



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Οι Τέσσερις Γενιές των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων και το Φαινόμενο P.I.D. (Potential Induced Degradation)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία Α. Βλάχου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα , Μάιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Οι Τέσσερις Γενιές των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων και το Φαινόμενο P.I.D.(Potential Induced Degradation)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεωργία Α. Βλάχου

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή.

.....
Κ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Βασιλείου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Ηρ. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα , Μάιος 2017

.....

Γεωργία Α. Βλάχου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεωργία Α. Βλάχου 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που εμπεριέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιο Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εποχή μας τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος καθώς η ζήτηση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές βρίσκεται στο ζενίθ. Η μόλυνση του περιβάλλοντος και η ανάγκη για πιο οικονομικές πηγές ενέργειας συντέμνουν σε αυτό.

Στο Α' Μέρος της παρούσας εργασίας θα γίνει μια αναλυτική παρουσίαση των τεσσάρων γενιών φωτοβολταϊκών πλαϊσίων. Η πρώτη γενιά περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πανέλα από κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Pi) και πανέλα αρσενικούχου γαλλίου (GaAs). Στην δεύτερη γενιά, γνωστή ως γενιά λεπτών υμενίων, ανήκουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου (a-Si), τελλουριούχου καδμίου (CdTe), δισηληνιούχου ινδιούχου χαλκού (CIS) και δισηληνιούχου γαλλιούχου ινδιούχου χαλκού (CIGS). Στην τρίτη και τέταρτη γενιά η κατηγοριοποίηση των διαφόρων τύπων φωτοβολταϊκών πανέλων γίνεται πιο δυσδιάκριτη, με τους επιστήμονες να διατυπώνουν διαφορετικές απόψεις για το αν ο κάθε τύπος ανήκει στην τρίτη ή τέταρτη γενιά. Ωστόσο, εμείς θα παρουσιάσουμε τις διάφορες γενιές ξεχωριστά, παραβλέποντας την όποια ασάφεια στα όριά τους. Έτσι, η τρίτη γενιά αποτελείται από τα συγκεντρωτικά, τα χρωματο-ευαίσθητα, τα οργανικά φωτοβολταϊκά πλαίσια και τα πλαίσια που βασίζουν την δομή τους στην νανοτεχνολογία. Τέλος, φωτοβολταϊκά πλαίσια των οποίων η κατασκευή βασίζεται σε ανόργανες νανοδομές χαρακτηρίζονται ως τέταρτη γενιά. Για κάθε γενιά γίνεται παρουσίαση της δομής, των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που τις χαρακτηρίζουν, του τρόπου κατασκευής, του αντικρύσματος στο εμπόριο και των προοπτικών τους. Παρόλο που η έρευνα έχει φτάσει στην τέταρτη γενιά φωτοβολταϊκών, ωστόσο είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι οι επιστήμονες συνεχίζουν να εξελίσσουν τις διάφορες γενιές προκειμένου να βελτιστοποιήσουν τις δυνατότητές τους, καθώς κάθε γενιά χαρακτηρίζεται από διαφορετικά πλεονεκτήματα. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι σε όλη την εργασία θα γίνεται κυρίως λόγος για φωτοβολταϊκές κυψέλες αφού η κυψέλη αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο κάθε πλαϊσίου.

Στο Β Μέρος της εργασίας θα αναλύσουμε ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που απασχολεί τα τελευταία χρόνια τους επιστήμονες και τους μηχανικούς που ασχολούνται με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το πρόβλημα αυτό έχει να κάνει με την μείωση της απόδοσης ισχύος λόγω υψηλού δυναμικού DC, γνωστό ως φαινόμενο P.I.D.. Στο φαινόμενο αυτό συντείνουν πολλοί παράγοντες, που αναφέρονται στην εργασία λεπτομερειακά. Οι επιστήμονες από την πλευρά τους προσπαθούν και έχουν καταφέρει να βρουν τρόπους τόσο πρόληψης του φαινομένου P.I.D. όσο και αντιμετώπισης της βλάβης που επιφέρει στα φωτοβολταϊκά πλαίσια αφού εμφανιστεί. Τέλος, στην εργασία μας θα συμπεριλάβουμε μία μελέτη φωτοβολταϊκής εγκατάστασης η οποία έχει παρουσιάσει υποτίμηση της απόδοσης ισχύος ήδη από τον δεύτερο χρόνο λειτουργίας της.

Λέξεις Κλειδιά: Γενιές φωτοβολταϊκών πλαϊσίων, Κρυσταλλικό πυρίτιο, Λεπτά υμενία, Οργανικά πλαίσια, Νανοδομές, Ανόργανες νανοδομές, Απόδοση μετατροπής, Μείωση της απόδοσης, Φαινόμενο P.I.D., Πρόληψη, Αντιμετώπιση, Ηλεκτρολογική Μελέτη, Μετρούμενες τιμές, Τιμές σε πρότυπες συνθήκες δοκιμών, Απόκλιση.

ABSTRACT

Nowadays, PV solar panels are in the center of interest since the demand of energy becoming from renewable source has reached the high. The environmental pollution and the need for more economical energy sources led to this.

The First Part of the thesis is a detailed presentation of the four generations of PV solar panels. The first generation includes solar panels of crystalline silicon (c-Si) a GaAs. PV solar panels such as panels of amorphous silicon (a-Si), CdTe, CuInSe₂ (CIS) and CuInGaSe₂ (CIGS) belong to the second generation of solar panels, known as generation of thin films. In reference of third and fourth generation of solar panels, there is not a distinct classification of the various types because the scientists express different opinions whether each type of solar panels belongs to the third or to the fourth. Nevertheless, we will present the two generations separately defying the non specific boundaries. Thus, the third generation consists in concentrating PV (CPV) solar panels, dye-sensitized PV solar panels, organic PV solar panels and the PV solar panels that their structure is based to nanotechnology. Finally, PV solar panels of nanostructures are characterized as fourth generation. In the thesis there is a presentation of the structure, the advantages and the disadvantages, the way of manufacturing, the commercial response and the future prospects of each generation. Despite the fact that scientific research has led to the fourth generation of PV solar panels, it is important to say that scientists continue to develop the various generations in order to optimize their capabilities as each generation has different advantages. It is important to mention that in this thesis the term of solar cell will be mainly used as the cell is the basic structure unit of each solar panel.

In the Second Part of the thesis we will analyze a very important problem which has caused the last years the concern of scientists and engineers that work on the field of PV. The problem is the reduction of power efficiency because of high potential, known as P.I.D. (potential induced degradation). There are many factors that contribute to this effect and they are described in detail in the thesis. Scientists have tried and managed to find ways of prevention of the P.I.D. effect and recovery of the damage. Finally, the thesis includes an electrological research of a PV installation that its power efficiency has degraded after the second year of running.

Keywords: Generations of PV panels, Crystalline silicon, Thin films, Organic panels, Nanostructures, Inorganic nanostructures, Conversion efficiency, Degradation of efficiency, P.I.D. effect., Prevention, Recovery, Electrological research, Measured values, STC (standard test conditions) values, Deviance.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στον τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Δέρβο για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και τις πολύτιμες ακαδημαϊκές γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την διάρκεια της φοίτησής μου στο Ε.Μ.Π..

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κύριο Ιωάννη Σταθόπουλο, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ Ε.Μ.Π. στον Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης της Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, για την καταλυτική βοήθεια που προσέφερε στην εκπόνηση της εργασίας με την διάθεση της ηλεκτρολογικής μελέτης επάνω στην οποία στηρίχτηκε ένα μέρος της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα την οικογένεια μου και κάποιους αξιόλογους ανθρώπους για την αμέριστη συμπαράσταση και την πίστη τους προς εμένα.

Γεωργία Βλάχου

Αθήνα, Απρίλιος 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Μέρος Α΄ Οι Γενιές των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων.....	19
Γενικά.....	20
1. Πρώτη Γενιά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων.....	22
1.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si).....	25
1.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si).....	28
1.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια αρσενικούχου γαλλίου (GaAs).....	31
2. Δεύτερη Γενιά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων.....	33
2.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου (a-Si).....	37
2.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια τελεριούχου καδμίου (CdTe).....	40
2.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια δισεληνιούχου ινδιούχου χαλκού (CuInSe ₂ , CIGSs) και δισεληνιούχου ινδιούχου γαλλιούχου χαλκού (CuInGaSe ₂ , CIGSs).....	44
3. Τρίτη Γενιά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων.....	53
3.1 Συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (Concentrating PV- CPV)...	54
3.2 Χρωματο-ευαίσθητα φωτοβολταϊκά πλαίσια (Dye-sensitized solar Cells, DSSCs).....	56
3.3 Οργανικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (Organic Photovoltaic Cells, OPVCs).....	60
3.4 Η Νανοτεχνολογία στην παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	63
3.4.1 Νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes, CNTs).....	64
3.4.2 Κβαντικές κουκκίδες (quantum dots, QDs).....	66
3.4.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία με θερμούς φορείς (hot carriers, HCs)	69
4. Τέταρτη Γενιά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων.....	70
4.1 Λίγα λόγια για τις ανόργανες νανοδομές που χρησιμοποιούνται στην τέταρτη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	77
4.2 Εφαρμογές των ανόργανων νανοδομών στις οργανικές ηλεκτρονικές συσκευές.....	79
4.2.1 Ανόργανα διαφανή ηλεκτρόδια.....	79
4.2.2 Χρήση των ανόργανων υλικών στα στρώματα μεταφοράς	

(transport layers).....	85
4.2.2. a Στρώματα μεταφοράς οπών.....	85
4.2.3.b Στρώματα μεταφοράς ηλεκτρονίων.....	89
4.2.3 Ενσωμάτωση των μεταλλικών νανοσωματιδίων στην ενδιάμεση στοιβάδα (interlayer).....	91
4.2.4 Ενσωμάτωση των ανόργανων υλικών στα ενεργά στρώματα (active layers).....	92
 Μέρος Β Το φαινόμενο της προκαλούμενης απόδοσης ισχύος των φωτοβολταϊκών πλαισίων λόγω δυναμικού, γνωστό ως φαινόμενο «πρόωρης γήρανσης» των φωτοβολταϊκών πλαισίων P.I.D. (potential induced degradation).....	 98
Γενικά.....	99
5. Οι πρώτες διαπιστώσεις των επιστημόνων της υποτίμησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων και ορισμός αυτής.....	100
6. Παράγοντες που προκαλούν υποβάθμιση της απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης και ονομαστικά τα διάφορα είδη υποτίμησης.....	102
7. Αναδρομή στις αρχικές μελέτες των επιστημόνων γύρω από το φαινόμενο της «πρόωρης γήρανσης» των φωτοβολταϊκών στοιχείων, γνωστό ως P.I.D.....	108
8. Εξήγηση του φαινομένου της υποτίμησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων P.I.D. (Potential Induced Degradation).....	110
9. Παράγοντες που προκαλούν το φαινόμενο P.I.D.	112
10. Η συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου P.I.D. και, γενικότερα, των φαινομένων υποτίμησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά τον κόσμο.....	118

11. Πρόγνωση και μελέτη του φαινομένου P.I.D. εντός του εργαστηρίου.....	122
12. Τα κύρια μαθηματικά μοντέλα της υποβάθμισης P.I.D. των φωτοβολταϊκών μονάδων.....	124
12.1 Το εκθετικό μοντέλο.....	124
12.2 Μοντέλα με χρήση της θερμοκρασίας για την επιτάχυνση της διαδικασίας υποβάθμισης της απόδοσης.....	126
12.2.1 Μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της υποβάθμισης της απόδοσης λόγω ακραίας υψηλής θερμοκρασίας-σχέση Arrhenius με συντελεστή επιτάχυνσης AF τον χρόνο.....	127
12.2.1 Μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της υποβάθμισης της απόδοσης λόγω ακραίας υψηλής θερμοκρασίας-σχέση Eyring με συντελεστή επιτάχυνσης AF τον χρόνο.....	129
12.3 Μαθηματικό μοντέλο με χρήση της υγρασίας ως μεταβλητής για την επιτάχυνση του ρυθμού αντίδρασης.....	130
12.4 Μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της υποβάθμισης της απόδοσης λόγω ακραία υψηλής τάσης- Αντίστροφη Σχέση Ισχύος.....	132
12.5 Μοντέλα επίσπευσης της διαδικασίας υποβάθμισης της απόδοσης με παραπάνω από μία μεταβλητές επιτάχυνσης.....	133
12.5.1 Γενικευμένη σχέση Eyring.....	133
12.5.2 Μοντέλα με μεταβλητές επιτάχυνσης της διαδικασίας υποβάθμισης της απόδοσης την θερμοκρασία και την τάση.....	135
13. Επιτόπια ανίχνευση του φαινομένου P.I.D σε εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	137
14. Πρόγνωση και υπολογισμός της απώλειας ισχύος με βάση την θερμογραφική εικόνα.....	153
15. Καινοτόμο πλατφόρμα για την διερεύνηση της επίδρασης του φαινομένου P.I.D στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά I_{sc} και V_{oc} μιας	

φωτοβολταϊκής μονάδας.....	156
15.1 Λειτουργία της πλατφόρμας.....	159
15.1.1 Θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου	161
15.1.2 Κανονικοποίηση - τυποποίηση μετρήσεων.....	162
15.1.3 Αξιολόγηση της υποβάθμισης των Isc και Voc.....	163
15.2 Αποτελέσματα και ανάλυση αυτών.....	164
15.2.1 Περιβαλλοντικές παράμετροι.....	165
15.2.2 Κανονικοποίηση των μετρήσεων.....	166
15.2.3 Εκτίμηση της υποβάθμισης.....	170
15.3 Σύνοψη.....	171
16. Πρόληψη της εμφάνισης του φαινομένου P.I.D.....	172
17. Η αναστρέψιμη και η μη αναστρέψιμη μορφή του P.I.D.	
– Λήψη των μέτρων για τον περιορισμό του φαινομένου P.I.D. και την επανόρθωση των βλαφθέντων φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	192
17.1 Αναστρέψιμο και μη αναστρέψιμο φαινόμενο P.I.D.....	192
17.2 Μέτρα αντιμετώπισης και μετριασμού του φαινομένου P.I.D.....	193
18. Μελέτη μιας πραγματικής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης-Διεξαγωγή μετρήσεων.....	199
18.1 Τοπολογία της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.....	199
18.2 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.....	202
18.3 Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν – Εξοπλισμός.....	207
18.4 Λήψη μέτρων ασφαλείας.....	207
18.5 Απαραίτητες πληροφορίες και ρυθμίσεις για την διεξαγωγή των μετρήσεων και τον υπολογισμό των επιθυμητών μεγεθών.....	207
18.5.1 Μέτρηση των περιβαλλοντικών συνθηκών.....	208
18.5.2 Παράμετροι του φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	210
18.5.3 Πρότυπο μετρήσεων IEC.....	210
18.5.4 Ρυθμίσεις μετρήσεων.....	211
18.6 Έλεγχος της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων	
- Μετρήσεις τάσεως ανοιχτοκυκλώσεως και ρεύματος βραχυκυκλώσεως – Μετρήσεις χαρακτηριστικής καμπύλης I/V.....	213

18.7 Μετρήσεις που πήραμε με το όργανο MI_3108 Eurotest για τα δεκαέξι τυχαία επιλεγμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.....	221
18.8 Υπολογισμός με την χρήση εξισώσεων των μεγεθών U_{oc} , I_{sc} , U_{mpp} , I_{mpp} και P_{mpp} στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (STC) για τα δεκαέξι φωτοβολταϊκά πλαίσια της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.....	237
18.9 Υπολογισμός των αποκλίσεων της αποδιδόμενης ισχύος των δεκαέξι φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	258
18.10 Συμπεράσματα.....	263
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	265

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα α.....	20
Εικόνα 1.....	23
Εικόνα 2.....	24
Εικόνα 3.....	27
Εικόνα 4.....	28
Εικόνα 5.....	30
Εικόνα 6.....	32
Εικόνα 7.....	36
Εικόνα 8.....	39
Εικόνα 9.....	40
Εικόνα 10.....	42
Εικόνα 11.....	45
Εικόνα 12.....	46
Εικόνα 13.....	47
Εικόνα 14.....	50
Εικόνα 15.....	51
Εικόνα 16.....	58
Εικόνα 17.....	59
Εικόνα 18.....	59
Εικόνα 19.....	60
Εικόνα 20.....	62
Εικόνα 21.....	63
Εικόνα 22.....	65
Εικόνα 23.....	67
Εικόνα 24.....	68
Εικόνα 25.....	70
Εικόνα 26.....	72
Εικόνα 27.....	74
Εικόνα 28.....	75
Εικόνα 29.....	76
Εικόνα 30.....	78
Εικόνα 31.....	81
Εικόνα 32.....	83
Εικόνα 33.....	84
Εικόνα 34.....	86
Εικόνα 35.....	88
Εικόνα 36.....	96
Εικόνα 37(a).....	103
Εικόνα 37(b).....	104
Εικόνα 38.....	104
Εικόνα 39.....	105
Εικόνα 40(a).....	105
Εικόνα 40(b).....	106

Εικόνα 41.....	107
Εικόνα 42.....	107
Εικόνα 43.....	108
Εικόνα 44.....	111
Εικόνα 45.....	111
Εικόνα 46.....	113
Εικόνα 47.....	114
Εικόνα 48.....	115
Εικόνα 49.....	119
Εικόνα 50.....	138
Εικόνα 51.....	140
Εικόνα 52.....	141
Εικόνα 53.....	142
Εικόνα 54.....	145
Εικόνα 55.....	145
Εικόνα 56.....	149
Εικόνα 57.....	158
Εικόνα 58.....	160
Εικόνα 59.....	174
Εικόνα 60.....	175
Εικόνα 61.....	176
Εικόνα 62.....	177
Εικόνα 63.....	178
Εικόνα 64.....	179
Εικόνα 65.....	180
Εικόνα 66.....	180
Εικόνα 67.....	195
Εικόνα 68.....	198
Εικόνα 69.....	200
Εικόνα 70.....	202
Εικόνα 71.....	204
Εικόνα 72.....	205
Εικόνα 73.....	205
Εικόνα 74.....	206
Εικόνα 75.....	209
Εικόνα 76.....	212
Εικόνα 77.....	213
Εικόνα 78.....	215
Εικόνα 79.....	216
Εικόνα 80.....	216
Εικόνα 81.....	218
Εικόνα 82.....	218

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.....	48
Πίνακας 2.....	102
Πίνακας 3.....	158
Πίνακας 4.....	161
Πίνακας 5.....	184
Πίνακας 6.....	186
Πίνακας 7.....	187
Πίνακας 8.....	189
Πίνακας 9.....	219
Πίνακας 10.....	220
Πίνακας 11.....	255
Πίνακας 12.....	256
Πίνακας 13.....	256
Πίνακας 14.....	257
Πίνακας 15.....	257
Πίνακας 16.....	261

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.....	21
Διάγραμμα 2.....	115
Διάγραμμα 3.....	121
Διάγραμμα 4.....	122
Διάγραμμα 5.....	126
Διάγραμμα 6.....	144
Διάγραμμα 7.....	145
Διάγραμμα 8.....	147
Διάγραμμα 9.....	148
Διάγραμμα 10.....	151
Διάγραμμα 11.....	152
Διάγραμμα 12.....	154
Διάγραμμα 13.....	155
Διάγραμμα 14.....	165
Διάγραμμα 15.....	166
Διάγραμμα 16.....	166
Διάγραμμα 17.....	167
Διάγραμμα 18.....	168
Διάγραμμα 19.....	169
Διάγραμμα 20.....	170
Διάγραμμα 21.....	171
Διάγραμμα 22.....	185
Διάγραμμα 23.....	191
Διάγραμμα 24.....	196
Διάγραμμα 25.....	196
Διάγραμμα 26.....	198

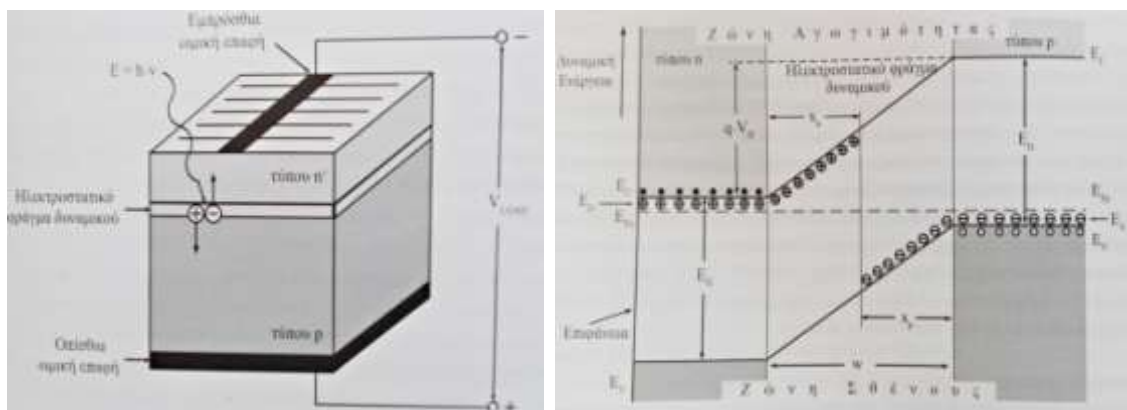
Μέρος Α΄

Οι Γενιές των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Γενικά

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε πρώτη φορά από τον Γάλλο φυσικό Alexander- Edmont Becquerel το 1839 . Το 1883 ο Charles Fritts κατασκεύασε το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο κάλυψε με σεληνιούχο (Se) ημιαγωγό με ένα πάρα πολύ λεπτό στρώμα από χρυσό (Au)για να παράγει τις επαφές – η απόδοσή του ήταν 1%. Πολλά χρόνια μετά, το 1946, το μοντέρνο φωτοβολταϊκό στοιχείο κατοχυρώθηκε από τον Russel Ohl. Η νεότερη εποχή της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών κυψελών σηματοδοτήθηκε το 1954. Τα εργαστήρια Bell τυχαία ανακάλυψαν πως το πυρίτιο (Si) που είναι νοθευμένο με συγκεκριμένες προσμίξεις ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητο στο φως. ^[1]

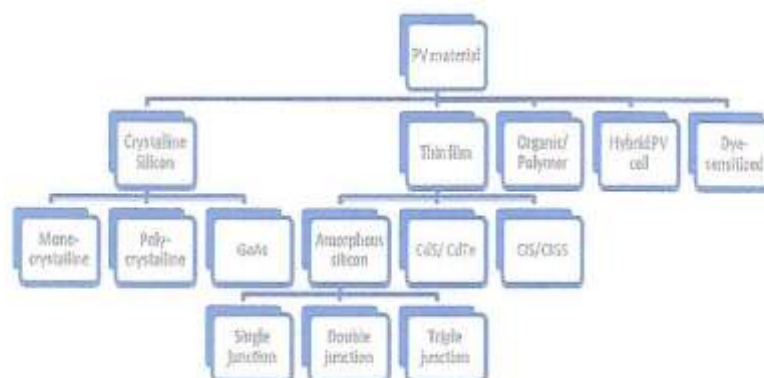
Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο συνίσταται στη μετατροπή μέρους του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. ^[5] Η φωτοβολταϊκή κυψέλη εκτελεί τις εξής σημαντικές λειτουργίες : απορρόφηση φωτός από κατάλληλο υλικό, παραγωγή ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρονίων και οπών) και διαχωρισμό των φορέων προς αγώγιμες επαφές για την παραγωγή ηλεκτρισμού. ^[1] Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται συνήθως με την απορρόφηση του φωτός από κατάλληλες διατάξεις - όπως είναι η δίοδος p-n και σε ειδικές περιπτώσεις η δίοδος Schottky.



Εικόνα 1 Στην αριστερή εικόνα φαίνεται η τυπική γεωμετρία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου (Si) που βασίζει την λειτουργία του στην δίοδο επαφής p-n. Δεξιά απεικονίζεται το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού της διόδου σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. ^[5]

Καθώς μια φωτοβολταϊκή κυψέλη αποτελεί την βασική δομική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού πάνελ στην οποία οφείλει τις ιδιότητες, την λειτουργία ή την ύπαρξη βλάβης, παρακάτω θα γίνεται κυρίως αναφορά στις φωτοβολταϊκές κυψέλες όταν θα μιλάμε για τις γενιές των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Η σύγχρονη αγορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων περιλαμβάνει μια ευρεία γκάμα τεχνολογιών. Οι τεχνολογίες αυτές διαφοροποιούνται αναλόγως των υλικών που χρησιμοποιούνται στις φωτοβολταϊκές κυψέλες και κατηγοριοποιούνται σε τρεις γενιές ενώ ήδη διερευνάται η τέταρτη γενιά φωτοβολταϊκών πλαισίων. Μεταξύ των τεχνολογιών συναντάμε την τεχνολογία ημιαγώγιμων δίσκων βασιζόμενων στο πυρίτιο (Si) (wafers), καθώς και μια ποικιλία τεχνολογιών λεπτών υμενίων (thin films). Στο παρακάτω διάγραμμα μπορούμε να δούμε με μια συνοπτική ματιά τις κατηγορίες και υποκατηγορίες των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Όπως φαίνεται, στο Διάγραμμα 1 δεν συμπεριλαμβάνονται τα φωτοβολταϊκά πανέλα τέταρτης γενιάς μιας που τα τελευταία είναι σχετικά πρόσφατα και βρίσκονται υπό μελέτη. Επιπλέον, μπορούμε να δούμε ότι το διάγραμμα συμπεριλαμβάνει την κατηγορία υβριδικών φωτοβολταϊκών στοιχείων ως μέρος της τρίτης γενιάς φωτοβολταϊκών πανέλων. Ωστόσο κατά την πλειονότητα των επιστημόνων τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούν μέρος της τέταρτης γενιάς. Επιπρόσθετα, στην τρίτη γενιά ανήκουν τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά πανέλα (CPV) που δεν αναγράφονται. Στο σημείο αυτό, λοιπόν, κρίνεται αναγκαίο να αναφέρουμε, ως εξήγηση των παραπάνω, ότι υπάρχει μια ασάφεια ανάμεσα στα όρια της τρίτης και της τέταρτης γενιάς, ενώ συχνά υπάρχει διαφωνία μεταξύ των επιστημόνων κατά πόσο μια κατηγορία φωτοβολταϊκών στοιχείων ανήκει στην τρίτη γενιά ή την επόμενη. Ωστόσο, η αυστηρή κατηγοριοποίηση δεν έχει τόση σημασία όσο το να δούμε αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της κάθε γενιάς. Σκοπός μας, όπως θα φανεί στην συνέχεια, είναι να δούμε την δομή κάθε κατηγορίας φωτοβολταϊκών κυψελών, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν, τον τρόπο κατασκευής τους, τις αποδόσεις μετατροπής της ισχύος - όπου αυτές είναι γνωστές -, την εμπορική τους απήχηση και τις προσδοκίες εξέλιξής τους στο μέλλον.



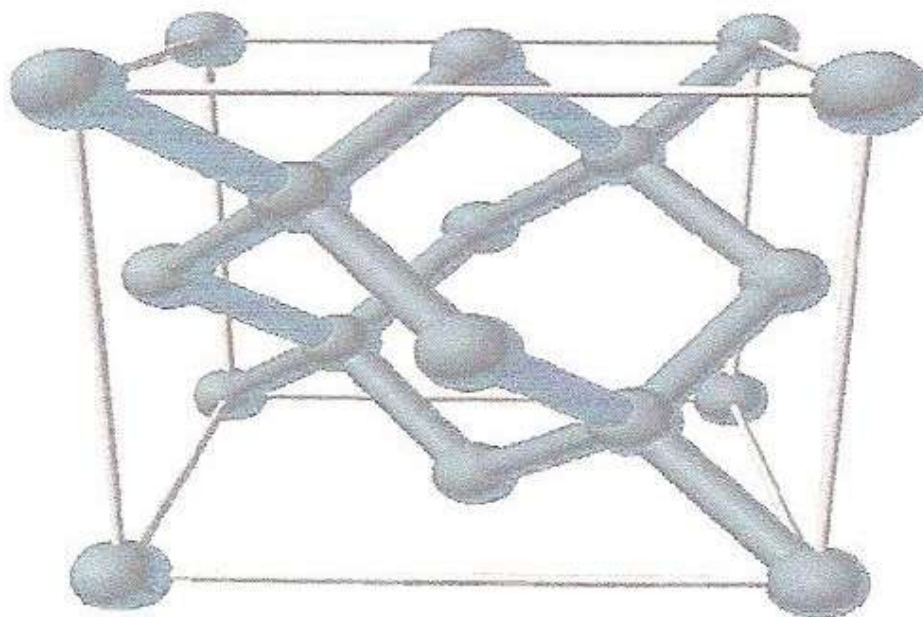
Διάγραμμα 1 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών κυψελών ανάλογα με τα χημικά στοιχεία που τις αποτελούν και την εσωτερική τους δομή. ^[4]

1. Πρώτη Γενιά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Η πρώτη γενιά φωτοβολταϊκών πλαισίων βασίζεται στο κρυσταλλικό πυρίτιο (crystalline-Si, c-Si). Το πυρίτιο (Si) είναι ένα από τα πιο άφθονα υλικά στην επιφάνεια της γης. Είναι το δεύτερο πιο συχνό ακατέργαστο υλικό στο υπέδαφος. Είναι ένα ημιαγώγιμο στοιχείο, κατάλληλο για φωτοβολταϊκές εφαρμογές και με ενεργειακό διάκενο 1.1 eV.

Το κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) είναι το πιο διαδεδομένο υλικό στην βιομηχανία των φωτοβολταϊκών πλαισίων και οι φωτοβολταϊκές κυψέλες που αποτελούνται από κρυσταλλικό πυρίτιο (crystalline-Si, c-Si) κυριαρχούν στην σύγχρονη αγορά. Το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο κατασκευάστηκε το 1954 στα εργαστήρια του Bell, όπου από λάθος μιας διαδικασίας που περιελάμβανε ημιαγωγούς, παρατηρήθηκε ότι στο πυρίτιο (Si) όταν εγχυθούν συγκεκριμένες νοθεύσεις τότε είναι πολύ ευαίσθητο στο φως. Η εμπορική παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) ξεκίνησε το 1963 από την ιαπωνική εταιρεία Sharp.^[1]

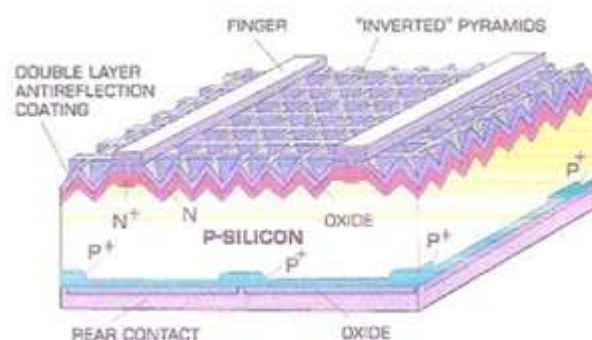
Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου (Si) έγκεινται στην υψηλή απορρόφηση φωτονίων μιας ευρείας ζώνης του ενεργειακού φάσματος και στην μεγάλη κινητικότητα των φορτίων. Από την άλλη, στα μειονεκτήματα δεσπόζει κυρίως το υψηλό κόστος κατασκευής, κάτι που οι επιστήμονες προσπαθούν συνεχώς να μειώσουν. Επιπλέον, η δημιουργία και το κόψιμο των ράβδων, που θα δούμε στην συνέχεια, είναι μια διαδικασία που απαιτεί μεγάλη ενέργεια. Στα μειονεκτήματα, θα πρέπει να προσθέσουμε τις μεγάλες ενεργειακές απώλειες σε μορφή θερμότητας που παρουσιάζουν τα φωτόνια πολύ υψηλής ενέργειας, στην μπλε περιοχή και στο τέλος του φάσματος.



Εικόνα 1 Δομή κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si).^[4]

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πρώτης γενιάς με κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) αποτελούνται από μία επαφή p-n και διακρίνονται, όπως θα δούμε, αναλόγως την δομή της φωτοβολταϊκής κυψέλης σε φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (monocrystalline-Si, mc-Si or single crystalline-Si, sc-Si) και πολυκρυσταλλικού πυριτίου (polycrystalline-Si, pc-Si). Στην πρώτη γενιά φωτοβολταϊκών πανέλων συγκαταλέγονται, επίσης, τα πανέλα αρσενικούχου γαλλίου (GaAs).

Η εσωτερική δομή ενός συμβατικού φωτοβολταϊκού στοιχείου κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) φαίνεται στην Εικόνα 2 .



Εικόνα 2 Γεωμετρία ενός τυπικού φωτοβολταϊκού στοιχείου κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si).^[12]

Όπως μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 2 οι ανεστραμμένες πυραμίδες στην επιφάνεια έχουν ως σκοπό της μείωση της αντανάκλασης. Το μεταλλικό πίσω μέρος φωτοβολταϊκής κυψέλης δρα αποτελεσματικά ως αντανάκλαστικό στοιχείο. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά έχουν ως συνέπεια, το φως να παγιδεύεται πολύ καλά στο εσωτερικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου έως και 40 φορές. Με άλλα λόγια επηρεάζουν την απόδοσή του. Το 2001 οι επιστήμονες επιβεβαίωσαν ότι η δομή και τα γεωμετρικά στοιχεία της φωτοβολταϊκής κυψέλης παίζουν σημαντικό ρόλο στο ποσοστό της απόδοσης.

Το 2010 η τεχνολογία φωτοβολταϊκών πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) αποτελούσε το 87% των παγκόσμιων πωλήσεων στην αγορά των φωτοβολταϊκών.^[2] Η πρώτη αυτή γενιά φωτοβολταϊκών πλαισίων απαιτεί υψηλή ενέργεια και μεγάλα χρηματικά ποσά για το εργατικό δυναμικό, που δυσχεραίνουν μια σημαντική πρόοδο στην μείωση του κόστους παραγωγής. Αν και πρόκειται για την παλαιότερη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων, παρόλο αυτά, δεν είναι καθόλου ξεπερασμένη ενώ η έρευνα συνεχώς προχωρά ώστε να μειωθεί το κόστος και να βελτιωθούν οι δυνατότητες και η αποδοτικότητα μέσω της βελτίωσης των υλικών και των κατασκευαστικών διαδικασιών. Πιστεύεται ότι πολύ σύντομα οι ιδιωτικές βιομηχανίες θα παράγουν εκατοντάδες MW τον χρόνο ή ακόμη και σε κλίμακα GW χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά πρώτης γενιάς.

1.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si)

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (mc-Si) είναι ευρύτατα διαδεδομένο στην ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων λόγω της υψηλής τους απόδοσης σε σχέση με τα αντίστοιχα στοιχεία που συγκροτούνται από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (pc-Si). Αυτό είναι και το πιο σημαντικό πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si). Υπολογίζεται ότι ένα ποσοστό 80% της αγοράς^[2] των φωτοβολταϊκών πλαισίων βασίζεται σε αυτήν την κατηγορία φωτοβολταϊκών κυψελών και πιστεύεται ότι η κυριαρχία αυτή θα συνεχιστεί έως ότου ανακαλυφθεί κάποια άλλη τεχνολογία πιο αποδοτική και ταυτόχρονα πιο οικονομική.

Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα των στοιχείων αυτών είναι το υψηλό κόστος, γύρω στο US\$4/W, το οποίο είναι τέσσερις φορές πιο ακριβό για μια πραγματικά ανταγωνιστική εμπορική παραγωγή.^[3]

Συγκριτικά με τις φωτοβολταϊκές κυψέλες στις οποίες χρησιμοποιούνται διαφορετικού τύπου υλικά, η φωτοβολταϊκή κυψέλη μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si) έχει την υψηλότερη απόδοση, με ποσοστό περισσότερο από 20%, ενώ η απόδοση στον τομέα της παραγωγής κυμαίνεται μεταξύ 15% και 17%. Η μέγιστη απόδοση που έχει καταγραφεί σε εργαστήριο είναι γύρω στο 23% υπό πρότυπες συνθήκες φωτισμού STC (Standard Test Conditions).^[4] Εδώ πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η διαφορά που παρατηρείται στις προαναφερθείσες αποδόσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει να κάνει με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες υπολογίζονται. Οι συνθήκες STC είναι οι πρότυπες συνθήκες φωτισμού που προδιαγράφονται από το πρότυπο ASTM-E 892. Πρακτικά, όμως, η απόδοση του ίδιου πλαισίου κατά τη λειτουργία του σε μια εγκατάσταση αναμένεται ότι θα είναι μικρότερη, λόγω των απωλειών του συστήματος.^[5]

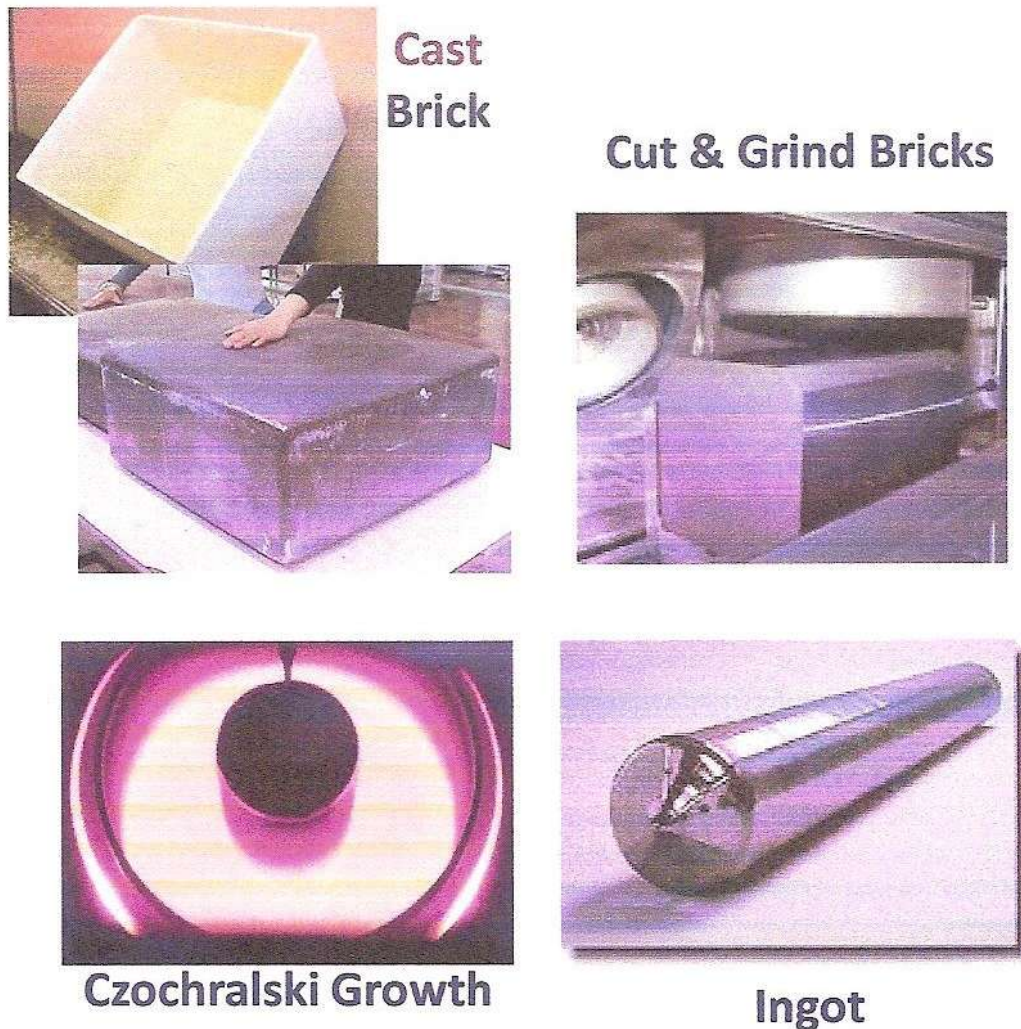
Στην πλειονότητα των περιπτώσεων το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (Si) κατασκευάζεται μέσω της διαδικασίας Czochralski. Σύμφωνα με αυτήν την διαδικασία, αρχικά, ημιαγώγιμο πυρίτιο (Si) υψηλής καθαρότητας λειώνει σε κάμινο. Στην συνέχεια προστίθενται συγκεκριμένες ποσότητες προσμίξεων στο λιωμένο πυρίτιο (Si), όπως άτομα βορίου ή φωσφόρου, μετατρέποντάς το σε τύπου-p ή τύπου-n. Για παράδειγμα, προσθέτοντας τρισθενείς προσμίξεις βορίου (B) μπορούμε να πάρουμε ένα μονοκρύσταλλο πυριτίου (mc-Si) τύπου-p.

Το υπόστρωμα των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου κατασκευάζεται πάντοτε από ημιαγωγό τύπου-p, λόγω του ότι συνιστά υλικό ανώτερης κρυσταλλικής ποιότητας συγκριτικά με τους μονοκρυστάλλους πυριτίου (Si) τύπου-n. Η ανώτερη κρυσταλλική ποιότητα σημαίνει μείωση των αταξιών. Η ύπαρξη αταξιών αυξάνει την μάζα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μειώνοντας την κινητικότητά τους ενώ, επίσης, αυξάνεται ο ρυθμός επανασύνδεσης, χαρακτηριστικά μη επιθυμητά για την πρόκληση και παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η ακριβής συγκέντρωση προσμίξεων βορίου (B) που εισάγονται στο υπόστρωμα, επιλέγεται από τον κάθε κατασκευαστή και είναι συνήθως της τάξης των $10^{16}/\text{cm}^3$. Η συγκέντρωση αυτή εξασφαλίζει χαμηλό ρυθμό επανασύνδεσης στον όγκο του υποστρώματος – εξαιτίας του χαμηλού ποσοστού προσμίξεων- και υψηλή αγωγιμότητα όγκου, έχοντας σαν αποτέλεσμα την χαμηλή αντίσταση σειράς R_s στον όγκο του υποστρώματος. Τα προαναφερθέντα αποσκοπούν στην ασφαλή μεταφορά των παραγόμενων ηλεκτρικών φορέων (οπών) από την θέση δημιουργίας τους έως τα ηλεκτρόδια της πίσω όψης του φωτοβολταϊκού στοιχείου χωρίς σημαντικές ηλεκτρικές απώλειες. Δηλαδή επιτυγχάνεται ρεύμα χωρίς απώλειες.

Συνεχίζοντας από το σημείο της προσθήκης προσμίξεων βορίου (B) είδαμε ότι αμέσως μετά την προσθήκη επηρεάζονται οι ηλεκτρονικές ιδιότητες του πυριτίου (Si). Έπειτα, λοιπόν, από την προσθήκη των προσμίξεων στο λιωμένο πυρίτιο (Si), ακολουθεί η βύθιση μίας πλαισιωμένης ράβδους (εκμαγείου) κρυστάλλου συγκεκριμένου προσανατολισμού. Η ράβδος σιγά σιγά ανασύρεται και την ίδια στιγμή περιστρέφεται, αλλάζοντας προσανατολισμό. Με τον ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας, το ρυθμό της βύθισης και της ανόρθωσης και την ταχύτητα της περιστροφής, είναι πολύ πιθανό να εξάγουμε μια μεγάλη μονοκρυσταλλική κυλινδρική ράβδο από το λιωμένο μίγμα. Η διαδικασία αυτή μπορεί να λάβει μέρος σε μια αδρανή ατμόσφαιρα, όπως συμβαίνει με το αργό (Ar), ή σε κάμινο π.χ. από χαλαζία (quartz, SiO_2). Τέλος, ο κρύσταλλος κόπτεται σε δίσκους (wafers) πάχους περίπου 300μm, από τους οποίους κατασκευάζεται το μονοκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου (mc-Si) της Εικόνας 4.

Στην Εικόνα 3 μπορούμε να δούμε συνοπτικά τα στάδια της κατασκευής μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-rc-Si). Στην πάνω αριστερά φωτογραφία έχουμε την κατασκευή ενός μεγάλου τούβλου πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) με την βοήθεια ενός εκμαγείου. Στην συνέχεια, ακολουθεί, όπως φαίνεται στην αμέσως επόμενη δεξιά φωτογραφία, το κόψιμο και το τρύχισμα. Στην τελευταία φωτογραφία βλέπουμε την μονοκρυσταλλική κυλινδρική

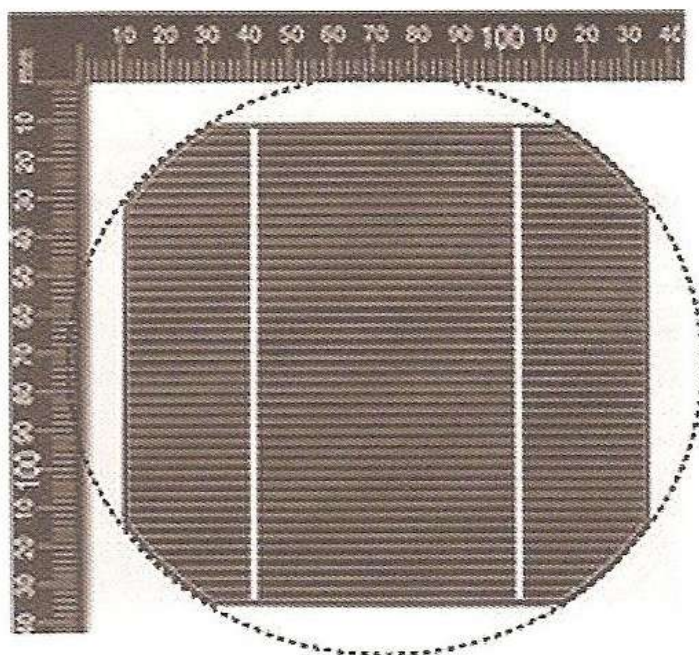
ράβδο.



Εικόνα 3 Τα στάδια κατασκευής μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si).^[12]

Στην Εικόνα 4 βλέπουμε, όπως ήδη είπαμε, μία μονοκρυσταλλική φωτοβολταϊκή κυψέλη πυριτίου (mc-Si). Συνήθως, τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία έχουν κυκλικό σχήμα (διαμέτρου της τάξης των 6 ιντσών κατά μέγιστον) και σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν αποκοπεί οι απολήξεις από τις τέσσερις αντιδιαμετρικές χορδές των τόξων (βλ. Εικόνα 4). Η κοπή αυτή γίνεται προκειμένου να καταφέρουμε μεγαλύτερη τοποθέτηση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε δεδομένο εμβαδόν φέροντος

φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η διάμετρος του κύκλου που εφάπτεται περιμετρικά στο στοιχείο μας δείχνει τη διάμετρο του αρχικού μονοκρυστάλλου που αναπτύχθηκε με την μέθοδο Czochralski. Στην συνέχεια, ακολούθησε, όπως έχουμε προαναφέρει, κοπή του κρυστάλλου σε δίσκους από τους οποίους κατασκευάστηκε το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου (mc-Si).



Εικόνα 4 Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου (Si) από το οποίο έχουν αποκοπεί τέσσερις αντιδιαμετρικοί κυκλικοί τομείς.^[5]

1.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si)

Η φωτοβολταϊκή κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) ήταν το αποτέλεσμα της προσπάθειας των επιστημόνων να κατασκευάσουν μία κυψέλη που θα ανταποκρίνεται στις ανάγκες της βιομηχανίας των φωτοβολταϊκών πανέλων για μειωμένο κόστος με ταυτόχρονη αύξηση της παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, το φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) βοήθησε στην μείωση του

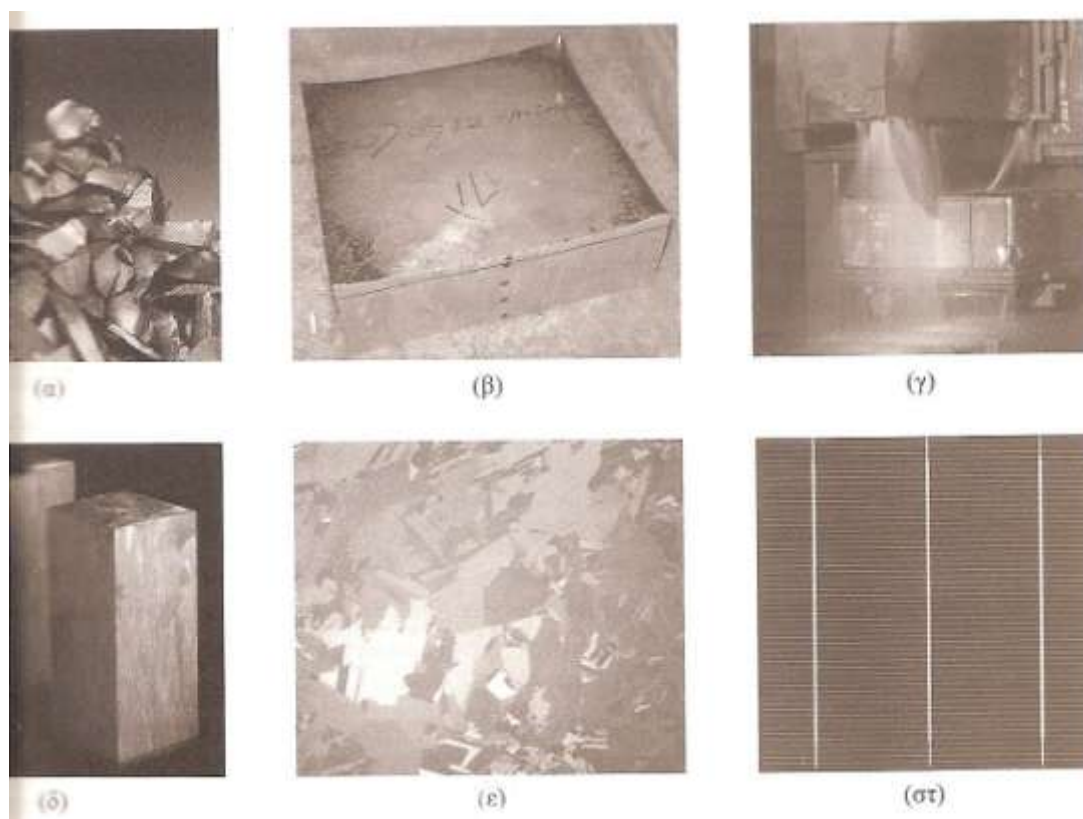
κόστους στον τομέα της ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, κάτι που αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Ένα, ακόμη, προτέρημα της χρήσης του πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) στον τομέα της παραγωγής φωτοβολταϊκών κυψελών, είναι ότι με την χρήση του κατορθώνεται να μειωθούν οι προσμείξεις που απαιτούνται κατά την διάρκεια της παραγωγής κυψελών με μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (mc-Si). Ωστόσο, η απόδοση των κυψελών αυτών είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si) και κυψέλες άλλων υλικών, χαρακτηριστικό ασφαλώς μη επιθυμητό.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο, έχουν απόδοση 12%-15%. Ωστόσο, σε εργαστήρια έχουν κατασκευαστεί στοιχεία που φτάνουν σε απόδοση το 19,8%.^[6]

Η κατασκευή των πολυκρυσταλλικών δίσκων πυριτίου (Si) που θα μας δώσουν τα επιθυμητά φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτού του τύπου, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω δύο διαφορετικών μεθόδων. Ως πρώτη ύλη και στις δύο περιπτώσεις, συνήθως, χρησιμοποιείται επαναχρησιμοποιημένο πυρίτιο (Si) ηλεκτρονικής καθαρότητας. Με τον τρόπο αυτό, έχουμε μικρότερες εισροές συγκριτικά με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο(mc-Si), που μπορούν να μολύνουν το μέταλλο και την δομή.^[5]

Σύμφωνα με την πρώτη κατασκευαστική μέθοδο , που φαίνεται αναλυτικά στις επιμέρους φωτογραφίες της Εικόνας 5, αρχικά, μικροκρύσταλλοι πυριτίου (Si) τοποθετούνται σε εκμαγείο ορθογωνικής γεωμετρίας (από χαλαζία). Το καλούπι αυτό θερμαίνεται στο σημείο τήξης και μετά την χύτευση παράγεται πολυκρύσταλλος στον οποίο πολλά μικρά κομμάτια του έχουν κρυσταλλωθεί αυτοτελώς σε μονοκρυσταλλική μορφή. Παρατηρούμε αρκετά κοινά σημεία με την μέθοδο Czochralski που χρησιμοποιείται για την κατασκευή μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si), μόνο που το προϊόν που λαμβάνουμε μετά την χύτευση είναι πολυκρυσταλλικό. Επίσης, το προϊόν έχει ορθογωνική γεωμετρία παραλληλεπιπέδου (με διαστάσεις στη βάση 50cm x 50cm) (βλ. Εικόνα 5(β)) –προηγουμένως είδαμε ότι το μονοκρυσταλλικό στοιχείο, εν αντιθέσει, έχει κυκλικό σχήμα. Στην συνέχεια, ακολουθεί καθάρισμα του πολυκρυστάλλου από το εξωτερικό τμήμα του με την βοήθεια αδαμαντοτροχών που βοηθούν στην κοπή κατά μήκος του (βλ. Εικόνα 5(γ)) . Οι ράβδοι που παίρνουμε μετά την κοπή (βλ. Εικόνα 5(δ)) έχουν γεωμετρία ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου (με διαστάσεις στη βάση τους 15cm x 15 cm). Κάθε ορθογωνική ράβδος κόβεται σε λεπτά εγκάρσια φύλλα (wafers), πάχους περίπου (350μm) (βλ. Εικόνα 5(ε)). Τα φύλλα αυτά

αποτελούν το βασικό υλικό για την κατασκευή των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου (Si). Έπειτα, με την χρήση χημικών μεθόδων σε συνδυασμό με την τεχνολογία μικροηλεκτρονικής καθαρότητας διαμορφώνεται το επιθυμητό φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) (βλ. Εικόνα 5(στ)).



Εικόνα 5 Τα στάδια για την κατασκευή ενός πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου(Si). ^[5]

Μία εναλλακτική μέθοδος κατασκευής του πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) είναι με την τοποθέτηση μικρο-κρυστάλλων πυριτίου (Si) σε λεπτό επίπεδο ορθογώνιο καλούπι, στο οποίο θερμαίνονται και συντήκονται στα όρια των κόκκων τους. Στη συνέχεια, με διεργασία πυροσυσσωμάτωσης διευρύνουν το μέγεθός τους, κατασκευάζοντας απευθείας τον επιθυμητό λεπτό ημιαγώγιμο δίσκο (wafer) που κατασκευάσαμε και με την προηγούμενη μέθοδο.

Όσον αφορά την εμπορικότητα των φωτοβολταϊκών κυψελών πολυκρυσταλλικού πυριτίου, όταν η τιμή του πυριτίου (Si) ανερχόταν στο ποσό των 340\$/kg, το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (pc-Si) κυριαρχούσε στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αργότερα, που η τιμή του πυριτίου έπεσε στα 50\$/kg ήταν μια ενδιαφέρουσα επιλογή λόγω του μικρού κατασκευαστικού κόστους σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si).

1.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια αρσενικούχου γαλλίου (GaAs)

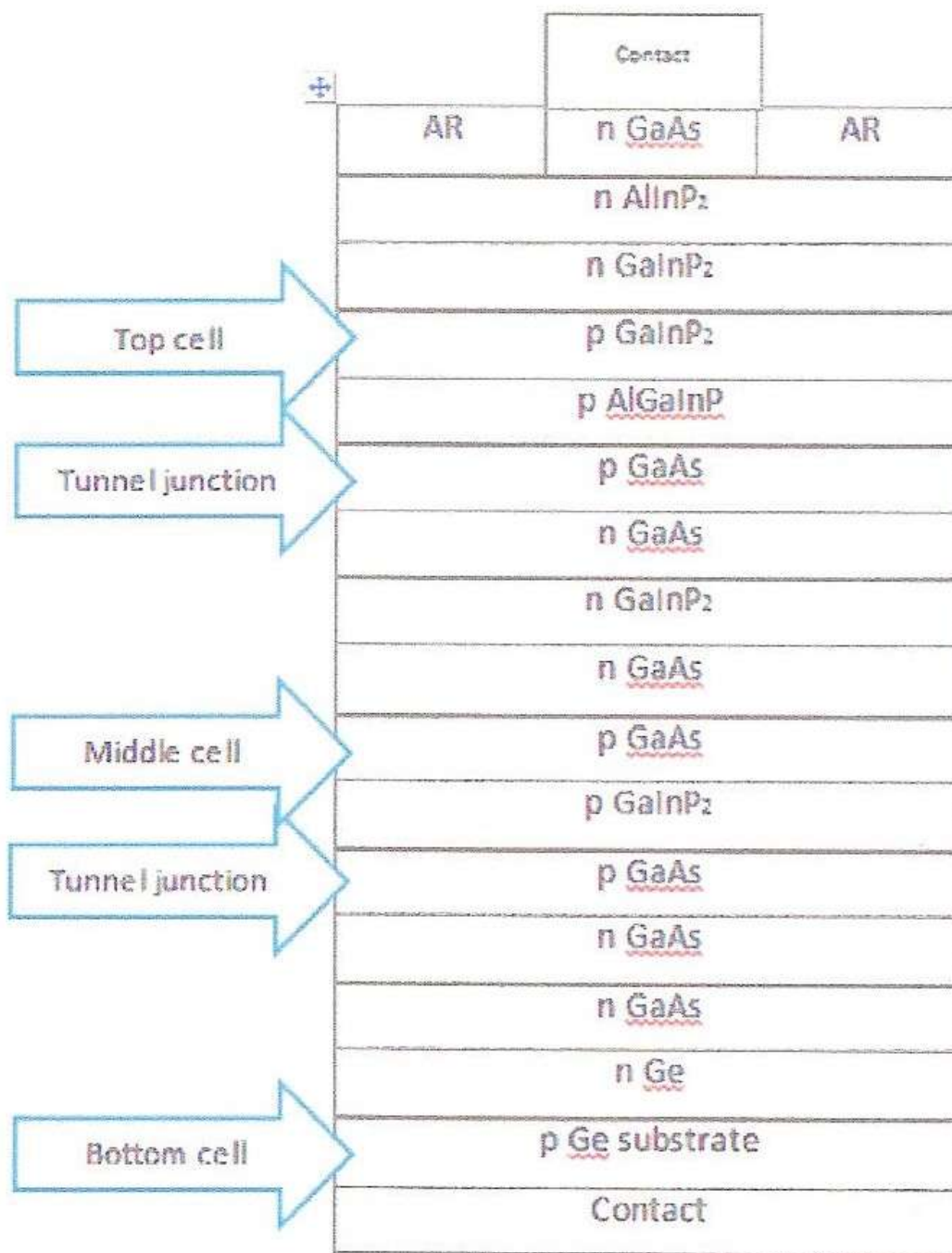
Όπως έχουμε ήδη πει, η πρώτη γενιά φωτοβολταϊκών κυψελών κυριαρχείται από το κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) ως δομικό υλικό. Ωστόσο, ορισμένοι επιστήμονες συμπεριλαμβάνουν σε αυτήν, επίσης, φωτοβολταϊκά στοιχεία με αρσενικούχο γάλλιο (GaAs).

Το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) είναι ένας σύνθετος ημιαγωγός από γάλλιο (Ga) και αρσενικό (As) που έχει παρόμοια δομή με το πυρίτιο.

Το ενεργειακό διάκενο του αρσενικούχου γαλλίου έχει τιμή 1,43 eV. Αυτό το εύρος μπορεί να αυξηθεί με την δημιουργία κράματος.

Η φωτοβολταϊκή κυψέλη στην οποία χρησιμοποιείται το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) έχει υψηλότερη απόδοση συγκριτικά με τις φωτοβολταϊκές κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου. Η απόδοση αυτή μπορεί να βελτιωθεί δημιουργώντας ένα κράμα με Al, In, P και Sb. Άλλα πλεονέκτημα του αρσενικούχου γαλλίου είναι η υψηλή θερμική αντίσταση και το ότι είναι πιο ελαφρύ συγκριτικά με το μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημά του είναι ότι το αρσενικούχο γάλλιο ως υλικό είναι ακριβό ενώ υψηλό είναι, επίσης, το κόστος κατασκευής της αντίστοιχης φωτοβολταϊκής κυψέλης.^[4]

Στην Εικόνα 6 μπορούμε να δούμε την βασική δομή μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης που κατασκευάζεται με αρσενικούχο γάλλιο.



Εικόνα 6 Δομή φωτοβολταϊκής κυψέλης από αρσενικόχο γάλλιο (GaAs).^[4]

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που αναφέραμε ως πρώτη γενιά απαιτούν υψηλά αρχικά κεφάλαια, αλλά μικρά έξοδα για την σωστή λειτουργία και διατήρησή τους. Η τιμή της ενέργειας που παρέχεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι αντιστρόφως ανάλογη

του χρόνου ζωής του. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα που βασίζονται στο κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) έχουν χρόνο ζωής 20-30 χρόνια. Στα περισσότερα συστήματα ο χρόνος απόσβεσης παραμένει μεγάλος, εκτός και αν τα οικονομικά προνόμια που παρέχουν οι κυβερνήσεις είναι αρκετά σημαντικά. Για τον λόγο αυτόν, πολλοί επιστήμονες και εταιρείες αναζητούν τρόπους μείωσης των αρχικών κεφαλαίων και των χρόνων απόσβεσης του κόστους, ώστε ο τομέας των φωτοβολταϊκών συστημάτων να αποτελέσει μια βιώσιμη τεχνολογία που θα μπορεί να υφίσταται χωρίς την ανάγκη υψηλών χρηματοδοτήσεων από τα κράτη. Η απαίτηση αυτή για μείωση του κόστους κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και, συνεπώς, ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου που αποτελεί την βασική μονάδα, είναι ο κύριος λόγος πίσω από την ανάπτυξη της τεχνολογίας των *λεπτών υμενίων (thin films)* που αναφέρονται ως *δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων*. Ο κύριος στόχος των επιστημόνων είναι να κατορθώσουν να εξισώσουν το κόστος ανά kWh που παρέχεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα με το κόστος ανά kWh που παρέχουν τα παραδοσιακά ενεργειακά μέσα. Ένας στόχος που παραμένει άπιαστος μέχρι στιγμής, αν και η τεχνολογική πρόοδος έχει επιφέρει μια εντυπωσιακή πτώση στο κόστος ανά Watt.

2. Δεύτερη Γενιά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Η πετρελαϊκή κρίση στην αρχή της δεκαετίας του '70 έδωσε το ερέθισμα για την ανάπτυξη της δεύτερης γενιάς φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στόχος της γενιάς αυτής ήταν η πρόοδος στον τομέα των φωτοβολταϊκών πλαισίων και η μείωση του κόστους \$/W μέσα από την απομάκρυνση περιττού υλικού. Η ανάγκη απομάκρυνσης περιττού υλικού οδήγησε στην χρήση λεπτών υμενίων (thin films).^[6] Αν και τα υμένια πυριτίου (Si) αναπτύχθηκαν ήδη πολλά χρόνια πριν, από την δεκαετία του '60, (στον τομέα της μικροηλεκτρονικής), ωστόσο μεσολάβησαν πολλά χρόνια για να ξεκινήσει η κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών με λεπτά υμένια πυριτίου που να διαθέτουν μια ικανοποιητική απόδοση. Η πρώτη επιστημονική δημοσίευση που αφορούσε φωτοβολταϊκές κυψέλες βασισμένες σε λεπτά υμένια άμορφου πυριτίου (a-Si) έγινε το 1976 (*Carlson and Wronski, 1976*). Η μεταφορά της τεχνολογίας αυτής σε πιο ευρεία παραγωγή και το εμπόριο σημειώθηκε τη δεκαετία του 80.

Οι τρεις βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών δεύτερης γενιάς που έχουν διαδοθεί στον εμπορικό τομέα βασίζονται στα εξής υλικά: το άμορφο πυρίτιο (a-Si και

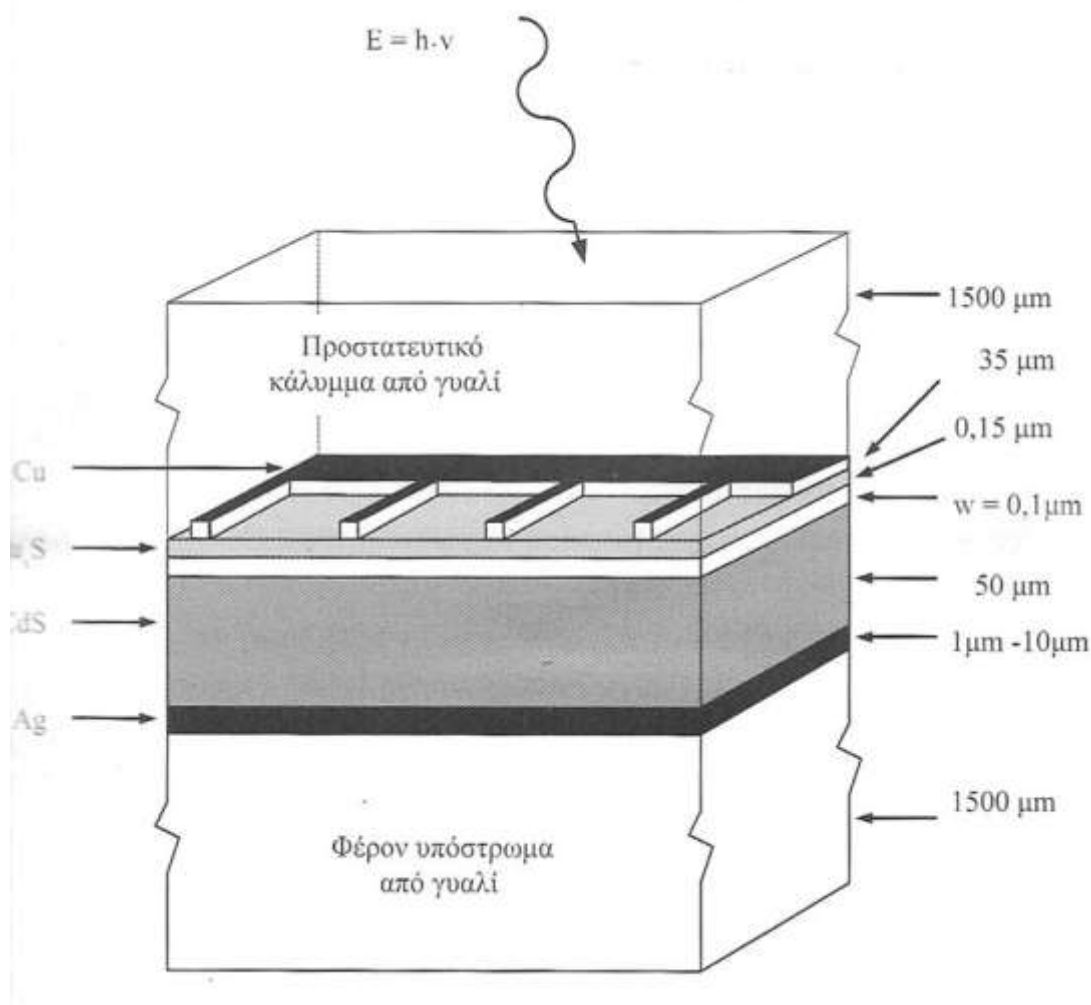
a-Si/μc-Si), το τελλουριούχο κάδμιο και σεληνιούχο κάδμιο (CdTe /CdSe) και τα υλικά δισεληνιούχος ινδιδιούχος χαλκός CuInSe₂ το οποίο αναφέρεται και ως CIS και δισεληνιούχος γαλλιδιούχος ινδιδιούχος χαλκός CuInGaSe₂ ή σε συντομογραφία CIGS. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται βιομηχανικά ή εμπίπτουν στην κατηγορία αυτή είναι η δομή (p/n) Cu_xS/CdS και οι ετεροδομές (n/p) AlAs/GaAs και GaAlAs/GaAs, που παρέχουν μεγάλες εργαστηριακές αποδόσεις.^[5]

Τα πλεονεκτήματα που μας παρέχει η δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων συγκριτικά με αυτά της πρώτης γενιάς, είναι ιδιαιτέρως σημαντικά ενώ μας δίνουν επιπρόσθετες επιλογές εφαρμογής των συγκεκριμένων στοιχείων. Αρχικά, πρέπει να αναφέρουμε ότι ένα από τα πιο σημαντικά προτερήματα είναι το μειωμένο κόστος κατασκευής συγκριτικά με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si), καθώς απαιτείται πολύ μικρότερη ποσότητα ημιαγωγικού υλικού για την ίδια απορρόφηση φωτός (έως 99% λιγότερο υλικό από το κρυσταλλικό πυρίτιο). Το κόστος των υποστρωμάτων είναι επίσης οικονομικό.^[7] Στο μειωμένο κόστος κατασκευής συμβάλλει, επίσης, η σύντομη διαδικασία κατασκευής των νέων φωτοβολταϊκών στοιχείων. Πέρα από αυτό μπορεί να επιτευχθεί χαμηλό κόστος \$/W. Ακόμη, όπως ήδη έχουμε πει, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεύτερης γενιάς έχουν μικρή μάζα άρα και βάρος και, παράλληλα, έχουν την ιδιότητα να μπορούν εφαρμοστούν πάνω σε πολύ ευλύγιστα και ελαφριά υλικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά δίνουν την δυνατότητα να μπορούν να τοποθετούνται φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σε κτίρια, π.χ. στέγες ή άλλες επιφάνειες κτιρίων(φωτοβολταϊκά ενσωματωμένα σε κτίρια, BIVP) χωρίς κάποια ιδιαίτερα ισχυρή υποστήριξη.

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα, δεν θα μπορούσαμε να μην αναφέρουμε την μειωμένη απόδοση συγκριτικά με τις φωτοβολταϊκές κυψέλες πυριτίου (σε ημιαγωγικούς δίσκους) πρώτης γενιάς. Επιπλέον, το άμορφο πυρίτιο (a-Si) δεν παρουσιάζει σταθερότητα. Παράλληλα, ένα μειονέκτημα που προκαλεί προβληματισμό είναι ότι ορισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία λεπτών υμενίων παρουσιάζουν τοξικότητα. Για παράδειγμα σε ορισμένες χώρες η χρήση του καδμίου έχει τεθεί υπό περιορισμό και απαγορεύεται η χρήση σε οικιακές εγκαταστάσεις των ηλεκτρικών διατάξεων που το περιλαμβάνουν ακόμη και σε εξαιρετικά μικρές περιεκτικότητες.^[5] Τέλος, παρατηρείται και μία μείωση της απόδοσής τους σε βάθος χρόνου, στοιχεία που δεν μπορούν να μας αφήσουν αδιάφορους.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων κατασκευάζονται από την εναπόθεση τουλάχιστον δύο λεπτών ημιαγώγιμων υμενίων (πάχους περίπου 1 μm) πάνω σε κατάλληλο υπόστρωμα. Το υπόστρωμα μπορεί να είναι υάλινη επιφάνεια ή μεταλλική επιφάνεια ή κρύσταλλος διαφορετικού ημιαγωγού. Τα ημιαγώγιμα υμένια (ημιαγωγός τύπου p και ημιαγωγός τύπου n) τοποθετούνται στην άνω όψη, η οποία δέχεται τον φωτισμό, και εγκαθιστούν το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού που απαιτείται για τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Όταν το κάθε υμένιο αποτελείται από διαφορετικό ημιαγώγιμο υλικό που παρουσιάζει διαφορετική τιμή ενεργειακού διακένου, τότε η δημιουργούμενη επαφή p-n χαρακτηρίζεται ως ετεροεπαφή (heterojunction). Σε αντίθετη περίπτωση χαρακτηρίζεται ως ομοεπαφή (homojunction).^[5]

Στην Εικόνα 7 μπορούμε να δούμε ένα κλασσικό παράδειγμα φωτοβολταϊκού στοιχείου λεπτού υμενίου που βασίζει τη λειτουργία του στην επαφή θειούχου χαλκού /θειούχου καδμίου ($\text{Cu}_x\text{S}/\text{CdS}$). Το ενδιάμεσο ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού έχει εύρος $w=0,1\mu\text{m}$. Τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από Cu (εμπρόσθια όψη) και Ag (οπίσθια όψη). Η όλη δομή εσωκλείεται σε ανθεκτικό γυαλί, που αξιοποιείται ως υπόστρωμα και ως μέσο προστασίας.



Εικόνα 7 Η δομή των υλικών και οι διαστάσεις ενός κλασικού φωτοβολταϊκού στοιχείου τύπου λεπτού υμενίου που βασίζει τη λειτουργία του στην επαφή θειούχου χαλκού/ θειούχου καδμίου ($\text{Cu}_x\text{S}/\text{CdS}$). ^[5]

Όσον αφορά τους επιστήμονες, θεωρούν δύσκολο να υπάρξει κάποια πρόοδος των φωτοβολταϊκών στοιχείων δεύτερης γενιάς τα οποία είναι βασισμένα σε υλικά όπως το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) και το σεληνιούχο γαλλιούχο ινδιούχο χαλκό (CIGS). Αυτό θεωρείται ως απόρροια θεμάτων που δεν έχουν επιλυθεί ακόμη και σχετίζονται με την μικρή πηγή των κύριων υλικών όπως του ινδίου (In) και τη μικρή ομοιομορφία τους σε μεγαλύτερη κλίμακα δηλαδή σε επίπεδο φωτοβολταϊκού πανέλ. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται κάποια διαφορά ανάμεσα στις εργαστηριακές αποδόσεις και τις καλύτερες δυνατές αποδόσεις των αντίστοιχων φωτοβολταϊκών πλαισίων, όπως

φαίνεται από τα μετρούμενα στοιχεία : 10,7% για την κυψέλη που βασίζεται στο τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) από 16,5% για το αντίστοιχο πάνελ και 13,4% για την κυψέλη που κατασκευάζεται από σεληνιούχο ινδιούχο γαλλιούχο χαλκό (CIGS) από 18,4% για το αντίστοιχο πάνελ. Αναφορικά με το σεληνιούχο ινδιούχο χαλκό (CIS), η κατασκευή του δεν παρουσιάζει κατασκευαστικό ενδιαφέρον για μεγάλες επενδύσεις, εξαιτίας της πολυπλοκότητας των υλικών, όπως είναι ο χαλκός (Cu) ο οποίος παρουσιάζει αστάθεια και αντιδραστικότητα με άλλα υλικά. Επιπλέον, είναι γεγονός πως η τοξικότητα του τελλουριούχου καδμίου (CdTe) τυγχάνει μειωμένης αποδοχής για ένα φωτοβολταϊκό προϊόν λόγω της επιθυμίας για «πράσινη» ενέργεια.^[8]

Παρόλη την αργή διάδοση της δεύτερης γενιάς φωτοβολταϊκών, παραμένει ελπιδοφόρα η μείωση του κόστους παραγωγής και του κόστους \$/W μέσω της χρήσης λιγότερου υλικού σε επίπεδο ευρείας παραγωγής. Δεδομένης της επιστημονικής έρευνας που έχει διεξαχθεί τα τελευταία χρόνια πάνω στην δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων, φαίνεται πως η περαιτέρω εξέλιξή τους αναμένεται να βασιστεί κυρίως στα στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si).^[9]

2.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου (a-Si)

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες δεύτερης γενιάς που ερευνήθηκαν πρώτα ήταν οι κυψέλες άμορφου πυριτίου (a-Si). Η πρώτη επιστημονική δημοσίευση για το είδος αυτών των κυψελών έγινε το 1976 (Carlson and Wronski, 1976) και οι πρώτες κυψέλες άμορφου πυριτίου (a-Si) λεπτών υμενίων κάνανε την εμφάνισή τους στην αγορά την δεκαετία του '80.^[6] Οι τελευταίες μαζί με τις φωτοβολταϊκές κυψέλες που αποτελούνται από τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) είναι οι δύο πιο ανεπτυγμένες κατηγορίες φωτοβολταϊκών κυψελών που ανήκουν στην τεχνολογία των λεπτών φιλμ.

Η δομή του άμορφου πυριτίου (a-Si) διαφέρει από αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) στο ότι τα άτομα πυριτίου είναι τοποθετημένα σε τυχαίες θέσεις, άσχετες η μία από την άλλη. Αυτή η «αταξία» στην δομή του ατόμου έχει σημαντική επίδραση στις ηλεκτρονικές ιδιότητες του υλικού^[2] δημιουργώντας ένα υψηλότερο ενεργειακό διάκενο (το εύρος του μεταβάλλεται μεταξύ 1,2eV-1,6eV)^[5] από αυτό του κρυσταλλικού πυριτίου (1,1eV).

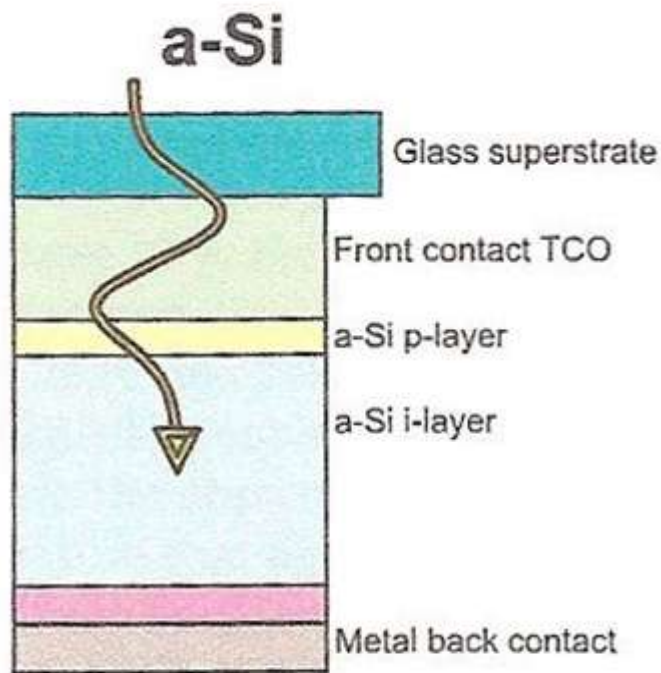
Η τιμή αυτή του ενεργειακού διακένου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) και είναι τέτοια που προσδίδει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si) πλεονεκτήματα έναντι των φωτοβολταϊκών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si). Τα πλεονεκτήματα αυτά αναφέρονται στην καλύτερη συμπεριφορά σε υψηλότερες θερμοκρασίες αλλά και την καλύτερη ανταπόκριση στη φωτοβολταϊκή μετατροπή, δεδομένου ότι η ιδανική τιμή του ενεργειακού διακένου που διασφαλίζει την μέγιστη απορρόφηση στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 1,45eV. Ο συντελεστής απορρόφησης του άμορφου πυριτίου (a-Si) είναι μεγαλύτερος του αντίστοιχου συντελεστή κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si), (με αποτέλεσμα το άμορφο πυρίτιο (a-Si) να συμπεριφέρεται ανάλογα με τα υλικά που έχουν άμεσο ενεργειακό διάκενο). Το γεγονός αυτό δίδει πλεονεκτήματα στη φωτοβολταϊκή μετατροπή, αφού επιτυγχάνει την πλήρη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε βάθος της τάξης του 1μm από την επιφάνειά του.^[5] Σύμφωνα, μάλιστα, με τους επιστήμονες η φωτοβολταϊκή κυψέλη άμορφου πυριτίου (a-Si) παρουσιάζει 40 φορές μεγαλύτερη απορροφητικότητα φωτός από μία κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si).^[4] Το κυριότερο, όμως, πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών κυψελών άμορφου πυριτίου (a-Si) έγκειται στην καλύτερη διατήρηση της απόδοσής τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας συγκριτικά με άλλα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ενδεικτικά, αναφέρουμε το παρακάτω παράδειγμα, σύμφωνα με το οποίο η μείωση της παρεχόμενης μέγιστης ισχύος P_{MAX} ανά °C αύξησης της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου άμορφου πυριτίου (a-Si) είναι -0,2%, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής για τα υπόλοιπα φωτοβολταϊκά στοιχεία (mono, poly, ribbon) είναι της τάξης του -0,4% έως - 0,5%.^[5]

Το σπουδαιότερο μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών κυψελών άμορφου πυριτίου (a-Si) είναι η χαμηλή απόδοσή τους. Για παράδειγμα, οι λαμβανόμενες αποδόσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου (a-Si) είναι μόλις 6%. Για το λόγο αυτό, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si) σπάνια επιλέγονται για μια συμβατική εγκατάσταση, εκτός εάν οι υψηλές θερμοκρασίες το απαιτούν. Άλλο ένα, εξίσου, σημαντικό μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών κυψελών άμορφου πυριτίου (a-Si) είναι η μεγάλη μείωση της ισχύς εξόδου σε βάθος χρόνου (15%-35%), καθώς ο ήλιος υποβαθμίζει την λειτουργία τους.^[7]

Οι φωτοβολταϊκές διατάξεις που κατασκευάζονται από άμορφο πυρίτιο (a-Si) βασίζουν την λειτουργία τους σε φράγματα δυναμικού Schottky και, συνήθως, ένα λεπτό στρώμα άμορφου πυριτίου (a-Si) εναποτίθεται σε ένα φύλλο ανοξειδωτού

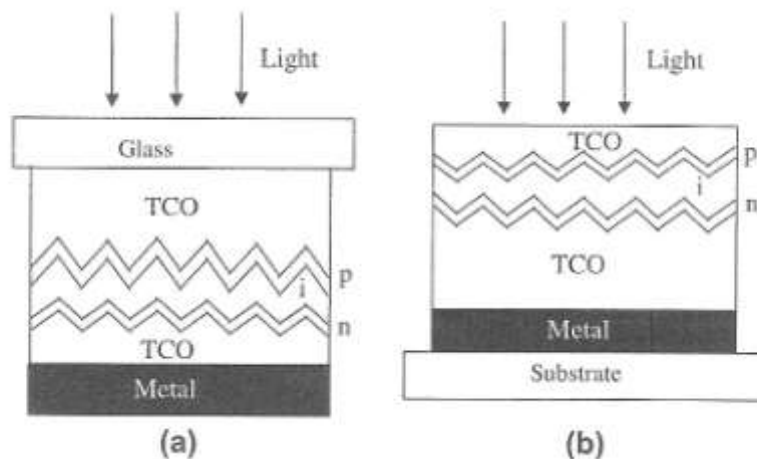
χάλυβα, που αποτελεί το υπόστρωμα και αρκεί να σχηματίσει την δίοδο και συγχρόνως την οπίσθια ωμική επαφή.^[5]

Εναλλακτικά, η απλή δομή ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου άμορφου πυριτίου (a-Si) μπορεί επίσης να φανεί στην Εικόνα 8 όπου χρησιμοποιείται γυαλί ως *υπέρστρωμα* ή *επίστρωμα* (superstrate).



