



**Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Πολυτεχνική Σχολή**

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Ν. Μπότσαρης

Τεχνικές επιταχυνόμενης γήρανσης Φωτοβολταϊκών πλαισίων

Παυλίδης Σαράντης
Α.Μ. 795



Ξάνθη, Ιούλιος 2014



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελής Ν. Μπότσαρης

Τεχνικές επιταχυνόμενης γήρανσης

Φωτοβολταϊκών πλαισίων

Παυλίδης Σαράντης

A.M. 795

Εγκρίθηκε από την τριμελής εξεταστική επιτροπή τον Ιούλιο του 2014:

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

.....

.....

Π. Μπότσαρης

Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ.

..... Καθηγητής Δ.Π.Θ.

..... Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Διπλωματική εργασία η οποία υποβλήθηκε τον Ιούλιο του 2014 για την απόκτηση του διπλώματος του
Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης

Copyright © Σαράντης Παυλίδης, 2014

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 περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

Στην Άννα...

Πρόλογος

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ασχολείται με την εφαρμογή της τεχνητής γήρανσης ως μεθόδου εκτίμησης των αστοχιών των φωτοβολταϊκών πάνελ. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας, που είναι καθαρά πειραματική, είναι να εξεταστούν οι συνθήκες τεχνητής γήρανσης στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 1 αναφέρονται αναλυτικά οι βλάβες των φωτοβολταϊκών που μπορεί να παρουσιαστούν σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας τους.

Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια η εμφάνιση και η εξέλιξη συγκεκριμένων τύπων βλαβών έχει ως αποτέλεσμα να μειώνει την απόδοση τους. Η παγκόσμια έρευνα εστιάζεται στην επίτευξη υψηλών επιπέδων αξιοπιστίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και της αντοχής τους έτσι ώστε να είναι διαθέσιμα και αξιοποιήσιμα.

Στο Κεφάλαιο 2 της εργασίας παρουσιάζονται οι τεχνικές επιταχυνόμενης γήρανσης και γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στο πρότυπο IEC 61215. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. Συγκεκριμένα περιγράφεται ο εξοπλισμός το υλικό και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων καθώς επίσης δίνονται αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τον τόπο το χρόνο και τις συνθήκες διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων ως προς την εξέλιξη του θερμικού αποτυπώματος των βλαβών την εξέλιξη της ηλεκτρικής απόδοσης καθώς επίσης και τις οπτικές παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4. Στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα βασικότερα συμπεράσματα της εργασίας.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. **Παντελή Ν. Μπότσαρη**, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης (ΔΠΘ), για τις πολύτιμες συμβουλές του, την καθοδήγηση και την στήριξη που μου παρείχε ως επιβλέπων κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Οφείλω, επίσης, να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην ερευνητική ομάδα του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) και συγκεκριμένα:

- την κα. **Αντωνία Μοροπούλου**, Καθηγήτρια του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ)
- τον κ. **Αστέριο Καραγιάννη-Μπακόλα**, Λέκτορα του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ)
- την κα. **Μαρία Καρόγλου**, Δρ., Ι.Δ.Α.Χ. και
- την κα. **Αικατερίνη Δελέγκου**, Δρ., Ι.Δ.Α.Χ.

Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω τον κ. **Ιωάννη Τσανάκα** διδάκτορα του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης (ΔΠΘ) για την ουσιαστική συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο **Ιωάννη Πουρσανίδη**, διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό & Μηχανικό Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης (ΔΠΘ) και M.Sc. Πληροφορικής και Διοίκησης του ΔΠΜΣ των Τμημάτων Πληροφορικής και Οικονομικών του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ).

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου **Αναστάσιο Παυλίδη** και **Άννα Σαραντινού** και τα αδέρφια μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους, όλα αυτά τα χρόνια.

