωνία  $\gamma$  είναι το αζιμούθιο της επιφάνειας και είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Είναι  $-180^\circ \leq \delta \leq 180^\circ$  με  $\gamma = 0^\circ$  στο νότο,  $\gamma = 90^\circ$  στη δύση,  $\gamma = 180^\circ$  στο βορρά και  $\gamma = -90^\circ$  στην ανατολή. [2]

Η γωνία  $\omega$  είναι η ωριαία γωνία. Είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί του άξονά της με ρυθμό  $15^\circ/\text{h} = 0.25^\circ/\text{min}$ . Λαμβάνεται θετική για μ.μ. και αρνητική για π.μ. [2]

Από τις σχέσεις 1.2.2-3, προκύπτει ο λόγος,  $R_b$ , της άμεσου ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς την άμεσο του οριζόντιου επιπέδου.

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (1.2.7)$$

### 1.3. Ημιαγωγοί

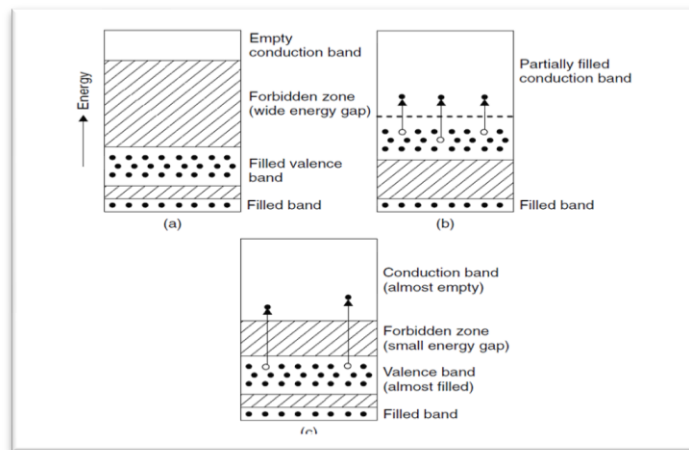
Για να γίνει κατανοητό το φ/β φαινόμενο, σκόπιμο είναι να αναφερθεί η λειτουργία των ημιαγωγών, δηλαδή των υλικών που επιτυγχάνουν την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η παραγωγή ενέργειας από τα φ/β στηρίζεται στη δημιουργία επαφών. Η συνηθέστερη επαφή είναι η p-n και θα αναλυθεί παρακάτω. [1]

Οι ημιαγωγοί είναι υλικά που μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια και κατατάσσονται μεταξύ των αγωγών και των μονωτών. Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το καθιστά ξεχωριστό υλικό είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενός ατόμου που βρίσκεται στην εξωτερική στοιβάδα ή στοιβάδα σθένους. [1]

Όπως είναι γνωστό, τα άτομα αποτελούνται από τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια, τα οποία βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα. Σύμφωνα με την κβαντομηχανική, τα ηλεκτρόνια από ένα απομονωμένο άτομο έχουν διακεκριμένη ή κβαντισμένη ενέργεια. Στοχεία όπου τα ηλεκτρόνια τους βρίσκονται σε διάφορα τροχιακά, τα εσωτερικά ηλεκτρόνια έχουν την μικρότερη (μέγιστη αρνητική) ενέργεια και ως εκ τούτου απαιτούν ένα μεγάλο ποσό ενέργειας για να υπερνικήσουν την έλξη του πυρήνα και να "ελευθερωθούν". Όταν τα άτομα έρθουν πολύ κοντά μεταξύ τους, η ενέργεια κάθε μεμονωμένου ατόμου αλλάζει, και τα επίπεδα ενέργειας ομαδοποιούνται σε ενεργειακές ζώνες. Σε μερικές ενεργειακές ζώνες τα ηλεκτρόνια επιτρέπεται να βρίσκονται σ'αυτές ενώ σε άλλες απαγορεύεται. Τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας ή σθένους είναι τα μοναδικά που μπορούν να αλληλεπιδρούν με τα άλλα άτομα. Αυτή είναι η πληρέστερη ζώνη, η οποία αντιστοιχεί στη θεμελιώδη κατάσταση των ηλεκτρονίων σθένους σε ένα άτομο, και αποκαλείται *ζώνη σθένους (valence band)*. Τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους είναι ελαφρώς συνδεδεμένα με τον πυρήνα του ατόμου και έτσι μπορεί να μεταπηδούν εύκολα σε γειτονικά άτομα, μετατρέποντας το γειτονικό άτομο σε ανιόν (αρνητικό φορτίο) και σε κατιόν το άτομο που εγκατέλειψαν. Μερικά ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους είναι πιθανό να έχουν περίσσεια ενέργειας και να έχουν τη δυνατότητα να μεταπηδήσουν σε μία υψηλότερη ενεργειακή ζώνη. Αυτά τα ηλεκτρόνια είναι υπεύθυνα για την αγωγή του ηλεκτρισμού και της θερμότητας, και αυτή η ζώνη λέγεται *ζώνη αγωγιμότητας*

(*conduction band*). Η διαφορά ενέργειας ενός ηλεκτρονίου στην ζώνη σθένους και στην εσωτερική στοιβάδα της ζώνης αγωγιμότητας αποκαλείται *ενεργειακό χάσμα* (*band gap*). [1]

Υλικά των οποίων η ζώνη σθένους είναι πλήρης και η ζώνη αγωγιμότητας είναι άδεια, έχουν πολύ μεγάλα ενεργειακά χάσματα και ονομάζονται μονωτές (*insulators*) γιατί δεν είναι δυνατό να παραχθεί ρεύμα από τα ηλεκτρόνια της πλήρους ζώνης και το ενεργειακό χάσμα είναι τόσο μεγάλο, που κάτω από συνήθεις συνθήκες, ένα ηλεκτρόνιο σθένους δεν μπορεί να δεχθεί ενέργεια, καθώς οι άδειες θέσεις στην ζώνη αγωγιμότητας είναι “απρόσιτες” για αυτό. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα διαγράμματα των ενεργειακών ζωνών των τριών ειδών υλικών (μονωτές, αγωγοί, ημιαγωγοί). [1]



**Εικόνα 1.3.1:** Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών για τυπικά υλικά. (α) Μονωτές. (β) Αγωγοί. (γ) Ημιαγωγοί. [1]

Τα υλικά που έχουν άδεια τη ζώνη σθένους και έχουν μερικά ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας ονομάζονται αγωγοί. (βλ. *Εικόνα 1.3.1*) Στην περίπτωση αυτή, η ζώνη αγωγιμότητας και σθένους επικαλύπτονται. Αντιθέτως, υλικά που έχουν μερικώς καλυμμένη τη ζώνη σθένους και έχουν μεσαία ενεργειακά χάσματα λέγονται ημιαγωγοί. Το ενεργειακό χάσμα αυτών των υλικών είναι μικρότερο των 3 eV. Έχουν την ίδια ενεργειακή δομή στις ζώνες τους με τους μονωτές αλλά το ενεργειακό χάσμα τους είναι πολύ μικρότερο. Τα δύο είδη των ημιαγωγών είναι τα εξής: (α) οι εγγενείς ημιαγωγοί, οι οποίοι δεν περιέχουν προσμίξεις, και (β) οι εξωγενείς ημιαγωγοί, οι οποίοι είναι ενισχυμένοι με προσμίξεις. [1]



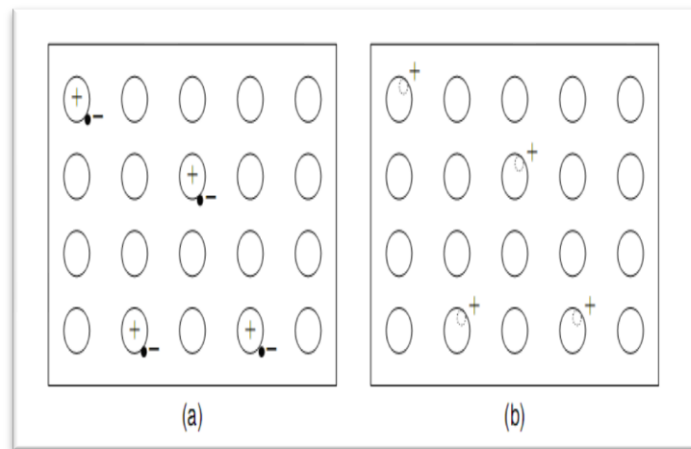
## 1.4. Επαφή p-n (p-n junction)

Το πυρίτιο ανήκει στην 4<sup>η</sup> ομάδα του Περιοδικού Πίνακα. Η δομή του πυριτίου ακολουθεί τη διαμαντοειδή κρυστάλλωση όπου κάθε άτομο έχει τους κοντινότερους «γείτονες» στις τέσσερις γωνίες ενός τετραέδρου. Αυτή η δομή είναι αποτέλεσμα των δεσμών που δημιουργούνται από τα τέσσερα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας. Κάθε δεσμός μεταξύ δύο ατόμων πυριτίου έχει δύο ηλεκτρόνια και όλοι οι ημιαγωγοί σχηματίζουν παρόμοιες κρυσταλλικές δομές. Αυτή η κρυσταλλική δομή έχει σημαντικές επιπτώσεις στις ηλεκτρονικές και οπτικές ιδιότητες του ημιαγωγού.

Στους ημιαγωγούς, εάν το υλικό που έχει προσμίξεις (doped material) έχει περισσότερα ηλεκτρόνια στην ζώνη σθένους από τον ημιαγωγό, τότε το υλικό ονομάζεται ημιαγωγός τύπου n. Ο ημιαγωγός τύπου n είναι ηλεκτρικά ουδέτερος αλλά έχει περίσσεια ηλεκτρονίων, τα οποία είναι διαθέσιμα για αγωγή. Αυτό επιτυγχάνεται όταν τα άτομα του πυριτίου αντικατασταθούν από στοιχεία της 5<sup>ης</sup> ομάδας του Περιοδικού Πίνακα, π.χ. το Αντιμόνιο (An) ή το Αρσενικό (As), και μ' αυτό τον τρόπο, σχηματίζονται ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να κινούνται γύρω από τον κρύσταλλο. Αν τα ηλεκτρόνια που είναι σε περίσσεια απομακρυνθούν, τα άτομα θα αποκτήσουν θετικό ηλεκτρικό φορτίο.

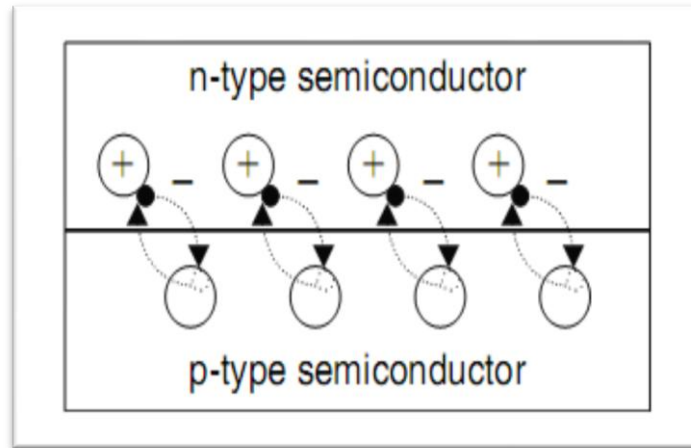
Αντιθέτως, εάν το υλικό που έχει προσμίξεις (doped material) έχει λιγότερα ηλεκτρόνια στην ζώνη σθένους από τον ημιαγωγό, τότε το υλικό ονομάζεται ημιαγωγός τύπου p. Ο ημιαγωγός τύπου p είναι ηλεκτρικά ουδέτερος αλλά έχει θετικές οπές στη δομή του, όπου μπορεί να "φιλοξενήσει" περίσσεια ηλεκτρονίων. Αυτό επιτυγχάνεται όταν τα άτομα του πυριτίου αντικατασταθούν από στοιχεία της 3<sup>ης</sup> ομάδας του Περιοδικού Πίνακα, π.χ. το Γάλλιο (Ga) ή το Ίνδιο (In), και μ' αυτό τον τρόπο, σχηματίζονται θετικά σωματίδια, που ονομάζονται οπές, που μπορούν να κινούνται γύρω από τον κρύσταλλο μέσω διάχυσης ή μετατόπισης. Εάν περισσότερα ηλεκτρόνια μπορούν να γεμίσουν τις οπές, τα άτομα με τις προσμίξεις θα ταιριάζουν περισσότερο ομοιόμορφα στην δομή που σχηματίζεται από τα κύρια άτομα του ημιαγωγού, αλλά τα άτομα θα φορτιστούν αρνητικά. [1]

Και οι δύο τύποι ημιαγωγών επιτρέπουν την εύκολη κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών μέσα στους ημιαγωγούς. Για το πυρίτιο, η ενέργεια που απαιτείται για να συλλάβει ένα ηλεκτρόνιο κατά την επαφή p-n είναι 1,1 eV. Η ενέργεια που απαιτείται είναι διαφορετική για κάθε ημιαγωγό. Στην *εικόνα 1.4.1*, φαίνονται σχηματικά οι παραπάνω τύποι ημιαγωγών.



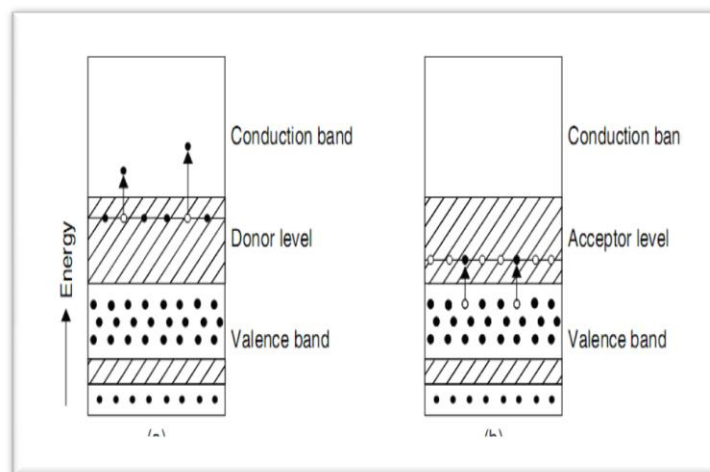
**Εικόνα 1.4.1:** Διαγράμματα για ημιαγωγούς τύπου- n και p. (α) Τύπου- n. (β) Τύπου- p. [1]

Όταν οι δύο παραπάνω τύποι ημιαγωγών ενώνονται σχηματίζουν μια επαφή, την λεγόμενη επαφή p-n (*Εικόνα 1.4.2*). Όπως παρατηρείται, όταν δύο υλικά ενώνονται, η περίσσεια των ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό τύπου- n μεταπηδά ώστε να καλύψει τις οπές του ημιαγωγού τύπου- p, και οι οπές του τύπου- p διαχέονται στην πλευρά του τύπου- n, αφήνοντας την πλευρά n της επαφής φορτισμένη θετικά και την πλευρά p αρνητικά φορτισμένη. Τα αρνητικά φορτία στην πλευρά p δεν επιτρέπουν την μετακίνηση άλλων ηλεκτρονίων από την πλευρά n. Ωστόσο, η μετακίνηση των ηλεκτρονίων από την p πλευρά είναι ευκολότερη εξαιτίας των θετικών φορτίων της επαφής στην πλευρά n. Συνεπώς η επαφή p- n συμπεριφέρεται όπως μία δίοδος. [1]



**Εικόνα 1.4.2:** Επαφή p- n .[1]

Στην *εικόνα 1.4.3*, φαίνεται το διάγραμμα των ενεργειακών ζώνων των δύο τύπων ημιαγωγών. Στον ημιαγωγό τύπου- n, επειδή η πρόσμιξη δίνει επιπλέον ηλεκτρόνια για την αγωγή του ρεύματος, καλείται δότης (donor) και η ενεργειακή ζώνη του επίπεδο του δότη (donor level). Στον ημιαγωγό τύπου- p, επειδή η πρόσμιξη δέχεται επιπλέον ηλεκτρόνια, καλείται δέκτης (acceptor) και η ενεργειακή ζώνη του επίπεδο του δέκτη (acceptor level). [2]

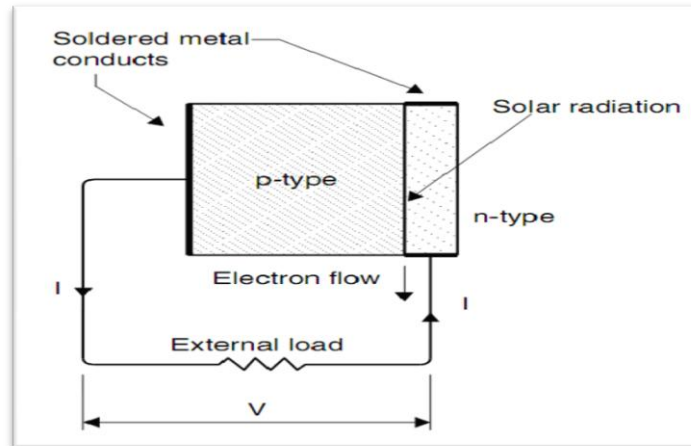


**Εικόνα 1.4.3:** Διαγράμματα ενεργειακών ζώνων για ημιαγωγούς τύπου- n και p. (α) Ημιαγωγός τύπου- n. (β) Ημιαγωγός τύπου- p. [1]

## 1.5. Φ/β Φαινόμενο (Photovoltaic Effect)

Όταν ένα φωτόνιο προσπίπτει πάνω σ' ένα φ/β κελί, μπορεί να ανακλαστεί, να απορροφηθεί ή να το διαπεράσει. Όταν ένα φωτόνιο απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους ενός ατόμου, η ενέργεια του ηλεκτρονίου αυξάνεται κατά το ποσό της ενέργειας που φέρει το φωτόνιο. Εάν, τώρα η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγικού υλικού, το ηλεκτρόνιο, το οποίο έχει περίσσεια ενέργεια, μεταπηδά στη ζώνη αγωγιμότητας, όπου μπορεί να κινηθεί ελεύθερα. Συνεπώς, όταν το φωτόνιο απορροφηθεί, ένα ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το άτομο. Το ηλεκτρόνιο μπορεί να "φύγει" από το άτομο από ένα ηλεκτρικό πεδίο στην εμπρόσθια και πίσω πλευρά του φ/β υλικού, και αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της p- n επαφής. Απουσία πεδίου, το ηλεκτρόνιο ανασυνδυάζεται με το άτομο ενώ όταν υπάρχει πεδίο, ρέει διαμέσω, και ως εκ τούτου παρατηρείται η εμφάνιση ρεύματος. Εάν η ενέργεια του φωτονίου, είναι μικρότερη του ενεργειακού χάσματος, το ηλεκτρόνιο δεν έχει επαρκή ενέργεια για να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας, και έτσι η περίσσεια αυτή ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι ανεξάρτητα από την ένταση της ενέργειας που φέρει το φωτόνιο, ένα μόνο ηλεκτρόνιο μπορεί να απελευθερωθεί. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί και την χαμηλή απόδοση των φ/β κελιών.

Η λειτουργία ενός φ/β κελιού φαίνεται στην *εικόνα .1.5.1*. Αυτά τα ηλιακά κελιά περιέχουν έναν ημιαγωγό τύπου- n και έναν τύπου- p, δηλαδή μιας επαφής p- n. Σε κάποιο βαθμό, τα ηλεκτρόνια και οι οπές διαχέονται διαμέσω των ορίων της επαφής, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο σ' αυτήν. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια παράγονται στη n ζώνη από τη δράση των φωτονίων. Όταν τα φωτόνια του φωτός προσπίπτουν πάνω στην επιφάνεια του κελιού και απορροφηθούν από τον ημιαγωγό, μερικά απ' αυτά δημιουργούν ζευγάρια ηλεκτρονίων-οπών. Εάν τα ζευγάρια αυτά είναι κοντά στην επαφή p- n, το ηλεκτρικό πεδίο τα αναγκάζει να χωρίσουν, τα ηλεκτρόνια μετακινούνται στην περιοχή n και οι οπές στην περιοχή p. Αν οι δύο περιοχές είναι τώρα ενωμένες μέσω του φορτίου, ρέει τόσο ηλεκτρικό ρεύμα όσο το φως του ήλιου που προσπίπτει στην επιφάνεια του κελιού. [1]



Εικόνα 1.5.1: Φ/β Φαινόμενο. [1]

Η ενέργεια,  $E_p$ , που περιέχεται σ' ένα φωτόνιο είναι ίση με:

$$E_p = h\nu \quad (1.5.1)$$

Όπου,

$h$  = Σταθερά του Planck,  $= 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

$\nu$  = Συχνότητα ( $\text{s}^{-1}$ )

Το πυρίτιο έχει ενεργειακό χάσμα  $1.11 \text{ eV}$  ( $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ).

Από την σχέση 1.5.2, συμπεραίνουμε ότι τα φωτόνια μήκους κύματος  $1.12 \mu\text{m}$  ή μικρότερο είναι χρήσιμα στη δημιουργία ζευγαριών από ηλεκτρόνια και οπές και συνεπώς ρεύματος. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας αξιοποιείται από τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία. [1]

$$E_p = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.5.2)$$

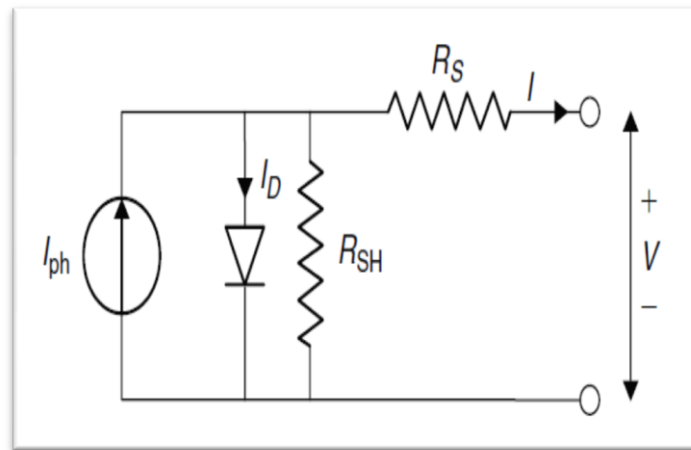
Ένα φ/β κελί αποτελείται από φ/β υλικό, μεταλλικά πλέγματα, αντανάκλαστικές επιστρώσεις, και υποστηρικτικό υλικό. Ολόκληρο το κελί έχει βελτιστοποιηθεί ώστε να μεγιστοποιεί και το ποσό της εισερχόμενης ακτινοβολίας και της παραγόμενης ισχύος. Το φ/β υλικό μπορεί να

είναι ένα από τις ενώσεις, που έχουν αναφερθεί. Τα μεταλλικά πλέγματα ενισχύουν την κυκλοφορία του ρεύματος από την μπροστινή ως την πίσω περιοχή του κελιού. Η αντιανακλαστική επίστρωση εφαρμόζεται στην κορυφή του κελιού για να μεγιστοποιεί το φως που εισέρχεται στο κελί. Τυπικά, αυτή η επίστρωση είναι μία μονή στρώση που βελτιστοποιείται για το ηλιακό φως. Αυτό συντελεί στο γεγονός ότι τα κελιά έχουν χρώμα που κυμαίνεται από μαύρο έως μπλε. Σε κάποιους τύπους φ/β πλαισίων, η κορυφή του κελιού είναι καλυμμένη από ένα ημι-διαπερατό αγωγό που λειτουργεί και ως συλλέκτη ρεύματος και ως αντιανακλαστική επίστρωση.

Το πυρίτιο είναι ένα χημικό στοιχείο που βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, καθώς καλύπτει το 25% του φλοιού της γης. Το ορυκτό πυρίτιο είναι φθινό, αλλά τα κελιά πυριτίου πρέπει να κατασκευάζονται μεμονωμένα για πολύ χρονικό διάστημα, με μια πολύπλοκη διεργασία που περιλαμβάνει τον καθαρισμό του πυριτίου, έλκοντας ένα μακρύ κρύσταλλο από υψηλή θερμοκρασία τήγματος, κόβοντας τον κρύσταλλο σε δισκία και διαχέοντας προσμείξεις σ' αυτά. Η προσδοκία είναι ότι οι τεχνικές κατασκευής και αυτοματισμού θα μειώσουν ριζικά το κόστος μέσα στα επόμενα χρόνια. [1]

## 1.6. Χαρακτηριστικά φ/β κελιών

Μια φ/β γεννήτρια είναι κυρίως μια συνδεσμολογία από ηλιακά κελιά, συνδέσεις, προστατευτικά μέρη και υποστηρίξεις. Όπως έχει ειπωθεί μέχρι τώρα, τα ηλιακά κελιά φτιάχνονται από ημιαγωγικά υλικά, συνήθως πυριτίου, και μεταχειρίζονται ειδικά για να σχηματιστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο με θετικό ηλεκτρικό φορτίο στην μια περιοχή και αρνητικό στην άλλη. Όταν η ηλιακή ενέργεια (φωτόνια) προσπίπτει στο ηλιακό κελί, τα ηλεκτρόνια εγκαταλείπουν τα άτομα στο ημιαγωγικό υλικό, δημιουργώντας ζευγάρια από ηλεκτρόνια και οπές. Εάν οι αγωγοί είναι συνδεδεμένοι με τις αρνητικές και θετικές περιοχές, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, τα ηλεκτρόνια λαμβάνονται υπό την μορφή ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο ονομάζεται *φωτορεύμα* (*photocurrent*),  $I_{ph}$ . Όταν επικρατεί σκοτάδι τα ηλιακά κελιά δεν είναι ενεργά και λειτουργούν ως δίοδοι. Εάν, ωστόσο, είναι συνδεδεμένα με μία εξωτερική παροχή τάσης, παράγουν ρεύμα που ονομάζεται ρεύμα διόδου ή σκότους (*diode or dark current*),  $I_D$ . Ένα ηλιακό κελί αναπαρίσταται από ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας διόδου και φαίνεται στην *εικόνα 1.6.1*.