Εικόνα 8 Φωτοβολταϊκό στοιχείο λεπτού υμενίου με άμορφο πυρίτιο (a-Si). Η μπροστινή επαφή TCO αποτελείται από διαφανές αγώγιμο οξείδιο (transparent conducting oxide).^{[3], [9]}

Οι δύο μορφές φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου (a-Si) που μόλις αναφέραμε μπορούν να φανούν στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9 (α) Αριστερά φαίνεται ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με άμορφο πυρίτιο (a-Si) σε «υπέρστρωμα» (superstrate) και p-i-n σχηματισμό ενώ (β) δεξιά ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με άμορφο πυρίτιο (a-Si) σε «υπόστρωμα» (substrate) και n-i-p σχηματισμό. Το φως επιτρέπεται πάντα από την p-πλευρά. ^[6]

2.2. Φωτοβολταϊκά πλαίσια τελεριούχου καδμίου (CdTe)

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο που είναι βασισμένο στο τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) είναι σήμερα το πιο πετυχημένο εμπορικά φωτοβολταϊκό στοιχείο της κατηγορίας φωτοβολταϊκών κυψελών λεπτών υμενίων. Η ανάπτυξή του ως υλικό για χρήση σε φωτοβολταϊκή κυψέλη πάει πίσω στην δεκαετία του 1980.

Τα αρχικά στοιχεία που επιδείχθηκαν την δεκαετία αυτήν παρουσίαζαν απόδοση γύρω στο ~10%. Διάφορα βήματα ακολούθησαν από τότε με σκοπό την εξέλιξη των αντίστοιχων φωτοβολταϊκών κυψελών τελλουριούχου καδμίου (CdTe), όπως η εφαρμογή γυαλιού καλύτερης ποιότητας, η χρήση πιο διάφανων αγωγικών οξειδίων καθώς και η εισαγωγή διάφανου υμενίου υψηλής αντίστασης κάτω από την επαφή CdS. Στα μέτρα αυτά προστέθηκαν οι υψηλότερες θερμοκρασίες εναπόθεσης και η εξελεγχόμενη χρήση χλωρίου (Cl) και τέλος η εισαγωγή και ανάμειξη νέων μορίων (doping). Όλα αυτά είχαν ως αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης των κυψελών, που έφτασε σε τιμές μεγαλύτερες >16%. Η πιο σημαντική αύξηση, ωστόσο, της απόδοσης επετεύχθη στο χρονικό διάστημα από το 2013 έως το 2014 όταν σε μια μικρή περιοχή κυψελών παρατηρήθηκε αύξηση της απόδοσης της τάξης του 20% για τις

φωτοβολταϊκές κυψέλες τελλουριούχου καδμίου (CdTe) και μια κορυφαία απόδοση 17% για τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά πλαίσια.^[10]

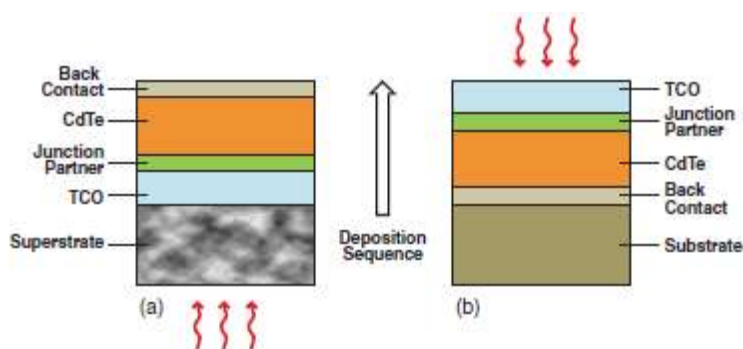
Ένα από τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων τελλουριούχου καδμίου (CdTe) είναι, όπως προαναφέραμε, η υψηλή απόδοση τόσο των κυψελών όσο και των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Επιπλέον, το ενεργειακό διάκενο της τεχνολογίας αυτής θεωρείται ιδανικό με τιμή γύρω στο $\sim 1,45\text{eV}$ ^[6] ενώ και οι σταθερές απορρόφησης του φωτός είναι υψηλές. Στα παραπάνω ευνοϊκά χαρακτηριστικά έχουμε να προσθέσουμε το μικρότερο χρόνο ενεργειακής απόσβεσης ($\sim 0,8$ χρόνια) και τις μικρότερες εκπομπές από κάθε άλλη τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι εκπομπές αυτές αναφέρονται στο σύντομο κύκλο ζωής αέριο του θερμοκηπίου, στο διοξείδιο του άνθρακα καθώς και σε άλλα μολυσματικά και βαρέων μετάλλων αέρια.

Ένα από τα μειονεκτήματα που απασχολούν τους επιστήμονες είναι η μικρή διαθεσιμότητα τελλούριου (Te) στην γη. Το εμπόδιο αυτό, ωστόσο, φαίνεται να περιορίζεται με την βελτίωση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων τελλουριούχου καδμίου (CdTe) με την πάροδο του χρόνου. Ένα άλλο θέμα που προκαλεί προβληματισμό είναι η τοξικότητα του καδμίου (Cd). Οι επιπτώσεις τόσο στην υγεία όσο και στο περιβάλλον των φωτοβολταϊκών πλαισίων που η κατασκευή τους είναι βασισμένη στο τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας πλήθους ανεξάρτητων οργανισμών τόσο στην Ευρώπη όσο και στις Η.Π.Α.. Το 2003 δύο επιστήμονες, οι *Fthenakis (Brookhaven National Laboratory, USA)* και *Zweibel (NREL, USA)*, παρουσίασαν σε συνέδριο του National Center for Photovoltaics την μελέτη τους σχετικά με τις ανεπιθύμητες επιδράσεις του καδμίου (Cd). Σύμφωνα με την έρευνά τους, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τελλουριούχου καδμίου (CdTe) είναι σχεδόν ακίνδυνα με μηδενικές εκπομπές και ουδεμία συσχετιζόμενη επίπτωση στην υγεία. Αξίζει εδώ να αναφέρουμε τα εξής: το κάδμιο απελευθερώνεται στο περιβάλλον με πολλούς τρόπους, π.χ. από λιπάσματα που περιέχουν φωσφορικό άλας, φλεγόμενα καύσιμα, εξόρυξη, διαδικασίες επεξεργασίας μετάλλων, παραγωγή τσιμέντου και ρίψης μεταλλικών προϊόντων ως απορρίμματα στο περιβάλλον. Όμως, στις περισσότερες από αυτές τις περιπτώσεις η έκθεση του ανθρώπου σε κίνδυνο είναι πολύ μικρή. Ακόμη και στην περίπτωση ρίψης μπαταριών τύπου Ni-Cd ως απορριμμάτων, η συνεισφορά στην ανθρώπινη έκθεση καδμίου (Cd) είναι πολύ μικρή αφού το κάδμιο (Cd) είναι προστατευμένο σε καλά σφραγισμένες δομές. Η μεγαλύτερη έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού στο κάδμιο (Cd) μπορεί να προέλθει από την κατάποσή του, μέσω λιπασμάτων, λύματα υπονόμων και απευθείας απελευθέρωσης στην ατμόσφαιρα. Αν και

η συνεχής έκθεση στο στοιχείο του καδμίου (Cd) μπορεί να έχει επιβλαβείς παρενέργειες, ως καρκινογόνο, ωστόσο υπάρχουν λίγα δεδομένα σχετικά με την τοξικότητά του. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα, όμως, της έρευνας είναι ότι η ένωση του τελλουριούχου καδμίου (CdTe) είναι πιο σταθερή και λιγότερο διαλυτή από το στοιχείο του καδμίου (Cd) και για τον λόγο αυτό είναι πολύ λιγότερο τοξική.

Η μόνη περίπτωση που θα μπορούσε, πιθανόν, να προκαλέσει πρόβλημα είναι η περίπτωση που ένα κτίριο φλεγόταν. Ακόμη, όμως και σε αυτήν την πιθανότητα, όπου η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί φτάνει τους 900°C, δεν υπάρχει κανένας λόγος ανησυχίας αφού το σημείο τήξεως του τελλουριούχου καδμίου (CdTe) είναι αρκετά μεγαλύτερο (1041 °C). Εκτός αυτού, η πίεση του ατμού στους 800 °C για το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) είναι 0,003 atm, κάτι που ελαχιστοποιεί ακόμη περισσότερο τον φόβο σε περίπτωση πυρκαγιάς και, μάλιστα, οποιαδήποτε εκπομπή καδμίου (Cd) είναι απίθανη όταν η χημική ένωση είναι καλά σφραγισμένη υπό τα υάλινα κελύφη.^[6]

Η κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυψελών τελλουριούχου καδμίου (CdTe) μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους που διαφέρουν ως προς την διάταξη, είτε δημιουργώντας μια δομή με διάταξη *υπερστρώματος* (superstrate) είτε μία δομή με διάταξη *υποστρώματος* (substrate).^[10] Οι δύο αυτές διαφορετικές δομές αναπαριστώνται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10 Στην αριστερή εικόνα 10(a), έχουμε μια δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου τελλουριούχου καδμίου (CdTe) με διάταξη υπερστρώματος, ενώ στην δεύτερη εικόνα 10(b) έχουμε μια δομή με διάταξη υποστρώματος.^[10]

Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 10(a), η δομή σε σχηματισμό υπερεστρώματος δημιουργείται με μια εναπόθεση κατά σειρά των υλικών: διαφανές αγώγιμο οξείδιο (transparent conductive oxide, TCO) - επαφή - τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) - πίσω επαφή επάνω σε ένα διαφανές φύλλο που λειτουργεί ως υπέρστρωμα και μέσω του οποίου το φως περνά στην συσκευή. Στην Εικόνα 10(b) παρατηρούμε ότι στη δομή σε σχηματισμό υποστρώματος αντιστρέφεται η σειρά εναπόθεσης των υλικών και τοποθετούνται ως εξής : πίσω επαφή - τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) - επαφή - διαφανές αγώγιμο οξείδιο (transparent conductive oxide, TCO) επάνω στο υπόστρωμα, το οποίο δεν χρειάζεται να είναι διαφανές. Όπως φαίνεται από την εικόνα, στην περίπτωση αυτή το φως διαπερνά την συσκευή από την μεριά του διαφανούς αγώγιμου οξειδίου (TCO). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με την μεγαλύτερη απόδοση καθώς και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που κυκλοφορούν στο εμπόριο κατασκευάζονται σε σχηματισμό υπερεστρώματος.

Προκειμένου να αποκτήσουμε μεγάλη απόδοση η τυπική διαδικασία κατασκευής μιας σύγχρονης φωτοβολταϊκής κυψέλης λεπτού υμενίου τελλουριούχου καδμίου (CdTe) με υπέρστρωμα ακολουθεί κάποια συγκεκριμένα στάδια. Αυτά περιλαμβάνουν την εναπόθεση ενός στρώματος διαφανούς αγώγιμου οξειδίου (TCO), τον σχηματισμό μιας στοίβας θειούχου καδμίου (CdS)/ τελλουριούχου καδμίου (CdTe) επάνω στο διαφανές αγώγιμο οξείδιο (TCO), την χρήση χλωρίου (Cl), τον καθαρισμό της επιφάνειας του υμενίου τελλουριούχου καδμίου (CdTe), την πρόσθεση προσμίξεων και τον σχηματισμό της πίσω επαφής.

Αναφορικά με την κατασκευή μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης τελλουριούχου καδμίου (CdTe) με υπόστρωμα, η επίτευξη μιας υψηλής απόδοσης αποτελεί μια πρόκληση. Η σχεδίαση της φωτοβολταϊκής κυψέλης απαιτεί τον σχηματισμό και τη διατήρηση μιας πίσω επαφής χαμηλής αντίστασης παράλληλα με την δημιουργία ενός υμενίου τελλουριούχου καδμίου (CdTe) υψηλής ποιότητας και μιας διεπαφής. Το πρόβλημα με το τελλουριούχο κάδμιο (CdTe) είναι η υψηλή συγγένεια των οπών ~5,8 eV με αποτέλεσμα να απαιτείται για την επαφή ένα υλικό που να λειτουργεί πολύ καλά. Όμως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία με υπόστρωμα, παρόλο που η επιφάνεια της διεπαφής είναι διαθέσιμη προς χειρισμό, ωστόσο η πίσω επαφή υπόκειται σε υποβάθμιση κατά την διάρκεια των επόμενων σταδίων που λαμβάνουν μέρος υπό υψηλές θερμοκρασίες. Πρόσφατα, παρουσιάστηκε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη με δομή υποστρώματος με απόδοση 11,3%. Στην κυψέλη αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα υάλινο υπόστρωμα πυριτιούχου βορίου, μια επαφή μολυβδαίνιου (Mo) και ένα στρώμα μιας

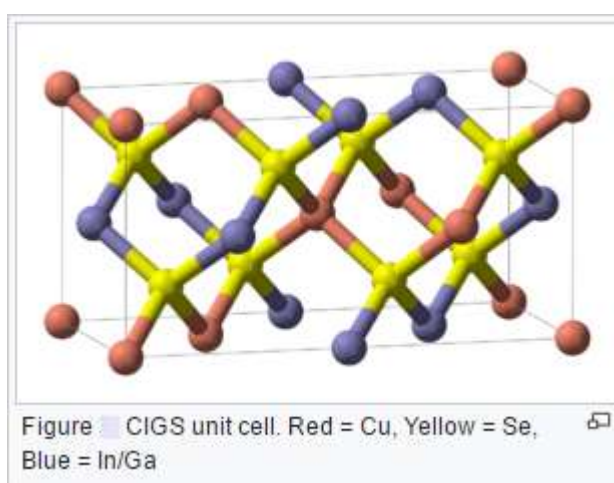
στοίβας Cu/Te/MoO_3 , ενώ οι θερμοκρασίες διατηρηθήκανε χαμηλότερα από 400°C . Οι συσκευές με υποστρώματα φύλλων μετάλλων αποδίδουν μέχρι στιγμής λιγότερο από 10%.

2.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια δισεληνιούχου ινδιούχου χαλκού (CuInSe_2 , CIsSs) και δισεληνιούχου γαλλιούχου ινδιούχου χαλκού (CuInGaSe_2 , CIGSs)

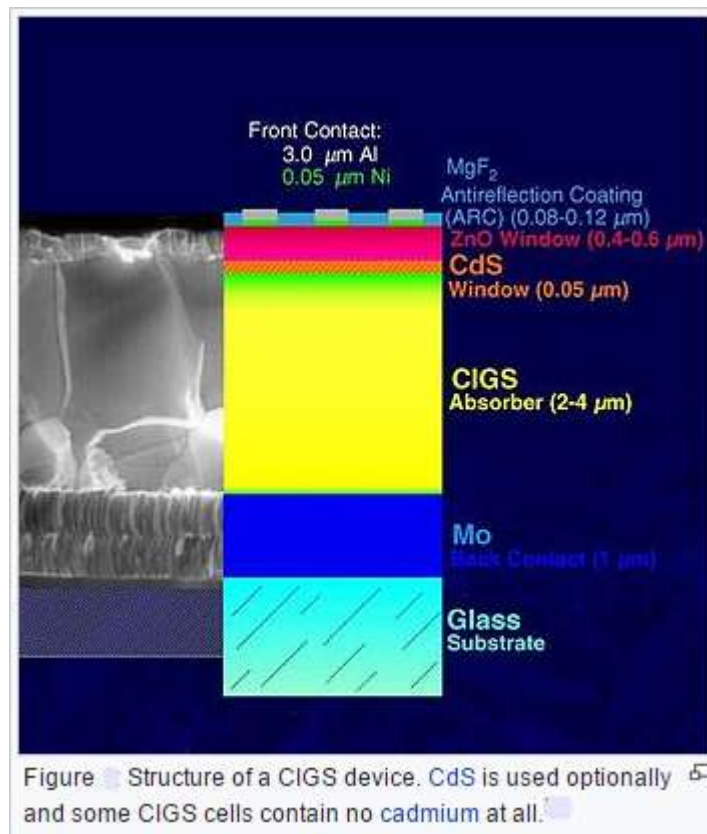
Στην δεύτερη γενιά των φωτοβολταϊκών κυψελών λεπτών υμενίων ανήκουν, επίσης, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δισεληνιούχου (γαλλιούχου) ινδιούχου χαλκού (χρησιμοποιείται η σύντηξη CI(G)Ss). Ο δισεληνιούχος (γαλλιούχος) ινδιούχος χαλκός CI(G)S είναι μια I-III-VI₂ ημιαγώγιμη χημική ένωση που συνίσταται από χαλκό (Cu), ίνδιο (In), γάλλιο (Ga) και σελήνιο (Se). Η ένωση αυτή είναι ένα στερεό διάλυμα δισεληνιούχου ινδιούχου χαλκού CIS και δισεληνιούχου γαλλιούχου χαλκού CIS, με χημικό τύπο $\text{CuIn}_x\text{G}_{(1-x)}\text{Se}_2$ όπου η τιμή του x μπορεί να κυμαίνεται από 1 (καθαρός δισεληνιούχος ινδιούχος χαλκός) έως 0 (καθαρός δισεληνιούχος γαλλιούχος χαλκός).

Η δομή στο χώρο της ένωσης δισεληνιούχου (γαλλιούχος) ινδιούχου χαλκού CI(G)Ss φαίνεται στην Εικόνα 11. Στην Εικόνα 12 μπορούμε να δούμε ένα κοινό φωτοβολταϊκό στοιχείο δισεληνιούχου (γαλλιούχου) ινδιούχου χαλκού CI(G)S . Ένα γυαλί νατρασβεστίου πάχους περίπου 1-3 χιλιοστών χρησιμοποιείται, συνήθως, ως υπόστρωμα, καθώς τα φύλλα γυαλιού περιέχουν νάτριο, το οποίο έχει αποδειχθεί ότι αποφέρει μία σημαντική αύξηση στην τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} . Παρόλο αυτά, πολλές εταιρείες αναζητούν ελαφρύτερα και πιο ευλύγιστα υποστρώματα όπως είναι το πολυαμίδιο (πολυμερές από ακυλονιτρικά μονομερή) ή τα μεταλλικά φύλλα. Ένα μεταλλικό στρώμα μολυβδαινίου (Mo) εναποτίθεται, συνήθως μέσω διασκόρπισης, το οποίο λειτουργεί ως πίσω επαφή και αντανάκλα το περισσότερο μη απορροφημένο φως πίσω στο CIGS για απορρόφηση. Μετά την εναπόθεση του στρώματος μολυβδαινίου (Mo) ακολουθεί ένα στρώμα απορρόφησης p-type CIGS, που κατασκευάζεται με διάφορες μεθόδους. Επάνω στο στρώμα απορρόφησης τοποθετείται ένα διαχωριστικό λεπτό στρώμα n- τύπου. Το διαχωριστικό αυτό στρώμα αποτελείται, συνήθως, από θειούχο κάδμιο (CdS) το οποίο εναποτίθεται μέσω χημικής πλύσης. Το στρώμα αυτό επικαλύπτεται με μια λεπτή στρώση οξειδίου του ψευδαργύρου (i-ZnO) που, επίσης, καλύπτεται από ένα λεπτότερο στρώμα οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) νοθευμένου

με αλουμίνιο (αργίλιο, Al). Η στρώση οξειδίου του ψευδαργύρου (i-ZnO) χρησιμοποιείται για την προστασία του στρώματος θειούχου κάδμιου (CdS) και απορρόφησης από την βλάβη που προκαλείται από την διασκόρπιση κατά την εναπόθεση του στρώματος του οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) : το αλουμίνιο (Al), συνήθως, τοποθετείται μέσω μεθόδου διασκόρπισης, που θεωρείται ως μια επιβλαβής διαδικασία. Το νοθευμένο με αλουμίνιο (Al) στρώμα οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) λειτουργεί ως ένα διαφανές αγωγίμο οξείδιο το οποίο συλλέγει και μετακινεί ηλεκτρόνια εκτός της κυψέλης ενώ απορροφά όσο λιγότερο ηλιακό φως είναι δυνατόν.



Εικόνα 11 Δομή στον χώρο της βασικής μονάδας μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης δισεληνιούχου (γαλλιούχου) ινδιούχου χαλκού C(G)ISs. Με κόκκινο χρώμα αναπαριστώνται τα άτομα χαλκού (Cu), με κίτρινο τα άτομα σεληνίου (Se) και τέλος με μπλε τα άτομα ινδίου (In) και γαλλίου (Ga).^[11]



Εικόνα 12 Δομή μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης δισηληνιούχου γαλλιούχου ινδιούχου χαλκού (CIGS). Το σεληνιούχο κάδμιο (CdS) χρησιμοποιείται προαιρετικά ενώ κάποιες κυψέλες δεν περιέχουν καθόλου κάδμιο (Cd).^[11]

Στα πλεονεκτήματα της ομάδας φωτοβολταϊκών κυψελών CI(G)Ss δεσπόζει η υψηλή οπτική απορρόφηση που παρουσιάζει, με συντελεστή απορρόφησης μεγαλύτερο από $10^5/\text{cm}$. Επίσης, εκτός από την υψηλή οπτική απορρόφηση, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία CI(G)Ss παρουσιάζουν μεταβλητά οπτικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, τα οποία οι επιστήμονες μπορούν να χειρίζονται και να ρυθμίζουν ανάλογα τις συγκεκριμένες ανάγκες μιας δεδομένης συσκευής. Στα πλεονεκτήματα πρέπει να αναφέρουμε και την μεγάλη ευλυσία των κυψελών (βλ. Εικόνα 13). Ωστόσο, σε σύγκριση με τις κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) έχουν μικρότερη αποδοχή στο εμπόριο.



Εικόνα 13 Εικόνα μιας ευλύγιστης φωτοβολταϊκής κυψέλης CIS.^[11]

Η καλύτερη απόδοση μετατροπής για τις φωτοβολταϊκές κυψέλες CIGSs επετεύχθη το Σεπτέμβριο του 2014 με τιμή 21,7%. Προηγουμένως, μια ομάδα επιστημόνων του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμης Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory) είχε καταφέρει μια απόδοση μετατροπής 19,9%, μία τιμή ρεκόρ για την εποχή, τροποποιώντας την επιφάνεια CIGS ώστε να ομοιάζει με CIS. Τα δείγματα ήταν εναποτεθειμένα σε γυαλί, το οποίο σήμαινε πως τα προϊόντα σε ήταν ευλύγιστα μηχανικά. Το 2013 επιστήμονες των Ομοσπονδιακών Ελβετικών Εργαστηρίων για την Επιστήμη Υλικών και Τεχνολογίας (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology) ανέπτυξαν φωτοβολταϊκές κυψέλες CIGS σε ευλύγιστα πολυμερικά φύλλα με μία νέα απόδοση ρεκόρ τιμής 20,4%. Το γεγονός αυτό κατέδειξε τόσο την υψηλή απόδοση όσο και την πολύ καλή ευλυγισία των φωτοβολταϊκών αυτών στοιχείων. Σε επίπεδο φωτοβολταϊκού πλαισίου το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας των Η.Π.Α (U.S National Renewable Energy Laboratory) διαπίστωσε μια απόδοση πλαισίου τιμής 13,8% το οποίο αναφερόταν σε ένα μεγάλο σε διάσταση παραγόμενο φωτοβολταϊκό πάνελ και απόδοση 13,4 % της συνολικής επιφάνειας για κάποια παραγόμενα πλαίσια. Υψηλότερες αποδόσεις (έως περίπου 30%) είναι δυνατόν να επιτευχθούν με την χρήση οπτικών για την συλλογή του προσπίπτοντος φωτός. Η χρήση γαλλίου μάλιστα διευρύνει το οπτικό εύρος ζώνης του στρώματος CIGS συγκριτικά με το καθαρό CIS, αυξάνοντας έτσι την τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} . Στον Πίνακα 1 παρατίθενται αποδόσεις που έχουν καταγραφεί εντός εργαστηρίου για φωτοβολταϊκές κυψέλες CIGS με διάφορα υποστρώματα.

Substrate	Glass	Steel	Aluminum	Polymer
Efficiency	21.7%	17.7%	16.2%	20.4%
Institute	ZSW ^(b)	Empa	Empa	Empa
Source: Swissolar, Flisom – presentation November 2014				
Note: ^(a) lab cell with ~0.5 cm ² , ^(b) ZSW: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung				

Πίνακας 1 Στον πίνακα αυτό είναι σημειωμένες οι μέγιστες αποδόσεις που επετεύχθησαν από ινστιτούτα εντός εργαστηρίου για φωτοβολταϊκές κυψέλες CIGS διαφόρων υποστρωμάτων, όπως γυαλί, ατσάλι, αλουμίνιο και πολυμερές. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη τιμή έχει καταγραφεί όταν ως υπόστρωμα χρησιμοποιείται γυαλί.^[11]

Οι τρόποι παραγωγής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου CIGS ποικίλουν. Οι τρόποι αυτοί είναι οι ακόλουθοι :

- *Παραγωγή υμενίου*

Η πιο κοινή διαδικασία σε συνθήκες κενού είναι η εξάτμιση ή η διασκόρπιση χαλκού (Cu), γαλλίου (Ga) και ινδίου (In) μέσα σε υπόστρωμα σε θερμοκρασία δωματίου και, κατόπιν, η ανόπτηση του προκύπτοντος υμενίου με σεληνιούχο ατμό. Μία εναλλακτική διαδικασία είναι η εξάτμιση χαλκού (Cu), γαλλίου (Ga), ινδίου (In) και σεληνίου (Se) μέσα με θερμό υπόστρωμα.

Μία εναλλακτική διαδικασία σε μη συνθήκες κενού αφορά την εναπόθεση νανοσωματιδίων των προδρομικών υλικών στο υπόστρωμα και στην συνέχεια επιτόπια σύντηξή τους. Η ηλεκτροεπικάλυψη είναι μία, επίσης, εναλλακτική μέθοδος χαμηλού κόστους για την εφαρμογή σε στρώμα CIGS.

- *Προσθήκη σεληνίου (Se)*

Η παροχή και προσθήκη σεληνίου (Se) είναι σημαντική για τον καθορισμό των ιδιοτήτων και της ποιότητας του υμενίου. Όταν το σελήνιο (Se) παρέχεται στην αέρια φάση (π.χ. ως υδροσελήνιο H₂Se ή ως στοιχείο Se) υπό υψηλές θερμοκρασίες, το σελήνιο (Se) ενσωματώνεται μέσα στο υμένιο μέσω απορρόφησης και ακόλουθης διάχυσης.

Η πηγή σεληνίου (Se) επηρεάζει τις προκύπτουσες ιδιότητες του υμενίου. Η χρήση υδροσεληνίου H_2Se προσφέρει την καλύτερη ομοιομορφία σύνθεσης. Παρόλο αυτά, το υδροσεληνίου H_2Se είναι αρκετά τοξικό και θεωρείται ως περιβαλλοντική απειλή.

- *Διασκορπιση στα μεταλλικά στρώματα και ακολούθως προσθήκη σεληνίου (Se)*

Σε αυτήν την μέθοδο χαλκός (Cu), ίνδιο (In) και γάλλιο (Ga) διασκορπίζονται σε θερμοκρασία δωματίου ή κοντά σε αυτήν και αντιδρούν με την ατμόσφαιρα σεληνίου (Se) σε υψηλή θερμοκρασία. Η διαδικασία αυτή έχει υψηλότερη διεκπεραιωτικότητα από ότι η μέθοδος εξάτμισης και μέσω αυτής μπορεί να επιτευχθεί ευκολότερα συνθετική ομοιομορφία

- *Χαλκογεννιτοποίηση (προσθήκη χαλκογεννίτη, όπως θείο (S), σελήνιο (Se) ή τελλούριο (Te) στρωμάτων σωματιδιακών προδρομικών υλικών*

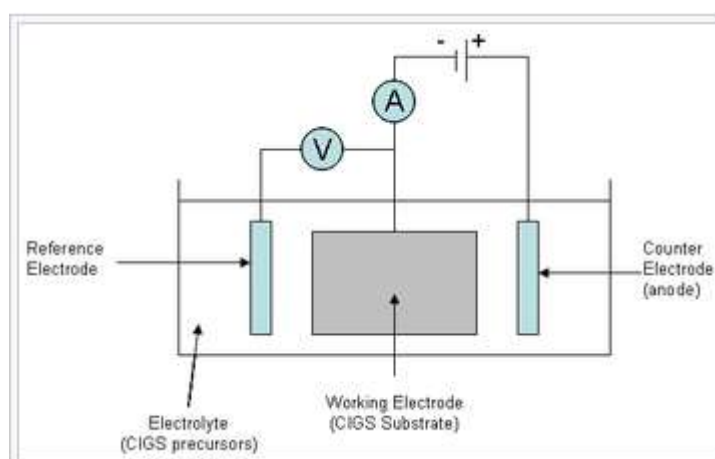
Με βάση την μέθοδο αυτή μεταλλικά σωματίδια ή σωματίδια μεταλλικών οξειδίων χρησιμοποιούνται ως πρόδρομοι για την ανάπτυξη του CIGS. Τα νανοσωματίδια αυτά, συνήθως, αιωρούνται σε διάλυμα νερού και στην συνέχεια εφαρμόζονται σε μεγάλες περιοχές με διάφορους τρόπους. Έπειτα το υμένιο αφυδατώνεται και, εάν τα πρόδρομα υλικά είναι μεταλλικά οξείδια, τότε μειώνονται σε μια ατμόσφαιρα υδρογόνου/ αζώτου H_2/N . Μετά την αφυδάτωση το εναπομένον πορώδες υμένιο τήκεται και προστίθεται σε αυτό σελήνιο (Se) σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από $400^\circ C$.

- *Ηλεκτροεναπόθεση και ακολούθως προσθήκη σεληνίου (Se)*

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή τα υλικά εναποτίθεται με ηλεκτροεναπόθεση. Υπάρχουν δύο μεθοδολογίες :εναπόθεση των δομών με στρώματα χημικών στοιχείων και ταυτόχρονη εναπόθεση όλων των στοιχείων (συμπεριλαμβανομένου του σεληνίου (Se)). Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν θερμική μεταχείριση σε ατμόσφαιρα σεληνίου (Se) ώστε να δημιουργηθούν ποιοτικά υμένια. Καθώς η ηλεκτροεναπόθεση απαιτεί

αγώγιμα ηλεκτρόνια, ως υπόστρωμα μπορεί να χρησιμοποιηθούν μεταλλικά λεπτά φύλλα . Η ηλεκτροεναπόθεση χημικών στρωμάτων είναι παρόμοια με την διασκόρπιση στρωμάτων χημικών στοιχείων.

Για την ταυτόχρονη εναπόθεση χρειάζονται ένα ηλεκτρόδιο (κάθοδος), ένα αντι-ηλεκτρόδιο (άνοδος) και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (reference electrode), όπως φαίνεται στην Εικόνα 14.



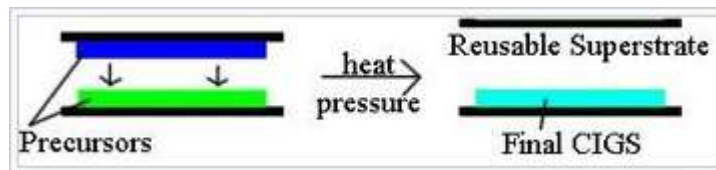
Εικόνα 14 Μέθοδος κατασκευής φωτοβολταϊκής κυψέλης CIGS μέσω ηλεκτρονικής εναπόθεσης και προσθήκης σεληνίου.^[11]

Τα υμένια που προκύπτουν είναι πλούσια σε χαλκό (Cu) και, συνήθως, περιέχουν φάσεις $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}_x$ μαζί με προσμίξεις από το διάλυμα. Προκειμένου να βελτιωθεί η κρυσταλλικότητα απαιτείται ανόπτηση. Για να αποδόσεις μεγαλύτερες από 7% απαιτείται στοιχειομετρική διόρθωση. Η διόρθωση παλαιότερα γινόταν μέσω εναπόθεσης υπό φυσικών ατμών υψηλής θερμοκρασίας , μια μέθοδος που δεν είναι πρακτική στην βιομηχανία.

Η εταιρεία Solopower παράγει τώρα κυψέλες τέτοιου τύπου με απόδοση μετατροπής >13.7%.

- *Τεχνική συνδυασμού προδρομικών υλικών με κόλληση δισκίων*

Στην διαδικασία αυτή δύο διαφορετικά υμένια εναποτίθενται ξεχωριστά σε ένα υπόστρωμα και ένα υπέρστρωμα. Τα υμένια πιέζονται μαζί και θερμαίνονται για να απελευθερωθεί το υμένιο από το επαναχρησιμοποιούμενο υπέρστρωμα, αφήνοντας ένα στρώμα απορρόφησης CIGS στο υπόστρωμα (βλ. Εικόνα 15).



Εικόνα 15 Επεξηγηματικό σχέδιο της μεθόδου συνδυασμού υλικών με κόλληση δισκίων.^[11]

Η εταιρεία Helionvolt έχει πατεντάρει την διαδικασία αυτή και την ονόμασε διαδικασία FASST. Η μέγιστη απόδοση που επετεύχθη από την εταιρεία μέσω της μεθόδου αυτής για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία CIGS ήταν 12%.

- *Εξάτμιση (ατμοποίηση)*

Η μέθοδος της εξάτμισης είναι η πιο συνηθισμένη και επικρατούσα τεχνική κατασκευής CIGS φωτοβολταϊκής κυψέλης.

Η εταιρεία Boeing χρησιμοποιεί την μέθοδο αυτή με την εναπόθεση διστρωμάτων CIGS με διαφορετικές στοιχειομετρικές μέσα σε θερμαινόμενο υπόστρωμα και τους επιτρέπει να αναμειχθούν.

Η εταιρεία NREL ανέπτυξε μία άλλη τεχνική που περιλαμβάνει τρία βήματα και φωτοβολταϊκή κυψέλη CIGS με κάτοχο ρεκόρ απόδοσης τιμής 20,3%. Το πρώτο βήμα της τεχνικής περιλαμβάνει την εναπόθεση ινδίου (In), γαλλίου (Ga) και σεληνίου (Se). Αυτή ακολουθείται από εναπόθεση χαλκού (Cu) και σεληνίου (Se) σε υψηλότερη θερμοκρασία

για την διάχυση και μίξη των χημικών στοιχείων. Στο τελευταίο στάδιο εναποτίθενται πάλι ίνδιο (In), γάλλιο (Ga) και σελήνιο (Se).

- *Χημική εναπόθεση ατμών*

Η χημική εναπόθεση των ατμών (chemical vapor deposition, CPV) έχει χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους για την εναπόθεση στις φωτοβολταϊκές κυψέλες CIGS.

Μέχρι το 2014 η χημική εναπόθεση ατμών CPV δεν χρησιμοποιούνταν για την εμπορική σύνθεση φωτοβολταϊκών κυψελών CIGS. Τα υμένια που παράγονται από την μέθοδο αυτή έχουν χαμηλή απόδοση και μικρή τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} , μερικώς ως αποτέλεσμα υψηλής συγκέντρωσης ατελειών. Επιπρόσθετα, οι επιφάνειες των υμενίων είναι γενικά τραχείς, κάτι το οποίο μειώνει ακόμη περισσότερο την τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} .

Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο CPV είναι χαμηλότερες συγκριτικά με άλλες μεθόδους όπως είναι η εξάτμιση και η προσθήκη σεληνίου (Se). Για τον λόγο αυτό, η διαδικασία CPV απαιτεί μικρότερες απαιτήσεις για την θερμική επεξεργασία και χαμηλότερα κόστη. Τα μελλοντικά προβλήματα που αφορούν την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών CPV περιλαμβάνουν την μετατροπή της σε μια παραγωγική ρυθμική διαδικασία όπως, επιπλέον, και το κόστος χειρισμού των ασταθών υλικών.

- *Ψέκασμα ηλεκτρονίων*

Τα υμένια CIS μπορούν, επίσης, να παραχθούν με εναπόθεση ηλεκτρονίων μέσω ψεκασμού. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει ψέκασμα μελανιού - υποβοηθούμενο από ηλεκτρικό πεδίο-, που περιέχει νανοσωματίδια CIS, κατευθείαν μέσα στο υπόστρωμα και κατόπιν τήξη σε αδρανές περιβάλλον. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι η διαδικασία λαμβάνει τόπο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και είναι πιθανόν η διαδικασία να προχωρήσει σε ένα μαζικό σύστημα παραγωγής.

Όσον αφορά την εμπορικότητα των φωτοβολταϊκών πλαισίων CIGS αυτή είναι προς το παρόν μικρή. Το 2013 η τεχνολογία αυτή φωτοβολταϊκών πανέλων κατείχε μόλις το 2% της αγοράς φωτοβολταϊκών, ενώ όλη η δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτών υμενίων ήταν περίπου 10%. Για τον λόγο η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών κυψελών CIGS συνεχίζει να εξελίσσεται προκειμένου να φτάσει τις αποδόσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου (Si) συνδυάζοντας, ταυτόχρονα, το χαμηλό κόστος των κυψελών λεπτών υμενίων. ^[11]

3. Τρίτη Γενιά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τρίτης γενιάς διαφέρουν πολύ από τις ημιαγώγιμες συσκευές φωτοβολταϊκών στοιχείων προηγούμενων γενιών που κυκλοφορούν στο εμπόριο και που αναφέραμε παραπάνω. Κάποιες φωτοβολταϊκές συσκευές τρίτης γενιάς, για παράδειγμα, δεν στηρίζονται στην χρήση της συνηθισμένης pn-επαφής που διαχωρίζει τους φορείς φορτίου.

Τα πλεονεκτήματα τα οποία παρουσιάζουν ποικίλουν. Τα πιο σημαντικά θεωρούνται το χαμηλό κόστος των υλικών κατασκευής τους (πολυμερικά στοιχεία), ότι δεν απαιτούν αρκετή ενέργεια κατά την διαδικασία δημιουργίας τους και ,επίσης, ο υψηλός ρυθμός διεκπεραίωσης της εργασίας τους. Σε αυτά τα θετικά χαρακτηριστικά, μπορούμε να προσθέσουμε ότι κάποιες κατηγορίες της τρίτης γενιάς (κυψέλες Graetzel) μπορούν να λειτουργούν ακόμη και σε συνθήκες χαμηλού φωτός. Τα τελευταία, μάλιστα, φωτοβολταϊκά στοιχεία (κυψέλες Graetzel) έχουν συγκεντρώσει το ενδιαφέρον προκειμένου να αντικαταστήσουν τις υπάρχουσες τεχνολογίες σε περιπτώσεις μη ιδιαίτερα απαιτητικών εφαρμογών, όπως στις οικιακές εγκαταστάσεις σε στέγες. ^[1] Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τρίτης γενιάς συμπεριλαμβάνουν, επίσης, τα «λεγόμενα» νανο-φωτοβολταϊκά , λόγω της χρήσης σε αυτά νανο-υλικών. Οι εξαιρετικές οπτικές, ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες των νανο-υλικών προσφέρουν την δυνατότητα επίτευξης υψηλών αποδόσεων. ^[6]

Από την άλλη, τα μειονεκτήματα που εμφανίζουν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες τρίτης γενιάς είναι εξίσου σημαντικά. Ένα από αυτά είναι ότι παρουσιάζουν χαμηλή

απόδοση συγκριτικά με τις κυψέλες πυριτίου (Si) , στις οποίες έχουμε αναφερθεί παραπάνω και οι οποίες βασίζονται στις δομές εγκάρσιων δίσκων (wafers). Επιπλέον, ένα πολύ βασικό μειονέκτημα είναι η υποβάθμιση της απόδοσής στους σε βάθος χρόνο λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως είναι η υψηλή θερμοκρασία. Τέλος, το ενεργειακό τους διάκενο των πολυμερικών φωτοβολταϊκών κυψελών είναι υψηλό, παραπάνω από το ιδανικό 1,45eV του πυριτίου (Si), με αποτέλεσμα να έχουμε θερμικές απώλειες.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία της τρίτης γενιάς δεν έχουν περάσει, ακόμη, εξολοκλήρου σε εμπορικό στάδιο. Ωστόσο, κάποιες συσκευές της γενιάς αυτής έχουν αρχίσει να εισέρχονται στο εμπόριο, αλλά αναμένεται πολύς χρόνος ακόμη για να διαπιστωθεί κατά πόσο θα καταφέρουν να αποκτήσουν μια πετυχημένη θέση στον τομέα της αγοράς.^[7]

Στην τρίτη γενιά φωτοβολταϊκών κυψελών ανήκουν οι κάτωθι τύποι ^{[7],[1]} :

- Συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (Concentrating PV- CPV)
- Dye-sensitized ηλιακές κυψέλες (Dye-sensitized solar cells- DSSC)
- Οργανικές ηλιακές κυψέλες (Organic solar cells)

και

- Ηλιακές κυψέλες που βασίζονται στην νανοτεχνολογία

3.1 Συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (Concentrating PV-CPV)

Τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά συστήματα (CPV) χρησιμοποιούν οπτικές συσκευές, όπως φακούς ή καθρέφτες, για να συγκεντρώσουν τις ευθείες ακτίνες της ηλιακής ακτινοβολίας σε πολύ μικρές, πολύ αποδοτικές φωτοβολταϊκές κυψέλες πολύ-επαφών κατασκευασμένες από ημιαγώγιμο υλικό. Ο συντελεστής της συγκέντρωσης ηλιακού φωτός κυμαίνεται από 2 με 100 suns (χαμηλή έως μέτρια συγκέντρωση) έως 1000 suns (υψηλή συγκέντρωση). Οι φακοί, προκειμένου να είναι αποτελεσματικοί, θα πρέπει να είναι μονίμως προσανατολισμένοι απέναντι ακριβώς από τον ήλιο και για τον

σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα σύστημα προσανατολισμού μονού ή διπλού άξονα για τον εντοπισμό χαμηλών και υψηλών συγκεντρώσεων, αντίστοιχα.

Τα συστήματα χαμηλής έως μέτριας συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας (έως 100suns) μπορούν να συνδυαστούν με ηλιακές κυψέλες πυριτίου, αλλά σε υψηλότερες θερμοκρασίες η απόδοσή τους μειώνεται. Τα συστήματα υψηλής συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας (πέρα από 500suns), συνήθως, συνδυάζονται με ηλιακές κυψέλες πολύ-επαφών κατασκευασμένες με ημιαγώγιμες ενώσεις των στοιχείων των ομάδων III και V του περιοδικού πίνακα (π.χ. αρσενικούχο γάλλιο, GaAs), τα οποία προσφέρουν πολύ υψηλή απόδοση. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες πολλών επαφών (είτε διπλών είτε τριπλών επαφών) απαρτίζονται από μία στοιβα επικαλυμμένων p-n επαφών, κάθε μία κατασκευασμένη από ξεχωριστό ζεύγος ημιαγωγών, με διαφορετικό ενεργειακό διάκενο και φασματική απορρόφηση έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή απορρόφηση του ηλιακού φάσματος. Τα υλικά τα οποία είναι πιο κοινά για την χρήση αυτήν είναι : το γερμάνιο (Ge) με 0,67eV, το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) ή το αρσενικούχο γαλλιούχο ίνδιο (InGaAs) με 1,4eV και το φωσφορούχο γαλλιούχο ίνδιο (InGaP) με 1,85eV. Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο τριπλής επαφής με ενεργειακά διακένα 0,74eV, 1,2eV και 1,8eV θα μπορούσε να φτάσει θεωρητικά μια απόδοση 59%. Δεδομένων της πολυπλοκότητας και του κόστους, οι πολύ-επαφές χρησιμοποιούνται στις φωτοβολταϊκές κυψέλες σε μικρή κλίμακα για την απορρόφηση υψηλής συγκέντρωσης φωτός ή σε διαστημικές εφαρμογές.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια CPV που κυκλοφορούν στο εμπόριο με φωτοβολταϊκά στοιχεία βασισμένα στο πυρίτιο (Si) προσφέρουν απόδοση της τάξης του 20% με 25%. Από την άλλη οι φωτοβολταϊκές μονάδες CPV που αποτελούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία που χρησιμοποιούν ημιαγωγούς των ομάδων III-V του περιοδικού πίνακα έχουν επιτύχει εντός εργαστηρίου απόδοση που φτάνει πάνω από 40%. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πολύ-επαφών που κατασκευάζονται από τις εταιρείες Sharp, Spectrolab και Azur παρουσιάζουν απόδοση γύρω στα 35% - σημαντικά υψηλότερη απόδοση από αυτήν που παρουσιάζουν οι συμβατικές φωτοβολταϊκές κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) μονής επαφής. Παράλληλα, γίνονται συνεχώς προσπάθειες που προσδοκούν σε αύξηση της απόδοσης των CPV φωτοβολταϊκών στοιχείων στο 45% ή ακόμη και στο 50%.

Όπως ήδη έχουμε προαναφέρει, προκειμένου να αυξήσουμε την παραγωγή ηλεκτρισμού, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια CPV θα πρέπει να είναι μονίμως

προσανατολισμένα κάθετα στην ηλιακή ακτινοβολία, χρησιμοποιώντας, παράλληλα, συστήματα ανίχνευσης της ηλιακής ακτινοβολίας με έναν ή δύο άξονες.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα που αποτελούνται από πολλές επαφές και συνδυάζουν συστήματα ανίχνευσης της ηλιακής ακτινοβολίας οδηγούν σε αύξηση του κόστους των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών πλαισίων (CPV) σε σύγκριση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Από την άλλη, η υψηλή τους απόδοση και η μικρής έκτασης επιφάνεια του απαιτούμενου ενεργού υλικού μπορούν σταδιακά να αντισταθμίσουν τα πολύ υψηλά κόστη, κάτι που σαφώς εξαρτάται από την ανάπτυξη που θα σημειωθεί μακροπρόθεσμα στα πεδία της απόδοσης και του κόστους.

Τέλος, όπως έχει προαναφερθεί, τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (CPV) βασίζονται στην ευθεία ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει κάθετα σε αυτά. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε περιοχές μη νεφελώδεις και με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση.^[7]

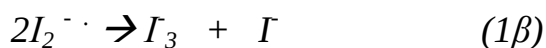
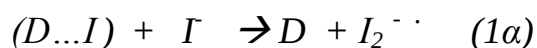
3.2 Χρωματο-ευαίσθητα φωτοβολταϊκά στοιχεία (Dye-sensitized solar cells, DSSCs)

Ένεκα διαφόρων προβλημάτων που σχετίζονται με την απόδοση, το παραγωγικό κόστος και θέματα που έχουν να κάνουν με τις επιπτώσεις κάποιων υλικών των φωτοβολταϊκών κυψελών στο περιβάλλον, οι ερευνητές αναζήτησαν νέες ιδέες για να παράγουν υλικά καινούριας τεχνολογίας, οδηγούμενοι έτσι στην εφεύρεση χρωματο-ευαίσθητων φωτοβολταϊκών στοιχείων (dye-sensitized solar cells, DSSC).^[4] Η εφεύρεση πραγματοποιήθηκε από τον Gratzel το 1990.^[12]

Σήμερα, το χρωματο-ευαίσθητο φωτοβολταϊκό στοιχείο (DSSC) θεωρείται ως ένας καλός ανταγωνιστής στην υπάρχουσα τεχνολογία υλικών των φωτοβολταϊκών κυψελών. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματά του ένα ιδιαίτερα σημαντικό είναι το χαμηλό κόστος των υλικών που χρησιμοποιούνται, η ευκαμψία^[2] τους και το μικρό τους βάρος.^[12] Επίσης, θεωρείται θετικό χαρακτηριστικό ότι είναι πολύ απλό στην κατασκευή του. Η κατηγορία αυτή φωτοβολταϊκών στοιχείων δεν απαιτεί απαραίτητα άπλετο φως και μπορεί να λειτουργήσει ακόμη και σε συνθήκες νεφελώδους ουρανού με απαλό φως.

Ωστόσο, η απόδοση των χρωματο-ευαίσθητων φωτοβολταϊκών κυψελών (DSSC) μπορεί να μειώνεται με το χρόνο (*υποτίμηση-degradation*) ως αποτέλεσμα της έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV) και την θερμότητα. Η αλληλεπίδραση των διαλυτών μέσα στο εσωτερικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελεί ένα ακόμη πρόβλημα. Στα μειονεκτήματα των χρωματο-ευαίσθητων φωτοβολταϊκών στοιχείων (DSSC) συγκαταλέγεται, επιπλέον, η χαμηλή απόδοσή τους. Αν και εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις γύρω στο 12% μέσω της ανάπτυξης νέων χρωμάτων ευρείας ζώνης και ηλεκτρολυτών (Gratzel, 2009), παρόλο αυτά, οι αποδόσεις των χρωματο-ευαίσθητων φωτοβολταϊκών στοιχείων (DSSC) του εμπορίου εμφανίζουν χαμηλές αποδόσεις, τυπικά κάτω από το 4% με 5%. Ο βασικός λόγος της χαμηλής απόδοσής τους είναι ότι υπάρχουν λίγα χρώματα (χρωστικά μόρια) τα οποία μπορούν να απορροφούν μια ευρεία περιοχή φάσματος.^[7]

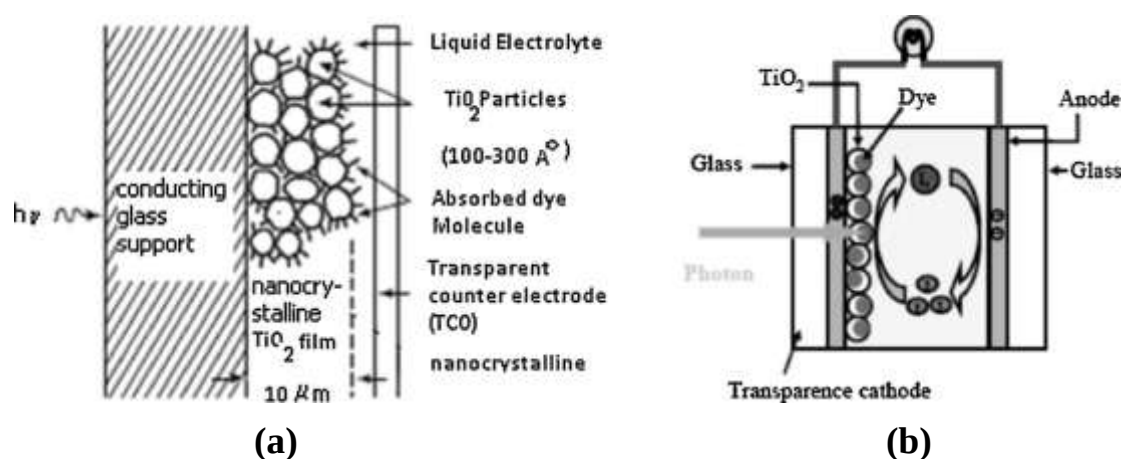
Η λειτουργία των χρωματοευαίσθητων φωτοβολταϊκών κυψελών (βλ. Εικόνα 16 έως Εικόνα 19) ξεκινά όταν τα φωτόνια του ηλιακού φωτός απορροφούνται από κάποια φωτο-ευαίσθητα χρωστικά μόρια (dyes), στα οποία οφείλεται ο χαρακτηρισμός «χρωματοευαίσθητα» (dye-sensitized) των συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων. Μέσα στις φωτοβολταϊκές κυψέλες περιέχονται, επίσης, ένας ημιαγωγός, όπως το πυρίτιο (Si), και ένας υγρός ηλεκτρολύτης, που είναι ένα αγωγίμο διάλυμα το οποίο, συνήθως, δημιουργείται με την διάλυση αλατιού σε διαλύτη, όπως είναι το νερό. Ο ημιαγωγός και ο ηλεκτρολύτης συνεργάζονται για να διαχωρίσουν τα ζευγάρια ηλεκτρονίων-οπών, που έχουν στενούς δεσμούς και που παράγονται όταν το ηλιακό φως φτάσει στην κυψέλη. Τα ηλεκτρόνια ή οι οπές είναι αυτά που θα μας δώσουν το ρεύμα ή αλλιώς το αποκαλούμενο ως «φωτόρρευμα» λόγω της προέλευσής του από τα απορροφούμενα φωτόνια.^[2] Η λειτουργία των χρωματοευαίσθητων φωτοβολταϊκών στοιχείων εξαρτάται, ακόμη, αρκετά από το μεσοπορώδες στρώμα από νανο-σωματίδια του διοξειδίου του τιτανίου (TiO₂), το οποίο απελευθερώνει ηλεκτρόνια καλυμμένα με απορροφητική χρωστική ουσία (βλ. Εικόνα 16 και Εικόνα 19).^[7] Μέσα στο διάλυμα συμβαίνει, επίσης, μία αντίδραση οξειδοαναγωγής: $I_3^- + 2e^- \rightarrow 3I^-$ (βλέπε Εικόνα 16 και Εικόνα 17). Το ζεύγος του μεσολαβητή οξειδοαναγωγής, I_3^- / I^- , είναι αρκετά σημαντικό γιατί με την βοήθεια αυτού έχουμε μια συνεχή αναπαραγωγή των χρωστικών μορίων. Η δημιουργία ενός πολυσύνθετου μορίου (D...I₂⁻), όπου D είναι το στοιχείο της φωτοευαίσθητης χρωστικής ουσίας, προτάθηκε για την περίπτωση που χρησιμοποιείται ως φωτοευαίσθητο στοιχείο D το ρουθίνιο Ru. Η αναπαραγωγή της φωτοευαίσθητης ουσίας γίνεται σύμφωνα με την αντίδραση^[12]:



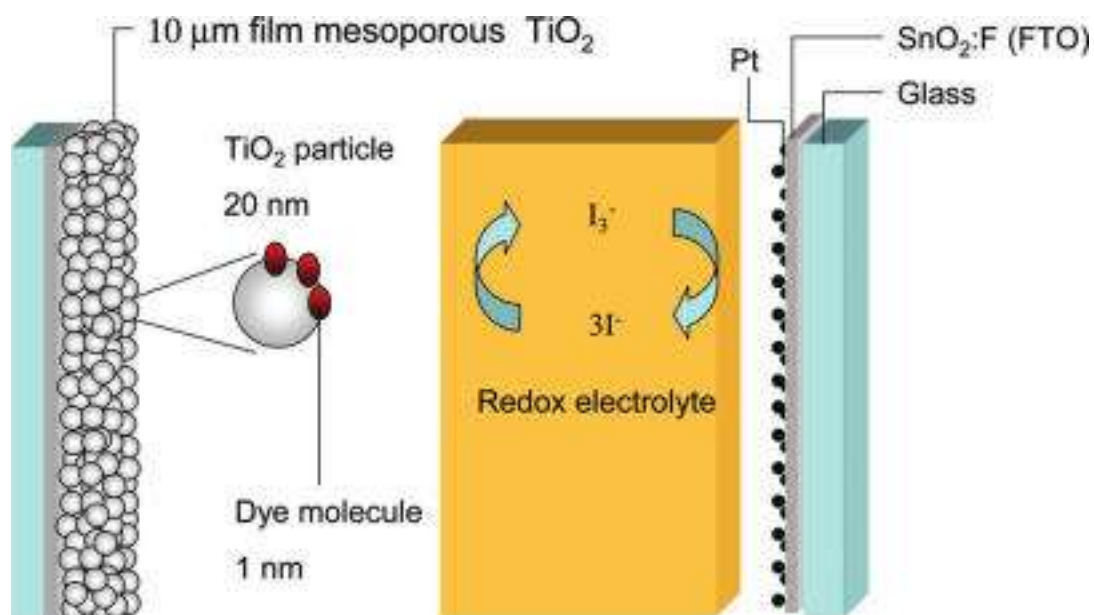
Η χρήση χρωματοευαίσθητων κυψελών σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών μας θυμίζει αρκετά την λειτουργία της φωτοσύνθεσης στα φυτά, κάτι άλλωστε που προσπάθησαν να μιμηθούν οι επιστήμονες με την χρήση των χρωστικών μορίων.

Τα βασικά στοιχεία δομής μιας φωτοευαίσθητης φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι (βλ. Εικόνα 16 και Εικόνα 17) : (i) μια κατασκευή μηχανικής υποστήριξης επικαλυμμένης με διαφανή αγώγιμο οξείδια, (ii) ένα ημιαγώγιμο φιλμ-μεσοπορώδες στρώμα, συνήθως διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) (βλ. Εικόνα 19), (iii) ένας φωτοαισθητήρας απορροφημένος στην επιφάνεια του αγωγού, (iv) ένας ηλεκτρολύτης που περιέχει έναν μεσολαβητή οξειδοαναγωγής, το ζεύγος I_3^- / I^- και (v) ένα ηλεκτρόδιο ικανό να «αναγεννά» τον μεσολαβητή οξειδοαναγωγής όπως η πλατίνα (Pt).

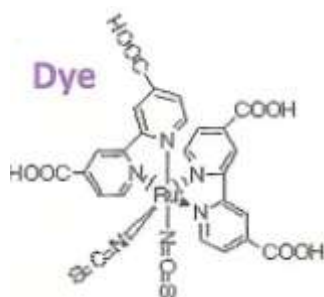
[4]



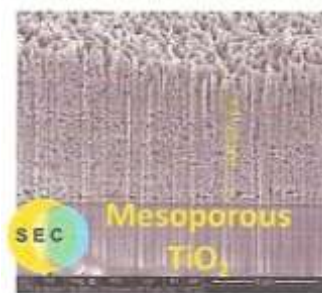
Εικόνα 16 (α) Δομή μιας φωτοευαίσθητης ηλιακής κυψέλης και **(β)** λειτουργία της.^[2]



Εικόνα 17 Μια δεύτερη εικόνα της δομής μιας φωτοευαίσθητης ηλιακής κυψέλης.



Εικόνα 18 Η δομή της φωτοευαίσθητης χρωστικής ουσίας με ρουθίνιο Ru.^[12]



Εικόνα 19 Το μεσοπορώδες στρώμα από νανο-σωματίδια διοξειδίου του τιτανίου TiO_2 .^[12]

Όπως είδαμε προηγουμένως, ένα από τα μειονεκτήματα των χρωματο-ευαίσθητων φωτοβολταϊκών στοιχείων (DSSC) είναι η χαμηλή απόδοσή τους λόγω της μη παρουσίας πολλών χρωματικών μορίων (dyes) που θα μπορούσαν να απορροφήσουν ένα ευρύ φάσμα φωτός. Ένα ενδιαφέρον πεδίο έρευνας είναι η χρήση νανο-κρυσταλλικών ημιαγωγών που επιτρέπουν στις χρωματο-ευαίσθητες φωτοβολταϊκές κυψέλες (DSSC) να έχουν μία ευρεία κάλυψη φάσματος προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοσή τους. Μάλιστα, έχουν μελετηθεί και δοκιμαστεί χιλιάδες οργανικά χρώματα με στόχο τον σχεδιασμό, την σύνθεση και την κατασκευή νανο-δομημένων υλικών που να παρέχουν υψηλές αποδόσεις.^[7]

3.3 Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (Organic Photovoltaic Cells, OPVCs)

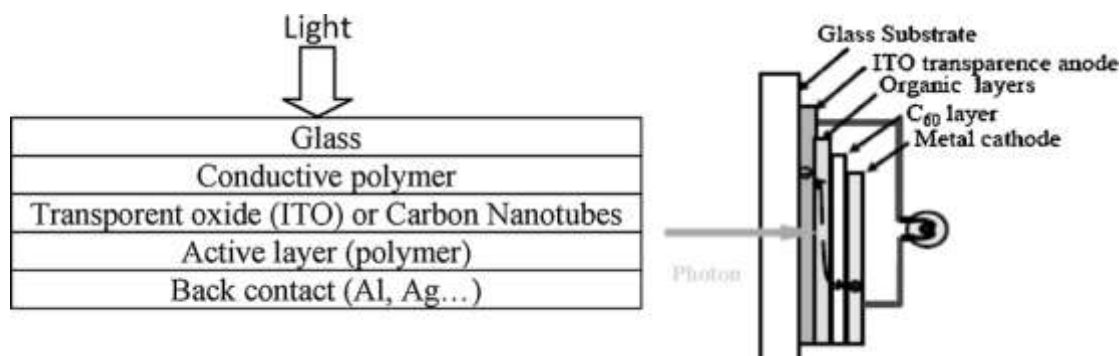
Μία νέα τεχνολογία που έχει αναδυθεί και συνεχίζει να αναπτύσσεται είναι οι οργανικές φωτοβολταϊκές κυψέλες. Τα οργανικά αυτά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από οργανικά ή πολυμερή υλικά (όπως οργανικά πολυμερή ή μικρά οργανικά μόρια).

Τα πλεονεκτήματα της κατηγορίας αυτής είναι πολλαπλά. Κάποια από αυτά έγκεινται στην μηχανική τους ευλυγισία, το μικρό τους βάρος και την διαθεσιμότητα. Καθώς οι οργανικές φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι κατά βάση κατασκευασμένες από

πλαστικά μέρη σε αντίθεση με το παραδοσιακά χρησιμοποιούμενο πυρίτιο (Si), η διαδικασία κατασκευής είναι οικονομική. Χρησιμοποιούνται, δηλαδή, υλικά χαμηλού κόστους, η παραγωγική διαδικασία είναι υψηλής ταχύτητας - χρησιμοποιούνται τεχνικές τύπωσης σε μια roll-to-roll διαδικασία R2R, μια διαδικασία που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ηλεκτρονικών συσκευών σε κυλίνδρους ευλύγιστων πλαστικών ή μεταλλικών φύλλων - ενώ, παράλληλα, δεν υπάρχουν ιδιαίτερες τεχνικές απαιτήσεις, όπως σε άλλες περιπτώσεις τεχνολογιών που προαναφέραμε, για παράδειγμα συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, συνθήκες χαμηλής πίεσης ή κενού.^[2] Η διαδικασία κατασκευής γίνεται, μάλιστα, ολοένα και οικονομικότερη με την πάροδο του χρόνου και οι επιστήμονες εκτιμούν πως το κατασκευαστικό κόστος θα φτάσει τα 0.50 USD /W μέχρι το 2020. Τέλος, να αναφέρουμε ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή οργανικών φωτοβολταϊκών κυψελών είναι ευρέως διαθέσιμα και μη τοξικά. Δικαιολογημένα, λοιπόν, οι επιστήμονες πιστεύουν ότι μελλοντικά τα χαρακτηριστικά αυτά θα καταστήσουν την κατηγορία αυτή των φωτοβολταϊκών στοιχείων ανταγωνιστική σε ορισμένες εφαρμογές έναντι άλλων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σήμερα.^[7]

Ωστόσο, η χαμηλή απόδοση που παρουσιάζουν οι οργανικές φωτοβολταϊκές κυψέλες αποτελούν ένα μειονέκτημα εξαιρετικής σημασίας. Για τον λόγο αυτόν, τα τελευταία χρόνια γίνεται μια συνεχής προσπάθεια που έχει επιφέρει πολλές βελτιώσεις οι οποίες έχουν οδηγήσει σε υψηλότερες αποδόσεις. Ενδεικτικά, αναφέρουμε ότι τα οργανικά φωτοβολταϊκά πλαίσια που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο παρουσιάζουν απόδοση της τάξης του 4% έως 5% , ενώ υπό εργαστηριακές συνθήκες η απόδοση ανέρχεται σε 6% έως 8%.^[7]

Η δομή των οργανικών φωτοβολταϊκών κυψελών βασίζεται σε λεπτά υμένα (τυπικά το πάχος τους είναι 100nm) οργανικών ημιαγωγών που μπορεί να είναι πολυμερή και ενώσεις μικρών μορίων, όπως για παράδειγμα η φθαλοκυανίνη χαλκού ($C_{32}H_{16}N_8Cu$ ή εν συντομία συμβολικά CuPc), η πολυφαινυλενική βινυλίνη $((C_8H_6)_n$ ή PPV) και τα φουλλερένια άνθρακα. Κατά κανόνα, ένα οργανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο (βλ. Εικόνα 20) αποτελείται από μία μπροστινή γυάλινη επιφάνεια, ένα στρώμα αγωγίμου πολυμερούς, ένα διαφανές στρώμα σαν επαφή από οξείδιο του κασσιτεριούχου ινδίου (ITO), ένα φωτοενεργό πολυμερές και, τέλος, ένα στρώμα μετάλλου που λειτουργεί σαν πίσω επαφή (ενδεικτικά μπορεί να είναι από Al, Ag ή κάτι άλλο).



Εικόνα 20 Δομή μιας οργανικής φωτοβολταϊκής κυψέλης.^{[2],[4]}

Η λειτουργία μιας οργανικής φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι αρκετά απλή. Το ζεύγος ηλεκτρονίων («δότης» και «δέκτης») αποτελούν την βάση της λειτουργίας. Όταν το φως πέσει πάνω στην υάλινη επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου και την διαπεράσει, τότε διαταράσσει το ηλεκτρόνιο- «δότη» κάνοντάς το να μετακινηθεί προς το μόριο του «δέκτη». Έτσι, απομένει μια οπή στην θέση του και το γεγονός αυτό συνεχίζει να συμβαίνει σαν κύκλος. Στην συνέχεια, τα φορτία που δημιουργήθηκαν εξαιτίας του φωτός μεταφέρονται προς αντίθετες κατευθύνσεις (βλ. Εικόνα 20) και προσκολλούνται στα αντίθετα ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο για να χρησιμοποιηθούν πριν ξαναενωθούν.^[2]

Οι χρήσεις μιας οργανικής φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι ποικίλες. Μπορούν να εφαρμοστούν πάνω σε πλαστικές λεπτές επιφάνειες, με τρόπους που θυμίζουν ένα εκτυπωμένο φύλλο ή ένα λεπτό κάλυμμα, καθιστώντας τα ιδανικά για κινητές εφαρμογές και χρήση σε ανώμαλες επιφάνειες. Ο κύριος εμπορικός στόχος, λοιπόν, των επιστημόνων είναι η μελλοντική χρήση των οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε κινητές συσκευές. Αυτές μπορούν να αφορούν μπαταρίες που φορτίζουν κινητά τηλέφωνα, laptops, ραδιόφωνα, συσκευές flash, παιχνίδια και, σχεδόν, οποιαδήποτε μικρή συσκευή στο μέγεθος του χεριού μας η οποία απαιτεί την χρήση μπαταρίας. Τα οργανικά φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να εγκατασταθούν, σχεδόν, παντού σε οτιδήποτε ή να ενσωματωθούν εντός μιας συσκευής. Επίσης, μπορούν να τυλιχθούν ή να διπλωθούν για να φυλαχθούν όταν δεν χρησιμοποιούνται. Όλες αυτές οι ιδιότητες και χρήσεις πιστεύεται ότι θα κάνουν τα οργανικά φωτοβολταϊκά πάνελ ιδιαίτερα ελκυστικά για να εγκαθίστανται σε διάφορες επιφάνειες κτιρίων και έτσι, με τον

τρόπο αυτό, η χρήση, γενικότερα, των φωτοβολταϊκών πλαισίων θα επεκταθεί και σε άλλες κατηγορίες σχημάτων και μορφών. [7]



Εικόνα 16 Εφαρμογές και προοπτικές των οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων.

3.4 Η Νανοτεχνολογία στην παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων

Εκτός από την αναζήτηση νέων υλικών για την βελτίωση της συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών κυψελών, μια νέα τεχνολογία έχει αναδειχθεί ως αρκετά ενδιαφέρουσα για την κατασκευή τους. Αναφερόμαστε στην νανοτεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται με σκοπό την αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών μέσα από τον έλεγχο του «ενεργειακού διακένου» από νανοτεχνολογικά συστατικά στοιχεία. [4]

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης της νανοτεχνολογίας είναι, πρωτίστως, οι εξαιρετικές οπτικές, ηλεκτρικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες των νανο-υλικών οι

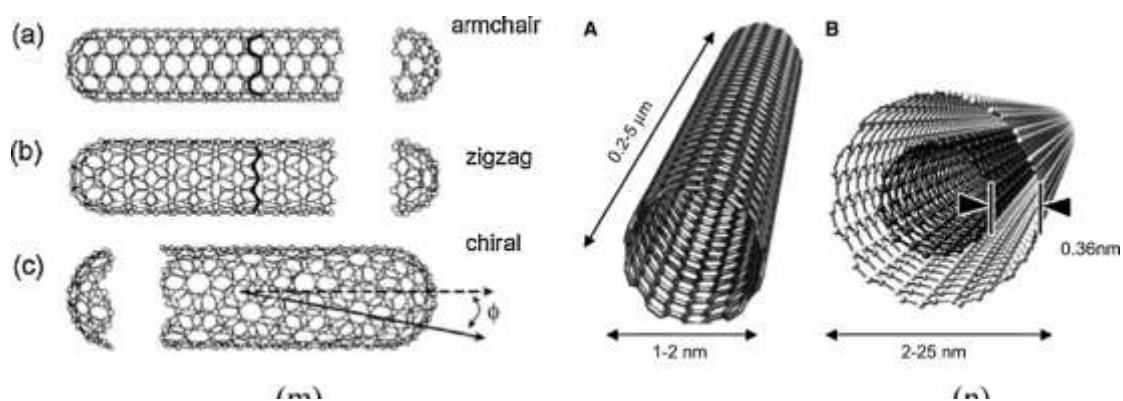
οποίες προσφέρουν στις φωτοβολταϊκές κυψέλες την δυνατότητα να επιτύχουν υψηλότερες αποδόσεις. Επίσης, σε αυτά προστίθενται το χαμηλό κόστος και το μικρό τους βάρος.^[6] Οι νανο-σωλήνες (nanotubes, CNT), τα κβαντο-μικροσωματίδια (quantum dots, QDs) και οι φωτοβολταϊκές κυψέλες με θερμούς φορείς είναι τρεις δομές που χρησιμοποιούνται από την νανοτεχνολογία στην παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων.^[4]

3.4.1 Νανο-σωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes, CNTs)

Οι νανο-σωλήνες άνθρακα έχουν δομή εξαγωνικού πλέγματος από άνθρακες (βλ. Εικόνα 22) και παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Ο σχηματισμός του νανο-σωλήνα μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα διάνυσμα με έναν αριθμό γραμμής “n” και έναν αριθμό στήλης “m” που ορίζουν πώς το φύλλο τυλίγεται σε ρολό. Οι νανο-σωλήνες μπορούν να είναι είτε μεταλλικοί είτε ημιαγώγιμοι και ανήκουν σε δύο κατηγορίες : μονού τοιχώματος (SWNTs, single walled nanotubes) και πολλών τοιχωμάτων (MWNTs, multi walled nanotubes).

Πολλοί επιστήμονες εντάσσουν, επιπλέον, την χρήση των νανოსωλήνων άνθρακα στα αποκαλούμενα «υβριδικά» φωτοβολταϊκά στοιχεία, ωστόσο ο τελευταίος όρος είναι αρκετά γενικός και οι υπάρχουσες πληροφορίες είναι ελλιπείς για το ποια φωτοβολταϊκά στοιχεία ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

Τους νανοςωλήνες άνθρακα θα τους συναντήσουμε ξανά, όπως θα δούμε, στην τέταρτη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων.



Εικόνα 22 (m) Νανο-σωλήνες μονού τοιχώματος και (n) διπλού τοιχώματος.^[2]

Οι νανο-σωλήνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά ως φωτοευαίσθητα υλικά, όπως ακριβώς διάφορα άλλα υλικά φωτοβολταϊκών στοιχείων. Έτσι, οι φωτοβολταϊκοί σωλήνες σε κλίμακα νανομέτρων αν καλυφθούν με ειδικά ημιαγώγιμα υλικά τύπου p και n σχηματίζουν μια p-n επαφή η οποία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η μεθοδολογία βελτιώνει και αυξάνει την περιοχή της επιφάνειας που είναι διαθέσιμη για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Πριν λίγα χρόνια, οι επιστήμονες στο Cornell University (2009) κατάφεραν να κατασκευάσουν μια απλή φωτοβολταϊκή κυψέλη με μια φωτο-δίοδο σχηματισμένη από έναν νανο-σωλήνα άνθρακα. Η συσκευή αυτή μετατρέπει το φως σε ηλεκτρισμό με μια πολύ αποδοτική διαδικασία που πολλαπλασιάζει την ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει προς την έξοδο. Αν και η απόδοση για αυτού του τύπου το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι χαμηλή - υπολογίζεται σε 3-4% - ωστόσο, υπάρχει μεγάλη αισιοδοξία από τους επιστήμονες ως προς την έρευνα που πρόκειται να ακολουθήσει για την βελτίωση της απόδοσης.

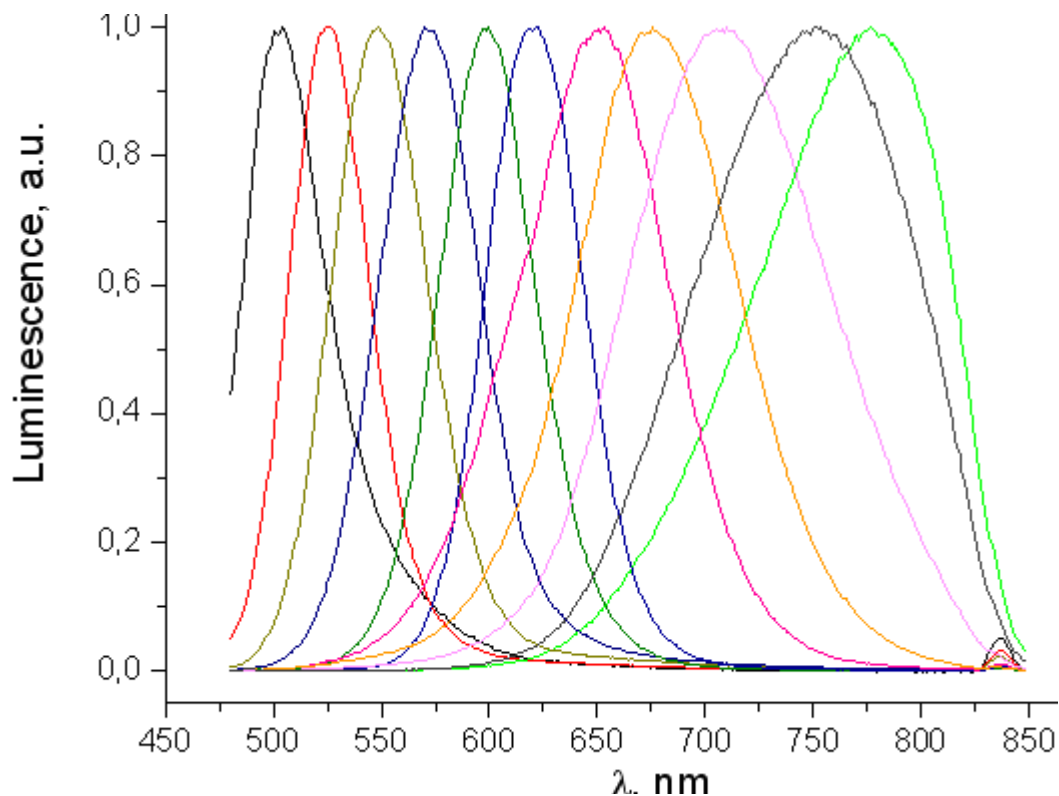
Επί του παρόντος, οι νανο-σωλήνες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του διαφανούς ηλεκτροδίου σε ευλύγιστα, αποδοτικά πολυμερή φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί χρωματο-ευαίσθητοι νανο-σωλήνες από ναφθαλοκυανίνη (NaPc) οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλό ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) και χαμηλή τάση ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}). Τέλος, υπάρχουν πολλές ερευνητικές ομάδες που δουλεύουν πάνω σε φωτοβολταϊκές κυψέλες που βασίζονται σε εντελώς ανόργανα νανο-σωματίδια, όπως σε νανο-σωματίδια σεληνιούχου καδμίου (CdSe), νανο-σωματίδια τελλουριούχου καδμίου (CdTe) και νανο-ράβδους από τα ίδια υλικά.^[2]

Όσον αφορά την εφαρμογή των νανοσωλήνων σε υβριδικές φωτοβολταϊκές συσκευές, θεωρείται απαραίτητο να αναφέρουμε ένα σημαντικό μειονέκτημά τους που είναι η *υποβάθμιση της απόδοσης* με το πέρασμα του καιρού σε περιβάλλον πλούσιο σε οξυγόνο. Το στρώμα προστασίας που χρησιμοποιείται συνήθως για την αποτροπή της οξείδωσης μπορεί να μειώσει της απόδοση της φωτοβολταϊκής κυψέλης καθώς και την οπτική διαπερατότητα στην περιοχή του ηλεκτροδίου.^[13]

3.4.2 Κβαντικές κουκκίδες (quantum dots, QDs)

Ένα υλικό αποτελούμενο από κβαντικές κουκκίδες είναι ένα ιδιαίτερο ημιαγώγιμο σύστημα που συντίθεται από έναν συνδυασμό ομάδων του περιοδικού πίνακα και το οποίο μπορεί να παρουσιάζεται με διαφορετικές μορφές. Τα υλικά από κβαντικές κουκκίδες έχουν προσαρμοζόμενο ενεργειακό διάκενο, μια ιδιότητα που τα κάνει να συμπεριφέρονται ως μία ξεχωριστή και ιδιαίτερη ομάδα ημιαγωγών.^{[2], [4]}

Σε διαφοροποίηση με το τι συμβαίνει σε άλλες απλές δομές ατόμων, η δομή μιας κβαντικής κουκκίδας παρουσιάζει την ασυνήθιστη ιδιότητα βάσει της οποίας τα επίπεδα ενέργειας εξαρτώνται από το μέγεθος της δομής της. Για παράδειγμα, το φάσμα εκπομπής φωτός μιας κβαντικής κουκκίδας σεληνιούχου καδμίου (CdSe) μπορεί να βελτιωθεί από την ερυθρή περιοχή -όταν η διάμετρος της κβαντικής κουκκίδας είναι 5nm - στην μωβ περιοχή -όπου η διάμετρος της κβαντικής κουκκίδας είναι 1,5nm. Η σχέση αυτή εξάρτησης μεταξύ του μεγέθους της κβαντικής κουκκίδας και του φάσματος εκπομπής γίνεται κατανοητή από το διάγραμμα της Εικόνας 23.



Εικόνα 23 Το διάγραμμα αναπαριστά το φάσμα εκπομπής φωτεινότητας κβαντικών κουκκίδων σεληνιούχου καδμίου (CdSe) διαφορετικών μεγεθών. Κβαντικές κουκκίδες διαφορετικού μεγέθους εκπέμπουν φως διαφορετικού χρώματος ^[16].

Η τιμή του ενεργειακού διακένου που καθορίζει την ενέργεια -και άρα το χρώμα- του εκπεμπόμενου φωτός είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του μεγέθους της κβαντικής κουκκίδας. Μεγαλύτερες κβαντικές κουκκίδες έχουν περισσότερα επίπεδα ενέργειας τα οποία είναι τοποθετημένα σε πολύ μικρές αποστάσεις, επιτρέποντας έτσι στις κβαντικές κουκκίδες να απορροφούν φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας (ερυθρότερου χρώματος). Με άλλα λόγια, η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου αυξάνει όσο το μέγεθος της κβαντικής κουκκίδας μειώνεται, (γιατί απαιτείται περισσότερη ενέργεια για να περιοριστεί η διέγερση του ημιαγωγού σε μικρότερο βαθμό). ^[14]

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία οι κβαντικές κουκκίδες χρησιμοποιούνται ως υλικό απορρόφησης του φωτός. Στην περίπτωση αυτήν, υποκαθιστούν τα μεγάλα μόρια υλικών όπως πυριτίου (Si), σεληνιούχου γαλλιούχου ινδιδίου χαλκού (CIGS) ή τελλουριούχου καδμίου (CdTe). Όπως προαναφέραμε οι κβαντικές κουκκίδες έχουν ενεργειακά διάκενα τα οποία μπορούν να βελτιωθούν εντός μιας ευρείας περιοχής

μεγεθών ενέργειας απλά μεταβάλλοντας το μέγεθος της κουκκίδας. Αντίθετα, σε άλλα υλικά που έχουμε ως τώρα αναφερθεί, το ενεργειακό διάκενο εξαρτάται από την επιλογή του υλικού ή των υλικών. Αυτή η ιδιότητα είναι που καθιστά τις κβαντικές κουκκίδες ελκυστικές ως λύση στην περίπτωση φωτοβολταϊκών κυψελών πολυ-επαφών (multi-junction), στις οποίες προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση χρησιμοποιείται μια ποικιλία των υλικών για την συγκέντρωση πολλαπλών περιοχών του ηλιακού φάσματος. [15]

Μία φωτοβολταϊκή κυψέλη με μεγαλύτερο και ευρύτερο ενεργειακό διάκενο απορροφά περισσότερο φως, παράγοντας, επίσης, μεγαλύτερη τάση εξόδου. Από την άλλη φωτοβολταϊκές κυψέλες με μικρότερο ενεργειακό διάκενο έχουν μεγαλύτερο ρεύμα εξόδου αλλά μικρότερη τάση εξόδου. Στην δεύτερη περίπτωση, το εύρος ζώνης περιλαμβάνει το ερυθρό τέλος του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. [2] Το πλεονέκτημα που χαρακτηρίζει, λοιπόν, τις κβαντικές κουκκίδες είναι η ικανότητά τους να διαφοροποιούν και να αυξάνουν, κατά επιθυμία, την απορρόφηση του φωτός, απλά, επιλέγοντας την κατάλληλη διάμετρο της κουκκίδας. [6] Το ίδιο συμβαίνει και με το φάσμα εκπομπής το οποίο, επίσης, αλλάζει ανάλογα την διάμετρο της κουκκίδας. Για τον λόγο αυτόν, οι κβαντικές κουκκίδες είναι γνωστές ως αποδοτικοί εκπομποί του φωτός, με ποικίλες διαβαθμίσεις απορρόφησης και φάσματος εκπομπής. [2]

Θεωρητικά αποτελέσματα (Luque and Mart, 1997) έδειξαν ότι με την εισαγωγή κβαντικών κουκκίδων, οι φωτοβολταϊκές κυψέλες μπορούν να ξεπεράσουν την απόδοση του μοντέλου Shockley- Queisser όχι μόνο φωτοβολταϊκής κυψέλης απλής επαφής αλλά και διπλής επαφής. Οι επιστήμονες Luque και Marti εισάγοντας μια κβαντική κουκκίδα στο εσωτερικό ενός p-i-n φωτοβολταϊκού στοιχείου υπολόγισαν μια θεωρητική απόδοση 63%.