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Αστοχία λόγω θραύσης του εμπρόσθιου στρώματος ενός Φ/Β πλαισίου	5
Σχήμα 1.2 Υλικά που απαρτίζουν το οπίσθιο τμήμα TPE	6
Σχήμα 1.3 Υπόστρωμα Φ/Β πλαισίου με εκτεταμένες ρωγμές	6
Σχήμα 1.4 Υπόστρωμα που έχει υποστεί εκτεταμένη αποκόλληση	7
Σχήμα 1.5 Σπασμένο PET λόγω υψηλής θερμοκρασίας	8
Σχήμα 1.6 Δύο διαφορετικοί τρόποι στήριξης των πλαισίων	8
Σχήμα 1.7 Υποχώρηση πλαισίων στήριξης λόγω δυνατών ανέμων	9
Σχήμα 1.8 Κατασκευαστικό πρόβλημα στο πλαίσιο	9
Σχήμα 1.9 Διαδικασία curing	11
Σχήμα 1.10 Αποχρωματισμένα στρώματα EVA σε συστοιχία Φ/Β πλαισίων	12
Σχήμα 1.11 Αποχρωματισμός EVA σε σκούρο καφέ χρώμα με αλλοίωση στα κεντρικά τμήματα των ηλιακών κυψελών	13
Σχήμα 1.12 Απώλειες ισχύος και ρεύματος εξόδου όπως καταγράφονται στην μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V, σε αλλοιωμένη, αποχρωματισμένη μεμβράνη EVA κίτρινου χρώματος	14
Σχήμα 1.13 Φ/Β πάνελ με εκτενή αποχρωματισμό των μεμβρανών	15
Σχήμα 1.14 Σύγκριση τάσης εφελκυσμού της ελαστικότητας για εκτεθειμένο και μη εκτεθειμένο στρώμα EVA	16
Σχήμα 1.15 Διάγραμμα ανακλαστικότητας στρωμάτων EVA με αλλοιώσεις αποχρωματισμού διαφορετικού χρώματος	16
Σχήμα 1.16 Διάγραμμα απορροφητικότητας για διαφορετικού χρώματος EVA	17
Σχήμα 1.17 Φ/Β πλαίσιο με εκτεταμένη αποκόλληση του στρώματος EVA	17
Σχήμα 1.18 Φ/Β πλαίσιο (α) με συγκεκριμένα σημεία αποκόλλησης του στρώματος EVA (β,δ) και εμφάνισης υγρασίας λόγω της αποκόλλησης (γ)	18
Σχήμα 1.19 Εξέλιξη στον χρόνο του φαινομένου α. της αποκόλλησης και β. της διάχυσης υγρασίας λόγω αποκόλλησης του στρώματος EVA για Φ/Β πλαίσιο του Σχήματος 1.18	18
Σχήμα 1.20 Διαφορά θερμοκρασίας ανά ηλιακή κυψέλη του “προβληματικού” πλαισίου σε σχέση με την μέση τιμή της	19
Σχήμα 1.21 Διάβρωση σε επαφή στο εσωτερικό του πάνελ	20
Σχήμα 1.22 Αποκόλληση βαριάς μορφής	20
Σχήμα 1.23 Τέσσερα στοιχεία που έχουν υποστεί αποκόλληση της EVA	21
Σχήμα 1.24 Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ τριών στοιχείων με διαφορετικό βαθμό αποκόλλησης	21
Σχήμα 1.25 Αποκόλληση σε στοιχείο με θερμή κηλίδα (hot spot)	22

Σχήμα 1.26 Στοιχείο με έντονο το φαινόμενο της αποκόλλησης της EVA	23
Σχήμα 1.27 Hot spots σε Φ/B στοιχεία	24
Σχήμα 1.28 Συνδεσμολογία “προβληματικής κυψέλης (α) παράλληλα και (β) σε σειρά με το υπόλοιπο κύκλωμα των “υγιών” κυψελών	25
Σχήμα 1.29 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V κυψελών και Φ/B πλαισίου για την συνδεσμολογία του Σχήματος 1.28-α	25
Σχήμα 1.30 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V κυψελών και Φ/B πλαισίου για την συνδεσμολογία του Σχήματος 1.28-β	26
Σχήμα 1.31 Γραφικός τρόπος υπολογισμού της συνολικής V_{oc} , για παράλληλη συνδεσμολογία της “προβληματικής” κυψέλης	26
Σχήμα 1.32 Γραφικός τρόπος υπολογισμού του συνολικού I_{sc} , για εν σειρά συνδεσμολογία της “προβληματικής” κυψέλης	27
Σχήμα 1.33 Ορατή θερμή κηλίδα σε ηλιακή κυψέλη	28
Σχήμα 1.34 Τοποθέτηση διόδων διαφυγής με αλληλεπικαλυπτόμενες κυψέλες	28
Σχήμα 1.35 Τοποθέτηση διόδων διαφυγής με μη αλληλεπικαλυπτόμενες κυψέλες	28
Σχήμα 1.36 Εμφάνιση θερμών κηλίδων στους δεσμούς συγκολλήσεων του πίνακα ηλιακών κυψελών	30
Σχήμα 1.37 Πίνακας ηλιακών κυψελών με δεσμούς συγκολλήσεων α. κακής ποιότητας και β. καλής ποιότητας	30
Σχήμα 1.38 Ρωγμή σε ηλιακή κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου	31
Σχήμα 1.39 Ηλιακή κυψέλη με τρεις τύπους ρωγμών και θραύσεων	31
Σχήμα 1.40 Ταξινόμηση ρωγμών ηλιακών κυψελών 0. Καμία ρωγμή, 1. Δενδροειδής ρωγμή, 2. Πολλαπλή ρωγμή, 3. +45° διαγώνια ρωγμή, 4. -45° διαγώνια ρωγμή, 5. Παράλληλη ρωγμή, 6. Κάθετη ρωγμή	32
Σχήμα 1.41 Ποσοστό της απώλειας ενεργού επιφάνειας κυψελών, για τις περιπτώσεις ρωγμών του Σχήματος 1.40	32
Σχήμα 1.42 Προσδιορισμός τύπων ρωγμών Φ/B πλαισίου βάσει της ταξινόμησης του Σχήματος 1.40	32
Σχήμα 1.43 Καταπονημένη διασύνδεση κυψέλης, στο όριο ολικής ρήξης της	33
Σχήμα 1.44 Διάβρωση στις μεταλλικές διασυνδέσεις ενός πίνακα ηλιακών κυψελών	33
Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση αξιοπιστίας και πιστοποίηση	41
Σχήμα 2.2 Η καμπύλη “μπανιέρα” για την αξιοπιστία ενός συστήματος	42
Σχήμα 2.3 Δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης κατά το πρότυπο IEC 61215	46