**Εικόνα 1.6.1:** Κύκλωμα ενός ηλιακού κελιού. [1]

Όπως φαίνεται στην *εικόνα 1.6.1*., υπάρχει μια πηγή ρεύματος,  $I_{ph}$ , μία δίοδος, και μια σειρά από αντιστάσεις,  $R_s$ , που αναπαριστούν την αντίσταση μέσα σε κάθε κελί. Η δίοδος έχει επίσης

μια εσωτερική αντίσταση σε διακλάδωση. Το καθαρό ρεύμα είναι η διαφορά μεταξύ του φωτορεύματος,  $I_{ph}$ , και του ρεύματος σκότους,  $I_D$ . [1]

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[ \frac{e(V+IR_s)}{kT_c} \right] - 1 \right\} - \frac{V+IR_s}{R_{SH}} \quad (1.6.1)$$

Αγνοώντας τις αντιστάσεις  $R_{SH}$  και  $R_s$ , η παραπάνω σχέση απλοποιείται ως εξής:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[ \frac{eV}{kT_c} \right] - 1 \right\} \quad (1.6.2)$$

Όπου,

$k$ = Σταθερά αερίων του Boltzmann =  $1.381 \cdot 10^{-23}$  J/K

$T_c$ = Απόλυτη θερμοκρασία (K)

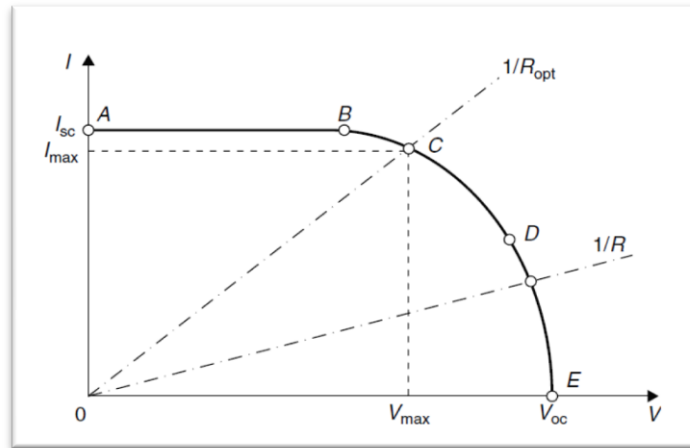
$e$ = ηλεκτρικό φορτίο, =  $1.602 \cdot 10^{-19}$  J/V

$V$ = τάση που εφαρμόζεται στο κελί (V)

$I_o$ = ρεύμα σκότους, το οποίο εξαρτάται άρρηκτα από τη θερμοκρασία (A)

Η εικόνα 1.6.2, παρουσιάζει το χαρακτηριστικό διάγραμμα Έντασης-Τάσης (I-V) ενός ηλιακού κελιού για συγκεκριμένη ένταση της ακτινοβολίας ( $G_t$ ), και σε καθορισμένη θερμοκρασία,  $T_c$ . Το ρεύμα από ένα ηλιακό κελί εξαρτάται από την εξωτερική τάση που εφαρμόζεται και το ποσό της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στο κελί. Όταν το κελί είναι βραχυκυκλωμένο, το ρεύμα αποκτά την μέγιστη τιμή (ρεύμα βραχυκύκλωσης,  $I_{sc}$ ), και η τιμή της τάσης είναι 0. Όταν το κύκλωμα του φ/β κελιού είναι ανοιχτό, η τάση αποκτά την μέγιστη τιμή της (τάση ανοιχτού κυκλώματος,  $V_{oc}$ ), και το ρεύμα είναι 0. Σε κάθε μια περίπτωση η ισχύς είναι ίση με μηδέν. Μεταξύ αυτών των τιμών η ισχύς είναι μεγαλύτερη από μηδέν. [1]





**Εικόνα 1.6.2:** Διάγραμμα Έντασης-Τάσης για φ/β κελιά. [1]

Η ισχύς προκύπτει από το γινόμενο της τάσης και της έντασης. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η μέγιστη τιμή της ισχύος προκύπτει όταν μεγιστοποιούνται και τα άλλα μεγέθη, δηλαδή στο σημείο C. Το σημείο C ονομάζεται *σημείο μέγιστης ισχύος*. Σ' αυτό το σημείο το φορτίο της αντίστασης,  $R_{opt}$ , είναι βέλτιστο και ισχύει:

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \quad (1.6.3)$$

Η *απόδοση (efficiency)* είναι ένα ακόμη μέγεθος των φ/β κελιών. Η απόδοση ορίζεται ως το πηλίκο της παραγόμενης ισχύος και της ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η απόδοση για ένα φ/β κελί αναφέρεται συνήθως σε θερμοκρασία 25 °C και σε προσπίπτουσα ακτινοβολία έντασης ίση με 1000 W/m<sup>2</sup>. [1]

$$\eta_c = \frac{P}{P_{in}} \quad (1.6.4)$$

Η βελτίωση στην απόδοση των φ/β συνδέεται άμεσα με την μείωση του κόστους. Η απόδοση ενός κελιού μονοκρυσταλλικού πυριτίου αγγίζει το 14-15% και του πολυκρυσταλλικού 12-13%. Η μέγιστη απόδοση είναι το πηλίκο της μέγιστης ισχύος προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και δίνεται από την σχέση 1.6.5: [3]

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} V_{max}}{A_c G_t} \quad (1.6.5)$$

Όπου,  $A_c$ =επιφάνεια κελιού ( $m^2$ ) και  $G_t$  η ακτινοβολία.

Η απόδοση μιας μονάδας ορίζεται ομοίως μ' αυτή του κελιού. Ορίζεται ως το πηλίκο της παραγόμενης ισχύος της μονάδας προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας.

$$\eta_1 = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{PV} V_{PV}}{A_{PV} G_t} \quad (1.6.6)$$

Όπου,  $A_{PV}$  = επιφάνεια φωτοβολταϊκής μονάδας ( $m^2$ ) και  $G_t$  η ακτινοβολία.

Στην πραγματικότητα, η πραγματική απόδοση ενός πλαισίου δίνεται από την εξής σχέση:

$$\eta_{PV} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \quad (1.6.7)$$

Όπου,

$\eta_2$ , συνδέεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς ένα μέρος από την εισερχόμενη ακτινοβολία δε μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ αλλά διαχέεται ως θερμότητα μέσα στο πλαίσιο. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι υψηλότερη σε περίπτωση που ο εξαερισμός των πλαισίων δεν είναι επαρκής ( $0.8 < \eta_2 < 0.9$ ).

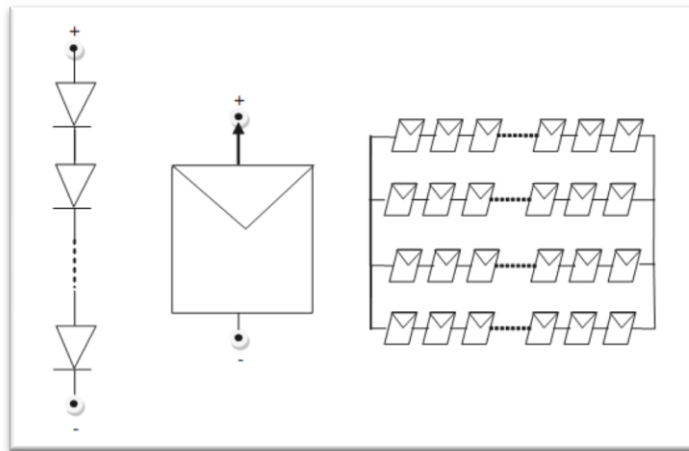
$\eta_3$ , συνδέεται με τις απώλειες ισχύος στα καλώδια από το φαινόμενο Joule. Για να μειωθούν αυτές οι απώλειες, η διατομή του καλωδίου διαστασιοποιείται σε σχέση με μια πτώση τάσης στα καλώδια ( $\eta_3 = 0.98$ ).

$\eta_4$ , συνδέεται με τις απώλειες του inverter ( $\eta_4 = 0.95$ ).

$\eta_5$ , συνδέεται με το σημείο εντοπισμού μέγιστης ισχύος ( $\eta_5 = 0.8$ ).

Για τη δημιουργία μεγαλύτερης ισχύος πολλά κελιά συνδέονται σε σειρά και σε παράλληλα κυκλώματα. Η φωτοβολταϊκή λειτουργική μονάδα (module) αποτελείται από πολλά συνδεδεμένα μεμονωμένα κελιά. Ένα φ/β πλαίσιο (panel) αποτελείται από μία ή πολλές λειτουργικές μονάδες (modules) συνδεδεμένες μεταξύ τους σε μία κοινή μονάδα στήριξης. [3]

Ο προσανατολισμός και η κλίση των πλαισίων είναι σημαντικές σχεδιαστικές παράμετροι, όπως επίσης και η σκίαση από γύρω εμπόδια. [22] Αυξάνοντας τον αριθμό των κελιών συνδεδεμένα σε σειρά, το ρεύμα είναι το ίδιο αλλά η τάση αυξάνεται αναλογικά με τον αριθμό των κελιών που είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Αυξάνοντας τον αριθμό των κελιών που είναι συνδεδεμένα παράλληλα, η τάση είναι ίση με τη τάση της κάθε μίας λειτουργικής μονάδας και το ρεύμα αυξάνεται με τον αριθμό των μονάδων που είναι σε παράλληλη σειρά. [3]



**Εικόνα 1.6.3:** Φ/β Κελιά, μονάδα, πλαίσια. [3]

## 1.7. Συντήρηση των φ/β συστημάτων

Γενικά, ένα φ/β σύστημα απαιτεί λίγη συντήρηση, αλλά είναι σημαντικός μερικές φορές ο καθαρισμός των πλαισίων. Είναι επίσης απαραίτητος ο έλεγχος των ηλεκτρικών συνδέσεων ώστε να περιοριστεί το πρόβλημα της διάβρωσης. Και, τελικώς, οι συσσωρευτές απαιτούν κανονική συντήρηση.[3]

### Καθαρισμός πλαισίων

Είναι απαραίτητος ο καθαρισμός της συστοιχίας των φ/β πλαισίων, όταν έχουν ακαθαρσίες. Σε περιβάλλον, όμως, ερήμου, υπάρχει άμμος πάνω στα πλαίσια. Σ'αυτή τη περίπτωση, είναι απαραίτητος ο συχνός καθαρισμός. Γενικά χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε να αποφευχθούν κραδασμοί στην γυάλινη επιφάνεια ή κηλίδες ύδατος (άλατα). Επίσης, θα πρέπει να απομακρύνεται η σκόνη και οι ακαθαρσίες από τον ηλεκτρικό πίνακα και από τους αντιστροφείς.

### Έλεγχος στηρίξεων

Θα πρέπει να ελέγχεται το σύστημα περιοδικά με όλες του τις στηρίξεις. Επίσης, θα πρέπει να επαληθεύεται αν η λειτουργία του συστήματος έχει σταθερότητα στο χρόνο.

### Συντήρηση των μπαταριών

Είναι σημαντικό να ελέγχονται οι μπαταρίες για τυχόν ατέλειες, ειδικά διάβρωση ή διαρροή και εάν είναι απαραίτητο να προστεθεί ηλεκτρολύτης και να γίνει εξίσωση των φορτίων.

### Έλεγχος των αντιστροφών

Πρέπει να ελεγχθεί μόνον εάν ο αντιστροφέας ταιριάζει με τα πλαίσια. [3]

## 1.8. Επίδραση της σκόνης στη λειτουργία των φ/β

Ένα από τα πλεονεκτήματα των φ/β είναι ότι δεν απαιτούν μεγάλη συντήρηση. Παρόλα αυτά, όμως, έχουν διεξαχθεί μελέτες σχετικά με την επίδραση της ρύπανσης της επιφάνειας των φ/β πλαισίων στην λειτουργία τους. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η απόθεση σκόνης και άλλων ρύπων στην επιφάνεια των φ/β επιδρούν αρνητικά στην απόδοσή τους. Η μείωση της απόδοσης τείνει να μετατρέψει την φωτοβολταϊκή τεχνολογία σε μία μη αποδοτική μορφή παραγωγή ενέργειας. Η απόθεση σκόνης είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο και επηρεάζεται από ποικίλους περιβαλλοντικούς και καιρικούς παράγοντες.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόθεση της σκόνης είναι οι εξής:

- Η κλίση και ο προσανατολισμός των φ/β πλαισίων.
- Εξωτερική θερμοκρασία και υγρασία.
- Χαρακτηριστικά περιοχής (βλάστηση, αυξημένη κυκλοφορία, ρύπανση αέρα)
- Ταχύτητα αέρα.
- Χαρακτηριστικά επιφάνειας του πλαισίου (υφή επιφάνειας και διάφορες επικαλύψεις σ' αυτήν).
- Ιδιότητες σκόνης (χημικές, βιολογικές, ηλεκτροστατικές ιδιότητες, μέγεθος, βάρος και σχήμα).

Η απόθεση της σκόνης στην επιφάνεια των φ/β πλαισίων επηρεάζονται από τις ιδιότητες της σκόνης και το περιβάλλον. Το περιβάλλον περιλαμβάνει παράγοντες που επηρεάζονται από τις επικρατούσες (ανθρώπινες) δραστηριότητες, από τα χαρακτηριστικά δόμησης (επιφάνειες, προσανατολισμός και ύψος δόμησης), από τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος (τύπος βλάστησης) και από τις καιρικές συνθήκες. Οι ιδιότητες της σκόνης (τύπος-χημικές, βιολογικές και ηλεκτροστατικές ιδιότητες, μέγεθος, σχήμα και βάρος) είναι σημαντικές για την συσσώρευσή της. Ομοίως, παίζει ρόλο και η υφή της επιφάνειας όπου εναποτίθεται η σκόνη. Μία τραχιά (κολλώδης, ηλεκτροστατική) επιφάνεια είναι πιθανότερο να συγκεντρώνει σκόνη

από μία λιγότερο κολλώδη ή λεία. Λόγω της βαρύτητας, μια οριζόντια επιφάνεια συνήθως τείνει να συσσωρεύει περισσότερη σκόνη από μια που βρίσκεται σε κλίση. Αυτό εξαρτάται και από τη ταχύτητα του ανέμου. Γενικά άνεμοι με χαμηλή ταχύτητα προάγουν την απόθεση σκόνης ενώ άνεμοι με μεγάλη ταχύτητα απομακρύνουν την σκόνη και καθαρίζουν την επιφάνεια. Η γεωμετρία του φ/β συστήματος σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει το φαινόμενο της επικάλυψης της σκόνης σε συγκεκριμένα μέρη του φ/β συστήματος. Η σκόνη είναι πιθανό να εναποτίθεται λόγω του ανέμου σε περιοχές με χαμηλή πίεση πάνω σε επιφάνειες με κλίση ή κατακόρυφες. Η διασπορά της σκόνης που αποδίδεται σε κινήσεις του αέρα και στην γεωμετρία του συστήματος εξαρτάται από τις ιδιότητες της σκόνης (βάρος, μέγεθος, τύπος). [4]

Πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί σχετικά με την απόθεση σκόνης και την επίδραση της σκόνης στα φ/β πλαίσια. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στις σημαντικότερες σχετικές μελέτες.

Οι *Hottel* και *Woertz* ήταν ανάμεσα στους πρωτοπόρους που ερεύνησαν την επίδραση της σκόνης στα ηλιακά συστήματα. Τα πειράματα των *Hottel-Woertz* διεξήχθησαν την περίοδο 9 Μαΐου- 1 Ιουνίου σε ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες με κλίση  $30^\circ$  σε βιομηχανική περιοχή (θερμοκήπιο) στην Αμερική. Η μέγιστη μείωση στην απόδοση βρέθηκε ότι ήταν ίση με 4,7% με μία μέση απώλεια στην προσπίπτουσα ακτινοβολία να είναι λιγότερο από 1%. [5]

Ο *Garg* μελέτησε την επίδραση της σκόνης στη διαπερατότητα της επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών συγκρίνοντας συλλέκτες με γυάλινη επιφάνεια και συλλέκτες με επιφάνεια επικαλυμμένη από πλαστικά υμένια στο Roorkee (Ινδία). [6]

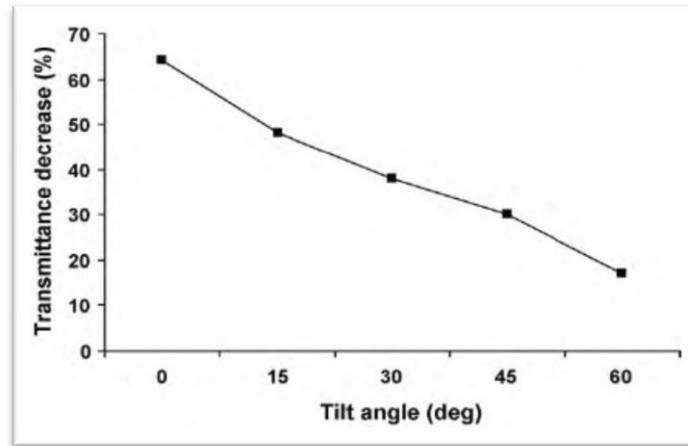
Η τιμή της διαπερατότητας μετά από έκθεση ενός μήνα για τον οριζόντιο και κάθετο συλλέκτη ήταν 30% και 88%, αντίστοιχα. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα της έρευνας του *Garg* ήταν ότι η μείωση της διαπερατότητας για ένα συλλέκτη με κλίση  $45^\circ$  ήταν μόνο 8%. Ένα άλλο πόρισμα ήταν ότι οι συλλέκτες με τα πλαστικά υμένια ελκύουν περισσότερη σκόνη εξαιτίας της αυξημένης ηλεκτροστατικής τάσης. [6]

Οι *Nimmo* και *Seid* μέτρησαν μια μείωση της τάξης των 26% και 40% στην απόδοση των ηλιακών θερμικών συλλεκτών και των φ/β κελιών, αντίστοιχα, σε περίοδο 6 μηνών. [4]

Ο *Salim* μελέτησε εκτενώς την συσσώρευση της σκόνης σε φ/β πάρκο (Σαουδική Αραβία) και έδειξε μια μείωση της τάξης των 32% στην απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μετά από 8 μήνες. Αυτή η μείωση αποδίδεται στη συσσώρευση της σκόνης. Το αποτέλεσμα αυτό προέκυψε κατόπιν σύγκρισης του φ/β συστήματος με ένα άλλο το οποίο βρισκόταν σε κλίση  $24.6^\circ$  και καθαριζόταν καθημερινά. Παρόμοια μελέτη διεξήχθη και από τον *Walkim* στο Κουβέιτ, ο οποίος έδειξε μια μείωση στην παραγόμενη ισχύ ίση με 17% μέσα σε 6 ημέρες εξαιτίας της συσσώρευσης άμμου πάνω στην επιφάνεια των πλαισίων. Επιπλέον, η μελέτη έδειξε ότι η επίδραση της σκόνης στα φ/β συστήματα είναι εντονότερη τη άνοιξη και το καλοκαίρι (20%) από το φθινόπωρο και το χειμώνα. [4]

Ο *Sayigh* μελέτησε την επίδραση της σκόνης στα ηλιακά συστήματα χρησιμοποιώντας 7 επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διάταξης, συγκρίθηκαν οι συλλέκτες, ανά δύο, σε κλίσεις  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $90^\circ$ . Σε κάθε ζευγάρι συλλεκτών, το ένα καθαριζόταν καθημερινά ενώ το δεύτερο διατηρείτο ανέπαφο. Το ποσό της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τον συλλέκτη που δεν καθαριζόταν καταγραφόταν καθημερινά και συγκρινόταν με το αντίστοιχο του καθαρού συλλέκτη. Μια απ' τις παρατηρήσεις ήταν ότι υπήρχε μια συσσώρευση σκόνης περίπου  $2.5 \text{ g/m}^2$  ανά μέρα μεταξύ των μηνών Απριλίου και Ιουνίου. [4]

Ο *Sayigh* έδειξε την επίδραση της σκόνης σε συλλέκτες που βρισκόταν σε κλίση και βρήκε μείωση στη διαπερατότητα των συλλεκτών που κυμαινόταν από 64% έως 17% για κλίσεις από  $0^\circ$  έως  $60^\circ$ , αντίστοιχα, μετά από 38 ημέρες έκθεσης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μια μείωση 30% στην παραγόμενη ενέργεια του οριζόντιου συλλέκτη μετά από 3 ημέρες συσσώρευσης σκόνης. Η επίδραση της κλίσης των συλλεκτών στην μείωση της διαπερατότητας φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 1.8.1. [4]



Εικόνα 1.8.1: Επίδραση κλίσης συλλεκτών στην μείωση της διαπερατότητας. [4]

Ο *Said* μελέτησε την επίδραση της σκόνης σε ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες και σε φ/β πλαίσιο για πολλούς μήνες σε περιβάλλον ερήμου. Παρατηρήθηκε μία μείωση 7% στην απόδοση του φ/β πλαισίου και μια κυμαινόμενη μείωση (από 2.8% έως 7%) στην απόδοση των ηλιακών θερμικών συλλεκτών. [4]

Οι *Nahar-Gupta* μελέτησαν την επίδραση της σκόνης στη διαπερατότητα διαφόρων ειδών επιφανειών έχοντας υπόψη τους την επίδραση της κλίσης των συλλεκτών στην συσσώρευση της σκόνης. Η μείωση της διαπερατότητας για τη γυάλινη επιφάνεια βρέθηκε ίση με 19.17%, 13.81% και 5.67% για κλίσεις  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , και  $90^\circ$ , αντίστοιχα. Η μείωση της διαπερατότητας της ακρυλικής επιφάνειας βρέθηκε ότι είναι ίση με 23%, 13,98% και 8,29% για κλίσεις  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , και  $90^\circ$ , αντίστοιχα. Όπως είχε αποδείξει και ο *Garg* [6], η συσσώρευση της άμμου πάνω στη γυάλινη επιφάνεια ήταν λιγότερη από αυτή στη PVC και στην ακρυλική επιφάνεια. Η διαπερατότητα μειωνόταν δραματικά σε αμμοθύελλες. Για περιβάλλον ερήμου προτείνεται ένα καθημερινό εντατικό καθάρισμα των επιφανειών των συλλεκτών. [4]

Οι *Michalsky* και *Dietz* χρησιμοποίησαν πυρανόμετρα για να μελετήσουν την επίδραση της σκόνης και βρήκαν μείωση 5% της διαπερατότητας μέσα σε 10 ημέρες. Παρόλο την ύπαρξη βροχοπτώσεων, παρατηρήθηκε λιγότερο από 1% μείωση της παραπάνω τιμής για τα μη καθαρά πυρανόμετρα. [4]

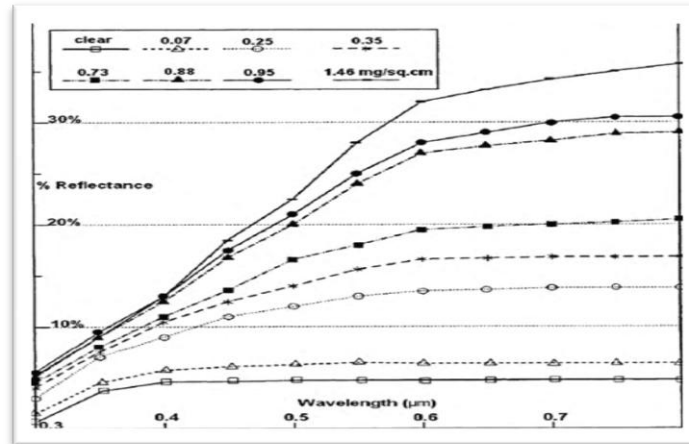


Οι *Al-Shobokshy* και *Hussein* είναι πρωτοπόροι στην μελέτη της επίδρασης της σκόνης στη λειτουργία των φ/β πλαισίων. Η μελέτη περιελάμβανε έρευνα σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες της σκόνης και της πυκνότητας της συσσώρευσης σκόνης που επηρεάζει παραμέτρους που μειώνουν την απόδοση του συστήματος. Το πείραμα διεξήχθη με τεχνητή σκόνη (περιέχει ασβεστόλιθο, κονίαμα, σωματίδια άνθρακα) και λάμπες αλογόνου. Ενώ η ένταση της ακτινοβολίας παρέμεινε σταθερή, μεταβαλλόνταν οι τιμές της πυκνότητας της σκόνης κατά τη διάρκεια του πειράματος, το οποίο πραγματοποιήθηκε πολλές φορές. Η μελέτη έδειξε ότι τα σωματίδια του κονιάματος είχαν την σημαντικότερη επίδραση, καθώς μια απόθεση  $73 \text{ g/m}^2$  σκόνης κονιάματος οδήγησε σε μείωση 80% στη τάση βραχυκύκλωσης. Η απόθεση ατμοσφαιρικής σκόνης με διάμετρο 80  $\mu\text{m}$  οδηγεί σε μέση μείωση στη τάση βραχυκύκλωσης κατά 82%. Οι υδρογονάνθρακες (5  $\mu\text{m}$ ) είχαν τη χειρότερη επίδραση στην απόδοση των φ/β. Η έρευνα επίσης έδειξε ότι τα λεπτόκοκκα σωματίδια είχαν μεγαλύτερη επίδραση από τα ίδιου τύπου πιο χονδρόκοκκα σωματίδια. [7], [8].

Ο *Goosens* μελέτησε την επίδραση της ταχύτητας του ανέμου και τον προσανατολισμό των φ/β συστημάτων στην απόθεση της σκόνης πάνω σ' αυτά. Η μελέτη περιλαμβάνει αεροσύραγγα βάσει προσομοιώσεων και πειραματικών μελετών στην έρημο Νεγκέβ για διάφορες συνθήκες ανέμου και συστήματα προσανατολισμού. Για φ/β σύστημα κλίσης  $45^\circ$  με κάτοπτρα (στη Δύση και στην Ανατολή), η μελέτη προσομοίωσης έδειξε ότι κάτω απ' όλες τις διευθύνσεις του ανέμου η απόθεση της σκόνης αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο, η απόθεση της σκόνης που σχετίζεται με το έδαφος μειώνεται με την αύξηση του ανέμου. Μια αξιοπρόσεχτη παρατήρηση είναι ότι μεγάλη απόθεση σκόνης πραγματοποιείται το απόγευμα και το βράδυ για ισχυρούς δυτικούς ανέμους, ενώ για νοτιοδυτικούς ανέμους παρατηρείται μόνο το απόγευμα. [9]

Ο *Al-Hasan* ερεύνησε μαθηματικά την επίδραση της απόθεσης άμμου στη διαπερατότητα του φωτός σ' ένα φ/β πλαίσιο. Κατέληξε σε σχέσεις που συνδέουν την διαπερατότητα και διάφορες τιμές της γωνίας πρόσπτωσης και μία γενική σχέση για την προσπίπτουσα ακτινοβολία που δέχεται μια επιφάνεια με κλίση για μεγαλύτερη ακρίβεια και αυξημένη

δυνατότητα πρόβλεψης. Η μελέτη, επίσης, έδειξε την επίδραση διάφορων ειδών επικάλυψης της σκόνης στην ανάκλαση του φωτός σε αντιστοιχία με το μήκος κύματός του. [4]



**Εικόνα 1.8.2:** Επίδραση της σκόνης στην ανάκλαση του γυαλιού για διάφορες τιμές του μήκου κύματος. [4]

Οι *Mastekbayena* και *Kumar* μελέτησαν την επίδραση της σκόνης στη διαπερατότητα τζαμιών πολυαιθυλενίου (μικρής πυκνότητας) και κατέληξαν σε έναν συντελεστή διόρθωσης-καθαρότητας που βασίζεται στις ημέρες έκθεσης και στην κλίση σε τροπικό κλίμα. Παρατηρήθηκε μείωση 11% στη διαπερατότητα πολυμερικής επιστρώσης για επικάλυψη της τάξης των  $5 \text{ g/m}^2$  για πάνω από έναν μήνα έκθεσης (κάτω από φυσικές συνθήκες) σε τροπικό κλίμα. Η μέγιστη συσσώρευση σκόνης που παρατηρήθηκε το καλοκαίρι ήταν  $3.7 \text{ g/m}^2$  για ένα μήνα. Ο συντελεστής διόρθωσης για ένα σταθερό έλασμα πολυαιθυλενίου 0,2 mm με κλίση  $15^\circ$  είναι: [10]

$$DC_{15} = 0.0001N^2 - 0.0082N + 0.999 \quad (1.8.1)$$

Όπου  $N$  είναι οι μέρες έκθεσης και ισχύει ότι  $0 \leq N \leq 30$ , για  $R^2=0.9963$ , και  $DC_{15}$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης για κλίση  $15^\circ$ .