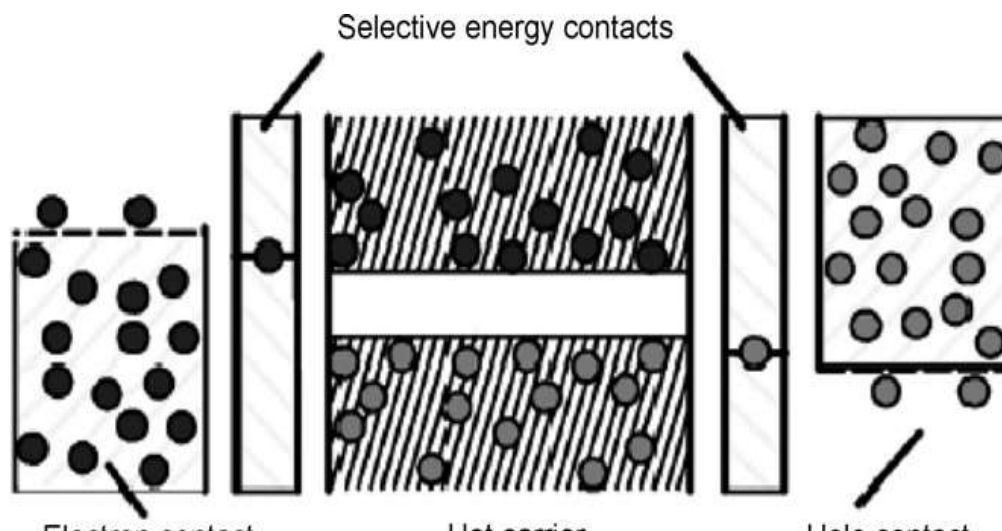
Το 2014 οι επιστήμονες πέτυχαν αποδόσεις που κυμαίνονται από 7.0 έως 8.3%. [6]



Εικόνα 19 Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που κατασκευάστηκε πειραματικά (Sargent Group at the University of Toronto, 2011) με την εισαγωγή οχτώ στρωμάτων από κβαντικές κουκκίδες, τα οποία εισήχθησαν για να επιτευχθεί μια ευρεία απορρόφηση του ηλιακού φάσματος. Οι μεταλλικοί δίσκοι στην μπροστινή επιφάνεια είναι οι ηλεκτρικές ενώσεις με τα υπόλοιπα στρώματα, δύο για κάθε στρώμα.^[15]

3.4.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία με θερμούς φορείς (Hot carriers, HCs)

Η μέθοδος των θερμών φορέων (HC) -ηλεκτρονίων και οπών- είναι μια πολύ απαιτητική αλλά και ενδιαφέρουσα μέθοδος, συγκριτικά με αυτές των νανο-σωλήνων άνθρακα (CNT) και των κβαντικών κουκκίδων (QD), γιατί χρησιμοποιούνται επαφές επιλεκτικής ενέργειας που μετατρέπουν το φως σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να παράγεται θερμότητα. Με άλλα λόγια, οι θερμοί φορείς συλλέγονται από τον απορροφητή εντός ενός μικρού εύρους ενέργειας, με επιλεκτικές επαφές ενέργειας χωρίς η επιπλέον ενέργεια να μετατρέπεται σε θερμότητα (βλ. Εικόνα 25).



Εικόνα 25 Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα ζωνών μιας ιδανικής φωτοβολταϊκής κυψέλης θερμών φορέων .^[2]

Η μέθοδος των θερμών φορέων είναι η πιο καινοτόμος προσέγγιση στην παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η επιλογή ενός υλικού που παίζει τον ρόλο του απορροφητή είναι βαρύνουσας σημασίας, γιατί είναι αυτό το οποίο πετυχαίνει υψηλή απόδοση συναρτήσει της συγκέντρωσης. Έρευνες και πειράματα έδειξαν ότι υλικά, όπως τα βισμούθιοχο βόριο (BBi), αζωτούχο βισμούθιο (BiN), βισμούθιοχος άργιλος (AlBi), φωσφορούχο βισμούθιο (BiP), θειούχο βισμούθιο (Bi_2S_3), κασσιτερούχο πυρίτιο (SiSn), αντιμονιούχο βόριο (BSb) και φωσφορούχο ίνδιο (InP) είναι καλά στην χρήση τους ως απορροφητές. Παρόλο αυτά, μέχρι σήμερα, λόγω της απουσίας ενός κατάλληλου υλικού το οποίο να έχει την ικανότητα να μειώνει τα επίπεδα ψύξης των φορέων, η κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων με θερμούς φορείς παραμένει σε πειραματικό στάδιο.^{[2], [4]}

Οι επιστήμονες Ross και Nozik διαπίστωσαν ότι σε συνθήκες με αέρια μάζα (A.M.) τιμής 1.5 – η αέρια μάζα ορίζει το μήκος του οπτικής διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει κάθετα στην ατμόσφαιρα της γης, εκφράζεται ως λόγος που σχετίζεται με το μήκος της μέγιστης κάθετης διαδρομής προς τα πάνω ως το ζενίθ και χρησιμοποιείται συχνά ως όρος όταν πρόκειται για φωτοβολταϊκές κυψέλες, όπου η ιδανική πρότυπη τιμή της πρέπει να είναι 1.5- , ο συντελεστής της απόδοσης μετατροπής έφτασε το όριο του 66%, το οποίο είναι 52% υψηλότερο από τα συνηθισμένα

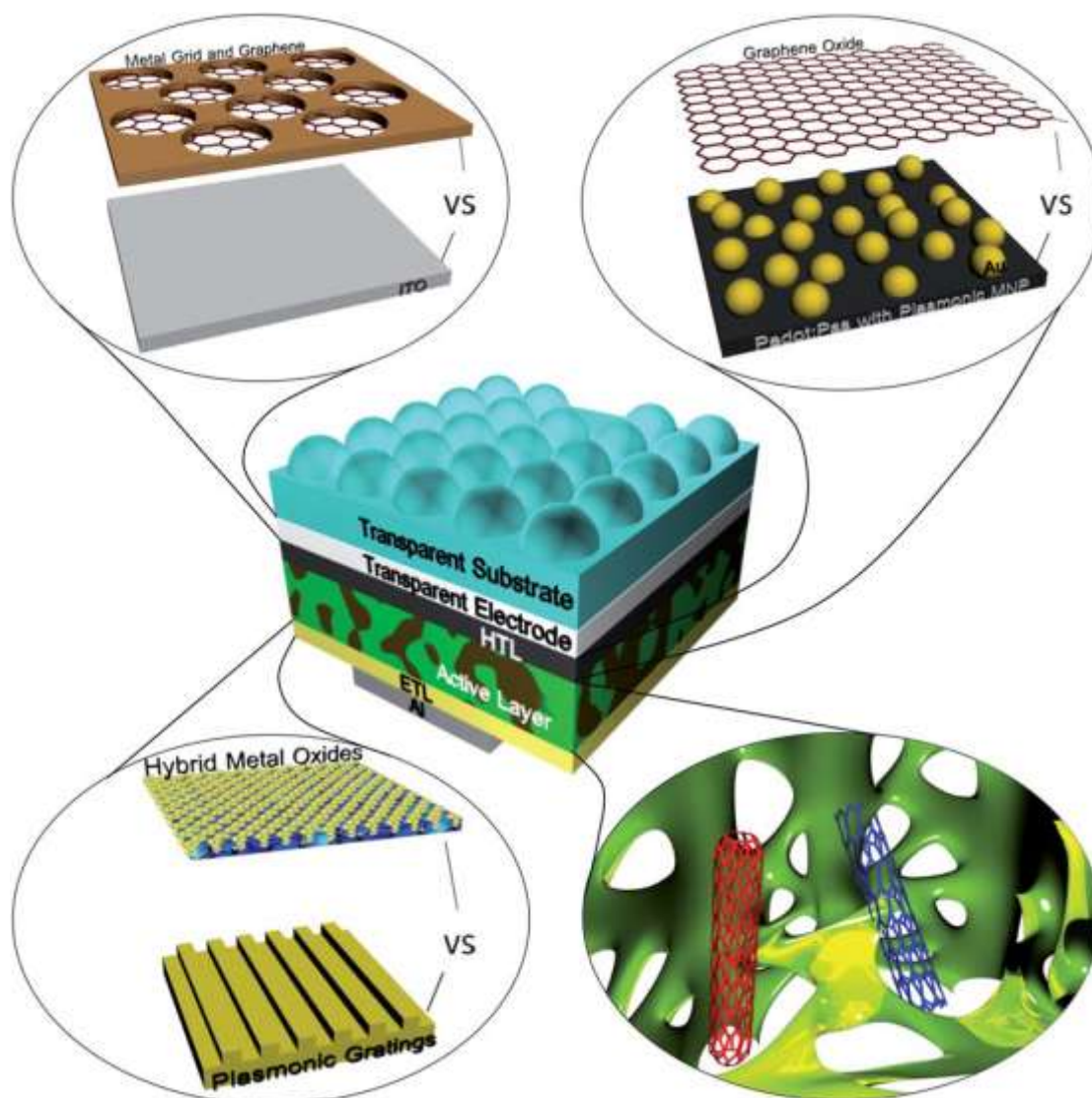
συστήματα φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου (Si) και 33% υψηλότερο από τα συστήματα τα οποία βασίζονται στην αρχή των κβαντικών κουκκίδων. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, παρατηρήθηκαν μειωμένες απώλειες ακτινοβολίας και υψηλή Carnot έξοδος – όρος της θερμοδυναμικής που εκφράζει την κατευθείαν μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική τάση ή ενέργεια-, η οποία προέκυψε λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των θερμών φορέων. ^[2]

4. Τέταρτη Γενιά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Καθώς η τρίτη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων συνεχίζει να εξελίσσεται, αναπτύχθηκε η ιδέα πάνω στον σχεδιασμό νέων φωτοβολταϊκών στοιχείων. Παρόλο το γεγονός ότι η τρίτη γενιά πολυμερικών φωτοβολταϊκών κυψελών (PSCs) είναι πολλά υποσχόμενη με αρκετές προοπτικές για το μέλλον, ωστόσο η εξέλιξη που έχει σημειωθεί είναι ακόμη περιορισμένη λόγω προβλημάτων όπως η απαίτηση για πιο λεπτά ενεργά επίπεδα (active layers) εξαιτίας της χαμηλής κινητικότητας των πολυμερών και η ως αποτέλεσμα αυτής μικρή οπτική απορροφητικότητα. Για τους λόγους αυτούς οι μελλοντικές έρευνες για την βελτίωση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων θα πρέπει να εστιάσουν στην ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής δομής της τέταρτης γενιάς φωτοβολταϊκών κυψελών ώστε να αμβλυνθούν τέτοια θέματα. Έτσι, οδηγούμαστε πια στα φωτοβολταϊκά πανέλα τέταρτης γενιάς.

Η δομή της τέταρτης γενιάς φωτοβολταϊκών κυψελών είναι επιστημονικά γνωστή με την φράση “inorganics-in-organics”, δηλαδή την ενσωμάτωση ανόργανων νανοδομών εντός των φωτοβολταϊκών κυψελών που αποτελούνται από οργανικά υλικά. Τα ανόργανα νανοδομοστά στοιχεία που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν νανοδομές άνθρακα, π.χ. νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs, carbon nanotubes) που έχουμε ήδη αναφέρει, γραφένιο και παράγωγά του, μεταλλικά νανομόρια (mNPs, metal nanoparticles), μεταλλικά νανο-οξείδια και νανο-υβρίδια. Η πολυχρηστική φύση των ανόργανων νανοδομών έχει οδηγήσει στην ενσωμάτωσή τους σε πολλά μέρη της εσωτερικής αρχιτεκτονικής κατασκευής των πολυμερικών φωτοβολταϊκών στοιχείων (PSCs) της γενιάς αυτής, όπως στα στρώματα μεταφοράς (transfer layers), στο ενεργό στρώμα (active layer) και στα ηλεκτρόδια (βλ. Εικόνα 26). Η προσδοκία των

επιστημόνων από αυτούς τους σχεδιασμούς είναι ότι θα οδηγηθούν σε πιο αποδοτικές και σταθερές συσκευές.



Εικόνα 26 Η χρήση των ανόργανων νανοδομών στα διάφορα στρώματα των πολυμερών φωτοβολταϊκών κυψελών. ^[17]

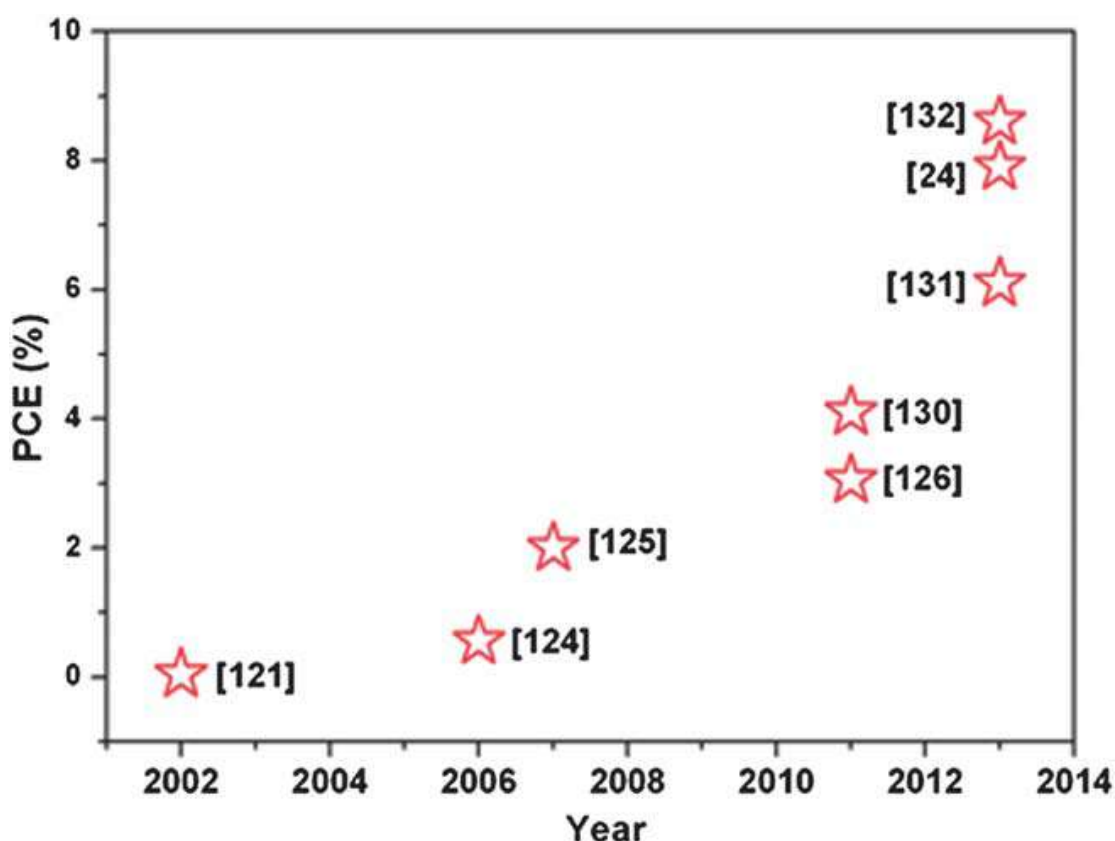
Στο σημείο αυτό κρίνεται αναγκαία μία διευκρίνιση ως προς την λεπτή διαχωριστική γραμμή που διακρίνει την τρίτη γενιά φωτοβολταϊκών κυψελών από την τέταρτη γενιά. Παρόλο, για παράδειγμα, που κάποια φωτοβολταϊκά στοιχεία της τρίτης γενιάς, που έχουμε προαναφέρει, θα μπορούσαν να θεωρηθούν ότι ανήκουν στην

τέταρτη γενιά λόγω της ενσωμάτωσης ανόργανων συστατικών – συνήθως τιτανίου – , ειδικά όταν συνδυάζονται με ένα πολυμερές ή με ένα οργανικό στρώμα ως χρωματο-ευαίσθητες φωτοβολταϊκές κυψέλες (DSSC) συμπαγούς κατάστασης , ωστόσο κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Ο λόγος είναι ότι στην παραπάνω περίπτωση, το ανόργανο συστατικό είναι απαιτούμενο για την λειτουργικότητα του φωτοβολταϊκού στοιχείου και δεν εισάγει επιπρόσθετα πλεονεκτήματα, όπως αυτά που θα συζητήσουμε στις τέταρτης γενιάς φωτοβολταϊκές κυψέλες.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της τέταρτης γενιάς φωτοβολταϊκών στοιχείων εστιάζονται στην φθηνή τους φύση και την καλύτερη απόδοση σε σχέση με τα στοιχεία προηγούμενων γενεών. Διαπιστώνουμε, λοιπόν, ότι η τέταρτη γενιά φωτοβολταϊκών κυψελών συνδυάζει το χαμηλό κόστος - αναλογικά με την ευλυγισία- των λεπτών πολυμερικών υμενίων με την σταθερότητα καινοτόμων ανόργανων νανοδομών. Σκοπός του συνδυασμού αυτού είναι η βελτίωση των οπτοηλεκτρικών ιδιοτήτων των λεπτών υμενίων χαμηλού κόστους. Αυτή η αρχιτεκτονική της συσκευής διατηρεί τη φθηνή ιδιότητα μιας λειτουργικής φωτοβολταϊκή δομής. Επιπλέον, ενσωματώνονται ανόργανα στοιχεία που βελτιώνουν την συλλογή ενέργειας των εγκάρσιων τομών, τον διαχωρισμό των φορτίων και την μεταφορά του φορτίου και μέσα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τέλος, παρατηρείται ότι η χρήση συγκεκριμένων ανόργανων υλικών στην τέταρτη γενιά φωτοβολταϊκών κυψελών συμβάλει στην αύξηση της διάρκειας ζωής των συσκευών αυτών.

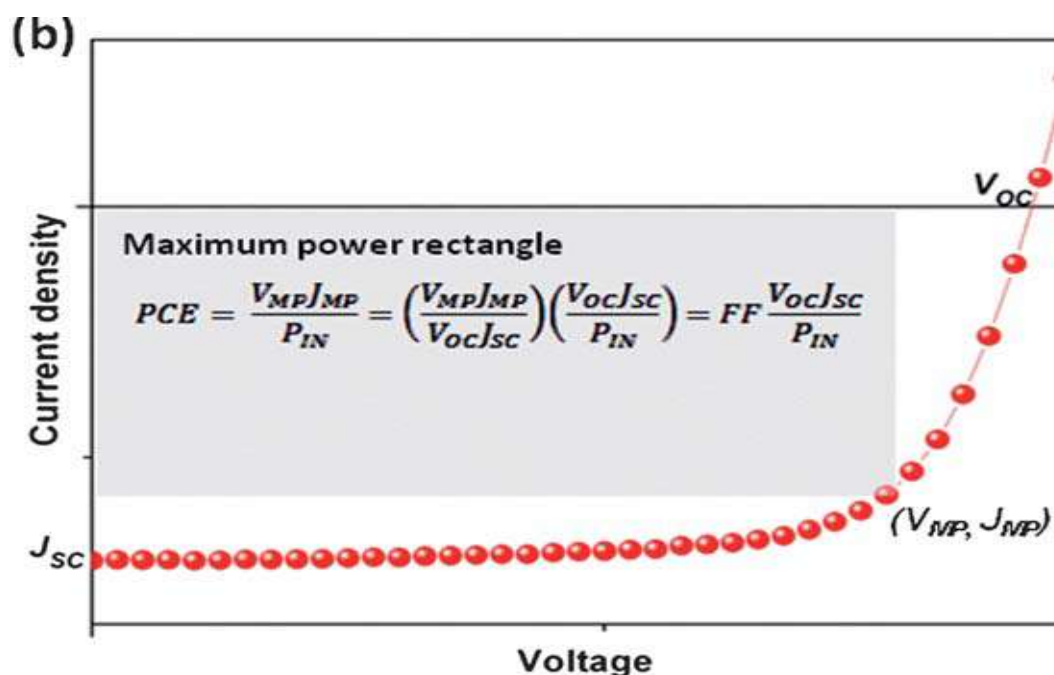
Αξίζει να αναφέρουμε ότι στην επιστημονική βιβλιογραφία υπάρχουν αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με την επιρροή που ασκεί η ενσωμάτωση των μεταλλικών νανομορίων (mNPs) στις ιδιότητες της μετακίνησης του φορτίου. Για παράδειγμα, υπάρχει η πεποίθηση της βελτίωσης της εξαγωγής φορέων, που υποβοηθείται από μία μείωση στις σειρές αντιστάσεων. Από την άλλη, υποστηρίζεται η άποψη ότι υπάρχει βελτίωση στην κινητικότητα λόγω των μεταλλικών νανομορίων (mNPs), όμως παρατηρείται μια μείωση στην εξαγωγή φορέων εξαιτίας της λειτουργίας των μεταλλικών νανομορίων (mNPs) ως παγίδες φορτίων. Αυτές οι γνώμες, βεβαίως, δεν μπορούν να γενικευθούν. Είναι δυνατό τέτοιες απώλειες – τόσο λόγω της σβέσης των εξιτονίων (excitons) όσο και λόγω της παγίδευσης του φορτίου – να μετριαστούν μέσα από μια λεπτομερή μελέτη και κατανόηση του πώς επιδρούν η συγκέντρωση , το σχήμα και το μέγεθος των μεταλλικών νανομορίων (mNPs) στο ενεργό στρώμα.

Είναι ενδιαφέρον ότι, παρόλο τις ολοφάνερες βελτιώσεις στις αποδόσεις μετατροπής της ισχύος χάρις στην δομή «ανόργανων υλικών σε οργανικά υλικά» της τέταρτης γενιάς φωτοβολταϊκών στοιχείων (βλ. Εικόνα 27), υπάρχει, ακόμη, απουσία πιστοποίησης από ευνυπόληπτα ινστιτούτα όπως το NREL (National Renewable Energy Laboratory) ^[18]. Η πιστοποίηση της λειτουργικότητας και της αξιοπιστίας μιας συσκευής είναι υψίστης σημασίας, ιδιαίτερα για μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, όπως αυτή της τέταρτης γενιάς φωτοβολταϊκών στοιχείων, τόσο ώστε να γίνει ευρύτερα γνωστή όσο και για την προώθησή της στον τομέα του εμπορίου. Αυτό, σαφώς, αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα.



Εικόνα 27 Βελτίωση της απόδοσης μετατροπής της ισχύος (PCE %, power conversion efficiency) των φωτοβολταϊκών κυψελών τέταρτης γενιάς ως αποτέλεσμα της χρήσης νανοσωλήνων. ^{[17], [24], [121], [124], [125], [126], [130], [131], [132]}

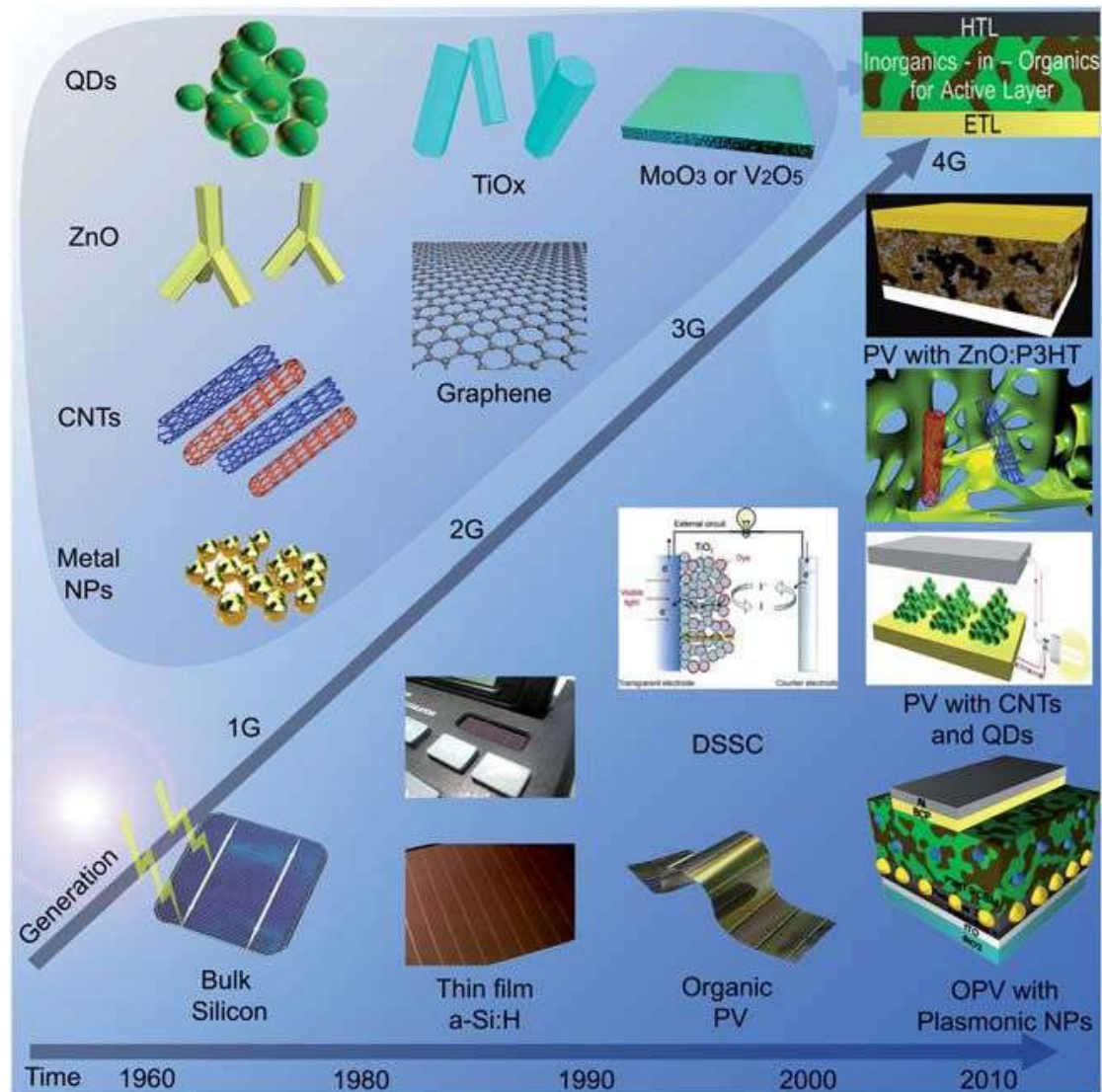
Για την κατανόηση της έννοιας της απόδοσης μετατροπής της ισχύος (PCE %, power conversion efficiency), την οποία αναφέραμε, παραθέτουμε το παρακάτω διάγραμμα (βλ. Εικόνα 28) με την μαθηματική σχέση με την οποία την υπολογίζουμε.



Εικόνα 28 Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου όπου φαίνονται η τάση ανοιχτοκυκλώματος (V_{oc}), η ένταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης (J_{sc}), και το σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point) με τάση V_{MP} και ένταση ρεύματος J_{MP} αντίστοιχα. Δίνεται, επίσης, η μαθηματική σχέση υπολογισμού της απόδοσης μετατροπής ισχύος.^[17]

Η νέα πολλά υποσχόμενη αρχιτεκτονική της τέταρτης γενιάς πολυμερών φωτοβολταϊκών κυψελών ανοίγει τον δρόμο για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων στο μέλλον σε αντιστάθμισμα των μέχρι τώρα γνωστών αποδοτικών ανόργανων συστημάτων. Οι επιστήμονες μετρούν τις μέρες μέχρι το επόμενο νανο-υβρίδιο μίας ένωσης (single junction) να ξεπεράσει την τιμή του 10% της απόδοσης μετατροπής της ισχύος (PCE), το οποίο θα ανοίξει τις πύλες σε μια οικονομία καθοδηγούμενη από πιστοποιημένα στοιχεία και γνώσεις.^[17]

Μια ενδεικτική εικόνα της εξέλιξης και της μετάβασης από γενιά σε γενιά των φωτοβολταϊκών στοιχείων αναπαριστάται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29 Εξέλιξη των τεσσάρων γενεών φωτοβολταϊκών κυψελών σε βάθος χρόνου.^[17]

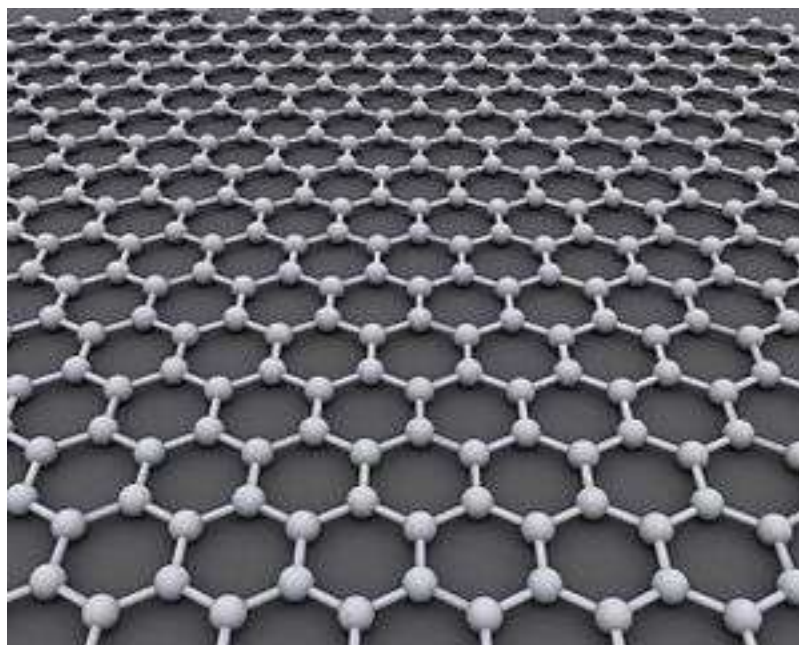
4.1 Λίγα λόγια για τις ανόργανες νανοδομές που χρησιμοποιούνται στην τέταρτη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων

Οι ανόργανες νανοδομές που χρησιμοποιούνται ευρύτερα στην τέταρτη γενιά πολυμερικών φωτοβολταϊκών κυψελών (PSCs) μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες : τις νανοδομές άνθρακα, τα μεταλλικά νανομόρια και τα μεταλλικά οξείδια. Στην μελέτη μας θα αποφύγουμε να αναφερθούμε στις κβαντικές κουκκίδες.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) είναι σωληνάκια γραφενίου που έχουν μοναδικές ηλεκτρονικές και οπτικές ιδιότητες. Ανάλογα τον αριθμό των ομοαξονικών σωληνίων που υπάρχουν, οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) ταξινομούνται (κατασκευαστικά) σε μονού τοιχώματος (SWNTs, single-walled nanotubes), διπλού τοιχώματος (double walled) και πολλών τοιχωμάτων (MWNTs, multi walled nanotubes). Μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των νανοσωληνίων άνθρακα (CNTs), είτε είναι μονού τοιχώματος είτε πολλών τοιχωμάτων, είναι η εξαιρετική ιδιότητα του φορτίου που οδηγεί σε βαλλιστική μεταφορά – βαλλιστική μεταφορά είναι η ανεμπόδιστη μεταφορά ηλεκτρονίων σε μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, η μεταφορά φορτίου στα δίκτυα νανοσωληνίων άνθρακα (CNTs) μπορεί να παρεμποδιστεί από τις ενώσεις που οδηγούν σε κινητικότητες λιγότερο από $1\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Από την οπτική των πολύ χαμηλών κινητικοτήτων οπών (ή ηλεκτρονίων) στις ενεργές επιφάνειες των πολυμερών φωτοβολταϊκών στοιχείων (PSCs), οι οποίες, συνήθως, κυμαίνονται σε λιγότερο από $10^{-3}\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, οι κινητικότητες που επιτυγχάνονται χάριν στους νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) παραμένουν ικανοποιητικές.

Επιπρόσθετα, εκτός από τους νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), το γραφένιο είναι άλλο ένα αλλότροπο άνθρακα που έχει ξεκινήσει να προσελκύει αρκετά το ενδιαφέρον για την χρήση του σε οργανικές ηλεκτρονικές συσκευές. Δομικά, το γραφένιο είναι ένα σύστημα δύο διαστάσεων που αποτελείται από άτομα άνθρακα τοποθετημένα σε εξαγωνικό σχήμα (βλ. Εικόνα 30). Ανάμεσα στις πρωταρχικές ιδιότητες του γραφενίου που το καθιστούν σημαντικό στην χρήση του σε οργανικές ηλεκτρονικές συσκευές είναι η υψηλή κινητικότητα φορτίου $\sim 2,6 \cdot 10^5\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ και η οπτική του μετάδοση που προσεγγίζει το 97% στα 550nm. Οι ηλεκτρονικές αυτές ιδιότητες έχουν παρατηρηθεί μόνο σε δείγματα γραφενίου που είναι μικρομηχανολογικά κομμένα, ενώ σε μεγαλύτερη

κλίμακα το γραφένιο που παράγεται από εναπόθεση εξάτμισης έχει πιο ασθενείς ιδιότητες μεταφοράς φορτίου.



Εικόνα 30 Το γραφένιο είναι ένα κρυσταλλικό πλέγμα ατόμων άνθρακα σε κυψελωτή δισδιάστατη διάταξη.^[19]

Μια ακόμη κατηγορία υλικών που έχουν τραβήξει το επιστημονικό ενδιαφέρον για την εφαρμογή τους σε οργανικές ηλεκτρονικές συσκευές είναι τα μεταλλικά οξείδια. Αν και το ευρύ ενεργειακό τους διάκενο δεν τα καθιστά ευνοϊκά ως οπτικό ενεργό συστατικό στις περισσότερες οπτικο-ηλεκτρονικές συσκευές, ωστόσο, τα μεταλλικά οξείδια όπως το οξείδιο του τιτανίου (TiO_2 ή TiO_x), το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) και το οξείδιο του μολύβδου (MoO_2) έχουν βρει εφαρμογή σε στρώσεις διεπιφανειών. Οι στάθμες Fermi των συγκεκριμένων υλικών ευνοούν την εξαγωγή ηλεκτρονίων ή οπών ενώ, επίσης, είναι γνωστό ότι τα οξείδια αυτά είναι ικανοποιητικοί συλλέκτες υγρασίας και οξυγόνου, κάτι το οποίο συμβάλει στην επέκταση της διάρκειας ζωής των οργανικών ηλεκτρονικών συσκευών.

Οι μεταλλικές νανοδομές αποτελούν την τρίτη κατηγορία υλικών που χρησιμοποιούνται στην τέταρτη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων. Παρόλο το γεγονός

ότι υπάρχει ένα μεγάλο εύρος από μέταλλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις οργανικές ηλεκτρονικές συσκευές, ωστόσο τα μέταλλα που έχουν διερευνηθεί περισσότερο για την εφαρμογή τους σε αυτές είναι ο χρυσός (Au) και το ασήμι (Ag). Αυτό οφείλεται στην πιθανότητα βελτίωσης της απόδοσης των οργανικών οπτικο-ηλεκτρονικών συσκευών ως αποτέλεσμα της εφαρμογής τους καθώς, επίσης, επειδή παρέχουν την δυνατότητα δημιουργίας μιας καινούριας γενιάς διαφανών αγωγών για τις οπτικο-ηλεκτρονικές συσκευές.^[17]

4.2 Εφαρμογές των ανόργανων νανοδομών στις οργανικές ηλεκτρονικές συσκευές

Τυπικά, μια φωτοβολταϊκή κυψέλη περιλαμβάνει ενεργά υλικά για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας και στρώματα μεταφοράς φορτίου τα οποία βρίσκονται στριμωγμένα ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια : ένα διαφανές αγωγίμο ηλεκτρόδιο (transparent conducting electrode, TCE) οποίο επιτρέπει στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία να διαπεράσει το φωτοβολταϊκό στοιχείο και ένα αδιαφανές , συνήθως μεταλλικό, οπίσθιο ηλεκτρόδιο το οποίο έχει διπλή ιδιότητα, εκείνη του ηλεκτροδίου και εκείνη ως αντανakλαστικού στοιχείου για την ανάκλαση του φωτός πίσω προς το ενεργό υλικό. Οι ανόργανες νανοδομές, όπως ήδη προαναφέραμε σε προηγούμενη παράγραφο, χρησιμοποιούνται στα ενεργά υλικά, στα στρώματα μεταφοράς και τέλος στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου.^[17]

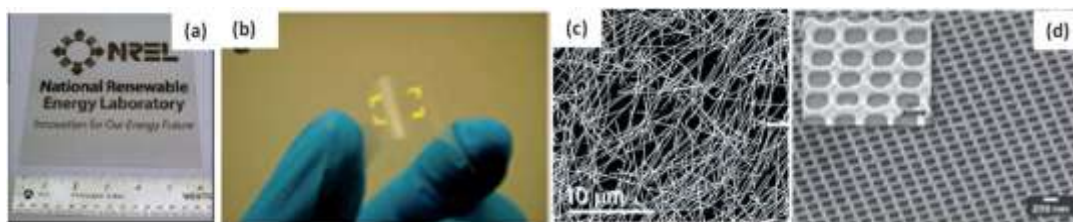
4.2.1 Ανόργανα διαφανή ηλεκτρόδια

Στην εποχή μας το υλικό που προτιμάται κυρίως για την κατασκευή των διαφανών αγωγίμων ηλεκτροδίων των φωτοβολταϊκών κυψελών είναι το οξειδίο του ινδίου-κασσίτερου (indium tin oxide, ITO). Τα πλεονεκτήματά του, όπως εκείνο της χαμηλής αντίστασης των $10\Omega \square^{-1}$ του φύλλου του οξειδίου ινδίου-κασσίτερου (ITO) και η ικανότητα υψηλής μετάδοσης του ορατού φωτός (περίπου μια μεταφορά της τάξης του 85% φωτός με μήκος κύματος 400-700 nm), το καθιστούν ευρέως διαδεδομένο ενώ η διαδικασία κατασκευής του συνεχώς βελτιστοποιείται. Από την άλλη, οι περιορισμοί

του συμπεριλαμβανομένων της χαμηλής αγωγιμότητας όταν αυτό λυγίζει, η σπανιότητα του ινδίου και οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται κατά την λειτουργία και επεξεργασία του έχουν παρακινήσει τους επιστήμονες να αναζητήσουν εναλλακτικά υλικά, ειδικά για την ανάπτυξη ευλύγιστων οργανικών ηλεκτρονικών συσκευών.

Όσον αφορά το μεταλλικό οπίσθιο ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στο άλλο άκρο, αυτό μπορεί να παραχθεί από μέταλλα σταθερά στην ατμόσφαιρα, όπως είναι το αλουμίνιο (Al) ή ο χρυσός (Au), με τεχνικές εξάτμισης. Υπάρχουν, επίσης, διαθέσιμες άλλες κατασκευές ηλεκτροδίων, όπως αυτές που ενσωματώνουν π.χ. φθορίδιο του λιθίου (LiF), μαγνήσιο (Mg) ή χαλκό (Cu), οι οποίες περικλείονται σε ένα στρώμα των προαναφερθέντων ατμοσφαιρικά σταθερών μετάλλων. Η επιλογή του υλικού του οπίσθιου ηλεκτροδίου βασίζεται στα ενεργειακά επίπεδα των υλικών των ενεργών στρωμάτων, των στρωμάτων μεταφοράς και του μπροστινού διαπερατού αγωγίμου ηλεκτροδίου (TCE) έτσι ώστε το ηλεκτρόδιο να παράγει μια Ωμική επαφή. Οι ερευνητές προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν ή να αντικαταστήσουν τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυψελών, δεδομένου του υψηλού κόστους των μετάλλων αλλά και της πιθανότητας «μόλυνσης» των ενεργών στρωμάτων από τα διαχέοντα μεταλλικά ιόντα.

Οι τελευταίες καινοτόμες τεχνολογίες που σχετίζονται με την παραγωγή της επόμενης γενιάς υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των διαπερατών αγωγίμων ηλεκτροδίων (TCE) αφορούν την χρήση οξειδίων χωρίς ίνδιο, λεπτών μεταλλικών υμενίων (πολύ λεπτά της τάξης αρκετών nm προκειμένου να διατηρηθεί η διαφάνεια), μεταλλικών πλεγμάτων, ή νανο-υλικών όπως νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), γραφένιο, ή νανοκαλώδια από ασήμι (βλ. Εικόνα 31).



Εικόνα 31 (a) Μια μεγάλη περιοχή ηλεκτροδίων από νανοσωλήνες άνθρακα ψεκασμένους με σπρέι (αναπαραγωγή με την άδεια από την επιστημονική αναφ.51, Copyright 2009, Wiley) (b) διαφανή ηλεκτρόδια γραφενίου πάνω σε ευλύγιστο υπόστρωμα (αναπαραγωγή με την άδεια από την επιστημονική αναφ.52, Copyright 2010, American Chemical Society) (c) δίκτυα νανοκαλωδίων από ασήμι (αναπαραγωγή με την άδεια από την επιστημονική αναφ.50, Copyright 2009, American Chemical Society) και (d) διαπερατά μεταλλικά πλέγματα (αναπαραγωγή με την άδεια από την επιστημονική αναφ.53, Copyright 2013, Optical Society of America).^{[17], [50], [51], [52], [53]}

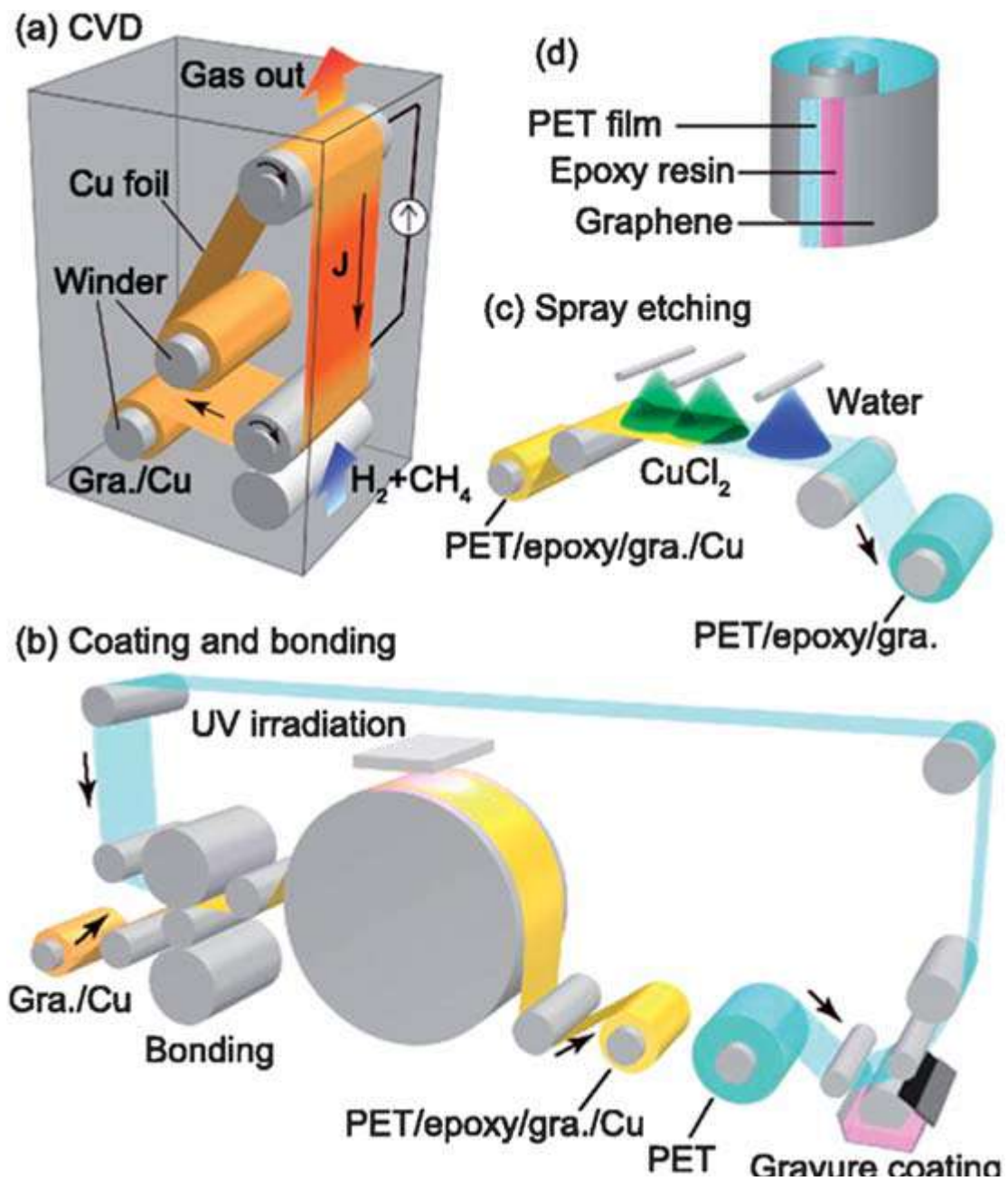
Μολονότι είναι πιθανή η παραγωγή ημιδιαφανών λεπτών μεταλλικών υμενίων με πάχος λιγότερο από 50nm, ωστόσο υπάρχει μία συνάρτηση συμβιβασμού μεταξύ της αντίστασης του φύλλου και της μετάδοσης του φωτός. Η αντίσταση φύλλου απαιτεί μια ομογενή επιφάνεια κάλυψης που παρέχεται από ένα λεπτό μεταλλικό υμένιο, όμως με τον τρόπο αυτό η μετάδοση του φωτός μειώνεται δραματικά καθώς το πάχος του υμενίου αυξάνεται. Τα ασυνεχή μεταλλικά υμένια ή τα μεταλλικά πλέγματα προσφέρουν μια λύση στο πρόβλημα αυτό καθώς τα κενά εντός του μεταλλικού πλέγματος επιτρέπουν την μετάδοση του φωτός, ενώ οι γραμμές του πλέγματος μπορούν να διατηρήσουν το μέγεθος του πάχους και, επομένως, την αγωγιμότητα.

Οι χαμηλές αντιστάσεις φύλλων είναι δυνατές, επίσης, με την χρήση νανοκαλωδίων από ασήμι (Ag) και οι αντιστάσεις επαφής μεταξύ μεμονωμένων νανοκαλωδίων μπορούν να μειωθούν με την διαδικασία της τήξης. Μάλιστα έχουν παραχθεί ηλεκτρόδια με νανοκαλώδια από ασήμι (Ag) τα οποία κατόπιν ειδικής επεξεργασίας δίνουν αντίσταση φύλλου $11\Omega \square^{-1}$ και διαφάνεια 87%.

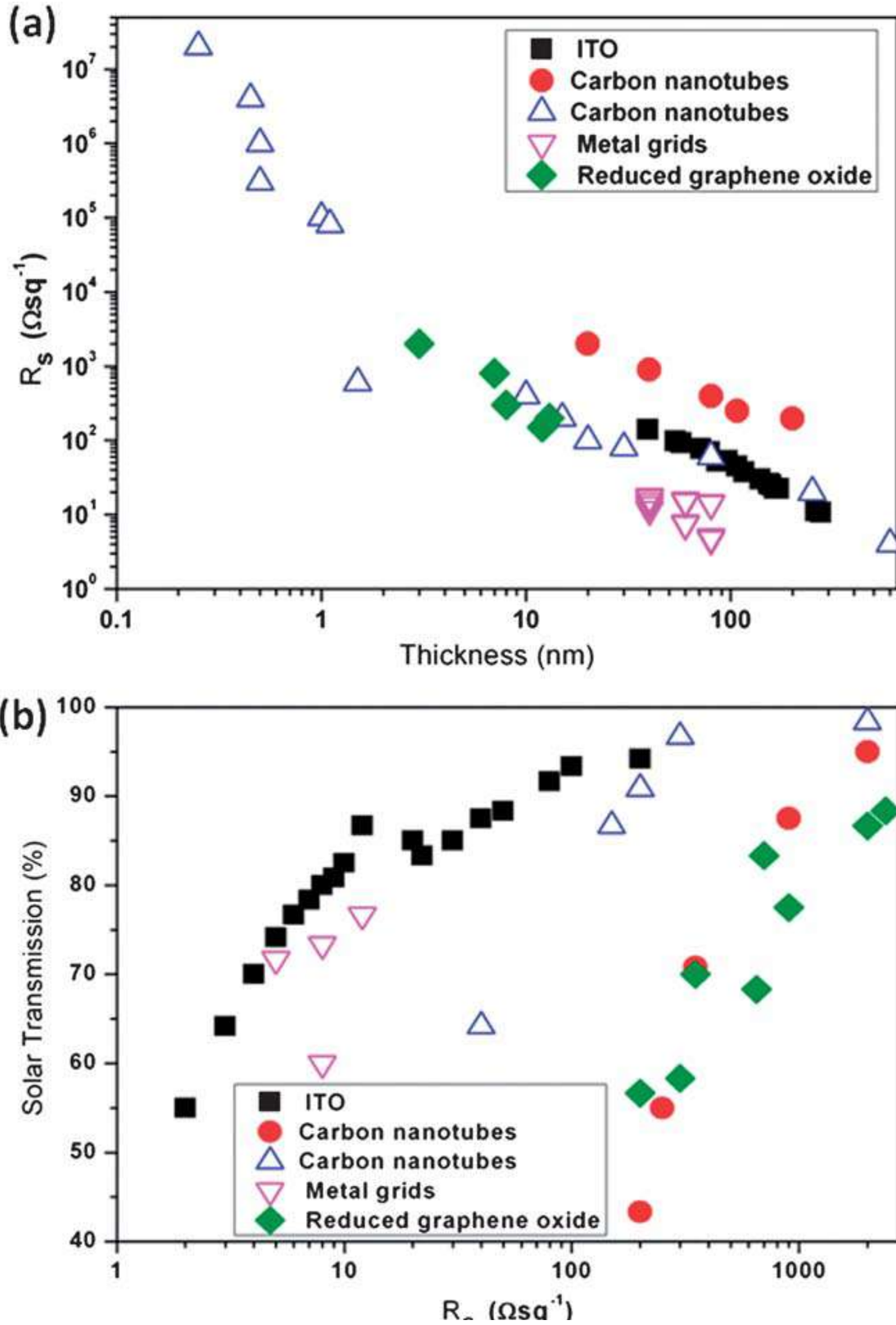
Τα νανο-υλικά από άνθρακα, όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), έχουν υψηλές κινητικότητες φορτίου και μπορούν να παρουσιάσουν βαλλιστική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου. Θεωρητικά θα απαιτούνταν μόνο μια μικρή συγκέντρωση για να επιτευχθεί μία χαμηλή αντίσταση φύλλου κατάλληλη για διαφανή αγωγή ηλεκτροδίων (TCEs). Οι μικρές συγκεντρώσεις θα

συνεπάγονταν ότι η απορρόφηση του φωτός από τα διαφανή αγωγίμα ηλεκτροδία (TCEs) που προκύπτουν θα ήταν, επίσης, μικρή. Δυστυχώς, η αντίσταση επαφής μεταξύ ξεχωριστών νανοσωλήνων είναι πολύ υψηλή και προκειμένου να επιτευχθεί μία αντίσταση φύλλου των $10\Omega\ \square^{-1}$, τα υμένα νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) θα πρέπει να έχουν πάχος μεγαλύτερο από 100nm. Παρόλο αυτά, έχουν χρησιμοποιηθεί υμένα νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) με μετρημένη αντίσταση φύλλου $30\Omega\ \square^{-1}$ και μια μέση διαπερατότητα 70% του ορατού φάσματος (400-700nm).

Το γραφένιο θεωρείται ότι δυναμικά θα αποτελέσει το ιδανικό υλικό για την κατασκευή διαφανών αγωγίμων ηλεκτροδίων (TCE). Κάποιες ιδιότητές του είναι ότι είναι ελαφρύ, αγωγίμο και η εσωτερική του δομή αποτελείται από άτομα άνθρακα ταξιθετημένα σε εξαγωνικό πλέγμα (βλ. Εικόνα 30). Το γραφένιο έχει μετρημένη αντίσταση φύλλου της τάξης των $300\Omega\ \square^{-1}$ και μια διαπερατότητα του φωτός μεγαλύτερη από 97% στα 550 nm και περισσότερη από 95% στα 400-1000 nm. Αν και μπορούμε να παράγουμε γραφένιο σε μεγάλες διαστάσεις, στην πραγματικότητα το γραφένιο προετοιμάζεται σε φύλλα με λίγα στρώματα (“few-layer” graphene -FLG-sheets), όπου αλληλεπικαλυπτόμενες φλούδες γραφενίου διαστάσεων κάποιων μικρομέτρων (μm) τοποθετούνται πάνω σε επιφάνεια. Δυστυχώς, αναφορικά με την αγωγιμότητα μεταξύ διαφορετικών νανοκαλωδίων, τα όρια των ινών που σχηματίζονται στα προαναφερθέντα φύλλα γραφενίου (FLG) παρουσιάζουν ένα εμπόδιο στην αγωγιμότητα φορτίου ενώ η αντίσταση του φύλλου αυξάνεται. Παρόλο αυτά, καινούριες τεχνικές μικρο-κατασκευών (εκτύπωση roll-to roll, βλ. Εικόνα 32) έχουν καταστήσει δυνατή την παραγωγή μονών φύλλων σε μεγάλες distâncias χωρίς ελαττώματα. Με τον τρόπο αυτό, το γραφένιο αντιπροσωπεύει ένα εξαιρετικό υποψήφιο για την μελλοντική παραγωγή διαπερατών αγωγίμων ηλεκτροδίων (TCEs) σε μεγάλη κλίμακα. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι προκειμένου να επιτευχθεί αντίσταση φύλλου της τάξης των $15\ \Omega\ \square^{-1}$ που είναι επιθυμητή για τον διαπερατό αγωγό, θα πρέπει να τοποθετηθούν σε στοίβα περίπου ~20 μονά στρώματα γραφενίου, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική πτώση την διάδοση του φωτός που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φτάσει το 50% (βλ. Εικόνα 33).^[17]



Εικόνα 32 Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής τύπωσης roll-to-roll (αναπαραγωγή με την άδεια από την επιστημονική αναφ. 62, Copyright 2013, American Institute of Physics).^{[17],[62]}

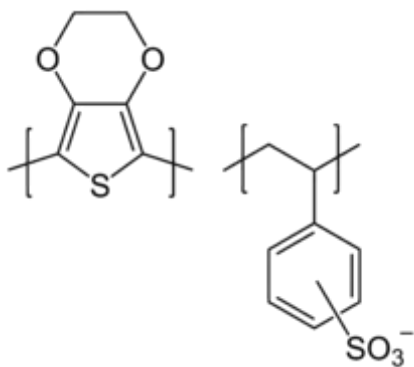


Εικόνα 33 (α) Συνάρτηση της αντίστασης φύλλου με το πάχος υμενίου και (β) συνάρτηση της μετάδοσης του φωτός με την αντίσταση φύλλου για οξείδιο ινδίουχου κασσίτερου (ITO), νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), μεταλλικά πλέγματα και ηλεκτρόδια οξειδίου του γραφενίου.^[17]

4.2.2 Χρήση των ανόργανων υλικών στα στρώματα μεταφοράς (transport layers)

• 4.2.2.a Στρώματα μεταφοράς οπών

Αν και το πλέον διαδεδομένο εμπορικά υλικό που χρησιμοποιείται ως στρώμα μεταφοράς οπών στις οργανικές ηλεκτρονικές συσκευές είναι το PEDOT: PSS [poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate ^[20] – πολυ(3,4-αιθυλοδιουχοθειοφαινιούχο) πολυφαινυλαιθινιούχο θείο], (βλ. Εικόνα 34), παρόλο αυτά, οι συσκευές που είναι κατασκευασμένες από το συγκεκριμένο υλικό μειονεκτούν λόγω της μικρής διάρκειας ζωής τους. Το γεγονός αυτό έχει αποτελέσει την αφορμή για την έρευνα νέων υλικών που θα το αντικαταστήσουν αποτελεσματικά και θα χαρακτηρίζονται από ιδιότητες όπως σταθερότητα στον αέρα και υψηλή διαπερατότητα από την ηλιακή ακτινοβολία. Τα αρχικά τεστ που πραγματοποιήθηκαν σε νέα υλικά μεταφοράς οπών περιλαμβάνουν λεπτά υμένια από μεταλλικά οξείδια μετάβασης (transition metal oxides, TMO) όπως το οξείδιο του βολφραμίου (WO_3), το οξείδιο του βαναδίου (V_2O_5), το οξείδιο του μολύβδου (MoO_3) και το οξείδιο του νικελίου (NiO), τα οποία διαθέτουν τα πλεονεκτήματα της σταθερότητας στον αέρα και της εξαιρετικής διαπερατότητας του φωτός του ορατού φάσματος. Ακόμη, τα συγκεκριμένα μεταλλικά οξείδια μετάβασης (TMOs) μπορούν να σχηματίσουν μια πολύ καλή Ωμική επαφή είτε με την άνοδο από οξείδιο του ινδίουχου κασσίτερου (ITO) είτε με την οπίσθια μεταλλική κάθοδο, διευκολύνοντας έτσι την εξαγωγή φορτίου. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν τα προαναφερθέντα μεταλλικά οξείδια είναι ότι απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες και κατάσταση κενού κατά την επεξεργασία τους και την ενσωμάτωσή τους στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα αυτά, πολλές επιστημονικές ομάδες έχουν εφαρμόσει προσεγγιστικές τεχνικές σύνθεσης υπό χαμηλή θερμοκρασία, δηλαδή κατεργασία σε θερμοκρασίες που να είναι συμβατές με μία φωτοβολταϊκή κυψέλη εύρους $70^\circ\text{-}100^\circ\text{C}$. Αυτό έχει οδηγήσει τόσο στην βελτίωση του χρόνου ζωής όσο και στην αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων στα οποία έχουν ενσωματωθεί τέτοια υλικά. ^[17]



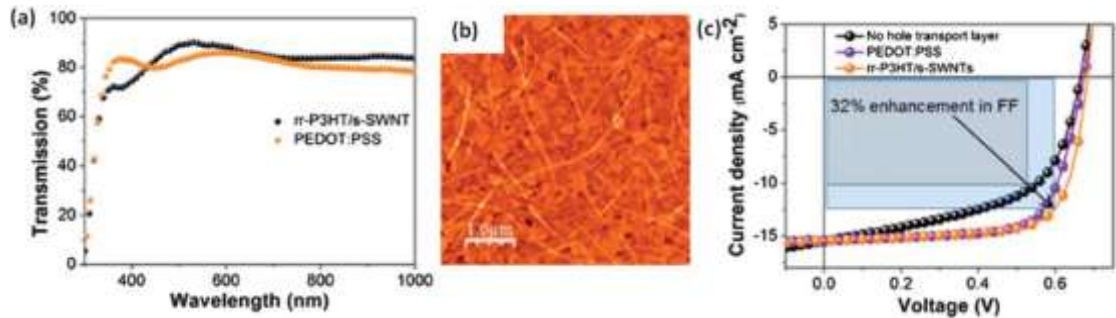
Εικόνα 34 Το πολυμερές PEDOT: PSS [poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate. Χρησιμοποιείται συνήθως ως διαπερατό, αγώγιμο πολυμερές με μεγάλη ελατότητα σε πολλές εφαρμογές.^[20]

Κάποια μέταλλα όπως ο χρυσός (Au) λειτουργούν πολύ αποδοτικά στην έγχυση οπών. Όμως ελάχιστα μόνο νανόμετρα (nm) χρυσού υμενίου μπορούν να εμποδίσουν εντελώς την μετάδοση του φωτός εντός της συσκευής και έτσι το ενδιαφέρον οδηγείται στην χρήση μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) που επιτρέπουν επιπρόσθετη απορρόφηση φωτός μέσω φαινομένων όπως τοπικού συντονισμού πλάσμονίων στην επιφάνεια (localized surface Plasmon resonance, LSPR – LSPR είναι ο συντονισμός ταλάντωσης αγωγίων ηλεκτρονίων στην επιφάνεια ανάμεσα σε δύο στρώματα θετικής και αρνητικής διαπερατότητας που έχουν διεγερθεί από προσπίπτον φως ^[21]).

Χρησιμοποιώντας μεταλλικά νανοσωματίδια (mNPs) τα οποία είναι μικρότερα από το μήκος κύματος του φωτός που διαπερνά την συσκευή μπορούμε να αυξήσουμε την ποσότητα του φωτός που απορροφάται από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες. Όπως στην περίπτωση των μεταλλικών οξειδίων μετάβασης (TMOs) έτσι και εδώ οι τεχνικές επεξεργασίας των νανοσωματιδίων απαιτούν να γίνονται υπό υψηλή θερμοκρασία και κενό, τα οποία αυξάνουν το κόστος και την πολυπλοκότητα. Επίσης, πρέπει να δοθεί προσοχή κατά την ενσωμάτωση των μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) καθώς μπορούν να βραχυκυκλώσουν την συσκευή. Παρόλο αυτά, έχει διαπιστωθεί μια βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων όταν τα μεταλλικά νανοσωματίδια (mNPs) προστίθενται στο στρώμα μεταφοράς οπών (HTL) - είτε κάτω από το πολυμερικό στρώμα μεταφοράς οπών είτε εντός αυτού - λόγω της αύξησης της πυκνότητάς τους.

Επιπρόσθετα με τα υλικά που προαναφερθήκανε, έχει καταγραφεί μία σημαντική έρευνα στα αλλότροπα υλικά που είναι βασισμένα σε άνθρακα. Τα τελευταία έχουν ένα πολύ ευνοϊκό ενεργειακό επίπεδο για τις οπές που εισάγονται και είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Ακόμη, έχουν υψηλή θερμική, οξειδωτική και χημική σταθερότητα που τα καθιστούν πολύ καλά ως εναλλακτικά υλικά στα παραδοσιακά PEDOT: PSS στρώματα μεταφοράς οπών. Για τον ίδιο λόγο οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) έχουν διερευνηθεί για μελλοντική χρήση ως διεπιφανειακά στρώματα και, επίσης, για την συμμετοχή τους στα διαπερατά αγωγίμα ηλεκτρόδια (TCEs). Λόγω της δυνατότητας να κατασκευαστεί άνθρακας με μια πληθώρα τμημάτων μορίων, η λειτουργικότητά τους μπορεί να βελτιωθεί είτε με μεταφορά ή εισαγωγή ηλεκτρονίων είτε οπών. Οι έτοιμοι πια νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) τείνουν να συγκεντρώνονται σε δέσμες και δεν διασκορπίζονται εύκολα εκτός αν εφαρμοσθεί σε αυτά ειδική επιφανειοδραστική ουσία - μειώνοντας την αγωγιμότητα του υμενίου. Άλλος τρόπος για να αποκτήσουν την επιθυμητή λειτουργία τους είναι είτε με μικρά διαλυτά μόρια είτε πολυμερή μέσω τεχνικών που χρησιμοποιούν ομοιοπολικούς ή μη ομοιοπολικούς δεσμούς. Αυτές οι μέθοδοι προετοιμασίας της λειτουργίας των νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) είναι πιο κοινές καθώς διευκολύνουν την δημιουργία λείων και καλά διασκορπισμένων υμενίων νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) χωρίς να εμποδίζεται η αγωγιμότητά τους. Η διαδικασία απόκτησης της επιθυμητής λειτουργίας με ομοιοπολικούς δεσμούς προκύπτει με τροποποίηση του τοιχώματος του νανοσωλήνα άνθρακα (CNT) είτε μέσω όξινων κατεργασιών του υλικού που εισάγουν υδροξυλικές και καρβοξυλικές ομάδες είτε μέσω της σύνδεσης κατευθείαν με πολυμερικές αλυσίδες ή μικρά μόρια. Κατά την διάρκεια δημιουργίας διαλυτών στο νερό νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) η λειτουργικότητα που οφείλεται στους ομοιοπολικούς δεσμούς καταστρέφει τα πλαϊνά τοιχώματα του νανοσωλήνα, κάτι το οποίο μειώνει την αγωγιμότητα στο τελικό υμένιο. Από την άλλη μεριά, η λειτουργικότητα που οφείλεται σε μη ομοιοπολικούς δεσμούς, όπου μικρά μόρια ή πολυμερή προσκολλούνται στα πλαϊνά τοιχώματα μέσω π-π αλληλεπιδράσεων με δύναμη Van der Waals, αφήνουν ανέπαφο τον νανοσωλήνα άνθρακα (CNT), ενώ παραμένει διαλυτό σε κοινά διαλύματα. Χρησιμοποιώντας την τεχνική μη ομοιοπολικών δεσμών με πολυμερές πt-P3HT σε νανοσωλήνες μονού τοίχου (single walled nanotubes,

SWNTs), ένα λεπτό υμένιο με διαπερατότητα ισοδύναμη του πολυμερούς PEDOT: PSS παράγει μια φωτοβολταϊκή κυψέλη με υψηλότερο fill factor (FF) και αποδοτικότητα συγκριτικά με αυτά του PEDOT: PSS (βλ. Εικόνα 35).^[17]



Εικόνα 35 (α) Οπτική μετάδοση, (β) μικρογραφίες της δύναμης ατόμων, (γ) χαρακτηριστικές J-V των νανο-υβριδίων rr-P3HT/ s- SWNTs ως στρώματα εξαγωγής οπών (αναπαραγωγή με άδεια από την επιστημονική αναφ.89, Copyright 2013, American Chemical Society). Για τα συγκεκριμένα νανο-υβρίδια έχει επιτευχθεί υψηλότερη οπτική μετάδοση συγκρινόμενη με αυτή του PEDOT: PSS μαζί με μία βελτιωμένη συμπεριφορά της συσκευής συγκριτικά με τις συσκευές που βασίζονται στο διαπερατό στρώμα οπών (HTL) με PEDOT: PSS.^[17]

Παρόμοια με τους νανοςωλήνες άνθρακα (CNTs) που αναφέραμε, το γραφένιο είναι άλλο ένα υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά κύριο λόγο - στην οξειδωμένη μορφή του - στο στρώμα μεταφοράς οπών. Το γραφένιο (ή το οξείδιο του γραφενίου (GO)) όταν οξειδώνεται είναι διαλυτό στο νερό, με μικρή λειτουργικότητα συγκριτικά με το παρθένο και αψεγάδιαστο γραφένιο, καθιστώντας το καλύτερο για την έγχυση οπών. Η διαδικασία της οξείδωσης διαταράσσει την αγωγιμότητα του γραφενίου κάνοντάς το πιο μονωτικό. Παρόλο αυτά, το οξείδιο του γραφενίου (GO) έχει χρησιμοποιηθεί ως αποτελεσματικό, σταθερό αντικατάστατο του PEDOT: PSS στα φωτοβολταϊκά στοιχεία καθώς έχει μεγαλύτερη αγωγιμότητα στην κάθετη διεύθυνση οποίο διευκολύνει το φαινόμενο σήραγγας ανάμεσα στις αλληλεπικαλυπτόμενες στρώσεις. Η μερική μείωση του οξειδίου του γραφενίου (GO), προκειμένου να βελτιωθεί η αγωγιμότητα τόσο στην κάθετη όσο και στην πλευρική διεύθυνση,

έχει οδηγήσει στην παραγωγή συσκευών με αποδοτικότητες αντίστοιχες με αυτές όταν χρησιμοποιείται PEDOT: PSS.^[17]

• 4.2.2.b Στρώματα μεταφοράς ηλεκτρονίων

Για τα στρώματα μεταφοράς ηλεκτρονίων δεν υπάρχουν τόσα υλικά όσα για τα στρώματα μεταφοράς οπών που προαναφέραμε και κάποια από τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι πολύ αντιδραστικά αλκαλικά γήινα μέταλλα, όπως το ασβέστιο (Ca) και το μαγνήσιο (Mg), ή το φθορίδιο του λιθίου (LiF), το οποίο επιτρέπει την εμφάνιση του φαινομένου σήραγγος των ηλεκτρονίων μέσα σε ένα υμένιο. Τα υλικά αυτά χρειάζεται να εξατμιστούν, κάτι το οποίο απαιτεί συνθήκες κενού και τήξη των μετάλλων σε υψηλές θερμοκρασίες. Όπως είδαμε και προηγουμένως, οι συνθήκες αυτές αυξάνουν το κόστος παραγωγής και για το λόγο αυτό αποτελούν μειονέκτημα. Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κάποια νανο-υλικά όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) και τα μεταλλικά οξείδια μετάβασης (TMOs) τα οποία διευκολύνουν την παραγωγή των συσκευών με διαδικασίες roll-to-roll. Ένα από τα πλεονεκτήματα των νανο-υλικών που είναι βασισμένα στον άνθρακα είναι η ικανότητα να αυξάνουν τα ενεργειακά τους επίπεδα μέσω χημικής μετατροπής, επιτρέποντάς τους με τον τρόπο αυτό να λειτουργούν για την έγχυση ηλεκτρονίων αντί οπών.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα με πολλά τοιχώματα (MWNTs, multi-walled CNTs) μπορούν να υποστούν ντοπάρισμα στα εξωτερικά τους τοιχώματα με θερμικές διαδικασίες υπό την παρουσία αμμωνίας ή αέριου αργού και την εισαγωγή αζωτούχων ιόντων εντός των τοιχωμάτων. Το ντοπάρισμα αυτό μειώνει το ενεργειακό επίπεδο της λειτουργίας τους από 4,6eV για τους καθαρούς και ανέγγιχτους νανοσωλήνες σε 4,4eV. Η μείωση αυτή κάνει τους νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) περισσότερο κατάλληλους για την εισαγωγή ηλεκτρονίων σε μια συσκευή και αντιθέτως με τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται για μεταφορά ηλεκτρονίων, σε αυτά δεν ασθενεί η λειτουργική τους απόδοση με την έκθεση σε νερό ή οξυγόνο.

Αντίστοιχα με τα μεταλλικά οξείδια μετάβασης (TMOs) που χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή οπών, τα μεταλλικά οξείδια μετάβασης (TMOs) που χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή ηλεκτρονίων παρουσιάζουν υψηλές κινητικότητες ηλεκτρονίων, υψηλή διαφάνεια ως υμένα και είναι σταθερά στον αέρα. Δεν υπάρχουν πολλά υλικά n-τύπου μεταλλικών οξειδίων μετάβασης (TMOs). Τα πιο γνωστά είναι τα οξείδια του τιτανίου TiO_x ή το διοξείδιο του τιτανίου TiO_2 , το οξείδιο του ψευδαργύρου ZnO και το οξείδιο AZO . Για τα συγκεκριμένα μεταλλικά οξείδια μετάβασης (TMOs), η έρευνα έχει εστιασθεί στα διαλυτως επεξεργασμένα υμένα, τα οποία αποτελούνται από λεπτά και πολύ διαπερατά στρώματα που υπόκεινται σε μια επεξεργασία αποκαλούμενη sol-gel. Το οξείδιο του τιτανίου TiO_x , που χρησιμοποιείται τόσο ως στρώμα μεταφοράς ηλεκτρονίων όσο και ως οπτικό υλικό (για να μετατραπεί σε μέγιστη η ένταση του φωτός μέσα στο ενεργό στρώμα), έχει παράγει φωτοβολταϊκές κυψέλες με σχεδόν 100% αποδοτικότητες κβάντων. Η επεξεργασία sol-gel χρησιμοποιείται, επίσης, στο οξείδιο του ψευδαργύρου ZnO , παράγοντας νανοσωματίδια με ελεγχόμενα μεγέθη και λεία υμένα. Επιπρόσθετα, το οξείδιο του ψευδαργύρου ZnO όταν χρησιμοποιείται σε ανάστροφες συσκευές, τότε μπορεί να απορροφήσει ακτίνες UV προκειμένου να επιμηκύνει τον χρόνο ζωής της συσκευής. Ακόμη, το ντοπάρισμα του αλουμινίου (Al) με νανοσωματίδια ZnO , προκειμένου να κατασκευάσουμε το AZO , έχει οδηγήσει σε πιο λεπτά και πιο αγωγίμα στρώματα μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETL). Δυστυχώς, το AZO απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες (200-260°C) ανόπτησης που είναι ανεπιθύμητες για τα εύκαμπτα πλαστικά υποστρώματα ή σε πολλά ενεργά στρώματα που χρησιμοποιούνται τελευταία σε φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Τελευταία, έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων των μεταλλικών οξειδίων μετάβασης (TMOs) και των νανοσωματιδίων άνθρακα. Η ικανότητα να βελτιώσουμε το πώς λειτουργεί το οξείδιο του γραφενίου (GO) μας επιτρέπει να διευκολύνουμε την εισαγωγή ηλεκτρονίων όταν αυτό συνδυάζεται με ένα μεταλλικό οξείδιο μετάβασης (TMO) δημιουργώντας ένα διπλό στρώμα μεταφοράς ηλεκτρονίων. Σε αυτό η βελτιωμένη ενέργεια 4,3eV του οξειδίου του γραφενίου (GO) διευκολύνει την εξαγωγή του φορτίου μέσω μιας βαθμίδουσας μετακίνησης προς το ηλεκτρόδιο. Το διπλό στρώμα μεταφοράς ηλεκτρονίων παρήγαγε υψηλότερη

απόδοση (7,5% versus 7,02%), κυρίως μέσω του βελτιωμένου συντελεστή πλήρωσης (FF) - λόγω της μειωμένης εν σειρά αντίστασης κατά την βαθμίδουσα μετακίνηση. Παρόμοια, όταν ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του τιτανίου (TiO_x) τοποθετείται σε ένα δίκτυο νανοσωματιδίων του άνθρακα (CNTs) διευκολύνεται η παρεμπόδιση της κίνησης των οπών διαμέσου των νανοσωματιδίων άνθρακα (CNTs) και επιτρέπεται η μεταφορά των ηλεκτρονίων ενώ διατηρείται η υψηλή ελαστικότητα και η διαπερατότητα των νανοσωματιδίων του άνθρακα (CNTs).^[17]

4.2.3 Ενσωμάτωση των μεταλλικών νανοσωματιδίων στην ενδιάμεση στοιβάδα (interlayer)

Ο ηλεκτρονικός σχεδιασμός ενεργού στρώματος/ διεπαφής(ή επιφάνειας επαφής) έχει την ικανότητα να δρα υπέρ της εξαγωγής φορτίου, ενώ, οι διεπιφάνειες μπορούν, επιπρόσθετα, να βελτιώσουν την ζεύξη φωτονίων εντός του ενεργού στρώματος. Αναφορικά με την ιδιότητα αυτή, η ένταξη μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) που μπορούν κατά προτίμηση να διασκορπίσουν το φως μέσα ή διαμέσου του ενεργού στρώματος καθίσταται ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον πεδίο έρευνας. Λόγω της σβέσης των εξιτονίων στο ενεργό στρώμα από τα μεταλλικά νανοσωματίδια (mNPs), κάποιοι επιστήμονες προτιμούν την ενσωμάτωση των μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) στην διεπιφάνεια των πολυμερικών φωτοβολταϊκών κυψελών (PSCs). Αυτό σχετίζεται, γενικά, με την εισαγωγή μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) τα οποία είναι καλυμμένα με επιφάνειες στο πολυμερές PEDOT:PSS, το ευρέως χρησιμοποιούμενο ως στρώμα μεταφοράς οπών στα πολυμερικά φωτοβολταϊκά στοιχεία (PSCs).

Οι αρχικές έρευνες σε αυτόν τον τομέα εστιάστηκαν στην ενσωμάτωση μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) χρυσού (Au) ή αργύρου (Ag) σε συνδυασμό με ενεργό στρώμα από π -P₃HT:PC₆₁BM το οποίο οδήγησε σε βελτιώσεις των αποδόσεων μετατροπής ισχύος (PCEs) κατά 20-70%^{[90], [91], [92], [93]} ή εναλλακτικά μαζί με poly[2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-p-phenylene vinylene] (MEH-PPV) που οδήγησε στην βελτίωση της απόδοσης μετατροπής ισχύος (PCE) κατά ~19%.¹¹⁴ Πρόσφατη έρευνα κατέδειξε την επίδραση των μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) στο πολυμερές PEDOT:PSS με ενεργά στρώματα poly[[4,8-bis[(2-ethylhexyl)oxy]]benzo-[1,2-*b*: 4,5-*b'*]dithiophene-2,6-diyl][3-fluoro-2-[(2-ethylhexyl)-carbonyl]thieno[3,4-*b*]thiophenediyl]

(PTB7):PC₇₁BM . Ενώ η ενσωμάτωση νανοσωματιδίων (mNPs) αργύρου (Ag) ή χρυσού (Au) με διαμέτρους της τάξης των 40-50nm επέφερε μια βελτίωση της απόδοσης από 7,25% σε 8,01% και 8,16% αντίστοιχα, η ενσωμάτωση και των δύο ειδών νανοσωματιδίων (mNPs) αργύρου (Ag) και χρυσού (Au) ταυτόχρονα μέσα στο πολυμερές PEDOT:PSS παρατηρήθηκε ότι κατέληγε σε μια απόδοση της μετατροπής της ισχύος (PCE) 8,67% . Η τελευταία είναι η υψηλότερη τιμή που έχει καταγραφεί μέχρι στιγμής στα φωτοβολταϊκά στοιχεία τέταρτης γενιάς με μεταλλικά νανοσωματίδια (mNPs). Παρόμοια έρευνα (Baek *et al.*) ^[94] πραγματοποιήθηκε ενσωματώνοντας νανοσωματίδια (mNPs) αργύρου (Ag) στο πολυμερές PEDOT:PSS επιφέροντας βελτίωση της απόδοσης μετατροπής ισχύος (PCE) από 6,4% σε 7,6% για ενεργό στρώμα poly[[9-(1-octylnonyl)-9H-carbazole-2,7-diyl]-2, 5-thiophenediyl-2, 1, 3-benzothiadiazole-4, 7-diyl-2, 5-thiophenediyl] (PCDTBT):PC₇₁BM και από 7,9% σε 8,6% για PTB7:PC₇₁BM, καταδεικνύοντας ξανά την σημασία αυτών των πλασμονικών νανοδομών. ^[17]

4.2.4 Ενσωμάτωση των ανόργανων υλικών στα ενεργά στρώματα (active layers)

Η χρήση των ανόργανων υλικών στα φωτοβολταϊκά στοιχεία τέταρτης γενιάς αφορά, εκτός από την συμμετοχή τους στα στρώματα μεταφοράς και την ενδιάμεση στοιβάδα, την συμπερίληψή τους στα ενεργά στρώματα (active layers).

Ανάμεσα στα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στα ενεργά στρώματα της τέταρτης γενιάς φωτοβολταϊκών ανήκουν και οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs). Οι εξελίξεις των τελευταίων 15 χρόνων έχουν οδηγήσει σε μία βαθύτερη κατανόηση του ρόλου των νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs) στις οργανικές οπτικοηλεκτρονικές συσκευές. Σε συνδυασμό με τα πρόσφατα βήματα που έχουν γίνει στις τεχνικές διασποράς για τους νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), αυτό συνετέλεσε στην επιτυχημένη ενσωμάτωσή τους ως ενεργά συστατικά στα οργανικά φωτοβολταϊκά συστήματα, με αποτέλεσμα την βελτίωση των αποδόσεων μετατροπής της ισχύος (PCE).

Καθώς τα πολυμερή φωτοβολταϊκά στοιχεία (PSCs) παρουσιάζουν μια μη ισορροπημένη μεταφορά ηλεκτρονίων και οπών, οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) μελετήθηκαν ως μεταφορείς είτε οπών είτε ηλεκτρονίων. Στις μελέτες που έγιναν

χρησιμοποιήθηκαν νανοσωλήνες MWNTs και SWNTs. Όσον αφορά την ιδιότητα της μεταφοράς, υπάρχει διαφωνία στην επιστημονική κοινότητα για τον ακριβή ρόλο των νανοσωλήνων. Κάποιες ομάδες επιστημόνων ισχυρίζονται ότι οι νανοσωλήνες λειτουργούν ως μεταφορείς οπών, ενώ άλλες υποστηρίζουν ότι οι νανοσωλήνες είναι μεταφορείς ηλεκτρονίων. Για τον λόγο αυτόν, οι επιστήμονες έχουν παρουσιάσει αντικρουόμενες μελέτες για το τι φορτίο είναι προτιμότερο να μεταφέρουν οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) - συγκεκριμένα οι νανοσωλήνες SWNTs. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι οι νανοσωλήνες MWNTs είναι πιο διαδεδομένοι σε σχέση με τους SWNTs εξαιτίας της ομοιομορφίας των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Κάποιοι επιστήμονες πρότειναν την νόθευση των νανοσωλήνων προκειμένου να τους μετατρέψουν σε έναν από τους δύο τύπους π.χ. σε τύπου-n. Όμως, οι ιδιότητες που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο είναι αδύνατο να γενικευθούν. Είναι, λοιπόν, κρίσιμης σημασίας η κατανόηση των ιδιοτήτων μεταφοράς φορτίου των νανοσωλήνων πριν την ενσωμάτωσή τους ως δότες ή λήπτες στα οργανικά συστήματα. Επιπρόσθετα, η ασάφεια αυτή ανέδειξε τη σημασία της ύπαρξης ερευνών πάνω στην ελεγχόμενη νόθευση των νανοσωλήνων.

Οι μελέτες, λοιπόν, επεκτάθηκαν πάνω στην νόθευση των νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs). Στις μελέτες αυτές προτιμήθηκαν οι νανοσωλήνες MWNTs στην θέση των νανοσωλήνων SWNTs λόγω της ομοιομορφίας των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Ενώ οι ανόθευτοι νανοσωλήνες MWNTs έχουν έργο εξόδου Φ περίπου $\sim 4,8\text{eV}$, οι μετρήσεις μέσω φωτοηλεκτρονικής φασματοσκοπίας αποκάλυψαν ένα υψηλότερο εξόδου έργο Φ της τάξης των 5-5,1eV για τους νανοσωλήνες O- MWNTs. Προσαρμόζοντας το έργο εξόδου Φ αναμένεται να διευκολυνθεί η επιλεκτική μεταφορά φορτίου μέσω των νανοσωλήνων. Έχει βρεθεί ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) μπορούν να μετατραπούν σε νοθευμένους τύπου-p ή τύπου-n μέσω της ενσωμάτωσης στοιχείων της ομάδας III ή της ομάδας V του περιοδικού πίνακα σε ελαττωματικές περιοχές που έχουν δημιουργηθεί στον νανοσωλήνα. Σχετικά με την νόθευση αυτή, έχουν αναφερθεί προσμίξεις με βόριο (B) και άζωτο (N) λόγω της ευκολίας με την οποία τα στοιχεία αυτά μπορούν να ενσωματωθούν στη δομή του νανοσωλήνα.