Σχήμα 2.4 Θερμική δοκιμή διόδου διαφυγής	46
Σχήμα 2.5 Δοκιμή θερμών κηλίδων	47
Σχήμα 2.6 Ένας τυπικός θερμοθάλαμος κλιματικών δοκιμών	47
Σχήμα 2.7 Ο θερμικός κύκλος	48
Σχήμα 2.8 Ο κύκλος ψύξης με υγρασία	49
Σχήμα 2.9 Δοκιμή έκθεσης σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας	49
Σχήμα 2.10 Μετρούμενη απώλεια ισχύος σε Φ/Β πλαίσιο, λόγω κομμένων διασυνδέσεων κυψελών μετά την εφαρμογή κλιματικών δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης	49
Σχήμα 2.11 Προετοιμασία (preconditioning) έκθεσης Φ/Β πλαισίου σε υπεριώδη ακτινοβολία UV-A και UV-B	50
Σχήμα 2.12 Διάταξη και διαδικασία δοκιμής μηχανικής καταπόνησης	50
Σχήμα 2.13 Αποτυχία πλαισίου, λόγω θραύσης του υπερστρώματος του γυαλιού, κατά τη δοκιμή μηχανικής καταπόνησης	51
Σχήμα 3.1 Το Φ/Β τύπου Siemens TM SM6 (PV-1).....	56
Σχήμα 3.2 Το Φ/Β πλαίσιο τύπου ET Solar TM ET-M53605 (PV-2, PV-3)	56
Σχήμα 3.3 Ο φορητός θερμικός αναλυτής Mikron TM / Impac TM IVN 780-P.....	57
Σχήμα 3.4 Ο φορητός θερμικός αναλυτής FLIR TM B200.....	58
Σχήμα 3.5 Θερμογράφημα του PV-1 στο μέσο του πειράματος της τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης στο λογισμικό MikroSpec ^R 4.0 PRO.....	58
Σχήμα 3.6 Μικροσκόπιο οπτικών ινών i_scope moritex.....	59
Σχήμα 3.7 Έλεγχος πιθανής βλάβης σε Φ/Β πλαίσιο με χρήση οπτικής μικροσκοπίας	59
Σχήμα 3.8 Στερεοσκόπιο στο οποίο εξετάστηκε το δείγμα	60
Σχήμα 3.9 Εικόνα στερεοσκοπίου του PV-1, πριν την εφαρμογή τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης	60
Σχήμα 3.10 Το πολύμετρο Range TM RE69 41/2 DMM.....	61
Σχήμα 3.11 Μέτρηση τάσης ανοιχτού κυκλώματος Φ/Β πλαισίου	61
Σχήμα 3.12 Μέτρηση ρεύματος βραχυκύκλωσης Φ/Β πλαισίου	62
Σχήμα 3.13 Το πυρανόμετρο KIMO TM SL 200	62
Σχήμα 3.14 Μέτρηση προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου με την χρήση πυρανομέτρου.....	63
Σχήμα 3.15 Ο ημιβιομηχανικός θερμοθάλαμος ελέγχου κλιματικών δοκιμών, τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης, Angelantoni TM GTS 600.....	64
Σχήμα 3.16 Έλεγχος ημιβιομηχανικού θερμοθαλάμου από υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Winkratos	64