Μια περισσότερο συστηματική έρευνα σχετικά με την επίδραση της σκόνης στη διαπερατότητα διεξήχθη από τον *Hegazy*, ο οποίος πραγματοποίησε μια μεγάλης διάρκειας πειραματική μελέτη για την υποτροπική κλιματική περιοχή της *Minia* (κεντρική Αίγυπτος). Η

πειραματική διάταξη περιελάμβανε εννιά κυκλικούς γυάλινους συλλέκτες πάχους 3 mm ο καθένας και επιφάνειας έκθεσης ίσης με 0,09 m<sup>2</sup>. Ο ένας συλλέκτης διατηρείτο καθαρός ενώ οι άλλοι ήταν τοποθετημένοι σε επίπεδα ξύλινα πλαίσια προσανατολισμένα στο νότο με διαφορετικές κλίσεις (0°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60 °, και 90°) ώστε να μελετηθεί εκτενώς η συσσώρευση σκόνης πάνω από ένα μήνα. Με ανάλυση μη γραμμικής παλινδρόμησης στα πειραματικά δεδομένα, προέκυψε μια εξίσωση που συσχετίζει την απόθεση σκόνης ( $\omega$  σε g/m<sup>2</sup>) και τη μείωση της διαπερατότητας της γυάλινης επιφάνειας ( $1-\tau/\tau_{clean}$ ) για περίοδο ενός μηνός: [11]

$$\frac{1-\tau}{\tau_{clean}} (\%) = 34.37 \operatorname{erf} (0.17\omega^{0,8473}) \quad (1.8.2)$$

Όπου  $\operatorname{erf}^{-1}(x)$  είναι η συνάρτηση σφάλματος του Gauss.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τις ζώνες γύρω από τον Ατλαντικό μέχρι και τον Περσικό κόλπο για μικρές κλίσεις, με εντατικό εβδομαδιαίο καθαρισμό των πλαισίων σε περίπτωση χαμηλής απόθεσης σκόνης και άμεσο καθαρισμό σε περίπτωση αμμοθύελλας. [11]

Ο *Hassan* μελέτησε την επίδραση της συγκέντρωσης της σκόνης στον αέρα στην λειτουργία των φ/β. Παρατηρήθηκε μείωση στην απόδοση από 33,5% έως 65,8% για έκθεση 1-6 μήνες, αντίστοιχα. Η μείωση αυξάνεται ραγδαία κατά τη διάρκεια των 30 ημερών έκθεσης (σκόνης). [12]

Ο *Eliminir* πραγματοποίησε τα πειράματα στο Κάιρο, συγκρίνοντας 100 γυάλινους συλλέκτες με διαφορετική κλίση και γωνία αζιμούθιου. Μετρήθηκε η διαπερατότητα του γυαλιού σε τακτά χρονικά διαστήματα για πάνω από 7 μήνες και για τους ισχύοντες ανέμους, συμπεριλαμβάνοντας και τις καταιγίδες. Η μελέτη έδειξε μείωση στην απόθεση σκόνης από 15,84 g/m<sup>2</sup> (για κλίση 0°) σε 4.48 g/m<sup>2</sup> (για κλίση 90°) και αύξηση της διαπερατότητας από 12,33% σε 52,54%. Παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη υγρασίας διευκολύνει την προσκόλληση της

σκόνης πάνω στην επιφάνεια υπό τη μορφή πήγματος (λάσπης). Σε τέτοιες περιπτώσεις προτείνεται εβδομαδιαίο καθάρισμα. [4]

Μία πρόσφατη έρευνα διεξήχθη από τον *Κυμάκη* σε ένα διασυνδεδεμένο φ/β σύστημα στην Κρήτη. Υπολογίστηκαν οι απώλειες της παραγόμενης ισχύος εξαιτίας της συσσώρευσης σκόνης. Η μελέτη έδειξε ετήσια απώλεια ίση με 5.86% και συγκεκριμένα το χειμώνα 4-5% και το καλοκαίρι 6-7%. [13]

Το 2010 στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα του Πειραιά διεξήχθη έρευνα από τον *Καλδέλη* σχετικά με την επίδραση της σκόνης στην λειτουργία των φ/β πλαισίων. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε ζευγάρια φ/β πλαισίων, προσανατολισμένα στο νότο με κλίση  $30^{\circ}$  με σκοπό την μελέτη της λειτουργίας τους όταν η επιφάνειά τους ήταν καθαρή και μη καθαρή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η ύπαρξη σκόνης επηρέαζε αρνητικά την παραγόμενη ενέργεια ακόμα και μετά από μια μικρή περίοδο έκθεσης των πλαισίων (2 μήνες). Η έκθεση των φωτοβολταϊκών έγινε κάτω από φυσικές συνθήκες και το χρονικό διάστημα έκθεσής τους ήταν το καλοκαίρι και αρχές του φθινοπώρου, ώστε να αποφευχθούν βροχοπτώσεις. Στη πειραματική διαδικασία δεν περιλαμβανόταν καθάρισμός των πλαισίων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μεγαλύτερη απόθεση που παρατηρηθήκε ήταν της τάξης του  $1 \text{ g/m}^2$ , η παραγόμενη ενέργεια μειώθηκε κατά 6.5%. Η μείωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα ετήσια απώλεια 40€/kWh, αν το σύστημα ήταν διασυνδεδεμένο με τις υπάρχουσες τότε τιμές αγοράς της kWh από το δίκτυο. [14], [15].

Οι *Mekhilef*, *Saudur* και *kamalisarvestani* μελέτησαν την επίδραση της σκόνης, της υγρασίας και της ταχύτητας του ανέμου στην λειτουργία των φ/β συστημάτων. Κατέληξαν ότι οι τρεις αυτοί παράγοντες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους στην απόδοση των φ/β. Συγκεκριμένα, η συσσώρευση σκόνης στην επιφάνεια των πλαισίων μειώνει την απόδοση, καθώς επίσης και η υγρασία. Η υγρασία, επιπλέον, ενισχύει το φαινόμενο συσσώρευσης της σκόνης, καθώς δημιουργεί ευνοϊκό περιβάλλον ώστε να προσκολλάται η σκόνη ευκολότερα. Η υψηλή ταχύτητα του αέρα μπορεί να απομακρύνει περισσότερη θερμότητα από την επιφάνεια του φ/β κελιού. Επίσης, υψηλή ταχύτητα αέρα μειώνει την σχετική υγρασία και αυτό οδηγεί σε

καλύτερα αποτελέσματα στην απόδοση. Αντιθέτως, ο άνεμος παρασύρει την σκόνη και προκαλεί τη διάχυσή της στην επιφάνεια των φ/β. Τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνονται και στον πίνακα 1.1. [16]

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1**

**Επίδραση διάφορων παραγόντων στην λειτουργία των φ/β**

|                          | <b>Σκόνη</b>                          | <b>Υγρασία</b>              | <b>Ταχύτητα<br/>Αέρα</b>    | <b>Απόδοση</b>      |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| <b>Σκόνη</b>             | Περισσότερη<br>συσσώρευση<br>σκόνης   | Μη<br>σημαντική<br>επίδραση | Μη<br>σημαντική<br>επίδραση | Μείωση              |
| <b>Υγρασία</b>           | Ενισχύεται η<br>προσκόλληση<br>σκόνης | -                           | Μη<br>σημαντική<br>επίδραση | Δραματική<br>μείωση |
| <b>Ταχύτητα<br/>Αέρα</b> | Περισσότερη<br>συσσώρευση<br>σκόνης   | Μείωση                      | -                           | Αύξηση              |

Όπως αναφέρθηκε, η επικάλυψη σκόνης και διάφορων ρύπων δημιουργεί προβλήματα στη λειτουργία των φ/β και η απόδοσή τους μειώνεται δραματικά. Σε τροπικά κλίματα, σε ξηρές περιοχές όπως η έρημος ή σε βιομηχανικές περιοχές που υπάρχει αυξημένη ατμοσφαιρική ρύπανση και αυξημένα επίπεδα σκόνης ή άμμου, έχει παρατηρηθεί ότι η απόδοση των φ/β πλαισίων είναι πιθανόν να μειωθεί έως και 80% μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα έκθεσης. Γι' αυτό το λόγο, χρειάζεται συχνό καθάρισμα των πλαισίων. Η συνηθέστερη μέχρι τώρα

συντήρηση των φ/β συστημάτων είναι ο καθαρισμός τους με απιονισμένο νερό κάθε έξι μήνες. Σε ορισμένα φ/β συστήματα η προτεινόμενη αυτή συντήρηση δε γίνεται καθόλου, καθώς η πρόσβαση σ' αυτά δεν είναι καθόλου εύκολη.

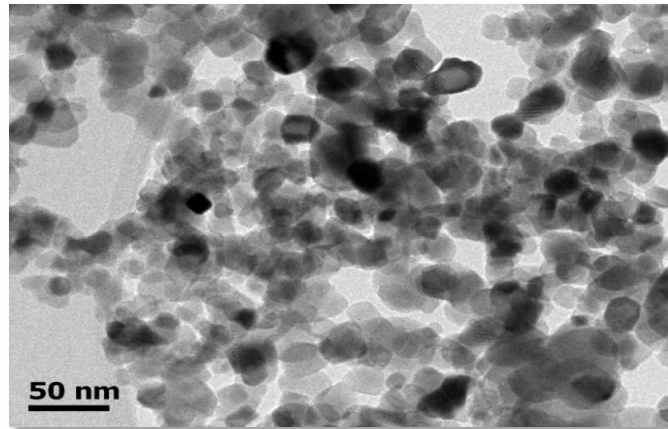
Στο παρακάτω υποκεφάλαιο, θα παρουσιαστεί ένας εναλλακτικός τρόπος συντήρησης των φ/β συστημάτων. Πρόκειται για μία επίστρωση που καθιστά την επιφάνεια των πλαισίων αυτοκαθαριζόμενη και μ' αυτό το τρόπο, τα φ/β διατηρείται για πάντα καθαρό και δεν απαιτείται περαιτέρω συντήρηση. Η επίστρωση αυτή είναι ένα εμπορικό προϊόν της εταιρείας NanoPhos A.E. Η εμπορική του ονομασία είναι SurfaShield G.

## 1.9. Αυτοκαθαριζόμενη Επίστρωση

### Φύση της επίστρωσης

Το παραπάνω προϊόν δημιουργεί μία ανόργανη νανοδομημένη επίστρωση που δένει χημικά στο υπόστρωμα. Αποτελείται από μίγμα οξειδίων μετάλλων, με το διοξείδιο του τιτανίου να είναι το κυρίως υλικό. Το πάχος της επίστρωσης είναι της τάξης των 150 nm. [17]

Η υγρή φόρμουλα που εναποτίθεται σε γυάλινες επιφάνειες αποτελείται από ειδικά σχεδιασμένα και σταθεροποιημένα νανοσωματίδια με μέσο μέγεθος 25 nm. Μετά την εφαρμογή οι επιφάνειες διατηρούν την ανόργανη φάση τους με μηδενικό ποσοστό οργανικών ουσιών. [17]



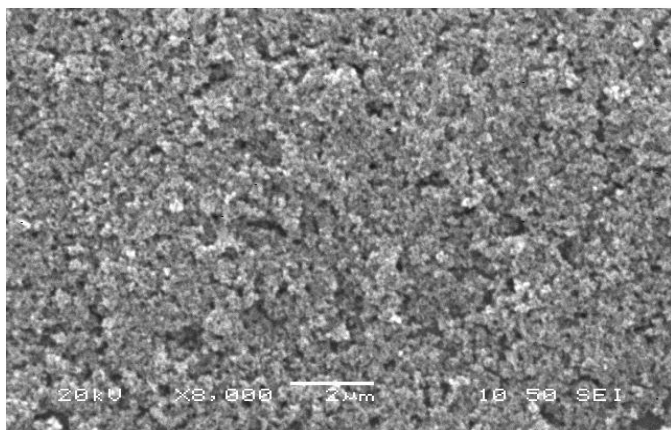
**Εικόνα 1.9.1:** Νανοσωματίδια που περιέχονται στο SurfaShield G, εικόνα από Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διαπερατότητας (Transmission Electron Microscopy, TEM).

Το προϊόν αποτελείται κυρίως από ενεργά σωματίδια διοξειδίου του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) και τα σωματίδια του συνδετικού μέσου. Τα σωματίδια του συνδετικού μέσου δημιουργούν δεσμούς μετάλλου- οξυγόνου- μετάλλου μεταξύ των νανοσωματιδίων  $\text{TiO}_2$  και του υποστρώματος δημιουργώντας μία διάφανη επίστρωση. Η τελική επίστρωση είναι ανόργανη και δένει στην επιφάνεια του υποστρώματος χωρίς θερμική επεξεργασία. Έτσι τα νανοσωματίδια δε δένουν μηχανικά αλλά χημικά πάνω στην εφαρμοζόμενη επιφάνεια. Ο δεσμός μετάλλου- οξυγόνου-

μετάλλου σταθεροποιεί την επικάλυψη αυξάνοντας την πρόσφυση στην επιφάνεια. Επιπλέον, δεν επηρεάζει τις μηχανικές ή θερμικές ιδιότητες της επιφάνειας του υποστρώματος.[17]

Το SurfaShield G είναι κατάλληλο για τον αυτοκαθαρισμό παραθύρων, καθρεπτών, φ/β πλαισίων, ηλιακών θερμικών και γενικά υαλωδών επιφανειών με τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: [17]

- Προστασία από οργανικούς λεκέδες.
- Αποτροπή επικάλυψης σκόνης και δημιουργία λάσπης.
- Αποικοδόμηση ρύπων και προστασία του περιβάλλοντος.
- Αναστολή ανάπτυξης βακτηρίων και μυκήτων.



**Εικόνα 1.9.2:** Η επίστρωση όπως φαίνεται στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM).

### Χαρακτηριστικά του Οξειδίου του Τιτανίου

Το διοξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) είναι λευκή σκόνη, η οποία εμφανίζεται χημικώς μη αδρανής, μη τοξική, με ιδιαίτερα χαμηλό κόστος. Από χημική σκοπιά το διοξείδιο του τιτανίου δεν αντιδρά με τα ορυκτά οξέα (ισχυρά ανόργανα οξέα), παρά μόνο με πυκνό θεικό οξύ, από το οποίο και διαλύεται προς κίτρινο θεικό τιτανύλιο. Το συγκεκριμένο οξύ δεν επιδεικνύει



καμιά διαλυτότητα σε κοινούς διαλύτες. Σχηματίζει κολλοειδή διαλύματα στο νερό και στους υπόλοιπους διαλύτες. Βιομηχανικά, το διοξείδιο του τιτανίου παρασκευάζεται με δύο βασικές διεργασίες: τη διαδικασία χλωριούχων και θειικών. [18]

Το διοξείδιο του τιτανίου θεωρείται ένα από τα πιο αδρανή συστατικά για τον ανθρώπινο οργανισμό (χαμηλή έως ανύπαρκτη τοξικότητα). Η συμπεριφορά αυτή αιτιολογείται από την υψηλή και σταθερή οξειδωτική βαθμίδα του τιτανίου. Ο κύριος τρόπος εισόδου στο σώμα είναι η αναπνευστική οδός αλλά ακόμα και σε περίπτωση εισπνοής σε υψηλές συγκεντρώσεις δεν έχουν παρατηρηθεί παρενέργειες. Το διοξείδιο του τιτανίου δε σχετίζεται με την ανάπτυξη νεοπλασιών. [18]

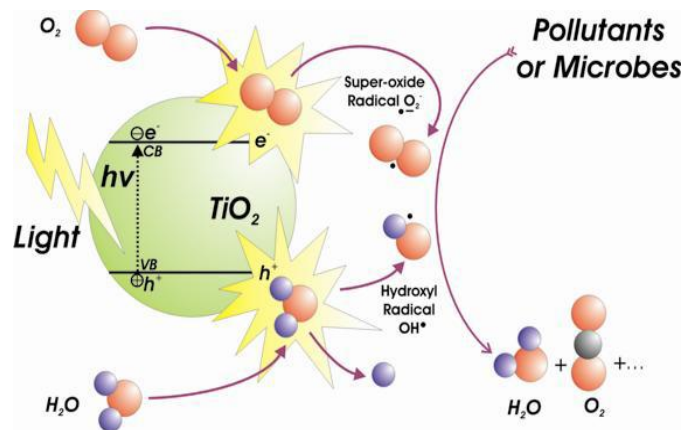
Η δομή του διοξειδίου του τιτανίου προκύπτει από την ανάμιξη των 2p τροχιακών του οξυγόνου και τα 3d τροχιακά του τιτανίου. Κρυσταλλογραφικά απαντάται σε τρεις κύριες μορφές (σε σειρά εμφάνισης στο φλοιό της γης): ανατάσης, ρουτίλιο και μπρουκίτης (anatase, rutile and brookite). Έχει επαμφοτερίζοντα χαρακτήρα, δρα δηλαδή τόσο ως οξύ όσο και ως βάση κατά Brönstead-Lowry. Αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς είναι να ενυδατώνεται πολύ εύκολα. [18]

Το διοξείδιο του τιτανίου αποτελεί έναν εξαιρετικό ημιαγωγό για την αποικοδόμηση οργανικών ενώσεων σε υδατική ή αέρια φάση, για την καταστροφή βακτηρίων και ιών, για την αδρανοποίηση κυττάρων και για την αντιμετώπιση πετρελαϊκών κηλίδων. Το πλεονέκτημα του  $\text{TiO}_2$  ως φωτοκαταλύτη βασίζεται στην μεγάλη διαθεσιμότητα του υλικού, τη μεγάλη σταθερότητα και το μικρό κόστος. Ωστόσο, η μεγάλη του απόδοση και ικανότητα να αποικοδομεί τις οργανικές ενώσεις το καθιέρωσε ως την πιο σύγχρονη «Προχωρημένη Οξειδωτική Μέθοδο Αντιρρύπανσης (Advanced Oxidation Process, AOP)». Υποθέτοντας ότι μόνο το 25% των ικανών φωτονίων προκαλούν φωτοκαταλυτική αποικοδόμηση οργανικών ουσιών αποδεικνύεται ότι ένα στρώμα υδρογονανθράκων περίπου 1μm πάχους μπορεί αποτελεσματικά να μετατραπεί σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό μέσα σε χρονικό διάστημα μιας ώρας! Αν κανείς αναλογιστεί ότι οι ρύποι εναποτίθενται σταδιακά στις επιφάνειες και ότι

ένα υμένιο μπορεί αποτελεσματικά να καταστρέφει ρύπους «εν τω γεννάσθαι», τότε είναι εύκολο να γίνουν αντιληπτές οι δυνατότητες της φωτοκαταλυτικής τεχνολογίας. [18]

### Μηχανισμός Επίστρωσης

Το SurfaShield G λειτουργεί απορροφώντας το περιβάλλον φως, μετατρέποντάς το σε χημική ενέργεια. Τα νανοσωματίδια του SurfaShield G, ως ημιαγωγός-καταλύτης, ενεργοποιούνται από το φως και παράγουν οξειδωτικές ρίζες οξυγόνου και υδροξυλίων. Η δράση των φωτοκαταλυτικών υλικών βασίζεται σε νανοκρυσταλλικά σωματίδια διοξειδίου του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ). Τα νανοσωματίδια συμπεριφέρονται ως ημιαγωγοί και απορροφούν φωτόνια με αποτέλεσμα το διαχωρισμό ηλεκτρονίων και θετικών οπών και τελικά τη δημιουργία οξειδωτικών ριζών και υδροξυλίων με μικρό χρόνο ζωής. Θα αναλυθεί ο μηχανισμός φωτοκατάλυσης του οξειδίου του τιτανίου που στην ουσία είναι ο ίδιος μ' αυτόν του SurfaShield G. Ο μηχανισμός περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα 1.9.3: [18]



**Εικόνα 1.9.3:** Φωτοκαταλυτικός μηχανισμός του  $\text{TiO}_2$  υπό την επίδραση υπεριώδους ακτινοβολίας.

Το βασικό στάδιο του μηχανισμού της φωτοκαταλυτικής διεργασίας σε νανοσωματίδια διοξειδίου του τιτανίου περιλαμβάνει την απορρόφηση φωτονίου με την απαραίτητη ενέργεια ( $E_{h\nu} \geq E_g = 3.2\text{eV} \rightarrow \lambda \leq 387.5\text{nm}$ ). [18]

Αμέσως, ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους του ημιαγωγού διεγείρονται στη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργώντας ζεύγος αντίθετα φορτισμένων φωτοεπαγόμενων φορτίων

(φωτοηλεκτρόνια  $e^-_{CB}$  και θετικές οπές  $h^+_{VB}$ , στη ζώνη αγωγιμότητας CB και στη ζώνη σθένους VB, αντίστοιχα). Τα φορτία αυτά μπορούν να ταξιδέψουν στην επιφάνεια του ημιαγωγού, λόγω του εκτεταμένου δικτύου δεσμικών και αντιδεσμικών τροχιακών του νανοσωματιδίου. Τα φωτοεπαγόμενα φορτία μπορούν στη συνέχεια να αντιδράσουν επιφανειακά με μοριακό οξυγόνο και νερό, σχηματίζοντας δραστικές οξειδωτικές ρίζες σύμφωνα με τις αντιδράσεις: [18]



Οι ελεύθερες ρίζες, που δημιουργούνται, έχουν το απαραίτητο δυναμικό οξείδωσης για την αποικοδόμηση σχεδόν όλων των οργανικών μορίων προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η αποικοδόμηση δεν γίνεται παρά σε αρκετά ενδιάμεσα στάδια, τελικά προϊόντα ωστόσο παραμένουν ανόργανα μόρια και ιόντα. [18]

Λόγω, λοιπόν, της φωτοκαταλυτικής δραστηρότητας, το SurfaShield G κάνει τις επιφάνειες να δρουν ως αυτοκαθαριζόμενες και αυτοαποστειρούμενες. Η επίστρωση αποικοδομεί τις οργανικές ενώσεις προστατεύοντάς τες από λεκέδες και χρωματισμούς από αέριους ρύπους. Η εφαρμογή της επικάλυψης SurfaShield G είναι ιδανική για εξωτερική χρήση επειδή εκτίθεται σε ηλιακό φως και έτσι οι υάλινες επιφάνειες διατηρούνται καθαρές για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, ειδικά αν λάβουμε υπόψη μας ότι δεν καθαρίζονται εύκολα, ούτε συνήθως είναι εύκολα προσβάσιμες. Μετά την ακτινοβολία με φως και με την επίδραση της υγρασίας η επιφάνεια γίνεται υπερυδρόφιλη και οι ρύποι απομακρύνονται. [18]

Η υδροφιλική φύση του διοξειδίου του τιτανίου σε συνδυασμό με τη βαρύτητα, αναγκάζει τη σκόνη και τη λάσπη να ξεπλυθούν, μετατρέποντας έτσι την επιφάνεια σε αυτοκαθαριζόμενη. Επιπλέον, το SurfaShield G λειτουργεί και σαν καθαριστής αέρα καθώς αποικοδομεί οργανικές επικίνδυνες ουσίες, όπως τις πτητικές οργανικές (ΠΟΕ) και τα καυσαέρια αυτοκινήτου, αλλά μετατρέπει και τα οξείδια του αζώτου σε ενώσεις πιο φιλικές προς τον άνθρωπο. Το αποτέλεσμα είναι οι υάλινες επιφάνειες να διατηρούνται καθαρές χωρίς τη χρήση επικίνδυνων χημικών ουσιών. [18]

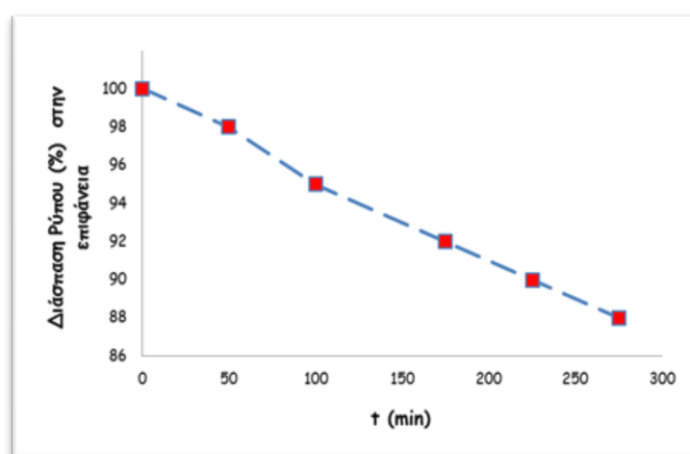


**Εικόνα 1.9.4:** Παράγοντες που επιδρούν θετικά στη λειτουργία της επίστρωσης.

## Ιδιότητες της επίστρωσης

- Φωτοκαταλυτική Δραστικότητα

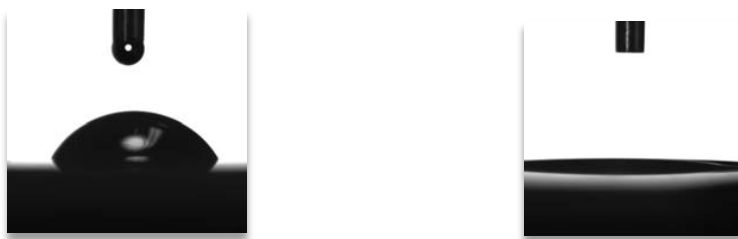
Η φωτοκαταλυτική δραστικότητα της τροποποιημένης επιφάνειας με SurfaShield G εκτιμήθηκε με βάση την αποικοδόμηση της οργανικής χρωστικής ουσίας (πορτοκαλόχρουν του μεθυλίου) υπό την ακτινοβόλησή της από υπεριώδη ακτινοβολία. Στην *εικόνα 1.9.5.*, φαίνεται ένα διάγραμμα που δείχνει την μεταβολή της συγκέντρωσης της χρωστικής συναρτήσει του χρόνου έκθεσης της επικαλυμμένης επιφάνειας. [17]



**Εικόνα 1.9.5:** Αποικοδόμηση οργανικής χρωστικής ουσίας συναρτήσει του χρόνου ακτινοβόλησής της με υπεριώδη ακτινοβολία. [17]

- Υδροφιλικότητα

Η πιο σημαντική ιδιότητα της επίστρωσης για τις υάλινες επιφάνειες είναι η υπερυδροφιλικότητα. Υδροφιλικότητα είναι η ικανότητα μιας επιφάνειας να έλκει τα μόρια του νερού και μπορεί να μετρηθεί με τη γωνία επαφής που σχηματίζεται μεταξύ μιας σταγόνας νερού και της επιφάνειας. Όσο πιο μικρή είναι η γωνία επαφής τόσο πιο υδρόφιλη είναι η επιφάνεια (*εικόνα 1.9.6*). [17]



*Εικόνα 1.9.6: Γωνία επαφής ανάμεσα σε σταγόνα νερού και της επιφάνειας του γυαλιού.*

Η γωνία επαφής μιας τροποποιημένης επιφάνειας με SurfaShield G και σταγόνας νερού είναι  $5^\circ$ . Αυτό κάνει την επιφάνεια να χαρακτηρίζεται ως υπερυδρόφιλη. Αυτή η ιδιότητα είναι που έχει ως αποτέλεσμα οι σταγόνες νερού σε μία κάθετη επιφάνεια να κυλούν χωρίς να αφήνουν στάμπες και υπολείμματα, ξεπλένοντας οποιαδήποτε σκόνη και βρωμιά. [17]