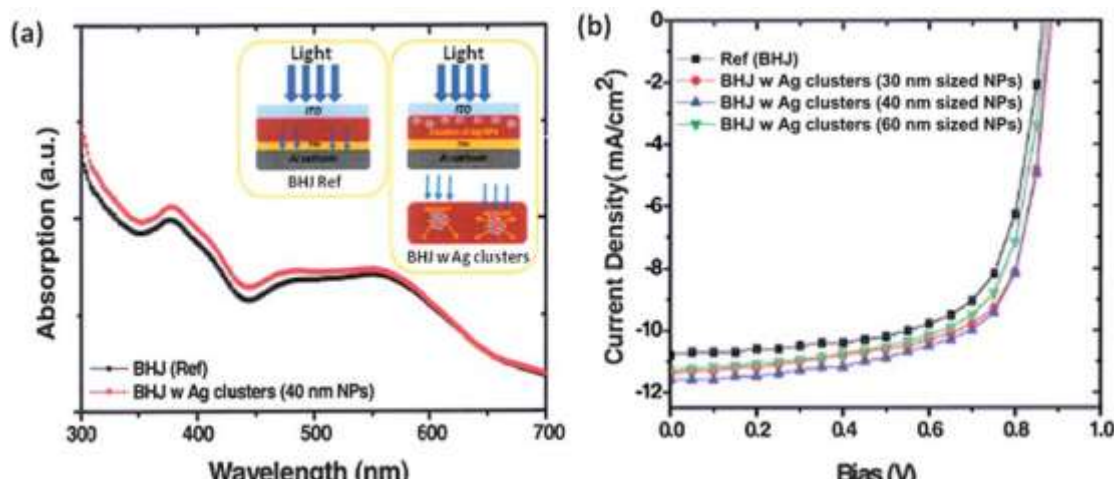
Όσον αφορά την χρησιμότητα αυτών των προσμίξεων, μία από τις πρώτες διαπιστώσεις είναι η εργασία του Lee *et al.* ^[95] στην οποία νοθευμένοι με βόρειο (B) νανοσωλήνες MWNTs ή νοθευμένοι με άζωτο (N) νανοσωλήνες MWNTs ή και τα δύο ενσωματώθηκαν στα ενεργά στρώματα που αποτελούνταν από p-P3HT:PC₇₁BM. Η ανάλυση απλών συσκευών είτε με ηλεκτρόνια είτε με οπές αποκάλυψαν ότι με την

ενσωμάτωση στις συσκευές νανοσωλήνων επιτυγχάνεται μια πιο ισορροπημένη μεταφορά φορτίου. Αυτό αναδεικνύει την σημασία της πρόσθεσης ανόργανων συστατικών για να υπάρξει ισορροπία στην εξαγωγή φορτίου στα οργανικά συστήματα, όπου οι κινητικότητες των ηλεκτρονίων και των οπών είναι ως γνωστόν μη ισορροπημένες. Ακόμη, η παραπάνω επιστημονική εργασία έδειξε ότι προσθέτοντας είτε νανοσωλήνες άνθρακα νοθευμένους με βόριο (B-CNTs) είτε νανοσωλήνες άνθρακα που έχουν νοθευτεί με άζωτο (N-CNTs) μπορούμε να βελτιώσουμε σημαντικά την απόδοση μετατροπής της ισχύος (PCE) της συσκευής έως 4,1% και 3,7%, αντίστοιχα, από 3% που είναι η αρχική απόδοση. Ο Lee *et al.*^[96] συνέχισε την έρευνά του προσθέτοντας, επιπλέον, κβαντικές κουκκίδες φωσφορούχου ινδίου (InP) στους νοθευμένους με άζωτο νανοσωλήνες άνθρακα (N-CNTs). Η πρόσθεση αυτή έγινε για την βελτίωση του διαχωρισμού των εξιτονίων και της μεταφοράς φορτίου μέσα στους νανοσωλήνες. Η ενσωμάτωση των νέων νανοσωλήνων InP: N-CNTs στα ενεργά στρώματα του rr-P3HT:IC₆₁BA υπό ιδανικές συνθήκες οδηγεί σε μία σημαντική βελτίωση της απόδοσης μετατροπής της ισχύος (PCE) από 4,68% σε 6,11%, οφειλόμενη, κυρίως, στην βελτίωση του διαχωρισμού των εξιτονίων και του παράγοντα πλήρωσης (FF, fill factor) ως αποτέλεσμα της ισορροπημένης μεταφοράς του φορτίου. Τέλος, η έρευνα Lu *et al.*^[97] επεκτάθηκε στην ενσωμάτωση των νοθευμένων με άζωτο (N) νανοσωλήνων N-MWNTs σε ενεργά στρώματα βασισμένα σε PTB7:PC₇₁BM. Η ενσωμάτωση αυτή οδήγησε σε μια βελτίωση της απόδοσης μετατροπής της ισχύος (PCE) από 7,3% σε 8,6% μέσω της προσαρμογής της συγκέντρωσης των νανοσωλήνων. Στην τελευταία αυτή μελέτη, η παρατηρούμενη βελτίωση αποδόθηκε στην αύξηση της ζεύξης φωτονίων, στον διαχωρισμό των εξιτονίων και στην μεταφορά φορτίου ως αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης νανοσωλήνων στο ενεργό στρώμα.

Στα προαναφερθέντα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο ενεργό στρώμα της τέταρτης γενιάς φωτοβολταϊκών κυψελών συγκαταλέγονται, επίσης, τα μεταλλικά νανοσωματίδια (mNPs). Η ενσωμάτωση των μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) στα πολυμερή φωτοβολταϊκά στοιχεία φαίνεται να έχει επίδραση στις οπτικές τους ιδιότητες. Ο βαθμός αυτής της επίδρασης εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του σωματιδίου. Για τα μεταλλικά νανοσωματίδια (mNPs) των οποίων το μέγεθος είναι μικρότερο από ~20nm, τα νανοσωματίδια αυτά αναμένεται να βελτιώσουν την διατομή απορρόφησης του ενεργού στρώματος. Από την άλλη μεριά, τα μεταλλικά νανοσωματίδια (mNPs) που είναι μεγαλύτερα από 40nm λειτουργούν ως περιοχές σκέδασης του φωτός αυξάνοντας την οπτική απορρόφηση. Παρόλο αυτά, ενώ οι παραπάνω διαπιστώσεις δηλώνουν ότι η

ενσωμάτωση των μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) μπορεί να επηρεάσει θετικά την απορρόφηση του φωτός, η συμπερίληψη τέτοιων νανοσωματιδίων στο ενεργό στρώμα είναι πιθανό να οδηγήσει σε σβέση των φωτοπαραγόμενων εξιτονίων, με αποτέλεσμα την *υποτίμηση της απόδοσης (efficiency degradation)* της συσκευής. Ωστόσο, λόγω του ότι τα μεταλλικά νανοσωματίδια (mNPs) διαθέτουν εξαιρετικές ιδιότητες μεταφοράς φορτίου, η πρόσθεση τέτοιων νανοσωματιδίων στο ενεργό στρώμα αναμένεται να οδηγήσει σε μια βελτιωμένη εξαγωγή φορτίου. Για τον λόγο αυτό, προκειμένου να επιτύχουμε μία βελτιωμένη απόδοση της συσκευής, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το κατάλληλο μέγεθος και την απαραίτητη συγκέντρωση των χρησιμοποιούμενων νανοσωματιδίων.

Επιπρόσθετα, τα μεταλλικά νανοσωματίδια (mNPs) σε κατάλληλο διηλεκτρικό περιβάλλον μπορούν να λειτουργήσουν σαν κεραία μικρών μηκών κύματος, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την διατομή απορρόφησης ή να οδηγήσουν σε σκέδαση φωτός, παράγοντας μακρύτερα μήκη οπτικών διαδρομών μέσα στα ενεργά στρώματα. Η ενσωμάτωση τέτοιων μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs), ειδικά χρυσού (Au) και αργύρου (Ag) έχει πραγματοποιηθεί σε πολλές περιπτώσεις διαφόρων ενεργών στρωμάτων. Ως παραδείγματα μπορούμε να αναφέρουμε: α) την ενσωμάτωση μεταλλικών νανοσωματιδίων χρυσού (Au) σε ενεργό στρώμα πt-P3HT:PC₇₁BM με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης μετατροπής της ισχύος (PCE) από 3,54% σε 4,36%, β) την ενσωμάτωση μεταλλικών νανοσωματιδίων χρυσού (Au) σε ενεργό στρώμα [(4,4'-bis(2-ethylhexyl)dithieno[3,2-b:2',3'-d]silole)-2,6-diyl-alt-(4,7-bis(2-thienyl)-2,1,3-benzothiadiazole)-5,5'-diyl] (Si-PCPDTBT):PC₇₁BM με αύξηση της απόδοσης μετατροπής της ισχύος (PCE) από 3,92% σε 4,54%, γ) την ενσωμάτωση μεταλλικών νανοσωματιδίων χρυσού (Au) ή αργύρου (Ag) σε ενεργό στρώμα PCDTBT:PC₇₀BM με αύξηση της απόδοσης μετατροπής της ισχύος (PCE) από 5,77% σε 6,45%^[98] και από 6,3% σε 7,1%^[99] αντίστοιχα. Στην πλειοψηφία αυτών των περιπτώσεων τα μεταλλικά νανοσωματίδια (mNPs) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν επαρκώς μεγάλα ώστε η οπτική απορρόφηση να βελτιωθεί σαν αποτέλεσμα του αυξημένου μήκους οπτικής διαδρομής (βλ. Εικόνα 36).



Εικόνα 36 (α) Βελτίωση της οπτικής απορρόφησης στο ορατό φάσμα για τα ενεργά στρώματα PCDTBT:PC₇₁BM μέσω της ενσωμάτωσης μεταλλικών νανοσωματιδίων αργύρου (Ag) και (β) οι χαρακτηριστικές J-V για το PCDTBT: PC₇₁BM με μεταλλικά νανοσωματίδια αργύρου (Ag) διαφορετικών μεγεθών (αναπαραγωγή με άδεια από την επιστημονική αναφορά 140, Copyright 2011, Wiley).^[17]

Η ενσωμάτωση μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) εκτός της επίδρασης που έχει στις οπτικές ιδιότητες, επηρεάζει, επίσης, τις ιδιότητες μεταφοράς του φορτίου στο ενεργό στρώμα. Όπως, όμως, έχουμε προαναφέρει, υπάρχουν κάποια αντικρουόμενα μεταξύ τους αποτελέσματα στην επιστημονική βιβλιογραφία σχετικά με αυτό. Για παράδειγμα, η δημοσίευση Wang *et al.*^[99] αναφέρει μια βελτίωση στην εξαγωγή φορτίου υποστηριζόμενη από πτώση στην αντίσταση εν σειρά και από αύξηση της έντασης του ρεύματος βραχυκυκλώσεως. Αντιθέτως, στην επιστημονική μελέτη Xue *et al.*^[100] υποστηρίζεται ότι υπάρχει μεν βελτίωση στην κινητικότητα λόγω των μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs), όμως παρατηρείται μια πτώση στην εξαγωγή φορτίου λόγω του ότι τα μεταλλικά νανοσωματίδια λειτουργούν ως παγίδες φορτίου. Τέτοια συμπεράσματα όμως δεν πρέπει να γενικεύονται για όλες τις φωτοβολταϊκές κυψέλες τέταρτης γενιάς στις οποίες υπάρχει ενσωμάτωση μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) στο ενεργό στρώμα. Τέλος, όσον αφορά απώλειες - τόσο λόγω της σβέσης εξιόντων όσο και της παγίδευσης φορτίων- αυτές μπορούν να μετριαστούν μέσα από μια σε βάθος κατανόηση του ρόλου της συγκέντρωσης, του σχήματος και του μεγέθους των μεταλλικών νανοσωματιδίων (mNPs) στο ενεργό στρώμα.^[17]

Μέρος Β

Το φαινόμενο της προκαλούμενης υποτίμησης της απόδοσης ισχύος των φωτοβολταϊκών στοιχείων λόγω δυναμικού, γνωστό ως φαινόμενο «πρόωρης γήρανσης» των φωτοβολταϊκών στοιχείων P.I.D. (potential induced degradation)

Γενικά

Η ενέργεια αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο για την κοινωνικο-οικονομική κατάσταση μιας κοινωνίας. Με την διαρκώς αυξανόμενη τιμή του πετρελαίου από την μία και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαιτίας της χρήσης ορυκτών καυσίμων από την άλλη, το θέμα της ενέργειας ανεγείρει πολλούς προβληματισμούς. Στις μέρες μας οι διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προσφέρουν μια μεγάλη ευελιξία ικανή να μειώσει το ενεργειακό έλλειμμα που προκαλείται από την διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση. Η ενέργεια που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατέχει μια σημαντική θέση στην αγορά των ανανεώσιμων πηγών. Πράγματι, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται τόσο από τη βιομηχανία όσο και από ιδιώτες για να καλύψουν τις ατομικές τους ανάγκες.

Κατά την διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας, η αγορά των φωτοβολταϊκών (PV) σημείωσε μια άνευ προηγουμένου ανάπτυξη. Ειδικά κατά το 2010-11 η αγορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων έφτασε μία ποσότητα των 40GW , αθροιστικά από τις εγκαταστάσεις, με μια ετήσια αύξηση της ποσότητας των 16,6 GW (EPIA, 2011). Για μία ανάγκη ενέργειας λογική σε ποσότητα , ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να είναι αποτελεσματικό μόνο εάν η εγκατάστασή του είναι βέλτιστη και διατηρείται σωστά.

Για τον λόγο αυτό, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε την αξιοπιστία και την διάρκεια ζωής ενός τέτοιου συστήματος. Η παρακολούθηση και ο έλεγχος της υποβάθμισης της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι σημαντικά στοιχεία καθώς ο υψηλός ρυθμός υποτίμησης της απόδοσης οδηγεί κατευθείαν στην απώλεια της ισχύς εξόδου και σαν αποτέλεσμα αυτού στην μείωση της απόσβεσης της επένδυσης. Οι επενδυτές απαιτούν ολοένα και περισσότερο ξεκάθαρες απαντήσεις στα παραπάνω θέματα για την ανάλυση των τεχνικών και οικονομικών τους δυνατοτήτων. Η έλλειψη ακριβών πληροφοριών σχετικά με τον ρυθμό της υποβάθμισης αυξάνει σαφώς το οικονομικό ρίσκο. Η αξιοπιστία και η διάρκεια ζωής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι στοιχεία που εξαρτώνται κυρίως από την ενεργειακή απόδοση της φωτοβολταϊκής μονάδας και τους διαφορετικούς τρόπους υποβάθμισής της.^[21]

Στο σημείο αυτό κρίνεται αναγκαίο να δώσουμε έναν σαφή ορισμό της έννοιας «διάρκεια ζωής» μιας φωτοβολταϊκής μονάδας μιας και κάναμε αναφορά σε αυτήν και ενδιαφέρει τόσο τους επενδυτές όσο και τους επιστήμονες. Ορίζουμε, λοιπόν, ως *διάρκεια ζωής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου την διάρκεια χρόνου πέρα από την οποία δεν*

μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πλαίσιο εξαιτίας διαφόρων αιτιών, όπως η ασφάλεια, ένα καταστροφικό συμβάν ή όταν η απόδοση ισχύος έχει μειωθεί κάτω από μία αποδεκτή ελάχιστη τιμή. Από την οπτική των κατασκευαστών, η διάρκεια ζωής αφορά τον αριθμό των ετών για τον οποίο εγγυώνται ότι η απόδοση ισχύος δεν θα πέσει κάτω από το 80% της αρχική της τιμής.

Στην εποχή μας οι περισσότεροι κατασκευαστές παρέχουν μια εγγύηση 20 με 25 χρόνων για μια λειτουργία των φωτοβολταϊκών που σταδιακά θα φτάσει στο ελάχιστο εντός των χρονικών αυτών ορίων, ενώ τελευταία κάποιοι κατασκευαστές εισήγαγαν εγγυήσεις 30 χρόνων. ^[22]

5. Οι πρώτες διαπιστώσεις των επιστημόνων της υποτίμησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων και ορισμός αυτής

Οι πρώτες πληροφορίες σχετικά με την υποβάθμιση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μονάδων εντοπίζονται χρονικά στις αρχές του 1970 (Quintana et al., 2002). ^[79] Μετά από την διάγνωση του φαινομένου οι επιστήμονες εφάρμοσαν πειράματα χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους και τα οποία τους έδωσαν αποτελέσματα προς μελέτη. Τα περισσότερα από αυτά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πειράματα τα οποία διεξαχθήκανε εντός εργαστηρίων δεν ήταν πάντα σύμφωνα με τους μετρημένους ρυθμούς υποβάθμισης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών μονάδων σε εξωτερικούς χώρους. Το 2002 το Διεθνές Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας (NREL, National Renewable Energy Laboratory) εκτίμησε πως η ετήσια υποβάθμιση της λειτουργίας των μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών μονάδων είναι 0,7% (Osterwald et al., 2002) ^[81]. Το Εργαστήριο Ενέργειας, Οικολογίας και Ηλιακής Οικονομίας –Ticino (LEEE-TISO, Laboratory of Energy, Ecology and Economy Solar –Ticino), το οποίο είναι κέντρο πειραμάτων φωτοβολταϊκών μονάδων στην Ελβετία, κατέγραψε ότι ο ετήσιος ρυθμός υποβάθμισης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών μονάδων πυριτίου (Si) μπορεί να κυμανθεί από 0,7% έως 9,8% κατά την διάρκεια του πρώτου χρόνου έκθεσης και από 0,7% έως 4,9% τον δεύτερο χρόνο (LEEE, 2008). ^{[80], [21]}

Προσπαθώντας να δώσουμε ένα γενικό ορισμό σε επιστημονικά πλαίσια της υποβάθμισης ή αλλιώς της υποτίμησης του στοιχείου ενός συστήματος, μπορούμε να

πούμε ότι συνίσταται στην βαθμιαία επιδείνωση των χαρακτηριστικών η οποία μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα του συστήματος να λειτουργήσει εντός των ορίων των αποδεκτών κριτηρίων. Η υποβάθμιση αυτή θεωρείται ότι προκαλείται από τις συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργεί το σύστημα (Lannoy and Procaccia, 2005) ^[82]. Μία υποβαθμισμένη φωτοβολταϊκή μονάδα μπορεί να συνεχίζει να διεκπεραιώνει την αρχική της λειτουργία, η οποία είναι να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα από το ηλιακό φως, ακόμα και αν η χρήση της δεν είναι βέλτιστη. Όμως, η υποβαθμισμένη κατάσταση και λειτουργία μιας μονάδας μπορεί να γίνει προβληματική όταν η υποβάθμιση ξεπεράσει ένα «κρίσιμο κατώφλι». Σύμφωνα με την επιστημονική μελέτη του Wohlgemuth (2005) ^[78] οι κατασκευαστές θεωρούν ότι μία φωτοβολταϊκή μονάδα είναι υποβαθμισμένη όταν η απόδοσή της φτάσει σε ένα επίπεδο κάτω από το 80% της αρχικής της απόδοσης. ^[21] Έτσι, οι εγγυήσεις που παρέχουν οι κατασκευαστές αναφέρονται σε μία λειτουργία που φτάνει το 90% της αρχικής κατά την διάρκεια των 10 πρώτων χρόνων, ενώ τα επόμενα 10 με 15 η λειτουργία θα φτάνει τουλάχιστον το 80% της αρχικής. Αξίζει εδώ να αναφέρουμε ότι παρουσιάζεται συχνά μια υποβάθμιση από τα πρώτα λίγα χρόνια. ^[22]

Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι αποδόσεις για τις διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυψελών και των αντίστοιχων φωτοβολταϊκών μονάδων. Καταγράφεται, επίσης, η απόκλιση ανάμεσα στις αποδόσεις των φωτοβολταϊκών μονάδων όπως έχουν μετρηθεί στο εργαστήριο και όταν πια χρησιμοποιούνται στο εμπόριο.

Technologies	Cell	Module	
		Laboratory efficiency	Module on market
Monocrystalline silicon	25 ± 0.5	22.7	14-20
Polycrystalline silicon	20.4 ± 0.5	16.2	11-15
Amorphous silicon	10.1 ± 0.3	10.4	5-9
CdTe	18.3 ± 0.5	8.3	-
CIS	19.3	13.5	9-11
CIGS	19.6 ± 0.6	10.3	
Organic solar cells (thin-film)	10 ± 0.3	-	-
Organic solar cells (submodule)	6.8 ± 0.2	-	-
Nanowires	13.8	-	-

Πίνακας 2 Διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυψελών και αποδόσεις αυτών (Green et al., 2013^[83]; Makrides et al., 2010^[84]; Laronde, 2009^[85]).^[21]

6. Παράγοντες που προκαλούν υποβάθμιση της απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης και ονομαστικά τα διάφορα είδη υποτίμησης.

Σε πολλές φωτοβολταϊκές μονάδες η εμφάνιση βλάβης στην λειτουργία και η μείωση της απόδοσής τους είναι αποτέλεσμα μιας σταδιακής συσσώρευσης φθορών που προκαλούνται από την μακροχρόνια έκθεση σε δριμείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Πολλές από αυτές απαιτούν πολύ χρόνο και οι διάφορες διαδικασίες υποτίμησης μπορεί να είναι σε χημική, ηλεκτρική, θερμική ή μηχανική μορφή. Οι διαδικασίες ξεκινούν ή επιταχύνονται λόγω του συνδυασμού καταπονήσεων στο περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν και συγκεκριμένα στην έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, την θερμοκρασία, την υγρασία και άλλων παραγόντων όπως είναι η συσσώρευση σκόνης, ο άνεμος, το χιόνι και η υψηλή σε άλας (NaCl) ατμόσφαιρα. Όλα τα παραπάνω αποτελούν τους λόγους εκείνους από τους οποίους προκαλείται η υποτίμηση της απόδοσης που εμφανίζεται με διάφορους τρόπους τους οποίους αναφέρουμε όπως:^[22]

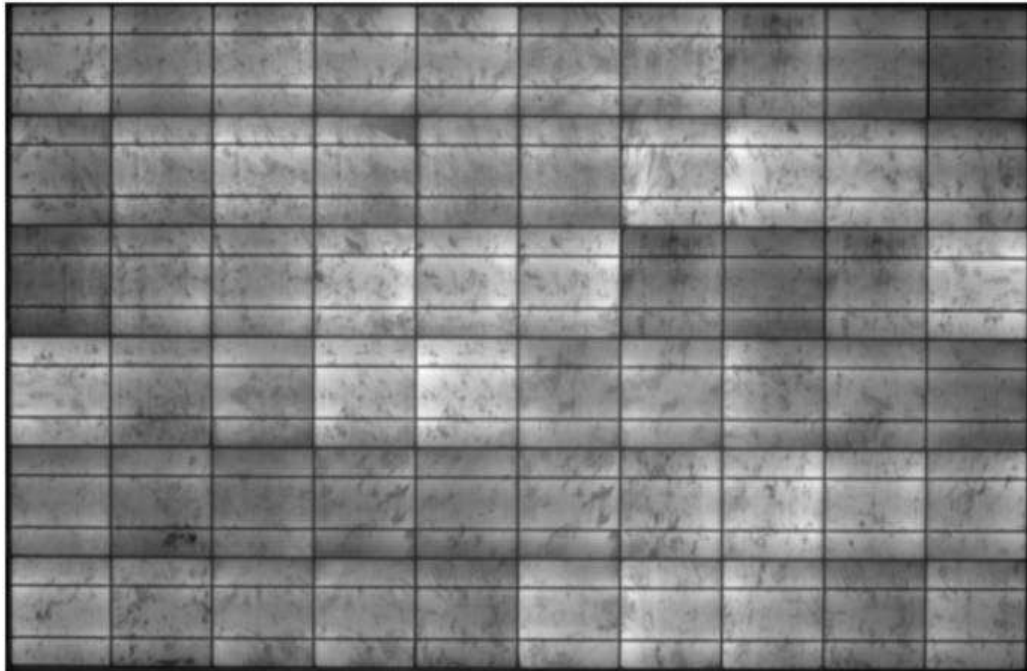
- Φαινόμενο P.I.D.
- Διάβρωση ή Οξείδωση
- Αποχρωματισμός
- Αποκόλληση υλικών του φωτοβολταϊκού στοιχείου

- Ράγισμα και σπάσιμο των φωτοβολταϊκών στοιχείων
- Ύπαρξη θερμών κηλίδων (hot spots)

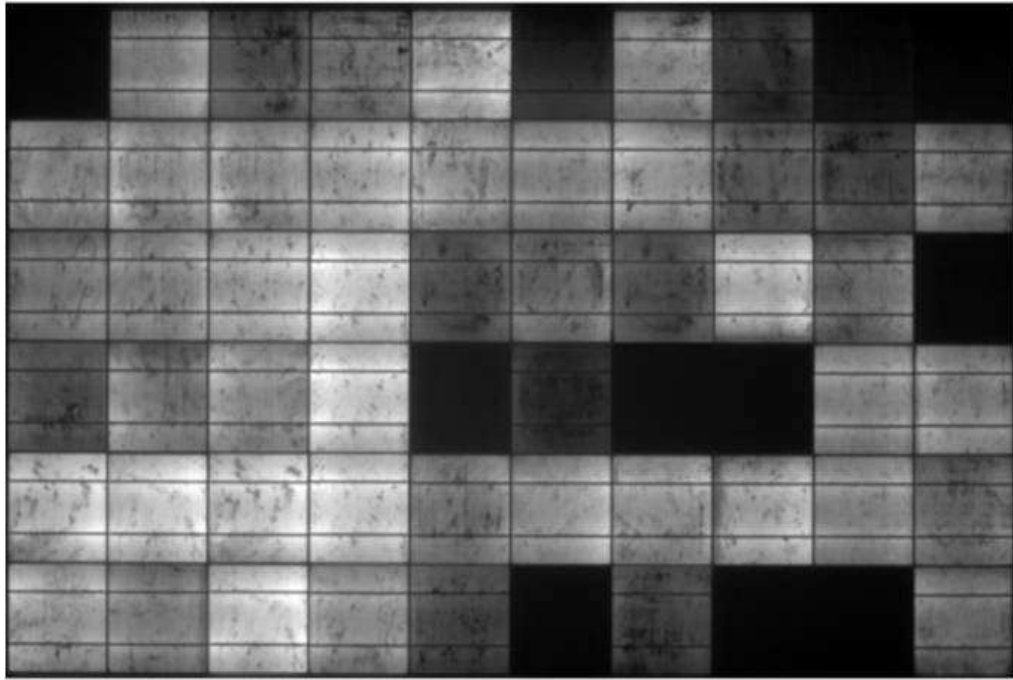
και

- Ύπαρξη φυσαλίδων

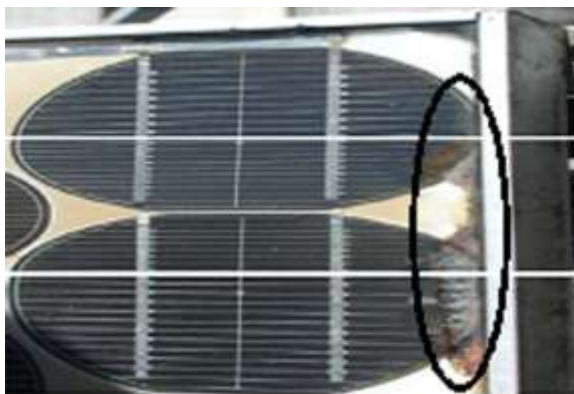
Παρακάτω παρατίθενται φωτογραφίες στις οποίες μπορούμε να δούμε παραδείγματα φωτοβολταϊκών μονάδων και κυψελών που έχουν υποστεί κάποιον από τους διαφορετικούς τρόπους υποτίμησης (βλ. Εικόνες 37 - 43).



Εικόνα 37(α) Η ηλεκτροφωταυγής εικόνα μας δείχνει κάποιες φωτοβολταϊκές κυψέλες που βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο της υποτίμησης τύπου P.I.D.. Σε μια τέτοια εικόνα το φαινόμενο P.I.D. εκδηλώνεται με ένα σκούρεμα των φωτοβολταϊκών κυψελών, κυρίως στην περιοχή των πλαισίων των φωτοβολταϊκών μονάδων. Στο πρώιμο στάδιο του φαινομένου P.I.D. προκαλείται μια μέτρια πτώση στην απόδοση ισχύος σε ποσοστό περίπου 9%.



Εικόνα 37(β) Στην παραπάνω ηλεκτροφωταυγή εικόνα μπορούμε να δούμε φωτοβολταϊκές κυψέλες που βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο της επίδρασης του φαινομένου P.I.D.. Το φαινόμενο P.I.D. έχει επιδράσει κατά μήκος όλης της επιφάνειας. Μάλιστα, το φαινόμενο είναι τόσο προχωρημένο σε κάποιες κυψέλες που αυτές δεν παράγουν πια ισχύ. Αυτές τις διακρίνουμε από το μαύρο χρώμα τους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το φαινόμενο P.I.D. έχει επιδράσει σημαντικά στην πτώση της ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής μονάδας, σε βαθμό πάνω από το 36%.



(a)

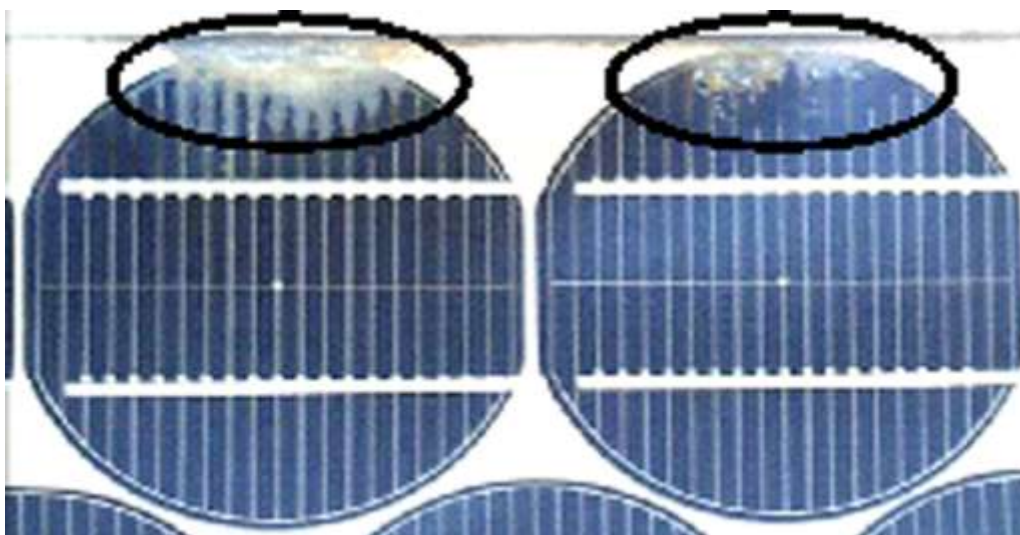


(b)

Εικόνα 38 Φωτοβολταϊκή μονάδα που έχει υποστεί οξείδωση (a) στην άκρη και (b) στο κουτί σύνδεσης των καλωδίων.^[21]



Εικόνα 39 Αποχρωματισμένες φωτοβολταϊκές κυψέλες (LEEE-TISO, 2008; Kaplanis and Kaplani , 2011). ^[21]



Εικόνα 40(α) Φωτοβολταϊκή μονάδα με αποκόλληση (delamination) (Kaplanis and Kaplani, 2011). ^[21]

Μια ,επίσης, εικόνα όπου η αποκόλληση είναι πιο ορατή και κατανοητή φαίνεται παρακάτω :



Delamination

Εικόνα 40(β) Μια περίπτωση αποκόλλησης όπου η σύνδεση μεταξύ του πλαστικού (πίσω πλευρά της φωτοβολταϊκής κυψέλης) και του γυαλιού (μπροστινή πλευρά) διαχωρίζεται. Τα στρώματα του περιβλήματος προστασίας (EVA) λιώνουν και αποκτούν το «γαλακτώδες» χρώμα που φαίνεται στην εικόνα. Η αποκόλληση μπορεί να συμβεί ανάμεσα στο επίστρωμα (γυαλί), το υπόστρωμα και το υλικό του περιβλήματος προστασίας μεταξύ των εγκλεισμένων με περίβλημα φωτοβολταϊκών κυψελών.



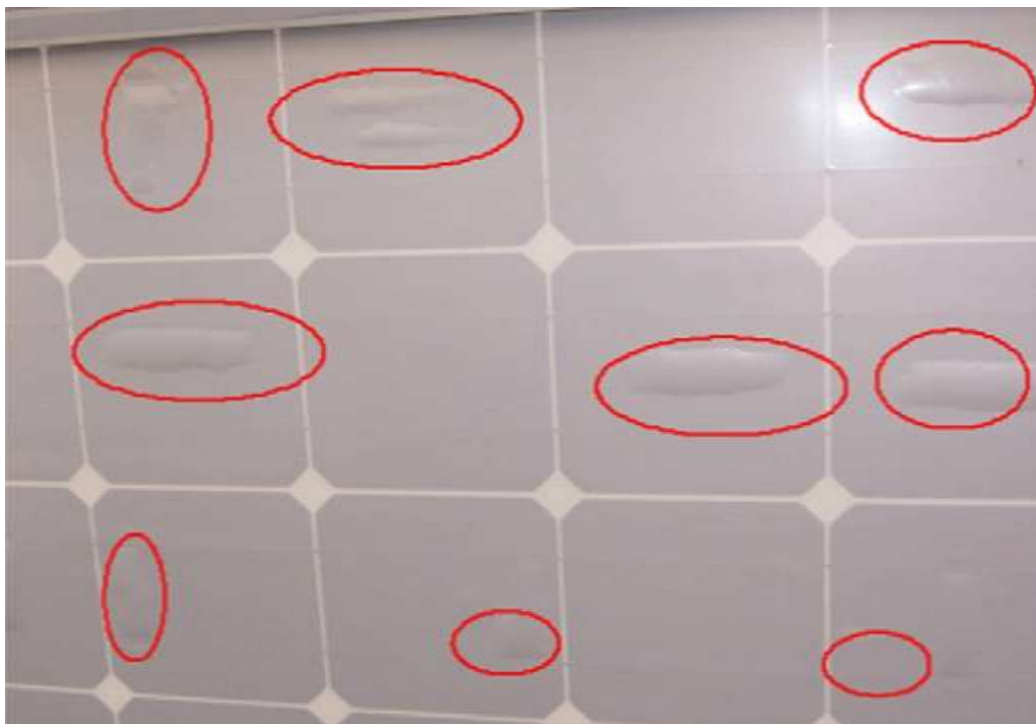
Εικόνα 41 Φωτοβολταϊκή μονάδα με ραγισμένο γυαλί. ^[21]



Hot Spots

Εικόνα 42 Φωτοβολταϊκές κυψέλες με θερμά σημεία (hot spots). Όταν ένα τμήμα μιας φωτοβολταϊκή κυψέλης βρίσκεται υπό σκιά, τότε αυτό μπορεί να θερμανθεί σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η κυψέλη, το περίβλημα εγκλεισμού (EVA) και η πίσω πλευρά της κυψέλης να καταστραφούν μόνιμα.

Αυτό είναι που προκαλεί τις θερμικές κουκκίδες στην φωτοβολταϊκή κυψέλη οι οποίες φαίνονται στην παραπάνω εικόνα.



Εικόνα 43 Φυσαλίδες στην πίσω όψη μιας φωτοβολταϊκής μονάδας (Munoz et al., 2011).^{[33], [21]}

Εμείς στη συνέχεια θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον μας και θα μελετήσουμε τον πρώτο τύπο υποβάθμισης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυψελών, δηλαδή το φαινόμενο της υποτίμησης P.I.D..

7. Αναδρομή στις αρχικές μελέτες των επιστημόνων γύρω από το φαινόμενο της «πρόωρης γήρανσης» των φωτοβολταϊκών στοιχείων, γνωστό ως P.I.D. (Potential Induced Degradation)

Η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκε ο όρος « της υποτίμησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε βάθος χρόνου γνωστός ως P.I.D. (Potential Induced Degradation) », ήταν στην δημοσιευμένη μελέτη του S.Pingel και των συνεργατών του το 2010 ^[74]. Στην μελέτη αυτή το φαινόμενο P.I.D. εισήχθη ως ο ρυθμός υποβάθμισης της απόδοσης που προκαλείται από την διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις κυψέλες της φωτοβολταϊκής μονάδας και του εδάφους. ^[23]

Η έρευνα που θεωρείται από τους επιστήμονες καινοτόμα στον τομέα αυτό έγινε από το εργαστήριο Jet Propulsion Laboratory εστιάζοντας, αρχικά, στην ηλεκτροχημική υποτίμηση των φωτοβολταϊκών μονάδων από κρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο. Ο μηχανισμός της υποβάθμισης της απόδοσης, γνωστός ως *πόλωση*, είχε συζητηθεί ήδη από το 2005 όταν διαπιστώθηκε στις εξαιρετικής λειτουργίας, από άποψη απόδοσης, φωτοβολταϊκές μονάδες πρώτης γενιάς της εταιρείας SunPower από κρυσταλλικό πυρίτιο ^[75]. Παρατηρήθηκε, επίσης, υποβάθμιση της απόδοσης των συμβατικών φωτοβολταϊκών μονάδων μπροστινής επαφής (n+/p) κάτω από την επίδραση διαφοράς δυναμικού. Ακόμη, το εμπορικό περιοδικό Photon αφιέρωσε αργότερα εκτενή άρθρα (4/2006, 6/2006 και 4/2007) στην υποτίμηση της απόδοσης λόγω *πόλωσης*. ^[23]

Ο κύριος και βασικός λόγος που εξηγεί γιατί το φαινόμενο P.I.D. δεν εμφανίστηκε νωρίτερα είναι πολύ απλός : το φαινόμενο P.I.D. εμφανίζεται ως αποτέλεσμα των υψηλών τάσεων του συστήματος (κάποιες εκατοντάδες volts), οι οποίες είναι τυπικές των συστημάτων που εγκαταστάθηκαν από το 2005 και μετά. Τα μεγαλύτερα φωτοβολταϊκά πάρκα και οι έκαναν επιτακτική την ανάγκη οι τάσεις λειτουργίας να αυξηθούν στα 600V για την Αμερική και τα 1000V για την Ευρώπη. ^[25]

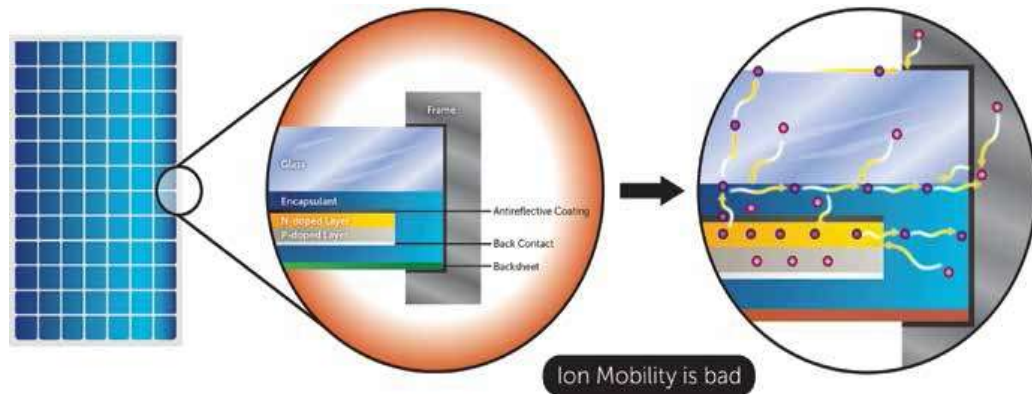
Το 2007 το φαινόμενο P.I.D. παρατηρήθηκε σε έναν αριθμό φωτοβολταϊκών πανέλων της εταιρείας Evergreen Solar (Photon 1/2008 και Photon 8/2008). Σε εκείνη την περίπτωση ο μηχανισμός της υποβάθμισης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών μονάδων που αποτελούνταν από φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου οφειλόταν στην αρνητική διαφορά δυναμικού των μονάδων ως προς το έδαφος. Αργότερα, το φαινόμενο P.I.D. συζητήθηκε εκτενέστερα ως ένα πρόβλημα των κοινών κρυσταλλικών μονάδων σε διάλεξη που δόθηκε από την κατασκευαστική εταιρεία Solon SE (Photon 12/2010, lecture by solar manufacturer Solon SE at PVSEC in

Valencia 2010). Στην διάλεξη αυτή διατυπώθηκε ότι: « Η τάση 1000V, μια συνηθισμένη τάση για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, μπορεί να είναι κρίσιμη για κάθε τεχνολογία μονάδων».^[23] Το φαινόμενο *P.I.D.* εγκάρσιου τύπου ή διακλάδωσης (*shunting type, P.I.D.-s*, που είναι ο πιο κοινός και ο πιο επιβλαβής τύπος του *P.I.D.* για τα πάνελ α κρυσταλλικού πυριτίου (*Si*), διαπιστώθηκε ότι προκαλείται από κρυσταλλικές ατέλειες που διαπερνούν την p-n επαφή των βλαφθέντων φωτοβολταϊκών κυψελών.^[43]

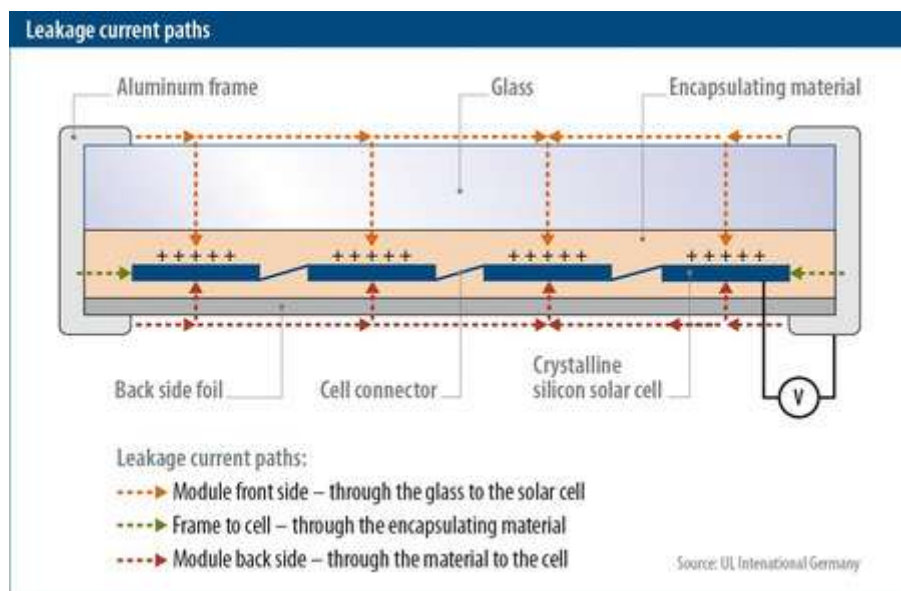
8. Εξήγηση του φαινομένου της υποτίμησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων *P.I.D.* (**Potential Induced Degradation**)

Οι ξεχωριστές μονάδες σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα συνδέονται συχνά σε σειρά προκειμένου να αυξηθεί η τάση του συστήματος. Η διαφορά δυναμικού της σχηματισμένης αλυσίδας μπορεί ορισμένες φορές να φτάσει τα πολλά εκατοντάδες Volts. Προκειμένου να υπάρχει ασφάλεια και προστασία των ανθρώπων από ανεπιθύμητα ηλεκτρικά σοκ, όλες οι μεταλλικές δομές των φωτοβολταϊκών μονάδων πρέπει να είναι γειωμένες. Λόγω της ηλεκτρικής τάσης ανάμεσα στις φωτοβολταϊκές μονάδες και της δομής τους, είναι πιθανόν τα ηλεκτρόνια, τα οποία υπάρχουν στα υλικά που χρησιμοποιούνται στις φωτοβολταϊκές μονάδες, να διαφύγουν διαμέσου του γειωμένου πλαισίου όταν η μόνωση ανάμεσα στην δομή και τα ενεργά στρώματα (*active layers*) δεν είναι τέλεια, προκαλώντας έτσι την δημιουργία *ρευμάτων διαφυγής* (βλ. Εικόνα 44) . Τα διαφεύγοντα ρεύματα οφείλονται, λοιπόν, στην τάση καθεμίας ξεχωριστά φωτοβολταϊκής μονάδας ως προς το έδαφος. Από το φαινόμενο αυτό συντηρείται μία πόλωση η οποία μπορεί να υποβαθμίσει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών κυψελών.^[21] Τα διαφεύγοντα ρεύματα είναι δυνατόν να επιφέρουν μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων έως και 30% . Στα περισσότερα αγείωτα φωτοβολταϊκά συστήματα οι φωτοβολταϊκές μονάδες με θετική ή αρνητική τάση ως προς το έδαφος εκτίθενται στο φαινόμενο *P.I.D.* . Το φαινόμενο της «πρώρης γήρανσης» *P.I.D.* των φωτοβολταϊκών κυψελών εμφανίζεται, κυρίως, λόγω της αρνητικής τάσης ως προς την τάση του εδάφους και επιταχύνεται από τις υψηλές τάσεις του συστήματος, τις υψηλές θερμοκρασίες και την υγρασία.^[23] Η έρευνα του επιστήμονα Hacke (2011)^[44] έδειξε παραδείγματος χάριν ότι το φαινόμενο *P.I.D.* ευνοείται από τα υγρά κλίματα εν αντιθέσει με τα θερμά και ξηρά. Μάλιστα, η

δημοσίευση του επιστήμονα Schutz (2011) ^[45] επιβεβαίωσε αυτήν την άποψη αποδεικνύοντας ότι τα διαφεύγοντα ρεύματα αυξάνουν λόγω της υγρασίας. ^[21]



Εικόνα 44 Το διαφεύγον ρεύμα και η διαφορά δυναμικού (εδώ φαίνεται η επίδραση της αρνητική τάσης) προκαλούν τα αρνητικά (-) (μωβ) ιόντα να μετακινηθούν μακριά από τον ημιαγωγό, ενώ τα θετικά (+) (ροζ) ιόντα μετακινούνται κατά μήκος του ημιαγωγού από το γυαλί, την συσκευασία και το εξωτερικό περιβάλλον της φωτοβολταϊκής μονάδας. ^[26]



Εικόνα 45 Στην εικόνα μπορούμε να δούμε τις δυνατές πορείες που ακολουθούν τα θετικά φορτία – σπές -, οι οποίες είναι αντίθετες από αυτές των ηλεκτρονίων και οι οποίες

δημιουργούν διαφεύγοντα ρεύματα. Τα δυνατά μονοπάτια είναι : (α) από την μπροστινή πλευρά της φωτοβολταϊκής μονάδας προς την κυψέλη μέσω του γυαλιού, (β) από το προστατευτικό πλαίσιο προς την κυψέλη μέσω του υλικού του περιβλήματος και (γ) από την πίσω πλευρά της φωτοβολταϊκής μονάδας που είναι κατασκευασμένη από υλικό αλουμινίου προς την κυψέλη μέσω του υλικού του περιβλήματος. ^[27]

9. Παράγοντες που προκαλούν το φαινόμενο P.I.D.

Οι παράγοντες που προκαλούν την εμφάνιση του φαινομένου P.I.D. ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες : (i) περιβαλλοντικοί λόγοι , (ii) λόγοι που έχουν σχέση με το σύστημα, (iii) λόγοι που αφορούν την φωτοβολταϊκή μονάδα και τέλος (iv) λόγοι σχετικοί με το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Οι συνθήκες του περιβάλλοντος αλληλεπιδρούν με τους υπόλοιπους παράγοντες και κάνουν δυνατή την ύπαρξη του φαινομένου P.I.D. . Ενώ οι παράγοντες που αφορούν το περιβάλλον είναι προκαθορισμένοι από την φύση και ανεξάρτητοι, οι υπόλοιποι παράγοντες (ii), (iii) και (iv) μπορούν να ελεγχθούν κατάλληλα για την πρόληψη του φαινομένου P.I.D. . Παρακάτω θα δούμε αναλυτικότερα κάθε μία από τις ανωτέρω κατηγορίες.

(i) Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Είναι γνωστό ότι, γενικά, οι περιβαλλοντικοί λόγοι ,όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, επηρεάζουν την λειτουργία και την απόδοση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Οι περιβαλλοντικοί αυτοί λόγοι, η θερμοκρασία και/ή η σχετική υγρασία, μπορούν, επίσης, να προκαλέσουν ή απλά να επιταχύνουν το φαινόμενο P.I.D. με την αύξηση των τιμών τους.

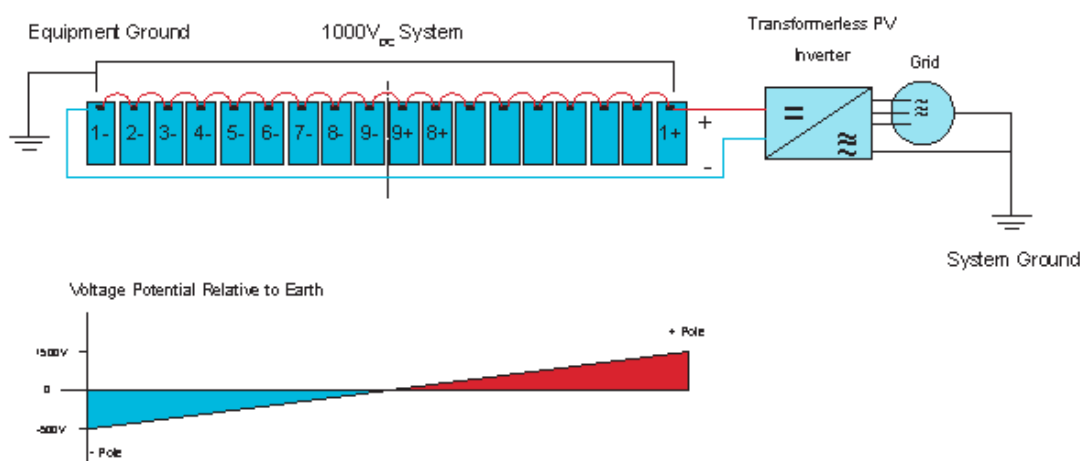
Είναι ενδιαφέρον να επισημάνουμε ότι ενώ οι υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν την υποτίμηση της απόδοσης που προκαλείται από το φαινόμενο P.I.D. , ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι διευκολύνουν κάποιες φορές την αναγέννηση των φωτοβολταϊκών μονάδων, μειώνοντας το P.I.D. φαινόμενο.

Καθώς, οι κατασκευαστικές εταιρείες δεν μπορούν να κάνουν αρκετά για να αλλάξουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες -εκτός από το να επιλέξουν προσεχτικά το μέρος που εγκαθίσταται το φωτοβολταϊκό σύστημα - ,το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στους τρεις άλλους παράγοντες (ii), (iii) και (iv). ^[26]

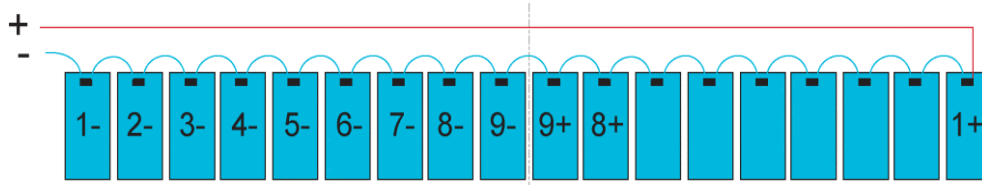
(ii) Παράγοντες σχετικοί με το φωτοβολταϊκό σύστημα

Σε επίπεδο συστήματος, οι πιο σημαντικοί παράγοντες επίδρασης είναι η τάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου και το σήμα τα οποία εξαρτώνται από την θέση της φωτοβολταϊκής μονάδας και την τοπολογία του συστήματος ως προς την γείωσή του. Στην Εικόνα 46 μπορούμε να δούμε ότι η τάση σε μία σειρά φωτοβολταϊκών κυψελών μπορεί να διαφέρει ανάλογα την τοπολογία γείωσης.^[26]

Το φαινόμενο P.I.D. εμφανίζεται σε συστήματα όπου υπάρχει αρνητική τάση ως προς την γη^[28]— αν και σύμφωνα με την εταιρεία Sunpower έχουν παρατηρηθεί προβλήματα και σε περιπτώσεις θετικής τάσης ως προς την γη^[26]. Αυτό συμβαίνει όταν ο αρνητικός πόλος του αντιστροφέα δεν είναι γειωμένος ή στην περίπτωση ενός διπολικά συνδεδεμένου συστήματος όπου ο θετικός πόλος του αντιστροφέα είναι συνδεδεμένος με τη γη^[28] (βλ. Εικόνα 46).



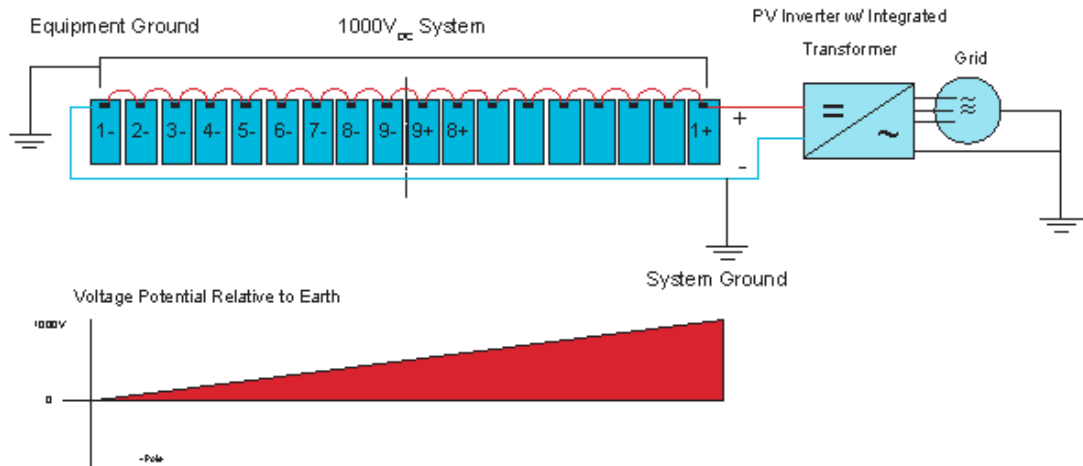
Εικόνα 46 Η διάταξη που βλέπουμε αναπαριστά ένα μη γειωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα, ενώ το διάγραμμα δείχνει την τάση του συστήματος ως προς την γη.^[28]



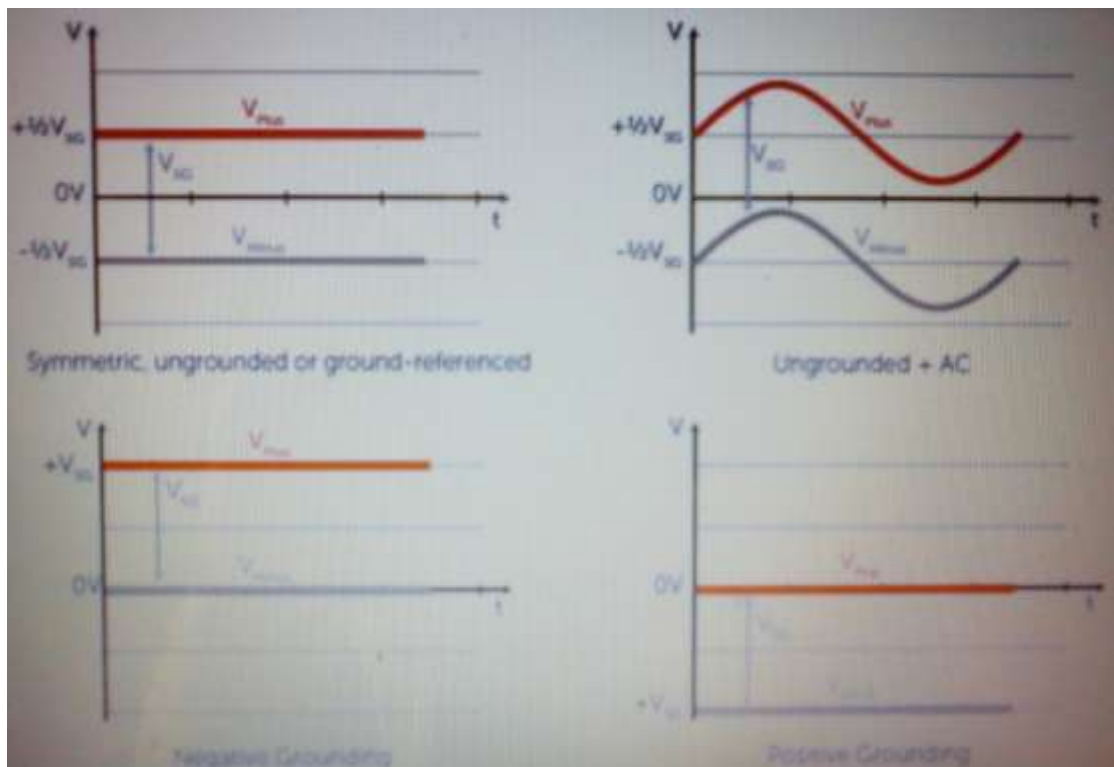
Εικόνα 47 Το layout των φωτοβολταϊκών πλαισίων για ένα μη γειωμένο σύστημα. ^[28]

Στην περίπτωση ενός μη γειωμένου συστήματος (βλ. Εικόνα 47), το φαινόμενο P.I.D. είναι πιο έντονο στα φωτοβολταϊκά πλαίσια με την μεγαλύτερη αρνητική τάση ως προς την γη, που στην περίπτωση των παραπάνω συνδεσμολογιών είναι η φωτοβολταϊκή μονάδα 1- . Το φαινόμενο μειώνεται κατά μήκος της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς κινούμαστε προς το πλαίσιο 9- όπου η τάση ως προς τη γη είναι μηδέν ή κοντά σε αυτό. Στην άλλη μεριά της συστοιχίας το ορισμένο ως πλαίσιο 1+ έχει την μεγαλύτερη θετική τάση ως προς την γη. Στην θετική πλευρά της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών μονάδων δεν υφίσταται το φαινόμενο P.I.D..

Το φαινόμενο P.I.D. δεν εμφανίζεται όταν ο αρνητικός πόλος του αναστροφέα είναι γειωμένος (βλ. Εικόνα 48) ή σε συστήματα λιγότερων των ή ίσων με 600V, που ελαχιστοποιούν την υψηλή αρνητική τάση που οδηγεί στο φαινόμενο P.I.D..



Εικόνα 48 Η συνδεσμολογία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στο οποίο ο αρνητικός πόλος του αναστροφέα είναι γειωμένος. Στο διάγραμμα της τάσης κάθε μονάδας ως προς την γη, παρατηρούμε ότι η τάση αυτή είναι θετική και αυξάνεται κατά μήκος της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών μονάδων, ξεκινώντας από αριστερά όπου το πλαίσιο 1- έχει τάση ίση με μηδέν και κινούμενοι προς τα δεξιά έως το πλαίσιο 1+ , το οποίο έχει την μεγαλύτερη τάση ως προς την γη.^[28]



Διάγραμμα 2 Στα διαγράμματα φαίνεται πως το δυναμικό εξαρτάται από την τοπολογία γείωσης του φωτοβολταϊκού συστήματος, που μπορεί να γίνει με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους.^[26]

Δυστυχώς, στην αγορά τα γειωμένα συστήματα ακολουθούν σε προτίμηση τα αγγεία και τα διπολικά συστήματα εξαιτίας του μειωμένου κόστους και την μεγαλύτερης απόδοσης. Επιπλέον, φωτοβολταϊκά συστήματα πολλών Volts γίνονται όλο και πιο συνήθη και είναι σύμφωνα με την παρούσα νομοθεσία.

Αν και είναι λιγότερο γνωστή, μπορούμε, επίσης, να αναφέρουμε μία επιπλέον έρευνα που έχει γίνει σχετικά με τους παράγοντες που προκαλούν το φαινόμενο P.I.D. λόγω κάποιας αστοχίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η έρευνα αυτή έχει αποκαλύψει ότι “ η ιδέα της εξάρτησης από την τάση ίσως οφείλεται στις χωρητικές επιδράσεις. Η μετακίνηση ιόντων που προκαλείται από μια συγκεκριμένη ηλεκτρική δύναμη λόγω της εφαρμογής τάσης οδηγεί σε κορεσμό του ηλεκτρικού φορτίου κρατώντας όλες τις δυνάμεις σε θερμοδυναμική ισορροπία. Αυτά τα ηλεκτρικά φορτία επηρεάζουν τις ημιαγωγικές ιδιότητες. Παρόλο το επίπεδο της τάσης η διαδικασία της υποτίμησης της απόδοσης της φωτοβολταϊκής μονάδας σταθεροποιείται σε συγκεκριμένα επίπεδα ανάλογα τον τύπο της.” [26]

(iii) Παράγοντες σχετικοί με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Οι παράγοντες που αφορούν την φωτοβολταϊκή μονάδα και μπορούν να συντελέσουν στο φαινόμενο P.I.D. εντοπίζονται στην ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της έτσι ώστε να εμποδίζουν το διαφεύγον ρεύμα. [29] Η επιλογή του τύπου γυαλιού , του υλικού ενθυλάκωσης και των υλικών που λειτουργούν ως εμπόδια διάχυσης φαίνεται να επιδρούν στην εμφάνιση του φαινομένου P.I.D. .

Όσον αφορά το εμπρόσθιο γυαλί, πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι η ύπαρξη νατρίου (Na) ως συστατικό υλικό του αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα. Σύμφωνα με μία μελέτη “ ένα συστατικό το οποίο περιλαμβάνεται σε γυαλί τύπου νατρίου-ασβεστίου (soda-lime, Na-Cu), δηλαδή στο κοινό γυαλί, αλλά δεν υπάρχει σε γυαλί τύπου Quartz, είναι απαραίτητο για την εμφάνιση του φαινομένου P.I.D. . Έτσι έγινε η υπόθεση πως το συστατικό αυτό είναι το νάτριο (sodium). Ενώ το νάτριο είναι ο κύριος ύποπτος, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε αυτό και της υψηλής κινητικότητας, εντούτοις, το αλουμίνιο (Al), το μαγνήσιο (Mg) και το ασβέστιο (Ca) εμπεριέχονται, επίσης, αν και σε μικρότερη περιεκτικότητα στο γυαλί νατρίου-ασβεστίου, ενώ στο γυαλί τύπου Quartz

όχι, κάτι το οποίο μπορεί να συμβάλλει στην διαφορετική συμπεριφορά των δύο τύπων γυαλιών” .

Τα διάφορα μέσα που χρησιμοποιούνται για την ενθυσλάκωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων φαίνεται πως επιδρούν εξίσου στο φαινόμενο P.I.D. . Το οξικό αιθυλενοβινύλιο (ethylene vinyl acetate, EVA), παίζει ζωτικό ρόλο στο φαινόμενο P.I.D., αφού όλα τα άλλα υποκατάστατα μπορούν να το αποτρέψουν. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε τους επιστήμονες να κάνουν την υπόθεση πως αυτό μπορεί να συνδέεται με τον διαφορετικό βαθμό αγωγιμότητας. Το οξικό οξύ που περιέχεται στο οξικό αιθυλενοβινύλιο (EVA) σε συνδυασμό με τη υγρασία μπορεί να είναι υπεύθυνα για την διάλυση των μεταλλικών ιόντων στην διεπιφάνεια του γυαλιού, γνωστή ως «διάβρωση του γυαλιού». Τα αποτελέσματα ερευνών δείχνουν πως το φαινόμενο P.I.D. σχετίζεται με την διαδικασία μεταφοράς διαμέσου της διεπιφάνειας μεταξύ γυαλιού και οξικού αιθυλενοβινυλίου (EVA) όπως, επίσης, της μεταφοράς διαμέσου της διεπιφάνειας ανάμεσα στο οξικό αιθυλενοβινύλιο (EVA) και της εξωτερικής επιφάνειας της φωτοβολταϊκής κυψέλης. Άλλες δοκιμές που έγιναν σε υλικά που χρησιμοποιούνται για την προστατευτική κάλυψη των φωτοβολταϊκών μονάδων με πολυβινυλοβουτυράλη (polyvinyl butyral, PVB) έδειξαν ότι εμφανίζουν την μεγαλύτερη ευαισθησία στο φαινόμενο P.I.D. Η πολυβινυλοβουτυράλη (PVB) χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή αντίσταση στην διείσδυση της υγρασίας, με αποτέλεσμα η περισσότερη υγρασία να αυξάνει την αγωγιμότητα. Εναλλακτικά υλικά που χρησιμοποιούνται και επιτρέπουν περισσότερο στην υγρασία να διεισδύσει, συγκριτικά με το αιθυλενοβινυλίου (EVA), φαίνεται να μειώνουν την επίτρεψη του φαινομένου P.I.D. . Σύμφωνα μάλιστα με τους επιστήμονες : “ Συνιστάται η χρήση εναλλακτικών υλικών βάσει του γεγονότος ότι τα διαφεύγοντα ρεύματα στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο μπορούν, θεωρητικά, να περιορίζονται με την χρήση ενός ενθυσλακωτικού υλικού το οποίο να είναι αδιαπέραστο από φορείς φορτίου” .

Η χρήση διοξειδίου του πυριτίου (silicon dioxide) με σκοπό να λειτουργήσει ως εμπόδιο στην διάχυση νατρίου (Na) ανάμεσα στο γυαλί και σε ηλεκτρικά ενεργά κομμάτια του ημιαγωγού φαίνεται πως λειτουργεί αρκετά καλά στην αποτροπή του φαινομένου P.I.D. , αλλά δυστυχώς, ένα τέτοιο εμπόδιο δεν είναι απρόσβλητο στα διαφεύγοντα ρεύματα οπών. Επιπρόσθετα, η μεταχείριση laser στην μπροστινή επαφή των φωτοβολταϊκών κυψελών λεπτών υμενίων δύναται να αφήσει κενά στο στρώμα του φράγματος , το οποίο μπορεί να είναι προβληματικό χωρίς τα απαραίτητα προληπτικά μέτρα για την κάλυψη αυτών των κενών. ^[26]

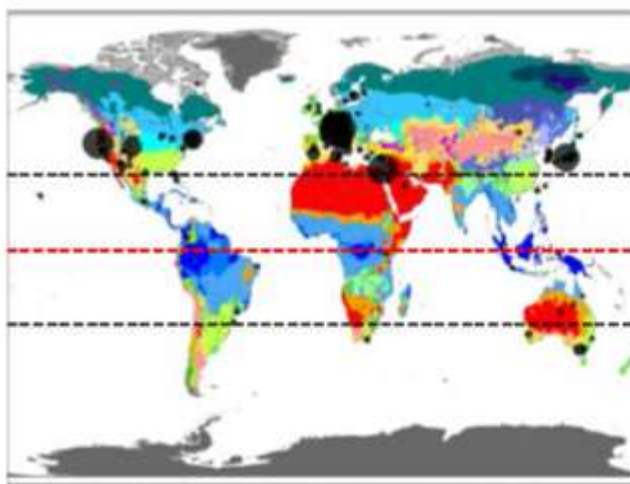
(iv) Παράγοντες σχετικοί με την φωτοβολταϊκή κυψέλη

Σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, μία αντι-αντανακλαστική επικάλυψη (anti-reflective coating, ARC) μπορεί να αυξήσει την σύλληψη φωτός και, ως εκ τούτου, να αυξηθεί η απόδοση ισχύος της φωτοβολταϊκής μονάδας. Όμως, η έρευνα έχει δείξει ότι οι ιδιότητες του αντι-αντανακλαστικού επιστρώματος ARC αποτελούν έναν παράγοντα πρόκλησης του φαινομένου P.I.D.. Σύμφωνα με τους επιστήμονες : “ Η αντι-αντανακλαστική επικάλυψη είναι άλλο ένα στοιχείο που θεωρείται προαπαιτούμενο για να υπάρξει η διαδικασία P.I.D.. Ακόμη, πρόσφατα διαπιστώθηκε από μετρήσεις μέσω της μεθόδου φασματομετρίας μάζας δευτερογενών ιόντων (secondary ion mass spectrometry, SIMS) ότι το νάτριο που προέρχεται από το γυαλί μπορεί εύκολα να βρεθεί στα άνω στρώματα της φωτοβολταϊκής κυψέλης.” Στην προηγούμενη ενότητα (iii) αναφέραμε ότι το νάτριο θεωρείται βασικός παράγοντας πρόκλησης του φαινομένου P.I.D..^[26] Ως παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε την ευρέως χρησιμοποιούμενη αντι-ανακλαστική επικάλυψη AR του νιτριδίου του πυριτίου (SiN_x), η οποία μπορεί να συσσωρεύσει ιόντα νατρίου μεγάλης κινητικότητας, τελώντας με τον τρόπο αυτό επιταχυντικό ρόλο στην εμφάνιση του φαινομένου P.I.D..^[30]

10. Η συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου P.I.D. και, γενικότερα, των φαινομένων υποτίμησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανά τον κόσμο.

Η συχνότητα εμφάνισης του φαινομένου υποτίμησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στις χώρες όπου χρησιμοποιείται η τεχνολογία τους έχει αποτελέσει αντικείμενο ενδιαφέροντος των επιστημόνων. Όπως γνωρίζουμε, οι παράμετροι I-V στην περίπτωση υποτίμησης της απόδοσης ενδέχεται να εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες και την κλιματική ζώνη.^[31] Οι παρατηρήσεις των επιστημόνων οδήγησαν στην δημιουργία ενός χάρτη με βάση τον χάρτη των *Koppen-Geiger*^[32]. Ο χάρτης *Koppen-Geiger* είναι ο πιο διαδεδομένος σε χρήση χάρτης ταξινόμησης των περιοχών ανάλογα το κλίμα. Η ταξινόμηση γίνεται σε πέντε κύριες κατηγορίες κλιμάτων : τροπικό, ξηρό, εύκρατο, ηπειρωτικό και πολικό. Κάθε κατηγορία, επίσης, περιλαμβάνει κάποιες υποκατηγορίες.^[32] Η Εικόνα 49 δείχνει τον χάρτη *Koppen-Geiger* επάνω στον οποίο έχει σημειωθεί η γεωγραφική κατανομή των συχνοτήτων εμφάνισης των

φαινομένων υποτίμησης (βλ. μαύρες κουκκίδες). Το μέγεθος των κουκκίδων είναι ανάλογο της συχνότητας της παρατηρούμενης υποτίμησης απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στη συγκεκριμένη κάθε φορά περιοχή. Ένα πρώτο συμπέρασμα που απορρέει από τον χάρτη είναι ότι σε πολλές από τις κλιματικές ζώνες του Korpen δεν παρατηρείται κανένα φαινόμενο υποτίμησης.

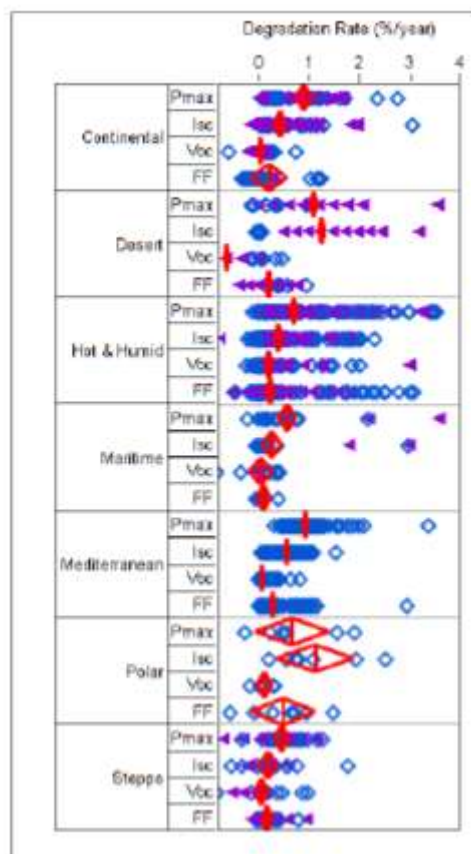


Εικόνα 49 Γεωγραφική κατανομή της συχνότητας των φαινομένων υποτίμησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων – με βάση τα δηλωθέντα περιστατικά - επάνω στον χάρτη Korpen-Geiger με τον ισημερινό και τους τροπικούς του Καρκίνου και Αιγόκερου. Το μέγεθος των μαύρων κύκλων είναι ενδεικτικό της συχνότητας εμφάνισης των φαινομένων υποτίμησης σε κάθε περιοχή.
[31]

Ο κλιματολόγος Vladimir Korpen ενδιαφερόταν ιδιαίτερα για την αλληλεπίδραση μεταξύ κλίματος και χλωρίδας. Για τον λόγο αυτόν, ο χάρτης κατηγοριοποίησής του είναι βασισμένος στην θερμοκρασία και την πτώση βροχής. Αναμφισβήτητα, η θερμοκρασία, η υγρασία, η βροχή και το χιόνι αποτελούν παράγοντες που σχετίζονται, επίσης, με την πρόκληση της υποτίμησης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πανέλων, όπως έχουμε ήδη αναφέρει. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλοι παράμετροι που μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων και την διάρκεια λειτουργίας τους, όπως το υψόμετρο, η μεταβολή της θερμοκρασίας, το ύψος του χιονιού που

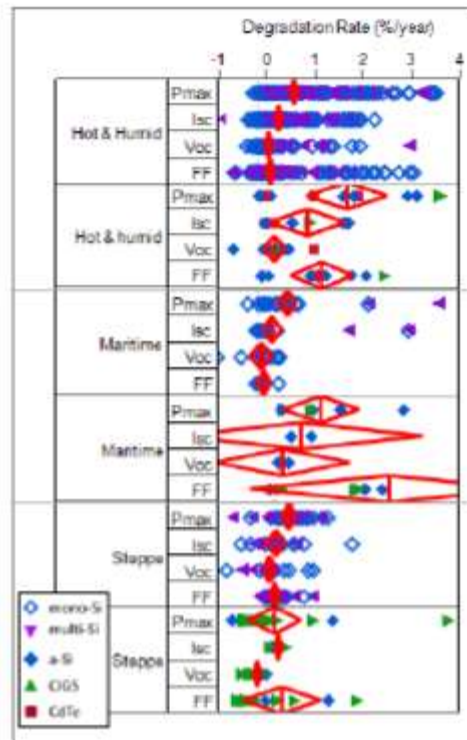
αποτελεί, ενδεχομένως, ένα βαρύ φορτίο για τα πάνελα και ο βαθμός αλμυρότητας της ατμόσφαιρας.

Μία πλήρης εικόνα για το φαινόμενο της υποτίμηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων μονο-κρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si) ανά τον κόσμο δίνεται στο Διάγραμμα 3. Σε αυτήν εικονίζονται οι παράμετροι IV της υποβάθμισης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων μονοκρυσταλλικού πυριτίου (mono-Si) και πολυκρυσταλλικού πυριτίου (multi-Si) ανάλογα την κλιματική ζώνη. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση του κλίματος που επικρατεί στις ερήμους η υποβάθμιση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} είναι μεγαλύτερη από την υποβάθμιση της μέγιστης ισχύος P_{max} , ενώ η τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} παρουσιάζει μια μικρή βελτίωση. Είναι πιθανό οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν στις ερήμους να είναι υπαίτιες για τον καφετί χρωματισμό του οξικού αιθυλοβινυλίου (EVA) - που χρησιμοποιείται ως υλικό ενθυλάκωσης – το οποίο εκδηλώνεται μέσω της υψηλής υποτίμησης του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} και της χαμηλής υποτίμησης του συντελεστή πλήρωσης (fill factor, FF). Επιπρόσθετα, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στα πολικά κλίματα ο συντελεστής πλήρωσης (FF) παρουσιάζει την μεγαλύτερη υποβάθμιση συγκριτικά με τα υπόλοιπα κλίματα. Μία πιθανή εξήγηση μπορεί να είναι ότι το φορτίο λόγω του χιονιού οδηγεί σε ράγισμα του εμπρόσθιου γυαλιού ή ότι οι ψυχρές θερμοκρασίες, ιδιαίτερα την περίοδο του χειμώνα, προκαλούν σπάσιμο των συνδέσεων λόγω της ευθραυστότητας που παρουσιάζει το οξικό αιθυλοβινύλιο (EVA) σε χαμηλές θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 3 Οι παράμετροι IV για την υποβάθμιση πανέλων μονοκρυσταλλικού πυριτίου (ρόμβοι) και multi-κρυσταλλικού πυριτίου (σκιασμένα τρίγωνα) ανάλογα τις κλιματικές ζώνες της ταξινόμησης Koppen-Geiger. Το 95% των διαστημάτων αξιοπιστίας κατέχεται από τους ρόμβους με μέσους όρους τις κάθετες γραμμές. ^[31]

Στο Διάγραμμα 4 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ φωτοβολταϊκών πλαισίων των τεχνολογιών κρυσταλλικού πυριτίου και λεπτού υμενίου στις διάφορες περιοχές που χρησιμοποιούνται και οι δύο. Ειδικά στους μουσώνες και στα θερμά και υγρά κλίματα ο συντελεστής πλήρωσης (FF) των φωτοβολταϊκών πανέλων λεπτού υμενίου παρουσιάζει πιο εμφανή υποτίμηση πιθανότατα λόγω της εισχώρησης υγρασίας εντός των φωτοβολταϊκών κυψελών. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι υπάρχει μια διακύμανση στα δεδομένα λόγω των φωτοβολταϊκών πλαισίων διαφορετικών τύπων, ηλικίας και κατασκευής, που περιλαμβάνει την ενθυσία, το εμπρόσθιο και οπίσθιο φύλλο, την ηλεκτρική διάταξη και την απόκλιση μέτρησης κλπ. ^[31]



Διάγραμμα 4 Οι παράμετροι IV για την υποβάθμιση πανέλων μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) (μπλε ρόμβοι) και multi-κρυσταλλικού πυριτίου (Si) (μωβ τρίγωνα) και πανέλων λεπτού υμενίου (μπλε σκιασμένοι ρόμβοι, πράσινα τρίγωνα, κόκκινα τετράγωνα) ανάλογα τις κλιματικές ζώνες της ταξινόμησης Koppen-Geiger. Το 95% των διαστημάτων αξιοπιστίας κατέχεται από τους ρόμβους με μέσους όρους τις κάθετες γραμμές.^[31]

11. Πρόγνωση και μελέτη του φαινομένου P.I.D. εντός του εργαστηρίου

Στην εποχή μας οι κατασκευαστές έρχονται ολοένα και περισσότερο αντιμέτωποι με πολλές δυσκολίες προκειμένου να αναπτύξουν καινοτόμα, υψηλής τεχνολογίας προϊόντα σε χρόνο ρεκόρ, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την παραγωγικότητα, την αξιοπιστία των προϊόντων και την ποιότητά τους. Όπως γνωρίζουμε, η αξιοπιστία και η διάρκεια ζωής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτώνται κυρίως από την παραγωγή ενέργειας των μονάδων και τον βαθμό υποβάθμισης της λειτουργίας τους. Όμως, η έλλειψη ακριβούς πληροφορίας για τον ρυθμό υποβάθμισης της απόδοσης αυξάνει το οικονομικό ρίσκο. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μεθόδων όπως την ταυτόχρονη κατασκευή σε συνδυασμό με την ευρύτερη χρήση ειδικά σχεδιασμένων

πειραμάτων για την βελτίωση των προϊόντων και της διαδικασίας παραγωγής.^[22] Πια, τα τελευταία χρόνια, η δοκιμή των φωτοβολταϊκών μονάδων ως προς την ευπάθειά τους στο φαινόμενο P.I.D. είναι απαραίτητη σε κάθε μεγάλο έργο ή έρευνα που αφορά τα φωτοβολταϊκά. Πολύ συχνά, μάλιστα, είναι προαπαιτούμενο για μια επικείμενη χρηματοδότηση. Οι δοκιμές αυτές χρησιμεύουν, επίσης, στην διαπίστωση αν ο μηχανισμός που προκαλεί το φαινόμενο P.I.D. σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι αναστρέψιμος, το οποίο ορίζει αν χρειάζονται μέτρα αντιμετώπισης και περιορισμού του φαινομένου καθώς και ποια θα είναι αυτά.^[26]

Αναζητώντας κανείς την σχετική βιβλιογραφία, μπορεί να συναντήσει αποτελέσματα από πειραματικές δοκιμές φωτοβολταϊκών μονάδων. Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι δοκιμών και διαφορετικές τεχνικές για την μελέτη της λειτουργίας των πλαισίων. Τα περισσότερα από αυτά τα αποτελέσματα που προέρχονται από δοκιμές εντός εργαστηρίου δεν είναι ακριβή και σύμφωνα με τους πραγματικούς ρυθμούς υποβάθμισης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αν και οι δοκιμές στο εξωτερικό περιβάλλον θεωρούνται ως η καλύτερη λύση, ωστόσο είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολύ χρόνο μέχρι να οδηγήσει σε συμπεράσματα τα οποία θα ληφθούν υπόψη για περαιτέρω αλλαγές. Για παράδειγμα, οι επιστήμονες δεν μπορούν να περιμένουν 25 χρόνια ή έστω ένα σημαντικό διάστημα αυτών των 25 χρόνων προκειμένου να εισάγουν ένα νέο προϊόν. Για τον λόγο αυτόν, θα πρέπει να αναπτυχθούν και να χρησιμοποιηθούν *επισπευσμένες δοκιμές (ATs, Accelerated Tests)* για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων των νέων προϊόντων.

Οι επισπευσμένες δοκιμές (ATs) γίνονται ολοένα και πιο σημαντικές λόγω των ταχέως μεταλλασσόμενων τεχνολογιών, των πιο πολύπλοκων προϊόντων που συνίστανται από περισσότερα στοιχεία, των υψηλών απαιτήσεων των καταναλωτών για μεγαλύτερη αξιοπιστία και της ανάγκης για γρήγορη ανάπτυξη ενός προϊόντος. Σκοπός της επισπευσμένης δοκιμής (AT) είναι να αποτιμήσει γρήγορα και να αποδείξει την αξιοπιστία ενός στοιχείου του συστήματος ή του υποσυστήματος, να πιστοποιήσει τα στοιχεία, να διαπιστώσει διάφορες μορφές αστοχίας ώστε να διορθωθούν και να συγκρίνει προϊόντα μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών. Η μεθοδολογία *επισπευσμένης δοκιμής της διάρκειας ζωής (ALT, Accelerated Life Testing)* πρέπει να χαρακτηρίζεται, αρχικά, από την ικανότητα να αναπαράγει μία συγκεκριμένη μορφή υποβάθμισης ή αστοχίας χωρίς να την μεταποιεί. Δευτερευόντως, η μεθοδολογία θα πρέπει να παράγει αυτό το αποτέλεσμα σε λιγότερο από τον πραγματικό χρόνο. Υπάρχουν δύσκολα πρακτικά και στατιστικά θέματα που σχετίζονται με την επιτάχυνση

ή αλλιώς την επίσπευση της ζωής ενός πολύπλοκου προϊόντος. Σε γενικές γραμμές, στις δοκιμές που γίνονται, μονάδες ενός υλικού, στοιχείου, υποσυστήματος ή ολόκληρου του συστήματος υπόκεινται σε υψηλότερες από το συνηθισμένο τιμές μίας ή περισσότερων μεταβλητών (όπως είναι η θερμοκρασία, η τάση ή η πίεση). Οι πληροφορίες από τις δοκιμές αυτές προεκβάλλονται μέσω ενός λογικού στατιστικού μοντέλου με στόχο την επίτευξη προβλέψεων για τον χρόνο ζωής ή της συμπεριφοράς σε βάθος χρόνου και σε χαμηλότερα, φυσιολογικά επίπεδα των επιταχυνόμενων μεταβλητών.^[22]

12. Τα κύρια μαθηματικά μοντέλα περιγραφής της υποβάθμισης P.I.D. των φωτοβολταϊκών μονάδων.

Όπως έχουμε προαναφέρει, υπάρχουν διάφοροι τύποι υποβάθμισης της απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής μονάδας, όπως είναι για παράδειγμα η διάβρωση, ο αποχρωματισμός, η αποκόλληση, η εμφάνιση θερμών κηλίδων ή το φαινόμενο P.I.D.. Κάποιοι από τους παράγοντες που προκαλούν τις βλάβες αυτές μπορεί να είναι η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η εφαρμογή υψηλής τάσης, η υγρασία ή συνδυασμός αυτών. Οι επισπευσμένες δοκιμές (AT, accelerated tests) υποβαθμισμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων υπό ακραίες συνθήκες είναι ένα πολύ καλό εργαλείο για την κατανόηση της υποβάθμισης της απόδοσής τους. Αυτό, όμως, που είναι πραγματικά ενδιαφέρον είναι η προσπάθεια των επιστημόνων για την δημιουργία μαθηματικών μοντέλων που προσομοιώνουν την πορεία της υποβάθμισης μιας φωτοβολταϊκής μονάδας. Η δημιουργία των μαθηματικών αυτών μοντέλων βασίζονται στα δεδομένα που προκύπτουν από τις επισπευσμένες δοκιμές (AT).