Σχήμα 3.17 Ψυκτήρας, καταλύτης και αεροφυλάκιο (από αριστερά προς τα δεξιά)	65
Σχήμα 3.18 Αεροσυμπιεστής.....	65
Σχήμα 3.19 Φ/Β πλαίσια εντός του θερμοθαλάμου	66
Σχήμα 3.20 Ο θερμικός κύκλος που εφαρμόστηκε κατά την διαδικασία τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης.....	67
Σχήμα 3.21 Ακολουθία εννέα θερμικών κύκλων της τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης	68
Σχήμα 3.22 Έναρξη πειράματος στο λογισμικό πακέτο Winkratos	69
Σχήμα 3.23 Ορισμός χαρακτηριστικών πειράματος (π.χ. θερμοκρασίες)	70
Σχήμα 3.24 Εκτέλεση/Διακοπή πειράματος	71
Σχήμα 3.25 Διάφορα χαρακτηριστικά πειράματος (υπεύθυνος πειράματος, διάρκεια πειράματος, αριθμός καταγραφών).....	72
Σχήμα 3.26 Παράθυρο εξέλιξης και αποτελεσμάτων εκτέλεσης πειράματος	73
Σχήμα 4.1 Η τοποθέτηση των Φ/Β για τη λήψη των θερμογραφημάτων και των ηλεκτρικών μετρήσεων.	77
Σχήμα 4.2 Η εξέλιξη των θερμοκρασιακών προφίλ των PV-1, PV-2 και PV-3 πριν την έναρξη της διαδικασίας γήρανσης.....	78
Σχήμα 4.3 Η εξέλιξη των θερμοκρασιακών προφίλ PV-1, PV-2 και PV-3 στο μέσο της διαδικασίας γήρανσης (53 κύκλοι)	79
Σχήμα 4.4 Η εξέλιξη των θερμοκρασιακών προφίλ PV-1, PV-2 και PV-3 στο τέλος της διαδικασίας γήρανσης (106 κύκλοι)	79
Σχήμα 4.5 Ανάλυση ιστογράμματος για το θερμοκρασιακό προφίλ του PV-3 πριν την εφαρμογή των θερμικών κύκλων επιταχυνόμενης γήρανσης της μελέτης	80
Σχήμα 4.6 Ανάλυση ιστογράμματος για το θερμοκρασιακό προφίλ του PV-3 μετά την ολοκλήρωση των 103 θερμικών κύκλων επιταχυνόμενης γήρανσης της μελέτης.....	80
Σχήμα 4.7 Εξέλιξη της ποσοστιαίας υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης του PV-1 από τους 0 (πριν την γήρανση) έως τους 106 (μετά την γήρανση) θερμικούς κύκλους.....	85
Σχήμα 4.8 Εξέλιξη της ποσοστιαίας υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης του PV-2 από τους 0 (πριν την γήρανση) έως τους 106 (μετά την γήρανση) θερμικούς κύκλους	86
Σχήμα 4.9 Εξέλιξη της ποσοστιαίας υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης του PV-3 από τους 0 (πριν την γήρανση) έως τους 106 (μετά την γήρανση) θερμικούς κύκλους	86
Σχήμα 4.10 Το Φ/Β δείγμα PV-1 πριν την έναρξη του πειράματος.....	88
Σχήμα 4.11 Εικόνα του PV-1 στο οποίο παρατηρείται εκτεταμένος αποχρωματισμός του EVA (καφέ χρώμα).....	89