*Εικόνα 1.9.7: Φωτογραφία της συμπεριφοράς της τροποποιημένης (αριστερά) και μη επιφάνειας (δεξιά) με SurfaShield G όταν έρθει σε επαφή με νερό.*

- Αντιστατικότητα

Η επίστρωση εκτός από αυτοκαθαριζόμενη και υπερυδρόφιλη, χαρακτηρίζεται και ως αντιστατική. Αποτρέπει την επικάθιση σκόνης, προσφέροντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε υάλινες επιφάνειες που είναι εκτεθειμένες σε εξωτερικό περιβάλλον, το οποίο μπορεί να είναι και ιδιαίτερα εκτεθειμένο σε σκόνη και ατμοσφαιρική ρύπανση. Το προϊόν μετατρέπει την υάλινη επιφάνεια στην οποία θα επιστρωθεί σε αντιστατική λόγω των οξειδίων που περιέχει. Τα οξείδια εμφανίζουν αυξημένη αγωγιμότητα και φορτίζουν την επιφάνεια και μ' αυτό το τρόπο αποτρέπεται η επικάθιση της σκόνης. Η ιδιότητα αυτή βρίσκει μεγάλη εφαρμογή εκτός

από υαλοπίνακες και σε ηλιακούς συλλέκτες, των οποίων η απόδοση μειώνεται δραματικά από την επικάλυψη της σκόνης, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, καθώς μειώνεται η διαπερατότητα της επιφάνειας και κατ' επέκταση το ποσό της ακτινοβολίας που εισέρχεται στον συλλέκτη με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγόμενη ενέργεια. [17]

- Αντιμικροβιακή και Αντιμυκητιακή Δράση

Η αντιβακτηριακή και αντιμυκητιακή δράση του SurfaShield G μετρήθηκε με βάση το πρότυπο ISO EN 27447 από ανεξάρτητο φορέα. Το τεστ πραγματοποιήθηκε με χρήση κοινών βακτηρίων και μυκήτων με τα εξής αποτελέσματα:

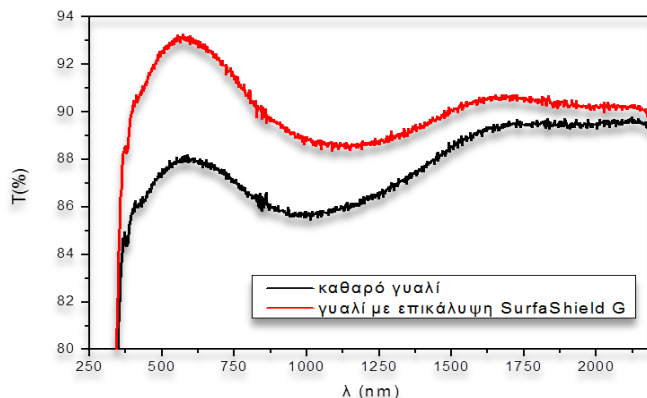
Αντιβακτηριακή δράση: 88.6% μείωση πληθυσμού βακτηρίων μέσα σε 4 ώρες

Αντιμυκητιακή δράση: 81.3% μείωση πληθυσμού μυκήτων μέσα σε 4 ώρες

Σημειώνεται ότι το SurfaShield G είναι απολύτως ασφαλές για τους ανθρώπους. Τα ανόργανα συστατικά του χρησιμοποιούνται εκτενώς σε χρώματα, καλλυντικά ακόμα και οδοντόκρεμες. Επιπλέον, το SurfaShield G δεν περιέχει αντιβιοτικά, απορρυπαντικά ή άλλα επικίνδυνα συστατικά που μπορούν να προκαλέσουν αλλεργικές αντιδράσεις ή παρενέργειες στους ανθρώπους και τα άλλα θηλαστικά. [17]

- Αύξηση της Διαπερατότητας

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της επίστρωσης SurfaShield G είναι ότι όχι μόνο διατηρεί την διαπερατότητα του γυαλιού (προστατεύοντάς το από ρύπους και σκόνη) αλλά μάλιστα την αυξάνει κατά περίπου 3%, ιδιότητα πολύ σημαντική ιδιαίτερα σε εφαρμογές, όπως φ/β πάνελ ή ηλιακούς συλλέκτες. Στην *εικόνα 1.9.8*, φαίνεται η διαπερατότητα του γυαλιού χωρίς και με την επίστρωση SurfaShield G. [17]



**Εικόνα 1.9.8:** Φάσμα διαπερατότητας καθαρού υάλου και υάλου με την επίστρωση.

Τα δείγματα προς μέτρηση ήταν δύο υάλου εργαστηρίου, εκ των οποίων ο ένας είχε την επίστρωση στην επιφάνειά του ενώ ο άλλος όχι. Στα δύο δείγματα μετρήθηκε με φασματοφωτόμετρο η διαπερατότητα της επιφάνειάς τους. Φαίνεται μια αισθητή αύξηση της διαπερατότητας της επιφάνειας του δείγματος με την επίστρωση. Επίσης, μεγάλη αύξηση παρατηρείται σε μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε ακτινοβολία φως (ορατή και υπεριώδη) πλήρως εκμεταλεύσιμη από τα φ/β ενώ ελάχιστη αύξηση παρατηρείται σε μήκη κύματος που αντιστοιχούν στην υπέρυθη ακτινοβολία, η οποία δεν εκμεταλεύεται από τα φ/β και το μόνο που προσφέρει είναι η αύξηση της θερμοκρασίας. [17]

Η πολύ καλή πρόσφυση της επίστρωσης SurfaShield® G σε ανόργανα υποστρώματα, όπως γυαλί και πλακάκι, οφείλεται στην ανόργανη φύση της επίστρωσης και τη δημιουργία του δεσμού μέταλλο-οξυγόνο-μέταλλο (M-O-M) που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια. Συνεπώς, τα νανοσωματίδια δεν δένουν με μηχανικό τρόπο αλλά με χημικό δεσμό στο υάλινο υπόστρωμα. Ο χημικός δεσμός που αναπτύσσεται σταθεροποιεί την τελική επίστρωση αποτρέποντας τον κίνδυνο αποκόλλησης της επίστρωσης. [17]

### Εφαρμογή Επίστρωσης

Το προϊόν εφαρμόζεται με ψεκασμό. Το εκνέφωμα που παράγεται επικάθεται στην υάλινη επιφάνεια και δημιουργεί μια λεπτή και ομοιόμορφη επίστρωση μερικων δεκάδων



νανομέτρων. Το ψεκαστικό είναι το Tornador και φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Η εκτιμώμενη κατανάλωση είναι 30 m<sup>2</sup>/L.



**Εικόνα 1.9.9:** (α) Ρυθμιστής παροχής αέρα του ψεκαστικού (β) Ρυθμιστής παροχής ποσότητας του υγρού προϊόντος

Στην εικόνα 1.9.10, παρουσιάζονται τα οπτικά αποτελέσματα μιας εφαρμογής σε φ/β στην Κύπρο για περίοδο έξι μηνών. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι το πλαίσιο με την επικάλυψη είναι πιο καθαρό και συνεπώς πιο αποδοτικό από το αντίστοιχο χωρίς την επικάλυψη.



**Εικόνα 1.9.10:** Σύγκριση επιφάνειας φ/β πάνελ ύστερα από έκθεση σε φυσικό περιβάλλον για 6 μήνες (περιοχή Κύπρος). Το αριστερό πάνελ έχει επιστρωθεί με SurfaShield G.

## 2. Μεθοδολογία

### 2.1. Βελτίωση Προϊόντος

Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική και πειραματική έρευνα για την βελτίωση κάποιων ιδιοτήτων της αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης (SurfaShield G). Οι ιδιότητες είναι η ανακλαστικότητα στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας και της αντιστατικότητας.

Οι επεμβάσεις που έγιναν για να επιτευχθεί η βελτίωση των παραπάνω ιδιοτήτων της αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης παρουσιάζονται παρακάτω και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την κάθε ιδιότητα του υλικού.

#### Ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο

Μας ενδιαφέρει η αύξηση της ανακλαστικότητας της επιφάνειας του υμενίου στο υπέρυθρο, καθώς η υπέρυθρη ακτινοβολία ( $1 \text{ mm} > \lambda > 700 \text{ nm}$ ) ευθύνεται για την εμφάνιση αύξησης της θερμοκρασίας στα φ/β κελιά. Αυτό παρατηρείται γιατί είναι μια μορφή ακτινοβολίας που δεν εκμεταλλεύεται από το φ/β κελί, ώστε να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια αλλά σε θερμική, μειώνοντας την απόδοση των κελιών.

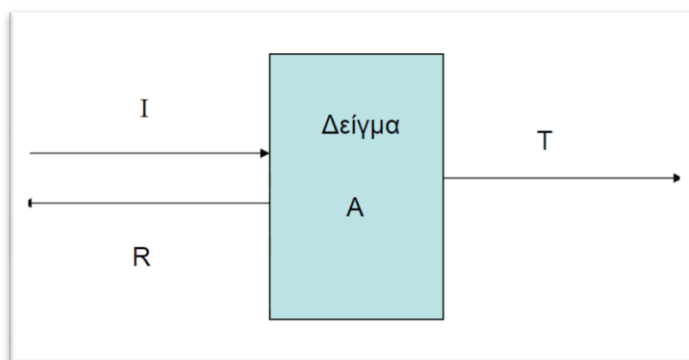
Από βιβλιογραφική αναζήτηση, προέκυψε ότι οι ουσίες που παρουσιάζουν ανακλαστικότητα στην περιοχή του υπέρυθρου είναι οι  $\text{ZrSiO}_4$ ,  $\text{SnO}_2$ . Τα δείγματα που δημιουργήθηκαν περιείχαν τις παραπάνω ενώσεις σε διάφορες συγκεντρώσεις μέσα στο διάλυμα του αρχικού υλικού και είναι τα εξής:

- 1<sup>ο</sup> Δείγμα: 5% w/w  $\text{SnO}_2$ .
- 2<sup>ο</sup> Δείγμα: 2% w/w  $\text{ZrSiO}_4$ .
- 3<sup>ο</sup> Δείγμα: 1% w/w  $\text{ZrSiO}_4$  και 2% w/w  $\text{TiO}_2$ .

Τα παραπάνω δείγματα εφαρμόσθηκαν σε υάλους εργαστηρίου και μετρήθηκε η ανακλαστικότητα της επιφάνειάς τους στο υπέρυθρο, λαμβάνοντας το φάσμα τους σε συνάρτηση με το μήκος κύματος.

Για την επιλογή του κατάλληλου δείγματος που εμφανίζει μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο, λήφθηκε υπόψη και η συμπεριφορά τους στα μικρότερα μήκη κύματος, καθώς η ανακλαστικότητα σε μικρότερα μήκη κύματος (ορατό και υπεριώδες) δεν είναι επιθυμητή. Οι δύο αυτές μορφές ακτινοβολίας εκμεταλλεύονται σε μεγάλο βαθμό από τα φ/β και είναι επιθυμητή η πλήρης απορρόφησή τους ώστε να επιτυγχάνεται η αποδοτική λειτουργία τους.

Η ανακλαστικότητα της επιφάνειας της νανοεπίστρωσης, όπως αναφέρθηκε, μετρήθηκε από ένα φασματοφωτόμετρο, του οποίου η λειτουργία περιγράφεται στην συνέχεια. Η αρχή λειτουργίας του περιγράφεται στην *εικόνα 2.1.1*.



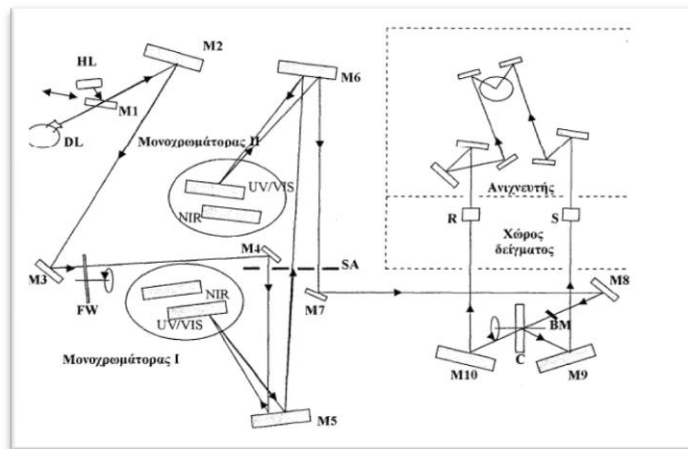
**Εικόνα 2.1.1:** Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του φασματοφωτομέτρου, όπου διακρίνεται η πρόσπτωση της δέσμης (I), η ανάκλαση (R) και η διαπερατότητα (T).

Η σχηματική αναπαράσταση του οπτικού συστήματος φαίνεται στην *εικόνα 2.1.2*. Ως πηγές ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται μια λάμπα δευτερίου (DL) και μία αλογόνου (HL), ώστε να καλυφθεί όλο το φάσμα των μηκών κύματος, από το εγγύς υπέρυθρο (NIR), το ορατό (VIS) έως το υπεριώδες (UV).

Για τη λειτουργία του οργάνου στο εγγύς υπέρυθρο και στο ορατό φάσμα, ο καθρέπτης M1 ανακλά την ακτινοβολία από τη λάμπα αλογόνου στον καθρέπτη M2, ενώ ταυτόχρονα

εμποδίζει τη διέλευση της ακτινοβολίας από τη λάμπα δευτερίου. Για λειτουργία στο υπεριώδες, ο καθρέπτης M1 μετατοπίζεται κατάλληλα και ο M2 ανακλά την ακτινοβολία από τη λάμπα δευτερίου.

Οι δύο μονοχρωμάτορες της διάταξης αποτελούνται από δύο φράγματα, τα οποία επιλέγονται αυτόματα, με βάση το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



**Εικόνα 2.1.2:** Σχηματική αναπαράσταση της οπτικής διάταξης του φασματοφωτομέτρου.

Με την εγκατάσταση ενός ειδικού εξαρτήματος (specular reflectance accessory) στο χώρο του δείγματος, είναι δυνατό να μετρηθεί η ανακλαστικότητα της επιφάνειας του υμενίου.

Η υδροφιλικότητα μετράται με το όργανο που φαίνεται στην *εικόνα 2.1.3*. Με τη βοήθεια του οργάνου υπολογίζεται η γωνία επαφής της σταγόνας νερού που προσπίπτει πάνω στην επικαλυμμένη με το δείγμα επιφάνεια του υάλου και της επιφάνειας πρόσπτωσης. Η σταγόνα αφήνεται από μια μικροσύριγγα, όπως φαίνεται και στην *εικόνα*. Η κάμερα που βρίσκεται τοποθετημένη απέναντι από τη βάση που βρίσκεται το δείγμα αποτυπώνει την χρονική στιγμή πρόσπτωσης της σταγόνας στην επιφάνεια και στέλνει την εικόνα στον συνδεδεμένο Η/Υ, όπου μέσω ειδικού λογισμικού υπολογίζεται η γωνία επαφής και οπτικά αλλά και ποσοτικά.



*Εικόνα 2.1.3: Όργανο με το οποίο εξετάζεται η υδροφιλικότητα της επιφάνειας.*

## Αντιστατικότητα

Η τελευταία επέμβαση για την βελτίωση του υλικού είναι η μετατροπή της επιφάνειας, στην οποία εφαρμόζεται το υλικό, σε αντιστατική. Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση της αγωγιμότητας της επιφάνειας. Συνήθως χρησιμοποιούνται οξείδια, όπως  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και άλλα μεταλλικά οξείδια. Έγινε μια αναζήτηση δειγμάτων-εμπορικών προϊόντων. Τα προϊόντα που χρησιμοποιήθηκαν δεν θα αναφερθούν με την εμπορική τους ονομασία.

Τα εμπορικά προϊόντα I και II περιέχουν οξείδια του Πυριτίου, Μαγνησίου, Λιθίου, Φωσφόρου και Νατρίου. Προετοιμάστηκαν δέκα δείγματα των 100 g, εκ των οποίων το καθένα περιείχε το αρχικό διάλυμα και τα παραπάνω εμπορικά προϊόντα σε διάφορες συγκεντρώσεις. Τα τελικά δείγματα περιείχαν τα εμπορικά προϊόντα I και II σε συγκεντρώσεις 1-5% w/w.

Το προϊόν III διατίθεται στην αγορά ως αντιστατικό και περιέχει τεταρτοταγή άλατα του αμμωνίου. Προετοιμάστηκαν πέντε δείγματα των 100 g, τα οποία περιείχαν το αρχικό διάλυμα του υλικού (SurfaShield G) και το προϊόν III σε διάφορες συγκεντρώσεις.

Τα παραπάνω δείγματα εφαρμόστηκαν σε υάλους εργαστηρίου με τη βοήθεια του ψεκαστικού Tornador και έπειτα εξετάστηκε πώς επηρεάζεται η διαπερατότητα του υάλου, η υδροφιλικότητα της επιφάνειας αλλά και η φωτοκαταλυτική δραστηριότητα του αρχικού υλικού

κατόπι της προσθήκης των προϊόντων που αναφέρθηκαν. Η διαπερατότητα και η υδροφιλικότητα μετρήθηκαν από τα όργανα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Για να εξεταστεί καλύτερα η αντιστατική ιδιότητα του υπάρχοντος υλικού αλλά και για να αποδειχθεί εάν θα πρέπει να βελτιωθεί η υπάρχουσα ιδιότητα, δείγματα υάλων επικαλυμμένα με την αρχική υπάρχουσα επίστρωση αλλά και με την βελτιωμένη (προϊόν Ι σε ποσοστό 3% w/w) αφέθηκαν σε εξωτερικό βιομηχανικό χώρο (Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου) εκτεθειμένα για περίπου ένα μήνα. Μόνο το μισό μέρος από το κάθε δείγμα υάλου ήταν επικαλυμμένο. Το άλλο αφηνόταν ανέπαφο, ώστε να είναι δυνατή η μεταξύ τους σύγκριση. Κατά τη διάρκεια αυτού του μήνα, πρέπει να σημειωθεί ότι υπήρξε βροχόπτωση. Το ίδιο ακριβώς πείραμα έγινε και με τεχνητό τρόπο. Κατά το τεχνητό τεστ, αποτέθηκε τεχνητά σκόνη ίδιων ιδιοτήτων (κοκκομετρία, βάρος, μέγεθος) και ίδιας ποσότητας.

## 2.2. Εφαρμογή Προϊόντος σε Φ/β Πλαίσιο

Στη βιβλιογραφική επισκόπηση έγινε μια αναφορά στην επίδραση της σκόνης και της ρύπανσης στην απόδοση και λειτουργία των φ/β. Οι ερευνητές που ασχολήθηκαν με την μελέτη αυτή απέδειξαν ότι η απόθεση σκόνης και ακαθαρσιών στην επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών μειώνει δραματικά τη διαπερατότητα τους και κατ' επέκταση την απόδοσή τους. Γι' αυτό το λόγο, η παρούσα μελέτη διεξήχθη με σκοπό την έρευνα της επίδρασης της αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης πάνω στην επιφάνεια των φ/β. Η αυτοκαθαριζόμενη επίστρωση έχει περιγραφεί στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο και αποτελεί ένα εμπορικό προϊόν της εταιρείας NanoPhos A.E.

### Τόπος διεξαγωγής πειραματικής διαδικασίας

Η έρευνα διεξήχθη στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο του Λαυρίου. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται κατά κύριο λόγο από δύο φ/β πλαίσια, τα οποία είναι εκτεθειμένα σε φυσικό περιβάλλον. Ο χώρος εγκατάστασης χαρακτηρίζεται από αυξημένα επίπεδα σκόνης και ρύπανσης, καθώς είναι ένας χώρος βιομηχανικός και πρέπει να επισημανθεί ότι παλαιότερα ήταν τόπος εξόρυξης αργυρομολυβδούχων μεταλλευμάτων.



**Εικόνα 2.2.1:** Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου. Τόπος εγκατάστασης των φ/β πλαισίων.

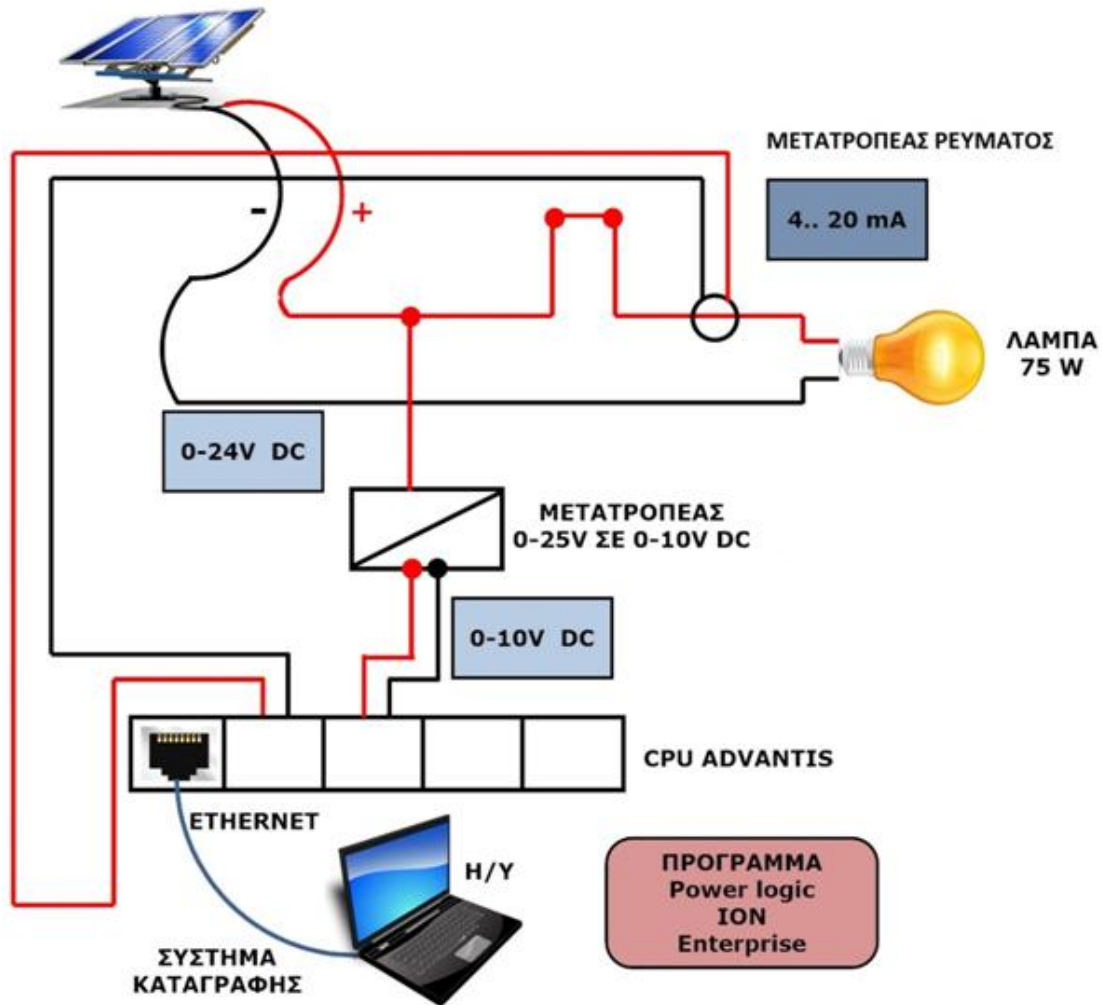
### Χαρακτηριστικά φ/β πλαισίων

Τα δύο πλαίσια είναι της εταιρείας Sunrise Solartech. Τα δύο πλαίσια είναι πανομοιότυπα, το μοντέλο τους είναι το SRM-80P και είναι μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα χαρακτηριστικά των δύο πλαισίων είναι τα εξής:

- Αριθμός κελιών: 36
- Διαστάσεις κελιού: 125×125 (mm)
- $P_m$ : 80 (W)
- $V_m$ : 17.8 (V)
- $I_m$ : 4.49 (A)
- $V_{oc}$ : 21.6 (V)
- $I_{sc}$ : 4.91 (A)
- Μάζα πλαισίου: 9.2 (kg)
- Διαστάσεις πλαισίου: 1195×535×35 (mm)

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στη *εικόνα 2.2.2*. Σύμφωνα με τη παρακάτω διάταξη, το ρεύμα και η τάση που παράγονται από το φ/β πλαίσιο περνούν από ένα μετατροπέα ρεύματος και τάσης. Στη συνέχεια, τα δεδομένα της έντασης και της τάσης (μετρήσεις ανά λεπτό) συλλέγονται στο σύστημα συλλογής (CPU ADVANTIS) και καταγράφονται στον Η/Υ μέσω του προγράμματος Power Logic ION Enterprise. Έχει τοποθετηθεί μια λάμπα πυρακτώσεως 75 W στο κλειστό κύκλωμα για αποφυγή βραχυκυκλώματος.





Εικόνα 2.2.2: Πειραματική διάταξη φ/β πλαισίων.



**Εικόνα 2.2.3:** Φ/β πλαίσια πειραματικής διάταξης.

Το δεξιό πλαίσιο είναι το πλαίσιο υπ' αριθμόν 2 και το αριστερό πλαίσιο είναι το υπ' αριθμόν 1.

### Εγκατάσταση φ/β πλαισίων και βαθμονόμηση

Η εγκατάσταση των φ/β πλαισίων πραγματοποιήθηκε στις 15/03/12 στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο του Λαυρίου στο ενεργειακά αυτόνομο κτίριο που ανήκει στην σχολή των Μηχανικών Μεταλλείων και Μεταλλουργών Ε.Μ.Π. Τα φ/β καθαρίστηκαν προσεχτικά και παρέμειναν εκτεθειμένα για τρεις μήνες περίπου (έως 31/05/12), ώστε να γίνει βαθμονόμηση και να υπολογιστεί η ονομαστική διαφορά της ισχύος τους ( $\Delta P_{ref}$ ), παρόλο που τα φ/β πλαίσια λειτουργούν κάτω από τις ίδιες συνθήκες και είναι κατασκευαστικά πανομοιότυπα. Η ονομαστική διαφορά προέκυψε από τον μέσο όρο των ημερήσιων διαφορών ισχύος που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης. Η μέση ημερήσια διαφορά της ισχύος τους προέκυψε από τις στιγμιαίες τιμές της διαφοράς κατά τη διάρκεια της κάθε ημέρας. Οι στιγμιαίες τιμές της διαφοράς ισχύος που συμπεριελήφθησαν στον υπολογισμό της μέσης ημερήσια διαφοράς αντιστοιχούσαν στο εύρος των γωνιών πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας που υπολογίστηκε. Συγκεκριμένα, η μέση ημερήσια διαφορά της ισχύος υπολογίστηκε από το σύνολο των στιγμιαίων διαφορών ισχύος, ( $\Delta P_m$ ) που αντιστοιχούσαν σε γωνίες πρόσπτωσης μικρότερες των  $40^\circ$  πριν το ηλιακό μεσημέρι και μικρότερες των  $85^\circ$  μετά το ηλιακό μεσημέρι.

## Σύστημα καταγραφής μετρήσεων

Οι μετρήσεις καταγράφονται ημερήσια και ανά λεπτό. Είναι διαθέσιμες on line στην ιστοσελίδα [www.labmet.ntua.gr/NanoPhos](http://www.labmet.ntua.gr/NanoPhos). Τα μετεωρολογικά μεγέθη μετρώνται από ένα μετεωρολογικό σταθμό τύπου Davis Vantage Pro2 που είναι εγκατεστημένος 50 m από τα εγκαταστημένα πλαίσια.