Μέχρι στιγμής, είναι λίγα τα μοντέλα εκτίμησης που έχουν δημιουργηθεί και για τον λόγο αυτό αναμένεται μία πρόοδος. Κάποια από τα γνωστά μοντέλα είναι το μοντέλο του Pan, το εκθετικό μοντέλο, η σχέση Arrhenius, η σχέση Eyring και το επισπευσμένο μοντέλο φωτογήρανσης. Στα μοντέλα αυτά η μεταβλητή επιτάχυνσης μπορεί άλλοτε να είναι ο χρόνος (σχέσεις Arrhenius και Eyring με παράγοντα τον χρόνο), άλλοτε η υγρασία (Arrhenius και Eyring με παράγοντα την υγρασία), η τάση (σχέση Arrhenius με παράγοντα την τάση) ή η UV ακτινοβολία (μοντέλο φωτογήρανσης), κρατώντας πάντα τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές. Για την περιγραφή φαινομένων των οποίων η διάρκεια ζωής εξαρτάται από ακραία υψηλές τιμές

κάποιων μεταβλητών ,όπως είναι η μηχανική καταπόνηση, η πίεση ή ακραία τιμή της τάσης, χρησιμοποιείται ,επίσης, η αντίστροφη σχέση ισχύος. Υπάρχουν, επίσης, μοντέλα στα οποία οι μεταβλητές επιτάχυνσης μπορεί να είναι δύο. ^[21]

12.1 Το εκθετικό μοντέλο

Οι επιστήμονες Vazquez και Ignacio (2008) ^[41] έχουν αναπτύξει ένα μαθηματικό μοντέλο για την εκτίμηση της υποβάθμισης της ισχύς των φωτοβολταϊκών πανέλων. Για τον λόγο αυτόν, προτείνανε τις παρακάτω υποθέσεις : α) η ισχύς (P) του πλαισίου θεωρείται ως σχετική της αξιολόγησης της λειτουργίας του και β) η υποβάθμιση του πλαισίου αποτιμάται σε σχέση με την αρχική ισχύ (P₀) του. Η μετρημένη ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε δοθέντα χρόνο ακολουθεί μία Gauss-ιανή κατανομή. Σύμφωνα με τους επιστήμονες Reis ^[34], Sakamoto και Oshiro ^[35] η πυκνότητα της πιθανότητας P δίνεται από την σχέση :

$$P(P) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right) * \exp \left(-\frac{1}{2} \right) * \left[\left(\frac{P-\mu}{\sigma} \right) \right]^2 \quad (2)$$

όπου P είναι η ισχύς του φωτοβολταϊκού πλαισίου, μ είναι η μέση τιμή του και σ είναι η καθιερωμένη απόκλιση. Η μέση ισχύς μειώνεται γραμμικά σύμφωνα με τους επιστήμονες Osterwald ^[36], Marion και Adelstein ^[37], Raghuraman ^[38] :

$$\mu(t) = P_0 - A * t \quad (3)$$

όπου

P₀ είναι η μέση ισχύς όταν t=0 (π.χ. η ονομαστική ισχύς του πλαισίου),

A είναι μία παράμετρος που σχετίζεται με την ετήσια μείωση της ισχύς του πλαισίου,

t είναι ο χρόνος σε έτη. Φυσικά, η εγκυρότητα της εξίσωσης (3) περιορίζεται από τον χρόνο (t) για t μικρότερο από P₀/A.

Ένας άλλος, ακόμη, περιορισμός προκύπτει από την υπόθεση σύμφωνα με την οποία η παράμετρος A είναι σταθερή στον χρόνο.

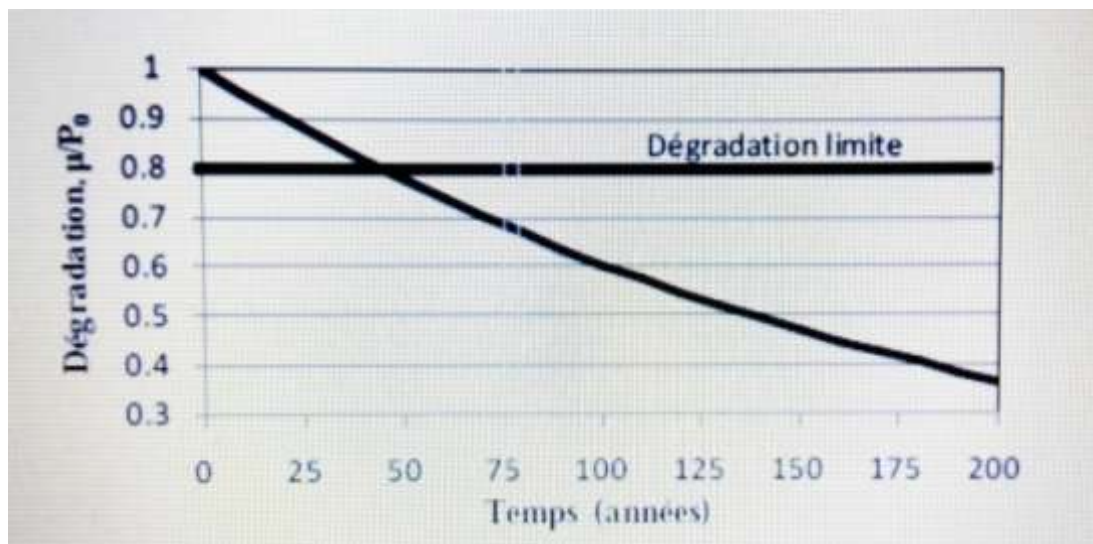
Στην εξίσωση (4) ο λόγος A/P₀ (έτη⁻¹) είναι ο ετήσιος ρυθμός υποβάθμισης της απόδοσης. Η εξίσωση (4) αναφέρεται σε δύο διαδοχικά έτη.

$$\frac{\mu(n)-\mu(n-1)}{P_0} = -\frac{A}{P_0} \quad (4)$$

Από μελέτες των επιστημόνων Chuang^[39], Xie και Pecht^[40] σχετικά με την υποβάθμιση ηλεκτρονικών στοιχείων, προκύπτει η υπόθεση σύμφωνα με την οποία ο ρυθμός της υποβάθμισης της ισχύος είναι εκθετικός:

$$\mu(t) = P_0 * \exp(-\alpha * t) \quad (5)$$

Το Διάγραμμα 5 δείχνει την υποβάθμιση της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ως συνάρτηση του χρόνου στο εκθετικό μοντέλο.



Διάγραμμα 5 Εκθετική υποβάθμιση της απόδοσης ισχύος μιας φωτοβολταϊκής μονάδας.^[21]

12.2 Μοντέλα με χρήση της θερμοκρασίας για την επιτάχυνση της διαδικασίας υποβάθμισης της απόδοσης.

Έχει λεχθεί κάποιες φορές ότι η υψηλή θερμοκρασία είναι ο «εχθρός» της αξιοπιστίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μία από τις πιο κοινές μεθόδους για την επιτάχυνση ενός μηχανισμού αστοχίας.

12.2.1 Μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της υποβάθμισης της απόδοσης λόγω ακραία υψηλής θερμοκρασίας- σχέση Arrhenius με συντελεστή επιτάχυνσης AF τον χρόνο

Η εξίσωση Arrhenius είναι ένα από τα πιο κοινά μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εξάρτηση της υποτίμησης της απόδοσης από την θερμοκρασία. Στην περίπτωση διαδικασιών που εξαρτώνται από την θερμοκρασία, ο νόμος του Arrhenius (βλ. εξίσωση 6) μπορεί να εφαρμοστεί για να προβλεφθεί η αύξηση στον ρυθμό τους σαν αποτέλεσμα μιας αύξησης της θερμοκρασίας.

$$R(temp) = Ae^{-\frac{E_a}{k*temp}} \quad (6), \quad \text{σχέση Arrhenius}$$

$$\frac{R(temp_1)}{R(temp_2)} = e^{\frac{E_a}{k} * \left(\frac{1}{temp_2} - \frac{1}{temp_1} \right)} = AF_T \quad (7), \quad \begin{array}{l} \text{συντελεστής} \\ \text{επιτάχυνσης} \end{array}$$

όπου η εξίσωση (6) είναι η σχέση μας δίνει τον ρυθμό R της διαδικασίας, A είναι ένας προ-εκθετικός παράγοντας που λέγεται παράγοντας Arrhenius, E_a είναι η προφανής ενέργεια ενεργοποίησης που είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό, k είναι η σταθερά αερίου, R_{temp1}/R_{temp2} είναι ο λόγος των ταχυτήτων για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες και $temp_1$, $temp_2$ είναι οι θερμοκρασίες που παίρνουμε ενδεικτικά. Η εξίσωση (7) μας δίνει τον *συντελεστή επιτάχυνσης της διαδικασίας* AF_T (acceleration factor), (λόγος των σταθερών των ρυθμών).

Για να προκύψουν οι εξισώσεις αυτές είναι αναγκαίο να γίνουν κάποιες υποθέσεις καθώς και προσεγγίσεις, όπως :

- Η σταθερά του ρυθμού R αφορά ένα συγκεκριμένο παράγοντα αλλαγής στην λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Για παράδειγμα, αν η φωτοβολταϊκή κυψέλη υποβαθμίζεται ως προς την απόδοσή της λόγω, επιπλέον, άλλων παραγόντων, όπως είναι ο αποχρωματισμός ή επιπλοκές στις μηχανικές ιδιότητες, τότε οι δύο τελευταίες διαδικασίες υποβάθμισης χαρακτηρίζονται από δικές τους σταθερές ταχύτητας R .

- Η όλη διαδικασία που οφείλεται στην θερμοκρασία (είτε με την παρουσία φωτός είτε χωρίς) και που οδηγεί σε αλλαγή της συμπεριφοράς ακολουθεί την λεγόμενη εξάρτηση Arrhenius.
- Η σταθερά ταχύτητας R μεταβάλλεται γραμμικά με την ακτινοβολία εντός ενός λογικού εύρους ακτινοβολιών. Αυτό μπορεί να μην συμβαίνει σε όλα τα πολυμερή ή σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως συμβαίνει πολλές φορές κατά την διάρκεια της ημέρας όπου η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει μέγιστες τιμές. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εφαρμόζεται ένας νόμος ισχύος σχετικά με την ακτινοβολία.
- Η ενέργεια ενεργοποίησης E_a (με παρουσία ή όχι φωτός) είναι σταθερή κατά το θεωρούμενο εύρος θερμοκρασιών.
- Οι ενέργειες ενεργοποίησης E_a για την περίπτωση έκθεσης στην επίδραση του καιρού ή ακόμη και αλλοίωσης λόγω αυτού με επιταχυνόμενες συνθήκες υποβάθμισης της απόδοσης είναι γνωστές μόνο για κάποια υλικά. Όταν η ενέργεια ενεργοποίησης E_a για κάποιο υλικό δεν είναι διαθέσιμη τότε χρειάζεται να εκτιμηθεί από τις ήδη γνωστές ενέργειες ενεργοποίησης παρόμοιων υλικών ή να καθοριστεί από πειράματα εντός κλειστού δωματίου. ^{[21], [22]}

Η σχέση Arrhenius μπορεί, επίσης, να γραφθεί ως:

$$R(temp) = \gamma_0 * \exp\left(\frac{-E_a}{k*tempK}\right) \quad (8)$$

όπου $R(temp)$ είναι ο ρυθμός της υποβάθμισης, $tempK = temp(^{\circ}C) + 273,15$ είναι η θερμοδυναμική θερμοκρασία σε Kelvin ($^{\circ}K$), k μπορεί να είναι είτε η σταθερά Boltzmann είτε η διεθνής σταθερά αερίου και E_a η ενέργεια ενεργοποίησης. Οι παράμετροι E_a και γ_0 εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του προϊόντος ή του υλικού. Σε εφαρμογές που σχετίζονται με την αξιοπιστία ηλεκτρονικών στοιχείων, χρησιμοποιείται συνήθως η σταθερά Boltzmann $k = 8,6171 * 10^{-5} = 1/11605$ σε μονάδες eV/K και στην περίπτωση αυτή η ενέργεια ενεργοποίησης E_a έχει μονάδες eV.

Επίσης, η σχέση (8), που μας δίνει τον συντελεστή επιτάχυνσης AF , μπορεί να γραφθεί :

$$AF(temp, temp_U, E_a) = \frac{R(temp)}{R(temp_U)} = \exp \left[E_a \left(\frac{11605}{temp_U K} - \frac{11605}{temp K} \right) \right] \quad (9)$$

Όταν $temp > temp_U$ τότε $AF(temp, temp_U, E_a) > 1$.

Η μεταβλητή $temp_U$ είναι η θερμοκρασία χρήσης, η μεταβλητή E_a είναι ίση με, περίπου, την ενέργεια ενεργοποίησης της αντίδρασης και η μεταβλητή $AF(temp, temp_U, E_a)$ δηλώνει τον χρόνο, που είναι ο συντελεστής επιτάχυνσης.

Στις περισσότερες εφαρμογές επιταχυνόμενων δοκιμών, θεωρείται πιο σωστό να γίνεται αναφορά της ενέργειας E_a στην εξίσωση (9) ως ημι-ενέργεια ενεργοποίησης ή, τουλάχιστον, ως η περίπου ενέργεια ενεργοποίησης.^[22]

Το μαθηματικό μοντέλο περιγραφής της υποβάθμισης της απόδοσης λόγω ακραίας θερμοκρασίας που βασίζεται στις εξισώσεις Arrhenius παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς. Πράγματι, οι εξισώσεις Arrhenius μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστεί το μέγεθος επίδρασης μεταβολής της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στην περίπτωση αλλαγής μίας ιδιότητας. Παρόλο αυτά, δεν μπορούν να παρέχουν μια πλήρη εικόνα της μακροπρόθεσμης υποβάθμισης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών μονάδων όταν τυχαίνει να συμπίπτουν και άλλοι παράγοντες υποτίμησης ή συνδυασμός αυτών. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να αναφέρονται στην υγρασία (προξενώντας φυσικές και χημικές διαδικασίες και παράγοντας μηχανική καταπόνηση σε συνδυασμό με την θερμοκρασία), τον θερμοκρασιακό κύκλο (παράγοντας θερμομηχανική καταπόνηση), την παραγωγή ηλεκτρισμού (επιφέροντας ηλεκτρικές και ηλεκτροχημικές καταπονήσεις) και άλλες εξωτερικά εφαρμοζόμενες τάσεις (αέρας, χαλάζι, ρύποι αερομεταφορών, θαλασσινή αύρα, φύσημα άμμου κλπ.).^[21]

12.2.2 Μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της υποβάθμισης της απόδοσης λόγω ακραία υψηλής θερμοκρασίας- σχέση Eyring με συντελεστή επιτάχυνσης AF τον χρόνο

Ο Eyring ^{[101], [102]} προσέφερε μια φυσική θεωρία περιγραφής του φαινομένου της επίδρασης που έχει η θερμοκρασία στον ρυθμό της διαδικασίας αντίδρασης, όπου:

$$R(temp) = \gamma_0 * A(temp) * \exp\left(\frac{-E_a}{k * tempK}\right) \quad (10), \quad \text{σχέση Eyring}$$

όπου $A(temp)$ είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας που εξαρτάται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της αντίδρασης και γ_0 και E_a είναι σταθερές για τις οποίες οι Weston και Schwartz μας δίνουν περισσότερες πληροφορίες ^[54]. Σε εφαρμογές της βιβλιογραφίας χρησιμοποιείται κατά κανόνα $A(temp) = (tempK)^m$ με συγκεκριμένες τιμές του m που κυμαίνονται από $m=0$ ^[47], $m=0,5$ ^[48] έως $m=1$ ^{[49], [46]}. Ο συντελεστής επιτάχυνσης για την σχέση Eyring υπολογίζεται από τον τύπο :

$$AF_{EY}(temp, temp_U, E_a) = \left(\frac{tempK}{temp_U K}\right)^m * AF_{Ar}(temp, temp_U, E_a) \quad (11), \quad \begin{array}{l} \text{συντελεστής} \\ \text{επιτάχυνσης} \end{array}$$

όπου $AF_{Ar}(temp, temp_U, E_a)$ είναι ο συντελεστής επιτάχυνσης Arrhenius από την Εξίσωση (9). Σε ένα πρακτικό εύρος της επιτάχυνσης της διαδικασίας υποβάθμισης λόγω θερμοκρασίας και για πρακτικές τιμές του m όχι πολύ μακριά από το 0, ο παράγοντας έξω από το εκθετικό μέρος έχει μικρή επίδραση στον συντελεστή επιτάχυνσης και ο επιπλέον όρος παραλείπεται δίνοντας την απλή σχέση Arrhenius. ^[22]

12.3 Μαθηματικό μοντέλο με χρήση της υγρασίας ως μεταβλητής για την επιτάχυνση του ρυθμού αντίδρασης

Η υγρασία είναι άλλη μία κοινή μεταβλητή επιτάχυνσης που χρησιμοποιείται. Αν και η επίδρασή της είναι σημαντικότερη σε περιπτώσεις όπου έχουμε υποβάθμιση της

απόδοσης όπως η διάβρωση ή άλλους τύπους χημικής επίδρασης, ωστόσο το φαινόμενο P.I.D επηρεάζεται, επίσης, από αυτήν. ^[42]

Η πυκνότητα του ατμού αναφέρεται στην ποσότητα των ατμών του νερού μέσα σε έναν όγκο αέρα με μονάδες μάζας ανά μονάδα όγκου.

Η μερική πίεση του ατμού (κάποιες φορές αναφέρεται απλά ως “πίεση ατμού”, vapor pressure) είναι στενά συνδεδεμένη και μετρά την ποσότητα της ολικής πίεσης του αέρα που ασκείται από τα μόρια του νερού στον αέρα. Η μερική πίεση ατμού είναι περίπου ανάλογη με την πυκνότητα των ατμών.

Ακόμη, η μερική πίεση του ατμού στην οποία τα μόρια εξατμίζονται και συμπιέζονται από την επιφάνεια του νερού με τον ίδιο ρυθμό λέγεται πίεση ατμών κορεσμού (vapor saturation pressure) . ^[22]

Η σχετική υγρασία, συνήθως, ορίζεται και εκφράζεται κοινώς σε μορφή ποσοστού. Για τους περισσότερους μηχανισμούς αστοχίας, η φυσική και χημική θεωρία υπονοούν ότι η RH (relative humidity) είναι η κατάλληλη κλίμακα στην οποία συνδέεται ο ρυθμός της αντίδρασης με την υγρασία, ειδικά αν η θερμοκρασία χρησιμοποιείται, επίσης, ως μεταβλητή επιτάχυνσης ^{[22], [48]}.

Μία ποικιλία από διαφορετικά μοντέλα που έχουν σχέση με την υγρασία (τα περισσότερα είναι εμπειρικά αλλά πολλά βασίζονται στην φυσική) έχουν προταθεί για διάφορα είδη μηχανισμών αστοχίας.

$$RH = \frac{\text{Vapor Pressure}}{\text{Saturation Vapor Pressure}} \quad (12)$$

Τα περισσότερα μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί με την υγρασία ως μεταβλητή επιτάχυνσης στα πειράματα επιτάχυνσης της διαδικασίας υποβάθμισης, χρησιμοποιούν την υγρασία σε συνδυασμό με την θερμοκρασία ως δεύτερη μεταβλητή. Για παράδειγμα ο επιστήμονας Peck ^[55] παρουσίασε δεδομένα και μοντέλα συσχετίζοντας την ζωή ημιαγωγικών ηλεκτρονικών στοιχείων με την υγρασία και την θερμοκρασία.

Στις περισσότερες εφαρμογές όπου η υγρασία χρησιμοποιείται ως μεταβλητή επιτάχυνσης, έχει διαπιστωθεί ότι η υψηλή υγρασία αυξάνει τους ρυθμούς υποβάθμισης της απόδοσης και οδηγεί νωρίτερα σε λειτουργικές βλάβες.

12.4 Μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της υποβάθμισης της απόδοσης λόγω ακραία υψηλής τάσης- Αντίστροφη Σχέση Ισχύος

Όπως αναφέραμε στον τίτλο της ενότητας αυτής, η αντίστροφη σχέση ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το φαινόμενο της υποβάθμισης της απόδοσης οφείλεται στην εφαρμογή υψηλής τάσης ή υψηλής πίεσης. Η υψηλή τάση ή η υψηλή πίεση έχει επίδραση στην διάρκεια ζωής του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Για το μοντέλο που θα περιγράψουμε, όπου η υποβάθμιση της απόδοσης οφείλεται στην υψηλή τάση, θεωρούμε ως $volt$ την τάση και ως $volt_U$ την τάση στις συνθήκες χρήσης. Η διάρκεια ζωής στο ακραίο επίπεδο τάσης δίνεται από την σχέση

$$T(volt) = \frac{T(volt_U)}{AF(volt)} = \left(\frac{volt}{volt_U} \right)^{\beta_1} * T(volt_U) \quad (13)$$

όπου το β_1 έχει, γενικά, αρνητική τιμή.

Ο συντελεστής επιτάχυνσης AF (acceleration factor) υπολογίζεται από τον τύπο :

$$AF(volt) = AF(volt, volt_U, \beta_1) = \frac{T(volt_U)}{T(volt)} = \left(\frac{volt}{volt_U} \right)^{-\beta_1} \quad (14)$$

Αν η $T(volt_U)$ έχει λογαριθμική κατανομή με παραμέτρους μ_U και σ , τότε η $T(volt)$ έχει, επίσης, λογαριθμική κατανομή με

$\mu = \beta_1 + \beta_{1x}$, όπου $x_U = \log(volt_U)$, $x = \log(volt)$, $\beta_0 = \mu_U - \beta_{1xU}$ και σ ανεξάρτητο του x .

Η αντίστροφη σχέση ισχύος χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της ζωής ως συνάρτησης μιας μεταβλητής επιτάχυνσης που έχει την έννοια της πίεσης (μηχανική πίεση, πίεση αέρα, ακραία υψηλή τάση).

Η σχέση αυτή θεωρείται ως ένα εμπειρικό μοντέλο καθώς δεν έχει κάποια επίσημη βάση σε γνώσεις φυσικής και χημείας από μοντέλα των τρόπων αστοχίας. Χρησιμοποιείται, όμως, ευρέως για τον λόγο ότι οι μηχανικοί έχουν βρει, με την πάροδο του χρόνου, πως συχνά παρέχει σημαντική περιγραφή για ορισμένα είδη δεδομένων που παίρνουμε από τις δοκιμές επιτάχυνσης (AT).

Αναλυτικά, υποθέτοντας ότι η υποβαθμιζόμενη διηλεκτρική δύναμη σε χρόνο t μπορεί να εκφραστεί ως :

$$D(t) = \delta_0 * t^{1/\beta_1} \quad (15)$$

και

$$T(volt) = \left(\frac{volt}{\delta_0} \right)^{\beta_1} \quad (16)$$

τότε ο συντελεστής επιτάχυνσης AF (acceleration factor) της τάσης $volt$ σε σχέση με την $volt_U$ είναι :

$$AF(volt) = AF(volt, volt_U, \beta_1) = \frac{T(volt_U)}{T(volt)} = \left(\frac{volt}{volt_U} \right)^{-\beta_1} \quad (17)$$

που είναι μια αντίστροφη σχέση ισχύος, όπως στην Σχέση (14).

Για να επεκτείνουμε το μοντέλο, γίνεται η υπόθεση ότι η υψηλότερη τάση οδηγεί σε μία αύξηση του ρυθμού υποβάθμισης και ότι αυτή η αύξηση περιγράφεται από το μοντέλο υποτίμησης:

$$D(t) = \delta_0 * [R(volt) * t]^{1/\gamma_1} \quad (18)$$

$$\text{όπου } R(volt) = \gamma_0 * \exp[\gamma_2 * \log(volt)] .$$

Εξισώνοντας το $D(t)$ με την τάση (δηλαδή την μεταβλητή $volt$) και λύνοντας ως προς τον χρόνο αστοχίας t παίρνουμε :

$$T(volt) = \frac{1}{R(volt)} * \left(\frac{volt}{\delta_0} \right)^{\gamma_1} \quad (19)$$

Τότε ο λόγος των χρόνων αστοχίας για $volt_U$ ως προς $volt$ μας δίνει τον συντελεστή επιτάχυνσης (AF , acceleration factor):

$$AF(volt) = AF(volt, volt_U, \beta_1) = \frac{T(volt_U)}{T(volt)} = \left(\frac{volt}{volt_U} \right)^{\gamma_2 - \gamma_1} \quad (20)$$

η οποία είναι ξανά μια αντίστροφη σχέση ισχύος με $\beta_1 = \gamma_1 - \gamma_2$.^[22]

12.5 Μοντέλα επίσπευσης της διαδικασίας υποβάθμισης της απόδοσης με παραπάνω από μία μεταβλητές επιτάχυνσης

12.5.1 Γενικευμένη σχέση Eyring

Η γενικευμένη σχέση Eyring επεκτείνει την σχέση Eyring της ενότητας 12.2.2 , λαμβάνοντας ακόμη μία ή περισσότερες μη θερμικές μεταβλητές (όπως είναι η υγρασία ή η τάση). Για μία επιπρόσθετη μη θερμική μεταβλητή επιτάχυνσης X , το μοντέλο σε μορφή ρυθμού της αντίδρασης, μπορεί να γραφθεί :

$$R(temp, X) = \gamma_0 * (tempK)^m * \exp\left(\frac{-\gamma_1}{k * tempK}\right) * \exp\left(\gamma_2 * X + \gamma_3 * Xk * tempK\right) \quad (21)$$

όπου X είναι μια συνάρτηση μη θερμικής «καταπόνησης». Οι παράμετροι $\gamma_1 = E_a$ (ενέργεια ενεργοποίησης) και $\gamma_0, \gamma_2, \gamma_3$ είναι χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης φυσικής/χημικής διαδικασίας. Οι επιπρόσθετοι παράγοντες, όπως αυτός δεξιά στην ισότητα (21), μπορούν να προστεθούν για άλλες μη θερμικές μεταβλητές επιτάχυνσης της διαδικασίας.

Στις επόμενες ενότητες, ακολουθώντας την κοινή πρακτική, θέτουμε $(tempK)^m = 1$, χρησιμοποιώντας ό,τι είναι απαραίτητο για την σχέση Arrhenius που έχει ως μεταβλητή επιτάχυνσης της διαδικασίας την θερμοκρασία.

Αυτές οι ενότητες περιγράφουν κάποιες σημαντικές εφαρμογές αυτού του γενικότερου μοντέλου. Αν το βασικό μοντέλο που έχει σχέση με την διαδικασία υποβάθμισης της απόδοσης είναι ένα μοντέλο μορφής SAFT (Statistical Associating Fluid Theory)^{[56], [57]} , τότε ο γενικευμένος τύπος Eyring μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την σχέση μεταξύ χρόνων που έχουν διαφορετικές συνθήκες

θερμοκρασίας και X . Συγκεκριμένα, ο συντελεστής επιτάχυνσης που είναι σχετικός με τις χρησιμοποιούμενες συνθήκες $temp_U$ και X_U είναι :

$$A(temp, X) = \frac{R(temp, X)}{R(temp_U, X_U)} \quad (22)$$

Ας υποθέσουμε ότι ο όρος $T(temp_U)$ (ο χρόνος που επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε ή κάποιος άλλος χρόνος που παίρνουμε ως σημείο αναφοράς) έχει μια λογαριθμική κατανομή με παραμέτρους μ_U και σ . Τότε ο χρόνος $T(temp)$ έχει την ίδια λογαριθμική κατανομή^[22] με

$$\mu = \mu_U - \log[AF(temp, X)] = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_2 * x_1 * x_2 \quad (23)$$

$$\text{όπου } \beta_1 = E_a, \beta_2 = -\gamma_2, \beta_3 = -\gamma_3, x_1 = 11605/tempK, x_2 = X \text{ και} \\ \beta_0 = \mu_U - \beta_1 * x_{1U} - \beta_2 * x_{2U} - \beta_3 * x_{1U} * x_{2U} \quad (24)$$

12.5.2. Μοντέλα με μεταβλητές επιτάχυνσης της διαδικασίας υποβάθμισης της απόδοσης την θερμοκρασία και το δυναμικό

Κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά διαφορετικά μοντέλα για την περιγραφή της περίπτωσης όπου η θερμοκρασία και το δυναμικό αποτελούν τις δύο μεταβλητές επιτάχυνσης της διαδικασίας. Για παράδειγμα, οι επιστήμονες Meeker και Escobar^[58] ανέλυσαν τα δεδομένα από μία μελέτη στην οποία η τάση και η θερμοκρασία είχαν σχέση με την αστοχία των υάλινων πυκνωτών. Μοντελοποίησαν την παράμετρο της θέσης του λογαρίθμου της διάρκειας ζωής ως μια απλή γραμμική συνάρτηση των $temp^{\circ}C$ και $volt$. Επίσης, η γενικευμένη σχέση Eyring μπορεί να χρησιμοποιηθεί θέτοντας ως $X = \log(volt)$, όπως έκαναν οι επιστήμονες Boyko και Gerlach^[59]. Ο Klinger^[48] μοντελοποίησε τα δεδομένα των Boyko και Gerlach συμπεριλαμβάνοντας και δευτερεύοντες όρους και για τις δύο μεταβλητές επιτάχυνσης. Προκειμένου να εξάγουμε τον παράγοντα επιτάχυνσης χρόνο για την διευρυμένη Arrhenius σχέση με $temp$ και $volt$,

μπορεί κάποιος να ακολουθήσει ανάλογα βήματα με αυτά που περιγράφηκαν στην Ενότητα 12.4 . Χρησιμοποιώντας την Ισότητα (21) με $X=\log(volt)$ προκύπτει:

$$R(temp, volt) = \gamma_0 * \exp\left(\frac{-E_\alpha}{k*tempK}\right) * \exp\left[\gamma_2 * \log(volt) + \gamma_3 * \log(volt) * tempK\right] \quad (25)$$

Η χρονική στιγμή αστοχίας βρίσκεται ξανά όταν $D(t)=volt$. Άρα :

$$T(temp, volt) = \frac{1}{R(temp, volt)} * \left(\frac{volt}{\delta_0}\right)^{\gamma_1} \quad (26)$$

Από την σχέση αυτήν υπολογίζεται ο συντελεστής επιτάχυνσης της διαδικασίας AF :

$$AF(temp, volt) = \frac{T(temp_U, volt_U)}{T(temp, volt)} = \exp[E_\alpha * (x_{1U} - x_1)] * \left(\frac{volt}{volt_U}\right)^{\gamma_2 - \gamma_1} * \{ \exp[x_1 \log(volt) - x_{1U} \log(volt_U)] \}^{\gamma_3} \quad (27)$$

όπου $x_{1U}=11605/(temp_U K)$ και $x_1=11605/(temp K)$. Όταν $\gamma_3=0$ τότε δεν υπάρχει κάποια αλληλεπίδραση μεταξύ θερμοκρασίας και τάσης. Σε αυτήν την περίπτωση, ο συντελεστής επιτάχυνσης της διαδικασίας $AF(temp, volt)$ μπορεί να γραφθεί ως συνδυασμός δύο όρων, ενός όρου που περιέχει μόνο την θερμοκρασία και ενός άλλου που περιέχει μόνο την τάση. Επομένως, όταν δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση, η συνεισφορά της θερμοκρασίας (αντίστοιχα της τάσης) στην επιτάχυνση της διαδικασίας είναι η ίδια σε όλα τα επίπεδα της τάσης (αντίστοιχα της θερμοκρασίας) ^[22].

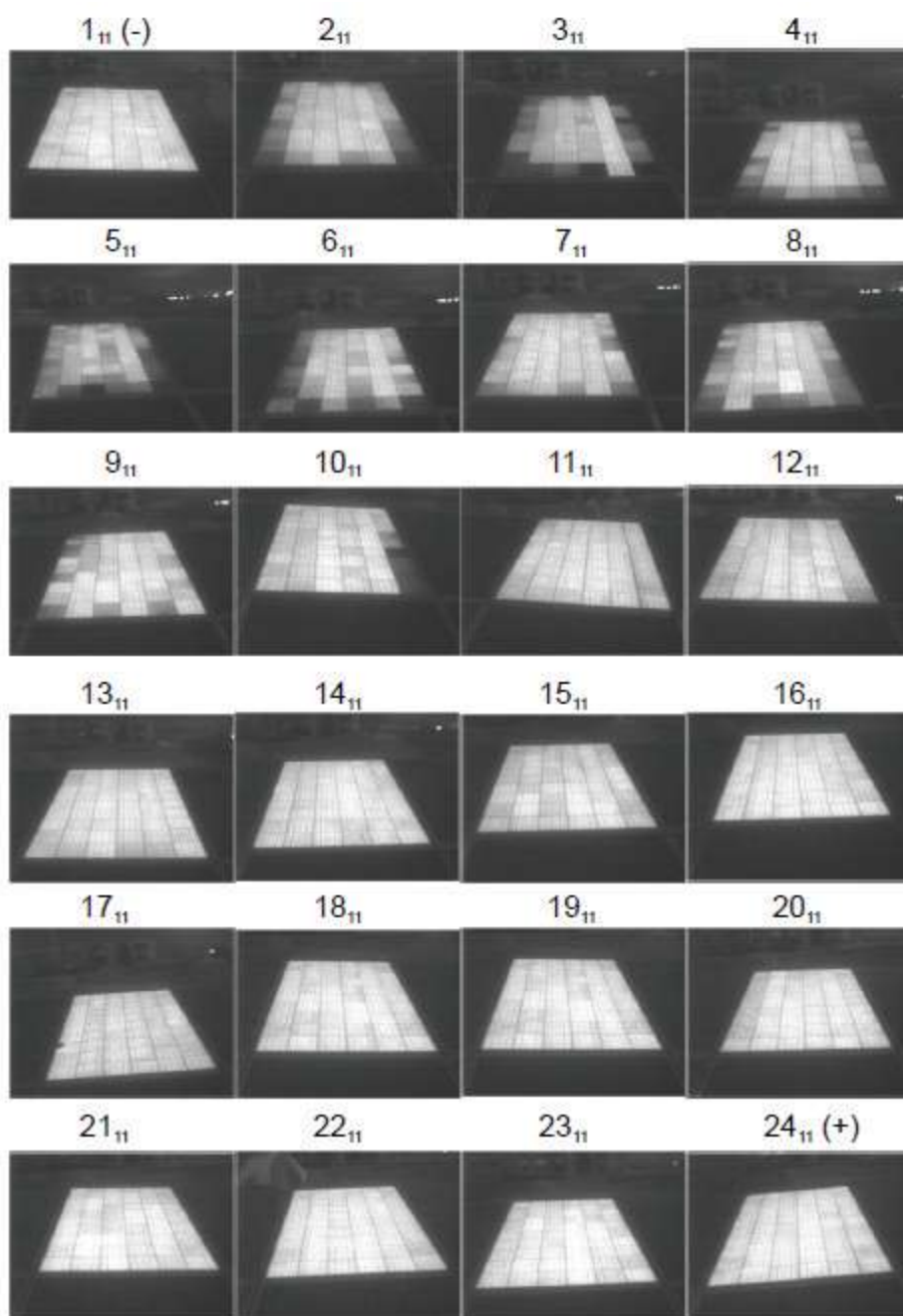
13. Επιτόπια ανίχνευση του φαινομένου P.I.D. σε εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πλαίσια

Υπάρχουν τέσσερις απλοί τρόποι ανίχνευσης του φαινομένου P.I.D. σε φωτοβολταϊκές μονάδες που είναι ήδη εγκατεστημένες και λειτουργούν. Οι τρόποι αυτοί είναι :

- **Μελέτη εικόνας ηλεκτροφωτοεκπομπής ή ηλεκτροφωταύγειας (EL, electroluminescence)**

Ένας αργός αλλά λεπτομερής τρόπος για να ανακαλυφθεί εάν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο παρουσιάζει επίδραση του φαινομένου P.I.D. είναι η λήψη μιας εικόνας ηλεκτροφωτοεκπομπής του πλαισίου. Η λήψη της εικόνας γίνεται με μια CCD κάμερα -μια αρκετά ακριβή συσκευή- ενόσω η φωτοβολταϊκή μονάδα διαρρέεται από ρεύμα και, επιπλέον, ελλείπει ηλιακού φωτός.

Στην εικόνα ηλεκτροφωτοεκπομπής μίας φωτοβολταϊκής μονάδας που δεν έχει επηρεαστεί από το φαινόμενο P.I.D. όλες οι φωτοβολταϊκές κυψέλες έχουν περίπου την ίδια φωτεινότητα, ενώ μία μονάδα η οποία έχει υποστεί την επίδραση του φαινομένου αυτού εμφανίζει σκιερές κυψέλες. Η Εικόνα 50 δείχνει τις φωτογραφίες ηλεκτροφωτοεκπομπής μιας αλυσίδας εικοσιτεσσάρων πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά που έχουν υποστεί βλάβη λόγω του φαινομένου P.I.D..



Εικόνα 50 Εδώ μπορούμε να δούμε τις φωτογραφίες ηλεκτροφωτοεκπομπής μιας αλυσίδας 24 φωτοβολταϊκών μονάδων συνδεδεμένων σε σειρά των οποίων η λειτουργία έχει επηρεαστεί από το φαινόμενο P.I.D. : οι φωτοβολταϊκές μονάδες που βρίσκονται πιο κοντά στον αρνητικό πόλο (μονάδα 1) περιέχουν κυψέλες κάποιες από τις οποίες έχουν σκούρο χρώμα (απόδειξη ύπαρξης του φαινομένου P.I.D.) ; οι φωτοβολταϊκές μονάδες που βρίσκονται πιο κοντά στον θετικό πόλο (μονάδα 24) έχουν όλες τις κυψέλες σχεδόν στην ίδια φωτεινότητα (μακριά από την επίδραση του φαινομένου P.I.D.) . Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο νο1 δεν έχει σκιασμένες κυψέλες καθώς το αρχικό αντικαταστάθηκε λόγω της μεγάλης βλάβης που υπέστη από το φαινόμενο P.I.D. .^[60]

Μια εικόνα ηλεκτροφωτοεκπομπής μπορεί να αποκαλύψει εάν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει υποστεί επίδραση του φαινομένου P.I.D. , αλλά δεν μπορεί να δηλώσει περισσότερα για τον τρόπο με τον οποίο η υποβάθμιση αυτή επηρεάζει την απόδοση του πλαισίου. ^[60]

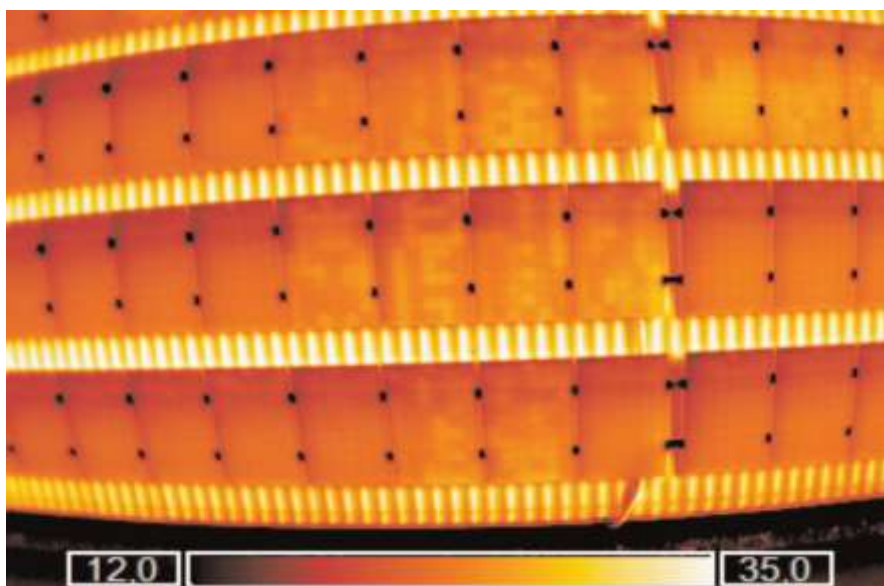
- **Μελέτη θερμογραφικής εικόνας**

Όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μιας εγκατάστασης δεν είναι εύκολο να προσεγγισθούν, τότε ως λύση ενδείκνυται η χρήση της μεθόδου της θερμικής ανάλυσης (thermography imaging). ^{[61],[73]} Η μέθοδος αυτή θεωρείται ένας γρήγορος και αξιόπιστος τρόπος για την ανίχνευση των φωτοβολταϊκών μονάδων που έχουν επηρεαστεί από το φαινόμενο P.I.D. . Ο έλεγχος διεξάγεται ενόσω το φωτοβολταϊκό σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία ^[61], έτσι δεν παρεμβαίνουμε σε αυτήν ^[60]. Για την διεξαγωγή της διαδικασίας χρησιμοποιείται ένα τηλεκατευθυνόμενο multicopter (κοινώς γνωστό ως drone) , το οποίο είναι εφοδιασμένο με κάμερα υπερύθρων (IR). Η χρήση ενός εφοδιασμένου με θερμογραφική κάμερα multicopter παρέχει την δυνατότητα διερεύνησης μιας ολόκληρης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης χωρίς την απαίτηση πολλού χρόνου και κόπου.

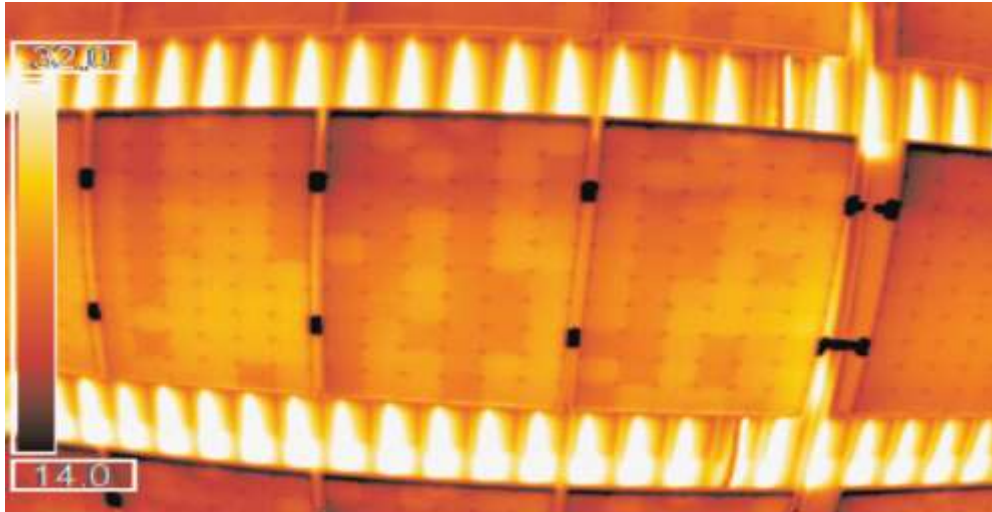
Η ανίχνευση των φωτοβολταϊκών μονάδων που έχουν υποστεί υποτίμηση της απόδοσής τους εξαιτίας του φαινομένου P.I.D. γίνεται μέσω της παρατήρησης των εικόνων που λαμβάνονται από την κάμερα υπερύθρων. ^[61] Για την πραγματοποίηση της μελέτης απαιτείται ηλιοφάνεια ώστε να φανούν με σαφήνεια οι διαφορές στην θερμοκρασία ανάμεσα στα φωτοβολταϊκά πλαίσια που βρίσκονται υπό την επίδραση του φαινομένου P.I.D. και τα υγιή. ^[60] Συνήθως, σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων που έχουν επηρεαστεί από το φαινόμενο P.I.D. φαίνεται ακόμη μικρότερη. ^[61] Ίσως, για τον λόγο αυτό, ο θερμογραφικός έλεγχος δεν αποκαλύπτει πάντα το πρόβλημα της υποτίμησης λόγω του P.I.D. . ^[60]

Στην Εικόνα 51 φαίνονται τρεις σειρές φωτοβολταϊκών μονάδων που ανήκουν σε διαφορετικές αλυσίδες φωτοβολταϊκών πλαισίων. Πολλές μονάδες περιέχουν φωτοβολταϊκές κυψέλες σε υψηλή θερμοκρασία και

αναγνωρίζονται από το φωτεινό τους χρώμα, καθώς από το κίτρινο προσεγγίζουν το λευκό χρώμα. Η πιο κοντινή Εικόνα 52 κάνει πιο ορατή την διαπίστωση αυτή. Επιπλέον, φανερώνει μια θερμοκρασιακή διαφορά της τάξης των 2-3K ανάμεσα στα κανονικά φωτοβολταϊκά στοιχεία και αυτά που έχουν υποστεί βλάβη λόγω του φαινομένου P.I.D. . Στην περίπτωση των τελευταίων στοιχείων που αναφέραμε μία μικρότερη ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια που κατευθύνεται στο δίκτυο. Σαν αποτέλεσμα αυτού τα φωτοβολταϊκά αυτά στοιχεία παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμοκρασία από ότι αυτά που λειτουργούν κανονικά. Έτσι εξηγείται, λοιπόν, η διαφορετική τους φωτεινότητα στην θερμογραφική εικόνα. ^[61]



Εικόνα 51 Θερμογραφική εικόνα στην οποία φαίνονται τρεις σειρές μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών μονάδων που βρίσκονται σε οροφή κτιρίου, σε θερμοκρασιακή κλίμακα °C. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που έχουν προσβληθεί από το φαινόμενο P.I.D. περιέχουν κυψέλες που βρίσκονται σε υψηλότερη θερμοκρασία από εκείνες που λειτουργούν κανονικά. Σύμφωνα με την φωτεινή αντιστοιχία της θερμοκρασιακής κλίμακας, που φαίνεται χαμηλά στην εικόνα, οι φωτοβολταϊκές κυψέλες των οποίων η λειτουργία έχει επηρεαστεί από το φαινόμενο P.I.D. παρουσιάζονται φωτεινότερες. ^[61]

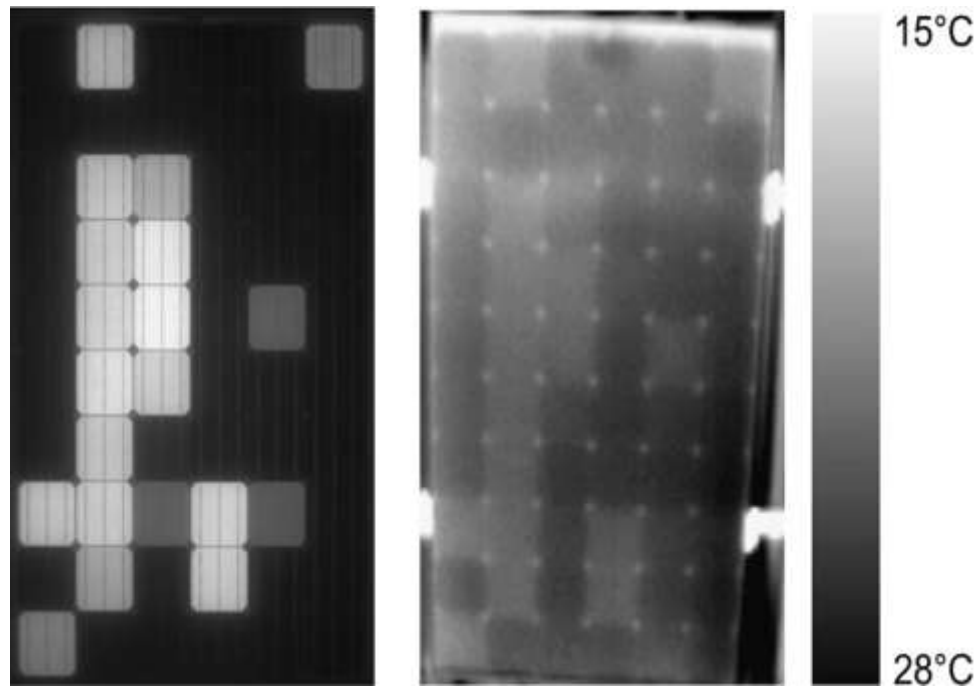


***Εικόνα 52** Θερμογραφική εικόνα, που έχει ληφθεί από κοντά, τριών φωτοβολταϊκών μονάδων που έχουν προσβληθεί από το φαινόμενο P.I.D.. Οι θερμοκρασιακές διαφορές κυμαίνονται από 2-3 K σε βαθμό ακτινοβολίας περίπου 600W/m^2 . ^[61]*

Σύγκριση της θερμικής εικόνας μιας φωτοβολταϊκής μονάδας με την αντίστοιχη εικόνα ηλεκτροφωτοεκπομπής της

Σε μια εικόνα ηλεκτροφωτοεκπομπής οι φωτοβολταϊκές κυψέλες των οποίων η λειτουργία έχει υποβαθμιστεί από το φαινόμενο P.I.D. φαίνονται σκιερές, ενώ οι φωτοβολταϊκές κυψέλες που λειτουργούν κανονικά παρουσιάζονται φωτεινότερες, εξαιτίας του μεγαλύτερου ρυθμού επανασύνδεσης φορτίων που μετακινούνται από την ζώνη αγωγιμότητας στην ζώνη ισορροπίας (band to band recombination). Ανάλογα την ευαισθησία που έχει κάθε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μιας μονάδας απέναντι στο φαινόμενο P.I.D. , η εικόνα ηλεκτροφωτοεκπομπής αποδίδει ένα συγκεκριμένο σχέδιο υποβάθμισης (degradation pattern). Στην Εικόνα 53 μπορούμε να δούμε την απεικόνιση ηλεκτροφωτοεκπομπής της τρίτης από αριστερά φωτοβολταϊκής μονάδας που βρίσκεται στη σειρά της Εικόνας 52. (Για τις ανάγκες μελέτης του σταδίου αυτού οι επιστήμονες μετέφεραν το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο από την στέγη στο έδαφος). Η θερμογραφική εικόνα (βλ. Εικόνα 53 δεξιά) παρουσιάζεται με ανεστραμμένη την φωτεινότητά της σε σχέση με τις Εικόνες 51 και 52. Κατόπιν τούτου, στην θερμογραφική απεικόνιση της Εικόνας 52 οι πιο φωτεινές κυψέλες έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία από ότι οι σκοτεινές

κυψέλες. Από μια πρώτη οπτική σύγκριση, μπορούμε να πούμε ότι υπάρχει μια ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στις δύο απεικονίσεις της Εικόνας 51 που φαίνεται να παρουσιάζουν ένα παρόμοιο σχέδιο υποβάθμισης.^[61]



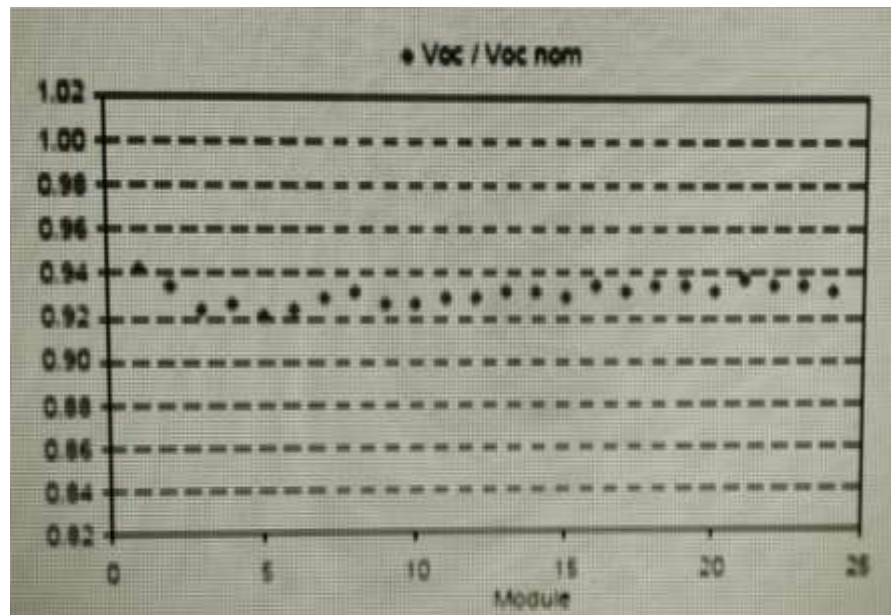
Εικόνα 53 Αριστερά μπορούμε να δούμε την εικόνα υπό την μέθοδο ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence, EL) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου το οποίο έχει επηρεαστεί από το φαινόμενο P.I.D., ενώ αριστερά φαίνεται η θερμογραφική εικόνα του ίδιου πλαισίου. Το φωτοβολταϊκό σύστημα στο οποίο ανήκει η φωτοβολταϊκή μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία την ώρα λήψης της εικόνας.^[61]

- **Μέτρηση της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc}**

Καθώς η μέτρηση της παράλληλης αντίστασης R_{sh} (shunt resistance), του μέγιστου σημείου της απόδοσης ισχύος MMP (Module's Maximum Power) και της υπέρυθρης απεικόνισης IR (Infrared imaging) απαιτούν ακριβή εξοπλισμό, ο πιο εύκολος τρόπος για να ανιχνεύσουμε το φαινόμενο P.I.D. σε μια φωτοβολταϊκή μονάδα είναι να χρησιμοποιήσουμε

ένα απλό βολτόμετρο για την μέτρηση της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} της μονάδας. Όταν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει προσβληθεί από το φαινόμενο P.I.D. τότε η τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} είναι μικρότερη από αυτή ενός απρόσβλητου πλαισίου. Αυτό οφείλεται στο ότι η μείωση της παράλληλης αντίστασης R_{sh} μπορεί να μειώσει την τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} . Όμως, η μείωση της αντίστασης παρατηρείται μόνο όταν το φαινόμενο P.I.D. είναι έντονο. ^[29] Συνήθως, το φαινόμενο P.I.D. επηρεάζει μόνο το ένα τέρμα μιας σειράς φωτοβολταϊκών μονάδων – το θετικό άκρο για μια σειρά πλαισίων με κυψέλες νοθευμένες με ηλεκτρόνια και το αρνητικό άκρο για μια σειρά πλαισίων με κυψέλες νοθευμένες με οπές. Με τον τρόπο αυτό, αν υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} για κάθε μονάδα μιας σειράς, σύγκρισης με την τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} των μονάδων που βρίσκονται στο άλλο άκρο της διάταξης και διαπιστωθεί ότι αυτή συνεχίζει να μειώνεται καθώς πλησιάζει το τέλος της αλυσίδας, τότε πιθανότατα να είναι περίπτωση προσβολής από το φαινόμενο P.I.D. . ^[73]

Το Διάγραμμα 6 δείχνει την κανονικοποιημένη τάση ανοιχτοκυκλώσεως στα εικοσιτέσσερα πλαίσια που αναφέραμε προηγουμένως (βλ. Εικόνα 50) , δηλαδή την τάση V_{oc} της φωτοβολταϊκής μονάδας διαιρεμένη με την ονομαστική τάση ανοιχτού κυκλώματος $V_{oc_{nom}}$, όπως αναφέρεται στο φύλλο δεδομένων ασφαλείας της μονάδας. Όπως μπορούμε να δούμε, η διαφορά ανάμεσα στην τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} των διαφορετικών μονάδων είναι μικρή. Στην συγκεκριμένη, λοιπόν, περίπτωση η τάση ανοιχτοκυκλώσεως δεν μας αποκαλύπτει αν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει υποστεί επίδραση από το φαινόμενο P.I.D. γιατί κανένα δεν έχει επηρεαστεί δραστικά. Σημειωτέον ότι οι μετρήσεις αυτές πρέπει να ληφθούν σε ημέρα με ηλιοφάνεια και σε σύντομο χρονικό διάστημα προκειμένου να υπάρχει η βεβαιότητα πως όλες οι μετρήσεις έλαβαν τόπο υπό συνθήκες ίδιας ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας των κυψελών, έτσι ώστε η σύγκριση ανάμεσα στις διαφορετικά φωτοβολταϊκά πλαίσια να γίνει με όσο το δυνατόν μικρότερη αβεβαιότητα. ^[60]

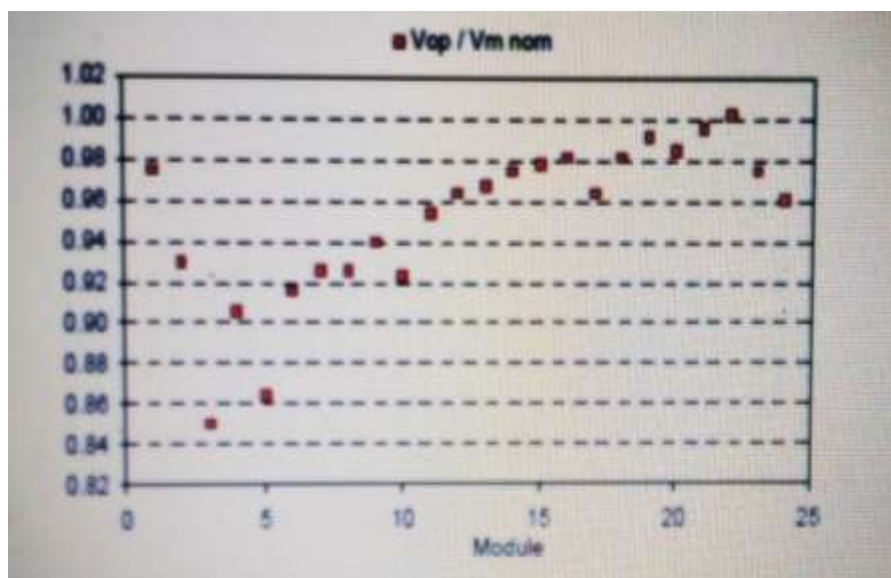


Διάγραμμα 6 Οι κανονικοποιημένες τάσεις ανοιχτοκυκλώσεως των εικοσιτεσσάρων φωτοβολταϊκών μονάδων της Εικ.50 που είναι συνδεδεμένες σε σειρά σε διάταξη επηρεασμένη από το φαινόμενο P.I.D. .^[60]

- **Τάση λειτουργίας V_{op}**

Η τάση κάθε μίας φωτοβολταϊκής μονάδας κατά την διάρκεια λειτουργίας της μπορεί να μετρηθεί, επίσης, γρήγορα με ένα βολτόμετρο. Η τιμή της μας δίνει πολλές περισσότερες πληροφορίες από ότι η τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} , όπως μπορούμε να δούμε στο Διάγραμμα 7. Το διάγραμμα που φαίνεται στην εικόνα αναπαριστά την κανονικοποιημένη τάση λειτουργίας των προαναφερθέντων εικοσιτεσσάρων πλαισίων μιας αλυσίδας που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, δηλαδή, την τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής μονάδας, V_{op} , διαιρεμένη με την ονομαστική τάση του μέγιστου σημείου ισχύος (maximum power point), $V_{m\ nom}$, που δίνεται στο φύλλο δεδομένων ασφαλείας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες που έχουν επηρεαστεί περισσότερο από το φαινόμενο P.I.D. έχουν μικρότερη τάση λειτουργίας από τις μονάδες που είναι «υγιείς». Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα πλαίσια που έχουν προσβληθεί από το φαινόμενο P.I.D. έχουν μεγαλύτερα ρεύματα διαφυγής και, συνεπώς, για να μεταφέρουν το ίδιο ρεύμα με τα υπόλοιπα «υγιή» πλαίσια της αλυσίδας θα πρέπει να λειτουργούν σε μικρότερη τάση.

Μάλιστα, η μείωση αυτή της τάσης λειτουργίας είναι αναλογική των απωλειών λόγω του φαινομένου P.I.D. .



Διάγραμμα 7 Κανονικοποιημένες τάσεις λειτουργίας των εικοσιτεσσάρων φωτοβολταϊκών μονάδων της Εικ. 50 που είναι συνδεδεμένα σε σειρά σε διάταξη η οποία έχει υποστεί βλάβη λόγω του φαινομένου P.I.D..^[60]

Ο πιο εύκολος τρόπος για να μετρηθεί η τάση λειτουργίας V_{op} είναι να ανοιχτεί το κουτί σύνδεσης για να υπάρξει πρόσβαση στον θετικό και αρνητικό πόλο της φωτοβολταϊκής μονάδας (άλλωστε, το πλαίσιο θα μπορεί να συνεχίζει την λειτουργία του). Παρόλο αυτά, είναι όλο και πιο σύνηθες οι φωτοβολταϊκές μονάδες να έχουν μια ετικέτα σφραγίσματος στο κουτί σύνδεσης η οποία παρέχει εγγύηση (βλ. Εικόνα 54). Αν η ετικέτα σκιστεί, τότε χάνεται η εγγύηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Για τον λόγο αυτόν, μια εναλλακτική είναι να φτιαχτούν συνδέσεις “T” στους πόλους των πλαισίων που είναι ύποπτα βλάβης και στους πόλους ενός «υγιούς» πλαισίου ώστε να συγκριθούν οι τιμές της τάσης λειτουργίας τους, V_{op} (βλ. Εικόνα 55).



Εικόνα 54 Ετικέτα εγγύησης που σφραγίζει το κουτί συνδέσεων ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. ^[60]

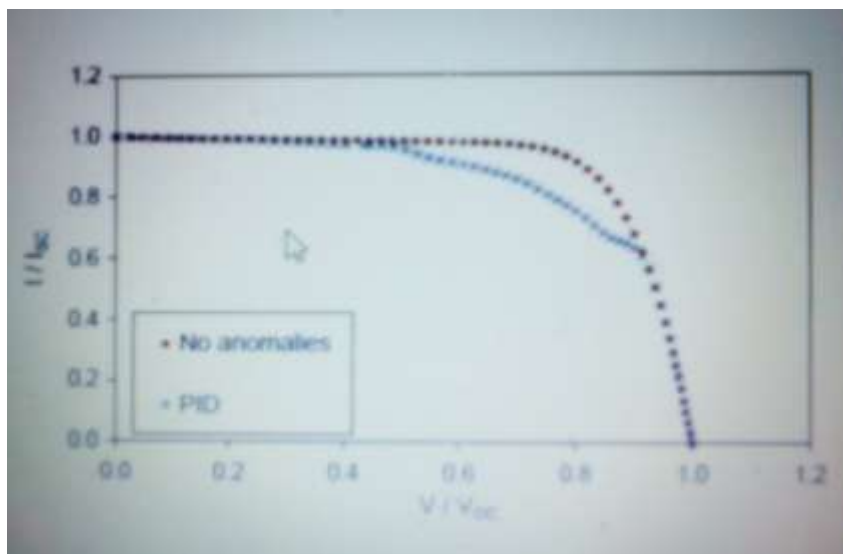


Εικόνα 55 Στην εικόνα αυτή φαίνονται οι “T” συνδέσεις στους πόλους δύο φωτοβολταϊκών πλαισίων προκειμένου να μετρηθεί η τάση λειτουργίας V_{op} τους χωρίς να ανοιχθεί το κουτί σύνδεσης. ^[60]

Όπως και στον προηγούμενο τρόπο μέτρησης της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} , η μέτρηση της τάσης λειτουργίας V_{op} πρέπει να πραγματοποιηθεί ημέρα που έχει ηλιοφάνεια και σε σύντομο χρονικό διάστημα προκειμένου να υπάρχει η βεβαιότητα ότι όλες οι μετρήσεις έγιναν υπό συνθήκες ίδιας ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών κυψελών. Δεδομένων αυτών, μπορεί να γίνει η σύγκριση της τιμής λειτουργίας V_{op} των διαφόρων πλαισίων με όσο το δυνατόν μικρότερη πιθανότητα σφάλματος. [60]

- **Αναπαράσταση της χαρακτηριστικής I-V**

Ένας τυπικός τρόπος διαπίστωσης αν κάποια φωτοβολταϊκή μονάδα έχει υποστεί βλάβη λόγω του φαινομένου P.I.D. ή όχι είναι να μετρηθεί η χαρακτηριστική IV με την χρήση μιας συσκευής φωτοηλεκτρονικής σκιαγράφησης. Από την μορφή της καμπύλης μπορεί κάποιος να ανιχνεύσει εύκολα την παρουσία του φαινομένου P.I.D. . Στην περίπτωση επίδρασης του φαινομένου P.I.D. το P_{max} είναι πιο μικρό από ότι στην κανονική λειτουργία, όπου η χαρακτηριστική IV, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 8, είναι πιο τετραγωνική. [29]



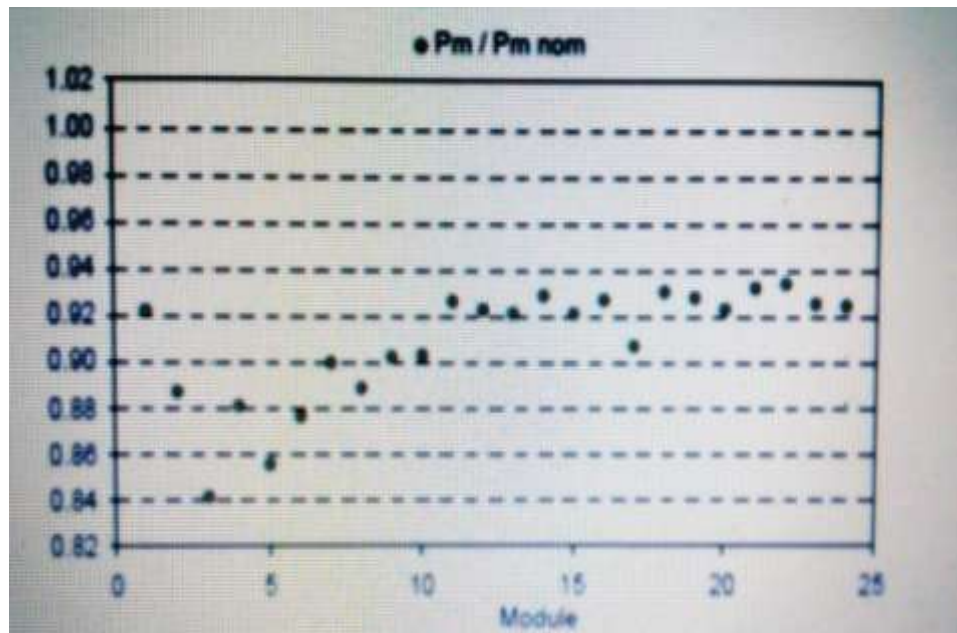
Διάγραμμα 8 Στο άνω διάγραμμα είναι σχεδιασμένες οι χαρακτηριστικές I-V δύο φωτοβολταϊκών μονάδων. Η χαρακτηριστική με το κόκκινο χρώμα ανήκει σε

μια απλή φωτοβολταϊκή μονάδα, ενώ η μπλε σε μια φωτοβολταϊκή μονάδα υπό την επίδραση του φαινομένου P.I.D. . Το σημείο της μέγιστης ισχύος, P_{max} , που βρίσκεται στο σημείο καμπίς της χαρακτηριστικής I-V φαίνεται να είναι πιο χαμηλά στην περίπτωση του δεύτερου πλαισίου. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού η απόδοση ισχύος μειώνεται όταν μια μονάδα έχει υποστεί βλάβη στην λειτουργία της λόγω του φαινομένου P.I.D..^[29]

Όμως, οι διαφορές στην χαρακτηριστική I-V δεν είναι πάντα πολύ εμφανείς. Σε αυτήν την περίπτωση χρειάζεται να συγκριθεί η ισχύς των διαφόρων φωτοβολταϊκών μονάδων στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (STC), όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 9. Σε αυτό το διάγραμμα αναπαριστάται η κανονικοποιημένη ισχύς των εικοσιτεσσάρων φωτοβολταϊκών πλαισίων της αλυσίδας , δηλαδή η μέγιστη ισχύς του κάθε πλαισίου προεκβαλλόμενη στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (STC) , P_{max} , διαιρεμένη με την ονομαστική μέγιστη ισχύ $P_{max nom}$, που δίνεται στο φύλλο δεδομένων ασφαλείας των φωτοβολταϊκών μονάδων. Οι μετρήσεις αυτές είναι σύμφωνες με τις μετρήσεις της τάσης λειτουργίας.

Κάποιοι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων επηρεάζεται περισσότερο από το φαινόμενο P.I.D. σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας από ότι στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (STC). Έτσι ένας εναλλακτικός τρόπος είναι να μετρηθεί η ισχύς της χαρακτηριστικής IV των πλαισίων υπό χαμηλή ακτινοβολία. Αυτό μπορεί να γίνει με την λήψη της χαρακτηριστικής IV τις πρώτες πρωινές ώρες της ημέρας ή τις ώρες λίγο πριν την δύση του ήλιου.

Όπως και στα προηγούμενα τεστ, η μέτρηση των χαρακτηριστικών IV θα πρέπει να γίνει σε ημέρα με ηλιοφάνεια και σε σύντομο χρονικό διάστημα, ώστε να υπάρχει η βεβαιότητα ότι όλες οι μετρήσεις ελήφθησαν υπό τις ίδιες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας των κυψελών και, επομένως, η σύγκριση των μετρήσεων για τις διάφορες φωτοβολταϊκές μονάδες να γίνει με όσο το δυνατόν μικρότερο σφάλμα.^[60]



Διάγραμμα 9 Η κανονικοποιημένη μέγιστη ισχύς 24 φωτοβολταϊκών μονάδων συνδεδεμένων σε σειρά σε συστοιχία επηρεασμένη από το φαινόμενο P.I.D. ^[60]

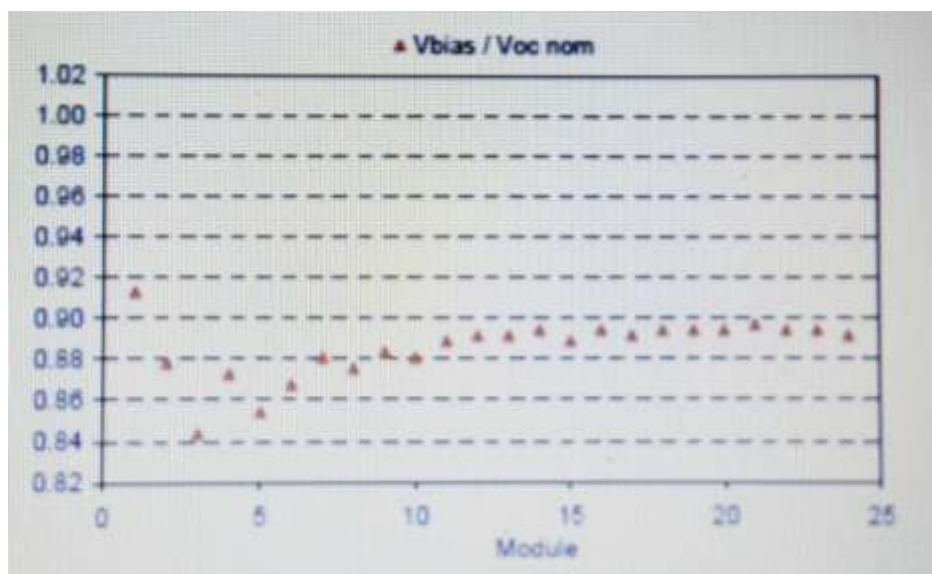
- **Αναπαράσταση της χαρακτηριστικής IV υπό συνθήκες σκοταδίου («Σκοτεινή χαρακτηριστική IV»)**

Τέλος, ένας άλλος τρόπος επιτόπιας ανίχνευσης του φαινομένου P.I.D. είναι η μέτρηση της τάσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν πολώνεται με πηγή ρεύματος και χωρίς φωτισμό (συνθήκες σκότους). Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση μίας κουβέρτας ή ενός χαρτονιού, που να καλύπτει όλη την επιφάνεια της φωτοβολταϊκής μονάδας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 56.



Εικόνα 56 Στην εικόνα μπορούμε να δούμε ένα καλυμμένο με χαρτόνι φωτοβολταϊκό πλαίσιο το οποίο είναι πολωμένο με μία πηγή ρεύματος (κάτω αριστερή γωνία). ^[60]

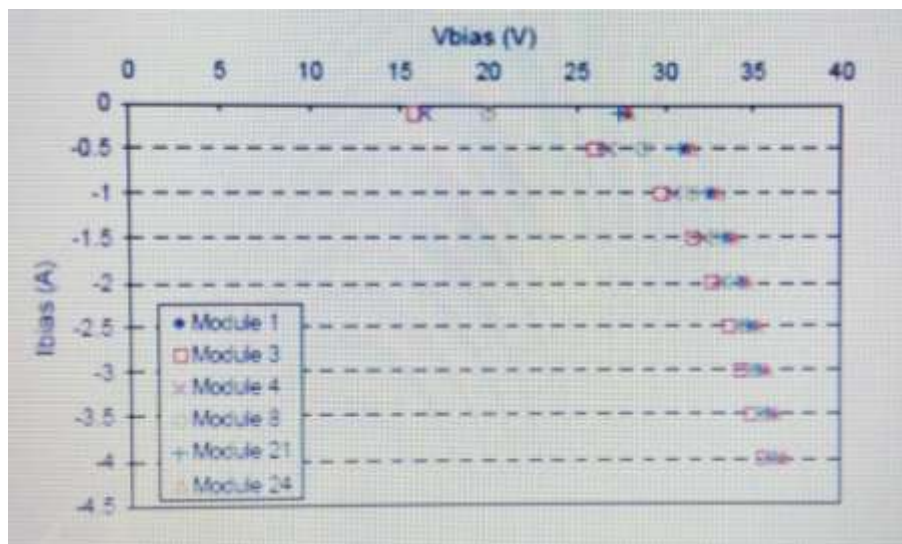
Το Διάγραμμα 10 αναπαριστά τα αποτελέσματα της μέτρησης της πολωμένης τάσης V_{bias} στα προηγούμενα εικοσιτέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες πολώθηκαν με ένα ρεύμα $\sim 1,5$ amps (περίπου ίσο με το 20% του ρεύματος βραχυκυκλώσεως που αναγράφεται στο φύλλο δεδομένων ασφαλείας τους). Στο γράφημα αναπαριστάται η κανονικοποιημένη V_{bias} (η πολωμένη τάση της φωτοβολταϊκής μονάδας V_{bias} , διαιρεμένη με την ονομαστική τιμή της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως $V_{oc\ nom}$ που αναγράφεται στο φύλλο δεδομένων ασφαλείας της). Όπως μπορούμε να δούμε, οι μετρήσεις έχουν μία λογική σχέση με την τάση λειτουργίας και την χαρακτηριστική IV.



Διάγραμμα 10 Κανονικοποιημένη τάση (σε συνθήκες σκότους) των 24 φωτοβολταϊκών μονάδων που είναι συνδεδεμένες εν σειρά σε συστοιχία που είναι επηρεασμένη από το φαινόμενο P.I.D. .^[60]

Τα σημεία της άνω καμπύλης αντιπροσωπεύουν ένα από τα σημεία της χαρακτηριστικής IV σε συνθήκες σκότους και συγκεκριμένα το σημείο που έχει σχέση με το ρεύμα $I_{bias} = -1,5\text{amps}$. Μάλιστα όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι η τιμή του ρεύματος, τόσο καλύτερο είναι για την ανίχνευση του φαινομένου P.I.D. . Η καμπύλη που παρουσιάζεται στην συνέχεια (βλ. Διάγραμμα 11) δείχνει την χαρακτηριστική IV υπό συνθήκες σκότους έξι εκ των εικοσιτεσσάρων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, όσο πιο αρνητικό είναι το ρεύμα I_{bias} (μεγαλύτερη απόλυτη τιμή, $|I_{bias}|$) τόσο μικρότερη διαφορά υπάρχει ανάμεσα στις τιμές της τάσης V_{bias} για κάθε ένα εκ των εικοσιτεσσάρων φωτοβολταϊκών μονάδων. Επιπλέον, όσο μικρότερη είναι η αρνητική τιμή του ρεύματος I_{bias} (άρα χαμηλότερη απόλυτη τιμή, $|I_{bias}|$) τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά ανάμεσα στις τιμές της τάσης V_{bias} των «υγιών» φωτοβολταϊκών πλαισίων (τα πλαίσια 1, 21 και 24 έχουν περίπου την ίδια τιμή V_{bias}) και τις τιμές της τάσης V_{bias} των φωτοβολταϊκών πλαισίων που έχουν υποστεί την επίδραση του φαινομένου P.I.D. (εννοώντας τα πλαίσια 3, 4 και 8 που

έχουν μικρότερες και διαφορετικές τιμές τάσης V_{bias} συναρτήσει της υποβάθμισής τους) .



Διάγραμμα 11 Χαρακτηριστικές IV υπό συνθήκες σκότους για 6 από τις 24 φωτοβολταϊκές μονάδες. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες των οποίων η λειτουργία έχει επηρεαστεί από το φαινόμενο P.I.D. έχουν μικρότερες τιμές τάσης V_{bias} όταν διαρρέονται από μικρότερο ρεύμα $|I_{bias}|$.^[60]

Συνεπώς, η χαρακτηριστική IV υπό συνθήκες σκότους δηλώνει την ύπαρξη του φαινομένου P.I.D., καθώς δείχνει αν η παράλληλη αντίσταση, shunt resistance, (που συνδέεται με την κλίση της καμπύλης για χαμηλό ρεύμα $|I_{bias}|$) είναι μικρή ή μεγάλη και, επομένως, αν το σχετιζόμενο διαφεύγον ρεύμα είναι μικρό ή μεγάλο αντίστοιχα.

Όπως και στις προηγούμενες δοκιμές που έχουν αναφερθεί, είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ως αναφορά, που να μην έχει υποστεί την επίδραση του P.I.D. φαινομένου. Η ύπαρξη του πλαισίου αναφοράς χρησιμεύει ώστε κάθε φορά να γίνεται σύγκριση μεταξύ της χαρακτηριστικής του IV σκότους με την αντίστοιχη χαρακτηριστική IV σκότους του πλαισίου εκείνου που είναι ύποπτο βλάβης λόγω του φαινομένου P.I.D.. Βέβαια, θα μπορούσε να είναι αρκετό να συγκρίνουμε την τιμή της τάσης V_{bias} όταν η φωτοβολταϊκή μονάδα

διαρρέεται από ρεύμα με τιμή κοντινή στο 5% του ρεύματος βραχυκυκλώσεως που αναγράφεται στο φύλλο δεδομένων ασφαλείας. Η τελευταία εναλλακτική είναι, μάλιστα, γρηγορότερη.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου διαπίστωσης του φαινομένου P.I.D. σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι ότι οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν οποιαδήποτε ημέρα και οποιαδήποτε ώρα, με άλλα λόγια δεν υπάρχουν χρονικοί περιορισμοί καθώς η τάση μετριέται στο σκοτάδι. Όπως είδαμε ήδη, οι συνθήκες σκοταδιού μπορούν να δημιουργηθούν καλύπτοντας το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με ένα χαρτόνι ή μία κουβέρτα (βλ. Εικόνα 56). Ο μόνος περιορισμός είναι ότι οι μετρήσεις πρέπει να γίνουν στην ίδια θερμοκρασία της φωτοβολταϊκής κυψέλης τόσο για το «υγιές» όσο και για το ύποπτο για βλάβη πλαίσιο, ώστε να μειωθεί η αβεβαιότητα ή αλλιώς η πιθανότητα σφάλματος.^[60]

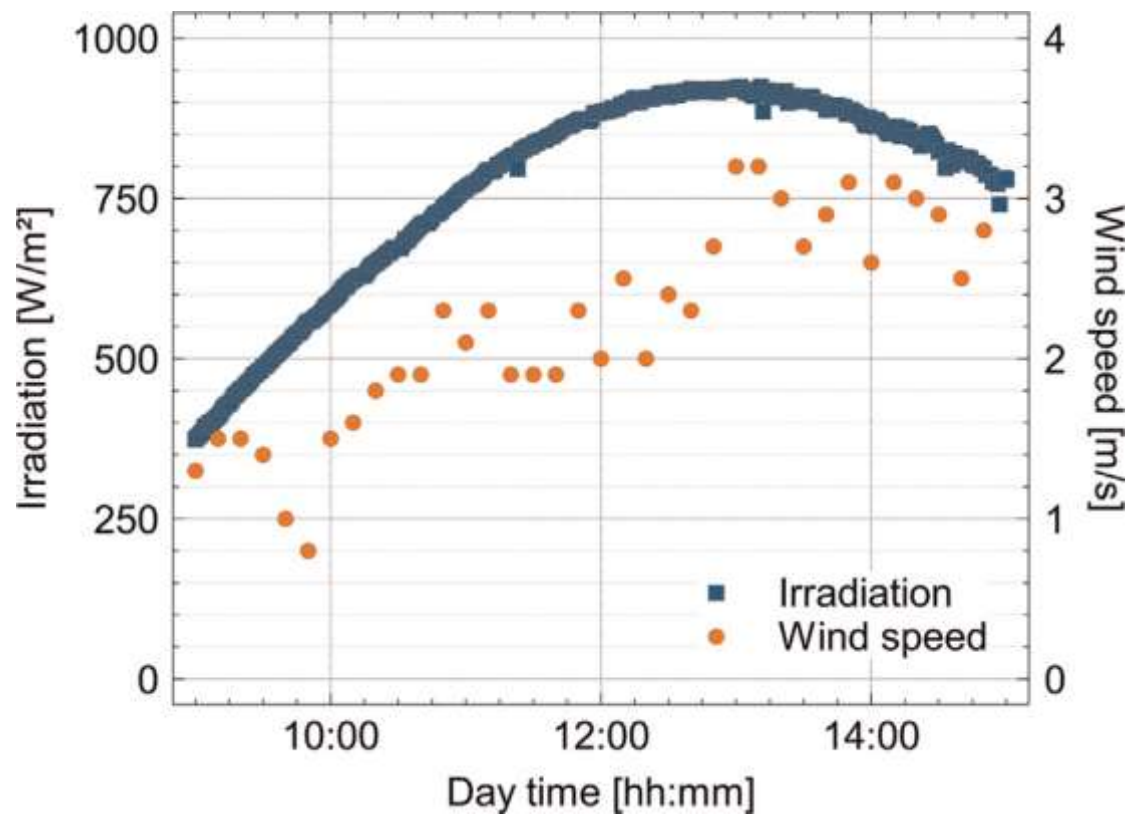
14. Πρόγνωση και υπολογισμός της απώλειας ισχύος με βάση την θερμογραφική εικόνα

Η διαδικασία για την εκτίμηση της απώλειας ισχύος λόγω του φαινομένου P.I.D. κατευθείαν από τις θερμογραφικές εικόνες βασίζεται στην θερμοκρασιακή διαφορά ΔT_{PID} , η οποία είναι η διαφορά της θερμοκρασίας ανάμεσα σε μια φωτοβολταϊκή κυψέλη που έχει επηρεαστεί από το φαινόμενο P.I.D. και μιας κυψέλης που ανήκει στην ίδια φωτοβολταϊκή μονάδα αλλά δεν έχει υποστεί επίδραση.