Σχήμα 4.12 Εικόνα του PV-1 σε τμήματα κυψελών με πιθανότητα μελλοντικής εμφάνισης όπου παρατηρούνται “χαλάρωση” της μεταλλικής διασύνδεσης	89
Σχήμα 4.13 Εικόνα του PV-1 σε τμήμα κυψέλης με θερμή κηλίδα, όπου παρατηρείται εκτεταμένη αλλοίωση του στρώματος ενθυλάκωσης EVA (κυανό χρώμα)	90
Σχήμα 4.14 Ελαττωματική Φ/Β κυψελίδα στο μέσον του πειράματος	90
Σχήμα 4.15 Γκρίζες αποχρωματισμένες περιοχές όπου αρχίζουν και είναι εμφανείς οι πόροι του υλικού	91
Σχήμα 4.16 Ελαττωματική κυψέλη με πιθανότητα εμφάνισης θερμής κηλίδας	91
Σχήμα 4.17 Το Φ/Β πλαίσιο PV-3, πριν την έναρξη του πειράματος	92
Σχήμα 4.18 Εικόνα του PV-3, σε τμήμα κυψέλης με θερμή κηλίδα, όπου παρατηρείται εκτεταμένη αλλοίωση του στρώματος ενθυλάκωσης EVA (κυανό χρώμα)	92
Σχήμα 4.19 Με κόκκινο σημειώνεται ελαττωματική κυψέλη και με κίτρινο σημειώνεται πρόβλημα στις καλωδιώσεις	93
Σχήμα 4.20 Με κίτρινο σημειώνεται πρόβλημα στις καλωδιώσεις και παρατηρούνται ελαττώματα στην κατασκευή.....	93
Σχήμα 4.21 Με κόκκινο σημειώνεται ελαττωματική περιοχή στην ηλιακή κυψελίδα	94

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Διαβάθμιση όρων από την ιδανική κατάσταση στην αποτυχία	3
Πίνακας 1.2 WVTR διαφόρων υποστρωμάτων και υλικών	7
Πίνακας 1.3 Συστατικά που απαρτίζουν την EVA.....	10
Πίνακας 1.4 Απώλειες σε ένα στοιχείο πυριτίου λόγω έντονου αποχρωματισμού της EVA	14
Πίνακας 1.5 Συγκριτικός πίνακας μεταξύ τριών στοιχείων.....	22
Πίνακας 1.6 Συνοπτικός πίνακας βλαβών	35
Πίνακας 2.1 Δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης για την μελέτη βλαβών Φ/Β πλαισίων.....	44
Πίνακας 4.1 Κατασκευαστικές και θεωρητικές τιμές κύριων ηλεκτρικών παραμέτρων και αποτελέσματα ηλεκτρικών παραμέτρων και αποτελέσματα ηλεκτρικών μετρήσεων για κάθε Φ/Β πλαίσιο, πριν την έναρξη (0), στο μέσο (53) και μετά το πέρας (106) της επιταχυνόμενης γήρανσης θερμικών κύκλων.....	84
Πίνακας 4.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων και των ηλεκτρικών μετρήσεων της μελέτης.....	87

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	i
Ευχαριστίες	ii
Πίνακας Σχημάτων	iii
Κατάλογος Πινάκων	viii
Περίληψη	xi
Abstract	xii
Κεφάλαιο 1	1
Βλάβες φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	2
1.2 Διαχωρισμός εννοιών «βλάβη-αποτυχία»	3
1.3 Βλάβες εξωτερικών στρωμάτων και πλαισίου	3
1.3.1 Παράγοντες φθοράς στο εμπρόσθιο στρώμα (υπέρστρωμα).....	4
1.3.2 Βλάβες στο οπίσθιο στρώμα (υπόστρωμα)	5
1.3.3 Βλάβες στο πλαίσιο στήριξης.....	8
1.4 Βλάβες λόγω ενθουλάκωσης	9
1.4.1 Αποχρωματισμός του EVA.....	11
1.4.2 Ανακλαστικότητα και απώλεια ελαστικότητας του EVA.....	15
1.4.3 Βλάβες αποκόλλησης του EVA.....	17
1.5. Βλάβες στον πίνακα ηλιακών κυψελών	23
1.5.1 Θερμές κηλίδες (hot spots)	24
1.5.2 Βλάβες συγκολλήσεων	29
1.5.3 Ρωγμές και θραύση ηλιακών κυψελών	30
1.5.4 Βλάβες εσωτερικών διασυνδέσεων.....	33
1.5.5 Μεταλλική διάβρωση.....	33
1.6 Σύνοψη.....	35
Βιβλιογραφία.....	36
Κεφάλαιο 2	39
Τεχνικές επιταχυνόμενης γήρανσης.....	39
2.1 Εισαγωγή.....	40
2.2 Υπάρχουσα κατάσταση.....	42
2.3 Τεχνητή επιταχυνόμενη γήρανση.....	43
2.3.1 Το πρότυπο IEC 61215.....	45