Τα μεγέθη που μετρώνται είναι τα εξής:

1. Εξωτερική θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )
2. Άμεση ακτινοβολία ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
3. Σχετική υγρασία (%)
4. UV ακτινοβολία
5. Ταχύτητα ανέμου ( $\text{m}/\text{s}$ )
6. Διεύθυνση ανέμου (deg)
7. Παραγόμενη ισχύς των δύο πλαισίων (W)
8. Τάση (V)
9. Ένταση (A)
10. Παραγόμενη ενέργεια (Wh)

Για την πρόσβαση των δεδομένων μέσω της παραπάνω ιστοσελίδας απαιτείται η σύνδεση (login) τοποθετώντας όνομα χρήστη (username) και κωδικό (password). Η ηλεκτρονική μορφή αποθήκευσης των δεδομένων επελέγη λόγω της ευκολίας που προσφέρεται όσον αφορά την πρόσβαση στα δεδομένα αλλά και λόγους ασφάλειας.

Photovoltaic monitoring

User Name:  
ctseemeli

Password:  
\*\*\*\*\*

Log In

Developed by Laboratory Of Metallurgy - National Technical University of Athens  
Author: Lampros Karalis

**Εικόνα 2.2.4:** Σύνδεση στην ιστοσελίδα με το προσωπικό μου λογαριασμό.

Έπειτα από την επιτυχή είσοδο στο σύστημα, εμφανίζεται η αρχική ιστοσελίδα όπου παρουσιάζονται οι στιγμιαίες μετρήσεις των μεγεθών και ανανεώνονται κάθε λεπτό. Μ' αυτό το τρόπο, είναι δυνατή η παρακολούθηση του συστήματος όποτε είναι επιθυμητό και επίσης είναι δυνατή η άμεση παρατήρηση τυχόν τεχνικού προβλήματος και κατ' επέκταση η άμεση επιδιόρθωση του (εικόνα 2.2.5.).

## Photovoltaic monitoring

Home Historical Data Excel exports Change Password Logout

| Panel Characteristics  |   |
|------------------------|---|
| Manufacturer           | <a href="#">Sunrise Solartech Co., Ltd.</a> |
| Model Type             | SRM-80P                                     |
| Installed Panels       | 2   |
| Number Of Cells        | 36  |
| Cell Dimension (mm)    | 125x125                                     |
| Max System Voltage (V) | DC700                                       |
| Pm(W)                  | 80  |
| Vm(V)                  | 17.8  |
| Im(A)                  | 4.49  |
| Voc(V)                 | 21.6  |
| Isc(A)                 | 4.91  |
| Module Net Weight(kg)  | 9.2   |
| Module Size(mm)        | 1197x535x35                                 |

| Weather data               |             |
|----------------------------|-------------|
| Outside Temperature (C):   | 9,94        |
| DewPoint (C):              | 6,67        |
| Low Wind Chill (C):        | 10,00       |
| Heat Index (C):            | 10,00       |
| THSW Index (C):            | 8,89        |
| Solar Radiation (W/m2):    | 0           |
| HI Solar Radiation (W/m2): | 0           |
| UV:                        | ,00         |
| HIUV:                      | ,00         |
| Humidity (%):              | 79          |
| Wind Speed (km/h):         | ,00         |
| Wind Direction (deg):      | 0           |
| Hi Wind Speed (km/h):      | ,00         |
| Hi Wind Direction (deg):   | 255         |
| RainCollectorType          | 2           |
| RainCollectorInc           | 0,003937008 |
| TotalRainClicks            | 0           |
| HIRainRate                 | 0           |
| IntervalIndex:             | 0           |

Last Update: 22/12/2012 12:13:00 mp

| Panel 1 Readings   |           |
|--------------------|-----------|
| Power (W):         | 0,00      |
| Total Energy (Wh): | 100975,96 |
| Current (A):       | 0,09      |
| Voltage (V):       | 0,00      |

| Panel 2 Readings   |           |
|--------------------|-----------|
| Power (W):         | 0,00      |
| Total Energy (Wh): | 106379,49 |
| Current (A):       | 0,13      |
| Voltage (V):       | 0,00      |

Last Update: 21/1/2013 1:17:00 mp

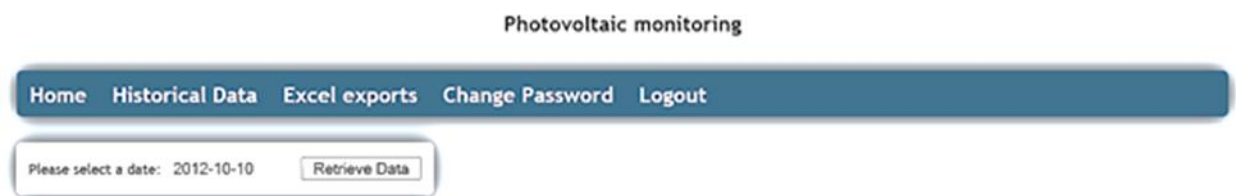
Developed by Laboratory Of Metallurgy - National Technical University of Athens  
Author: Lampros Karalis

**Εικόνα 2.2.5:** Αρχική ιστοσελίδα καταγραφής των δεδομένων.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.2.5., τα δεδομένα στην αρχική σελίδα καταγράφονται και ανανεώνονται ανά λεπτό. Υπάρχει, όμως, και η επιλογή Historical Data, όπου τα δεδομένα

είναι συγκεντρωμένα και ομαδοποιημένα ανά ημέρα. Η διαδικασία που ακολουθείται παρουσιάζεται στα παρακάτω βήματα και τις παρακάτω εικόνες.

**Βήμα 1<sup>ο</sup>** : Επιλογή του Historical Data από το μενού επιλογών του ιστοτόπου.



**Εικόνα 2.2.6:** Επιλογή Historical Data.

**Βήμα 2<sup>ο</sup>** : Επιλογή για την εμφάνιση των δεδομένων της ημέρας που επιθυμείται.

Photovoltaic monitoring

Home Historical Data Excel exports Change Password Logout

Please select a date: 2012-10-10

**Εικόνα 2.2.7:** Επιλογή ημερομηνίας (π.χ. 10 Οκτωβρίου 2012).

**Βήμα 3<sup>ο</sup>** : Επιλογή Retrieve Data και τα δεδομένα της επιλεγμένης ημέρας παρουσιάζονται ανά λεπτό.

**Photovoltaic monitoring**

Home Historical Data Excel exports Change Password Logout

Please select a date: 2012-10-10

| Time Stamp | Temp  | Humidity | Rain | UV   | Solar Radiation | Wind Speed | Wind Direction | Panel 1 Power | Panel 1 Current | Panel 1 Voltage | Panel 1 Energy | Panel 2 Power | Panel 2 Current | Panel 2 Volt | Panel 2 Energy |
|------------|-------|----------|------|------|-----------------|------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|--------------|----------------|
| 00:00      | 20,61 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 5,00       | 0,00           | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:01      | 20,61 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 2,00       | 0,00           | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:02      | 20,61 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 3,00       | 0,00           | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:03      | 20,61 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 2,00       | 0,00           | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:04      | 20,61 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 4,00       | 0,00           | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:05      | 20,61 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 4,00       | 15,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:06      | 20,61 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 1,00       | 14,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:07      | 20,61 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 2,00       | 0,00           | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:08      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 7,00       | 0,00           | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:09      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 2,00       | 13,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:10      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 1,00       | 13,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:11      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 3,00       | 13,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:12      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 0,00       | 14,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:13      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 2,00       | 0,00           | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,14            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:14      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 2,00       | 12,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:15      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 3,00       | 15,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:16      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 4,00       | 15,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:17      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 4,00       | 15,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:18      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 4,00       | 0,00           | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:19      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 2,00       | 0,00           | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:20      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 1,00       | 12,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:21      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 2,00       | 12,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |
| 00:22      | 20,67 | 71,00    | 0,00 | 0,00 | 0,00            | 5,00       | 15,00          | 0,00          | 0,06            | 0,00            | 81.638,37      | 0,00          | 0,13            | 0,00         | 88.797,43      |

*Εικόνα 2.2.8: Στιγμιότυπο ημερήσιας καταγραφής δεδομένων.*

Επιπλέον, τα δεδομένα κάθε ημέρας είναι διαθέσιμα και σε μορφή excel, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους. Η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω.















**Βήμα 1<sup>ο</sup>** : Επιλέγουμε από το μενού την επιλογή Excel Exports.



## Photovoltaic monitoring

Home Historical Data Excel exports Change Password Logout

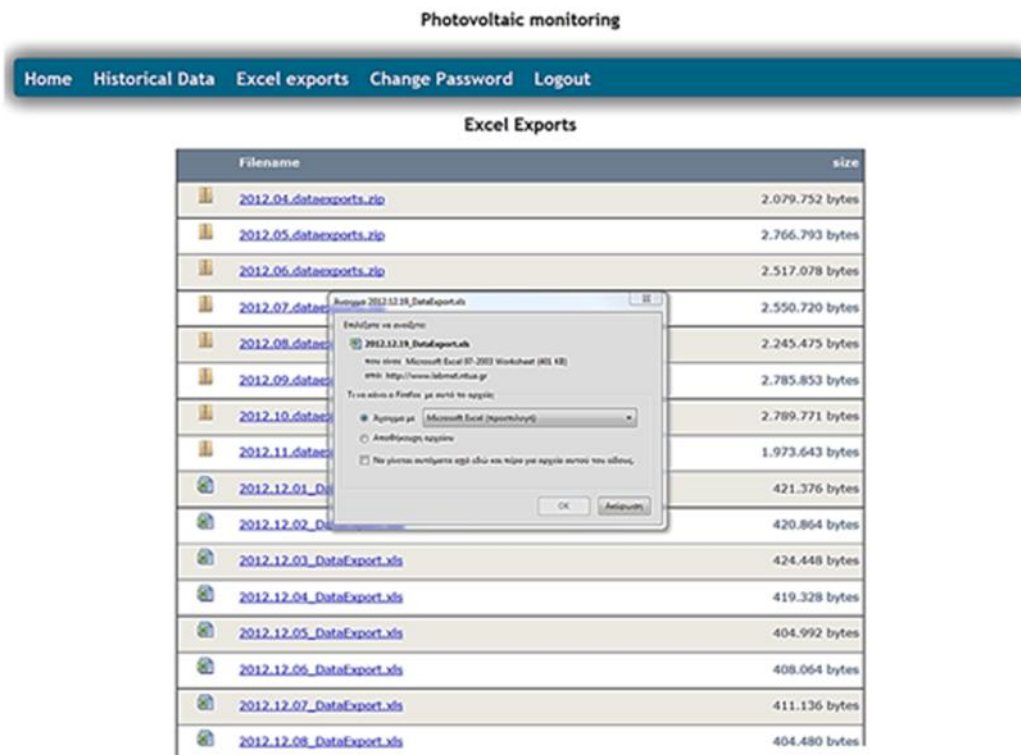
## Excel Exports

| Filename  | size            |
|---|-----------------|
|  <a href="#">2012.04.dataexports.zip</a>     | 2.079.752 bytes |
|  <a href="#">2012.05.dataexports.zip</a>     | 2.766.793 bytes |
|  <a href="#">2012.06.dataexports.zip</a>     | 2.517.078 bytes |
|  <a href="#">2012.07.dataexports.zip</a>     | 2.550.720 bytes |
|  <a href="#">2012.08.dataexports.zip</a>     | 2.245.475 bytes |
|  <a href="#">2012.09.dataexports.zip</a>     | 2.785.853 bytes |
|  <a href="#">2012.10.dataexports.zip</a>     | 2.789.771 bytes |
|  <a href="#">2012.11.dataexports.zip</a>     | 1.973.643 bytes |
|  <a href="#">2012.12.01_DataExport.xls</a>   | 421.376 bytes   |
|  <a href="#">2012.12.02_DataExport.xls</a>   | 420.864 bytes   |
|  <a href="#">2012.12.03_DataExport.xls</a>   | 424.448 bytes   |
|  <a href="#">2012.12.04_DataExport.xls</a>   | 419.328 bytes   |
|  <a href="#">2012.12.05_DataExport.xls</a>   | 404.992 bytes   |
|  <a href="#">2012.12.06_DataExport.xls</a> | 408.064 bytes   |
|  <a href="#">2012.12.07_DataExport.xls</a> | 411.136 bytes   |
|  <a href="#">2012.12.08_DataExport.xls</a> | 404.480 bytes   |

*Εικόνα 2.2.9: Τα δεδομένα βρίσκονται συγκεντρωμένα σε αρχεία excel.*

Παρατηρείται ότι υπάρχουν φάκελοι που αντιστοιχούν σε κάθε μήνα. Ο κάθε φάκελος περιέχει τόσα αρχεία excel όσες είναι και οι ημέρες του μηνός. Για τον τρέχοντα μήνα τα αρχεία excel δεν βρίσκονται οργανωμένα σε φάκελο αλλά είναι διαθέσιμα άμεσα προς επεξεργασία.

**Βήμα 2<sup>ο</sup>:** Επιλογή εμφάνισης δεδομένων συγκεκριμένης ημέρας με απλό αριστερό κλικ και το αρχείο excel είναι διαθέσιμο προς επεξεργασία.



*Εικόνα 2.2.10: Άνοιγμα αρχείου excel μιας ημέρας π.χ. 08/12/12.*

**Βήμα 3<sup>ο</sup>:** Μετά το άνοιγμα του αρχείου όλα τα δεδομένα είναι στη διάθεση μας και έτοιμα προς επεξεργασία. Το κάθε αρχείο excel περιέχει ένα φύλλο εργασίας το οποίο αποτελείται από 16 στήλες και 1441 γραμμές. Οι πρώτες οκτώ στήλες αναφέρονται σε μετεωρολογικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα: η πρώτη στήλη είναι η ώρα ανά λεπτό, η δεύτερη η εξωτερική θερμοκρασία, η τρίτη είναι η σχετική υγρασία, η τέταρτη η βροχόπτωση, η πέμπτη η UV ακτινοβολία, η έκτη η ακτινοβολία, η έβδομη και όγδοη η ταχύτητα και η διεύθυνση του αέρα. Οι υπόλοιπες είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη των πλαισίων και συγκεκριμένα: ισχύς, ρεύμα, τάση και ενέργεια του πλαισίου 1 και ακολουθούν και οι αντίστοιχες τιμές για το πλαίσιο 2. Μια τυπική εικόνα ενός αρχείου excel παρουσιάζεται στην *εικόνα 2.2.11*.

| 1  | Time Stamp            | Temp     | Humidity | Rain     | UV | Solar Radiation | Wind Speed | Wind Direction | Panel 1 Power | Panel 1 Current | Panel 1 Voltage | Panel 1 Energy | Panel 2 Power | Panel 2 Current | Panel 2 Volt | Panel 2 Energy |
|----|-----------------------|----------|----------|----------|----|-----------------|------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------|--------------|----------------|
| 2  | 14/6/2012 12:00:00 πμ | 31.05556 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 4          | 8              | 0             | 0.063281        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.121875        | 0            | 36969.95       |
| 3  | 14/6/2012 12:01:00 πμ | 31.05556 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 3          | 8              | 0             | 0.0625          | 0               | 35762.89       | 0             | 0.123438        | 0            | 36969.95       |
| 4  | 14/6/2012 12:02:00 πμ | 31.05556 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 8          | 9              | 0             | 0.059375        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.127344        | 0            | 36969.95       |
| 5  | 14/6/2012 12:03:00 πμ | 31.11111 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 6          | 12             | 0             | 0.060156        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.121875        | 0            | 36969.95       |
| 6  | 14/6/2012 12:04:00 πμ | 31.11111 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 4          | 11             | 0             | 0.060938        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.121875        | 0            | 36969.95       |
| 7  | 14/6/2012 12:05:00 πμ | 31.16667 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 5          | 12             | 0             | 0.060156        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.121875        | 0            | 36969.95       |
| 8  | 14/6/2012 12:06:00 πμ | 31.16667 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 7          | 9              | 0             | 0.059375        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.123438        | 0            | 36969.95       |
| 9  | 14/6/2012 12:07:00 πμ | 31.16667 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 5          | 9              | 0             | 0.060938        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.122656        | 0            | 36969.95       |
| 10 | 14/6/2012 12:08:00 πμ | 31.16667 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 5          | 13             | 0             | 0.059375        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.123438        | 0            | 36969.95       |
| 11 | 14/6/2012 12:09:00 πμ | 31.16667 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 6          | 11             | 0             | 0.060156        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.122656        | 0            | 36969.95       |
| 12 | 14/6/2012 12:10:00 πμ | 31.16667 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 3          | 8              | 0             | 0.061719        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.125781        | 0            | 36969.95       |
| 13 | 14/6/2012 12:11:00 πμ | 31.11111 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 6          | 9              | 0             | 0.059375        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.121875        | 0            | 36969.95       |
| 14 | 14/6/2012 12:12:00 πμ | 31.11111 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 8          | 12             | 0             | 0.060156        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.122656        | 0            | 36969.95       |
| 15 | 14/6/2012 12:13:00 πμ | 31.11111 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 8          | 11             | 0             | 0.058594        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.123438        | 0            | 36969.95       |
| 16 | 14/6/2012 12:14:00 πμ | 31.11111 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 9          | 12             | 0             | 0.058594        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.122656        | 0            | 36969.95       |
| 17 | 14/6/2012 12:15:00 πμ | 31.05556 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 9          | 10             | 0             | 0.059375        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.126563        | 0            | 36969.95       |
| 18 | 14/6/2012 12:16:00 πμ | 31.05556 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 4          | 10             | 0             | 0.059375        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.122656        | 0            | 36969.95       |
| 19 | 14/6/2012 12:17:00 πμ | 31.05556 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 5          | 11             | 0             | 0.060156        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.123438        | 0            | 36969.95       |
| 20 | 14/6/2012 12:18:00 πμ | 31.05556 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 7          | 11             | 0             | 0.060156        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.128906        | 0            | 36969.95       |
| 21 | 14/6/2012 12:19:00 πμ | 31.11111 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 3          | 12             | 0             | 0.059375        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.122656        | 0            | 36969.95       |
| 22 | 14/6/2012 12:20:00 πμ | 31.05556 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 7          | 11             | 0             | 0.057813        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.123438        | 0            | 36969.95       |
| 23 | 14/6/2012 12:21:00 πμ | 31.05556 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 4          | 8              | 0             | 0.055469        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.121875        | 0            | 36969.95       |
| 24 | 14/6/2012 12:22:00 πμ | 31.05556 | 30       | 0.003937 | 0  | 0               | 7          | 9              | 0             | 0.058594        | 0               | 35762.89       | 0             | 0.123438        | 0            | 36969.95       |

Εικόνα 2.2.11: Μορφή καταγραφής δεδομένων σε αρχείο excel μιας τυχαίας μέρας.

## Εφαρμογή της αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης (SurfaShield G)

Την 1η Ιουνίου 2012 τα δύο φ/β πλαίσια καθαρίστηκαν προσεχτικά με απιονισμένο νερό και έγινε η εφαρμογή του προϊόντος στην επιφάνεια του πλαισίου 2. Η εφαρμογή έγινε με τη βοήθεια του ψεκαστικού Tornador, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 1. Το πλαίσιο 1 έμεινε ανέπαφο, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση της λειτουργίας των δύο πλαισίων και μ' αυτό το τρόπο να γίνει φανερή η επίδραση της επίστρωσης στη λειτουργία των φ/β.

## Επεξεργασία των μετρήσεων

Από την στιγμή της εφαρμογής και μετά υπολογίστηκε καθημερινά η διαφορά επί τοις εκατό στην παραγόμενη ισχύ των δύο φ/β από την 1<sup>η</sup> Ιουνίου έως την 21<sup>η</sup> Δεκεμβρίου. Αυτή η διαφορά αφαιρείται κάθε φορά από την ονομαστική διαφορά των πλαισίων ( $\Delta P_{ref}$ ), ώστε να προκύψει η μέση καθαρή ημερήσια διαφορά της ισχύος ( $\Delta P_d$ ). Η  $\Delta P_d$  αποδίδεται καθαρά στην επίδραση της επίστρωσης, αφού έχει γίνει η εξής λογική παραδοχή ότι οποιαδήποτε διαφορά που παρατηρείται στη λειτουργία των πλαισίων αποδίδεται στην ύπαρξη του υλικού, καθώς οι συνθήκες λειτουργίας τους είναι ίδιες (ακτινοβολία, θερμοκρασία, κτλ.) και τα φ/β

είναι κατασκευαστικά πανομοιότυπα. Επίσης, υπολογίστηκε για κάθε ημέρα μετά την εφαρμογή η μέση ημερήσια ακτινοβολία και βρέθηκε το πώς επηρεάζεται η  $\Delta P_d$  από αυτήν.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποτέλεσε η μελέτη της κατανομής της στιγμιαίας διαφοράς της ισχύος των δύο πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μελέτηθηκε για δύο ημέρες που εμφάνισαν τη μέγιστη μέση ημερήσια ισχύ. Ο λόγος που εξετάστηκαν δύο ημέρες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές στην μέση ημερήσια διαφορά της ισχύος, είναι ότι η μία ήταν μια ηλιόλουστη ημέρα ενώ η άλλη ήταν μια συννεφιασμένη ημέρα. Οι δύο μέρες που επελέγησαν, επίσης, και συγκρίθηκαν μεταξύ τους είναι οι 17/06/12 και 26/08/12. Όπως, παρατηρείται η πρώτη ημέρα είναι λίγο μετά την εφαρμογή, όπου τα πλαίσια δεν έχουν επιβαρυνθεί με σκόνη και η δεύτερη είναι τρεις μήνες σχεδόν μετά, όπου έχει περάσει ένα ξηρό καλοκαίρι και η επίδραση της σκόνης γίνεται φανερή.

Τις πρώτες ημέρες οι επιφάνειες και των δύο πλαισίων ήταν εξίσου καθαρές. Συγκρίθηκε για τρεις ημέρες στην αρχή της εφαρμογής η μέση ημερήσια διαφορά ισχύος,  $\Delta P_d$ , των δύο φ/β πλαισίων με σκοπό να παρατηρηθεί η διαφορά της παραγόμενης ισχύος τους όταν δεν λαμβάνει χώρα η επίδραση της σκόνης. Αυτό έγινε με σκοπό να υπολογιστεί κατά πόσο αυξάνεται η παραγωγή της ισχύος από την αύξηση της διαπερατότητας της επιφάνειας που προσφέρει το προϊόν στην επιφάνεια του πλαισίου 2.

Επιπλέον, επελέγησαν δύο ημέρες, εκ των οποίων η μία ήταν προτού γίνει η εφαρμογή της επίστρωσης και η άλλη αναφερόταν μετά την εφαρμογή της. Βάσει αυτών των τυχαίων ημερών, εξετάστηκε η συμπεριφορά της διαφορά ισχύος συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας πριν και μετά το ηλιακό μεσημέρι. Έγινε σύγκριση στην συμπεριφορά της διαφοράς της ισχύος των δύο ημερών όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι περίπου ίση με  $40^\circ$  (πριν το ηλιακό μεσημέρι-νωρίς το πρωί) και όταν είναι περίπου ίση με  $85^\circ$  (αργά το απόγευμα). Ουσιαστικά, μελετήθηκε η διαφορά της ισχύος των δύο πλαισίων την στιγμή που ξεκινούν τα πλαίσια να παράγουν ισχύ μέσα στην ημέρα και την στιγμή που σταματούν πριν και μετά την εφαρμογή του προϊόντος.

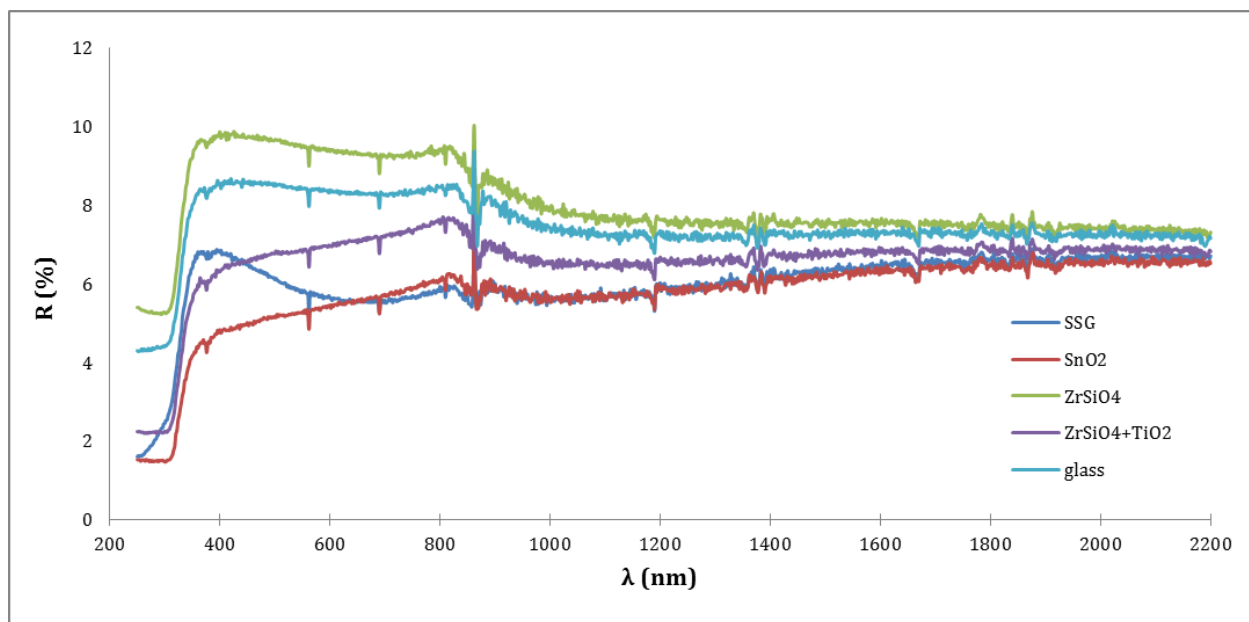
Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια οικονομοτεχνική μελέτη με σκοπό την σύγκριση δύο φ/β συστημάτων που αποτελούνται ουσιαστικά από το φ/β πλαίσιο 1 και 2, αντίστοιχα και υπολογίστηκε και η απόσβεση του προϊόντος μετά από την εφαρμογή του σε φ/β πλαίσιο.

## 3. Αποτελέσματα

### 3.1. Βελτίωση του προϊόντος

Ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο

Κατασκευάστηκε το παρακάτω διάγραμμα που παρουσιάζει τα φάσματα της ανακλαστικότητας που λήφθηκαν από τα δείγματα που είχαν δοκιμαστεί.



**Εικόνα 3.1.1:** Φάσμα ανακλαστικότητας των τριών πρώτων δειγμάτων που δοκιμάστηκαν, του SSG και του απλού γυαλιού.

Παρατηρείται ότι τα δείγματα που περιείχαν τις ουσίες  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZrSiO}_4$  εμφανίζουν μεγαλύτερη ανακλαστικότητα στο υπέρυθρο απ' ό τι το SurfaShield G. Η διαφορά, όπως φαίνεται, δεν είναι αισθητά μεγαλύτερη. Ο λόγος που οδήγησε στο να μη γίνει δεκτή η προσθήκη αυτών των ουσιών είναι εξαιτίας της ανακλαστικότητας που εμφανίζουν και στο ορατό. Η ανακλαστικότητα στο ορατό δεν είναι επιθυμητή γιατί είναι ακτινοβολία μήκους κύματος που εκμεταλλεύεται πλήρως το φ/β κελί.