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρειάστηκαν διάφορες μονοκρυσταλλικές και multi-κρυσταλλικές φωτοβολταϊκές μονάδες πυριτίου (Si) που υπέστησαν τεχνητή βλάβη από το φαινόμενο P.I.D.. Η απώλεια ισχύος κάθε φωτοβολταϊκής κυψέλης μιας φωτοβολταϊκής μονάδας καθοριζόταν από τις μετρήσεις στην χαρακτηριστική $I-V$ και την εικόνα ηλεκτροφωταύγειας EL. Οι θερμογραφικές εικόνες ελήφθησαν σε διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας μεταξύ 500 και 1050 W/m². Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διατηρήθηκαν σε λειτουργία κοντά στο σημείο της μέγιστης ισχύος. Οι μετρήσεις επετεύχθησαν με τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας κάθε μίας φωτοβολταϊκής κυψέλης ξεχωριστά με την βοήθεια θερμοηλεκτρικού ζεύγους συνδεδεμένου στην πίσω πλευρά των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η διαφορά

θερμοκρασίας ΔT_{PID} που αναφέραμε προηγουμένως χρησιμεύει ως η μόνη τιμή στην διαδικασία πρόγνωσης.

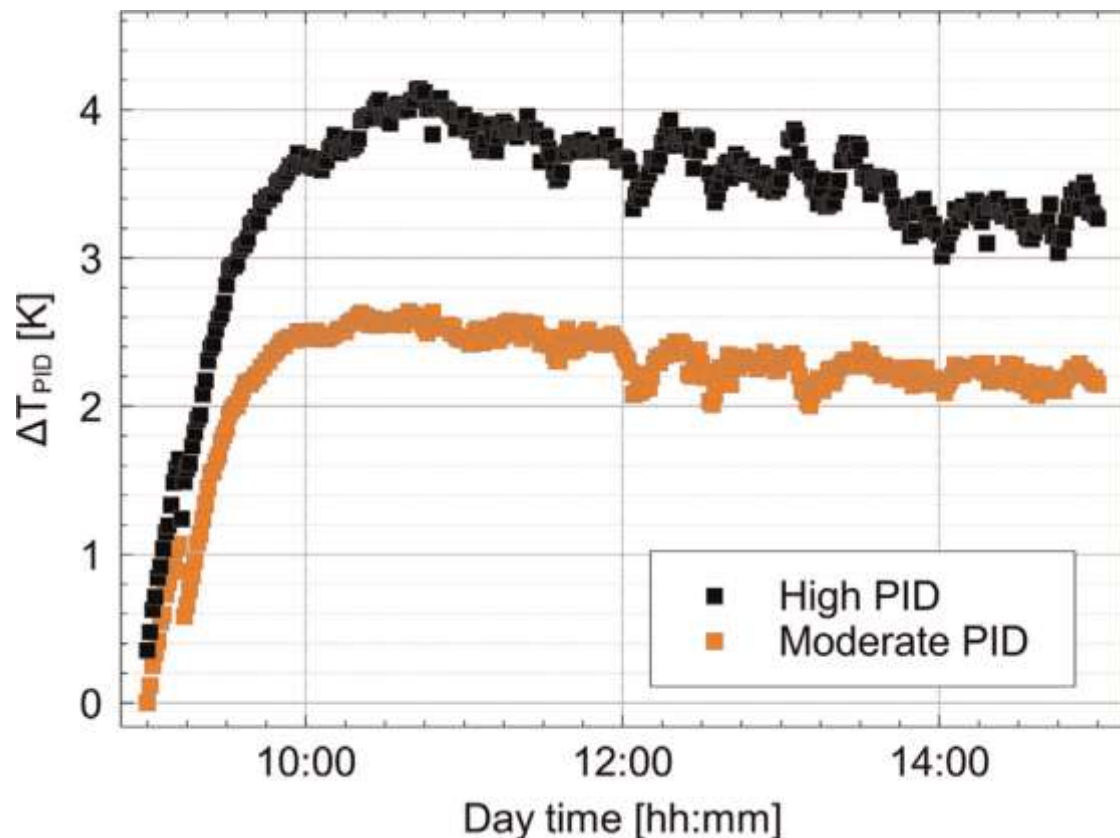
Οι κύριες επιδράσεις στην θερμοκρασιακή διαφορά φαίνονται υποδειγματικά στα Διαγράμματα 12 και 13 .



Διάγραμμα 12 Ακτινοβολία και ταχύτητα του ανέμου μεταξύ 9 π.μ. και 3 μ.μ. σε μια μη νεφελώδη καλοκαιρινή ημέρα. ^[61]

Σε μια μη συννεφιασμένη καλοκαιρινή ημέρα η ηλιακή ακτινοβολία κυμαίνεται μεταξύ 350 και 930 W/m² στο χρονικό διάστημα 9 π.μ. και 3 μ.μ., βλ. Διάγραμμα 12. Επιπλέον, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται από 1 έως 3m/s στο ενδιαμέσο χρονικό διάστημα. Το Διάγραμμα 13(a) δείχνει την διαφορά θερμοκρασίας ΔT_{PID} μιας ηλιακής κυψέλης που έχει υποστεί έντονα την επίδραση του φαινομένου P.I.D. και μίας με μέτρια επίδραση του P.I.D. Η θερμοκρασιακή διαφορά ΔT_{PID} αυξάνει γενικά με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρόλο αυτά, μπορεί να ελαττωθεί με μία έντονη μετάδοση θερμότητας λόγω της αυξανόμενης ταχύτητας του αέρα. Στο δοθέν

παράδειγμα, η ισορροπία μεταξύ της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε κορεσμό την θερμοκρασιακή διαφορά ΔT_{PID} των δύο κυψελών - η οποία βρίσκεται υπό εξέταση. Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή το φωτοβολταϊκό στοιχείο που έχει υποστεί μεγαλύτερη βλάβη λόγω του φαινομένου P.I.D. παρουσιάζει μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά από ότι το στοιχείο στο οποίο το φαινόμενο P.I.D. εμφανίζεται σε μέτριο βαθμό.



Διάγραμμα 13(α) Θερμοκρασιακή διαφορά δύο φωτοβολταϊκών κυψελών που ανήκουν στην ίδια φωτοβολταϊκή μονάδα και οι οποίες έχουν υποστεί βλάβες λόγω της παρουσίας του φαινομένου P.I.D. υπό τις συνθήκες που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 12. Οι θερμοκρασίες έχουν μετρηθεί με την βοήθεια θερμοηλεκτρικού ζεύγους. ^[61]

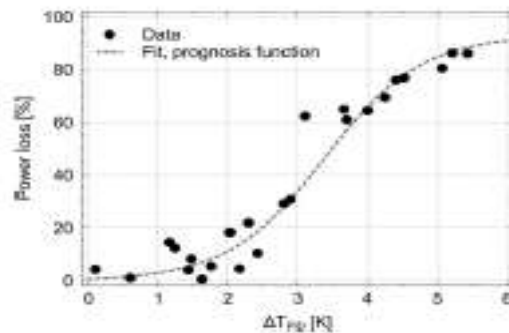
Από το σύνολο των πειραμάτων προέκυψαν συναρτήσεις πρόγνωσης της απώλειας ισχύος μονο-κρυσταλλικών και multi- κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου (Si) για διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Οι συναρτήσεις πρόγνωσης παρέχουν μία εκτίμηση της απώλειας ισχύος όπως μετριέται στις πρότυπες

συνθήκες δοκιμών (STC) και σε εξάρτηση με την θερμοκρασιακή διαφορά ΔT_{PID} , η οποία καθορίζεται από την θερμογραφική εικόνα μίας φωτοβολταϊκής κυψέλης του πλαισίου. Στην προσέγγισή μας, η διαφορά στο ρεύμα των κυψελών αγνοείται, το οποίο ρεύμα διατηρείται μόνο για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία εκείνα τα οποία βρίσκονται υπό μέτρια επίδραση του φαινομένου P.I.D. . Συνεπώς, η απώλεια ισχύος ολόκληρου του φωτοβολταϊκού πλαισίου προκύπτει προσεγγιστικά από το άθροισμα της ισχύος κάθε μίας φωτοβολταϊκής κυψέλης.

Στο Διάγραμμα 13(b) απεικονίζεται η συνάρτηση πρόγνωσης για τις μονο-κρυσταλλικές φωτοβολταϊκές μονάδες πυριτίου (Si) για συνθήκες με ακτινοβολία τιμής $\sim 800 \text{ W/m}^2$. Τα δεδομένα απεικονίστηκαν με την γραμμική προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων σε μία λογιστική συνάρτηση.

$$\Delta P[\%] = \frac{\Delta P_{max}}{1 + \exp(-k * \Delta P_{max} * \Delta T_{PID}) * (\Delta P_{max} / \Delta P_0 - 1)} \quad (28)$$

Το ΔP είναι η απώλεια ισχύος, το ΔP_{max} η απώλειες ισχύος κορεσμού, το ΔP_0 η απώλεια ισχύος για $\Delta T_{PID}=0$ και k η παράμετρος που περιγράφει την κλίση της καμπύλης. Η παράμετρος k εξαρτάται τόσο από το επίπεδο ακτινοβολίας όσο και από τον τύπο της φωτοβολταϊκής μονάδας, π.χ. μονο-κρυσταλλική ή multi-κρυσταλλική μονάδα πυριτίου (Si). Η απώλεια της ισχύος κορεσμού αντιστοιχεί στο 93% της μέγιστης απώλειας ισχύος μετά από 24h – 8000V όπως υπολογίσαμε στα πειράματά μας. Η διαδικασία πρόγνωσης ισχύει με την θεώρηση ότι υπάρχει τουλάχιστον μία φωτοβολταϊκή κυψέλη στην μονάδα της οποίας η λειτουργία δεν έχει επηρεαστεί και την οποία παίρνουμε ως κυψέλη αναφοράς. Το φαινόμενο P.I.D. θα πρέπει να είναι η μόνη παρούσα βλάβη στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και οποιεσδήποτε άλλες επιδράσεις θα πρέπει να αγνοούνται. ^[61]

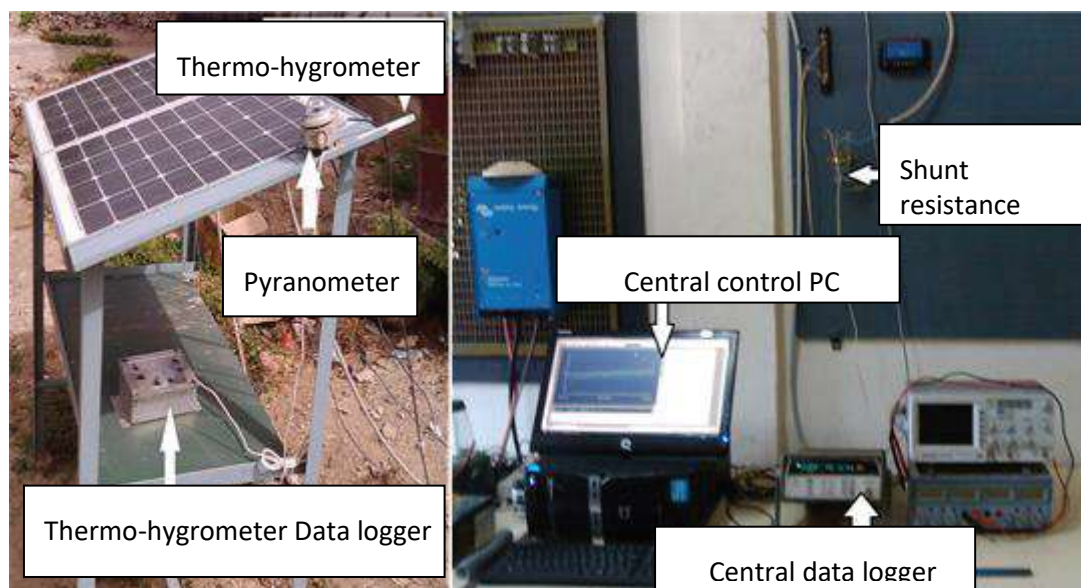


Διάγραμμα 13(b) Συνάρτηση πρόγνωσης της απώλειας ισχύος mc-Si κυψέλης λόγω P.I.D., για ακτινοβολία 800 W/m^2 . ^[61]

15. Καινοτόμα πλατφόρμα για την διερεύνηση της επίδρασης του φαινομένου P.I.D. στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά I_{sc} και V_{oc} μιας φωτοβολταϊκής μονάδας

Η φωτοβολταϊκή πλατφόρμα η οποία θα παρουσιαστεί στην ενότητα αυτή εγκαταστάθηκε στην Πολυτεχνική Σχολή του Ντακάρ στη Σενεγάλη (Higher Polytechnic School of the Dakar University, Senegal). Λόγω του ότι οι κλιματικές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο στην πλατφόρμα αυτή, αναφέρονται παρακάτω κάποια σημαντικά στοιχεία για την ευρύτερη περιοχή. Έτσι, πρέπει να ειπωθεί ότι η Σενεγάλη βρίσκεται στην δυτική Αφρική μεταξύ των συντεταγμένων $12,5^{\circ}$ και $16,5^{\circ}$ του Βόρειου γεωγραφικού πλάτους και 12° και 17° του Δυτικού γεωγραφικού μήκους. Το κλίμα της είναι ξηρό και τροπικό και χαρακτηρίζεται από δύο εποχές: μια ξηρή που διαρκεί από τον Νοέμβριο μέχρι τον Ιούνιο και μία βροχερή από τον Ιούλιο έως τον Οκτώβριο. Η Σενεγάλη έχει μία σημαντική ηλιοφάνεια με μία ετήσια μέση διάρκεια της ακτινοβολίας περίπου 3000 ώρες και μία τάξη έκθεσης στην ακτινοβολία $5,7 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$. Η ακτινοβολία ποικίλει μεταξύ του βόρειου μέρους που χαρακτηρίζεται από περισσότερη ηλιοφάνεια ($5,8 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ στο Dakar) και της νοτιότερης περιοχής που είναι πλουσιότερη στις βροχοπτώσεις ($4,3 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ στην πόλη Ziguinchor). Η θερμοκρασία κυμαίνεται από 16° γύρω από το Dakar (θερμοκρασία τον μήνα Ιανουάριο) έως 38° στον Νότο (θερμοκρασία τον Οκτώβριο). Η βροχόπτωση αυξάνει από τον Βορρά προς τον Νότο με ένα ετήσιο περίπου μέτρο των 300 mm στον Βορρά και 1500mm στον Νότο. Η σχετική υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 75% και 95%. Η πλατφόρμα είναι εγκατεστημένη στην περιοχή του Dakar ανάμεσα στο Δυτικό γεωγραφικό μήκος $17,28^{\circ}$ και το Βόρειο γεωγραφικό πλάτος $14,43^{\circ}$ σε ύψος 31 m. Παρακάτω θα δούμε την πλατφόρμα αναλυτικά καθώς και τα διάφορα στοιχεία από τα οποία αποτελείται.

Η πλατφόρμα η οποία φαίνεται στην Εικόνα 57 άρχισε να λειτουργεί τον Μάρτιο του 2012. Αποτελείται από δύο ίδιες μονοκρυσταλλικές φωτοβολταϊκές μονάδες, τέσσερις αισθητήρες θερμοκρασίας, ένα πυρανόμετρο με καταγραφέα δεδομένων και έναν Η/Υ. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών μονάδων δίνονται στον Πίνακα 3.



Εικόνα 57 Φωτοβολταϊκή πλατφόρμα μετρήσεων. ^[63]

Specification	Values	Units
Nominal Peak power (P_p)	30	Watts
Short-circuit current (I_{sc})	1.67	Amps
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.50	Volts
Series resistance (R_s)	1.74	Ohms
PV cell surface (S)	49	cm ²
Cells number (N)	36	—
Fill Factor (FF)	0.72	—

Πίνακας 3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών μονάδων ^[63]

Παρακάτω παρατίθενται λίγα λόγια για την λειτουργία των στοιχείων της πλατφόρμας :

Αισθητήρας της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ο αισθητήρας αυτός αποτελείται από θερμοζεύγη τύπων J τοποθετημένα στην εσωτερική επιφάνεια της φωτοβολταϊκής μονάδας με στόχο την μέτρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Για κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο δύο θερμοζεύγη συνδέονται σε αντιδιαμετρικά σημεία. Ο υπολογισμός του μέσου όρου των δύο μετρήσεων για κάθε φωτοβολταϊκή μονάδα δίνει την θερμοκρασία της επιφάνειας.

Αισθητήρας της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της σχετικής υγρασίας

Για την μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της σχετικής υγρασίας χρησιμοποιείται ένα θερμο-υγρόμετρο τύπου KH-200 DN. Αυτό περιλαμβάνει ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων που ελέγχεται από το λογισμικό KILOG. Η μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της σχετικής υγρασίας γίνεται ταυτόχρονα κάθε λεπτό.

Αισθητήρας ακτινοβολίας

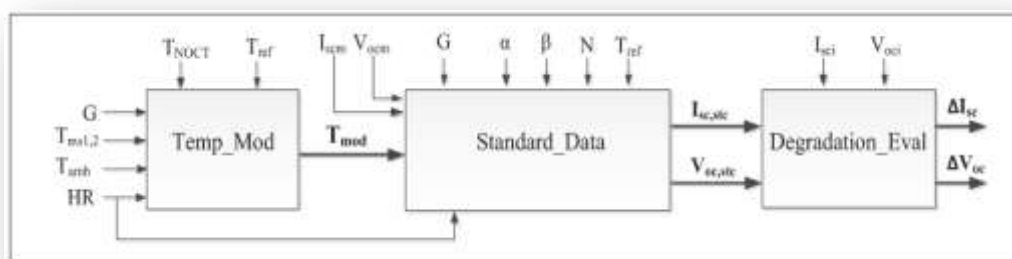
Ο αισθητήρας ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι ένα ακτινόμετρο (πυρανόμετρο) τύπου Kipp & Zonen CM 11. Είναι τοποθετημένος στο ίδιο επίπεδο με τις φωτοβολταϊκές μονάδες.

Απόκτηση δεδομένων

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με έναν καταγραφέα δεδομένων (data logger) τύπου Agilent. Η λειτουργία της πλατφόρμας γίνεται μέσω ενός H/Y που έχει τα εξής χαρακτηριστικά: έναν μεγάλο επεξεργαστή διπλού πυρήνα 2,6 GHz 32bit, με μνήμη RAM 2 GB και 50 GB σκληρό δίσκο. Η πλατφόρμα των μετρήσεων κατευθύνεται από έναν καταγραφέα δεδομένων Agilent Benchlink. Τέλος, οι μετρήσεις των παραμέτρων (ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου, σχετική υγρασία, ρεύμα βραχυκυκλώσεως, και τάση ανοιχτοκυκλώσεως) λαμβάνονται κάθε ένα λεπτό συνεχόμενα.^[63]

15.1 Λειτουργία της πλατφόρμας

Οι μετρήσεις που πραγματοποιεί η πλατφόρμα θα πρέπει να επιτρέπουν την ανίχνευση και την αξιολόγηση της υποτίμησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών μονάδων όπως είναι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) και η τάση ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}) σε αναλογία με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων στα οποία επικεντρώνεται η μελέτη είναι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) και η τάση ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}). Η Εικόνα 58 παρουσιάζει μια επισκόπηση της μεθοδολογίας. ^[63]



Εικόνα 58 Επισκόπηση μεθοδολογίας. ^[63]

Οι έννοιες των μεταβλητών και δεδομένων που εισέρχονται και εξέρχονται στα διάφορα στάδια της πλατφόρμας επεξηγούνται στον Πίνακα 4 :

G	measured irradiance (W.m-2);
T _{amb}	ambient temperature (°C);
T _{NOCT}	nominal operating cell temperature (°C);
T _{ref}	standard reference temperature (°C);
A	current temperature coefficient (+ 22 μA/cm². °K);
β	voltage temperature coefficient (-2.2 mV / °K);
K	curvature coefficient (2 mW / ° K);
N	cells number of PV module;
T _{mod}	module temperature (°C);
I _{scm}	measured short-circuit current (A);
V _{ocm}	measured open-circuit voltage (V);
I _{sc, stc}	standardized short-circuit current (A);
V _{oc, stc}	standardized open-circuit voltage (V);
I _{sci}	initial short-circuit current in STC (A);
V _{oci}	initial open-circuit voltage in STC (V);
ΔI _{sc}	short-circuit current degradation (%);
ΔV _{oc}	open-circuit voltage degradation (%);
S	PV cell surface (cm²);
R _s	series resistance of PV module (Ω).

Πίνακας 4 Ορολογία. ^[63]

15.1.1 Θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου

Η πλατφόρμα μετρά απευθείας την θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}) και την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_{ms1, 2}) . Η θερμοκρασία της επιφάνειας του πλαισίου δίνεται, επίσης, από την σχέση Kenny :

$$T_m = T_{amb} + \frac{G}{800} * (T_{NOCT} - 20) \quad (29)$$

όπου T_{NOCT} είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας της φωτοβολταϊκής κυψέλης κατόπιν ακτινοβολίας 800 W*m⁻², 20°C είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, 1m*s⁻¹ είναι η ταχύτητα του αέρα και 45° είναι η γωνία κλίσης των

φωτοβολταϊκών μονάδων, σύμφωνα με το σύστημα προδιαγραφών IEC(International Electrochemical Commission) 61215.

Η τιμή της θερμοκρασίας T_{NOCT} για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που βρίσκονται αυτήν την εποχή στην αγορά κυμαίνεται από 42°C έως 46°C. ^[63]

15.1.2 Τυποποίηση-κανονικοποίηση μετρήσεων

Το μετρούμενο ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{scm} και η μετρούμενη τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{ocm} στην κανονική λειτουργία διορθώνονται προκειμένου να υπολογιστούν τα ισοδύναμά τους στις πρότυπες συνθήκες (STC, standard test conditions). Από τις μετρήσεις είναι δυνατό να υπολογιστεί η τιμή τους σύμφωνα με τις προδιαγραφές των προτύπων συνθηκών των δοκιμών (STC) που χαρακτηρίζονται από ακτινοβολία $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ και θερμοκρασία 25°C. Πράγματι, το πρότυπο NF EN 60891: 1992-02 το οποίο χρησιμοποιείται για την διόρθωση σε διαδικασίες που εξαρτώνται από την θερμοκρασία και την ακτινοβολία και που εφαρμόζεται στις μετρήσεις των χαρακτηριστικών ρεύματος και τάσης των φωτοβολταϊκών μονάδων πυριτίου (Si), δίνει τις γενικές σχέσεις διορθωτικών εξισώσεων (30) και (31) :

$$I_s = I_m + I_{scm} * \left(\frac{1000}{G} - 1 \right) + \alpha * S * (T_{ref} - T_{mod}) \quad (30)$$

$$V_s = V_m - R_s * (I_s - I_m) - K * I_s * (T_{ref} - T_{mod}) + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \quad (31)$$

όπου I_s είναι το μετρούμενο ρεύμα που είναι κανονικοποιημένο, I_m είναι το μετρούμενο ρεύμα σε πραγματικές συνθήκες, I_{scm} είναι το μετρούμενο ρεύμα βραχυκυκλώσεως, G είναι η μετρημένη ακτινοβολία, α είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας του ρεύματος, T_{ref} είναι μία θερμοκρασία αναφοράς και T_{mod} είναι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Ακόμη, V_s είναι η μετρούμενη τάση που είναι κανονικοποιημένη και V_m είναι η μετρούμενη τάση. β είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας τάσης, R_s είναι η σειριακή αντίσταση της φωτοβολταϊκής μονάδας, K είναι ο συντελεστής καμπυλότητας και N

είναι ο αριθμός κυψελών του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στο ανοιχτό κύκλωμα, ο συντελεστής κυρτότητας K που λαμβάνει υπόψη την απώλεια επιπρόσθετης τάσης κοντά στην κάμψη της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης-ρεύματος δεν συμπεριλαμβάνεται. Με τον τρόπο αυτό, η διορθωτική σχέση του μετρημένου ρεύματος βραχυκυκλώσεως $I_{sc, meas}$ και της μετρημένης τάσης ανοιχτοκυκλώσεως $V_{oc, meas}$ δίνονται από τις ισότητες 32 και 33. Αυτές χρησιμοποιούνται στο μπλοκ της πλατφόρμας που φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα 58 .

$$I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \quad (32)$$

$$V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \quad (33)$$

Οι ισότητες (32) και (33) χρησιμοποιούνται από την βαθμίδα Standard_ Data του μπλοκ κανονικοποίησης (βλ. Εικόνα 58) για την διόρθωση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως $I_{sc,meas}$ και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως $V_{oc,meas}$ ώστε να προκύψουν τα ισοδύναμά τους στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (STC) $I_{sc,STC}$ και $V_{oc,STC}$. Οι κανονικοποιημένες αυτές μετρήσεις χρησιμεύουν για την εκτίμηση της υποβάθμισης του ρεύματος βραχυκυκλώσεως και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως, ΔI_{sc} και ΔV_{oc} , ως προς τις αρχικές τιμές I_{sci} και V_{oci} .^[63]

15.1.3. Αξιολόγηση της υποβάθμισης των I_{sc} και V_{oc}

Η εκτίμηση της υποβάθμισης του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} μιας φωτοβολταϊκή μονάδας γίνεται μέσω της βαθμίδας Degradation_Eval του μπλοκ της Εικόνας 58 . Για κάθε παράμετρο, γίνεται σύγκριση μεταξύ της κανονικοποιημένης μετρημένης τιμής και της αρχικής τιμής που δίνεται από τον κατασκευαστή για τον χρόνο πριν ακόμη γίνει χρήση της φωτοβολταϊκής μονάδας. Η διαφορά σε ποσοστό ανάμεσα στις δύο προαναφερθείσες τιμές αντιπροσωπεύει την υποβάθμιση της εκάστοτε παραμέτρου. Επομένως, η υποβάθμιση του ρεύματος

βραχυκυκλώσεως (ΔI_{sc}) και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (ΔV_{oc}) δίνεται αντίστοιχα από τις ισότητες (34) και (35) :

$$\Delta I_{sc} (\%) = \frac{I_{sci} - I_{sc,stc}}{I_{sci}} * 100 \quad (34)$$

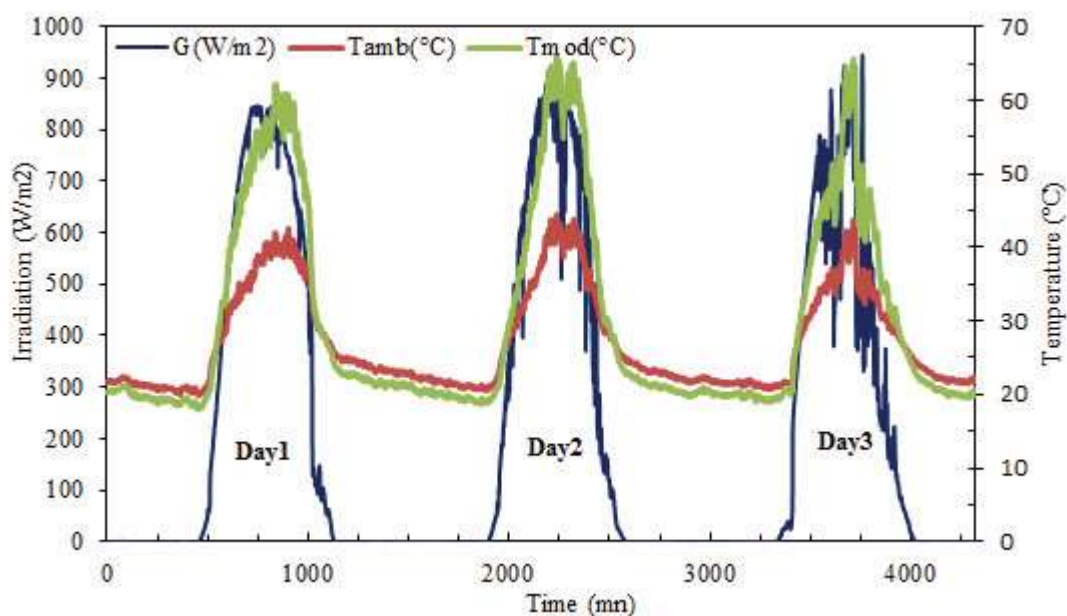
$$\Delta V_{oc} (\%) = \frac{V_{oci} - V_{oc,stc}}{V_{oci}} * 100 \quad (35)$$

όπου $I_{sc,stc}$ είναι το κανονικοποιημένο ρεύμα βραχυκυκλώσεως, I_{sci} είναι το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (STC), $V_{oc,stc}$ είναι η κανονικοποιημένη τάση ανοιχτοκυκλώσεως και V_{oci} είναι η αρχική τάση ανοιχτοκυκλώσεως στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (STC).^[63]

15.2 Αποτελέσματα και ανάλυση αυτών

15.2.1 Περιβαλλοντικές παράμετροι

Κύριος σκοπός των επιστημόνων στην υποενοότητα αυτή είναι ο έλεγχος εμφάνισης υποβάθμισης ή μη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πλαισίων μετά από ένα χρόνο λειτουργίας τους. Κάτι τέτοιο μπορεί να πραγματοποιηθεί με την λήψη μετρήσεων για τρεις ημέρες μέσω της φωτοβολταϊκής πλατφόρμας. Στο Διάγραμμα 4 φαίνονται σχεδιασμένα η ηλιακή ακτινοβολία (G), η θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}) και η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_{mod}) κατά την διάρκεια των τριών αυτών ημερών. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}) - ας υπενθυμίσουμε ότι το πείραμα λαμβάνει τόπο στην Σενεγάλη κατά της διάρκεια ξηρής περιόδου – μπορεί να πέσει γύρω στους 18°C την νύχτα, ενώ μπορεί να φτάσει τους 23°C έως 45°C κατά την διάρκεια της ημέρας, ανάλογα με την ποσότητα του φωτός. Η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_{mod}) τις τρεις ημέρες αναπτύσσεται όμοια με την θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά παραμένει σημαντικά πάνω από αυτήν κατά την διάρκεια της ημέρας. Αντίθετα, κατά την διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πλαισίου βρίσκεται κάτω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

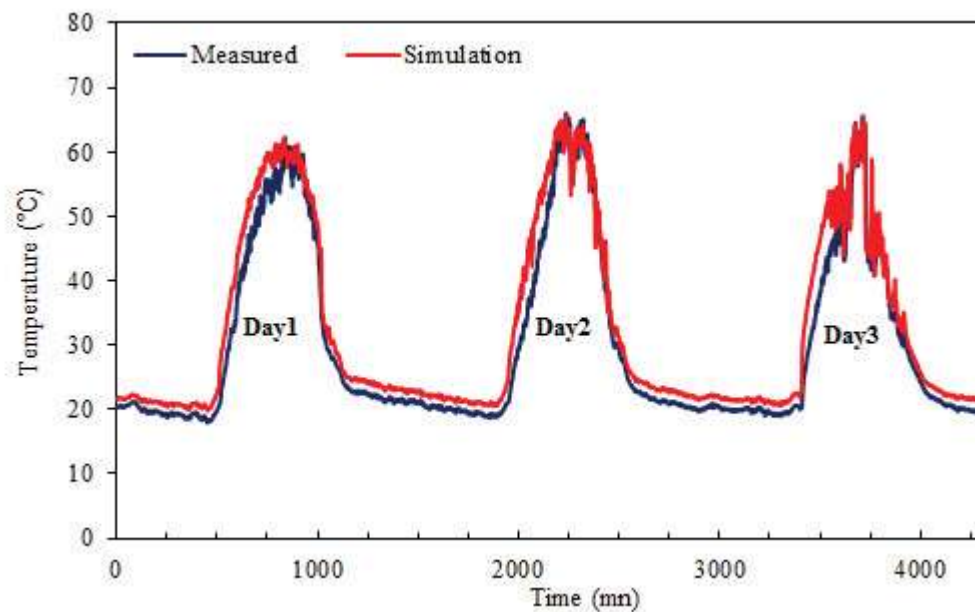


Διάγραμμα 14 Διαγράμματα ακτινοβολίας, θερμοκρασίας περιβάλλοντος και θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την πάροδο του χρόνου για τις τρεις ημέρες. ^[63]

Η θερμοκρασία της φωτοβολταϊκής μονάδας είναι μία σημαντική παράμετρος για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς της με το πέρασμα του χρόνου. Στο Διάγραμμα 15 φαίνονται η μετρούμενη θερμοκρασία της φωτοβολταϊκής μονάδας τις τρεις ημέρες και η προσομοιωμένη θερμοκρασία της μονάδας που υπολογίζεται από την σχέση Kenny (29). Οι προσομοιωμένες τιμές συγκρίνονται ποσοτικά με τις μετρούμενες τιμές της θερμοκρασίας μέσω ενός συντελεστή συσχέτισης R^2 που δίνεται από την ισότητα (36).

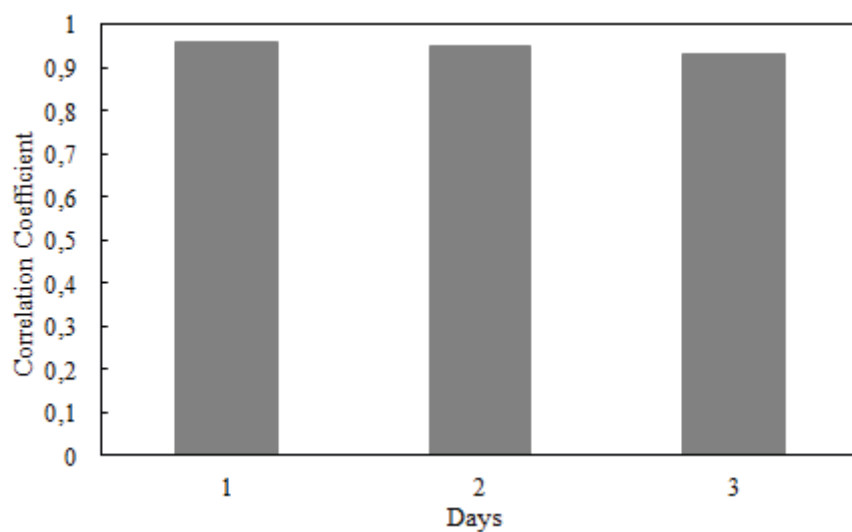
$$R^2 = 1 - \frac{\sum (X_i - \bar{X}_i)^2}{\sum (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad (36)$$

όπου X_i είναι η μετρούμενη τιμή, $\bar{X}_i$ είναι η προσομοιωμένη τιμή και $\bar{X}_i$ είναι η μέση αριθμητική τιμή των μετρούμενων τιμών. Όσο πιο υψηλή είναι η τιμή του συντελεστή R^2 τόσο μεγαλύτερη είναι η γραμμική συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας που προκύπτει από την προσομοίωση και της μετρούμενης θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, δηλαδή τόσο πιο πετυχημένη είναι η λειτουργία της προσομοίωσης.



Διάγραμμα 15 Σύγκριση μεταξύ της μετρούμενης θερμοκρασίας (μπλε γραμμή) και της θερμοκρασίας κατόπιν προσομοίωσης (κόκκινη γραμμή) του φωτοβολταϊκού πλαισίου.^[63]

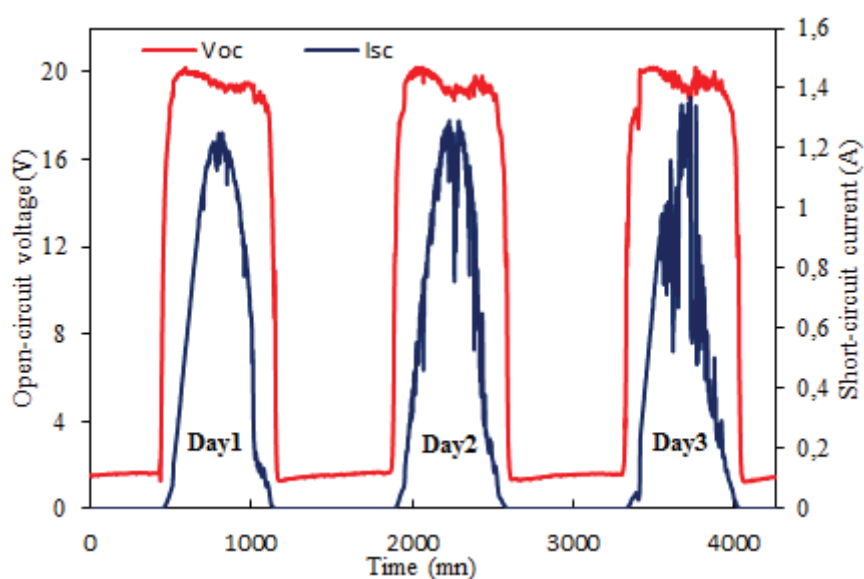
Οι συντελεστές συσχέτισης για τις τρεις ημέρες είναι 0,97, 0,96 και 0,95 αντίστοιχα (Διάγραμμα 14). Οι υψηλές τιμές του R^2 για όλες τις ημέρες επιβεβαιώνουν την συνολική ακρίβεια της σχέσης Kenny.^[63]



Διάγραμμα 16 Συντελεστές συσχέτισης .^[63]

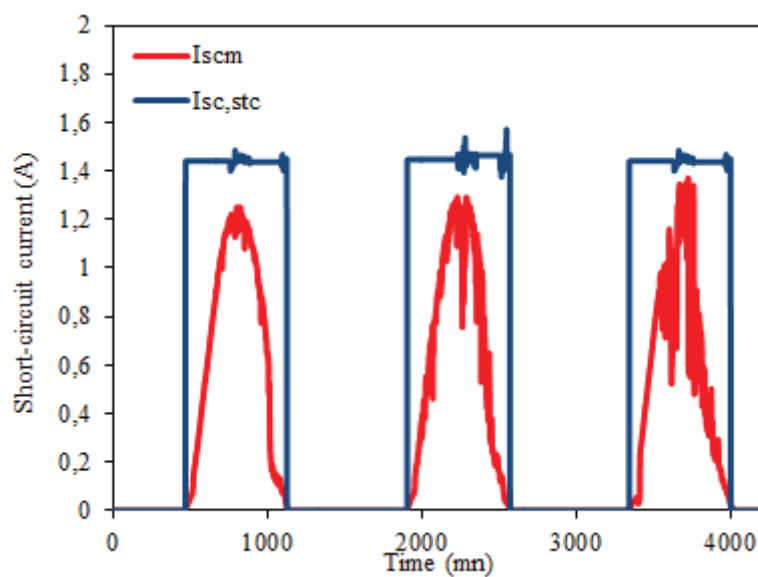
15.2.2 Κανονικοποίηση των μετρήσεων

Οι μετρήσεις που προκύπτουν από την πλατφόρμα πραγματοποιούνται κάτω από πραγματικές συνθήκες που εξαρτώνται πάρα πολύ από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι περιβαλλοντικές παράμετροι μεταβάλλονται αρκετά ανάλογα την εποχή και τον χρόνο. Για να γίνουν συγκριτικές μελέτες των μετρήσεων, θα πρέπει να έχουν πραγματοποιηθεί κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Η λύση που προτείνεται είναι η «προβολή» των πραγματικών μετρήσεων στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (STC) με την βοήθεια της μεθόδου που εφαρμόζεται στο Standard_Data μπλοκ της Εικόνας 58 . Οι απευθείας και οι κανονικοποιημένες μετρήσεις του ρεύματος βραχυκυκλώσεως και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως τις τρεις ημέρες παρουσιάζονται παρακάτω. Το Διάγραμμα 17 δείχνει τις απευθείας μετρήσεις του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{scm}) και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{ocm}) τις τρεις ημέρες. Παρατηρείται ότι όταν η φωτοβολταϊκή μονάδα ξεκινά να παράγει, η τάση ανοιχτοκυκλώσεως αυξάνει πολύ γρήγορα μέχρι να αποκτήσει την ονομαστική της τιμή, την οποία διατηρεί κατά την διάρκεια της ημέρας. Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως αναπτύσσεται ακολουθώντας την ακτινοβολία και φτάνει στην μέγιστη τιμή του όταν η ακτινοβολία έχει φτάσει στο μέγιστο.



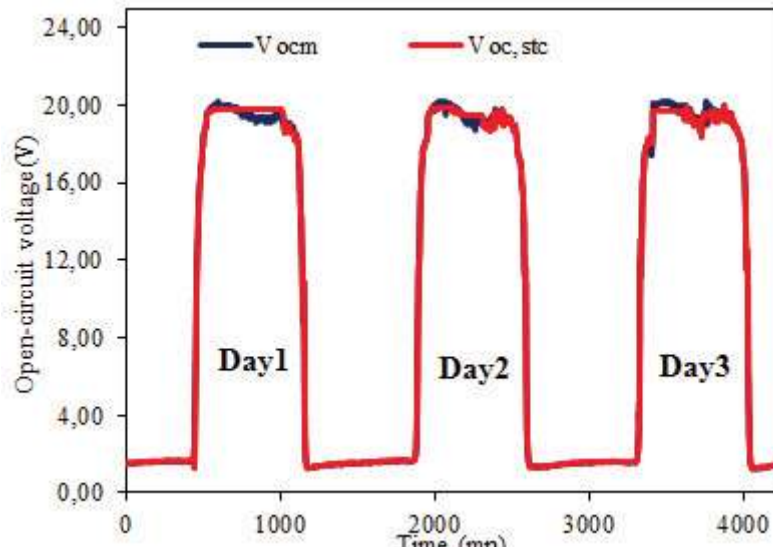
Διάγραμμα 17 Η μεταβολή στον χρόνο της μετρούμενης τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (κόκκινη καμπύλη) και του μετρούμενου ρεύματος βραχυκυκλώσεως (μπλε καμπύλη) στις τρεις διαφορετικές ημέρες.^[63]

Στα Διαγράμματα 18 και 19 φαίνονται αντίστοιχα το κανονικοποιημένο ρεύμα βραχυκυκλώσεως ($I_{sc,stc}$) και η τάση ανοιχτοκυκλώσεως ($V_{oc,stc}$) για τις τρεις ημέρες. Το Διάγραμμα 18 δείχνει καθαρά ότι το κανονικοποιημένο ρεύμα βραχυκυκλώσεως παραμένει σχετικά σταθερό κατά την διάρκεια της ημέρας παρόλη την μεταβολή της ακτινοβολίας και του μετρούμενου ρεύματος βραχυκυκλώσεως. Στο Διάγραμμα 18 πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνο οι τιμές που αφορούν τις ώρες στη μέση της ημέρας (κεντρικές ώρες).



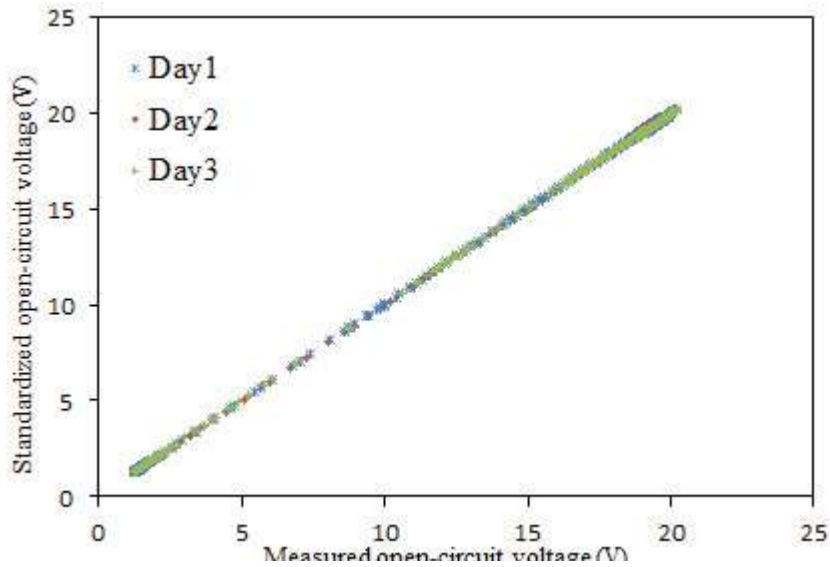
Διάγραμμα 18 Σύγκριση μεταξύ του μετρούμενου ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{scm}) και του κανονικοποιημένου ρεύματος βραχυκυκλώσεως ($I_{sc,stc}$) τις τρεις διαφορετικές ημέρες.^[63]

Η κανονικοποιημένη τάση ανοιχτοκυκλώσεως παραμένει σχετικά σταθερή στο φως της ημέρας παρόλη την μεταβολή της ακτινοβολίας στις τρεις ημέρες, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 19 . Πράγματι, η τάση εξαρτάται λιγότερο από την ακτινοβολία σε σχέση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης.



Διάγραμμα 19 Σύγκριση μεταξύ της μετρούμενης τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{ocm}) και της κανονικοποιημένης τάσης ανοιχτοκυκλώσεως ($V_{oc,stc}$) τις τρεις διαφορετικές ημέρες. ^[63]

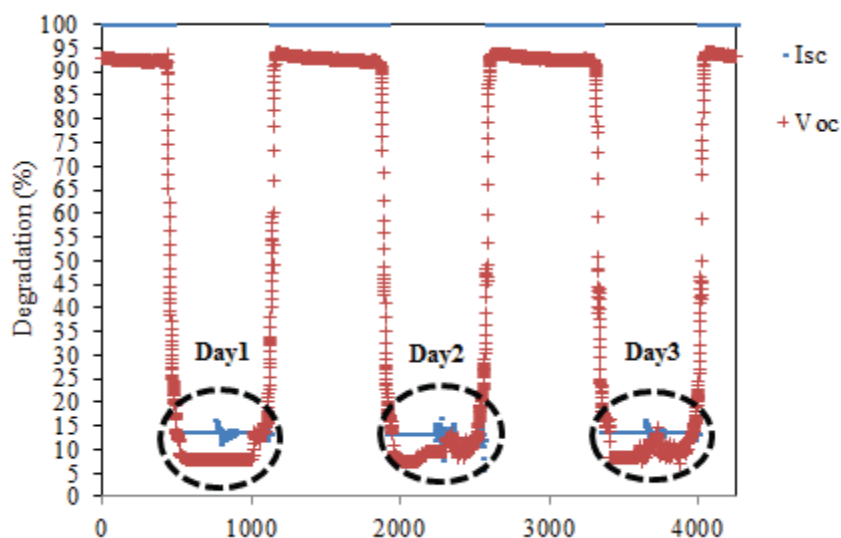
Το Διάγραμμα 20 παρουσιάζει την συσχέτιση μεταξύ της μετρούμενης τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{ocm}) και της κανονικοποιημένης τάσης ανοιχτοκυκλώσεως ($V_{oc,stc}$). Φαίνεται ότι οι δύο αυτές παράμετροι συσχετίζονται πολύ καλά τις τρεις θεωρούμενες ημέρες και για τον λόγο αυτό η κανονικοποίηση θεωρείται αξιόπιστη. ^[63]



Διάγραμμα 20 Συσχέτιση μεταξύ της μετρούμενης τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{ocm}) και της κανονικοποιημένης τάσης ανοιχτοκυκλώσεως ($V_{oc,stc}$).^[63]

15.2.3 Εκτίμηση της υποβάθμισης

Το Διάγραμμα 21 απεικονίζει την υποβάθμιση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}) της φωτοβολταϊκής μονάδας μετά από δέκα μήνες λειτουργίας της στην περιοχή του Πανεπιστημίου του Dakar. Τα αποτελέσματα αυτά προκύπτουν από τις μετρήσεις της πλατφόρμας και από την μέθοδο που προτείνεται στην ερευνητική αυτή μελέτη. Στο Διάγραμμα 21, θα πρέπει να δοθεί σημασία μόνο στις τιμές στην κεντρική πλαισιωμένη περιοχή καθώς αυτές σχετίζονται με τις παραγωγικές ώρες των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η υποβάθμιση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) είναι περίπου 13,5% για τις τρεις ημέρες. Τα δεδομένα που αφορούν τις ημέρες χωρίς ηλιοφάνεια δεν είναι ενδιαφέροντα καθώς κατά την περίοδο αυτήν οι φωτοβολταϊκές μονάδες δεν παράγουν ενέργεια. Η υποβάθμιση της μετρούμενη τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}) τις τρεις αυτές ημέρες είναι περίπου 8%.^[63]



Διάγραμμα 21 Υποβάθμιση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}) της φωτοβολταϊκής μονάδας μετά από δέκα μήνες λειτουργίας. ^[63]

15.3 Σύνοψη

Στην ενότητα 15.1 παρουσιάστηκε μια πλατφόρμα η οποία προορίζεται για μελέτες που αφορούν την υποβάθμιση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών μονάδων. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των περιβαλλοντικών παραμέτρων για τις τυπικές ημέρες και προτάθηκαν μέθοδοι κανονικοποίησης των άμεσων μετρήσεων των τιμών του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}). Ακόμη, προτάθηκε μία στρατηγική εκτίμησης της υποβάθμισης του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) και της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως (V_{oc}). Ωστόσο, είναι ακόμη δύσκολο να εκτιμηθούν ποσοτικά αυτά τα πρώτα αποτελέσματα υποβάθμισης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Είναι πράγματι, σπάνιο να βρεθεί, προς το παρόν, κάποια επιστημονική μελέτη που θα δίνει ακριβείς τιμές της υποβάθμισης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών. Η παρούσα έρευνα να μεν στοχεύει σε ένα χρονικό εύρος μετρήσεων δέκα μηνών, όμως η προοπτική είναι να επεκταθεί η μελέτη σε βάθος μεγαλύτερων περιόδων λειτουργίας της πλατφόρμας ώστε να υπάρξει μια πιο σημαντική βάση δεδομένων. Κάτι τέτοιο θα συνέβαλε στην ποσοτικοποίηση της υποβάθμισης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών που θα παρατηρούνταν σε μια μεγαλύτερη περίοδο και σε διαφορετικές εποχές. Θα είναι, τέλος,

εξαιρετικά ενδιαφέρον η έρευνα να επεκταθεί και σε φωτοβολταϊκές μονάδες διαφορετικών τεχνολογιών. ^[63]

16. Πρόληψη της εμφάνισης του φαινομένου P.I.D.

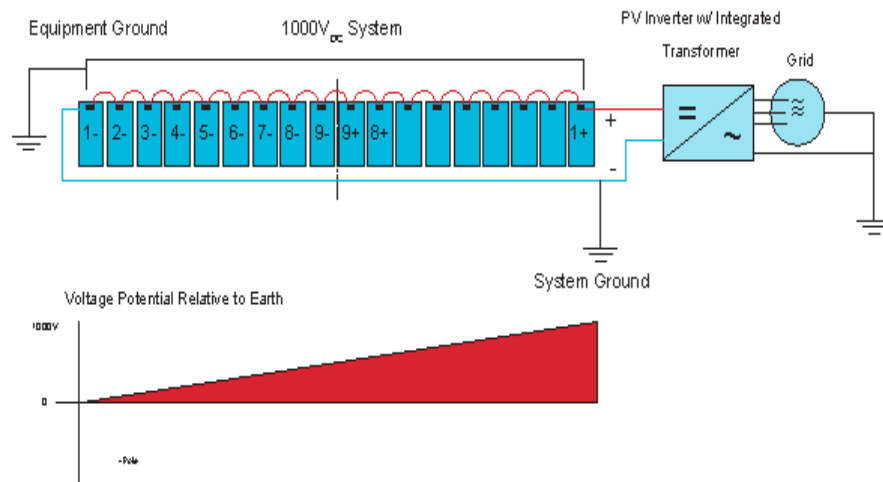
Η λήψη προληπτικών μέτρων κατά την διάρκεια κατασκευής μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης προκειμένου να αποτραπεί η επιβλαβής εμφάνιση του φαινομένου P.I.D. είναι πολύ σημαντική. Κάθε φωτοβολταϊκό κύτταρο μιας εγκατάστασης που έχει υποστεί την επίδραση του φαινομένου P.I.D. επιφέρει μείωση της συνολικής τάσης μιας ολόκληρης συστοιχίας. Ταυτόχρονα, το φαινόμενο P.I.D. , ως γνωστόν, προκαλεί μείωση της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και σε μεγαλύτερη κλίμακα μιας εγκατάστασης. Η μείωση αυτή της απόδοσης μπορεί να είναι αναστρέψιμη ή ακόμη και όχι όταν η μείωση της απόδοσης κυμαίνεται σε ποσοστό μεγαλύτερο από 30% . Στην τελευταία περίπτωση, όπου η ζημία είναι μεγαλύτερη από ό,τι στην πρώτη – αναστρέψιμη περίπτωση όπου απαιτείται η λήψη λιγότερο κοστοβόρων μέτρων επιδιόρθωσης – , το κόστος αντικατάστασης των κατεστραμμένων φωτοβολταϊκών πανέλων είναι αρκετά υψηλό. Σε κάθε περίπτωση, βέβαια, η μη προσεκτική κατασκευή μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης αυξάνει την πιθανότητα μελλοντικής μείωσης της επιθυμητής αποδοτικότητας, με αποτέλεσμα να απαιτείται ένα επιπλέον οικονομικό κόστος προκειμένου η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση να επανέλθει στην αρχική της απόδοση και λειτουργική συμπεριφορά.

Κρίνεται, λοιπόν, αναγκαία η λήψη προληπτικών μέτρων ώστε να επιτευχθεί η ανεπιθύμητη εμφάνιση του φαινομένου P.I.D. .Τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν είναι δυνατό να διακριθούν σε τρία επίπεδα, ανάλογα στο τί αφορούν. Επομένως, τα μέτρα κατηγοριοποιούνται σε: a) αυτά που λαμβάνονται σε επίπεδο του συστήματος και αφορούν το σύστημα, b) αυτά που λαμβάνονται σε επίπεδο φωτοβολταϊκών πανέλων και c) αυτά που αφορούν την δομή των φωτοβολταϊκών κυττάρων.

a) Μέτρα σε επίπεδο συστήματος :

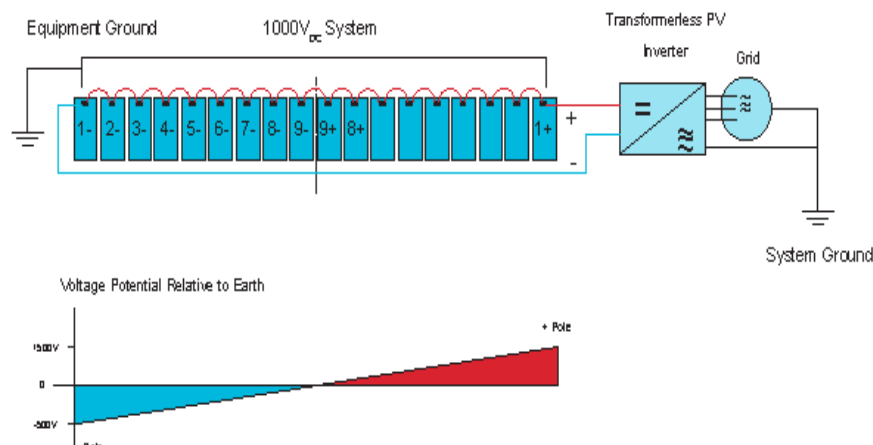
- Καθώς το φαινόμενο P.I.D. εμφανίζεται κατά την εφαρμογή πολύ υψηλών τάσεων, ένα μέτρο που προτείνουν οι μηχανικοί είναι η λειτουργία του συστήματος υπό δυναμικό λιγότερο από 500V DC. ^[29]
- Στην περίπτωση αντιστροφes με μετασχηματιστή το φαινόμενο P.I.D. μπορεί να αποφευχθεί απομονώνοντας γαλβανικά την φωτοβολταϊκή συστοιχία από το δίκτυο και γειώνοντας τον κατάλληλο πόλο του αντιστροφes, έτσι ώστε όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελα να χαρακτηρίζονται είτε μόνο από θετικό είτε μόνο από αρνητικό δυναμικό. Η πολύ υψηλή θετική ή η πολύ υψηλή αρνητική τάση (“voltage stress”) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μιας συστοιχίας ως προς την γη οδηγεί σε διαφεύγοντα ρεύματα και εξασθένηση της απόδοσής του. Το φαινόμενο P.I.D. που μπορεί να εμφανιστεί, συνήθως, επηρεάζει μόνο το ένα άκρο της συστοιχίας – το θετικό άκρο για πάνελα που είναι νοθευμένα με ηλεκτρόνια και το αρνητικό άκρο για πάνελα που είναι νοθευμένα με οπές. Η πρόληψη, λοιπόν, απαιτεί να γίνει γείωση είτε του θετικού πόλου του αντιστροφes- για φωτοβολταϊκά πλαίσια που αποτελούνται από κυψέλες νοθευμένες με ηλεκτρόνια (n-doped wafers) - είτε του αρνητικού πόλου του αντιστροφes - για πλαίσια που αποτελούνται από κυψέλες νοθευμένες με οπές (p-doped wafers) - ανάλογα την δομή του φωτοβολταϊκού κυττάρου και την πολικότητα της τάσης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι όλα τα πλαίσια θα έχουν αρνητική ή θετική τάση, αντίστοιχα, ως προς το έδαφος και για τον λόγο αυτό τα ηλεκτρόνια θα κινούνται μόνο προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση - από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες προς τα εξωτερικά πλαίσια των πανέλων στην πρώτη περίπτωση και αντίστροφα στην δεύτερη, δηλαδή από τα πλαίσια των πανέλων προς τα φωτοβολταϊκά στοιχεία - χωρίς να υπάρχουν διαφεύγοντα ρεύματα που αποδυναμώνουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η γείωση θα πρέπει να γίνεται πάντα σε συνεργασία με τον κατασκευαστή του αντιστροφes. Στην Εικόνα 59, αρχικά, το φωτοβολταϊκό πάνελο “ 1- ” είχε πολύ υψηλή αρνητική τάση. Με την

γείωση του αρνητικού πόλου του αντιστροφέα όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελα της συστοιχίας έχουν θετική πια τάση ως προς την γη και με τον τρόπο αυτό προλαμβάνεται το φαινόμενο P.I.D..^[73]



Εικόνα 59 Κύκλωμα μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένης με αντιστροφέα που διαθέτει μετασχηματιστή. Όπως φαίνεται, ο αρνητικός πόλος του αντιστροφέα έχει γειωθεί για την πρόληψη του φαινομένου P.I.D. . Κάτω αναπαριστάται το διάγραμμα τάσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων ως προς την γη.^[28]

- Αρκετές είναι οι φορές όπου προτιμάται η χρήση αντιστροφέα χωρίς μετασχηματιστή (βλ. Εικόνα 60) καθώς είναι πιο ελαφρύς, οικονομικότερος και πιο αποδοτικός. Στην περίπτωση αυτή εξαιτίας της απουσίας γαλβανικής απομόνωσης μεταξύ της AC και της DC πλευράς δεν μπορούμε να κάνουμε DC γείωση του αρνητικού πόλου του αντιστροφέα.



Εικόνα 60 Κύκλωμα μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένης με αντιστροφέα που δεν διαθέτει μετασχηματιστή. ^[28]

Παρόλο αυτά, ακόμη και για αυτούς τους μετασχηματιστές υπάρχουν διαθέσιμες τεχνολογίες, όπως η χρήση PV Offset Box της εταιρείας SMA ^[78] ή αντιστροφέα χωρίς μετασχηματιστή της εταιρείας Omron, ειδικού στην αποτροπή του φαινομένου P.I.D.. Στην Εικόνα 61 μπορούμε να δούμε ένα παράδειγμα PV Offset Box της SMA. Το PV Offset Box χρησιμοποιείται για εγκαταστάσεις και αντιστροφείς των 1000V. ^[29]

Το PV Offset Box διατηρεί την σωστή λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών πλαισίων αναλαμβάνοντας τον ρόλο εξισσοροπιστή ή αντισταθμιστή φορτίου. Καθώς το φαινόμενο P.I.D. οφείλεται στην υψηλή αρνητική τάση ως προς το έδαφος, ο εξισσοροπιστής φορτίου εφαρμόζει το αντίθετο φορτίο μετά την δύση του ηλίου, κατά την διάρκεια της νύχτας. ^[28]

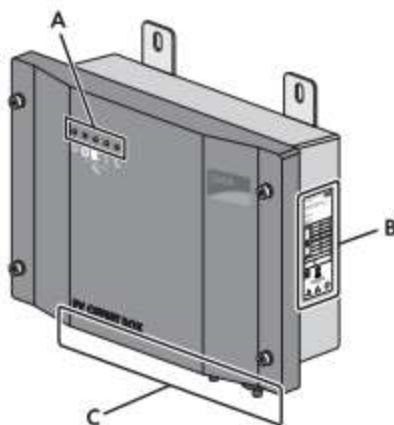
Όταν η τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας πέσει κάτω από μια καθορισμένη τιμή - τιμή κατωφλίου - το PV Offset Box επιβάλλει μια υψηλή θετική διαφορά δυναμικού –αντίθετη, δηλαδή, τάση- μεταξύ +400V και +1000V ως προς τη γη, αποφορτίζοντας την υψηλή αρνητική διαφορά δυναμικού τις νυχτερινές ώρες. Το γεγονός αυτό αποτρέπει το

φαινόμενο πόλωσης που μπορεί να εμφανιστεί κατά την διάρκεια λειτουργίας του.



Εικόνα 61 Παράδειγμα PV Offset Box της SMA. ^[64]

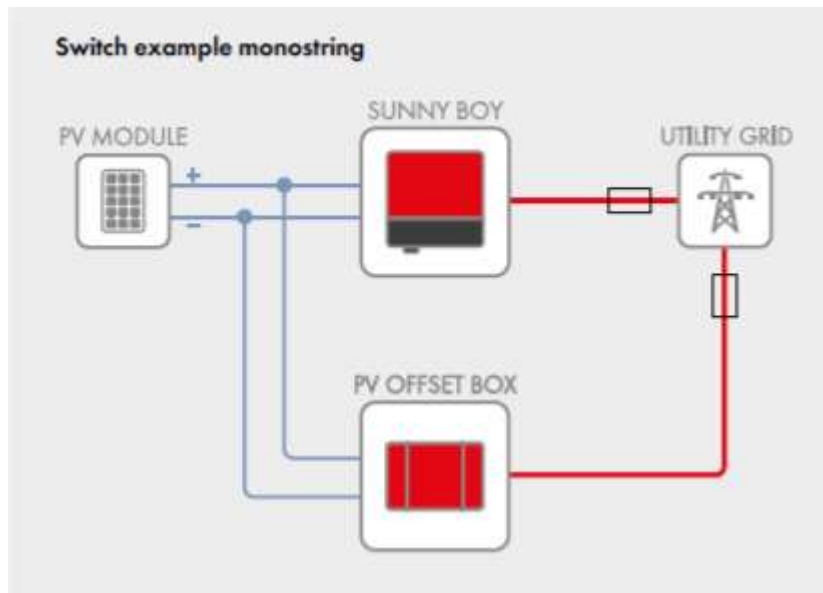
Ο σκελετός του PV Offset Box της SMA και τα μέρη από τα οποία αποτελείται η συσκευή φαίνονται στην Εικόνα 62 .



Item	Description	Explanation
A	LEDs	LEDs for operation and fault display
B	Type label	-
C	Connection area	Cable glands for the AC connection and DC connector

Εικόνα 62 Δομή του PV Offset Box. Το σημείο A δείχνει την θέση των LEDs τα οποία χρησιμεύουν για την αναπαράσταση είτε της λειτουργίας είτε της περίπτωσης βλάβης. Στην θέση B είναι τοποθετημένη η ετικέτα του μοντέλου της συσκευής με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του. Τέλος, το σημείο C μας δείχνει την μεριά στην οποία βρίσκονται τα σημεία συνδέσεων.^[66]

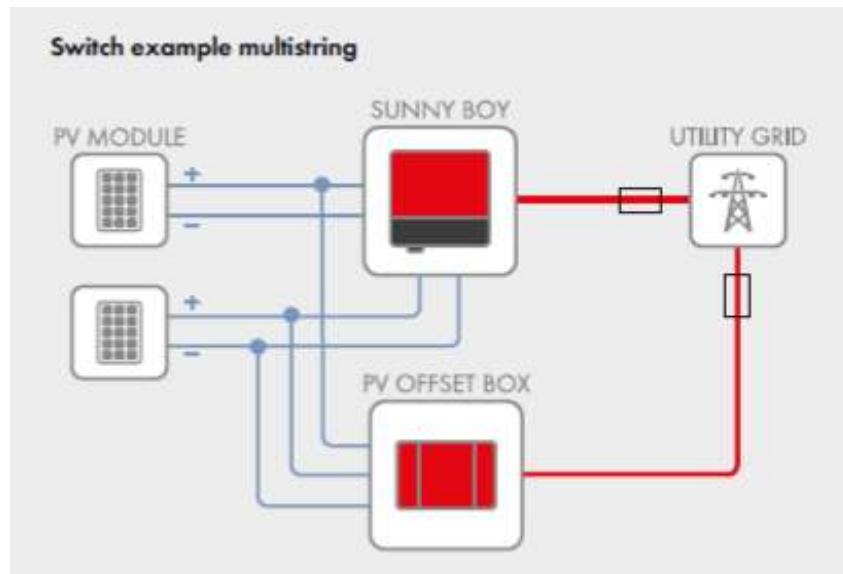
Η σύνδεση του PV Offset Box στην φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θα πρέπει να έχει την έγκριση του κατασκευαστή του, όπως, επίσης, του κατασκευαστή των φωτοβολταϊκών πανέλων. Γενικότερα, η τοποθέτησή του πρέπει να είναι συμβατή με όλα τα στοιχεία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, δηλαδή τα πανέλα, τα καλώδια και τους αντιστροφείς και να εξετάζεται από τον κατασκευαστή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Παρακάτω, στις Εικόνες 63 και 64 μπορούμε να δούμε τον τρόπο σύνδεσης του PV Offset Box στην περίπτωση που έχουμε μία φωτοβολταϊκή συστοιχία και στην περίπτωση που έχουμε περισσότερες.



Εικόνα 63 Σύνδεση του PV Offset Box με ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. ^[64]

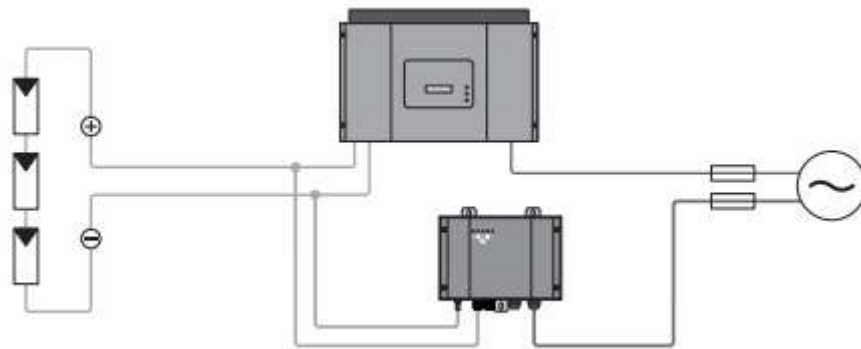
Όπως μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 63, στην περίπτωση όπου η συσκευή PV Offset Box χρησιμεύει για την αντιστάθμιση ενός φωτοβολταϊκού πάνελου ή μίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας, τότε συνδέεται εν παραλλήλω με τον αντιστροφέα Sunny Boy αφού έχουν τις ίδιες εισόδους.

Στην περίπτωση μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με παραπάνω από μία συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων (βλ. Εικόνα 64) , ο αντισταθμιστής PV Offset Box θα συνδεθεί με τους θετικούς πόλους και τον ένα αρνητικό πόλο. ^{[64], [65]} Επίσης, ο αντιστροφέας Sunny Boy θα έχει περισσότερες εισόδους (inputs), όπου οι αρνητικές εισοδοι θα γεφυρωθούν εσωτερικά.

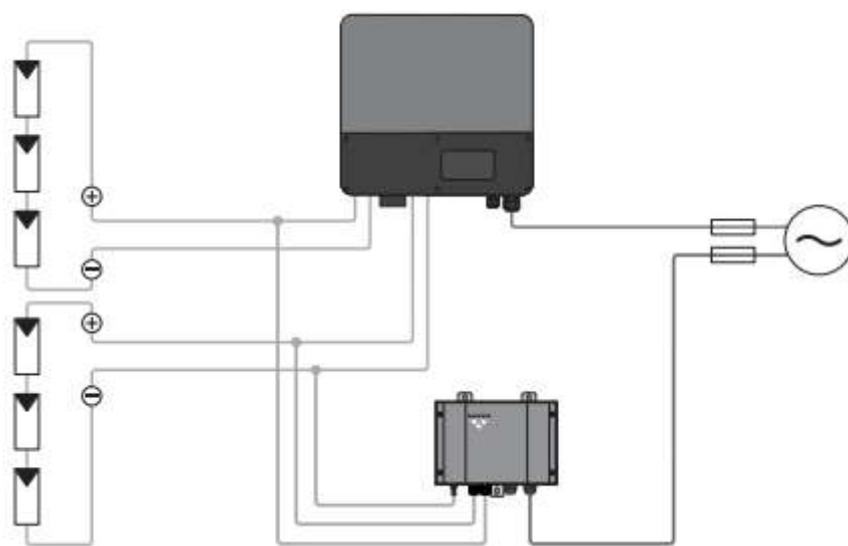


Εικόνα 64 Σύνδεση του PV Offset Box με φωτοβολταϊκά πάνελα διαφορετικών συστοιχιών. Η συσκευή συνδέεται με τον αρνητικό πόλο και τους θετικούς πόλους των δύο συστοιχιών. Η αντισταθμιστική τάση είναι έτοιμη να εφαρμοστεί μόλις οι τάσεις των δύο φωτοβολταϊκών συστοιχιών ξεπεράσουν μια ορισμένη τιμή κατωφλίου.^[64]

Η σύνδεση του αντιστροφέα PV Offset Box μίας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης η οποία αποτελείται από μία ή παραπάνω συστοιχίες γίνεται, ίσως, σαφέστερη στις παρακάτω Εικόνες 65 και 66. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να πούμε ότι δεν θα πρέπει να συνδέεται παραπάνω από μία συσκευή PV Offset Box για κάθε αντιστροφή. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση αντιστροφέα πολλών εισόδων, όπου οι αρνητικές DC εισοδοί δεν γεφυρώνονται.^[66]



Εικόνα 65 Σύνδεση της συσκευής PV Offset Box σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση μίας συστοιχίας φωτοβολταϊκών πλαισίων. ^[66]



Εικόνα 66 Σύνδεση της συσκευής PV Offset Box σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που αποτελείται από δύο συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων. ^[66]

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης PV Offset Box ως λύση πρόβλεψης του φαινομένου P.I.D. για τους αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστές είναι πολλαπλά. Καταρχάς, είναι μια μόνιμη και αξιόπιστη λύση που διατηρεί

τις δυνατότητές σε βάθος χρόνου. Επίσης, η εγκατάσταση του PV Offset Box είναι οικονομική από την άποψη τόσο του κόστους όσο και της κατανάλωσης ενέργειας. Το χαμηλό κόστος έγκειται στο ότι χρησιμοποιούνται αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή, που είναι οικονομικοί σε σχέση με αυτούς που διαθέτουν μετασχηματιστή, ενώ, επίσης, δεν απαιτείται η αγορά επιπλέον στοιχείων για να γίνει μια γείωση, η οποία θα απαιτούνταν στην περίπτωση αντιστροφών με μετασχηματιστή. Επιπρόσθετα, οι παλαιές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μπορούν να αναβαθμιστούν εύκολα και απλά. Όσον αφορά την ενεργειακή κατανάλωση από το PV Offset Box, αυτή είναι αμελητέα, αφού το ρεύμα το οποίο το διαρρέει κατά την διάρκεια της νυχτερινής λειτουργίας είναι ελάχιστο, λόγω του περιορισμού του ρεύματος λειτουργίας του ($P_{AC\ nom} < 3W$). Η συμβατότητα του PV Offset Box της SMA με αντιστροφείς άλλων κατασκευαστών είναι ακόμη ένα πλεονέκτημα. Τέλος, η λειτουργία της συσκευής είναι πολύ απλή και εντελώς αυτόματη.

Όλα αυτά που αναφέραμε καθιστούν το PV Offset Box ως ιδανική λύση αποτροπής του φαινομένου P.I.D. στην περίπτωση όπου έχουμε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστές.

Όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα, η ευεργετική λειτουργία του PV Offset Box επεκτείνεται στην χρήση του ως εμβόλιμη λύση στον περιορισμό και την ελαχιστοποίηση του φαινομένου P.I.D. , όταν πια αυτό έχει πλήξει μία φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. ^{[64], [65]}

b) Μέτρα σε επίπεδο φωτοβολταϊκού πλαισίου :

Στο επίπεδο φωτοβολταϊκού πλαισίου γίνονται, συνεχώς, προσπάθειες βελτιστοποίησης από τους επιστήμονες, προκειμένου να κατασκευαστούν φωτοβολταϊκά πλαίσια από καινοτόμα υλικά που θα λειτουργούν αποτρεπτικά στην εμφάνιση του φαινομένου P.I.D. . Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται είτε στην ενθυλάκωση είτε στο εμπρόσθιο γυαλί του φωτοβολταϊκού πανέλ και θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από μια

αντίσταση στο φαινόμενο P.I.D., για την οποία οι επιστήμονες χρησιμοποιούν τον όρο «P.I.D. resistance» και «P.I.D. resistant» για τα αντίστοιχα υλικά.^[67] Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, λοιπόν, χαρακτηρίζεται ως «P.I.D. resistant», δηλαδή, λειτουργεί αποτρεπτικά στο φαινόμενο P.I.D., όταν η απώλεια ισχύος του είναι μικρότερη από 5%^[68]. Παρακάτω, παρουσιάζονται πιο αναλυτικά οι προσπάθειες αυτές:

- Η επιλογή του γυαλιού, που χρησιμοποιείται ως δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού πλαισίου, φαίνεται να επηρεάζει την εμφάνιση του φαινομένου P.I.D., όπως έχουμε ξαναπεί. Για τον λόγο αυτό, οι επιστήμονες αναζήτησαν και συνεχίζουν να ψάχνουν νέες τεχνολογίες που θα αντικαταστήσουν το κοινό γυαλί.^{[26], [29]}

Μία από τις ανακαλύψεις των επιστημόνων αποτελεί το πυριτικό γυαλί (Quartz glass). Σύμφωνα με μία μελέτη, ένα συστατικό που περιέχεται στο γυαλί με νατρασβέστιο (soda-lime glass) , δηλαδή στο κοινό γυαλί, αλλά όχι στο πυριτικό γυαλί (Quartz glass), φαίνεται να απαιτείται για να συμβεί το ανεπιθύμητο φαινόμενο «γήρανσης» P.I.D.. Οι επιστήμονες υποθέσανε, λοιπόν, ότι το υπεύθυνο συστατικό μπορεί να είναι το νάτριο (Na). Πολλές έρευνες, ακόμη, εκτός από την αναφερθείσα μελέτη έχουν επιβεβαιώσει ότι η περιεκτικότητα σε νάτριο (Na-sodium) του εμπρόσθιου γυαλιού του φωτοβολταϊκού πάνελ αποτελεί ένα παράγοντα πρόκλησης του φαινομένου P.I.D.. Το πυριτικό γυαλί (Quartz glass), επίσης, δεν περιέχει κάποια από τα παρακάτω στοιχεία: το αλουμίνιο (Al), το μαγνήσιο (Mg) ή το ασβέστιο (Ca) τα οποία είναι παρόντα στο κοινό γυαλί σε μικρότερη, όμως, περιεκτικότητα, αλλά είναι πιθανό να συμβάλλουν στο φαινόμενο P.I.D.. Η επιλογή, λοιπόν, του πυριτικού γυαλιού (Quartz glass) για την κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ανθεκτικού στην «γήρανση» P.I.D. φαίνεται να είναι αποδοτική.^[26]

Μία άλλη τεχνολογία που έχουν προτείνει οι επιστήμονες για την αντικατάσταση του κοινού γυαλιού είναι το γυαλί που βασίζεται στο κάλιο (K) ή αλλιώς ποτάσσιο. Το συγκεκριμένο γυαλί υπόκειται σε μια χημική διαδικασία που του προσδίδει ανθεκτικότητα. Η αντικατάσταση του νατρίου (Na) από το κάλιο (K) απομακρύνει την πιθανότητα πρόκλησης του φαινομένου P.I.D. που σχετίζεται με την παρουσία νατρίου (Na).

Επιπλέον, προσδίδει κάποιες πρόσθετες θετικές ιδιότητες στο γυαλί, όπως είναι η ανθεκτικότητα στην μηχανική καταπόνηση και η σταθερότητά του σε διάφορες χημικές διαδικασίες. Μάλιστα, για τους λόγους αυτούς η χρήση του είναι διαδεδομένη στην αεροναυπηγική.^[69] Τέλος, ένα προτέρημα του νέου γυαλιού το οποίο το κάνει ελκυστικό στους επιστήμονες, ώστε να το χρησιμοποιούν ως αντικατάστατο του κοινού γυαλιού, είναι πως το κάλιο (K) βρέθηκε ότι κάνει την επιφάνεια του γυαλιού να είναι λιγότερο υδρόφιλη και, επομένως, μειώνει την υδαρότητα. Η τελευταία διαπίστωση είναι σημαντική, καθώς εμποδίζει την διάδοση των διαφευγόντων ρευμάτων.^[29]

- Η επιλογή του υλικού ενθυλάκωσης στα φωτοβολταϊκά πανέλα έχει αποδειχθεί ότι παίζει, επίσης, έναν σημαντικό ρόλο στην πρόκληση του φαινομένου P.I.D..^{[26], [29]} Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου (Si), συνήθως, ενθυλακώνονται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια με οξικό αιθυλοβινύλιο (γνωστό ως EVA - ethylene vinyl acetate). Το οξικό αιθυλοβινύλιο (EVA) είναι τόσο διαδεδομένο λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων του, όπως η μηχανική του αντοχή, η προστασία που παρέχει απέναντι στην έκθεση στους περιβαλλοντικούς παράγοντες και η ηλεκτρική απομόνωση. Καθώς, όμως, φαίνεται να συμβάλλει δραστικά στο φαινόμενο P.I.D., έχουν προταθεί στην εποχή μας διάφορα μέσα για την αντικατάστασή του.^[71] Πολλά ερευνητικά εργαστήρια σε όλον τον κόσμο έχουν αναδείξει νέα τέτοια υλικά αντικατάστασης του EVA, όπως είναι π.χ. τα *ιονομερή (IO)* ή η *πολυ-ολεφίνη (poly-olefin)*.^{[26], [29]} Τα τελευταία εμποδίζουν την ροή ιόντων διαμέσου του υλικού ενθυλάκωσης, μειώνουν τα διαφεύγοντα ρεύματα και χαρακτηρίζονται από μία *ειδική αντίσταση της επιφάνειας* – γνωστή ως «*volume resistivity*» με μονάδα $\Omega \text{ cm}$.^[67]

Η ειδική αντίσταση της επιφάνειας είναι η παράμετρος κλειδί για το εάν ένα υποκατάστατο του υλικού ενθυλάκωσης προστατεύει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο από το φαινόμενο P.I.D.. Μία υψηλή ειδική αντίσταση θα μειώσει την μαζική μεταφορά ιόντων από το εμπρόσθιο γυαλί προς την φωτοβολταϊκή κυψέλη. Αυτό οδηγεί σε ένα λιγότερο αγωγίμο υλικό ενθυλάκωσης και ένα χαμηλότερο ρεύμα διαφυγής. Επομένως, η ειδική αντίσταση της επιφάνειας είναι ένας παράγοντας

επιλογής. Στον Πίνακα 5 καταγράφονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης που παρουσιάζουν διάφορα υλικά. Όπως φαίνεται, το πυρίτιο (silicone), η πολυ-ολεφίνη (poly-olefin) και το ιονομερές (IO) έχουν τις υψηλότερες τιμές (6.0×10^{15} , 2.0×10^{15} και $7.1 \times 10^{15} \Omega \text{ cm}$) εν αντιθέσει με το ευρέως χρησιμοποιούμενο οξικό αιθυλοβινύλιο (EVA) που έχει μικρή τιμή ($1.0 \times 10^{14} \Omega \text{ cm}$). Ωστόσο, η χρήση της σιλικόνης ως υλικό ενθυλάκωσης θα συνεπαγόταν μια τροποποίηση σε όλη την γραμμή παραγωγής και για τον λόγο αυτό δεν προτιμάται.

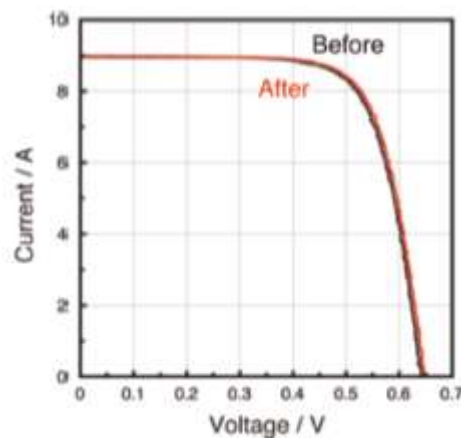
Στον ίδιο Πίνακα παρατηρούμε ότι η πολυ-ολεφίνη (poly-olefin) και το ιονομερές (IO) έχουν μικρό ρυθμό διαπερατότητας υδρατμών (water vapour transmission rate, WVTR, με μονάδα $\text{g}/(\text{m}^2\text{-day})$), 3.30 και 0.19 $\text{g}/(\text{m}^2\text{-day})$ αντίστοιχα, το οποίο σημαίνει ότι η εισχώρηση υγρασίας μειώνεται πάρα πολύ όταν χρησιμοποιούνται στην ενθυλάκωση. Μία άλλη, ακόμη, θετική ιδιότητά τους είναι ότι διατηρούν, περίπου, την διαφάνεια του οξικού αιθυλοβινυλίου (EVA).