2.4 Σύνοψη	52
Βιβλιογραφία.....	53
Κεφάλαιο 3	54
Εξοπλισμός-πειραματική διάταξη	54
3.1 Εισαγωγή.....	55
3.2 Πειραματική υλοποίηση.....	55
3.2.1 Υλικό	55
3.2.2 Λογισμικό	66
3.3 Σύνοψη	73
Βιβλιογραφία.....	74
Κεφάλαιο 4	75
Διαδικασία γήρανσης	75
4.1 Εισαγωγή.....	76
4.2 Συνθήκες μετρήσεων	76
4.3 Εξέλιξη θερμικού αποτυπώματος βλαβών	77
4.4 Εξέλιξη της ηλεκτρικής απόδοσης	81
4.5 Οπτικές παρατηρήσεις	88
4.6 Σύνοψη	94
Βιβλιογραφία.....	96
Κεφάλαιο 5	97
Συμπεράσματα	97
Μελλοντική έρευνα.....	97
Παράρτημα	99

Περίληψη

Με την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας κατά τις τελευταίες δεκαετίες, οι μηχανολογικές κατασκευές αυξάνουν ανάλογα ως προς την πολυπλοκότητα αλλά και την ευαισθησία, με αποτέλεσμα να υφίστανται σύνθετες βλάβες ή/και αστοχίες που επηρεάζουν αρνητικά την αξιοπιστία και την ασφαλή λειτουργία τους.

Σε επίπεδο εντοπισμού και διάγνωσης βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, η δυναμική της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας αποτιμήθηκε, με την εκπόνηση πειραματικής μελέτης, ως προς την τεχνική ανάλυσης των θερμικών αποτυπωμάτων. Οι δυνατότητες της μεθόδου αξιολογήθηκαν με την διερεύνηση της εξέλιξης συγκεκριμένων βλαβών στον χρόνο, μέσα από την συγκριτική μελέτη πειραματικών μετρήσεων υπέρυθρης θερμογραφίας, ηλεκτρικής απόδοσης και οπτικής μικροσκοπίας, πριν και μετά την εφαρμογή της τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης σε Φ/Β πλαίσια.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των δοκιμών της επιταχυνόμενης γήρανσης στα Φ/Β πλαίσια, της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με την ερευνητική ομάδα της Καθηγήτριας Α. Μοροπούλου, του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Στόχος ήταν η επίτευξη μιας προσεγγιστικής προσομοίωσης μεγάλου μέρους της διάρκειας ζωής ενός Φ/Β πλαισίου στο πεδίο.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η αξιολόγηση της εξέλιξης της κατάστασης και ενδεχόμενων βλαβών τριών Φ/Β πλαισίων μονοκρυσταλλικού πυριτίου, μικρής ισχύος, μετά την εφαρμογή επιταχυνόμενης γήρανσης θερμικών κύκλων. Η τεχνική αυτή πραγματοποιήθηκε σε ειδικό θερμοθάλαμο, ο οποίος προσομοίωνε προσεγγιστικά μέρος του πραγματικού χρόνου ζωής, των Φ/Β, σε συνθήκες πεδίου. Οι παράμετροι - μεταβλητές που αξιολογήθηκαν κατά την εφαρμογή της τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης, στην συγκεκριμένη διπλωματική, ήταν η εξέλιξη του θερμικού αποτυπώματος των βλαβών, η αλλαγή της ηλεκτρικής απόδοσης και η μορφολογία κάθε Φ/Β πλαισίου. Απώτερος σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η εξαγωγή πιθανών προγνωστικών συμπερασμάτων ως προς την θερμική, την ηλεκτρική και την μορφολογική συμπεριφορά, τόσο των "υγιών" όσο και των "προβληματικών", Φ/Β πλαισίων σε αντίστοιχη έκθεση τους σε πραγματικές κλιματικές συνθήκες πεδίου.

Ο πειραματικός σχεδιασμός περιελάμβανε την μακροσκοπική φωτογράφιση των Φ/Β πλαισίων, την λήψη εικόνων μικροσκοπίου στην πρόσθια επιφάνεια κάθε δείγματος σε συνθήκες εργαστηρίου, καθώς επίσης την παθητική θερμογράφιση κάθε δείγματος και την μέτρηση ηλεκτρικών χαρακτηριστικών εξόδου υπό συνθήκες πεδίου, στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της διαδικασίας της γήρανσης.

Λέξεις κλειδιά: Τεχνητή γήρανση, φωτοβολταϊκά πλαίσια, διάγνωση και πρόγνωση βλαβών, θερμογραφία

Abstract

The last few decades technology faces a rapid development, mechanical constructions are being increased concerning the complexity and the sensitivity and as a result they undergo complex fault and/or failures which are affecting negatively the efficiency and their safe function.

The potential of the IR thermography method for PV modules' fault diagnosis was assessed through this experimental study, regarding the featured thermal image processing and diagnosis technique. The prospect of IR thermography was evaluated by a comparative case study of IR, electrical I-V and optical microscopy measurements of faults' evolution, through accelerated ageing tests to PV modules.