## Αντιστατικότητα

Για την ενίσχυση της αντιστατικότητας χρησιμοποιήθηκαν τα εμπορικά προϊόντα που περιγράφησαν στη Μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα αποτελέσματα απ' αυτή την έρευνα εξετάστηκαν συναρτήσει των άλλων ιδιοτήτων του υλικού (υδροφιλικότητα, καταλυτική δραστηριότητα, διαπερατότητα) αλλά και κατά πόσο εμφάνιζαν συμβατότητα με το αρχικό διάλυμα.

### 1. Συμβατότητα με το αρχικό διάλυμα

*Εμπορικό Προϊόν I:* Δεν παρατηρήθηκε καθίζηση των στερεών  $TiO_2$  μέχρι ποσοστό συγκέντρωσης 3% w/w στο τελικό διάλυμα. Σε μεγαλύτερα ποσοστά συγκεντρώσεων (4-5 % w/w) παρατηρήθηκε καθίζηση λόγω της μεγάλης ηλεκτρικής φόρτισης του εναιωρήματος.

*Εμπορικό Προϊόν II:* Σ' όλες τις συγκεντρώσεις που δοκιμάστηκε η προσθήκη του στο αρχικό διάλυμα, παρατηρήθηκε η δημιουργία gel και συνεπώς δεν υπήρξε καμία συμβατότητα.

*Εμπορικό Προϊόν III:* Παρατηρήθηκε ασυμβατότητα με τα υπόλοιπα συστατικά του προϊόντος.

### 2. Υδροφιλικότητα

Το εμπορικό προϊόν I σε συγκέντρωση 3% w/w στο διάλυμα παρουσιάζει μείωση της υδροφιλικότητας. Η γωνία επαφής είναι ίση με  $25^\circ$  ενώ η γωνία επαφής του αρχικού προϊόντος είναι ίση με  $5^\circ$ .

### 3. Καταλυτική Δραστηριότητα

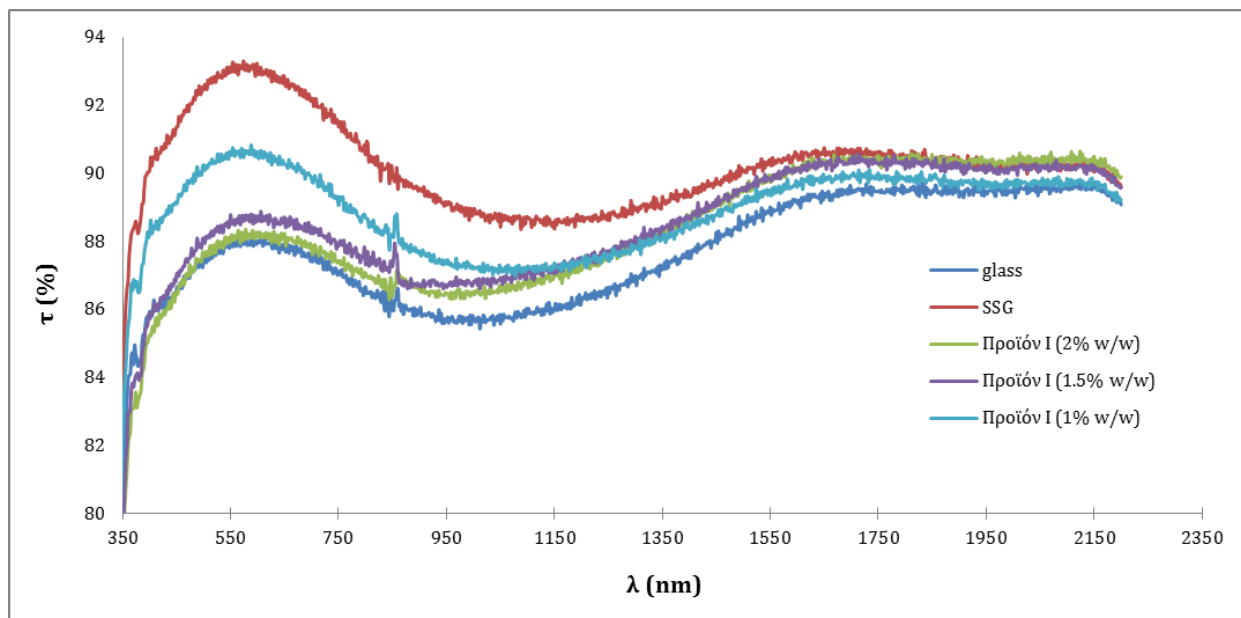
Το εμπορικό προϊόν I σε συγκέντρωση 3% w/w παρουσιάζει μείωση κατά μία τάξη μεγέθους.

### 4. Διαπερατότητα

Κατασκευάστηκε το διάγραμμα που προέκυψε από το φασματοφωτόμετρο έπειτα από την εξέταση των παρακάτω δειγμάτων:

- Απλό δείγμα υάλου

- Δείγμα υάλου επικαλυμμένο με το αρχικό διάλυμα του υλικού (SurfaShield G)
- Δείγμα υάλου επικαλυμμένο με το προϊόν I συγκέντρωσης 1% w/w στο τελικό διάλυμα
- Δείγμα υάλου επικαλυμμένο με το προϊόν I συγκέντρωσης 1.5% w/w στο τελικό διάλυμα
- Δείγμα υάλου επικαλυμμένο με το προϊόν I συγκέντρωσης 2% w/w στο τελικό διάλυμα



*Εικόνα 3.1.2: Φάσμα διαπερατότητας των δειγμάτων που δοκιμάστηκαν.*

Παρατηρείται ότι η διαπερατότητα της επιφάνειας που ήταν επικαλυμμένη με το SSG εμφανίζει την μεγαλύτερη διαπερατότητα. Στις άλλες περιπτώσεις, η διαπερατότητα μειώνεται.

Πραγματοποιήθηκε και ένα φυσικό και τεχνητό τεστ σκόνης, όπου μελετήθηκε η συμπεριφορά του αρχικού υλικού (SurfaShield G) και του προϊόντος I σε συγκέντρωση 3% w/w απέναντι στην σκόνη. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες 3.1.3-6.

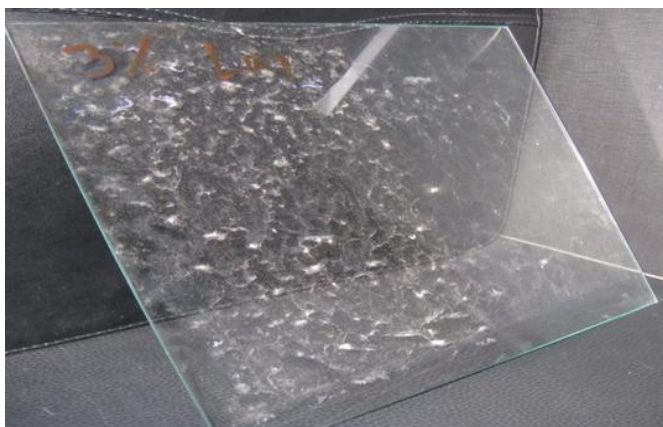
Στις παρακάτω εικόνες το υλικό έχει επιστρωθεί στην δεξιά περιοχή του γυαλιού ενώ η αριστερή περιοχή έχει μείνει ατροποποίητη (γυαλί αναφοράς).





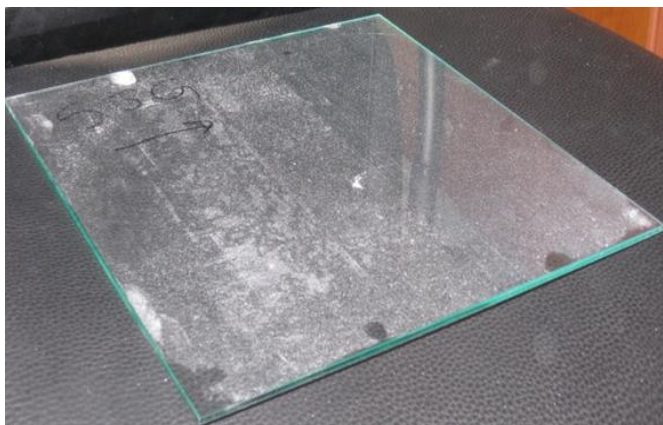
**Εικόνα 3.1.3:** Συμπεριφορά SurfaShield G (αρχικό υλικό) κατά την επίστρωση του σε γυαλί που ήταν εκτεθειμένο για ένα μήνα σε φυσικό περιβάλλον.

Στην εικόνα το υλικό (εμπορικό προϊόν I σε συγκέντρωση 3% w/w) έχει επιστρωθεί και πάλι στη δεξιά περιοχή του γυαλιού ενώ η αριστερή έχει μείνει ανέπαφη.

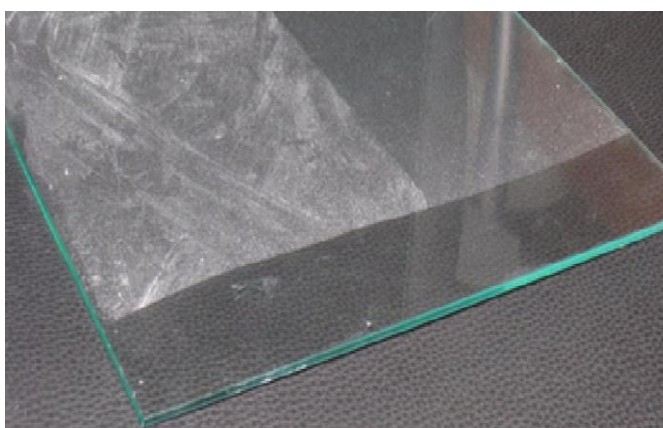


**Εικόνα 3.1.4:** Συμπεριφορά εμπορικού προϊόντος I σε συγκέντρωση 3% w/w κατά την επίστρωση του σε γυαλί που ήταν εκτεθειμένο για ένα μήνα σε φυσικό περιβάλλον.

Στις εικόνες 3.1.6-7, φαίνονται τα αποτελέσματα έπειτα από το τεχνητό τεστ σκόνης που πραγματοποιήθηκε. Και πάλι η δεξιά περιοχή του γυαλιού είναι επικαλυμμένη ενώ η αριστερή έχει μείνει ανέπαφη.



**Εικόνα 3.1.5:** Συμπεριφορά SurfaShield G (αρχικό υλικό) κατά την επίστρωση του σε γυαλί έπειτα από τεχνητή απόθεση σκόνης στην επιφάνεια του.



**Εικόνα 3.1.6:** Συμπεριφορά εμπορικού προϊόντος I σε συγκέντρωση 3% w/w κατά την επίστρωση του σε γυαλί έπειτα από τεχνητή απόθεση σκόνης στην επιφάνεια του.

Τα αποτελέσματα της έρευνας σχετικά με την βελτίωση του αρχικού προϊόντος μεμονωμένα ήταν επιθυμητά. Στο σύνολο τους, όμως, δεν ήταν ικανοποιητικά. Με τη βελτίωση μιας ιδιότητας, επηρεαζόταν μια άλλη ιδιότητα του υλικού.

Για παράδειγμα, με την ενίσχυση της ανακλαστικότητας στο υπέρυθρο προσθέτοντας  $ZrSiO_4$ , μειωνόταν η διαπερατότητα σε μικρότερα μήκη κύματος. Η ακτινοβολία μικρότερων μηκών κύματος εκμεταλλεύεται πλήρως από τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Συνεπώς, η επέμβαση αυτή δεν επέφερε επιθυμητά αποτελέσματα. Η προσπάθεια ενίσχυσης της αντιστατικότητας, απ'

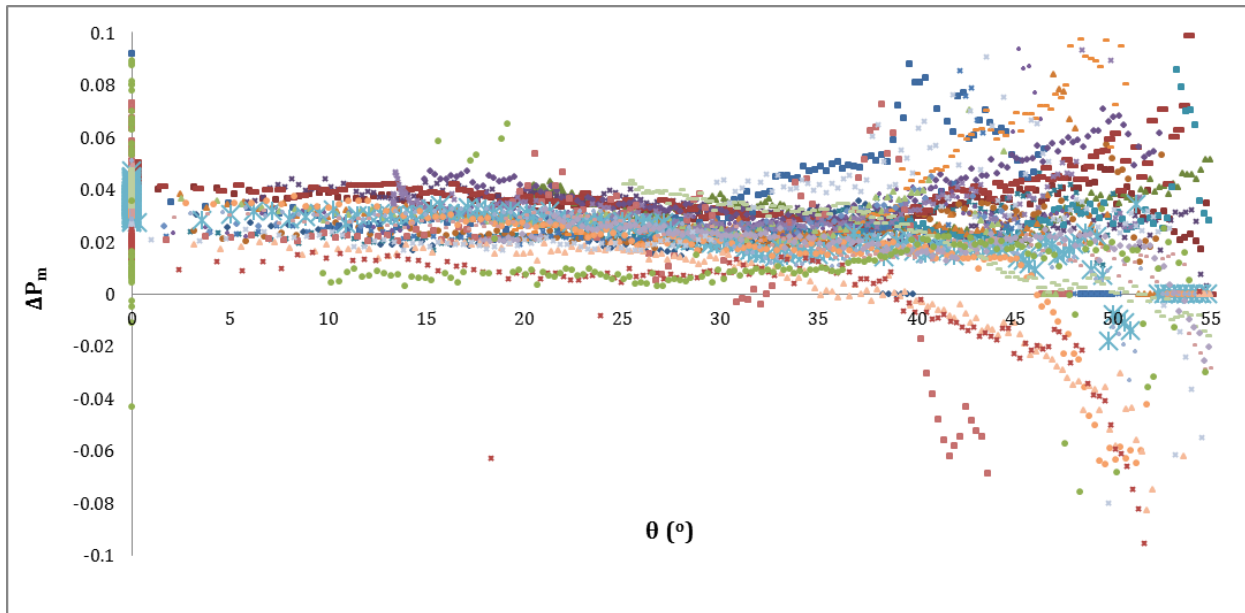
την άλλη, με το προϊόν I είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά οδηγούσε σε μείωση της διαπερατότητας και σε δραματική μείωση της υδροφιλικότητας. Γι' αυτό το λόγο τελικά, διατηρήθηκε η φόρμουλα του αρχικού προϊόντος.

## 3.2. Βαθμονόμηση Φ/β Πλαισίων

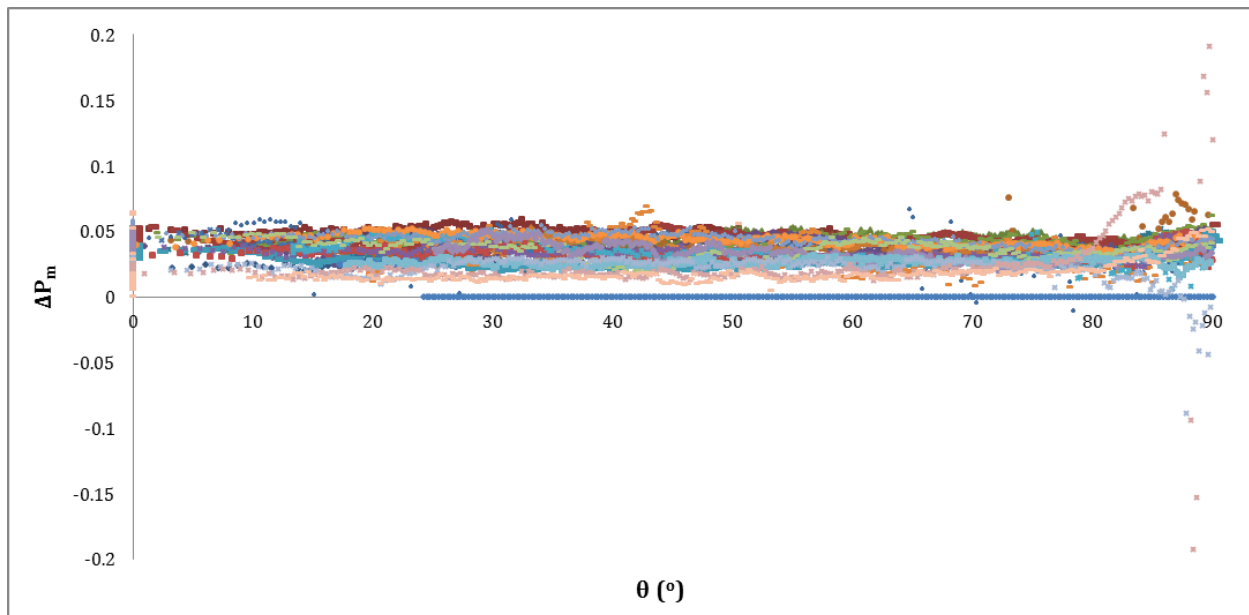
Πριν την εφαρμογή της νανο-επίστρωσης στην επιφάνεια του φ/β πλαισίου 2 (08/04/12-31/05/12) έγινε βαθμονόμηση των δύο φ/β πλαισίων και υπολογίστηκε ο μέσος όρος της διαφοράς της παραγόμενης ισχύος ( $\Delta P_{ref}$ ) τους. Τα δύο πλαίσια είναι πανομοιότυπα κατασκευαστικά, ήταν εκτεθειμένα το ίδιο χρονικό διάστημα και οι συνθήκες έκθεσης ήταν ακριβώς οι ίδιες.

Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, όμως, παρατηρήθηκε ότι το ποσοστό της μέσης ημερήσιας διαφοράς ισχύος δεν ήταν σταθερό και υπήρχαν διακυμάνσεις. Αυτό γινόταν γιατί τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες υπήρχαν σκιάσεις σε ένα απ' τα δύο φ/β πλαίσια κάθε φορά. Η χρονική στιγμή που παρατηρείτο το φαινόμενο δεν ήταν κάθε μέρα η ίδια. Δεν ήταν δυνατό, δηλαδή, να ληφθεί ο ημερήσιος μέσος όρος των στιγμιαίων ανά λεπτό διαφορών της ισχύος μεταξύ των πλαισίων λόγω του παραπάνω φαινομένου.

Γι' αυτό το λόγο, υπολογίστηκε η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) για κάθε λεπτό της εκάστοτε ημέρας και κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα για κάθε ημέρα της βαθμονόμησης. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν την διαφορά της παραγομένης ισχύος συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. Με τη βοήθεια των διαγραμμάτων έγινε φανερό το εύρος των γωνιών πρόσπτωσης στο οποίο κανένα από τα δύο πλαίσια δε σκιάζονται και υπολογίστηκε χωρίς αποκλίσεις το πραγματικό ημερήσιο ποσοστό της διαφοράς της παραγόμενης ισχύος.



**Εικόνα 3.2.1:** Διαφορά παραγόμενης ισχύος των δύο πλαισίων κατά τις πρωινές ώρες.



**Εικόνα 3.2.2:** Διαφορά παραγόμενης ισχύος των δύο πλαισίων κατά τις απογευματινές ώρες.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι τις πρωινές ώρες για γωνίες μεγαλύτερες των  $40^\circ$  η διαφορά της παραγόμενης ισχύος λαμβάνει είτε πολύ μεγαλύτερες τιμές και αυτό

σημαίνει ότι σ' αυτές τις γωνίες το πλαίσιο 1 υστερεί στην παραγωγή ισχύος έναντι του δεύτερου είτε αρνητικές τιμές που συμβαίνει το αντίθετο. Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και από το διάγραμμα που παρουσιάζει την σχέση της γωνίας πρόσπτωσης με την διαφορά της ισχύος των δύο πλαισίων και φαίνεται ότι για γωνίες μεγαλύτερες των  $85^\circ$  η διαφορά εκτοξεύεται σε πολύ μεγάλες τιμές.

Το ποσοστό διαφοράς της στιγμιαίας παραγόμενης ισχύος προκύπτει από της εξής σχέση :

$$\Delta P_m (\%) = \frac{P_{m2} - P_{m1}}{P_{m1}} \times 100 \quad (3.2.1)$$

Όπου,  $P_{m1} (W)$ ,  $P_{m2} (W)$  είναι η στιγμιαία παραγόμενη ισχύ του panel 1 και 2, αντίστοιχα.

Η γωνία πρόσπτωσης υπολογίστηκε ως εξής:

1. Αρχικά, υπολογίστηκε ο ηλιακός χρόνος. Η σχέση που συνδέει τον τοπικό χρόνο (χρόνος που μετράει το ρολόι) με τον ηλιακό είναι ο εξής:

$$\text{ηλιακός χρόνος} = t_{\rho\sigma\lambda} \pm 4(L_{st} - L_{oc}) + E \quad (3.2.2)$$

$L_{st}$ : Γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος. Για την Ελλάδα είναι ίσος με  $30^\circ$ .

$L_{oc}$ : Γεωγραφικό μήκος παρατηρητή. Το γεωγραφικό μήκος του Λαυρίου είναι ίσο με  $23.58^\circ$ .

$E$ : Η εξίσωση του χρόνου που λαμβάνεται για κάθε ημέρα του έτους.

Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E (\text{min}) = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (3.2.3)$$

Όπου,  $B = 360(n - 81)/364$  και  $n$  η ημέρα του έτους ( $n = 1$  για την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου).

Η σχέση ισχύει με + για τα δυτικά μήκη και με - για τα ανατολικά μήκη. Ο συντελεστής 4 εκφράζει min/μοίρες.

- Υπολογίστηκε η ωριαία γωνία. Η τιμή της στις 12 μ.μ. είναι ίση με  $0^\circ$  και μεταβάλλεται κατά  $0.25^\circ$  ανά λεπτό από το ηλιακό μεσημέρι. Λαμβάνεται ως θετική για μ.μ. και αρνητική για π.μ.
- Βρέθηκε η ηλιακή απόκλιση για κάθε ημέρα της βαθμονόμησης από την εξίσωση

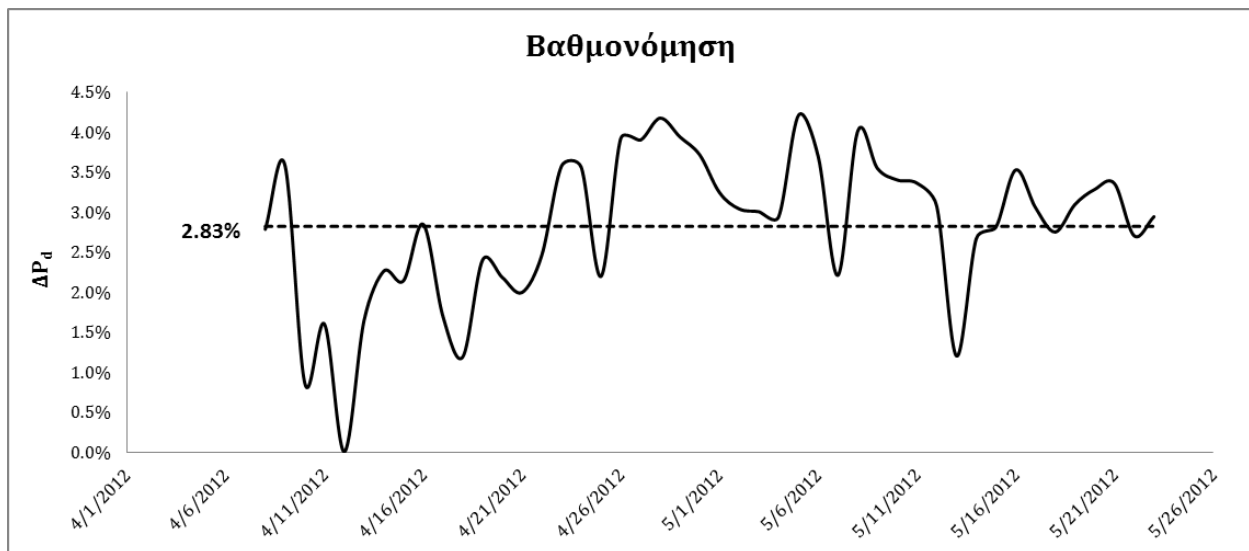
$$\delta = 23.45 \sin \frac{360 (284+n)}{365} \quad (3.2.4)$$

- Τέλος, η γωνία πρόσπτωσης σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\cos\theta = \cos(\varphi - \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\varphi - \beta) \sin\delta \quad (3.2.5)$$

Όπου  $\varphi$  είναι ίσο με  $37.7^\circ$ ,  $\beta$  είναι κλίση της επιφάνειας που είναι ίση με  $29^\circ$  και  $\gamma$  είναι  $0^\circ$  για προσανατολισμό στο Νότο.

Έπειτα από την παραπάνω διαδικασία λήφθηκαν οι μέσες ημερήσιες τιμές της διαφοράς της παραγόμενης ισχύος των δύο πλαισίων και στην συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος όλης της περιόδου της βαθμονόμησης και βρέθηκε ίσος με 2.83%. Το ποσοστό αυτό θα λαμβάνεται από δω και στο εξής ως η διαφορά αναφοράς της παραγόμενης ισχύος των δύο πλαισίων και θα αφαιρείται κάθε φορά από το αντίστοιχο ποσοστό διαφοράς που θα εμφανίζουν τα δύο πλαίσια στην παραγόμενη από αυτά ισχύ.



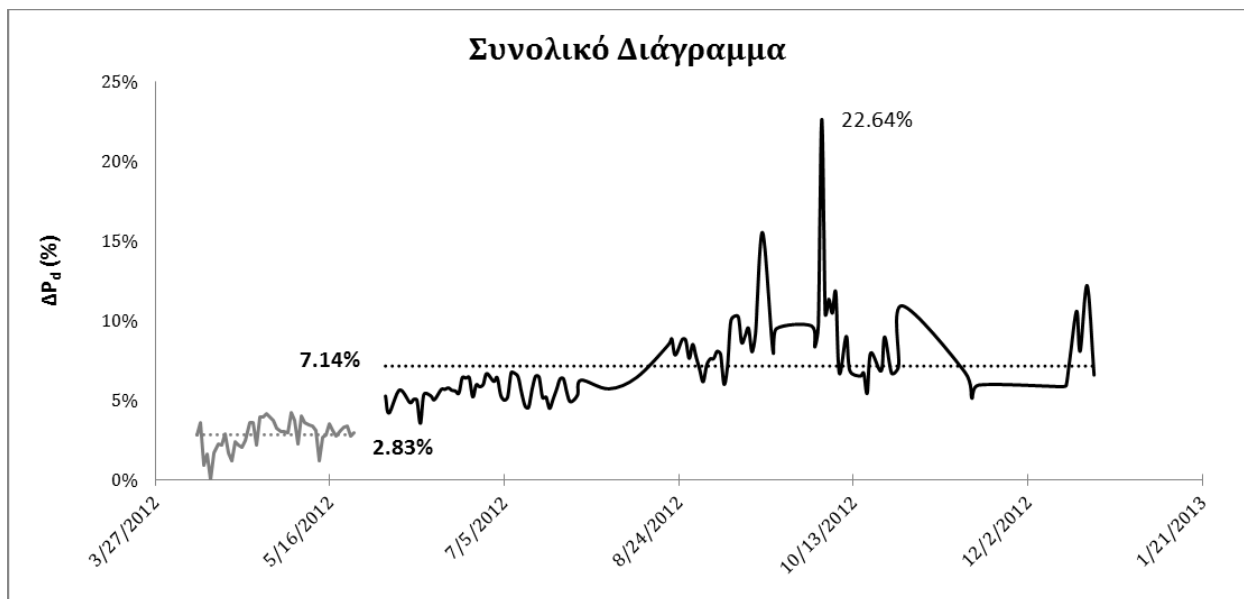
**Εικόνα 3.2.3:** Διαφορά της παραγόμενης ισχύος των δύο πλαισίων κατά την περίοδο βαθμονόμησης τους.