Encapsulant material	Volume resistivity ($\Omega \text{ cm}$)	Transmittance (%)	WVTR ($\text{g}/(\text{m}^2\text{-day})$)
EVA	1.0×10^{14}	91.0	34.00
PVB	4.8×10^{12}	91.0	40.05
TPU	2.7×10^{14}	90.0	
Silicone	6.0×10^{15}	98.9	
Polyolefin	2.0×10^{15}	92.0	3.30
Ionomer	7.1×10^{15}	93.4	0.19

Πίνακας 5 Ηλεκτρικές, οπτικές ιδιότητες και η σχέση με την υγρασία διαφόρων προτεινόμενων υλικών ενθυλάκωσης. ^[67]

Το ιονομερές (IO), το οποίο αναφέραμε, τοποθετείται ανάμεσα στο γυαλί και το οξικό αιθυλοβινύλιο (EVA) ως στρώμα που εμποδίζει την διάχυση ιόντων και δεν υποκαθιστά πλήρως το οξικό αιθυλοβινύλιο (EVA). ^[67] Έχει διαπιστωθεί ότι η χρήση ενός ιονομερούς (IO) στην ενθυλάκωση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου πυριτίου (Si) p-τύπου προσδίδει στο πλαίσιο μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και αντίσταση στο

φαινόμενο «γήρανσης» P.I.D. συγκριτικά με το οξικό αιθυλοβινύλιο (EVA). Περαιτέρω πειράματα έδειξαν, επιπλέον, ότι η χρήση ιονομερούς (IO) στα πάνελα πυριτίου (Si) n-τύπου μπροστινής επαφής (FJ, front junction), εκτός από τα πάνελα που αναφέραμε πρωτύτερα, συμβάλλει το ίδιο αποτρεπτικά στην εμφάνιση του φαινομένου P.I.D.. Η παρατήρηση αυτή αναπαριστάται πετυχημένα στο διάγραμμα των χαρακτηριστικών $I-V$, (βλ. Διάγραμμα 22). Οι χαρακτηριστικές $I-V$ ελήφθησαν πριν και μετά την δοκιμή ενός FJ πλαισίου πυριτίου n- τύπου με ιονομερές (IO) υπό συνθήκες τάσης -1000V σε θερμοκρασία 85°C για δύο εβδομάδες – τυποποιημένες συνθήκες που χρησιμοποιούνται σε ένα τεστ ανθεκτικότητας στο φαινόμενο P.I.D.. Μετά το τέλος των δύο εβδομάδων δεν διαπιστώθηκε καμία υποτίμηση της απόδοσης ισχύος στα φωτοβολταϊκά πλαίσια που περιείχαν ενθυλάκωση με ιονομερές (IO). Το συμπέρασμα είναι ότι η ενθυλάκωση με ιονομερές (IO) αποτρέπει αποτελεσματικά το φαινόμενο P.I.D. τόσο στα φωτοβολταϊκά πάνελα p-τύπου όσο και στα φωτοβολταϊκά πάνελα n-τύπου. ^[71]



Διάγραμμα 22 Οι χαρακτηριστικές $I-V$ ενός συνήθους φωτοβολταϊκού πλαισίου FJ Si n-τύπου πριν και μετά την δοκιμή ανθεκτικότητας στο φαινόμενο P.I.D. (υποβολή σε συνθήκες τάσης -1000V στους 85°C για 2 εβδομάδες). ^[71]

Όπως προαναφέραμε, η βιομηχανία φωτοβολταϊκών πλαισίων έχει ανακαλύψει άλλο ένα υλικό με υψηλή ειδική αντίσταση, κοινώς γνωστό

ως πολυ-ολεφίνη (*poly-olefin*, C_nH_{2n}). Σε αντίθεση με το ιονομερές (ΙΟ), η πολυ-ολεφίνη μπορεί να αντικαταστήσει εντελώς το οξικό αιθυλοβινύλιο (EVA) στην ενθυλάκωση των φωτοβολταϊκών κυψελών. Εναλλακτικά, μπορούν να γίνουν συνδυασμοί ενθυλάκωσης, όπως δύο φύλλα πολύ-ολεφίνης ή ένα φύλλο πολύ-ολεφίνης κοντά στο γυαλί και ένα φύλλο οξικού αιθυλοβινυλίου κοντά στο πίσω επίστρωμα. Τα πειράματα που έχουν γίνει για να διαπιστωθεί εάν τα νέα υλικά ενθυλάκωσης είναι ανθεκτικά στο φαινόμενο «γήρανσης» P.I.D. έχουν δείξει ότι οι χαρακτηριστικές I-V και οι τιμές των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως I_{sc} , των τάσεων ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} , των μέγιστων αποδόσεων ισχύος P_{mp} και των μέγιστων σημείων ρεύματος I_{mp} και τάσης V_{mp} των φωτοβολταϊκών πανέλων-δειγμάτων παραμένουν σχεδόν ίδιες πριν και μετά την εφαρμογή υψηλής τάσης (βλ. Πίνακες 6 και 7). Συγκεκριμένα, οι χαρακτηριστικές τους I-V δείχνουν μία μεταβολή στην απόδοση ισχύος μικρότερη από 5%, που είναι το κριτήριο για το εάν ένα υλικό αντιστέκεται στο φαινόμενο P.I.D. – «P.I.D. resistant» - ή με άλλα λόγια είναι ικανό να το αποτρέψει.

	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	P_{mp} (W)	FF (%)
<i>Before PID test</i>						
1-Ref.	8.85	37.82	8.23	30.61	251.92	75.25
Module 3	8.81	37.85	8.19	30.60	250.65	75.18
<i>After PID test</i>						
1-Ref.	8.83	37.74	8.25	30.44	251.21	75.37
Module 3	8.85	37.70	8.23	30.48	251.01	75.24
<i>Relative difference</i>						
1-Ref.					- 0.28%	
Module 3					+ 0.14%	

Πίνακας 6 Τα στοιχεία της χαρακτηριστικής I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς (1-ref) και ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με ενθυλάκωση πολύ-ολεφίνης (Module 3) πριν και μετά την υποβολή σε συνθήκες δοκιμής για την διαπίστωση εμφάνισης του φαινομένου P.I.D..^[67]

	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	P_{mp} (W)	FF (%)
<i>Before PID test</i>						
1-Ref.	8.83	37.64	8.18	30.73	251.24	75.61
Module-7	8.85	37.90	8.26	30.70	253.56	75.58
<i>After PID test</i>						
1-Ref.	8.82	37.70	8.24	30.63	252.28	75.90
Module-7	8.93	37.75	8.22	30.54	251.07	74.51
<i>Relative differences</i>						
1-Ref.					+ 0.41%	
Module-7					- 0.98%	

Πίνακας 7 Τα στοιχεία της χαρακτηριστικής I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς (1-ref) και ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με ενθυλάκωση πολύ-ολεφίνης-EVA (Module 7) πριν και μετά την υποβολή σε συνθήκες δοκιμής για την διαπίστωση εμφάνισης του φαινομένου P.I.D..^[67]

Η πολυ-ολεφίνη, επομένως, είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό το οποίο λειτουργεί επιτυχώς ως υλικό ενθυλάκωσης στην αποτροπή του φαινομένου P.I.D. στα φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si). Με άλλα λόγια, η πολυ-ολεφίνη μπορεί να εμποδίσει αποτελεσματικά την μετακίνηση ιόντων από το κοινό γυαλί προς τις επιφάνειες των φωτοβολταϊκών κυψελών. Το ίδιο ισχύει και για τους συνδυασμούς πολυ-ολεφίνη/ πολυ-ολεφίνη και πολυ-ολεφίνη/ EVA.

Κάποιες πολύ σημαντικές ιδιότητες της πολυ-ολεφίνης που αξίζει να αναφέρουμε είναι ότι δεν απαιτεί κάποια αλλαγή στην γραμμή κατασκευής του φωτοβολταϊκού πλαισίου, έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και δεν χρειάζεται ειδικές συνθήκες στρωματοποίησης. Οι δύο τελευταίες ιδιότητες επιτρέπουν την εξοικονόμηση ενέργειας και αυξάνουν την εγγύηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, αντίστοιχα. Όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με ενθυλάκωση συνδυασμού πολυ-ολεφίνης/ πολυ-ολεφίνης ή πολυ-ολεφίνης/ EVA οι παρούσες βιομηχανικές γραμμές παραγωγής μπορούν να τα κατασκευάσουν χωρίς κάποια αλλαγή στα χρησιμοποιούμενα μηχανήματα. Άλλο πλεονέκτημα των άνω συνδυασμών είναι ότι οι συνθήκες στρωματοποίησης μπορούν να γίνουν πιο απλές, κάτι που οδηγεί σε μειωμένο κόστος παραγωγής.^[67]

- Τέλος, ένας τρόπος αποτροπής του φαινομένου P.I.D. είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν μειωμένης συγκέντρωσης νερού και, γενικότερα, υγρασίας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η υγρασία, ως γνωστόν, διευκολύνει τα ρεύματα διαφυγής. Προκειμένου να αποφευχθούν τα ρεύματα διαφυγής πρέπει να επιδιώκεται η απουσία ή η μικρή συγκέντρωση υγρασίας. ^[29]

c) Μέτρα σε επίπεδο φωτοβολταϊκής κυψέλης :

Όπως γνωρίζουμε, το αντι-ανακλαστικό περίβλημα (anti-reflecting coating, ARC) αυξάνει την σύλληψη του φωτός και, επομένως, την μετατροπή της ενέργειας ενός φωτοβολταϊκού πανέλου. Η επιστημονική έρευνα, όμως, έχει δείξει ότι οι ιδιότητες του αντι-ανακλαστικού περιβλήματος (ARC) είναι ένας αιτιολογικός παράγοντας εμφάνισης του φαινομένου P.I.D.. Το γεγονός αυτό τού προσδίδει έναν σημαντικό ρόλο στην αποτροπή του φαινομένου «γήρανσης» των φωτοβολταϊκών πανέλων λόγω υψηλού δυναμικού DC. ^[26] Οι επιστήμονες, λοιπόν, έχουν προτείνει κάποια μέτρα πρόληψης του φαινομένου P.I.D. που σχετίζονται με το περίβλημα αυτό. Τα μέτρα αυτά είναι :

- Το αντι-ανακλαστικό επίστρωμα (ARC) πρέπει να βρίσκεται σε συγκεκριμένη περιοχή και να έχει συγκεκριμένες διαστάσεις. Έχει παρατηρηθεί ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του αντι-ανακλαστικού στρώματος (ARC) τόσο μεγαλύτερη είναι η ειδική αντίσταση της κυψέλης στην εμφάνιση του φαινομένου P.I.D.. Από την άλλη, η μεταβολή στο πλάτος είναι πιθανό να μειώσει την μετάβαση του φωτός ή και αντίστροφα. Άρα ένα μέτρο πρόληψης του φαινομένου P.I.D. είναι η επιλογή του κατάλληλου εύρους του αντι-ανακλαστικού περιβλήματος (ARC), χωρίς, όμως, να προκαλείται, ταυτόχρονα, πρόβλημα στην μετάβαση του φωτός. ^[29]

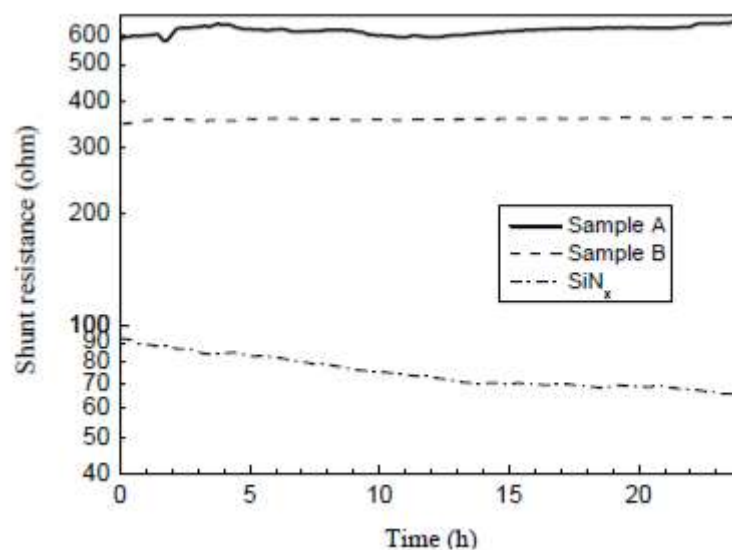
- Ένα καινούριο μέτρο πρόληψης του φαινομένου P.I.D. είναι η χρήση ενός διπλού στρώματος αντι-ανακλαστικού περιβλήματος (ARC) στις φωτοβολταϊκές κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου (Si), το οποίο αυξάνει κατά πολύ την ανθεκτικότητά τους απέναντι στο φαινόμενο. Σύμφωνα με μία πρόσφατη μελέτη επιστημόνων η εισαγωγή ενός λεπτού στρώματος SiO_yN_x ανάμεσα στο στρώμα SiN_x και το υπόστρωμα Si βελτιώνει την χημική ουδετεροποίηση της επιφάνειας. Παράλληλα, το νέο αυτό αντι-ανακλαστικό περίβλημα (ARC) μπορεί να επιφέρει ένα σταθερό κέρδος στην απόδοση μετατροπής της ενέργειας συγκριτικά με την φωτοβολταϊκή κυψέλη που καλύπτεται από ένα μονό στρώμα SiN_x . Τα συμπεράσματα αυτά φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 8. Στον Πίνακα 8 καταγράφεται η ηλεκτρική συμπεριφορά τριών ομάδων φωτοβολταϊκών κυψελών μονο-κρυσταλλικού πυριτίου, δύο ομάδων καλυμμένων με διπλό επίστρωμα $\text{SiO}_y\text{N}_x/\text{SiN}_x$ αλλά διαφορετικού πάχους και μίας με μονό επίστρωμα SiN_x που λειτουργεί ως μονάδα αναφοράς. Η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων που περιβάλλονται από την στοίβα $\text{SiO}_y\text{N}_x/\text{SiN}_x$ είναι 17.2% ανεξάρτητα από το πάχος του στρώματος. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μονού στρώματος SiN_x επιφέρουν απόδοση 17.1%. Φαίνεται, λοιπόν, ότι η εισαγωγή του διπλού στρώματος $\text{SiO}_y\text{N}_x/\text{SiN}_x$ ως αντι-ανακλαστικού περιβλήματος (ARC) αντί του μονού στρώματος SiN_x μπορεί να επιτύχει ένα κέρδος 0.1% στην απόδοση μετατροπής. Ακόμη, η διαφορά στο πάχος των διπλών στρωμάτων $\text{SiO}_y\text{N}_x/\text{SiN}_x$ έχει περιορισμένη επίδραση στην απόδοση μετατροπής των φωτοβολταϊκών κυψελών.

Sample	Rf Power density (mW/cm ²)	SiO_yN_x thickness (nm)	SiN_x thickness (nm)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
A	47	8	72	623	34.8	79.2	17.2
B	47	30	50	623	34.8	79.4	17.2
Single SiN_x film	58	/	80	621	34.7	79.4	17.1

Πίνακας 8 Οι ηλεκτρικές παράμετροι φωτοβολταϊκής κυψέλης μονο-κρυσταλλικού πυριτίου (Si) με στοίβα $\text{SiO}_y\text{N}_x/\text{SiN}_x$ συγκριτικά με τις ηλεκτρικές παραμέτρους φωτοβολταϊκής κυψέλης μονού στρώματος SiN_x που θεωρείται

κυψέλη αναφοράς. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από την μέση τιμή δέκα φωτοβολταϊκών κυψελών για κάθε ομάδα. ^[72]

Το πιο σημαντικό, όμως, είναι ότι η στοίβα $\text{SiO}_y\text{N}_x/\text{SiN}_x$ αυξάνει την ειδική αντίσταση των φωτοβολταϊκών κυψελών μονο-κρυσταλλικών πυριτίου (Si) στο φαινόμενο P.I.D., καθώς σε δοκιμή ανθεκτικότητας απέναντι στο φαινόμενο P.I.D. - «P.I.D. sensitivity test» - παρατηρήθηκε σχεδόν μηδενική υποτίμηση της παράλληλης αντίστασης R_{sh} (shunt resistance) μετά από υποβολή των κυψελών. Η δοκιμή έγινε υπό συνθήκες τάσης -1000V και θερμοκρασίας 60°C για 24 ώρες. Αντίθετα, η παράλληλη αντίσταση R_{sh} φωτοβολταϊκών κυψελών μονο-κρυσταλλικού πυριτίου (Si) με μονό στρώμα SiN_x υποτιμήθηκε κατά 30%. Οι διαπιστώσεις αυτές φαίνονται καθαρά στο Διάγραμμα 23, όπου αναπαριστάται η παράλληλη αντίσταση R_{sh} σε συνάρτηση με τον χρόνο. Από τα αποτελέσματα γίνεται σαφές ότι η εισαγωγή ενός στρώματος SiO_yN_x βελτιώνει την ειδική αντίσταση των φωτοβολταϊκών κυψελών μονο-κρυσταλλικού πυριτίου (Si) απέναντι στο φαινόμενο P.I.D.. Στο διάγραμμα δεν παρατηρείται κάποια διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα των φωτοβολταϊκών κυψελών με στρώματα SiO_yN_x πάχους 8mm και 30mm μετά την δοκιμή των 24 ωρών.



Διάγραμμα 23 Διάγραμμα της παράλληλης αντίστασης R_{sh} σε συνάρτηση με τον χρόνο για τρία δείγματα φωτοβολταϊκών κυψελών υπό συνθήκες υψηλής τάσης -1000V και θερμοκρασίας 60°C. Τα δείγματα A και B αποτελούνται από αντι-ανακλαστικό περίβλημα (ARC) SiO_yN_x / SiN_x πάχους 8mm και 30mm αντίστοιχα. Το τρίτο δείγμα αποτελείται από περίβλημα SiN_x .^[72]

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η εισαγωγή ενός στρώματος SiO_yN_x ανάμεσα στην διεπιφάνεια SiN_x / Si των φωτοβολταϊκών κυψελών βελτιώνει την ηλεκτρική συμπεριφορά και έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου P.I.D.. Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι ο λόγος της υψηλής αντίστασης απέναντι στο φαινόμενο P.I.D. είναι η παγίδευση φορέων φορτίου εντός του διηλεκτρικού στρώματος.^[72]

17. Η αναστρέψιμη και η μη αναστρέψιμη μορφή του P.I.D. – Λήψη μέτρων για τον περιορισμό του φαινομένου P.I.D. και την επανόρθωση των βλαφθέντων φωτοβολταϊκών πλαισίων

17.1 Αναστρέψιμο και μη αναστρέψιμο φαινόμενο P.I.D.

Όπως αναγράφεται στον τίτλο, η βλάβη που επιφέρει το φαινόμενο P.I.D. μπορεί άλλοτε να είναι αναστρέψιμη και άλλοτε όχι. Στην πρώτη περίπτωση το φαινόμενο μπορεί να αναστραφεί και να εξαφανιστεί ή να μειωθεί στο ελάχιστο. Στην μη αναστρέψιμη μορφή του, αυτό δεν είναι δυνατόν και η βλάβη που έχει επέλθει στο σύστημά μας είναι μόνιμη. Το αν το φαινόμενο P.I.D. είναι αναστρέψιμο ή μη εξαρτάται από τους λόγους που το προκαλούν και την έκταση της φθοράς. ^[26]

Η αναστρέψιμη μορφή του φαινομένου P.I.D. είναι γνωστή ως « Πόλωση της Επιφάνειας» («Surface Polarization») ή ως «Φαινόμενο της Πόλωσης» (« Polarization Effect») και ανακαλύφθηκε το 2005 από την εταιρεία SunPower ^[75]. Σύμφωνα με ανακοίνωση της εταιρείας που ακολούθησε την σημαντική αυτή ανακάλυψη “το νέο αυτό φαινόμενο, που ονομάζεται «πόλωση της επιφάνειας», δημιουργεί μία μη καταστρεπτική και αναστρέψιμη συσσώρευση στατικού φορτίου στην επιφάνεια φωτοβολταϊκών κυψελών που χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση”. Η πόλωση της επιφάνειας έχει μελετηθεί και καταγραφεί από τότε από την εταιρεία Solon ^[74] και πολλούς άλλους και, γενικά, σχετίζεται με τις φωτοβολταϊκές μονάδες κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si). ^{[26], [29]} Το φαινόμενο P.I.D. , λοιπόν, μπορεί να αναστραφεί όταν έχουμε πόλωση στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, δηλαδή συσσώρευση φορτίων που οδηγούν σε αυξημένα διαφεύγοντα ρεύματα. Η ένταση του διαφεύγοντος ρεύματος εξαρτάται, όπως έχουμε πει, από την συνδεσμολογία γείωσης της φωτοβολταϊκής διάταξης. Τα συσσωρευμένα φορτία παρεμποδίζουν την ικανότητα παραγωγής της φωτοβολταϊκής κυψέλης. Παρόλο αυτά, μπορεί να υπάρξει έλεγχος και να αναστραφεί η συσσώρευση φορτίων λαμβάνοντας τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης. ^[29] Βέβαια, η αναστροφή του φαινομένου εξαρτάται και από το ύψος της απώλειας ισχύος και την έκταση της βλάβης την χρονική στιγμή που λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα. Φωτοβολταϊκά πλαίσια με ελαφριές απώλειες ισχύος μικρότερες από 10% μπορούν γενικά να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση, όμως όταν η απώλεια ισχύος είναι μεγαλύτερη από 30% δεν αναμένεται να υπάρξει πλήρης επαναφορά στην αρχική κατάσταση. ^[28]

Η εμφάνιση του φαινομένου P.I.D. μπορεί να είναι, όμως, μη αναστρέψιμη, κάτι που καθιστά το φαινόμενο στην περίπτωση αυτή πολύ σοβαρό και απαιτείται έγκαιρη διάγνωση.^[26] Η μη αναστρέψιμη μορφή του φαινομένου P.I.D. συναντάται, κυρίως, στις φωτοβολταϊκές κυψέλες με λεπτές μεμβράνες (υμένια) (thin films) και οφείλεται στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην ηλεκτρο-διάβρωση του διαπερατού αγώγιμου οξειδίου (Transparent conducting oxide, TCO)^[29] και/ή την αποκόλληση υμενίου.^[26] Αυτό παρατηρείται κυρίως στην αρνητική πλευρά της συστοιχίας μιας φωτοβολταϊκής μονάδας. Καθώς ο χρόνος περνά, η φωτοβολταϊκή κυψέλη χάνει βαθμιαία την ικανότητα να μεταφέρει τους φορείς φορτίου και υποβαθμίζεται ολοένα και περισσότερο.^[73] Όπως προείπαμε, τα μη αναστρέψιμα αυτά χαρακτηριστικά καταγράφηκαν, ως επί το πλείστον, στις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών υμενίων (thin films) και, ως εκ τούτου, δεν αποτελούν σημείο ενδιαφέροντος για τους κατασκευαστές φωτοβολταϊκών κυψελών κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si).^[26]

17.2 Μέτρα αντιμετώπισης και μετριασμού του φαινομένου P.I.D.

Όσον αφορά την αναστρέψιμη μορφή του φαινομένου P.I.D. και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που έχουν υποστεί υποβάθμιση της απόδοσής τους λόγω του φαινομένου αυτού, η επιλογή των κατάλληλων μέτρων μετριασμού της βλάβης διαφέρει από εγκατάσταση σε εγκατάσταση. Στα μέτρα αυτά μπορούν να συμπεριλαμβάνονται :

- Αλλαγές στην ηλεκτρική διάταξη και συνδεσμολογία της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης
- Αντικατάσταση των φωτοβολταϊκών πανέλων με καινούρια
- Εγκατάσταση επιπρόσθετου εξοπλισμού, ή
- Συνδυασμό των παραπάνω

Δύο πολύ διαδεδομένοι τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου P.I.D., στους οποίους έχουμε προαναφερθεί εκτενώς καθώς χρησιμεύουν, ταυτόχρονα, ως μέτρα πρόληψης, είναι : α) η γείωση του ενός πόλου του αναστροφέα της φωτοβολταϊκής

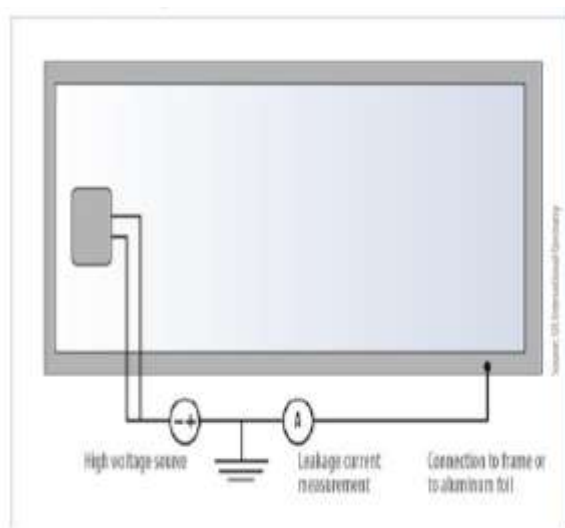
συστοιχίας και β) η εγκατάσταση και χρήση αντισταθμιστών φορτίου, όπως το PV Offset Box. Η επιλογή ανάμεσα στις δύο παραπάνω μεθόδους εξαρτάται, όπως έχουμε πει, από τον σχεδιασμό του φωτοβολταϊκού συστήματος αλλά, ακόμη, από την συμβατότητα και το κόστος. Οποιαδήποτε επιλογή θα πρέπει να έχει την σύμφωνη γνώμη του κατασκευαστή του αναστροφέα, του κατασκευαστή των φωτοβολταϊκών πλαισίων και του αντισυμβαλλόμενου της συμφωνίας ενεργειακής απόδοσης (energy performance contracting, EPC), έτσι ώστε να μην υπάρξει ακύρωση των εγγυήσεων λειτουργίας του εξοπλισμού και του συστήματος.

Στην περίπτωση μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών πλαισίων το ένα άκρο της οποίας έχει πολύ υψηλό θετικό ή αρνητικό δυναμικό DC (“voltage stress”), ένας τρόπος μετριασμού του φαινομένου P.I.D. είναι η γείωση του κατάλληλου πόλου του αναστροφέα εφόσον αυτός εμπεριέχει μετασχηματιστή. Ο τρόπος αυτός έχει παρουσιαστεί αναλυτικά πρωτότερα στα μέτρα πρόληψης του φαινομένου P.I.D. όπου και μπορούμε να ανατρέξουμε. Μέσω της γείωσης, όλα τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποκτούν είτε θετική είτε αρνητική τάση με αποτέλεσμα η κίνηση των φορέων φορτίου να γίνεται πάντα προς μία κατεύθυνση, χωρίς να υπάρχουν διαφεύγοντα ρεύματα. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ αποδοτική και, συνήθως, μπορεί σχεδόν να εξαφανίσει την ύπαρξη του φαινομένου P.I.D..

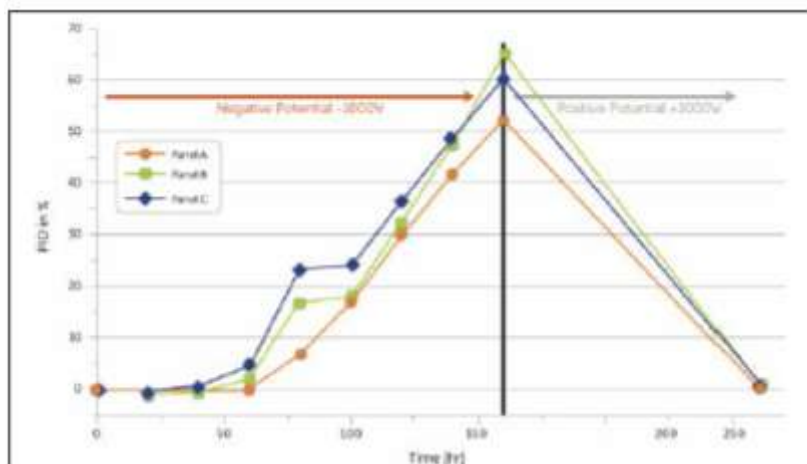
Όπως έχει ήδη ειπωθεί, ένας αντισταθμιστής φορτίου, όπως το PV Offset Box, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων στην οποία ο αναστροφέας δεν διαθέτει μετασχηματιστή και, επομένως, δεν δύναται να γειωθεί. Η λειτουργία του αντισταθμιστή φορτίου βασίζεται στην εφαρμογή π.χ. υψηλού θετικού δυναμικού στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, ώστε να αποφορτιστεί το αρνητικό δυναμικό, δηλαδή εφαρμόζεται πάντα αντίθετη τάση ώστε να λειτουργήσει ως αντιστάθμιση. Η διαδικασία λαμβάνει τόπο κατά την διάρκεια της νύχτας και αναστρέφει το φαινόμενο της πόλωσης της επιφάνειας (“polarization effect”) που εμφανίζεται κατά την διάρκεια λειτουργίας. Ένας αντισταθμιστής φορτίου δεν μπορεί να επαναφέρει πλήρως ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο στην αρχική του λειτουργία. Είναι πολύ πιθανόν, λοιπόν, να παραμείνει στο τέλος της διαδικασίας μετριασμού του φαινομένου P.I.D. ένα ποσοστό απώλειας ισχύος 5%. Παρόλο αυτά, στο επίπεδο του συστήματος κάτι τέτοιο περνά απαρατήρητο και δεν είναι άξιο αναφοράς. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι η μέθοδος αυτή έχει επιδείξει ιδιαίτερη επιτυχία ειδικά στην ανάκαμψη φωτοβολταϊκών πλαισίων που έχουν υποστεί επίδραση του φαινομένου P.I.D. για μια μακρά χρονική περίοδο. Με άλλα λόγια είναι μία μέθοδος αρκετά αποτελεσματική για εκείνη την

κατηγορία φωτοβολταϊκών πανέλων που έχουν καταβληθεί από μία σοβαρή επιρροή του φαινομένου P.I.D.. Βέβαια, τα πανέλα εκείνα που παρουσιάζουν απώλεια ισχύος σε ποσοστό που υπερβαίνει το 50%, δεν αναμένεται να επανακτήσουν πλήρως την αρχική τους απόδοση. ^[28]

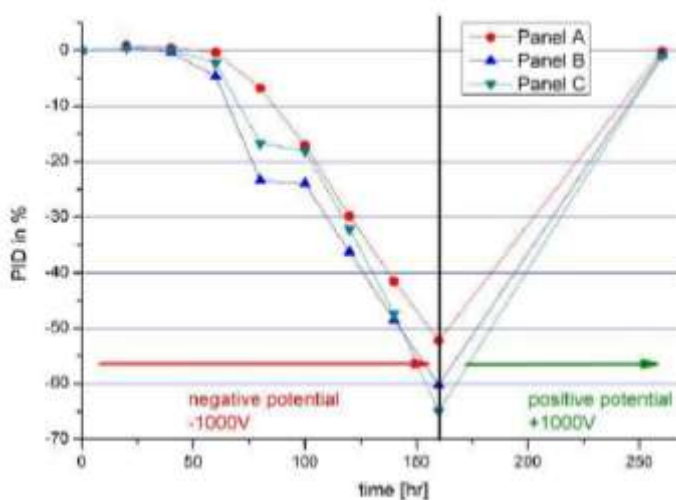
Εάν η διαδικασία επαναφοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων πρέπει να γίνει γρήγορα, αντί της γείωσης του κατάλληλου πόλου, μία εναλλακτική μέθοδος είναι η βραχυκύκλωση του θετικού και του αρνητικού πόλου και, κατόπιν, η χρήση εξωτερικής πηγής τάσης 1000 volts (βλ. Εικόνα 67). Για φωτοβολταϊκά πανέλα με δίσκους (wafers) νοθευμένους με ανιόντα απαιτείται τάση -1000 volts, ενώ πανέλα με δίσκους νοθευμένους με κατιόντα απαιτούν τάση +1000 volts. ^[73] Με τον τρόπο αυτόν σταματά και αναστρέφεται η καταστροφική δράση του φαινομένου της «πόλωσης της επιφάνειας» με αντιστροφή της πόλωσης μέσω εφαρμογής υψηλής αντίθετης τάσης. Στα Διαγράμματα (24) και (25) καταγράφεται η αντιμετώπιση του φαινομένου P.I.D. μέσω της επιβολής υψηλής θετικής τάσης. ^{[26], [29]}



Εικόνα 67 Βραχυκύκλωση του θετικού και αρνητικού πόλου και εφαρμογή υψηλής τάσης μέσω εξωτερικής πηγής. ^[29]



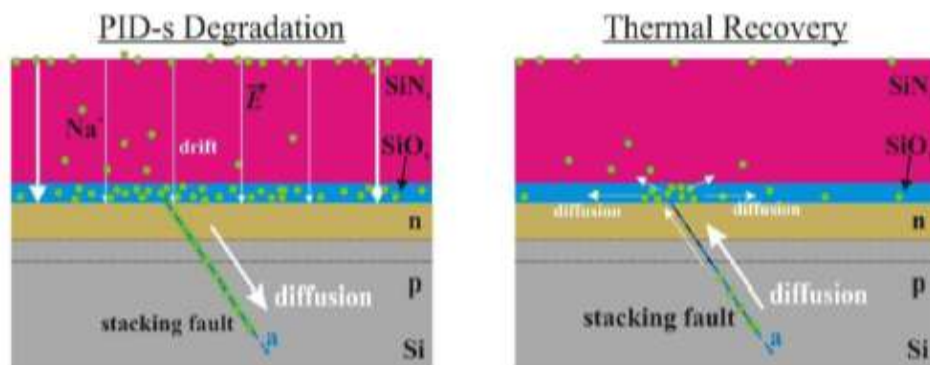
Διάγραμμα 24 Το φαινόμενο «πόλωσης της επιφάνειας» στα φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) μπορεί να περιοριστεί με την αντιστροφή της εφαρμοζόμενης τάσης. ^[26] [Πηγή: S.Pingel ^[74]].



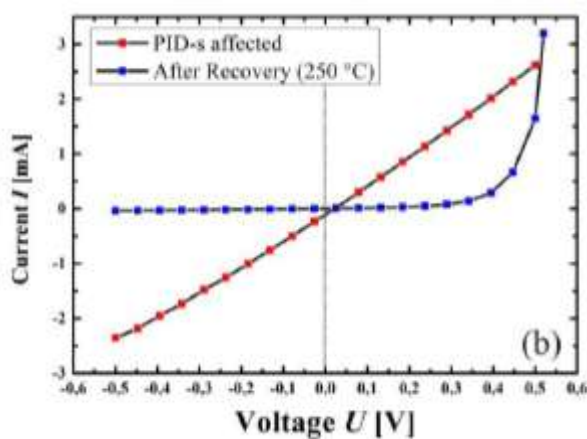
Διάγραμμα 25 Περιορισμός της βλάβης λόγω του φαινομένου P.I.D. μέσω της εφαρμογής υψηλής θετικής τάσης. ^[29]

Μία αποτελεσματική μέθοδος αντιμετώπισης του φαινομένου P.I.D. και διόρθωσης της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων που έχουν υποστεί βλάβη λόγω αυτού είναι η μέθοδος με χρήση θερμότητας. Για την κατανόηση του τρόπου

λειτουργίας της μεθόδου αυτής, θα περιγραφθεί η αντιμετώπιση του φαινομένου P.I.D.-s, της πιο συχνής μορφής με την οποία συναντάμε το φαινόμενο P.I.D.. Στην Εικόνα 68, όπου απεικονίζεται η τομή μας φωτοβολταϊκής κυψέλης, φαίνεται μια διάχυση ιόντων νατρίου (Na) μέσω της διεπιφάνειας SiN/Si του γυαλιού προς το εσωτερικό του στρώματος πυριτίου (Si) και τοποθέτησή τους στα σημεία εκείνα που υπάρχουν ατέλειες στο στρώμα. Η διάχυση αυτή είναι που προκαλεί το φαινόμενο P.I.D.-s. Η διαδικασία αντιστροφής του φαινομένου P.I.D.-s και επαναφοράς των φωτοβολταϊκών στοιχείων στην αρχική κατάσταση λειτουργίας τους επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής σε αυτά θερμοκρασίας ύψους 250°C. Μετά την χρήση θερμότητας το νάτριο (Na) ακολουθεί την αντίθετη κατεύθυνση της αρχικής διάχυσης, αφήνοντας πίσω μία «καθαρή» ατέλεια του στρώματος, που δεν είναι ηλεκτρικά αγωγίμη. Το Διάγραμμα 26 αναπαριστά την καμπύλη I-V ενός τμήματος μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης. Κατά την διάρκεια παρουσίας του φαινομένου P.I.D., παρατηρείται μία ωμική εξασθένιση που οδηγεί στην γραμμική χαρακτηριστική I-V γύρω από το 0 (κόκκινη γραμμή). Μετά το τέλος εφαρμογής της υψηλής θερμοκρασίας η γραμμική συμπεριφορά εξαφανίζεται και η χαρακτηριστική I-V δείχνει την τυπική συμπεριφορά διόδου, όπως ήταν πριν την υποτίμηση λόγω του P.I.D. φαινομένου (μπλε καμπύλη).^[77] Η επανόρθωση των φωτοβολταϊκών πανέλων με χρήση της θερμικής μεθόδου μπορεί να φτάσει κοντά στο 100%,^[29] ανάλογα την συγκέντρωση νατρίου (Na) στα σημεία ατέλειας του στρώματος,^[77] την κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα πάνελ και την έκταση της βλάβης που έχουν υποστεί.^[29] Η μέθοδος αυτή είναι μια πολύ ταχεία διαδικασία, γεγονός πολύ θετικό. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι κάποιες φορές η καταπόνηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των υλικών τους λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την μακρόχρονη αντοχή τους.



Εικόνα 68 Σχηματική αναπαράσταση της υποτίμησης της απόδοσης λόγω του φαινομένου P.I.D.-s και της θερμική διαδικασίας επαναφοράς. Στις εικόνες φαίνονται οι κάθετες τομές ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το άσπρο βέλος δείχνει την κίνηση των ιόντων και ατόμων νατρίου (Na) (πράσινες κουκκίδες).^[77]



Διάγραμμα 26 Καμπύλες I-V ενός μικρού τμήματος φωτοβολταϊκής κυψέλης που έχει υποστεί βλάβη λόγω του φαινομένου P.I.D.-s (κόκκινη καμπύλη) και μετά την διόρθωση μέσω της χρήσης θερμότητας (μπλε καμπύλη).^[77]

Όσον αφορά την περίπτωση φωτοβολταϊκών πλαισίων που έχουν υποστεί υποβάθμιση της απόδοσής τους λόγω του φαινομένου P.I.D., αλλά είναι δυνατό να επανέλθουν στην αρχική κατάσταση λειτουργίας, θα πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτική επιλογή και εφαρμογή των κατάλληλων μέτρων περιορισμού του φαινομένου P.I.D..

Μία μη ορθή και άστοχη προσπάθεια μείωσης του φαινομένου μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή μέρους του εξοπλισμού μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και να ακυρώσει τις εγγυήσεις που παρέχουν οι κατασκευαστές. ^[28]

Καθώς ο περιορισμός του φαινομένου P.I.D. μπορεί να αυξήσει το αρχικό κόστος του συστήματος, πρέπει να γίνεται σωστή επιλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων «ανθεκτικών» στο φαινόμενο σε συνδυασμό με τη λήψη μέτρων πρόληψης. Ωστόσο, κάποιες φορές γίνεται σχεδιασμός μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με φωτοβολταϊκά πάνελ ευαίσθητα στο φαινόμενο P.I.D. όταν η εξοικονόμηση από την επιλογή τους είναι μεγαλύτερη από τα πιθανά μέτρα περιορισμού του φαινομένου. ^[26]

18. Μελέτη μιας πραγματικής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης – Διεξαγωγή μετρήσεων

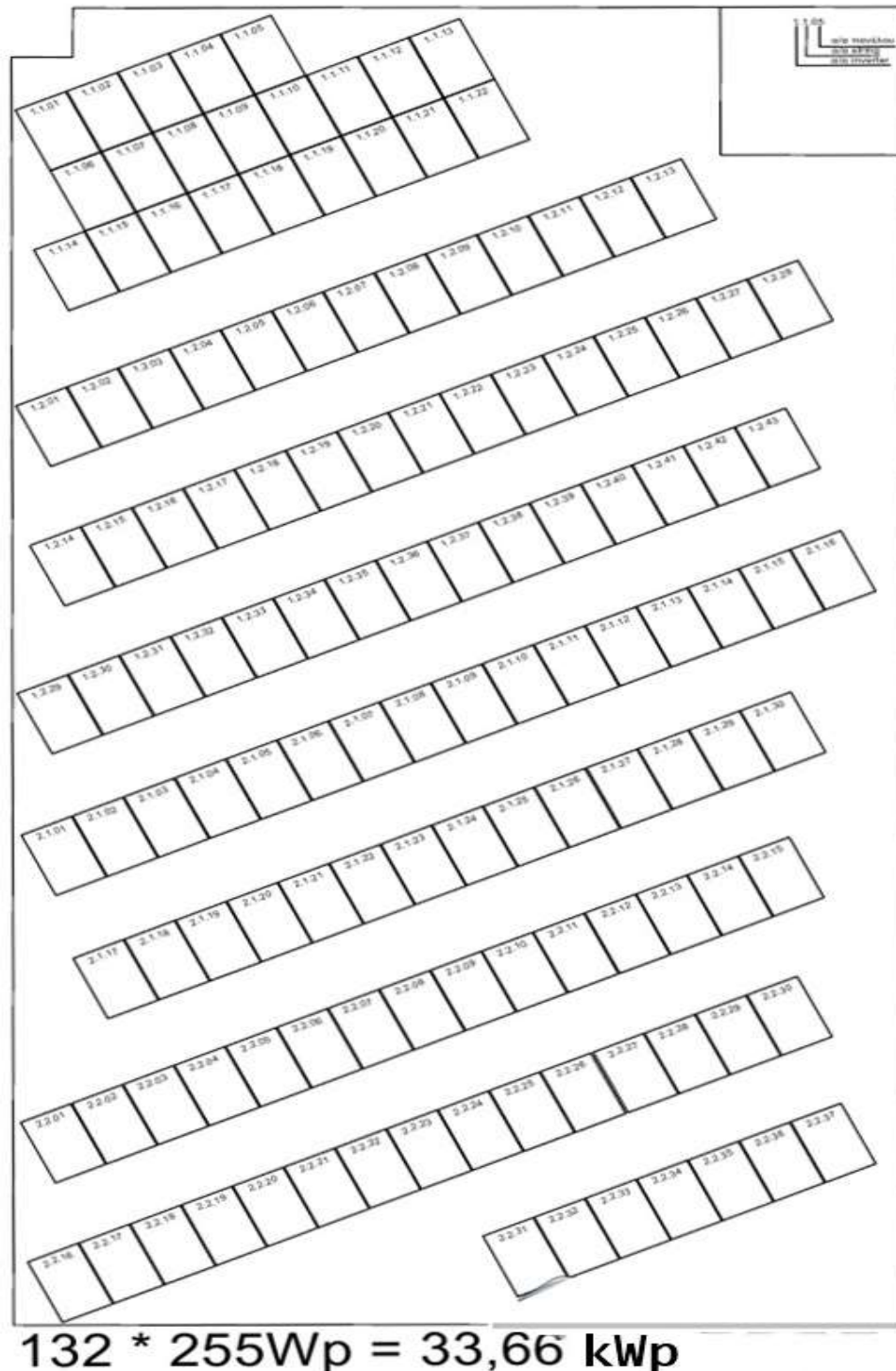
Η Ενότητα 17 αφορά μια πραγματική φωτοβολταϊκή εγκατάσταση η οποία είναι τοποθετημένη στον οροφή του κτιρίου μιας βιομηχανίας. Η βιομηχανία αυτή, επ'ονόματι N&I TSIRONI, βρίσκεται επί της οδού Θηβών 463.

Σκοπός είναι η μελέτη της απόδοσης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ένα χρόνο μετά την έναρξη λειτουργίας της προκειμένου να εξεταστεί το ενδεχόμενο υποβάθμισης της απόδοσής της λόγω πιθανής εμφάνισης του φαινομένου P.I.D..

18.1 Τοπολογία της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση της εν λόγω βιομηχανίας αποτελείται από τέσσερις συστοιχίες φωτοβολταϊκών πανέλων. Ο συνολικός αριθμός των πανέλων ανέρχεται σε εκατόν τριάντα δύο, με ονομαστική ισχύ 255Wp, έτσι ώστε η θεωρητική απόδοση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης να υπολογίζεται σε $132 \times 255 \text{Wp} = 33,66 \text{kWp}$. Στην κάτοψη της εγκατάστασης (βλ. Εικόνα 69) μπορούμε να δούμε πώς είναι η τοπογραφία των φωτοβολταϊκών πλαισίων, την εγκατάστασή τους κατά συστοιχίες και την σύνδεσή τους με έναν από τους δύο υπάρχοντες inverters. Κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ χαρακτηρίζεται από έναν μοναδικό τετραψήφιο αριθμό που δηλώνει επακριβώς την θέση του στην φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Το πρώτο ψηφίο εκφράζει ποιος inverter

είναι συνδεδεμένος στην άκρη της σειράς στην οποία ανήκει το πάνελ. Το δεύτερο ψηφίο δηλώνει την συστοιχία στην οποία ανήκει και τέλος τα δύο τελευταία ψηφία είναι το νούμερο του εκάστοτε φωτοβολταϊκού πλαισίου.



$$132 * 255Wp = 33,66 \text{ kWp}$$

Εικόνα 69 Κάτοψη της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στην οροφή του κτιρίου.

18.2 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε

Η μελέτη μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης προκειμένου να διερευνηθεί το ενδεχόμενο μείωσης της απόδοσης μετά από κάποιο χρονικό διάστημα απαιτεί την τυχαία επιλογή κάποιων μόνο φωτοβολταϊκών μονάδων από το σύνολό τους και την μέτρηση βασικών χαρακτηριστικών τους. Οι μετρήσεις πρέπει να πραγματοποιηθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα ώστε οι περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζουν την λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όπως η θερμοκρασία, η ακτινοβολία ή η υγρασία, να παραμένουν σταθερές για όλα τα πλαίσια και κατ'επέκταση τα αποτελέσματα της μελέτης να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα.

Μία πρώτη εικόνα της πιθανής μείωσης της απόδοσης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μπορεί να μας δώσει η μέτρηση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} , της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} , των μέγιστων τιμών του ρεύματος και της τάσης, I_{mpp} και V_{mpp} , ο υπολογισμός της μέγιστης ισχύος P_{mpp} και, κατόπιν, η σύγκρισή τους με τις ονομαστικές τιμές τους που δίνει ο κατασκευαστής.

18.3 Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν -Εξοπλισμός

Για την λήψη βασικών μετρήσεων του φωτοβολταϊκού συστήματος χρησιμοποιήθηκε το όργανο χειρός MI 3108 Eurotest της εταιρείας Metrel d.d. (βλ. Εικόνα 70) . Το Eurotest είναι ένα επαγγελματικό πολυλειτουργικό όργανο το οποίο προορίζεται να εκτελεί όλες τις μετρήσεις που απαιτούνται προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια συνολική επιθεώρηση a.c. ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και d.c. φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Οι δυνατότητες που διαθέτει το όργανο MI 3108 Eurotest αναφορικά με τις μετρήσεις και τις δοκιμές των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι οι εξής :

- Τάση, Ρεύμα και Ισχύς Φ/Β συστημάτων (inverter- αντιστροφέας και Φ/Β panel- πλαίσιο)
- Υπολογισμός απόδοσης και τιμών STC (Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής – Standard Test Conditions) Φ/Β συστημάτων
- Μετρήσεις U_{oc} / I_{sc}

- Περιβαλλοντικές παράμετροι (Θερμοκρασία στοιχείου και Ένταση Ακτινοβολίας στο επίπεδο του στοιχείου)
- Καμπύλη I-V
- Αντίσταση μόνωσης Φ/Β συστημάτων



EUROTEST PV

MI 3108



METREL®

***Εικόνα 70** Το επαγγελματικό όργανο MI 3108 Eurotest που χρησιμοποιείται συχνά για την λήψη μετρήσεων και την διενέργεια δοκιμών σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. ^[87]*

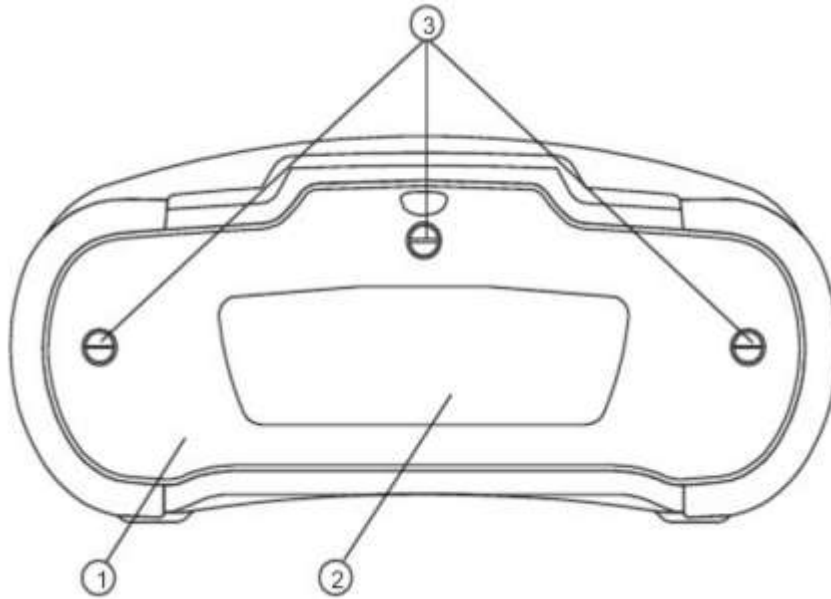
Το σετ του οργάνου MI 3108 περιλαμβάνει τα εξής :

- Όργανο
- Θήκη μεταφοράς, 2 τεμάχια
- Υποδοχέας ασφάλειας Φ/Β πλαισίου
- Πυρανόμετρο
- Υποδοχέας θερμοκρασίας Φ/Β πλαισίου
- AC/DC αμπεροτσιμπίδα
- Υποδοχέας ελέγχου πρίζας Σούκο (Schuko)
- Καλώδιο ελέγχου 3x1,5m
- 4xΑκροδέκτες ελέγχου
- 4xΚροκοδειλάκια
- Σετ μιάντα
- PV MC 4 προσαρμογέας αρσενικός
- PV MC 4 προσαρμογέας θηλυκός
- PV MC 3 προσαρμογέας αρσενικός
- PV MC 3 προσαρμογέας θηλυκός
- Καλώδιο RS232/PS2
- Καλώδιο USB
- Μπαταρίες NiMH
- Τροφοδοτικό φόρτισης μπαταριών
- Σύντομο εγχειρίδιο οδηγιών
- Πιστοποιητικό διακρίβωσης
- CD οδηγιών και λογισμικό EuroLink PRO

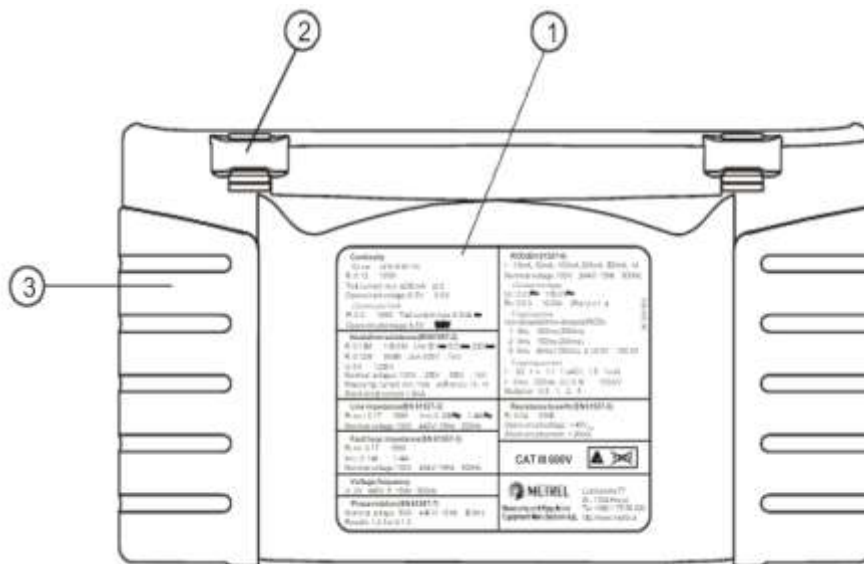
Επιπλέον εικόνες του οργάνου MI 3108 Eurotest φαίνονται παρακάτω (βλ. Εικόνες 71- 73) :



Εικόνα 71 Μπροστινή όψη του οργάνου MI 3108 Eurotest. Τα κουμπιά 1 έως 12 χρησιμεύουν για την περιήγηση στο μενού του οργάνου. ^[87]

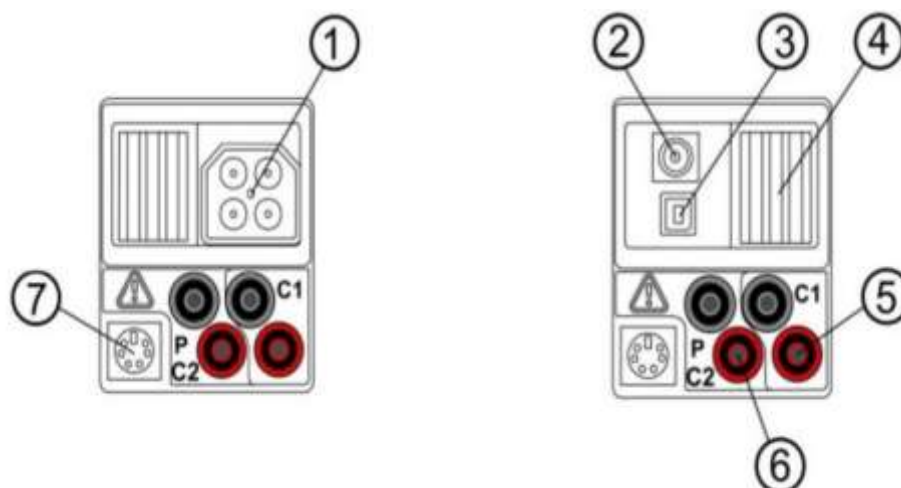


Εικόνα 72 Πίσω πάνελ οργάνου 3108 MI Eurotest. Το σημείο 1 υποδεικνύει το κάλυμμα μπαταριών/ασφαλειών. Το σημείο 2 αντιστοιχεί στην πινακίδα πληροφοριών και τα σημεία 3 είναι οι θέσεις των βιδών στερέωσης. ^[87]



Εικόνα 73 Βάση του οργάνου MI 3108 Eurotest. Το σημείο 1 υποδεικνύει την ετικέτα πληροφοριών, το σημείο 2 τον υποδοχέα του ιμάντα ανάρτησης και το σημείο 3 τα πλευρικά σημεία συγκράτησης. ^[87]

Στην Εικόνα 74 απεικονίζεται το πάνελ συνδέσεων με σκοπό την κατανόηση των συνδεσμολογιών, όπως θα δούμε στα επόμενα στάδια, για την λήψη μετρήσεων:



Υπόμνημα:		
1	Σύνδεση υποδοχέα	Υποδοχέας
2	Υποδοχέας φόρτισης	Σύνδεση βύσματος τροφοδοτικού
3	USB σύνδεση	Θύρα επικοινωνίας PC USB (1.1).
4	Προστατευτικό κάλυμμα	Προστατεύει ταυτόχρονα τους συνδέσμους ελέγχου και το σύνδεσμο του καλωδίου επικοινωνίας - τροφοδοσίας.
5	C1	Είσοδος μέτρησης Αμπεροτσιμπίδας #1
6	P/C2	Είσοδος μέτρησης Αμπεροτσιμπίδας #2
		Είσοδος εξωτερικών αισθητήριων – εξαρτημάτων μέτρησης
7	PS/2 connector	Σειριακή θύρα επικοινωνίας με το PC Σύνδεση με πρόσθετα μετρητικά εξαρτήματα Σύνδεση με αναγνώστη barcode / RFID

Εικόνα 74 Πάνελ συνδέσεων για το όργανο MI 3108 και υπόμνημα επεξήγησής του. ^[87]

18.4 Λήψη μέτρων ασφαλείας- Περιορισμοί

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στους εξής περιορισμούς όσον αφορά το πάνελ συνδέσεων:

- Μην χρησιμοποιείτε το όργανο σε Φ/Β εγκαταστάσεις με τάση μεγαλύτερη των 1000V d.c. και/ή ρεύματα μεγαλύτερα από 15A d.c.! Αλλιώς το όργανο θα καταστραφεί.
- Πηγές Φ/Β μπορεί να παράγουν υψηλές τάσεις και ρεύματα. Για τον λόγο αυτόν μόνο έμπειρα άτομα μπορούν να διεξάγουν τις μετρήσεις.
- Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα πρότυπα και οι κανονισμοί κάθε χώρας.
- Σε περίπτωση σφάλματος κατά την μέτρηση, παρουσία εύφλεκτων αερίων ή υψηλής υγρασίας μπορεί να δημιουργηθεί ηλεκτρικό τόξο και να προκληθεί φωτιά. Οι χειριστές πρέπει να έχουν την εμπειρία να αποσυνδέσουν την Φ/Β εγκατάσταση με ασφάλεια.

18.5 Απαραίτητες πληροφορίες και ρυθμίσεις για την διεξαγωγή των μετρήσεων και τον υπολογισμό των επιθυμητών μεγεθών

Για την διαδικασία λήψης των μετρήσεων με την βοήθεια του πολυεργαλείου MI 3108 Eurotest πρέπει να γνωρίζουμε τα εξής τα οποία λαμβάνονται υπόψη για λόγους ορθού υπολογισμού των επιθυμητών μεγεθών:

- Ο υποδοχέας A1384 χρησιμοποιείται **μόνο** για μετρήσεις Φ/Β πανέλων, U_{oc} / I_{sc} , καμπύλη I/V, αντιστροφέα inverter (AC/DC) και ISO.
- Ο υποδοχέας δοκιμής A1385 χρησιμοποιείται **μόνο** για μετρήσεις Φ/Β αντιστροφέων inverter AC/DC.
- Πριν την εκκίνηση των μετρήσεων ενός Φ/Β συστήματος πρέπει να ελεγχθούν οι ρυθμίσεις της Φ/Β μονάδας καθώς και οι παράμετροι ελέγχου του Φ/Β.
- Χρειάζεται να γνωρίζουμε τις περιβαλλοντικές παραμέτρους (I_{rr} , T) για τον υπολογισμό των μεγεθών STC (Standard Test Conditions - Πρότυπες

Συνθήκες Δοκιμής). Οι περιβαλλοντικές παράμετροι μπορούν είτε να μετρηθούν είτε να εισαχθούν από τον χρήστη του οργάνου.

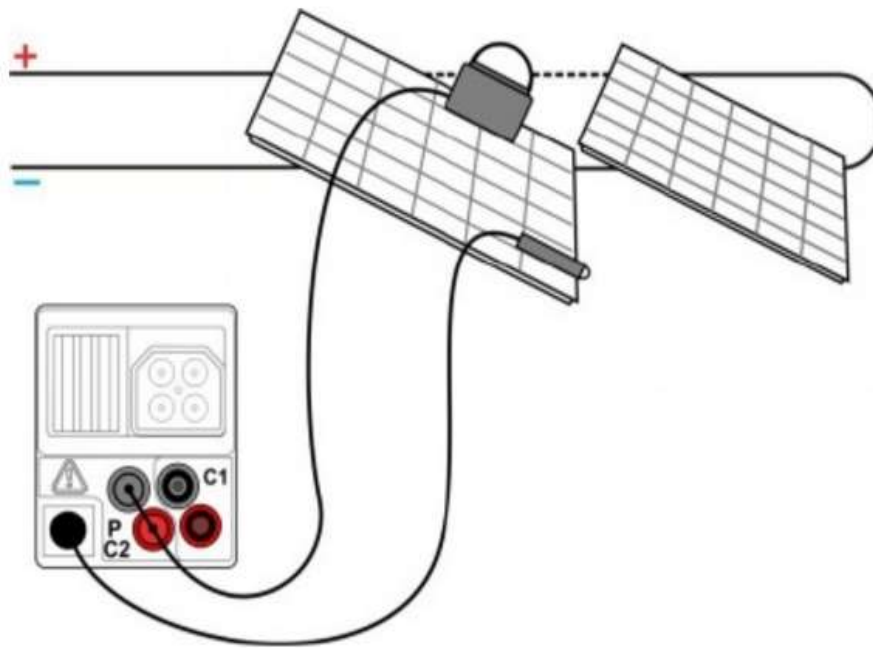
- Οι περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία στοιχείου και ένταση ακτινοβολίας) πρέπει να είναι σταθερές κατά την διάρκεια των μετρήσεων.
- Για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων STC (Standard Test Conditions - Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής) πρέπει να είναι γνωστές οι τιμές των παραμέτρων U_{oc} / I_{sc} , έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του στοιχείου, θερμοκρασίας (περιβάλλοντος ή Φ/B στοιχείου –κυψέλης) και Φ/B πλαισίου .

18.5.1 Μέτρηση περιβαλλοντικών συνθηκών

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και την θερμοκρασία στο επίπεδο του πλαισίου. Οι τιμές αυτές απαιτούνται για τον υπολογισμό των τιμών σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC- Standard Test Conditions) (βλ. Εξ. (38), (39)), όπως, επίσης, για τον έλεγχο ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι κατάλληλες για να εκτελεστούν οι έλεγχοι του Φ/B στοιχείου. Πέραν αυτών, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι οι μετρήσεις των I_{IT} και T πρέπει να παρθούν αμέσως πριν τον έλεγχο του πλαισίου και ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες πρέπει να παραμένουν σταθερές καθόλα την διάρκεια των μετρήσεων.

Έχουμε αναφέρει ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες μπορούν είτε να μετρηθούν είτε να εισαχθούν δια χειρός. Οι ακροδέκτες μπορεί να συνδεθούν στο όργανο ή στην PV remote unit (A 1378).

Η συνδεσμολογία για την μέτρηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων απεικονίζεται παρακάτω στην Εικόνα 75. Εκτός από την PV remote unit (A 1378) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, χρειαζόμαστε, επίσης, έναν ακροδέκτη θερμοκρασίας (A 1400) και ένα πυρανόμετρο (A1399) που λειτουργεί ως αισθητήρας της ηλιακής ακτινοβολίας.



Εικόνα 75 Συνδέσεις μέτρησης περιβαλλοντικών παραμέτρων. ^[87]

Τα αποτελέσματα της μέτρησης παραδείγματος χάριν για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο 1.1.2 είναι :

- $I_{rr} = 809 \text{ W/m}^2$ και
- $T_{cell} = 49,3 \text{ } ^\circ\text{C}$

Αντί της θερμοκρασίας της φωτοβολταϊκής κυψέλης T_{cell} , θα μπορούσαμε να μετρήσουμε την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} .

Σημείωση

Εάν το αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερο από την τιμή ρύθμισης $I_{rr \min}$ τα STC αποτελέσματα δεν θα υπολογιστούν (αντί αυτού εμφανίζεται το μήνυμα $I_{rr} < I_{rr \min}$!). Το $I_{rr \min}$ είναι μία παράμετρος μετρήσεων των φωτοβολταϊκών στοιχείων και συμβολίζει την ελάχιστη ένταση ακτινοβολίας στο επίπεδο του στοιχείου για υπολογισμό ($500\text{-}1000 \text{ W/m}^2$). Επιλέγεται στα 500 W/m^2 .

18.5.2 Παράμετροι του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Η γνώση των παραμέτρων του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι πολύ σημαντική και απαραίτητη για τον υπολογισμό των μετρούμενων μεγεθών σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC). Οι τιμές των παραμέτρων θα πρέπει να εισαχθούν στο όργανο MI 3108 Eurotest το οποίο θα μας δώσει αυτόματα τις τιμές στις πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC).

Οι παράμετροι που ζητούνται είναι η ονομαστική ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου P_{max} , η τάση του σημείου μέγιστης ισχύος U_{mpp} , το ρεύμα του σημείου μέγιστης ισχύος I_{mpp} , η τάση ανοιχτού κυκλώματος U_{oc} , το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου NOCT, ο συντελεστής θερμοκρασίας του I_{sc} α , ο συντελεστής θερμοκρασίας του U_{oc} β , ο συντελεστής θερμοκρασίας του P_{max} γ και η αντίσταση σειράς R_s του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Οι τιμές των παραμέτρων για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο RENESOLA255 είναι οι εξής:

P_{max} : 255W
 U_{mpp} : 30,4V
 I_{mpp} : 8,39A
 U_{oc} : 37,5V
 I_{sc} : 8,86A
NOCT: 45, 0 °C
 α : 5,79mA/°C
 β : -0,127V/°C
 γ : -0,47%/°C
 R_s : 0,01Ω

Οι τιμές αυτές των παραμέτρων δίνονται από τον κατασκευαστή του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στην ηλεκτρολογική αναφορά πρέπει να προσθέσουμε και το όνομα του μοντέλου του φωτοβολταϊκού πλαισίου που στην μελέτη μας είναι το RENESOLA255, καθώς οι παράμετροι που αναφέραμε αφορούν αποκλειστικά το συγκεκριμένο μοντέλο.

Οι ανωτέρω τιμές εισάγονται στο μενού “Ρυθμίσεις Φ/Β πλαισίων” του οργάνου MI 3108 Eurotest, που χρησιμοποιούμε, και κατόπιν δημιουργείται μια βάση δεδομένων 16 φωτοβολταϊκών πλαισίων που έχουμε επιλέξει τυχαία από την φωτοβολταϊκή

εγκατάσταση. Στην συνέχεια, οι παράμετροι των τιμών STC (standard test conditions) θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς.

18.5.3 Πρότυπο μετρήσεων IEC

Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή IEC (International Electrotechnical Commission) είναι γνωστή ως μία διεθνής οργάνωση που προετοιμάζει και ανακοινώνει τις διεθνείς προδιαγραφές που αναφέρονται στις ηλεκτρονικές, ηλεκτρολογικές τεχνολογίες και, συνολικά, τις τεχνολογίες εκείνες που σχετίζονται με τον γενικότερο τομέα της ηλεκτροτεχνολογίας. Οι προδιαγραφές IEC αφορούν ένα μεγάλο εύρος κλάδων, όπως η παραγωγή ενέργειας, η νανοτεχνολογία ή οι τηλεπικοινωνίες. Τα πρότυπα αυτά, μεταξύ άλλων, μπορεί να περιλαμβάνουν προδιαγραφές για μετρήσεις, λειτουργίες ή ό,τι αφορά την ασφάλεια, καθώς, επίσης, ορολογίες και σύμβολα κ.ά. Η διεθνής επιτροπή IEC διευθύνει, επίσης, τρία παγκόσμια συστήματα εκτίμησης για το κατά πόσο διάφοροι εξοπλισμοί, συστήματα και στοιχεία εναρμονίζονται με τις παγκόσμιες προδιαγραφές.

Είναι πολύ σημαντικό σε κάθε μελέτη ή πείραμα να υιοθετούμε ένα πρότυπο IEC (International Electrotechnical Commission- Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή) το οποίο πρέπει να ακολουθείται και να αναφέρεται, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι ορθά και αξιόπιστα. Η σύγκριση, μάλιστα, μεταξύ διαφορετικών μελετών ή πειραμάτων είναι δυνατή μόνο όταν αυτά έχουν πραγματοποιηθεί υπό τις ίδιες προδιαγραφές, δηλαδή υπό τα ίδια πρότυπα IEC.

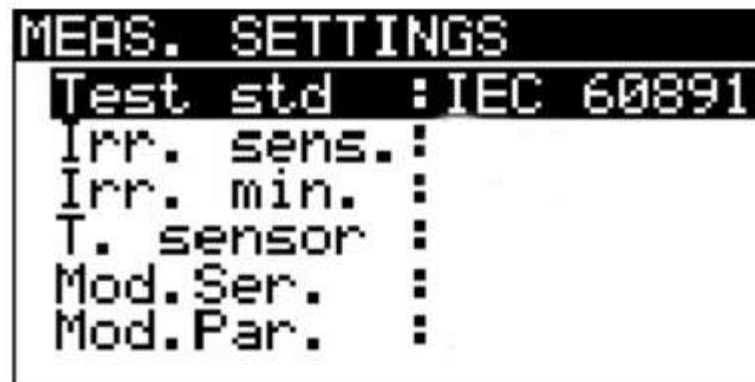
Στην παρούσα μελέτη μας ακολουθείται το πρότυπο IEC_60891, το οποίο ανήκει στην κατηγορία της τεχνολογίας ηλιακής ενέργειας και συγκεκριμένα των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το πρότυπο αυτό αναθεωρήθηκε το 2009 και συνεχίζει να χρησιμοποιείται έως τον παρόντα χρόνο που μιλάμε. Σκοπός του προτύπου IEC_60891 είναι ο ορισμός των προδιαγραφών για τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται στις διορθώσεις των παραμέτρων θερμοκρασίας και ακτινοβολίας στις μετρούμενες I-V χαρακτηριστικές των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Επίσης, το πρότυπο αυτό καθορίζει κάποιους συντελεστές, απαραίτητους για αυτές τις διορθώσεις. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC_60891 η ονομαστική ηλιακή ακτινοβολία $I_{T,STC}$ είναι ίση με 1000W/m^2 και η ονομαστική θερμοκρασία T_{STC} του πλαισίου είναι 25°C . Είναι σημαντικό να

αναφέρουμε πως πολλές φορές ακολουθούνται διαφορετικά πρότυπα IEC ανάλογα την χώρα στην οποία γίνεται ένα πείραμα. Λόγω αυτού, συχνά βλέπουμε να ακολουθούνται διαφορετικά πρότυπα στην Ευρώπη εν συγκρίσει με την Αμερική.

Τέλος, το πρότυπο IEC_60891 ρυθμίζεται ως επιλογή στο όργανο MI 3108 Eurotest (βλ. Εικόνα 76), το οποίο είναι εκείνο που «αναγνωρίζει» το περιεχόμενο των προδιαγραφών του ώστε να υπολογίσει τα σωστά αποτελέσματα.

18.5.4 Ρυθμίσεις μετρήσεων

Πριν την λήψη των μετρήσεων στο φωτοβολταϊκό σύστημα, απαιτείται να γίνουν κάποιες ρυθμίσεις μετρήσεων (measurement settings) στο όργανο MI 3108 Eurotest. Οι ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν φαίνονται στο παρακάτω πίνακάκι του μενού του MI 3108 Eurotest:



Εικόνα 76 Επιλογή ρυθμίσεων των μετρήσεων των φωτοβολταϊκών πλαισίων (measurement settings).^[87]

Στην πρώτη σειρά μας ζητείται να γράψουμε το *πρότυπο IEC*, το οποίο ακολουθούμε κατά την μελέτη της εγκατάστασης και το οποίο, όπως έχουμε αναφέρει, είναι το IEC_60891.

Το *Irr sens.* ζητά να γράψουμε ποιόν αισθητήρα ακτινοβολίας χρησιμοποιούμε. Στην μελέτη μας χρησιμοποιούμε το πυρανόμετρο.

Το *Irr min.* είναι η ελάχιστη ένταση ακτινοβολίας στο επίπεδο του στοιχείου για υπολογισμό, η οποία μπορεί να κυμαίνεται από 500 έως 1000W/m². Εμείς την ορίσαμε, (βλ. ενότητα 18.5.1) στα 500W/m².

Στην γραμμή *T.sensor* καταγράφουμε ποια θερμοκρασία επιλέγουμε για υπολογισμό, ανάμεσα από τις δύο θερμοκρασίες, την θερμοκρασία περιβάλλοντος *Tamb* και την θερμοκρασία πανέλου *Tπαν.* την οποία και επιλέγουμε.

Τέλος, ο όρος *Mod.Ser.* αναφέρεται στον αριθμό πλαισίων εν σειρά, που θα θεωρούμε ότι βρίσκονται με κάθε ένα από τα δεκαέξι φωτοβολταϊκά πλαίσια κατά την διαδικασία ελέγχου τους, ο οποίος είναι 1 και ο όρος *Mod.Par.* στον αριθμό πλαισίων εν παραλλήλω, που είναι 1. Γενικά, ο πρώτος όρος μπορεί να κυμανθεί από 1 έως 30 πλαίσια, ενώ ο δεύτερος από 1 έως 10 πλαίσια.

Οι ρυθμίσεις μετρήσεων καταγράφονται ως εξής:

```
Measurement settings:
Test std: IEC_60891
Irr. sens.: Pyran.
Irr. min.: 500
T. sensor: Tπαν.
Mod.Ser.: 1
Mod.Par.: 1
```

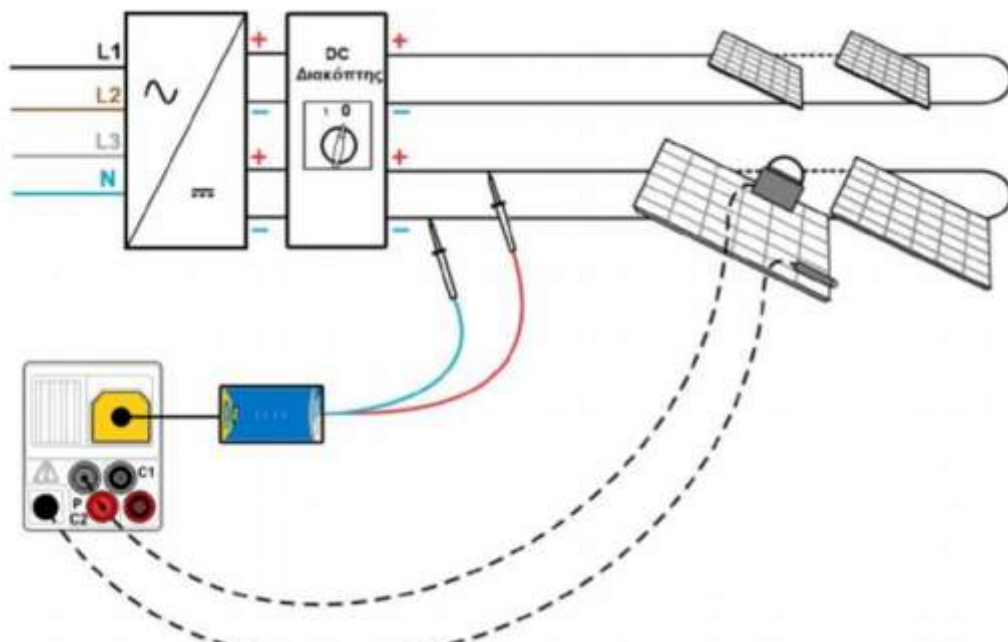
Εικόνα 77 Οι ρυθμίσεις μετρήσεων όπως τις ορίσαμε στο όργανο MI 3108 Eurotest, οι οποίες εμφανίζονται στις αναφορές της μελέτης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και αφορούν τον έλεγχο κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου .^[87]

18.6 Έλεγχος της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων – Μετρήσεις τάσεως ανοιχτοκυκλώσεως U_{oc} και ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} – Μετρήσεις χαρακτηριστικής καμπύλης I/V .

Η μέτρηση της τάσεως ανοιχτοκυκλώσεως U_{oc} , του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} και της χαρακτηριστικής I/V έχει σκοπό να ελέγξει την ομαλή λειτουργία των συσκευών στην d.c. πλευρά της Φ/Β εγκατάστασης, δηλαδή αν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν ικανοποιητικά. Ανάλογα τα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε αν κάποιο φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποδίδει αρκετά λιγότερο από την αρχική ισχύ του κατασκευαστή και, επομένως, αν έχει υποστεί κάποια βλάβη.

Μετρήσεις τάσης ανοιχτοκυκλώσεως U_{oc} και ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc}

Για την εύρεση των τιμών της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως U_{oc} και του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} για κάθε ένα από τα δεκαέξι φωτοβολταϊκά πλαίσια χρησιμοποιούμε την παρακάτω συνδεσμολογία (βλ. Εικόνα 78) . Την ίδια σύνδεση θα χρησιμοποιήσουμε, επίσης, για να βρούμε τις I/V χαρακτηριστικές. Στην συνδεσμολογία μας επιλέγουμε να συμπεριλάβουμε την PV remote unit για καλύτερα αποτελέσματα.



Εικόνα 78 Συνδεσμολογία για την μέτρηση των μεγεθών U_{oc} , I_{sc} και της χαρακτηριστικής I/V των φωτοβολταϊκών πλαισίων. ^[87]

Η διαδικασία που ακολουθούμε περιλαμβάνει την παρακάτω σειρά βημάτων :

1. Επιλέγουμε την υπορουτίνα **Uoc / Isc** με την χρήση του **Επιλογέα Λειτουργιών** και των πλήκτρων βέλους $\blacktriangle/\blacktriangledown$ στο όργανο MI 3108 Eurotest.
2. Συνδέουμε το σεντ ακροδεκτών και τους αισθητήρες (προαιρετικά) στο όργανο.
3. Συνδέουμε το προς έλεγχο πλαίσιο.
4. Ελέγχουμε τις τάσεις εισόδου.
5. Πατάμε το πλήκτρο **TEST** για την εκτέλεση της μέτρησης.
6. Αποθηκεύουμε το αποτέλεσμα πατώντας το πλήκτρο **MEM** (προαιρετικά).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε ένα από τα δεκαέξι φωτοβολταϊκά πλαίσια θα εμφανιστούν στην οθόνη του οργάνου MI 3108 Eurotest (βλ. Εικόνες 79, 80). Η τάση εισόδου $U:0.0V$ απεικονίζεται με σκοπό τον έλεγχο της καταλληλότητας των συνδέσεων πριν την πραγματοποίηση των μετρήσεων (βλ. Εικόνα 79).

Uo/Isc		
	STC	MEAS
Uo	----V	----V
Isc	----A	----A
U:0.0V		

Εικόνα 79 Μενού του οργάνου MI 3108 Eurotest όπου θα εμφανιστούν οι μετρούμενες τιμές των U_{oc} , I_{sc} και οι αυτόματα υπολογιζόμενες STC τιμές τους. ^[87]

Ένα τυχαίο παράδειγμα εμφάνισης των αποτελεσμάτων U_{oc} , I_{sc} και των αυτόματα υπολογιζόμενων STC τιμών τους φαίνεται στην κάτωθι Εικόνα 80 .

Uo/Isc		
	STC	MEAS
Uo	112V	110V
Isc	5.29A	4.93A
U:4.5V		

Εικόνα 80 Παράδειγμα μετρούμενων και αυτόματα υπολογιζόμενων STC τιμών για τα μεγέθη U_{oc} , I_{sc} , όπως εμφανίζονται στο αντίστοιχο μενού οργάνου MI 3108 Eurotest. ^[87]

Τα μεγέθη U_{oc} και I_{sc} για κάθε ένα από τα δεκαέξι φωτοβολταϊκά πλαίσια καταγράφονται στις αναφορές 1-16.

Μετρήσεις χαρακτηριστικής καμπύλης I/V χαρακτηριστικής

Για την εύρεση της I/V χαρακτηριστικής των δεκαέξι τυχαία επιλεγμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων χρησιμοποιείται η ίδια συνδεσμολογία (βλ. Εικόνα 78).

Η διαδικασία που ακολουθούμε περιλαμβάνει την παρακάτω σειρά βημάτων :

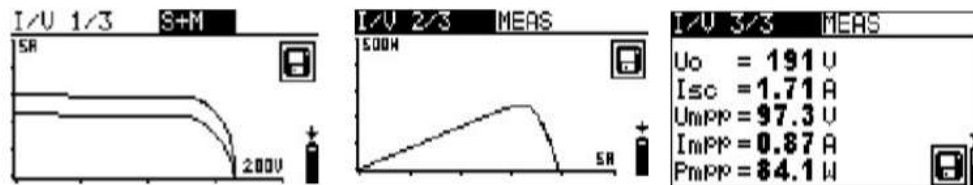
1. Επιλέγουμε την υπορουτίνα **I/V** με την χρήση του **Επιλογέα Λειτουργιών** και των πλήκτρων βέλους $\blacktriangle/\blacktriangledown$ στο όργανο MI 3108 Eurotest.
2. Ελέγχουμε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και θέτουμε τις παραμέτρους.
3. Συνδέουμε το σετ ακροδεκτών στο όργανο.
4. Συνδέουμε το σετ των περιβαλλοντικών μετρήσεων στο όργανο.
5. Συνδέουμε το προς μέτρηση στοιχείο.
6. Πατάμε το πλήκτρο **TEST** για την εκτέλεση της μέτρησης.
7. Αποθηκεύουμε το αποτέλεσμα πατώντας το πλήκτρο **MEM** (προαιρετικά).

Τα στοιχεία προς μέτρηση διαιρούνται σε τρεις οθόνες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 81 . Στην πρώτη οθόνη **1/3** θα απεικονίζονται οι μετρούμενες και οι STC χαρακτηριστικές I/V. Στην δεύτερη οθόνη **2/3** θα απεικονίζεται η ισχύς $P(W)$ συναρτήσει του ρεύματος $I(A)$ και η αντίστοιχη STC καμπύλη και, τέλος, στην τρίτη οθόνη **3/3** θα εμφανίζονται τα μετρούμενα μεγέθη U_{oc} , I_{sc} , U_{mpp} , I_{mpp} , P_{mpp} μαζί με τις STC τιμές τους, οι οποίες υπολογίζονται αυτόματα από το όργανο-έχουμε εισάγει προηγουμένως τις παραμέτρους του φωτοβολταϊκού πλαισίου (στις Εικόνες 81 και 82 φαίνονται μόνο οι μετρούμενες τιμές, όμως εμείς ρυθμίζουμε το μενού του οργάνου ώστε να υπολογίσει και τις STC τιμές) .



Εικόνα 81 Οθόνες εκκίνησης καμπύλης I/V. ^[87]

Ένα τυχαίο παράδειγμα παρουσίασης των αποτελεσμάτων της καμπύλης I/V φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 82 .



Εικόνα 82 Παράδειγμα αποτελεσμάτων καμπύλης I/V. ^[87]

Οι χαρακτηριστικές I/V και τα μετρούμενα μεγέθη U_{oc} , I_{sc} , U_{mpp} , I_{mpp} , P_{mpp} μαζί με τις STC τιμές τους για κάθε ένα από τα δεκαέξι φωτοβολταϊκά πλαίσια που έχουμε επιλέξει να ελέγξουμε φαίνονται στις αναφορές 1-16.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί το όργανο MI 3108 Eurotest για τον υπολογισμό του ρεύματος και της τάσης κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου στις πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC) , I_{STC} , U_{STC} , είναι οι εξής (38), (39):

$$I_{STC} = I_1 + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \quad (38)$$

$$U_{STC} = U_1 + \frac{M}{N} * R_s * (I_{STC} - I_1) + M * \beta * (T_{STC} - T_1) \quad (39)$$

όπου

I_{STC}, U_{STC}	Υπολογιζόμενες τιμές ρεύματος και τάσης σε κανονικές συνθήκες ελέγχου, (Ampere) και (Volt) αντίστοιχα
I_1, U_1	Απευθείας μετρούμενο ρεύμα και τάση του πλαισίου, (Ampere) και (Volt) αντίστοιχα
I_{sc}	Μετρούμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης πλαισίου, (A)
$I_{rr_{STC}}$	Ηλιακή ακτινοβολία σε STC, (W/m ²)
I_{rr}	Μετρούμενη ηλιακή ακτινοβολία, (W/m ²)
α, β	Θερμοκρασιακοί συντελεστές ρεύματος και τάσης του πλαισίου, (mA/°C) και (V/°C) αντίστοιχα
T_{SCT}	Θερμοκρασία σε STC, (°C)
T_1	Μετρούμενη θερμοκρασία, (°C)
R_s	Αντίσταση σειράς πλαισίου, (Ω)
M	Πλήθος των πλαισίων εν σειρά
N	Πλήθος των πλαισίων εν παραλλήλω

Πίνακας 9 Επεξήγηση των παραμέτρων που συμπεριλαμβάνονται στις εξισώσεις (38) και (39). ^[87]

Η ακρίβεια των μετρήσεων του οργάνου MI_3108 Eurotest για τα μεγέθη I_{sc} , U_{oc} και τα μεγέθη της χαρακτηριστικής I-V καταγράφονται στα παρακάτω πίνακάκια

- I_{sc} U_{oc} :

DC Τάση

Εύρος μέτρησης (V)	Ανάλυση (V)	Ακρίβεια
0.0 ÷ 15.0	0.1	ενδεικτική
15.1 ÷ 199.9	0.1	± (2 % μέτρησης + 2 ψηφία)
200 ÷ 999	1	±2 % μέτρησης

DC Ρεύμα

Εύρος μέτρησης (A)	Ανάλυση (A)	Ακρίβεια
0.00 ÷ 9.99	0.01	±(2 % μέτρησης + 3 ψηφία)
10.00 ÷ 15.00	0.01	±2 % μέτρησης

- I-V :

DC Τάση

Εύρος μέτρησης (V)	Ανάλυση (V)	Ακρίβεια
0.0 ÷ 15.0	0.1	ενδεικτική
15.1 ÷ 199.9	0.1	± (2 % μέτρησης + 2 ψηφία)
200 ÷ 999	1	±2 % μέτρησης

DC Ρεύμα

Measuring range (A)	Ανάλυση (A)	Ακρίβεια
0.00 ÷ 9.99	0.01	±(2 % μέτρησης + 3 ψηφία)
10.00 ÷ 15.00	0.01	±2 % μέτρησης

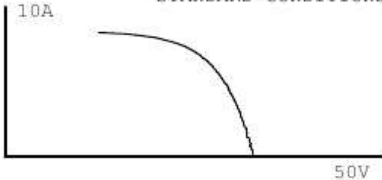
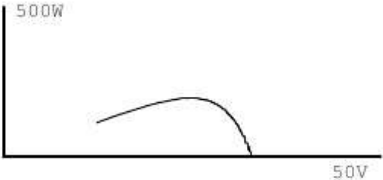
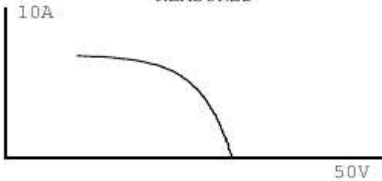
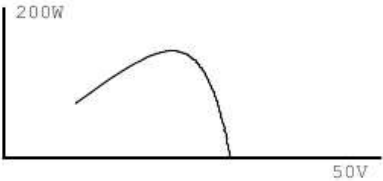
DC Ισχύς

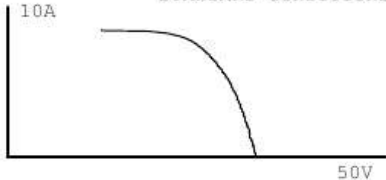
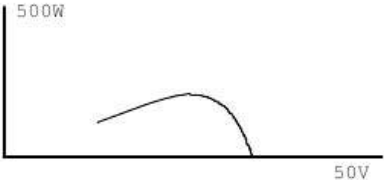
Εύρος μέτρησης (W)	Ανάλυση (W)	Ακρίβεια
0 – 1999	1	± (3 % μέτρησης + 5 ψηφία)
2.00 k ÷ 14.99 k	10	± 3 % μέτρησης

Πίνακες 10 Ανάλυση τιμών και ακρίβεια για τα μεγέθη I_{sc} , U_{oc} και της χαρακτηριστικής I-V ανάλογα το εύρος τιμών τους.