It's worth remembering that the design and the implementation of the accelerated ageing tests to PV modules were helped by the research team of the professor A. Moropoulou, Department of Materials Science and Engineering, School of Chemical Engineering National Technical University of Athens (NTUA).

The purpose of this thesis was to evaluate the progress of potential faults in three individual monocrystalline silicon PV modules, after the accelerated ageing tests of photovoltaic (PV) modules, of thermal cycles. This technique was took place inside a chamber, which was simulating a real part of PV modules' life. The parameters and variables which were evaluated, through this proceeding, were the progress of the faults' thermal images, the change of electrical performance and the change in the morphology of photovoltaic modules such as they've been exposed in real outdoor conditions.

The experimental design included, macroscopic photography images of PV modules, microscope images of the front surface of every sample under laboratory condition, thermography.

Keywords: Aging tests, PV modules, diagnosis and fault prognosis, infrared thermography

Κεφάλαιο 1

Βλάβες φωτοβολταϊκών πλαισίων

1.1 Εισαγωγή.....	2
1.2 Διαχωρισμός εννοιών «βλάβη-αποτυχία»	3
1.3 Βλάβες εξωτερικών στρωμάτων και πλαισίου	3
1.3.1 Παράγοντες φθοράς στο εμπρόσθιο στρώμα (υπέρστρωμα)	4
1.3.2 Βλάβες στο οπίσθιο στρώμα (υπόστρωμα)	5
1.3.3 Βλάβες στο πλαίσιο στήριξης	8
1.4 Βλάβες λόγω ενθυλάκωσης	9
1.4.1 Αποχρωματισμός του EVA.....	11
1.4.2 Ανακλαστικότητα και απώλεια ελαστικότητας του EVA.....	15
1.4.3 Βλάβες αποκόλλησης του EVA	17
1.5. Βλάβες στον πίνακα ηλιακών κυψελών	23
1.5.1 Θερμές κηλίδες (hot spots)	24
1.5.2 Βλάβες συγκολλήσεων	29
1.5.3 Ρωγμές και θραύση ηλιακών κυψελών	30
1.5.4 Βλάβες εσωτερικών διασυνδέσεων	33
1.5.5 Μεταλλική διάβρωση	33
1.6 Σύνοψη.....	35

1.1 Εισαγωγή

Στα φωτοβολταϊκά πλαίσια η εμφάνιση και η εξέλιξη συγκεκριμένων τύπων βλαβών έχει ως αποτέλεσμα να μειώνει την απόδοσή τους. Η παγκόσμια έρευνα εστιάζεται στην επίτευξη υψηλών επιπέδων αξιοπιστίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και της αντοχής τους έτσι ώστε να είναι διαθέσιμα και αξιοποιήσιμα.

Σε ένα πάνελ φωτοβολταϊκών μπορεί να εμφανιστούν διάφορες βλάβες κατά την περίοδο της λειτουργίας του οι οποίες σχετίζονται με διάφορους παράγοντες οι οποίοι αναλύονται στην συνέχεια του κεφαλαίου.

Στο συγκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δυνατές βλάβες που μπορεί να παρουσιαστούν σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ με βάση την προέλευση, τη συχνότητα εμφάνισής τους και τη σοβαρότητα τους. Με βάση το γεγονός πως ο χρόνος ζωής ενός Φ/Β πλαισίου είναι μεγαλύτερος από τα 20 χρόνια και πως οι πρώτες εγκαταστάσεις Φ/Β ίσα που έχουν ξεπεράσει αυτό το όριο η έρευνα για την επίδραση των βλαβών στα Φ/Β είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο.

Η αιτία, η φύση και η θέση μιας βλάβης όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά της εννοώντας τη σοβαρότητα και τη συχνότητα της είναι ιδιαίτερα σημαντικά στοιχεία για την λειτουργία τους. Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις βλάβες των Φ/Β πλαισίων προσπαθώντας να εστιαστεί στην παγκόσμια εμπειρία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε εκείνους τους τύπους βλαβών που πρωτίστως σχετίζονται με Φ/Β πλαίσια τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου.

Με κριτήριο την θέση εμφάνισής τους, ως προς τη δομή του Φ/Β πλαισίου, οι τύποι βλαβών μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

Βλάβες στα εξωτερικά στρώματα του Φ/Β πλαισίου και στο ίδιο το πλαίσιο, στις οποίες περιλαμβάνονται το εμπρόσθιο (front cover) και το οπίσθιο στρώμα (back sheet) καθώς και το πλαίσιο που τα περικλείει.