### 3.3. Εφαρμογή της αυτοκαθαριζόμενης επίστρωσης

#### Μέση Ημερήσια Διαφορά Παραγόμενης Ισχύος

Από την πρώτη ημέρα εφαρμογής της επίστρωσης (1<sup>η</sup> Ιουνίου) και έπειτα υπολογίζεται καθημερινά η μέση διαφορά της παραγομένης ισχύος των δύο πλαισίων ( $\Delta P_d$ ). Η διαφορά αυτή που παρατηρείται αφαιρούμενη από την αντίστοιχη ονομαστική που υπολογίστηκε κατά τη βαθμονόμηση οφείλεται καθαρά στην επίδραση της επίστρωσης. Μ' αυτό το τρόπο, φαίνεται αν η επίστρωση επιδρά και πόσο θετικά ή αρνητικά. Η μέση διαφορά προέκυψε από τον υπολογισμό του μέσου όρου των στιγμιαίων διαφορών της παραγόμενης ισχύος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στον υπολογισμό του μέσου όρου έχουν συμπεριληφθεί όλες οι τιμές που αντιστοιχούν σε γωνίες πρόσπτωσης της ακτινοβολίας μικρότερες των 40° για το πρωί και μικρότερες των 85° για το απόγευμα.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέσες ημερήσιες διαφορές της ισχύος που αφορούν όλο το διάστημα της πειραματικής διαδικασίας. Η περίοδος της βαθμονόμησης αντιστοιχεί σε ποσοστό 2.83% ενώ η περίοδος κατά την οποία έγινε η εφαρμογή σε 7.14%.

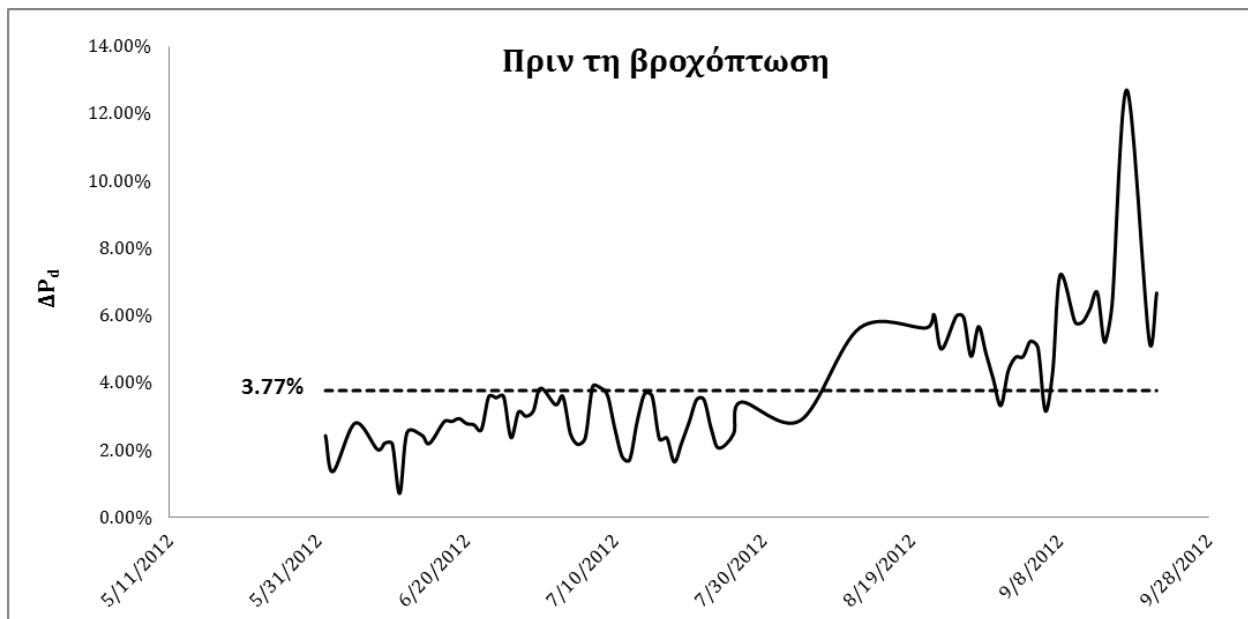


**Εικόνα 3.3.1:** Διάγραμμα απεικόνισης ημερήσιων διαφορών ισχύος στο διάστημα βαθμονόμησης και εφαρμογής.

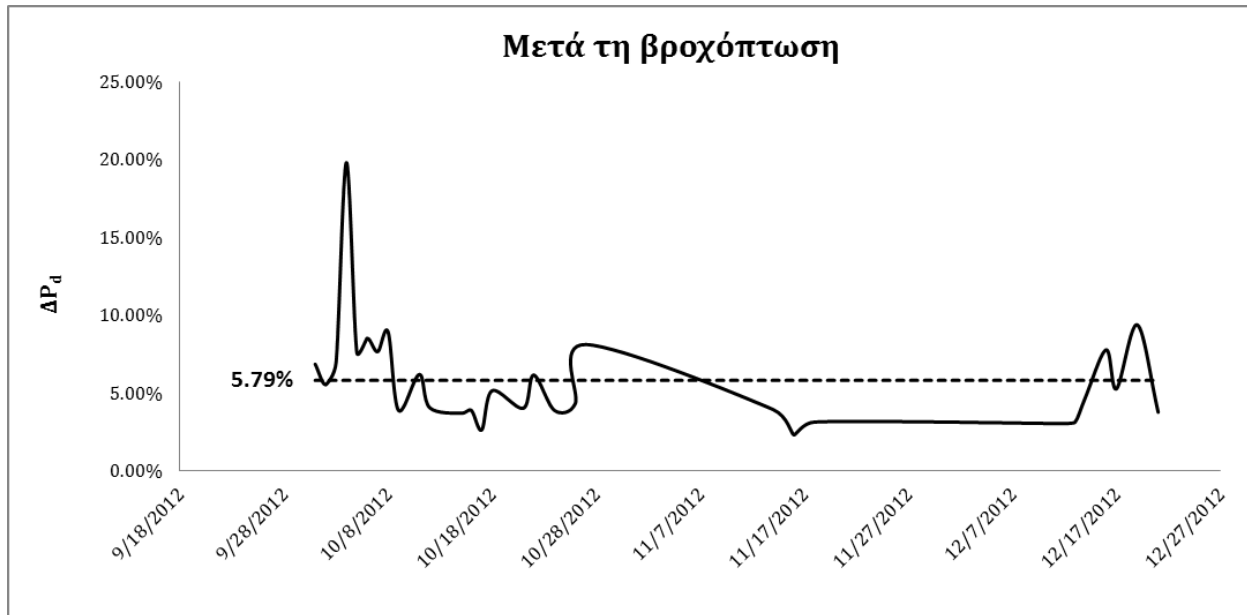


Παρατηρείται ότι από την πρώτη ημέρα εφαρμογής η διαφορά της ημερήσιας παραγόμενης ισχύος αυξάνεται παρόλο που και τα δύο πλαίσια είναι καθαρά. Δηλαδή, δεν οφείλεται στην καθαρότητα αλλά στην αύξηση της διαπερατότητας που προσφέρει το υλικό στην υάλινη επιφάνεια, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Η αύξηση τη διαφοράς ενισχύεται κατά τον Αύγουστο και Σεπτέμβριο, δηλαδή όταν έχουν περάσει 3 μήνες από την εφαρμογή και φαίνεται η επίδραση της σκόνης. Επίσης, παρατηρείται ραγδαία αύξηση τους φθινοπωρινούς μήνες.

Στα παρακάτω διαγράμματα έχουν διακριθεί οι περίοδοι βάσει της πρώτης βροχόπτωσης που παρατηρήθηκε. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα, πριν την βροχόπτωση όπου η επίδραση της σκόνης είναι έντονη η μέση τιμή των ημερησίων μέσων τιμών της ισχύος είναι 3.77%. Μετά τη πρώτη βροχόπτωση, παρατηρείται μια απότομη αύξηση της διαφοράς της παραγόμενης ισχύος και κυμαίνεται περίπου στο 5.79% (μέση τιμή των μέσων ημερησίων διαφορών ισχύος των δύο πλαισίων).



**Εικόνα 3.3.2:** Κατανομή διαφοράς ισχύος πριν την πρώτη βροχόπτωση.

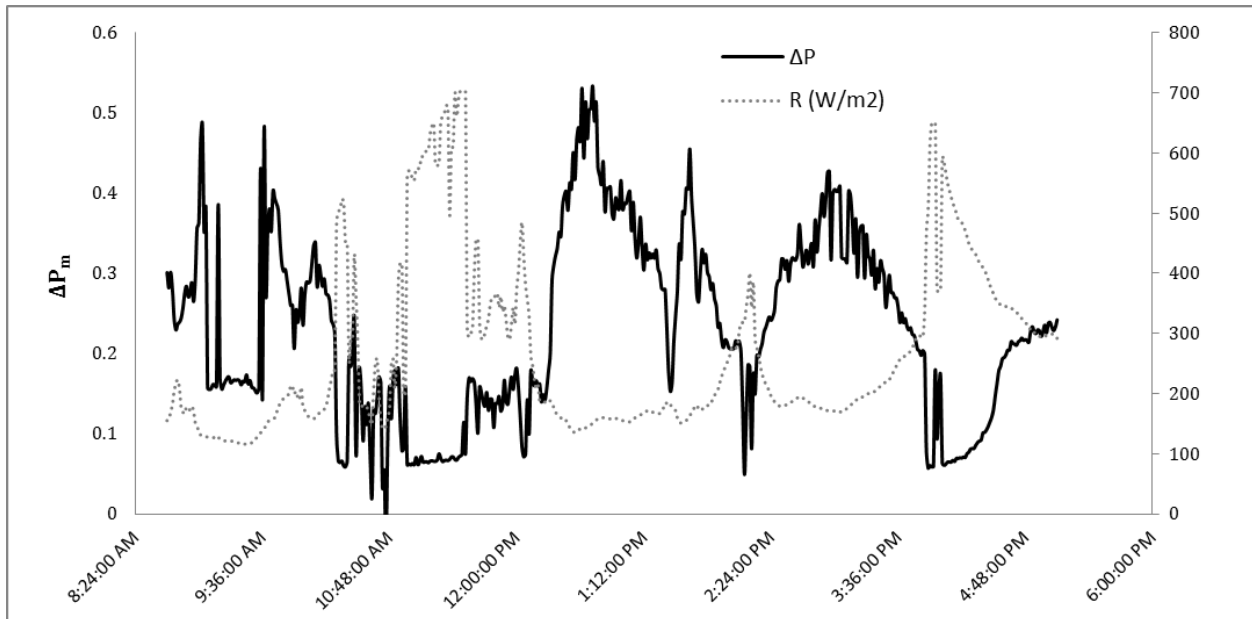


**Εικόνα 3.3.3:** Κατανομή διαφοράς ισχύος μετά την πρώτη βροχόπτωση.

Υπολογισμός διαφοράς της παραγόμενης ισχύος κατά τη διάρκεια της ημέρας,  $\Delta P_m$  (%)

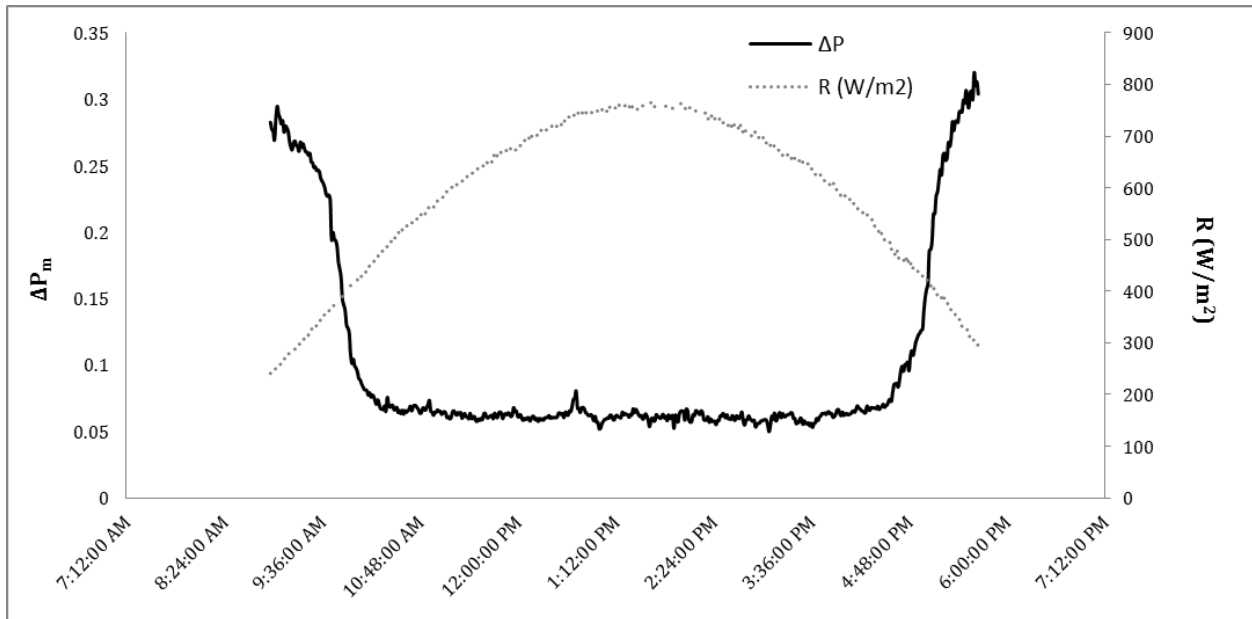
Κατασκευάστηκαν διαγράμματα με σκοπό να εξεταστεί το πως κυμαίνεται η διαφορά της παραγόμενης ισχύος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επελέγησαν ημέρες που εμφάνιζαν υψηλό ποσοστό στη διαφορά της μέσης ημερήσιας διαφοράς ισχύος και ημέρες με χαμηλό ποσοστό. Επίσης, ένα άλλο κριτήριο επιλογής είναι η μέση ημερήσια ακτινοβολία.

Συνεπώς, επελέγη η 4<sup>η</sup> Οκτωβρίου που εμφανίζει υψηλή μέση ημερήσια διαφορά στην παραγόμενη ισχύ (19.81%) και χαμηλή μέση ημερήσια ακτινοβολία (104.86 W/m<sup>2</sup>). Επισημαίνεται ότι η ημέρα αυτή ήταν συννεφιασμένη. Συνεπώς, υπήρχαν διακυμάνσεις στην ακτινοβολία και εξαιτίας της συννεφιάς τα φ/β λειτουργούσαν με τη διάχυτη ακτινοβολία.



**Εικόνα 3.3.4:** Στιγμαία διαφορά ισχύος και ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της 4<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 2012

Η επόμενη ημέρα που επελέγη είναι η 8<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου. Εμφανίζει και αυτή υψηλό ποσοστό στη μέση ημερήσια παραγόμενη ισχύ (10.03%) αλλά είναι μια ηλιόλουστη ημέρα, η τιμή της έντασης της ακτινοβολίας της αγγίζει τα 240.76  $W/m^2$ . Τα αποτελέσματα της ημέρας αυτής αποτυπώνονται στο διάγραμμα της εικόνας 3.3.5.



**Εικόνα 3.3.5:** Στιγμαία διαφορά ισχύος και ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της 8<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2012

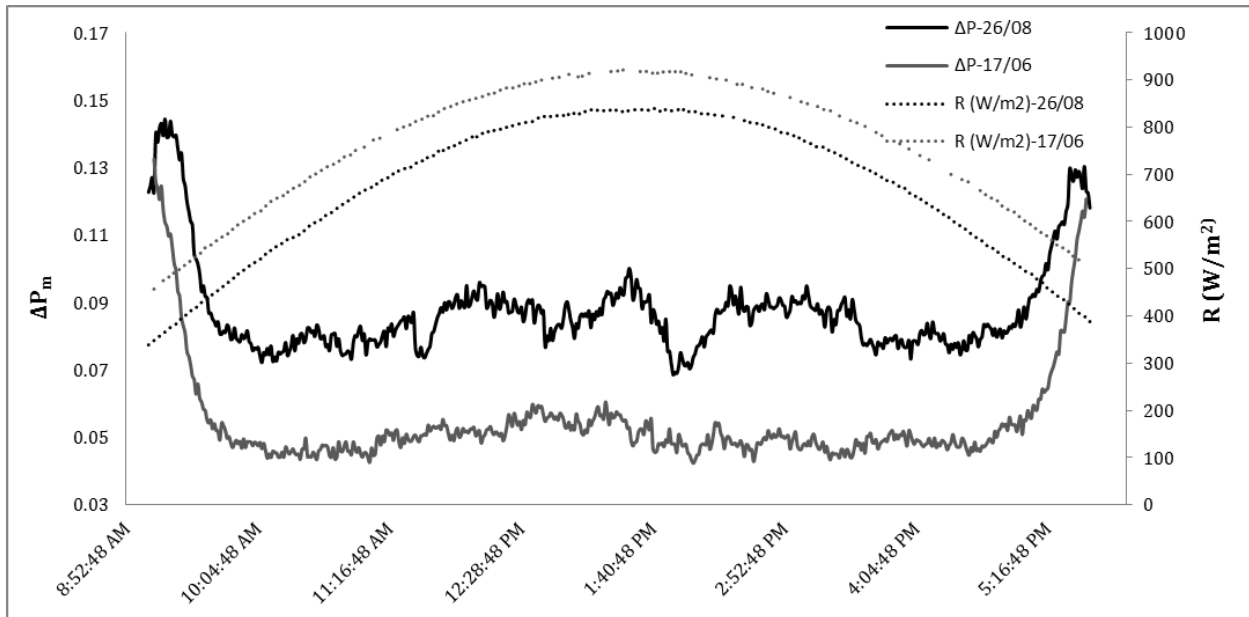
Παρατηρείται ότι στο πρώτο διάγραμμα όπου παρουσιάζεται μια συνεφιασμένη ημέρα, οι διακυμάνσεις είναι μεγαλύτερες στην διαφορά της παραγόμενης ισχύος. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η επίστρωση παρουσιάζει πλεονέκτημα στη διάχυτη ακτινοβολία, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη υποενότητα. Αυτό φυσικά είναι μια υπόθεση, καθώς δεν μετράται η διάχυτη ακτινοβολία. Σε αυτό το διάστημα σημειώθηκε η πρώτη ασθενής βροχή του φθινοπώρου, όπου τα δύο πλαίσια επιβαρύνθηκαν περισσότερο όσον αφορά το επίπεδο σκόνης στην επιφάνειά τους. Τα αποτελέσματα αυτής της βροχής φαίνονται στην *εικόνα 3.3.6*.



**Εικόνα 3.3.6:** Τα δύο πλαίσια μετά από τη πρώτη βροχή. Το αριστερό πλαίσιο είναι το υπ' αριθμόν 1 και το δεξιό το υπ' αριθμόν 2. Το πλαίσιο 2 είναι αυτό που η επιφάνειά έχει επικαλυθεί με την επίστρωση.

Από την εικόνα φαίνεται ξεκάθαρα ότι το πλαίσιο 2 παρουσιάζει περισσότερη καθαρότητα έναντι του 1. Φαίνονται οι δύο απ' τις βασικές ιδιότητες της επίστρωσης. Η μία είναι η αντιστατική συμπεριφορά και η δεύτερη είναι η αυξημένη υδροφιλικότητα της επιφάνειας που ενεργοποιήθηκε από τη βροχόπτωση.

Στη συνέχεια, επελέγησαν δύο ημέρες με ίδια περίπου ένταση ακτινοβολίας, έτσι ώστε η σύγκριση να περιοριστεί στην επίδραση της σκόνης. Οι δύο αυτές ημέρες είναι οι 26/08 και 17/06. Μεταξύ αυτών των ημερομηνιών, δεν έχει σημειωθεί βροχόπτωση και δεν έχουν καθαριστεί τα πλαίσια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα (βλ. εικόνα 3.3.7).



**Εικόνα 3.3.7:** Στιγμαία διαφορά ισχύος και ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της 26<sup>ης</sup> Αυγούστου και 17<sup>ης</sup> Ιουνίου 2012.

Η κατανομή της ακτινοβολίας, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, είναι ίδια και στις δύο ημέρες και έχει περίπου την ίδια τιμή. Συνεπώς, η σύγκριση έγκειται μόνο στα επίπεδα σκόνης που έχουν τα δύο πλαίσια στην επιφάνειά τους. Παρατηρείται μια σαφώς μεγαλύτερη αύξηση της τάξης του 3%. Αυτό δεν οφείλεται, όμως, εξ ολοκλήρου στην αυτοκαθαριζόμενη ιδιότητα της επιστρώσης αλλά και στην αύξηση της διαπερατότητας της επιφάνειας. Δηλαδή, η διαπερατότητα της επιφάνειας του πλαισίου 2 αυξάνεται και λόγω μεγαλύτερης καθαρότητας της επιφάνειας και λόγω της αύξησης που προσφέρει η επιστρώση. Η αύξηση που προσφέρει θα αναλυθεί στην επόμενη υποενότητα.

## Αύξηση της διαπερατότητας της επιφάνειας

Στο κεφάλαιο 1, έγινε αναφορά των ιδιοτήτων της νανο - επίστρωσης και μία από τις ιδιότητες είναι ότι προσδίδει στην επιφάνεια που επικαλύπτει μια αύξηση στη διαπερατότητα της τάξης του 3%. Αυτή η ιδιότητα που μπορεί να προσφέρει η επικάλυψη μπορεί να γίνει φανερή εάν υπολογιστεί η μέση ημερήσια διαφορά ισχύος των δύο πλαισίων κατά τις πρώτες μέρες όπου έγινε η εφαρμογή της επίστρωσης στην επιφάνεια του πλαισίου 2. Αυτό συμβαίνει επειδή οι επιφάνειες και των δύο πλαισίων αυτές τις ημέρες ήταν εξίσου καθαρές. Άρα, οποιαδήποτε διαφορά παρατηρηθεί μπορεί να αποδοθεί στη αντανακλαστική επίστρωση που προστέθηκε στην επιφάνεια του πλαισίου 2. Στον πίνακα 3.1 φαίνεται η διαφορά της παραγόμενης ισχύος των δύο πλαισίων στις 8-10/06/12.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1**

Ημερήσια διαφορά ισχύος (%) των δύο πλαισίων που αποδίδεται στην αύξηση της διαπερατότητας της επιφάνειας του πλαισίου 2 μετά την επικάλυψή της από την νανο-επίστρωση.

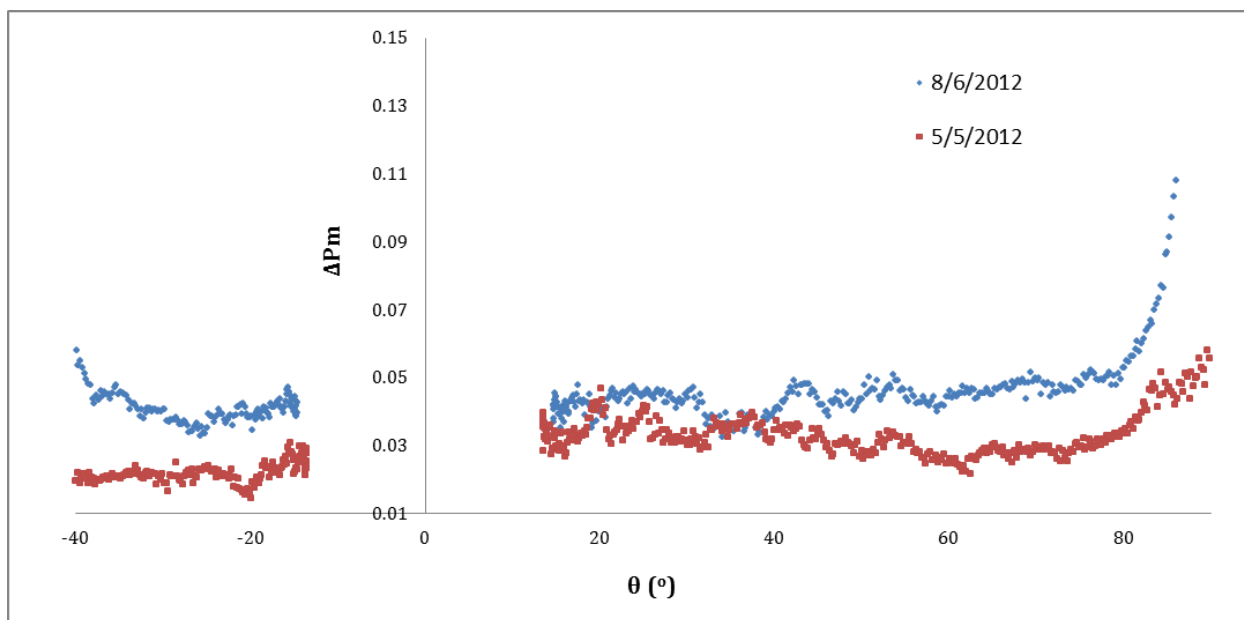
|                         | $\Delta P_d$ (%) | Καθαρή Διαφορά (%) |
|-------------------------|------------------|--------------------|
| 8 <sup>η</sup> Ιουνίου  | 4.85%            | 2.02%              |
| 9 <sup>η</sup> Ιουνίου  | 5.04%            | 2.21%              |
| 10 <sup>η</sup> Ιουνίου | 5.01%            | 2.18%              |

Συνεπώς, η επίστρωση προσφέρει περίπου 2% αύξηση στην παραγόμενη ισχύ λόγω της αύξησης της διαπερατότητας. Αυτή η αύξηση ισχύει και όταν και τα δύο πλαίσια είναι καθαρά. Δηλαδή, ακόμα και σε περιόδους που τα πλαίσια είναι καθαρά και δεν επιδρά η σκόνη, το πλαίσιο 2 θα παράγει κατά 2% περισσότερη ισχύ.

## Γωνία Πρόσπτωσης της Ηλιακής Ακτινοβολίας – Διαφορά Ισχύος

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, μετά την εφαρμογή του προϊόντος, παρατηρήθηκε μια απότομη αύξηση στη διαφορά της παραγόμενης ισχύς κατά τις πρώτες ώρες της ημέρας και στο τέλος της ημέρας. Για την επαλήθευση αυτής της παρατήρησης επελέγησαν δύο τυχαίες ημέρες πριν και μετά την εφαρμογή και κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα (βλ. εικόνες 3.3.8-9).

Τα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται στις ημέρες 5/5/12 (πριν την εφαρμογή) και 8/6/12 (μετά την εφαρμογή). Παρουσιάζουν την στιγμιαία διαφορά στην παραγόμενη ισχύ των δύο πλαισίων συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επελέγη η γωνία πρόσπτωσης γιατί οι ώρες ανατολής και δύσης διαφέρουν στις δύο μέρες ενώ η γωνία είναι ένα αντικειμενικό μέσο σύγκρισης. Το πρώτο διάγραμμα παρουσιάζει την κατανομή της διαφοράς ισχύος το πρωί (έως το ηλιακό μεσημέρι) και το δεύτερο το απόγευμα (μετά το ηλιακό μεσημέρι).