18.7 Μετρήσεις που πήραμε με το όργανο MI_3108 Eurotest για τα δεκαέξι τυχαία επιλεγμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Παρακάτω μπορούμε να δούμε τις πλήρεις αναφορές με τις μετρήσεις που μας έδωσε το όργανο MI_3108 Eurotest. Στις καταμετρημένες τιμές συμπεριλαμβάνονται η τάση ανοιχτοκυκλώσεως $U_{oc,meas}$, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως $I_{sc,meas}$, καθώς και η I-V χαρακτηριστική με το μέγιστο σημείο τάσης $U_{mpp,meas}$, το μέγιστο σημείο ρεύματος $I_{mpp,meas}$ και το μέγιστο σημείο ισχύος $P_{mpp,meas}$. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το όργανο MI_3108 Eurotest μας δίνει, επιπλέον, τις αντίστοιχες υπολογισμένες STC τιμές των μεγεθών αυτών, δηλαδή τα $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$.

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ																					
<u>Χρήστης:</u> ΙΟΑΝΝΙΣ ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ Electical & Cmputer Engineer	<u>Τόπος:</u> N&I TSIRONI O.E. 33,66kWp, Thivon str 463																				
<u>Δεδομένα οργάνου</u> <u>Τύπος:</u> EUROTEST PV <u>Αρ. Σειράς:</u> 12240399 <u>Μοντέλο:</u> MI 3108 <u>Παραγωγός:</u> Metrel d.d. <u>Ημερομηνία δημιουργίας αναφοράς:</u> 20/8/2014																					
Όχι Αποτελέσματα																					
1	N&I TSIRONI O.E. / INVERTER1 / STRING1 / PANEL 2 13.08.2014 15:46		ΑΠΟΔΕΚΤΟ*																		
I/V <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.8em;"> <thead> <tr> <th></th> <th>STC</th> <th>MEAS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Uoc</td> <td>36.5V</td> <td>33.3V</td> </tr> <tr> <td>Isc</td> <td>9.24A</td> <td>7.59A</td> </tr> <tr> <td>Umpp</td> <td>28.0V</td> <td>24.9V</td> </tr> <tr> <td>Impp</td> <td>7.78A</td> <td>6.39A</td> </tr> <tr> <td>Pmpp</td> <td>218W</td> <td>159W</td> </tr> </tbody> </table> STANDARD CONDITIONS   MEASURED   ENVIRONMENT - SYNCH. Irr: 809W/m2 Tcell: 49.3°C Module settings: Module: RENESOLA255 Pmax: 255W Umpp: 30.4V Impp: 8.39A Uoc: 37.5V Isc: 8.86A NOCT: 45.0°C Measurement settings: Test std: IEC 60891 Irr. sens.: Pyran. Irr. min.: 500 T. sensor: Tpan. Mod.Ser.: 1 Mod.Par.: 1 alfa: 5.79mA/°C beta: -0.127V/°C gamma: -0.47%/°C Rs: 0.01Ω					STC	MEAS	Uoc	36.5V	33.3V	Isc	9.24A	7.59A	Umpp	28.0V	24.9V	Impp	7.78A	6.39A	Pmpp	218W	159W
	STC	MEAS																			
Uoc	36.5V	33.3V																			
Isc	9.24A	7.59A																			
Umpp	28.0V	24.9V																			
Impp	7.78A	6.39A																			
Pmpp	218W	159W																			
ENERGYPLANNING SOLUTIONS																					
Σελίδα: 1																					

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ																				
Όχι	Αποτελέσματα																			
2	N&I TSIRONI O.E. / INVERTER1 / STRING1 / PANEL 9 13.08.2014 15:47 ΑΠΟΔΕΚΤΟ* I/V <table> <tr> <th></th><th>STC</th><th>MEAS</th></tr> <tr> <td>Uoc</td><td>36.4V</td><td>33.2V</td></tr> <tr> <td>Isc</td><td>9.39A</td><td>7.62A</td></tr> <tr> <td>Ump</td><td>27.9V</td><td>24.7V</td></tr> <tr> <td>Imp</td><td>8.33A</td><td>6.76A</td></tr> <tr> <td>Pmp</td><td>232W</td><td>167W</td></tr> </table> STANDARD CONDITIONS   MEASURED ENVIRONMENT - SYNCH. Irr: 799W/m2 Tcell: 49.3°C Module settings: Module: RENESOLA255 Pmax: 255W Ump: 30.4V Imp: 8.39A Uoc: 37.5V Isc: 8.86A NOCT: 45.0°C alfa: 5.79mA/°C beta: -0.127V/°C gamma: -0.47%/°C Rs: 0.01Ω Measurement settings: Test std: IEC 60891 Irr. sens.: Pyran. Irr. min.: 500 T. sensor: Tnav. Mod.Ser.: 1 Mod.Par.: 1		STC	MEAS	Uoc	36.4V	33.2V	Isc	9.39A	7.62A	Ump	27.9V	24.7V	Imp	8.33A	6.76A	Pmp	232W	167W	
	STC	MEAS																		
Uoc	36.4V	33.2V																		
Isc	9.39A	7.62A																		
Ump	27.9V	24.7V																		
Imp	8.33A	6.76A																		
Pmp	232W	167W																		
3	N&I TSIRONI O.E. / INVERTER1 / STRING2 / PANEL 1 13.08.2014 15:49 ΑΠΟΔΕΚΤΟ*																			
ENERGYPLANNING SOLUTIONS																				
Σελίδα 2																				

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Όχι Αποτελέσματα

I/V

	STC	MEAS
U _{oc}	36.5V	33.2V
I _{sc}	9.30A	7.52A
U _{mpp}	29.4V	26.1V
I _{mpp}	8.55A	6.90A
P _{mpp}	251W	180W

STANDARD CONDITIONS

MEASURED

ENVIRONMENT - SYNCH.

Irr: 794W/m²

T_{cell}: 50.3°C

Module settings:

Module: RENESOLA255

P_{max}: 255W

U_{mpp}: 30.4V

I_{mpp}: 8.39A

U_{oc}: 37.5V

I_{sc}: 8.86A

NOCT: 45.0°C

alfa: 5.79mA/°C

beta: -0.127V/°C

gamma: -0.47%/°C

Rs: 0.01Ω

Measurement settings:

Test std: IEC_60891

Irr. sens.: Pyran.

Irr. min.: 500

T. sensor: T_{nav}.

Mod.Ser.: 1

Mod.Par.: 1

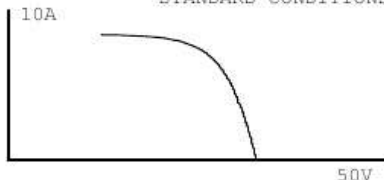
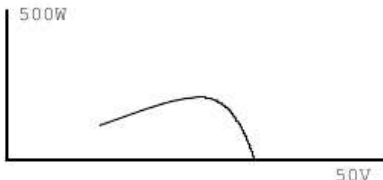
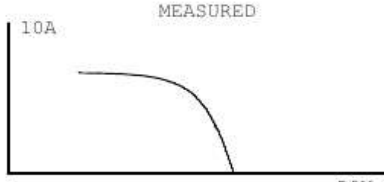
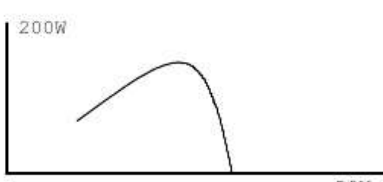
4

N&I TSIRONI O.E. / INVERTER1 / STRING2 / PANEL 2
13.08.2014 15:50

ΑΠΟΔΕΚΤΟ*

ENERGYPLANNING SOLUTIONS

Σελίδα: 3

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ																				
Όχι	Αποτελέσματα																			
	I/V																			
		<table><tr><th></th><th>STC</th><th>MEAS</th></tr><tr><td>Uoc</td><td>36.4V</td><td>33.1V</td></tr><tr><td>Isc</td><td>9.31A</td><td>7.45A</td></tr><tr><td>Umpp</td><td>28.6V</td><td>25.3V</td></tr><tr><td>Impp</td><td>8.13A</td><td>6.51A</td></tr><tr><td>Pmpp</td><td>232W</td><td>164W</td></tr></table>		STC	MEAS	Uoc	36.4V	33.1V	Isc	9.31A	7.45A	Umpp	28.6V	25.3V	Impp	8.13A	6.51A	Pmpp	232W	164W
		STC	MEAS																	
	Uoc	36.4V	33.1V																	
	Isc	9.31A	7.45A																	
	Umpp	28.6V	25.3V																	
	Impp	8.13A	6.51A																	
	Pmpp	232W	164W																	
	STANDARD CONDITIONS																			
																				
	MEASURED																			
																				
	ENVIRONMENT - SYNCH.																			
	Irr: 787W/m2																			
	Tcell: 50.8°C																			
Module settings:																				
Module: RENESOLA255																				
Pmax: 255W																				
Umpp: 30.4V																				
Impp: 8.39A																				
Uoc: 37.5V																				
Isc: 8.86A																				
NOCT: 45.0°C																				
alfa: 5.79mA/°C																				
beta: -0.127V/°C																				
gamma: -0.47%/°C																				
Rs: 0.01Ω																				
Measurement settings:																				
Test std: IEC_60891																				
Irr. sens.: Pyran.																				
Irr. min.: 500																				
T. sensor: Tnov.																				
Mod.Ser.: 1																				
Mod.Par.: 1																				
5	N&I TSIRONI O.E. / INVERTER1 / STRING2 / PANEL 6																			
	13.08.2014 15:51																			
	ΑΠΟΔΕΚΤΟ*																			
ENERGYPLANNING SOLUTIONS																				
Σελίδα 4																				

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Όχι Αποτελέσματα

I/V

	STC	MEAS
Uoc	36.4V	33.0V
Isc	9.24A	7.35A
Umpp	28.2V	24.9V
Impp	8.21A	6.53A
Pmpp	232W	163W

STANDARD CONDITIONS

MEASURED

ENVIRONMENT - SYNCH.

Irr: 782W/m²

Tcell: 50.8°C

Module settings:

Module: RENESOLA255

Pmax: 255W

Umpp: 30.4V

Impp: 8.39A

Uoc: 37.5V

Isc: 8.86A

NOCT: 45.0°C

alfa: 5.79mA/°C

beta: -0.127V/°C

gamma: -0.47%/°C

Rs: 0.01Ω

Measurement settings:

Test std: IEC 60891

Irr. sens.: Pyran.

Irr. min.: 500

T. sensor: Tnqv.

Mod.Ser.: 1

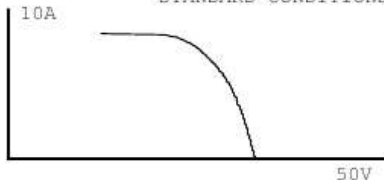
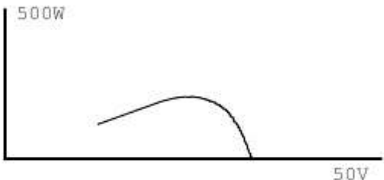
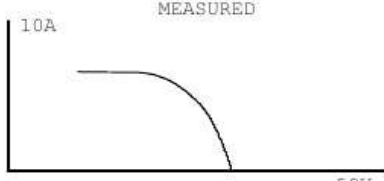
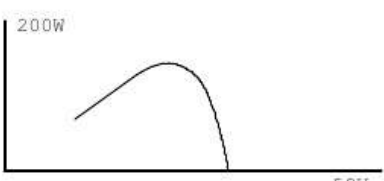
Mod.Par.: 1

6 N&I TSIRONI O.E. / INVERTER1 / STRING2 / PANEL 15
13.08.2014 15:53

ΑΠΟΔΕΚΤΟ*

ENERGYPLANNING SOLUTIONS

Σελίδα: 5

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ																				
Όχι	Αποτελέσματα																			
	I/V																			
		<table><tr><th></th><th>STC</th><th>MEAS</th></tr><tr><td>Uoc</td><td>36.3V</td><td>32.8V</td></tr><tr><td>Isc</td><td>9.29A</td><td>7.35A</td></tr><tr><td>Umpp</td><td>27.8V</td><td>24.3V</td></tr><tr><td>Impp</td><td>8.31A</td><td>6.57A</td></tr><tr><td>Pmpp</td><td>231W</td><td>160W</td></tr></table>		STC	MEAS	Uoc	36.3V	32.8V	Isc	9.29A	7.35A	Umpp	27.8V	24.3V	Impp	8.31A	6.57A	Pmpp	231W	160W
		STC	MEAS																	
	Uoc	36.3V	32.8V																	
	Isc	9.29A	7.35A																	
	Umpp	27.8V	24.3V																	
	Impp	8.31A	6.57A																	
	Pmpp	231W	160W																	
	STANDARD CONDITIONS																			
																				
	MEASURED																			
																				
	ENVIRONMENT - SYNCH.																			
	Irr: 778W/m2																			
	Tcell: 51.8°C																			
Module settings:																				
Module: RENESOLA255																				
Pmax: 255W																				
Umpp: 30.4V																				
Impp: 8.39A																				
Uoc: 37.5V																				
Isc: 8.86A																				
NOCT: 45.0°C																				
alfa: 5.79mA/°C																				
beta: -0.127V/°C																				
gamma: -0.47%/°C																				
Rs: 0.01Ω																				
Measurement settings:																				
Test std: IEC 60891																				
Irr. sens.: Pyran.																				
Irr. min.: 500																				
T. sensor: Tpan.																				
Mod.Ser.: 1																				
Mod.Par.: 1																				
7	N&I TSIRONI O.E. / INVERTER2 / STRING1 / PANEL 3																			
	13.08.2014 15:56																			
	ΑΠΟΔΕΚΤΟ*																			
ENERGYPLANNING SOLUTIONS																				
Σελίδα: 6																				

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Όχι Αποτελέσματα

I/V

	STC	MEAS
Uoc	36.6V	33.0V
Isc	9.29A	7.30A
Umpp	28.9V	25.3V
Impp	8.31A	6.53A
Pmpp	240W	165W

STANDARD CONDITIONS

MEASURED

ENVIRONMENT - SYNCH.

Irr: 771W/m²

Tcell: 52.8°C

Module settings:

Module: RENESOLA255

Pmax: 255W

Umpp: 30.4V

Impp: 8.39A

Uoc: 37.5V

Isc: 8.86A

NOCT: 45.0°C

alfa: 5.79mA/°C

beta: -0.127V/°C

gamma: -0.47%/°C

Rs: 0.01Ω

Measurement settings:

Test std: IEC 60891

Irr. sens.: Pyran.

Irr. min.: 500

T. sensor: Tnov.

Mod.Ser.: 1

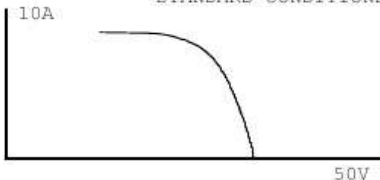
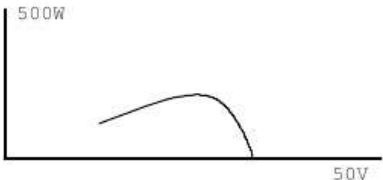
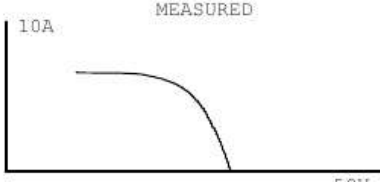
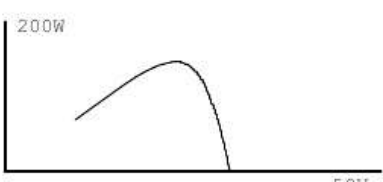
Mod.Par.: 1

8 N&I TSIRONI O.E. / INVERTER2 / STRING2 / PANEL 1
13.08.2014 15:58

ΑΠΟΔΕΚΤΟ*

ENERGYPLANNING SOLUTIONS

Σελίδα 7

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ																				
Όχι	Αποτελέσματα																			
	I/V																			
		<table><tr><th></th><th>STC</th><th>MEAS</th></tr><tr><td>U_{oc}</td><td>36.6V</td><td>33.1V</td></tr><tr><td>I_{sc}</td><td>9.41A</td><td>7.34A</td></tr><tr><td>U_{mpp}</td><td>28.5V</td><td>25.0V</td></tr><tr><td>I_{mpp}</td><td>8.35A</td><td>6.51A</td></tr><tr><td>P_{mpp}</td><td>238W</td><td>163W</td></tr></table>		STC	MEAS	U _{oc}	36.6V	33.1V	I _{sc}	9.41A	7.34A	U _{mpp}	28.5V	25.0V	I _{mpp}	8.35A	6.51A	P _{mpp}	238W	163W
		STC	MEAS																	
	U _{oc}	36.6V	33.1V																	
	I _{sc}	9.41A	7.34A																	
	U _{mpp}	28.5V	25.0V																	
	I _{mpp}	8.35A	6.51A																	
	P _{mpp}	238W	163W																	
	STANDARD CONDITIONS																			
																				
	MEASURED																			
																				
	ENVIRONMENT - SYNCH. Irr: 766W/m2 Tcell: 51.8°C																			
	Module settings: Measurement settings: Module: RENESOLA255 Test std: IEC 60891 Pmax: 255W Irr. sens.: Pyran. U _{mpp} : 30.4V Irr. min.: 500 I _{mpp} : 8.39A T. sensor: T _{nov} . U _{oc} : 37.5V Mod.Ser.: 1 I _{sc} : 8.86A Mod.Par.: 1 NOCT: 45.0°C alfa: 5.79mA/°C beta: -0.127V/°C gamma: -0.47%/°C Rs: 0.01Ω																			
9	N&I TSIRONI O.E. / INVERTER2 / STRING2 / PANEL 2 13.08.2014 15:59																			
	ΑΠΟΔΕΚΤΟ*																			
ENERGYPLANNING SOLUTIONS																				
Σελίδα 8																				

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Όχι Αποτελέσματα

I/V

	STC	MEAS
U _{oc}	36.6V	33.1V
I _{sc}	9.32A	7.25A
U _{mpp}	28.1V	24.6V
I _{mpp}	8.32A	6.48A
P _{mpp}	234W	159W

STANDARD CONDITIONS

Graph showing the I-V characteristic under standard conditions. The y-axis is labeled 10A and the x-axis is labeled 50V. The curve starts at 10A on the y-axis and drops to 0A at 50V.

Graph showing the P-V characteristic under standard conditions. The y-axis is labeled 500W and the x-axis is labeled 50V. The curve starts at 0W, rises to a peak of 500W, and then drops to 0W at 50V.

MEASURED

Graph showing the I-V characteristic under measured conditions. The y-axis is labeled 10A and the x-axis is labeled 50V. The curve starts at 10A on the y-axis and drops to 0A at 50V.

Graph showing the P-V characteristic under measured conditions. The y-axis is labeled 200W and the x-axis is labeled 50V. The curve starts at 0W, rises to a peak of 200W, and then drops to 0W at 50V.

ENVIRONMENT - SYNCH.

Irr: 765W/m²

T_{cell}: 51.8°C

Module settings:

Module: RENESOLA255

P_{max}: 255W

U_{mpp}: 30.4V

I_{mpp}: 8.39A

U_{oc}: 37.5V

I_{sc}: 8.86A

NOCT: 45.0°C

alfa: 5.79mA/°C

beta: -0.127V/°C

gamma: -0.47%/°C

Rs: 0.01Ω

Measurement settings:

Test std: IEC 60891

Irr. sens.: Pyran.

Irr. min.: 500

T. sensor: T_{nov}.

Mod.Ser.: 1

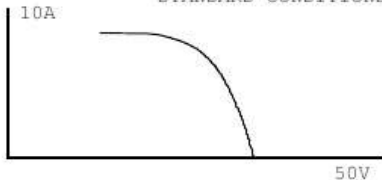
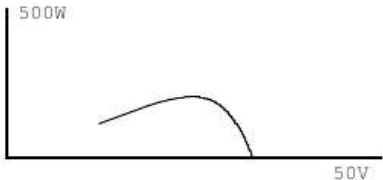
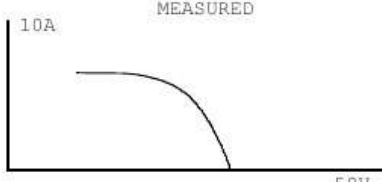
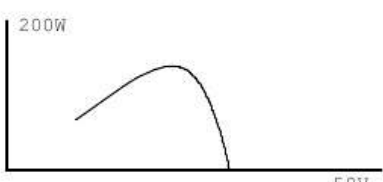
Mod.Par.: 1

11 N&I TSIRONI O.E. / INVERTER2 / STRING2 / PANEL 4
13.08.2014 16:00

ΑΠΟΔΕΚΤΟ*

ENERGYPLANNING SOLUTIONS

Σελίδα: 10

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ																				
Όχι	Αποτελέσματα																			
	I/V																			
		<table><tr><td></td><td>STC</td><td>MEAS</td></tr><tr><td>U_{oc}</td><td>36.3V</td><td>32.8V</td></tr><tr><td>I_{sc}</td><td>9.31A</td><td>7.24A</td></tr><tr><td>U_{mpp}</td><td>28.1V</td><td>24.6V</td></tr><tr><td>I_{mp}</td><td>8.11A</td><td>6.30A</td></tr><tr><td>P_{mpp}</td><td>228W</td><td>155W</td></tr></table>		STC	MEAS	U _{oc}	36.3V	32.8V	I _{sc}	9.31A	7.24A	U _{mpp}	28.1V	24.6V	I _{mp}	8.11A	6.30A	P _{mpp}	228W	155W
		STC	MEAS																	
	U _{oc}	36.3V	32.8V																	
	I _{sc}	9.31A	7.24A																	
	U _{mpp}	28.1V	24.6V																	
	I _{mp}	8.11A	6.30A																	
	P _{mpp}	228W	155W																	
	STANDARD CONDITIONS																			
																				
	MEASURED																			
																				
ENVIRONMENT - SYNCH. Irr: 764W/m2 Tcell: 51.8°C																				
Module settings: Module: RENESOLA255 Pmax: 255W U _{mpp} : 30.4V I _{mp} : 8.39A U _{oc} : 37.5V I _{sc} : 8.86A NOCT: 45.0°C alfa: 5.79mA/°C beta: -0.127V/°C gamma: -0.47%/°C Rs: 0.01Ω																				
Measurement settings: Test std: IEC_60891 Irr. sens.: Pyran. Irr. min.: 500 T. sensor: T _{nov} . Mod.Ser.: 1 Mod.Par.: 1																				
12	N&I TSIRONI O.E. / INVERTER2 / STRING2 / PANEL 6 13.08.2014 16:01																			
	ΑΠΟΔΕΚΤΟ*																			
ENERGYPLANNING SOLUTIONS																				
Σελίδα: 11																				

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Όχι Αποτελέσματα

I/V

	STC	MEAS
U _{oc}	36.6V	33.1V
I _{sc}	9.44A	7.27A
U _{mp}	28.3V	24.8V
I _{mp}	8.22A	6.33A
P _{mp}	233W	157W

STANDARD CONDITIONS

MEASURED

ENVIRONMENT - SYNCH.

Irr: 757W/m²

T_{cell}: 51.3°C

Module settings:

Module: RENESOLA255

P_{max}: 255W

U_{mp}: 30.4V

I_{mp}: 8.39A

U_{oc}: 37.5V

I_{sc}: 8.86A

NOCT: 45.0°C

alfa: 5.79mA/°C

beta: -0.127V/°C

gamma: -0.47%/°C

R_s: 0.01Ω

Measurement settings:

Test std: IEC_60891

Irr. sens.: Pyran.

Irr. min.: 500

T. sensor: T_{nov}.

Mod.Ser.: 1

Mod.Par.: 1

13 N&I TSIRONI O.E. / INVERTER2 / STRING2 / PANEL 7
13.08.2014 16:01

ΑΠΟΔΕΚΤΟ*

ENERGYPLANNING SOLUTIONS

Σελίδα: 12

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Όχι Αποτελέσματα

I/V

	STC	MEAS
U _{oc}	36.3V	32.8V
I _{sc}	9.31A	7.21A
U _{mp}	28.7V	25.3V
I _{mp}	8.12A	6.28A
P _{mp}	233W	159W

STANDARD CONDITIONS

Graph showing the I-V characteristic under standard conditions. The y-axis is labeled 10A and the x-axis is labeled 50V. The curve starts at 10A on the y-axis and drops to 0A at 50V.

Graph showing the P-V characteristic under standard conditions. The y-axis is labeled 500W and the x-axis is labeled 50V. The curve starts at 0W on the y-axis, rises to a peak of 500W, and then drops to 0W at 50V.

MEASURED

Graph showing the I-V characteristic under measured conditions. The y-axis is labeled 10A and the x-axis is labeled 50V. The curve starts at 10A on the y-axis and drops to 0A at 50V.

Graph showing the P-V characteristic under measured conditions. The y-axis is labeled 200W and the x-axis is labeled 50V. The curve starts at 0W on the y-axis, rises to a peak of 200W, and then drops to 0W at 50V.

ENVIRONMENT - SYNCH.

Irr: 761W/m²

T_{cell}: 51.3°C

Module settings:

Module: RENESOLA255

P_{max}: 255W

U_{mp}: 30.4V

I_{mp}: 8.39A

U_{oc}: 37.5V

I_{sc}: 8.86A

NOCT: 45.0°C

alfa: 5.79mA/°C

beta: -0.127V/°C

gamma: -0.47%/°C

Rs: 0.01Ω

Measurement settings:

Test std: IEC 60891

Irr. sens.: Pyran.

Irr. min.: 500

T. sensor: T_{nov}.

Mod.Ser.: 1

Mod.Par.: 1

14 N&I TSIRONI O.E. / INVERTER2 / STRING2 / PANEL 15
13.08.2014 16:03

ΑΠΟΔΕΚΤΟ*

ENERGYPLANNING SOLUTIONS

Σελίδα: 13

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Όχι Αποτελέσματα

I/V

	STC	MEAS
U _{oc}	36.7V	33.2V
I _{sc}	9.38A	7.16A
U _{mpp}	29.1V	25.7V
I _{mpp}	8.67A	6.61A
P _{mpp}	252W	170W

STANDARD CONDITIONS

MEASURED

ENVIRONMENT - SYNCH.

Irr: 750W/m²

T_{cell}: 50.8°C

Module settings:

Module: RENESOLA255

P_{max}: 255W

U_{mpp}: 30.4V

I_{mpp}: 8.39A

U_{oc}: 37.5V

I_{sc}: 8.86A

NOCT: 45.0°C

alfa: 5.79mA/°C

beta: -0.127V/°C

gamma: -0.47%/°C

R_s: 0.01Ω

Measurement settings:

Test std: IEC 60891

Irr. sens.: Pyran.

Irr. min.: 500

T. sensor: T_{παν}.

Mod.Ser.: 1

Mod.Par.: 1

15 N&I TSIRONI O.E. / INVERTER2 / STRING2 / PANEL 35
13.08.2014 16:04

ΑΠΟΔΕΚΤΟ*

ENERGYPLANNING SOLUTIONS

Σελίδα: 14

ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Όχι

Αποτελέσματα

I/V

	STC	MEAS
Uoc	36.8V	33.3V
Isc	9.47A	7.13A
Ump	29.2V	25.7V
Imp	8.85A	6.66A
Pmp	259W	171W

STANDARD CONDITIONS

MEASURED

ENVIRONMENT - SYNCH.

Irr: 740W/m²

Tcell: 50.8°C

Module settings:

Module: RENESOLA255

Pmax: 255W

Ump: 30.4V

Imp: 8.39A

Uoc: 37.5V

Isc: 8.86A

NOCT: 45.0°C

alfa: 5.79mA/°C

beta: -0.127V/°C

gamma: -0.47%/°C

Rs: 0.01Ω

Measurement settings:

Test std: IEC 60891

Irr. sens.: Pyran.

Irr. min.: 500

T. sensor: Tnov.

Mod.Ser.: 1

Mod.Par.: 1

16 N&I TSIRONI O.E. / INVERTER2 / STRING2 / PANEL 37
13.08.2014 16:05

ΑΠΟΔΕΚΤΟ*

ENERGYPLANNING SOLUTIONS

Σελίδα: 15

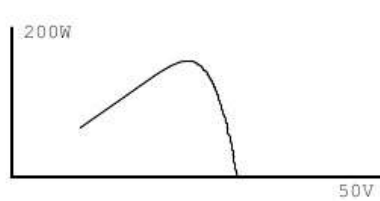
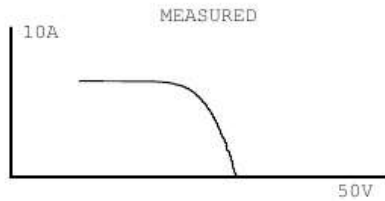
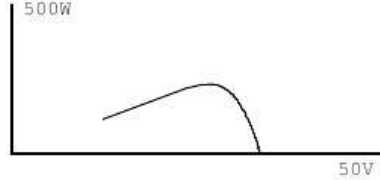
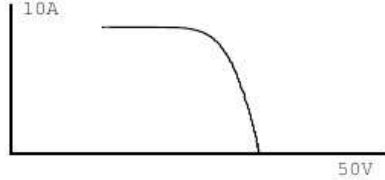
ΑΝΑΦΟΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Όχι Αποτελέσματα

I/V

	STC	MEAS
U _{oc}	36.7V	33.3V
I _{sc}	9.48A	7.15A
U _{mp}	29.3V	25.9V
I _{mp}	8.84A	6.66A
P _{mp}	259W	173W

STANDARD CONDITIONS



ENVIRONMENT - SYNCH.

Irr: 742W/m²
T_{cell}: 50.3°C

Module settings:
Module: RENESOLA255
P_{max}: 255W
U_{mp}: 30.4V
I_{mp}: 8.39A
U_{oc}: 37.5V
I_{sc}: 8.86A
NOCT: 45.0°C
alfa: 5.79mA/°C
beta: -0.127V/°C
gamma: -0.47%/°C
Rs: 0.01Ω

Measurement settings:
Test std: IEC 60891
Irr. sens.: Pyran.
Irr. min.: 500
T. sensor: T_{pnv}.
Mod.Ser.: 1
Mod.Par.: 1

Σχόλια:

1.1.2 - 'E2154512111101002
1.1.9 - 'E2154512111001165
1.2.2 - 'E21545121111301225
1.2.6 - 'E2154512111201119
1.2.15 - 'E2154512111301288
2.1.3 - 'E2154512111101035
2.2.1 - 'E2154512111201326
2.2.2 - 'E2154512111201290
2.2.3 - 'E2154512111201331
2.2.4 - 'E2154512111201245
2.2.6 - 'E2154512111101120
2.2.7 - 'E2154512111301017
2.2.15 - 'E2154512111201101
2.2.35 - 'E2154512111101118 2.2.37 - 'E2154512111301329

ENERGYPLANNING SOLUTIONS

Σελίδα: 16

18.8 Υπολογισμός με την χρήση εξισώσεων των μεγεθών U_{oc} , I_{sc} , U_{mpp} , I_{mpp} και P_{mpp} στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (STC) για τα δεκαέξι φωτοβολταϊκά πλαίσια της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Όπως, έχουμε αναφέρει οι STC τιμές των μεγεθών U_{oc} , I_{sc} , U_{mpp} , I_{mpp} και P_{mpp} υπολογίζονται αυτόματα από το όργανο MI_3108 Eurotest. Οι τιμές $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ δίνονται από τις εξισώσεις (38), (39) της ενότητας 18.6 :

$$I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \quad (38)$$

και

$$U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas}) + M * \beta * (T_{STC} - T_1) \quad (39)$$

Οι τιμές $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$ μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις (32), (33) που αναφέρθηκαν στην ενότητα 15.1.2 :

$$I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \quad (32)$$

και

$$V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \quad (33)$$

Κάνοντας χρήση των παραπάνω εξισώσεων μπορούμε να υπολογίσουμε, ανεξάρτητα από το όργανο MI_3108 Eurotest, τις τιμές που θα μας δώσουν και, κατόπιν, να τις συγκρίνουμε με τις τιμές του οργάνου. Στην εξίσωση (32) το S είναι το εμβαδόν του φωτοβολταϊκού πλαισίου, το οποίο για το μοντέλο πλαισίου RENESOLA255 δίνεται από τον κατασκευαστή ίσο με $S=1,640m*0,922m \Rightarrow S=1,627m^2$ [Solar Design Tool, RENESOLA255 , Mechanical Characteristics] ^[88]. Έτσι έχουμε :

➤ Πλαίσιο 1.1.2 . σελ.1 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Rightarrow$
 $\Rightarrow I_{mpp,STC} = 6,39 + 7,59 * \left(\frac{1000}{809} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 49,3) \Rightarrow$
 $\Rightarrow I_{mpp,STC} \cong \mathbf{8,04 A} .$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Rightarrow$
 $\Rightarrow U_{mpp,STC} = 24,9 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,04 - 7,78) + 1 * (-0,127) * (25 - 49,3) \Rightarrow$
 $\Rightarrow U_{mpp,STC} \cong \mathbf{28,0V} .$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Rightarrow$
 $\Rightarrow P_{mpp,STC} = 28,0 * 8,04 \Rightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 226 W} .$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Rightarrow$
 $\Rightarrow I_{sc,STC} = 7,59 * \left(\frac{1000}{809} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 49,3) \Rightarrow$
 $\Rightarrow I_{sc,STC} \cong \mathbf{9,15A} .$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Rightarrow$
 $\Rightarrow V_{oc,STC} = 33,3 + (-0,127) * 1 * (25 - 49,3) \Rightarrow$
 $\Rightarrow V_{oc,STC} \cong \mathbf{36,4V} .$

➤ Πλαίσιο 1.1.9, σελ.2 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,76 + 7,62 * \left(\frac{1000}{799} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 49,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,54 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 24,7 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,54 - 6,76) + 1 * (-0,127) * (25 - 49,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 27,8 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 27,8 * 8,54 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 237 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,62 * \left(\frac{1000}{799} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 49,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,31 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 33,2 + (-0,127) * 1 * (25 - 49,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,3 V .}$

➤ Πλαίσιο 1.2.1 . σελ.3 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,90 + 7,52 * \left(\frac{1000}{794} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 50,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,71 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 26,1 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,71 - 6,90) + 1 * (-0,127) * (25 - 50,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 29,3 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 29,3 * 8,71 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 255 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,52 * \left(\frac{1000}{794} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 50,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,23 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 33,2 + (-0,127) * 1 * (25 - 50,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,4 V .}$

➤ Πλαίσιο 1.2.2, σελ. 4 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,51 + 7,45 * \left(\frac{1000}{787} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 50,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} \cong \mathbf{8,38\ A} .$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 25,3 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,38 - 6,51) + 1 * (-0,127) * (25 - 50,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} \cong \mathbf{28,6\ V} .$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 28,6 * 8,38 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 240\ W} .$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,45 * \left(\frac{1000}{787} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 50,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} \cong \mathbf{9,22\ A} .$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 33,1 + (-0,127) * 1 * (25 - 50,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} \cong \mathbf{36,4\ V} .$

➤ Πλαίσιο 1.2.6, σελ.5 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Rightarrow$
 $\Rightarrow I_{mpp,STC} = 6,53 + 7,35 * \left(\frac{1000}{782} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 50,8) \Rightarrow$
 $\Rightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,43 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Rightarrow$
 $\Rightarrow U_{mpp,STC} = 24,9 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,43 - 6,53) + 1 * (-0,127) * (25 - 50,8) \Rightarrow$
 $\Rightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 28,2 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Rightarrow$
 $\Rightarrow P_{mpp,STC} = 28,2 * 8,43 \Rightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 238 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Rightarrow$
 $\Rightarrow I_{sc,STC} = 7,35 * \left(\frac{1000}{782} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 50,8) \Rightarrow$
 $\Rightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,16 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Rightarrow$
 $\Rightarrow V_{oc,STC} = 33,00 + (-0,127) * 1 * (25 - 50,8) \Rightarrow$
 $\Rightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,3 V .}$

➤ Πλαίσιο 1.2.15, σελ.6 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,57 + 7,35 * \left(\frac{1000}{771} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 52,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,51 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 24,3 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,51 - 6,57) + 1 * (-0,127 * (25 - 51,8)) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 27,7 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 27,7 * 8,51 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 236 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,35 * \left(\frac{1000}{778} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,20 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 32,8 + (-0,127) * 1 * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,2 V .}$

➤ Πλαίσιο 2.1.3, σελ.7 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Rightarrow$
 $\Rightarrow I_{mpp,STC} = 6,53 + 7,30 * \left(\frac{1000}{771} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 52,8) \Rightarrow$
 $\Rightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,54 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Rightarrow$
 $\Rightarrow U_{mpp,STC} = 25,3 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,54 - 6,53) + 1 * (-0,127) * (25 - 52,8) \Rightarrow$
 $\Rightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 28,8 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Rightarrow$
 $\Rightarrow P_{mpp,STC} = 28,8 * 8,54 \Rightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 246 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Rightarrow$
 $\Rightarrow I_{sc,STC} = 7,30 * \left(\frac{1000}{771} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1.627 * (25 - 52,8) \Rightarrow$
 $\Rightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,21 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Rightarrow$
 $\Rightarrow V_{oc,STC} = 33,0 + (-0,127) * 1 * (25 - 52,8) \Rightarrow$
 $\Rightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,5 V .}$

➤ Πλαίσιο 2.2.1, σελ.8 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,51 + 7,34 * \left(\frac{1000}{766} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,60 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 25,00 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,60 - 6,51) + 1 * (-0,127) * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 28,4 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 28,4 * 8,60 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 244 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,34 * \left(\frac{1000}{766} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,33 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 33,1 + (-0,127) * 1 * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,5 V .}$

➤ Πλαίσιο 2.2.2, σελ.9 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,53 + 7,29 * \left(\frac{1000}{763} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,64 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 25,0 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,64 - 6,53) + 1 * (-0,127) * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 28,4 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 28,4 * 8,64 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 245 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,29 * \left(\frac{1000}{763} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,30 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 33,1 + (-0,127) * 1 * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,5 V .}$

➤ Πλαίσιο 2.2.3, σελ. 10 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,48 + 7,25 * \left(\frac{1000}{765} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,55 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 24,6 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,55 - 6,48) + 1 * (-0,127) * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 27,0 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 27,0 * 8,55 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 231 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,25 * \left(\frac{1000}{765} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,23 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 33,10 + (-0,127) * 1 * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,50 V .}$

➤ Πλαίσιο 2.2.4, σελ. 11 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,30 + 7,27 * \left(\frac{1000}{764} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,38 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 24,6 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,38 - 6,30) + 1 * (-0,127) * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 28,0 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 28,0 * 8,38 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 235 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,24 * \left(\frac{1000}{764} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,22 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 32,8 + (-0,127) * 1 * (25 - 51,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,2 V .}$

➤ Πλαίσιο 2.2.6, σελ. 12 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,33 + 7,27 * \left(\frac{1000}{757} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 51,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,51 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 24,8 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,51 - 6,33) + 1 * (-0,127) * (25 - 51,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 28,1 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 28,1 * 8,51 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 239 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,27 * \left(\frac{1000}{757} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 51,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,36 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 33,1 + (-0,127) * 1 * (25 - 51,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,4 V .}$

➤ Πλαίσιο 2.2.7, σελ. 13 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,28 + 7,21 * \left(\frac{1000}{761} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 51,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,39 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 25,3 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,39 - 6,28) + 1 * (-0,127) * (25 - 51,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 28,6 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 28,6 * 8,39 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 240 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,21 * \left(\frac{1000}{761} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 51,3) \Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,23 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 32,8 + 1 * (-0,127) * 1 * (25 - 51,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,1 V .}$

➤ Πλαίσιο 2.2.15. σελ.14 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,61 + 7,16 * \left(\frac{1000}{750} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 50,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 8,85 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 25,7 + \frac{1}{1} * 0,01 * (8,85 - 6,61) + 1 * (-0,127) * (25 - 50,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 29,0 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 29,0 * 8,85 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 257 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,16 * \left(\frac{1000}{740} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 50,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,40 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 33,2 + (-0,127) * 1 * (25 - 50,8) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,5 V .}$

➤ Πλαίσιο 2.2.35, σελ.15 ηλεκτρολογικής μελέτης

$$\begin{aligned}
 \circ \quad I_{mpp,STC} &= I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * \\
 &\quad (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow \\
 &\quad \Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,66 + 7,13 * \left(\frac{1000}{740} - 1 \right) + 1 * 5,79 * \\
 &\quad 10^{-3} * (25 - 50,8) \Leftrightarrow \\
 &\quad \Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 9,02 \text{ A} .}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \circ \quad U_{mpp,STC} &= U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - \\
 &\quad I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow \\
 &\quad \Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 25,7 + \frac{1}{1} * 0,01 * (9,02 - 6,66) + 1 * \\
 &\quad (-0,127) * (25 - 50,8) \Leftrightarrow \\
 &\quad \Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 29,0 \text{ V} .}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \circ \quad P_{mpp,STC} &= U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow \\
 &\quad \Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 29,0 * 9,02 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 262 \text{ W} .}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \circ \quad I_{sc,STC} &= I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow \\
 &\quad \Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,13 * \left(\frac{1000}{740} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * \\
 &\quad (25 - 50,8) \Leftrightarrow \\
 &\quad \Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,39 \text{ A} .}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \circ \quad V_{oc,STC} &= V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow \\
 &\quad \Leftrightarrow V_{oc,STC} = 33,30 + (-0,127) * 1 * (25 - 50,8) \Leftrightarrow \\
 &\quad \Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,6 \text{ V} .}
 \end{aligned}$$

➤ Πλαίσιο 2.2.37, σελ.16 ηλεκτρολογικής μελέτης

- $I_{mpp,STC} = I_{mpp,meas} + I_{sc} * \left(\frac{I_{rr,STC}}{I_{rr}} - 1 \right) + N * \alpha * (T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{mpp,STC} = 6,66 + 7,15 * \left(\frac{1000}{742} - 1 \right) + 1 * 5,79 * 10^{-3} * (25 - 50,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{mpp,STC} \cong 9,00 A .}$

- $U_{mpp,STC} = U_{mpp,meas} + \frac{M}{N} * R_s * (I_{mpp,STC} - I_{mpp,meas} + M * \beta * T_{STC} - T_1) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow U_{mpp,STC} = 25,9 + \frac{1}{1} * 0,01 * (9,00 - 6,66) + 1 * (-0,127) * (25 - 50,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{U_{mpp,STC} \cong 29,1 V .}$

- $P_{mpp,STC} = U_{mpp,STC} * I_{mpp,STC} \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow P_{mpp,STC} = 29,1 * 9,00 \Leftrightarrow \mathbf{P_{mpp,STC} \cong 262 W .}$

- $I_{sc,STC} = I_{sc,meas} * \left(\frac{1000}{G} \right) + a * S * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow I_{sc,STC} = 7,15 * \left(\frac{1000}{742} \right) + 5,79 * 10^{-3} * 1,627 * (25 - 50,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{I_{sc,STC} \cong 9,40 A .}$

- $V_{oc,STC} = V_{oc,meas} + \beta * N * (T_{ref} - T_{mod}) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow V_{oc,STC} = 35,3 + (-0,127) * 1 * (25 - 50,3) \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow \mathbf{V_{oc,STC} \cong 36,5 V .}$

Οι τιμές των μεγεθών $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$, που υπολογίσαμε με την βοήθεια των εξισώσεων, στην πλειονότητά τους είτε συμπίπτουν είτε εμπίπτουν στο εύρος ακρίβειας των τιμών των αντίστοιχων μεγεθών που υπολογίσαμε με την βοήθεια του οργάνου MI_3108 Eurotest. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που οι τιμές - από ό,τι παρατηρήσαμε των ρευμάτων $I_{mpp,STC}$ κάποιων πλαϊσίων- έχουν μια πολύ μικρή απόκλιση.

Παρακάτω μπορούμε να δούμε και να συγκρίνουμε ως παράδειγμα της άνω διαπίστωσης τις τιμές που βρήκαμε με τις τιμές του οργάνου για πέντε πλαίσια.

* Πλαίσιο 1.1.2

	Εξισώσεις	MI_3108	Ακρίβεια
$U_{oc,STC}$	36,4	36,5	$\pm(0,73)$
$I_{sc,STC}$	9,15	9,24	$\pm(0,1848)$
$U_{mpp,STC}$	28	28	$\pm(0,56)$
$I_{mpp,STC}$	8,04	7,78	$\pm(0,1556)$
$P_{mpp,STC}$	226	218	$\pm(6,54 + 3 \text{ ψηφία})$

Πίνακας 11 Τιμές των $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$ για το πλαίσιο 1.1.2 .

Από το πινακάκι παρατηρούμε ότι τα μεγέθη $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$ που υπολογίσαμε με την βοήθεια των εξισώσεων δεν εμπίπτουν στο εύρος της ακρίβειας των αντίστοιχων τιμών που προέκυψαν από το ηλεκτρονικό όργανο MI_3108 Eurotest.

* Πλαίσιο 1.1.9

	Εξισώσεις	MI_3108	Ακρίβεια
$U_{oc,STC}$	36,3	36,4	$\pm(0,728)$
$I_{sc,STC}$	9,31	9,39	$\pm(0,1878)$
$U_{mpp,STC}$	27,8	27,9	$\pm(0,558)$
$I_{mpp,STC}$	8,54	8,33	$\pm(0,1666)$
$P_{mpp,STC}$	237	232	$\pm(6,96 + 3 \text{ ψηφία})$

Πίνακας 12 Τιμές των $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$ για το πλαίσιο 1.1.9 .

Από τις τιμές του πίνακα μπορούμε εύκολα να δούμε ότι οι τιμές των μεγεθών $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$ που υπολογίσαμε μέσω των εξισώσεων (32), (33) και (38), (39) εμπίπτουν στο εύρος τιμών των αντίστοιχων μεγεθών που υπολογίστηκαν από το ηλεκτρονικό όργανο MI_3108 Eurotest.

* Πλαίσιο 2.1.3

	Εξισώσεις	MI_3108	Ακρίβεια
$U_{oc,STC}$	36,5	36,6	$\pm(0,734)$
$I_{sc,STC}$	9,21	9,29	$\pm(0,1858)$
$U_{mpp,STC}$	28,8	28,9	$\pm(0,578)$
$I_{mpp,STC}$	8,54	8,31	$\pm(0,1662)$
$P_{mpp,STC}$	246	240	$\pm(7,2 + 4 \text{ ψηφία})$

Πίνακας 13 Τιμές των $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$ για το πλαίσιο 2.1.3 .

Οι τιμές των μεγεθών $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$ που υπολογίσαμε είναι πολύ κοντά στις τιμές που μας έδωσε το ηλεκτρονικό όργανο MI_3108 Eurotest. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι το ρεύμα $I_{mpp,STC}$ βρίσκεται έξω το επιθυμητό εύρος ακρίβειας αν και είναι κοντά στην τιμή που υπολογίστηκε από το ηλεκτρονικό όργανο.

* Πλαίσιο 2.2.15

	Εξισώσεις	MI_3108	Ακρίβεια
$U_{oc,STC}$	36,5	36,7	$\pm(0,734)$
$I_{sc,STC}$	9,4	9,38	$\pm(0,1876)$
$U_{mpp,STC}$	29	29,1	$\pm(0,582)$
$I_{mpp,STC}$	8,85	8,67	$\pm(0,1734)$
$P_{mpp,STC}$	257	252	$\pm(7,56 + 3 \text{ ψηφία})$

Πίνακας 14 Τιμές των $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$ για το πλαίσιο 2.2.15.

Οι υπολογισμένες τιμές των μεγεθών $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$ για το πλαίσιο 2.2.15 προσεγγίζουν με ακρίβεια τις αντίστοιχες τιμές του ηλεκτρονικού οργάνου MI_3108 Eurotest. $I_{mpp,STC}$

* Πλαίσιο 2.2.37

	Εξισώσεις	MI_3108	Ακρίβεια
$U_{oc,STC}$	36,5	36,7	$\pm(0,734)$
$I_{sc,STC}$	9,4	9,48	$\pm(0,1896)$
$U_{mpp,STC}$	29,1	29,3	$\pm(0,586)$
$I_{mpp,STC}$	9	8,84	$\pm(0,1768)$
$P_{mpp,STC}$	262	259	$\pm(7,77 + 3 \text{ ψηφία})$

Πίνακας 15 Τιμές των $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$ για το πλαίσιο 2.2.37.

Από τις τιμές του Πίνακα 15 είναι ορατό ότι οι υπολογισμένες τιμές των μεγεθών $U_{oc,STC}$, $I_{sc,STC}$, $U_{mpp,STC}$, $I_{mpp,STC}$ και $P_{mpp,STC}$ μέσω των εξισώσεων εμπίπτουν στο εύρος ακρίβειας των μετρήσεων του ηλεκτρονικού οργάνου MI_3108 Eurotest.

18.9 Υπολογισμός των αποκλίσεων της αποδιδόμενης ισχύος των δεκαέξι φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στην συνέχεια με βάση τις μετρούμενες τιμές $P_{meas, stc}$ [W] και τις ονομαστικές τιμές $P_{nom, stc}$ [W] που μας δίνει ο κατασκευαστής των φωτοβολταϊκού πανέλων – ανηγμένες και οι δύο στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (STC) -, υπολογίζουμε την απόκλιση ισχύος d (Deviation) για κάθε ένα από τα τυχαία πλαίσια που έχουμε επιλέξει από την εγκατάσταση.

Έτσι, έχουμε :

- Panel 1.1.2 : $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{218 - 255}{255} \times 100\% = -14,51\%$
- Panel 1.1.9 : $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{232 - 255}{255} \times 100\% = -9,02\%$
- Panel 1.2.1 : $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{251 - 255}{255} \times 100\% = -1,57\%$
- Panel 1.2.2 : $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{232 - 255}{255} \times 100\% = -9,02\%$
- Panel 1.2.6 : $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{232 - 255}{255} \times 100\% = -9,02\%$

- Panel 1.2.15: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{231-255}{255} \times 100\% = -9,41\%$
- Panel 2.1.3: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{240-255}{255} \times 100\% = -5,88\%$
- Panel 2.2.1: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{238-255}{255} \times 100\% = 6,67\%$
- Panel 2.2.2: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{240-255}{255} \times 100\% = -5,88\%$
- Panel 2.2.3: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{234-255}{255} \times 100\% = -8,24\%$
- Panel 2.2.4: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{228-255}{255} \times 100\% = -10,59\%$
- Panel 2.2.6: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{233-255}{255} \times 100\% = -8,63\%$

- Panel 2.2.7: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{233-255}{255} \times 100\% = -8,63\%$
- Panel 2.2.15: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{252-255}{255} \times 100\% = -1,18\%$
- Panel 2.2.35: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{259-255}{255} \times 100\% = 1,57\%$
- Panel 2.2.37: $d = \frac{P_{meas, stc} - P_{nom, stc}}{P_{nom, stc}} \times 100\% = \frac{259-255}{255} \times 100\% = 1,57\%$

Οι αποκλίσεις της αποδιδόμενης ισχύς που υπολογίσαμε για κάθε ένα από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 16 . Με τον τρόπο αυτό, είναι εύκολο να έχουμε μια συνολική εικόνα των αποκλίσεων ισχύος και να οδηγηθούμε σε κάποια συμπεράσματα.

ΕΡΓΟ: 33,66Wp N&I ΤΣΙΡΩΝΗ Ο.Ε.

Panel	Serial Number	Date	Time	P _{STC} [W] measured	P _{STC} [W] Nameplate	Deviation
1.1.2	E2154512111101002	13/08/2014	15:46	218	255	-14,51%
1.1.9	E2154512111001165	13/08/2014	15:47	232	255	-9,02%
1.2.1	E2154512111301238	13/08/2014	15:49	251	255	-1,57%
1.2.2	E2154512111301225	13/08/2014	15:50	232	255	-9,02%
1.2.6	E2154512111201119	13/08/2014	15:51	232	255	-9,02%
1.2.15	E2154512111301288	13/08/2014	15:53	231	255	-9,41%
2.1.3	E2154512111101035	13/08/2014	15:56	240	255	-5,88%
2.2.1	E2154512111201326	13/08/2014	15:58	238	255	-6,67%
2.2.2	E2154512111201290	13/08/2014	15:59	240	255	-5,88%
2.2.3	E2154512111201331	13/08/2014	15:59	234	255	-8,24%
2.2.4	E2154512111201245	13/08/2014	16:00	228	255	-10,59%
2.2.6	E2154512111101120	13/08/2014	16:01	233	255	-8,63%
2.2.7	E2154512111301017	13/08/2014	16:01	233	255	-8,63%
2.2.15	E2154512111201101	13/08/2014	16:03	252	255	-1,18%
2.2.35	E2154512111101118	13/08/2014	16:04	259	255	1,57%
2.2.37	E2154512111301329	13/08/2014	16:05	259	255	1,57%

Πίνακας 16 Συγκρίσεις των τιμών της μετρούμενης ισχύος $P_{meas,sc}$ [W] και της ονομαστικής $P_{nom,sc}$ [W] των τυχαία επιλεγμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και υπολογισμός της απόκλισης d των δύο αυτών τιμών.

Με βάση τις αποκλίσεις d των ισχύων $P_{meas,sc}$ [W] και $P_{nom,sc}$ [W] των τυχαίων φωτοβολταϊκών πανέλων που έχουμε επιλέξει τυχαία από την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, που φαίνεται στην Εικόνα 69, μπορούμε να οδηγηθούμε σε κάποια συμπεράσματα. Οι αποκλίσεις d της μετρούμενης ισχύος $P_{meas,sc}$ [W] από αυτήν του

κατασκευαστή $P_{nom, stc}$ [W] για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια 1.1.9 ($d = -9,02\%$), 1.2.1 ($d = -1,57\%$), 1.2.2 ($d = -9,02\%$), 1.2.6 ($d = -9,02\%$), 1.2.15 ($d = -9,41\%$), 2.1.3 ($d = -5,88\%$), 2.2.1 ($d = -6,67\%$), 2.2.2. ($d = -5,88\%$), 2.2.3 ($d = -8,24\%$), 2.2.4 ($d = -10,59\%$), 2.2.6 ($d = -8,63\%$), 2.2.7 ($d = -8,63\%$), 2.2.15 ($d = -1,18\%$), 2.2.35 ($d = 1,57\%$) και 2.2.37 ($d = 1,57\%$) δηλώνουν ότι τα συγκεκριμένα πανέλα δεν έχουν επηρεαστεί από το φαινόμενο P.I.D.. Το συμπέρασμα αυτό βασίζεται στις μελέτες των κατασκευαστών, σύμφωνα με τις οποίες η υποβάθμιση της αποδιδόμενης ισχύος κατά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης θεωρείται φυσιολογικό να φτάσει περίπου έως το $d = \sim 9\%$. Ωστόσο, τα πανέλα 1.1.2 ($d = -14,51\%$) και 2.2.4 ($d = -10,59\%$) εμφανίζουν μεγαλύτερη απόκλιση, γεγονός που δείχνει ότι έχουν υποστεί υποβάθμιση της απόδοσής τους λόγω του φαινομένου P.I.D.. Από την άλλη, οι θετικές τιμές της απόκλισης της ισχύος d που υπολογίσαμε για τα πανέλα 2.2.36 ($d = 1,57\%$) και 2.2.37 ($d = 1,57\%$) δείχνουν ότι τα δύο αυτά πλαίσια έχουν βελτιώσει την απόδοσή τους. Ωστόσο, τα πανέλα 1.1.2 ($d = -14,51\%$) και 2.2.4 ($d = -10,59\%$) εμφανίζουν μεγαλύτερη απόκλιση, γεγονός που δείχνει ότι έχουν υποστεί υποβάθμιση της απόδοσής τους λόγω του φαινομένου P.I.D..

18.10 Συμπεράσματα

Το φαινόμενο P.I.D. , όπως είδαμε, είναι ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα που επηρεάζει την εύρυθμη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μειώνοντας την απόδοση μετατροπής των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί ένα θέμα που απασχολεί αρκετά τους επιστήμονες και τους επενδυτές λόγω της οικονομικής ζημίας που μπορεί να αποφέρει ως απρόβλεπτο πρόσθετο έξοδο στην συνολική αρχική επένδυση.

Το φαινόμενο P.I.D. οφείλεται κυρίως στην υψηλό δυναμικό DC που μπορεί να υπάρχει σε μία φωτοβολταϊκή κυψέλη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Το P.I.D έκανε την εμφάνισή του μόλις τα τελευταία χρόνια αν και πολλοί παράγοντες που συμβάλλουν στην εμφάνισή του προϋπήρχαν. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην δημιουργία με την πάροδο του χρόνου ολοένα μεγαλύτερων φωτοβολταϊκών πάρκων και μεγαλύτερων εγκαταστάσεων που αποσκοπούσαν σε μεγαλύτερες αποδόσεις ισχύος, κάτι που απαιτούσε μεγαλύτερες τάσεις λειτουργίας (600V για την Αμερική και 1000V για την Ευρώπη) από ό,τι προηγούμενως.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί εύκολα να εντοπιστεί αν έχει υποστεί βλάβη εξαιτίας του φαινομένου P.I.D με μια απλή επιτόπια έρευνα (μέσω των μεθόδων ηλεκτροφωταύγειας και θερμογραφικής μελέτης). Ωστόσο, οι επιστήμονες έχουν προχωρήσει στην ανάπτυξη μιας ενδιαφέρουσας πλατφόρμας η οποία λαμβάνει ως εισόδους τα επιτόπια μετρούμενα μεγέθη - τάση , ρεύμα- και κατόπιν τα επεξεργάζεται μέσω ενός H/Y. Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική μελέτη σε βάθος του ανεπιθύμητου επιβλαβούς φαινομένου οδήγησε στην δημιουργία μαθηματικών μοντέλων πρόβλεψης μέσω εξισώσεων για τον υπολογισμό των μεγεθών τάσης, ρεύματος και ισχύος μετά την επίδραση του φαινομένου P.I.D. Η σημαντικότερη από τις μαθηματικές σχέσεις είναι η σχέση Arrhenius.

Βασική επιθυμία των επιστημόνων είναι η πρόληψη του φαινομένου P.I.D. και η αντιμετώπισή του όταν πια έχει εμφανιστεί, δηλαδή η επαναφορά των βλαφθέντων φωτοβολταϊκών πλαισίων όπου και όσο είναι αυτό δυνατόν. Για παράδειγμα, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο του οποίου η απόδοση έχει μειωθεί πάνω από 30% δεν δύναται να επανέλθει εντελώς στην αρχική κατάσταση λειτουργίας του. Οι τρόποι αντιμετώπισης ποικίλουν και αφορούν μέτρα που λαμβάνονται σε επίπεδο συστήματος, επίπεδο φωτοβολταϊκού πλαισίου και επίπεδο φωτοβολταϊκής κυψέλης.

Τέλος, μας δίνεται μια ηλεκτρολογική μελέτη που πραγματοποιήθηκε για μια πραγματική φωτοβολταϊκή εγκατάσταση για τον έλεγχο πιθανής υποβάθμισης της απόδοσης εξαιτίας του φαινομένου P.I.D.. Σκοπός είναι η επιβεβαίωση όλων όσων έχουμε αναφέρει στην διπλωματική εργασία επάνω στο φαινόμενο P.I.D. .Η μελέτη κατέγραψε κατά πόσο τα μεγέθη, όπως η τάση ανοιχτοκυκλώσεως Voc, η τάση βραχυκυκλώσεως Isc, η μέγιστη ισχύς εξόδου P_{mpp} κ.ά., έχουν αποκλίνει από τις αρχικές τιμές τους που δίνονται από τον κατασκευαστή. Εμείς με την σειρά μας και με την βοήθεια των μαθηματικών σχέσεων που έχουμε προαναφέρει στην εργασία, προχωρήσαμε στην επιβεβαίωση των μετρήσεων αυτών.

Το συμπέρασμα των άνωθεν μετρήσεων, δηλαδή των αποκλίσεων d των μετρούμενων ισχύων -ανηγμένων στις πρότυπες συνθήκες διαφοράς- συγκριτικά με τις ονομαστικές τιμές λειτουργίας που μας δίνει ο κατασκευαστής είναι ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελα έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις, άρα η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση δεν έχει επηρεαστεί από το φαινόμενο P.I.D. με εξαίρεση μόνο δύο φωτοβολταϊκά πάνελα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Solar Cells Operation and Modelling, Dragica Vasileska, Gerhard Klimeck, 2010.
- [2] Review of Photovoltaic technologies, I. El Chaar, L.A. Iamont, N. El Zein, Reviews and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, Science Direct, 2011.
- [3] Current and Future Photovoltaics, M. Boreland, D. Bagnall Nanoscale Foresight and Horizon Scanning Centre-Energy Project, 2006.
- [4] Progress in solar PV technology: Research and achievement, V.V. Tyagi, Nurul A.A. Rahim, N.A. Rahim, Jeyraj A./I. Selvarj, Reviews and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, Science Direct, 2012.
- [5] Φωτοβολταϊκά Συστήματα από τη Θεωρία στην Πράξη, Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2013.
- [6] Solar Photovoltaic electricity: Current status and future prospects, T.M. Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, Elsevier, Science Direct, 2011.
- [7] Solar Photovoltaic Technologies, Solar Photovoltaics, Volume 1:Power Sector- Issue 4/5, IRENA Working Paper, International Renewable Energy Agency, 2012.
- [8] Crystalline and thin-film silicon solar cells, state of the art and future Potential, Martin A. Green, Solar Energy 74, Elsevier, Science Direct, 2003
- [9] Photovoltaic Technologies, Darren M. Bagnall, Matt Boreland, Elsevier, Energy Policy, 2008.
- [10] Brief Review of cadmium telluride-based photovoltaic technologies, Bulent M. Basol, Brian McCandless, Journal of Photonics for Energy, 2014.
- [11] Copper indium gallium selenide solar cells, Wikipedia-The free Encyclopedia (link: https://en.wikipedia.org/wiki/Copper_indium_gallium_selenide_solar_cells).
- [12] The Present and Future of Photovoltaic Manufacturing, Colin A. Wolden, Science Foundation Ireland.
- [13] Hybrid solar cell, Wikipedia-The free Encyclopedia (link: https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_solar_cell#Types_of_interfaces_and_structures).
- [14] Quantum dot display, Wikipedia-The free Encyclopedia (link: https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_dot_display).
- [15] Quantum dot solar cell, Wikipedia-The free Encyclopedia (link:

- https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_dot_solar_cell).
- [16] Quantum dot, Wikipedia-The free Encyclopedia (link: https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_dot).
 - [17] Inorganics –in-Organics: Recent Developments and Outlook for 4g Polymer Solar Cells, Imalka Jayawardena, Chris Mills, Michail Julius Beliatas, S Ravi P Silva, ResearchGate, 2013.
 - [18] NREL (National Renewable Energy Laboratory), Colorado-USA, Established 1974, Wikipedia-The free Encyclopedia (link: https://en.wikipedia.org/wiki/National_Renewable_Energy_Laboratory).
 - [19] Γραφένιο, Βικιπαιδεία-Η Ελεύθερη Εγκυκλοπαίδεια (link: <https://el.wikipedia.org/wiki/Γραφένιο>).
 - [20] PEDOT: PSS, Wikipedia-The free Encyclopedia (link: <https://en.wikipedia.org/wiki/PEDOT:PSS>).
 - [21] Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review, Ababacar Ndiaye, Abderafi Charki, Abdessamad Kobi, Cheikh M.F. Kebe, Pape A. Ndiaye, Vincent Sambou, Solar Energy- Elsevier, Science Direct, 2012.
 - [22] Model Associated with the Study of the Degradation Based on the Accelerated Test: A Literature Review, Fatou Dia, Nacire Mbengue, Omar A.Niasse, Awa Dieye, Mor Niang, Bassirou Ba, Cheikh Sene, Laboratory of Semiconducors, University Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal, Scientific Research Publishing, 2015.
 - [23] Potential Induced Degradation, Wikipedia-The free Encyclopedia (link: https://en.wikipedia.org/wiki/Potential_induced_degradation).
 - [24] G. D. M. R. Dabera, K. D. G. I. Jayawardena, M. R. R. Prabhat, I. Yahya, Y. Y. Tan, N. A. Nismy, H. Shiozawa, M. Sauer, G. Ruiz-Soria, P. Ayala, V. Stolojan, A. A. D. T. Adikaari, P. D. Jarowski, T. Pichler, and S. R. P. Silva, ACS Nano, 2013.
 - [25] On-site tests for the Detection of Potential Induced Degradation in Modules, F. Martinez-Moreno, E. Lorenzo, J. Munoz, R. Parra, T. Espino, Spain.
 - [26] Understanding Potential Induced Degradation, ΔE Advanced Energy, USA.
 - [27] Potential-Induced Degradation (P.I.D.): Introduction of a Novel Test Approach and Explanation of Increased Depletion Region Recombination, Dominik Lausch, Volker Naumann, Otwin Breitenstein, Jan Bauer, Andreas Graff, Joerg Bagdahn and Christian Hagendorf, IEEE Journal of Photovoltaics, IEEE, 2014.
 - [28] What is P.I.D. and how can you reduce solar power loss?, Michael Roy, Hartford Steam Boiler, Munich, 2015.
 - [29] Potential Induced Degradation, Product and Services, Waaree Company,

India.

- [30] Potential Induced Degradation (P.I.D.): an Introduction, Niclas, Sinovoltaics Company, 2013.
- [31] Technology and Climate Trends in PV Module Degradation, Dirk C. Jordan, John H. Wohlgemuth and Sarah R. Kurtz, NREL.
- [32] Koppen Climate Classification, Wikipedia- The free Encyclopedia, (link: https://en.wikipedia.org/wiki/Koppen_climate_classification).
- [33] Munoz, M.A., Alonso Garcia, M.C., Nieves, V., Chenlo, F., 2011. Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions, *Solar Energy* 85, 2264-2274.
- [34] Reis, A.M., Coleman, N.T., Marshall, M.W., Lehman, P.A., Chamberlain, C.E., 2002. Comparison of PV module performance before and after 11-years of field exposure. In: *Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans Louisiana, USA.
- [35] Sakamoto, S., Oshiro, T., 2003, Field tests results on the stability of crystalline Silicon photovoltaic modules manufactured in the 1990s. In: *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, pp. 1888-1891.
- [36] Osterwald, C.R., Benner, J.P., Pruett, J., Anderberg, A, Rummeland, S., Ottoson, L., 2003,. Degradation in weathered crystalline-silicon PV modules Apparently caused by UV radiation. In: *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, pp.2911-2915.
- [37] Marion, B., Adelstein, J., 2003. Long-term performance of the SERF PV Systems. *NCPV and Solar Program Review Meeting*.
- [38] Raghuraman, B., Laksman, V., Kuitche, J., Shisler, w., Tamizhani, G., Kapoor, H., 2006. An overview of SMUDs outdoor photovoltaic test program at Arizona State University. In: *4th IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Hawaii, USA.
- [39] Chuang, S., Ishibashi, A., Kijima, S., Nakayama, N., Ukita, M., Taniguchi, S., 1997. Kinetic model for degradation of lightemitting diodes. *IEEE Journal of Quantum electronics* 33, 970-979.
- [40] Xie, J., Pecht, M., 2003. Reliability prediction modeling of semiconductor light emitting device. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 3, 218-222.
- [41] Vazquez, M., Ignacio, R.S., 2008. Photovoltaic module reliability model based on field degradation studies. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 16, 419-433.
- [42] Effect of humidity and temperature on the potential-induced degradation, Stephan Hoffman and Michael Koelh, Fraunhofer Institute for Solar Energy

- Systems, Germany, Wiley Online Library, 2012.
- [43] Naumann Volker, Lausch Dominik, Hahnel Angelika, Bauer Jan, Breitenstein Otwin, Graff Andreas, Werner Martina, Swatek Sina (2014-01-01).
“Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 120, Part A 383-389.
 - [44] Hacke, and al., 2011. System Voltage Potential-Induced Degradation Mechanisms in PV Modules and Methods for Test. In: 37th IEEE PVSC.
 - [45] Schütze, M., and al., 2011. Laboratory Study of Potential Induced Degradation of Silicon Photovoltaic Modules. In: 37th IEEE PVSC.
 - [46] Mann, N. R. , Schafer, R. E. and Singpurwalla, N. D. (1974) *Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data*. Wiley, New York.
 - [47] Boccaletti, G., Borri, F.R., D’Esponosa, F. and Ghio, E. (1989) Chapter 11: Accelerated Tests. In: Pollino, E., Ed., *Microelectronic Reliability-Volume 2: Integrity Assessment and Assurance*, Artech House, Norwood.
 - [48] Klinger, D.J. (1991) On the Notion of Activation Energy in Reliability: Arrhenius, Eyring and Thermodynamics. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Orlando, 29-31 January 1991, 295-300.
 - [49] Nelson, W. (1990) *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analyses*, Wiley, New York. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470316795>.
 - [50] S. De, T. M. Higgins, P. E. Lyons, E. M. Doherty, P. N. Nirmalraj, W. J. Blau, J. J. Boland, and J. N. Coleman, *ACS Nano*, 2009, 3, 1767-1774.
 - [51] R. C. Tenent, T. M. Barnes, J. D. Bergeson, A. J. Ferguson, B. To, L. M. Gedvilas, M. J. Heben and J. L. Blackburn, *Adv. Mater.*, 2009, 21, 3210-3216.
 - [52] L. G. De Arco, Y. Zhang, C. W. Schlenker, K. Ryu, M. E. Thomson and C. W. Zhou, *ACS Nano*, 2010, 4, 2865-2873.
 - [53] S. Y. Chou and W. Ding, *Opt. Express*, 2013, 21, A60-A76.
 - [54] Weston, R. and Schwarz H.A. (1972) *Chemical Kinetics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
 - [55] Peck, D.S. (1986) Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation. *Proceedings of the IEEE International Reliability Physics Symposium*, Anaheim, 1-3 April 1986, 44-45. <http://dx.doi.org/10.1109/irps.1986.362110> .
 - [56] Statistical Associating Fluid Theory (SAFT): A Successful Model for the Calculation of Thermodynamic and Phase Equilibrium Properties of Complex Fluid Mixtures, Ioannis G. Economou, National Research Center for Physical Sciences “Demokritos”, Greece, Industrial and Engineering Chemistry

- Research, 2002, ACS Publications.
- [57] Numerical Aspects of the SAFT Equation of State, Leah M. Octavio, University of Rhode Island, 2006.
 - [58] Meeker, W.Q. and Escobar, L.A.(1998) Statistical Methods for Reliability Data. Wiley, New York.
 - [59] Boyko, K.C. and Gerlach, D.L. (1989) Time Dependent Dielectric Breakdown at Al_2O_3 Oxides. *Proceedings of the 27th Annual International Reliability Physics Symposium*, Phoenix, 11-13 April 1989, 1-8.
 - [60] On-site Tests for the Detection of Potential Induced Degradation in Modules, F. Martinez-Moreno, E. Lorenzo, J. Munoz, R. Parra, T. Espino, PVCROPS, Spain.
 - [61] Power loss prognosis from thermographic images of P.I.D. affected silicon Solar modules, Thomas Kade, Katrin Lammers, Hans Joachim Moller, Solar Energy Materials & Solar Cells, Elsevier, ScienceDirect, 2015.
 - [62] T. Kobayashi, M. Bando, N. Kimura, K. Shimizu, K. Kadono, N. Umezu, K. Miyahara, S. Hayazaki, S. Nagai, Y. Mizuguchi, Y. Murakami and D. Hobara, Appl. Phys. Lett., 2013, 102, 023112.
 - [63] Photovoltaic Platform for Investigating PV Module Degradation, Ababacar Ndiaye, Cheikh M. F. Kebe, Abderafi Charki, Vincent Sambou, Papa A. Ndiaye, International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15, Energy Procedia 74 (2015), Elsevier, Science Direct.
 - [64] SMA PV OFFSET BOX- Automatic Night-Time Discharging of PV Modules, SMA Solar Technology, Germany.
 - [65] P.I.D. – The Problem and How to Solve It, Module Regeneration with the PV-Offset Box, SMA Solar Technology, Germany.
 - [66] Accessories for PV Inverters, SMA PV OFFSET BOX, Installation Manual, SMA Solar Technology, Germany.
 - [67] Polyolefin as P.I.D. resistant encapsulant material in PV modules, M.C.Lopez-Escalante, Luis J. Caballero, F. Martin, M. Gabas, A. Cuevas, J.R. Ramos-Barrado, Spain, Solar Energy Materials & Solar Cells, Elsevier, Science Direct, 2015.
 - [68] link: http://www.ul.com/global/documents/offerings/industries/energy/resources/PID/_EN_Sept2012_final.pdf .
 - [69] Chemically strengthened glass, Wikipedia- The free Encyclopedia, (link: https://en.wikipedia.org/wiki/Chemically_strengthened_glass).
 - [70] Influence of silver and potassium ion exchange on physical and mechanical properties of soda lime glass, Duygu Guldiren, Ipek Erdem, Suheyla Aydin,

- Turkey, Journal of Non-Crystalline Solids, Elsevier, Science Direct, 2016.
- [71] Potential-induced degradation in photovoltaic modules based on n-type Single crystalline Si solar cells, Kohjiro Hara, Sachiko Jonai, Atsushi Masuda, Japan, Solar Energy Materials & Solar Cells, Elsevier, Science Direct, 2015.
- [72] $\text{SiO}_y\text{N}_x/\text{SiN}_x$ stack anti-reflection coating with P.I.D.-resistance for Crystalline silicon solar cells, Chunlan Zhou, Junjie Zhu, Sean E. Foss, Halvard Haug, Ørnulf Nordseth, Erik S. Marstein, Wenjing Wang, 5th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2015, Energy Procedia, Elsevier, ScienceDirect 2015.
- [73] Potential-induced degradation (P.I.D.) of photovoltaic panels, Matthiac Diefh, pvServe, Denmark, 2015.
- [74] Proceedings of the 35th IEEE PVSC 20-25 June 2010 pp. 2817-2822.
- [75] R. Swanson et.al. 15th PVSEC, Shanghai (2005).
- [76] S. Pingel, et. al, *Potential Induced Degradation of Solar Cells and Panels*, 35th IEEE PVSC, 2010.
- [77] Sodium outdiffusion from stacking faults as root cause for the recovery Process of potential-induced degradation (PID), Dominik Lausch, Volker Naumann, Andreas Graff, Angelika Hähnel, Otwin Breitenstein, Christian Halgendorf, Jörg Bagdahn, 4th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2014, Energy Procedia 55 (2014) 486-493, Energy Procedia, Elsevier, Science Direct.
- [78] Wohlgemuth, J.H., Cunningham, D.W., Nguyen, A.M., Miller, J., 2005. Long Term Reliability of PV Modules. In: Proc. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 1942-1946.
- [79] Quintana, M.A., King, D.L., McMahon, T.J., Osterwald, C.R., 2002. Commonly observed degradation in field-aged photovoltaic modules. In: Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1436-1439.
- [80] IEEE- TISO, 2008. , <http://ieee.dct.supsi.ch/PV/Results/Tested_modules.htm>
- [81] Osterwald, C.R., Anderberg, A., Rummel, S., Ottoson, L., 2002. Degradation Analysis of Weathered Crystalline-Silicon PV Modules. In: 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, Louisiana,
- [82] Lannoy, A., Procaccia, H., 2005. Evaluation et maîtrise du vieillissement Industriel. Edition Lavoisier.
- [83] Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., Dunlop, E.D., 2013. Solar cell efficiency tables (Version 41). Progress in Photovoltaic Energy Conversion, Vol. 1, May 2006, pp. 15-19.

- [84] Makrides, G., Zinsser, B., Norton, M., Georghiou, G.E., Schubert, M., Werner, J.H., 2010. Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(2), 754-762.
- [85] Laronde, R., 2009. Solution Photovoltaïques dans le Bâtiment, GINGER CATED.
- [86] IEC: 60891:2009, International Electrotechnical Commission (IEC webstore: link: <https://webstore.iec.ch/publication/3821>).
- [87] Manual EurotestPV MI 3108, Version 1.1, Code no. 20 751 987, Manufacturer: METREL d.d, Slovenia, (Απόδοση στα Ελληνικά-Μετάφραση: Σαλευρής Αντώνιος, 2012,link: <https://www.scribd.com/doc/265769337/Οδηγίες-χρήσης-για-το-MI-3108-EurotestPV>).
- [88] Renesola JCC 255M-24/Bb (255W) Solar Panel, Renesola, SolarDesignTool, (link: <http://www.solardesigntool.com/components/module-panel-solar/Renesola/2137/JC255M-24-Bb/specification-data-sheet.html>).
- [89] G. D. M. R. Dabera, K. D. G. I. Jayawardena, M. R. R. Prabhath, I. Yahya, Y. Y. Tan, N. A. Nismy, H. Shiozawa, M. Sauer, G. Ruiz-Soria, P. Ayala, A. A. D. T. Adikaari, P. D. Jarowski, V. Pichler and S. R. P. Silva, *ACS Nano*, 2013, 7, 556-565.
- [90] A. J. Morfa, K. L. Rowlen, T. H. Reilly, M. J. Romero and J. van de Lagemaat, *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92, 013504.
- [91] S. S. Kim, S. I. Na, J. Jo, D. Y. Kim and Y. C. Nah, *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93, 073307.
- [92] J. H. Lee, J. H. Park, J. S. Kim, D. Y. Lee and K. Cho, *Org. Electron.*, 2009, 10, 416-420.
- [93] F. C. Chen, J. L. Wu, C. L. Lee, Y. Hong, C. H. Kuo and M. H. Huang, *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95,013305.
- [94] S.-W. Baek, J. Noh, C.-H. Lee, B. Kim, M.-K. Seo and J.-Y Lee, *Sci. Rep.*, 2013, 3, 1726.
- [95] J. M. Lee, J. S. Park, S. H. Lee, H. Kim, S. Yoo and S. O. Kim, *Adv. Mater.*, 2011, 23, 629-633.
- [96] J. M. Lee, B.-H. Kwon, H. I Park, H. Kim, M. G. Kim, J. S. Park, E. S. Kim, S. Yoo, D. Y. Jeon and S. O. Kim, *Adv. Mater.*, 2013, 25, 2011-2017.
- [97] L. Lu, T. Xu, W. Chen, J. M. Lee, Z. Luo, I. H. Jung, H. I. Park, S. O. Kim and L. Yu, *Nano Lett.*, 2007, 91, 253112.
- [98] D. H. Wang, D. Y. Kim, K. W. Choi, J. H. Seo, S. H. Im, J. H. Park, O. O. Park and A. J. Heeger, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2011,50, 5519-5523.

- [99] D. H. Wang, K. H. Park, J. H. Seo, J. Seifert, J. H. Jeon, J. K. Kim, J. H. Park, O. O. Park and A. J. Heeger, *Adv. Energy Mater.*, 2011, 1, 766-770.
- [100] M. Xue, L. Li, B. J. de Villers, H.J. Shen, J.F. Zhu, Z. B. Yu, A. Z. Stieg, Q. B. Pei, B. J. Schwartz and K. L. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98, 253302.
- [101] Glasstone, S., Laidler, K.J. and Eyring, H.(1941) *Theory of Rate Processes*, McGraw-Hill, New York.
- [102] Eyring, H. (1980) *Basic Chemical Kinetics*, Wiley, New York.

Εικόνα 27: Σημεία [24], [121], [124], [125], [126], [130], [131] ,

ομώνυμα με τις αντίστοιχες αναφορές τους στις οποίες βασιστήκανε:

- [24] G. D. M. R. Dabera, K. D. G. I. Jayawardena, M. R. R. Prabath, I. Yahya, Y. Y. Tan, N. A. Nismy, H. Shiozawa, M. Sauer, G. Ruiz-Soria, P. Ayala, V. Stolojan, A. A. D. T. Adikaari, P. D. Jarowski, T. Pichler, and S. R. P. Silva, *ACS Nano*, 2013.
- [121] H. Ago, K. Petritsch, M. S. P. Shaffer, A. H. Windle and R. H. Friend, *Adv. Mater.* , 1999, 11, 1281-1285.
- [124] M. C. Scharber, D. Wuhlbacher, M. Koppe, P. Denk, C. Waldauf, A. J. Heeger and C. I. Brabec, *Adv. Mater.* , 2006, 18, 789-794.
- [125] B. Pradhan, S. K. Batabyal and A. J. Pal, *Appl. Phys. Lett.* , 2006, 88, 093106.
- [126] A. J. Miller, R. A. Hatton and S. R. P. Silva, *Appl. Phys. Lett.* , 2006, 89, 133117.
- [130] T. Schuettfort, A. Nish, and R. J. Nicholas, *Nano Lett.* , 2009, 9, 3871-3876.
- [131] M. H. Ham, G. L. C. Paulus, C. Y. Lee, C. Song, K. Kalantarzadeh, W. Choi, J. H. Han and M. S. Strano, *ACS Nano*, 2010, 4, 6251-6259.