**Εικόνα 3.3.8:** Στιγμαία διαφορά ισχύος κατά τη διάρκεια δύο ημερών πριν και μετά την εφαρμογή συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας πριν και μετά το ηλιακό μεσημέρι.



**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2**

Μέση ημερήσια διαφορά ισχύος, διαφορά ισχύος σε γωνία πρόσπτωσης  $-40^\circ$  και  $85^\circ$  των ημερών 8/6/12 (μετά την εφαρμογή) και 5/5/12 (πριν την εφαρμογή).

|          | $\Delta P_d$ | $\Delta P_{mor} (-40^\circ)$ | $\Delta P_{ev} (85^\circ)$ |
|----------|--------------|------------------------------|----------------------------|
| 8/6/2012 | 4.46%        | 6.51%                        | 10.79%                     |
| 5/5/2012 | 2.94%        | 2.07%                        | 4.22%                      |

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα και από τον πίνακα 3.2, η διαφορά της ισχύος την ημέρα μετά την εφαρμογή αυξάνεται απότομα στην αρχή της ημέρας ( $\theta=-40^\circ$ ) και ακόμα μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στο τέλος της ημέρας ( $\theta=85^\circ$ ). Θα είχε ενδιαφέρον να παρατηρηθεί και η διαφορά της ισχύος σε μεγαλύτερες γωνίες το πρωί αλλά δεν είναι δυνατόν, γιατί, όπως προαναφέρθηκε, το πλαίσιο 1 σε μικρότερες γωνίες των  $-40^\circ$  υστερεί στην παραγωγή ισχύος γιατί πιθανόν υπάρχει σκίαση.

Η διαφορά αυτή που παρατηρείται πιθανό να οφείλεται στην ιδιότητα της επιστρωσης που καθιστά την επιφάνεια λιγότερο ανακλαστική. Οι γωνίες πρόσπτωσης στην αρχή και στο τέλος της ημέρας είναι πολύ μεγάλες και κατ' επέκταση μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται. Γι' αυτό το λόγο, το πλαίσιο 2 ανακλά λιγότερο την ακτινοβολία που προσπίπτει στην αντιανακλαστική επιφάνειά του σε σχέση με το πλαίσιο 1 που η επιφάνειά του δεν έχει επιστρωθεί με το υλικό και είναι κατά 3% περισσότερο ανακλαστική. Επίσης, κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες η διάχυτη ακτινοβολία λαμβάνει μεγάλες τιμές. Συνεπώς, αυτή η συμπεριφορά μπορεί να οφείλεται και πάλι στην αυξημένη απόδοση της επιστρωσης όταν η ακτινοβολία είναι διάχυτη.

## 4. Οικονομοτεχνική Μελέτη

### 4.1. Σύγκριση Φ/β Συστημάτων

Πραγματοποιήθηκε οικονομοτεχνική μελέτη κατά την οποία έγινε σύγκριση δύο φ/β συστημάτων. Το φ/β σύστημα Α αποτελείται από ένα φ/β πλαίσιο και το σύστημα Β από ένα πανομοιότυπο φ/β πλαίσιο με αυτό του συστήματος Α με τη διαφορά ότι η επιφάνειά του είναι επικαλυμμένη με την νανοεπίστρωση που εξετάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια (SurfaShield G-εμπορικό προϊόν εταιρείας NanoPhos A.E.) Τα πλαίσια που απαρτίζουν τα δύο συστήματα είναι στην ουσία αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας διπλωματικής.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να αποδειχθεί με οικονομικούς όρους κατά πόσο η επικάλυψη της επιφάνειας ενός φ/β πλαισίου με το παρόν εμπορικό προϊόν επιδρά στην οικονομικότητα της επένδυσης. Η αφορμή για τη διεξαγωγή αυτής της μελέτης είναι το ότι το φ/β σύστημα Β αποδίδει περισσότερο. Δηλαδή, όπως έχει αποδειχθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, η παραγόμενη ενέργεια του συστήματος Β παρουσιάζει μια αύξηση της τάξης του 4% κατά μέσο όρο από την αντίστοιχη παραγόμενη ενέργεια του συστήματος Α.

Τα δύο συστήματα υποθέτουμε ότι είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο και η τιμή της πώλησης της παραγόμενης kWh ανέρχεται στα 0.25 €. Έχουν εγκατασταθεί στην περιοχή του Λαυρίου. Η κλίση του είναι στις 30 μοίρες (βέλτιστη κλίση) και η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σ' αυτή την κλίση είναι ίση με 1800 kWh/m<sup>2</sup>. Ο χρόνος ζωής τους ανέρχεται στα 25 χρόνια. Για την εξόφληση της εγκατάστασης των συστημάτων υπάρχει δανεισμός σε ποσοστό 50% σε ίσες δόσεις. Η χρονική διάρκεια του δανείου είναι 10 χρόνια.

Τα δεδομένα της μελέτης είναι τα εξής:

- Ετήσια παραγωγή ενέργειας συστήματος Α:  $E_A = 200(kWh/m^2)$ .
- Ετήσια παραγωγή ενέργειας συστήματος Β:  $E_B = 208(kWh/m^2)$ .
- Ετήσια μείωση απόδοσης: 0.8%

- Κόστος συστήματος A ( $C_A$ ): 300 €/m<sup>2</sup>
- Κόστος SurfaShield G: 1.3 €/m<sup>2</sup>
- Κόστος συστήματος B ( $C_B$ ): 301.3 €/m<sup>2</sup>
- Ετήσιος πληθωρισμός (f): 2%
- Ποσοστό δανεισμού: 50%
- Επιτόκιο δανεισμού(i): 8%
- Χρονική διάρκεια δανείου: 10 έτη
- Ποσοστό λειτουργικών εξόδων: 2% του κόστους

Τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται στους πίνακες 4.1 και 4.2.

## ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1

## Οικονομική Ανάλυση Σύστηματος Α

| Έτη | Ενέργεια (kWh) | Τιμή €/kWh | Δόση (€) | Λειτουργικά (€) | Έξοδα (€) | Έσοδα (€) | Κέρδος (€) |
|-----|----------------|------------|----------|-----------------|-----------|-----------|------------|
| 0   |                |            |          |                 | 150       |           | -150.00    |
| 1   | 200            | 0.250      | 22.35    | 6.00            | 28.35     | 50.00     | 21.65      |
| 2   | 198            | 0.251      | 22.35    | 6.12            | 28.47     | 49.85     | 21.37      |
| 3   | 197            | 0.253      | 22.35    | 6.24            | 28.60     | 49.70     | 21.10      |
| 4   | 195            | 0.254      | 22.35    | 6.37            | 28.72     | 49.55     | 20.82      |
| 5   | 194            | 0.255      | 22.35    | 6.49            | 28.85     | 49.39     | 20.55      |
| 6   | 192            | 0.256      | 22.35    | 6.62            | 28.98     | 49.24     | 20.27      |
| 7   | 191            | 0.258      | 22.35    | 6.76            | 29.11     | 49.09     | 19.98      |
| 8   | 189            | 0.259      | 22.35    | 6.89            | 29.25     | 48.95     | 19.70      |
| 9   | 188            | 0.260      | 22.35    | 7.03            | 29.38     | 48.80     | 19.41      |
| 10  | 186            | 0.261      | 22.35    | 7.17            | 29.52     | 48.65     | 19.12      |
| 11  | 185            | 0.263      |          | 7.31            | 7.31      | 48.50     | 41.19      |
| 12  | 183            | 0.264      |          | 7.46            | 7.46      | 48.35     | 40.89      |
| 13  | 182            | 0.265      |          | 7.61            | 7.61      | 48.21     | 40.60      |
| 14  | 180            | 0.267      |          | 7.76            | 7.76      | 48.06     | 40.30      |
| 15  | 179            | 0.268      |          | 7.92            | 7.92      | 47.91     | 40.00      |
| 16  | 177            | 0.269      |          | 8.08            | 8.08      | 47.77     | 39.69      |
| 17  | 176            | 0.271      |          | 8.24            | 8.24      | 47.62     | 39.39      |
| 18  | 174            | 0.272      |          | 8.40            | 8.40      | 47.48     | 39.08      |
| 19  | 173            | 0.273      |          | 8.57            | 8.57      | 47.33     | 38.76      |
| 20  | 172            | 0.275      |          | 8.74            | 8.74      | 47.19     | 38.45      |
| 21  | 170            | 0.276      |          | 8.92            | 8.92      | 47.05     | 38.13      |
| 22  | 169            | 0.278      |          | 9.09            | 9.09      | 46.90     | 37.81      |
| 23  | 168            | 0.279      |          | 9.28            | 9.28      | 46.76     | 37.48      |
| 24  | 166            | 0.280      |          | 9.46            | 9.46      | 46.62     | 37.16      |
| 25  | 165            | 0.282      |          | 9.65            | 9.65      | 46.48     | 36.83      |

## ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2

## Οικονομική Ανάλυση Συστήματος Β

| Έτη | Ενέργεια (kWh) | Τιμή €/kWh | Δόση (€) | Λειτουργικά (€) | Έξοδα (€) | Έσοδα (€) | Κέρδος (€) |
|-----|----------------|------------|----------|-----------------|-----------|-----------|------------|
| 0   |                |            |          |                 | 150.65    |           | -150.65    |
| 1   | 208            | 0.250      | 22.45    | 6.00            | 28.45     | 52.00     | 23.55      |
| 2   | 206            | 0.251      | 22.45    | 6.12            | 28.57     | 51.84     | 23.27      |
| 3   | 205            | 0.253      | 22.45    | 6.24            | 28.69     | 51.68     | 22.99      |
| 4   | 203            | 0.254      | 22.45    | 6.37            | 28.82     | 51.53     | 22.71      |
| 5   | 201            | 0.255      | 22.45    | 6.49            | 28.95     | 51.37     | 22.42      |
| 6   | 200            | 0.256      | 22.45    | 6.62            | 29.08     | 51.21     | 22.14      |
| 7   | 198            | 0.258      | 22.45    | 6.76            | 29.21     | 51.06     | 21.85      |
| 8   | 197            | 0.259      | 22.45    | 6.89            | 29.34     | 50.90     | 21.56      |
| 9   | 195            | 0.260      | 22.45    | 7.03            | 29.48     | 50.75     | 21.27      |
| 10  | 193            | 0.261      | 22.45    | 7.17            | 29.62     | 50.59     | 20.97      |
| 11  | 192            | 0.263      |          | 7.31            | 7.31      | 50.44     | 43.13      |
| 12  | 190            | 0.264      |          | 7.46            | 7.46      | 50.29     | 42.83      |
| 13  | 189            | 0.265      |          | 7.61            | 7.61      | 50.13     | 42.52      |
| 14  | 187            | 0.267      |          | 7.76            | 7.76      | 49.98     | 42.22      |
| 15  | 186            | 0.268      |          | 7.92            | 7.92      | 49.83     | 41.91      |
| 16  | 184            | 0.269      |          | 8.08            | 8.08      | 49.68     | 41.60      |
| 17  | 183            | 0.271      |          | 8.24            | 8.24      | 49.53     | 41.29      |
| 18  | 181            | 0.272      |          | 8.40            | 8.40      | 49.38     | 40.98      |
| 19  | 180            | 0.273      |          | 8.57            | 8.57      | 49.23     | 40.66      |
| 20  | 179            | 0.275      |          | 8.74            | 8.74      | 49.08     | 40.34      |
| 21  | 177            | 0.276      |          | 8.92            | 8.92      | 48.93     | 40.01      |
| 22  | 176            | 0.278      |          | 9.09            | 9.09      | 48.78     | 39.69      |
| 23  | 174            | 0.279      |          | 9.28            | 9.28      | 48.63     | 39.36      |
| 24  | 173            | 0.280      |          | 9.46            | 9.46      | 48.48     | 39.02      |
| 25  | 172            | 0.282      |          | 9.65            | 9.65      | 48.34     | 38.69      |

Οι πίνακες προέκυψαν από τις παρακάτω σχέσεις:

1. Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια υπολογίστηκε ως εξής:

$$E_n = E_{n-1}(1 - 0.8\%), \quad \text{για } 25 \leq n < 1.$$

Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια του Β τον πρώτο χρόνο είναι ίση με 208 kWh, όπως έχουμε από τα δεδομένα. Δηλαδή, κάθε χρόνο η παραγόμενη ενέργεια μειώνεται σε σχέση με την ενέργεια του προηγούμενου έτους κατά 0.8%.

2. Η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο είναι ίση με 0.25 €/kWh. Η τιμή όμως μεταβάλλεται κάθε έτος λόγω του ετήσιου πληθωρισμού(=2%). Έτσι η τιμή για τα επόμενα υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$T_n = T_{n-1}(1 + 25\% \cdot f), \quad \text{για } 25 \leq n < 1.$$

Για  $n = 1$ ,  $T_1 = 0.25 \text{ €/kWh}$ .

3. Η δόση του δανείου είναι η ίδια και τα δέκα χρόνια που διαρκεί ο δανεισμός. Προκύπτει από το επιτόκιο δανεισμού, τη χρονική διάρκεια και το ποσό του δανεισμού (50% του κόστους).
4. Τα λειτουργικά έξοδα, από τα δεδομένα, αποτελούν το 2% του κόστους. Τον πρώτο χρόνο ( $n=1$ ) τα λειτουργικά έξοδα είναι ίσα με:

$$L_1 = 2\% \cdot C_i, \quad \text{όπου } i = A \text{ ή } B$$

Ενώ τα επόμενα έτη είναι ίσα με:

$$L_n = L_{n-1}(1 + f), \quad \text{για } 25 \leq n < 1.$$

5. Τα έξοδα του κάθε συστήματος τη χρονική στιγμή που γίνεται η επένδυση ( $n=0$ ) είναι ίσα με:

$$E_0 = C_i (1 + f), \quad \text{για } 25 \leq n < 1.$$

Τα επόμενα έτη τα έξοδα υπολογίζονται από την εξής σχέση:

$$E_n = L_i + \Delta\delta\sigma\eta, \quad \text{για } 25 \leq n \leq 1.$$

6. Τα έσοδα,  $P_n$ , είναι ίσα με την ετήσια παραγόμενη ενέργεια επί την αντίστοιχη τιμή της ανάλογα στο έτος αναφοράς.
7. Το ετήσιο κέρδος προκύπτει με μια απλή αφαίρεση των εξόδων από τα έσοδα.

Βάσει των παραπάνω πινάκων φαίνεται ότι η απόσβεση του συστήματος A θα γίνει ένα χρόνο μετά από το σύστημα B. Επίσης, το κέρδος (ΚΠΑ) μετά από τα 25 χρόνια είναι μεγαλύτερο για το σύστημα B κατά 18.08 €/m<sup>2</sup>. Δηλαδή, για ένα φ/β πάρκο με εγκατεστημένη ισχύ ίση με 100 kWp που καταλαμβάνει 750 m<sup>2</sup>, η ΚΠΑ ανέρχεται στα 13560 €. Τέλος, παρατηρείται ότι το κέρδος τον πρώτο κιόλας χρόνο του συστήματος B είναι κατα 1.90 €/m<sup>2</sup> περισσότερο από του σύστημα B. Αν εφαρμοστεί το παραπάνω ποσό για το προαναφερθέν φ/β πάρκο, το κέρδος ανέρχεται στα 1425 €.

Στον παρακάτω πίνακα, έχουν υπολογιστεί και δύο οικονομικοί δείκτες για τα δύο συστήματα. Είναι φανερό ότι το σύστημα B είναι οικονομικά αποδοτικότερο.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3**

Οικονομικοί δείκτες αξιολόγησης των δύο επενδύσεων ( $i=8\%$ )

| Οικονομικοί Δείκτες Αξιολόγησης  | Σύστημα A | Σύστημα B |
|----------------------------------|-----------|-----------|
| Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR) | 16%       | 17%       |
| Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV)        | 133.89 €  | 151.97 €  |

## 4.2. Απόσβεση Προϊόντος

Αν υποθεθεί ότι η ημερήσια ενέργεια που παράγεται από 1 m<sup>2</sup> μιας φ/β συστοιχίας είναι περίπου 400 Wh, τότε η ετήσια παραγωγή ενέργειας θα είναι ίση με 146 kWh. Η επίστρωση προσφέρει μια αύξηση 4% στην ετήσια παραγόμενη ενέργεια, άρα 5,84 kWh/m<sup>2</sup> περισσότερη παραγόμενη ενέργεια. Αν η παραγόμενη ενέργεια αγοράζεται από το δίκτυο στην τιμή των 0.25 €/kWh, τότε το κέρδος που θα αποφέρει η επίστρωση θα είναι ίση με 1.46 €/m<sup>2</sup>. Το κόστος αγοράς και εφαρμογής της επίστρωσης ισούται με 1.3 €/m<sup>2</sup>. Στο κόστος συνυπολογίζεται και το κόστος της εφαρμογής. Η εφαρμογή πρέπει να γίνεται από έμπειρο προσωπικό και από ειδικό ψεκαστικό (κεφάλαιο 1). Συνεπώς, η απόσβεσή της θα γίνει σε περίπου 10 μήνες από την εφαρμογή της.



## 5. Συμπεράσματα-Προτάσεις

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία που διεξήχθη, διαπιστώνεται ότι η αυτοκαθαριζόμενη επίστρωση που εφαρμόστηκε στο ένα πλαίσιο της πειραματικής διάταξης προσφέρει συνολικά στο διάστημα που εξετάστηκε μια μέση αύξηση της τάξης του 4% στην παραγόμενη ισχύ.

Πριν την εφαρμογή της επίστρωσης σε φ/β πλαίσιο, είχε γίνει εφαρμογή της επίστρωσης σε απλούς υάλους εργαστηρίου και μετά από την μέτρηση της διαπερατότητας των υάλων παρατηρήθηκε μια αύξηση στη διαπερατότητα της τάξης του 3% (όταν η ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια). Εξετάστηκαν οι πρώτες ημέρες του Ιουνίου, όπου και τα δυο πλαίσια ήταν εξίσου καθαρά, και θεωρητικά η διαπερατότητα της επιφάνειάς τους ήταν η ίδια. Παρολ' αυτά, το επικαλυμμένο πλαίσιο παρουσιάζει αύξηση στην παραγόμενη ισχύ ίση με 2%. Η αύξηση αυτή αποδίδεται καθαρά στην αύξηση της διαπερατότητας της επιφάνειας του επικαλυμμένου πλαισίου που του προσφέρει η επίστρωση.

Κατά την περίοδο του καλοκαιριού και τον πρώτο μήνα του φθινοπώρου (Σεπτέμβριος), όπου ήταν μια ξηρή περίοδος χωρίς βροχοπτώσεις, παρατηρείται μια συνεχής αύξηση της διαφοράς της παραγόμενης ισχύος. Η μέση αύξηση ανέρχεται στα 3.77%. Η αύξηση αυτή αποδίδεται αφενός στην αυτοκαθαριζόμενη δράση της επίστρωσης, καθώς αυτοί οι μήνες χαρακτηρίζονται από υψηλά ποσοστά σκόνης, αλλά αφετέρου στην αύξηση της διαπερατότητας της επιφάνειας.

Την υπόλοιπη περίοδο (Οκτώβριος-Νοέμβριος-Δεκέμβριος) παρατηρείται ότι η αύξηση δεν μειώθηκε αλλά ενισχύθηκε περισσότερο. Σ' αυτούς τους μήνες, η επίδραση της σκόνης είναι μικρή έως ανύπαρκτη, καθώς υπήρχαν βροχοπτώσεις και τα πλαίσια ήταν εξίσου καθαρά. Εξάιρεση αποτελούν οι πρώτες ημέρες του Οκτωβρίου, όπου μετά την πρώτη βροχή τα πλαίσια δεν καθαρίστηκαν αλλά η σκόνη που υπήρχε στην επιφάνειά τους μετατράπηκε σε λάσπη. Αυτές τις ημέρες παρατηρούνται τα μεγαλύτερα ποσοστά αύξησης, καθώς το πλαίσιο 2

είχε καλύτερη συμπεριφορά κατά τη βροχόπτωση και καθαρίστηκε σχεδόν πλήρως. Σ' αυτές τις ημέρες έγινε φανερή η δεύτερη ιδιότητα της επίστρωσης που είναι η υδροφιλικότητα. Η γωνία επαφής του νερού της βροχής και της επιφάνειας του επικαλυμμένου πλαισίου ήταν κατά πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή του μη επικαλυμμένου. Το αποτέλεσμα ήταν να παρασυρθεί η τυχόν σκόνη και να μη μετατραπεί σε λάσπη. Τα πλαίσια μετά από τις βροχοπτώσεις που επακολούθησαν καθαρίστηκαν εξίσου αλλά το ποσοστό αύξησης δεν μειώθηκε πάλι δραματικά, όπως αναμενόταν. Αυτό είναι ένα βασικό πλεονέκτημα, καθώς ενώ δεν υπάρχει η επίδραση της σκόνης, υπάρχει και πάλι αύξηση στην παραγόμενη ισχύ.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει έπειτα από την μελέτη της αύξησης στην παραγόμενη ισχύ μιας συνεφιασμένης ημέρας είναι ότι η επίστρωση εκμεταλλεύεται περισσότερο τη διάχυτη ακτινοβολία. Δεδομένου ότι σε περιόδους συνεφιάς η παραγωγή ενέργειας από τα φ/β είναι μειωμένη, το πλεονέκτημα που προσφέρει η επίστρωση είναι πολύ σημαντικό. Αυτό, όμως, θα μπορεί να εξακριβωθεί αν υπάρχουν δεδομένα για τη διάχυτη ακτινοβολία. Αυτή η ιδιότητα της επίστρωσης είναι πολύ σημαντική για φ/β συστήματα που βρίσκονται σε περιοχές όπου τα ποσοστά της διάχυτης ακτινοβολίας είναι υψηλά. Το θέμα αυτό προσφέρεται για περαιτέρω μελέτη.

Τέλος, παρατηρήθηκε ότι μετά την εφαρμογή της επίστρωσης τις πρώτες πρωινές ώρες και αργά το απόγευμα η αύξηση ήταν ραγδαία. Αυτό εξακριβώθηκε λαμβάνοντας δύο τυχαίες ημέρες πριν και μετά την εφαρμογή. Ενώ οι μέσες ημερήσιες διαφορές της παραγόμενης ισχύος των δύο ημερών διέφεραν περίπου 1.5%, στην αρχή της ημέρας διέφεραν περίπου κατά 4.5% και το απόγευμα περίπου κατά 6.5%. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το πρωί και το βράδυ οι γωνίες πρόσπτωσης έχουν μεγάλες τιμές και έτσι υπεισέρχεται έντονα το φαινόμενο της ανάκλασης. Η επιφάνεια του επικαλυμμένου πλαισίου εμφανίζει μειωμένη ανακλαστικότητα, λόγω της επίστρωσης, ίση με 3%. Συνεπώς, εισέρχεται περισσότερη ακτινοβολία και η παραγωγή ισχύος αυξάνεται. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει η επίστρωση όσον αφορά την μείωση της ανακλαστικότητας της επιφάνειας, δίνει την αφορμή να μελετηθεί η συμπεριφορά της σε πλαίσια με διάφορες κλίσεις, όπου αλλάζει και η γωνία

πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Επιπλέον, το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα λαμβάνει υψηλές τιμές και μπορεί να αποτελέσει άλλη μια εξήγηση του παραπάνω φαινομένου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τους χειμερινούς μήνες το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας είναι υψηλό. Αυτό ενδεχομένως να εξηγήσει το υψηλό ποσοστό της διαφοράς της ισχύος που παρατηρείται τους χειμερινούς μήνες.

Μία ενδιαφέρουσα έρευνα θα ήταν, επίσης, η μελέτη της συμπεριφοράς της επίστρωσης κάτω από διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, υγρασία). Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν την λειτουργία των φ/β πλαισίων και ενδιαφέρει να εξεταστεί αν η επίστρωση λειτουργεί θετικά ή αρνητικά κάτω από διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας, ταχύτητας ανέμου και υγρασίας.

## 6. Βιβλιογραφία

1. Kalogirou, Soteris A, (2009). *Solar Energy Engineering: processes and systems*. UK: Elsevier.
2. John A. Duffie, William A. Beckmann, (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons.
3. Djamila Rekioua, Ernest Matagne, (2012). *Optimization of Photovoltaic Power Systems. Belgium: Springer*.
4. Monto Mani, Rohit Pillai., (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Recent status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 3124-3131.
5. Hottel HC, Woertz BB., (1942). The performance of flat plate solar heat collectors. *ASME Trans* 64, 91–104.
6. Garg HP., (1974). Effect of dirt on transparent covers in flat plate solar energy collectors. *Solar Energy*, 15(4), 299–302.
7. El-Shobokshy MS, Hussein FM. (1993). Effect of the dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. *Solar Energy* ;51(6):505–11.
8. El-Shobokshy MS, Hussein FM. (1993). Degradation of photovoltaic cell performance due to dust deposition on to its surface. *Renew Energy* ;3(6/7):585–90.
9. Goossens D, Van Kerschaever, (1999). E. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance. *Solar Energy*, 66(4), 277–89.
10. Mastekbayeva GA, Kumar S. (2000). Effect of dust on the transmittance of low density polyethylene glazing in a tropical climate. *Solar Energy*; 68(2):135–41.
11. Hegazy AA. (2001). Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors. *Renew Energy* ;22:525–40.
12. Hassan AH, Rahoma UA, Elminir HK, Fathy AM., (2005). Effect of airborne dust concentration on the performance of PV modules. *J Astron Soc Egypt*, 13(1), 24–38.
13. Kymakis E, Kalykakis S, Papazoglou TM., (2009). Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete. *Energy Convers Manage*, 50, 433–8.
14. Kaplani S., Kaplani E., (2011). Energy performance and degradation over 20 years performance of BP c-Si PV modules. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, 1201–1211.
15. Kaldelis J.K., Kokala A., (2010). Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal. *Energy*, 35, 4862-4869.

16. Mekhilef S., Saidur R., Kamalisarvestani M., (2012). Effect of dust and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2920-2925.
17. Τεχνικό Φυλλάδιο (PDS) του προϊόντος SurfaShield G.
18. Αραμπατζής Ιωάννης, (2004). *Νανοδομημένη Τιτανία για Περιβαλλοντικές Εφαρμογές*. Αθήνα:Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
19. Zorrilla-Casanova, M. Piliouguine, J. Carretero, P. Bernaola, P. Carpena, L. Mora-Lopez, M. Sidrach-de-Cardona. (2011). Analysis of dust losses in photovoltaic modules. *World Renewable Energy Congress –Sweden*.
20. N. Martin, J.M. Ruiz, (2001). Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 70, 25-38.
21. N. Martin, J.M. Ruiz,(2005). Annual angular reflection losses in PV modules. *Progress in Photovoltaics:Research and Applications* 13, 75-84.
22. Ιωάννου Αναστασία, (2011). *Τεχνοοικονομική Διερεύνηση Εφαρμογής Φωτοβολταϊκών στον Νομό Αττικής*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.