Βλάβες στην ενθυλάκωση του πλαισίου, στις οποίες περιλαμβάνονται ο αποχρωματισμός της μεμβράνης ενθυλάκωσης (EVA), η απώλεια ελαστικότητάς της και η αποκόλληση αυτής.

Βλάβες στο εσωτερικό στρώμα του πλαισίου (πίνακας ηλιακών κυψελών), στις οποίες περιλαμβάνονται οι θερμές κηλίδες, οι συγκολλήσεις, οι ρωγμές, οι εσωτερικές μεταλλικές διασυνδέσεις καθώς και η διάβρωση αυτών.

1.2 Διαχωρισμός εννοιών «βλάβη-αποτυχία»

Ο όρος βλάβη αναφέρεται στην κατάσταση του πλαισίου που οδηγεί το πλαίσιο σε δυσλειτουργία, εκτεταμένη φθορά, υποβάθμιση ή ακόμα και αστοχία. Η βλάβη ενός πλαισίου μπορεί να είναι βαθμιαία ή ακαριαία ανάλογα με το πότε εμφανίζεται και πως εξελίσσεται. Από την άλλη ο όρος αποτυχία αφορά στην κατάσταση κατά την οποία το πλαίσιο δεν είναι σε θέση να εξυπηρετήσει το σκοπό σχεδιασμού τους. Κατά συνέπεια η βλάβη και η αποτυχία είναι δυο έννοιες που δεν πηγαίνουν αναγκαστικά μαζί. Είναι δηλαδή δυνατό ένα πλαίσιο να παρουσιάζει διάφορες βλάβες χωρίς όμως να αποτυγχάνει και απαραίτητα. Ενώ ως αποτυχία καλείται η κατάσταση κατά την οποία η όποια συσκευή/εξοπλισμός αδυνατεί να εξυπηρετήσει την εκάστοτε ανάγκη για την οποία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε. Οπότε, είναι δυνατόν ένα μηχάνημα να έχει διάφορες βλάβες και ατέλειες αλλά να μην αποτυγχάνει απαραίτητα [1].

Πίνακας 1.1 Διαβάθμιση όρων από την ιδανική κατάσταση στην αποτυχία [1]

English	Ελληνικά
ideal	ιδανικό
defective	ελλιπές
faulty	ελαττωματικό
erroneous	εσφαλμένο
malfunctioning	δυσλειτουργικό
degraded	υποβαθμισμένο
failed	αποτυχημένο

1.3 Βλάβες εξωτερικών στρωμάτων και πλαισίου

Το πόσο αποτελεσματικό είναι ένα Φ/Β πλαίσιο εξαρτάται από τα υλικά από τα οποία αποτελείται το πλαίσιο του πάνελ. Το πιο συνηθισμένο υλικό που χρησιμοποιείται για τα Φ.Β πλαίσια είναι το γυαλί. Το γυαλί χρησιμοποιείται τόσο στα πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου όσο και στα πλαίσια λεπτού υμενίου. Επιπλέον το γυαλί χρησιμοποιείται ως εξωτερικό στρώμα στο πίσω μέρος του πλαισίου. Τα βασικά μειονεκτήματα του γυαλιού ως υλικό των Φ/Β πλαισίων είναι το βάρος του, το κόστος του και η πιθανότητα θραύσης του.

Εναλλακτικά από το γυαλί χρησιμοποιούνται πολυμερικές μεμβράνες οι οποίες έχουν μικρότερο κόστος και έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην θραύση. Το μειονέκτημα των συγκεκριμένων μεμβρανών είναι ότι είναι ιδιαίτερα διαπερατές στην υγρασία [2].

1.3.1 Παράγοντες φθοράς στο εμπρόσθιο στρώμα (υπέρστρωμα)

Στα Φ/Β πλαίσια σημαντικό ρόλο έχει το υπέρστρωμα που παρέχει την μηχανική ακαμψία, την οπτική διαφάνεια και την ηλεκτρική απομόνωση στο ηλεκτρικό τους κύκλωμα ενώ επίσης δρα προστατευτικά ως προς την επίδραση των εξωτερικών συνθηκών.

Ως υπέρστρωμα χρησιμοποιείται κυρίως το θερμικά επεξεργασμένο γυαλί. Η θερμική επεξεργασία ενισχύει την ακαμψία και η μικρή τους περιεκτικότητα σε σίδηρο διασφαλίζει την υψηλή τους διαπερατότητα στο φως. Στο τυπικό γυαλί η διαπερατότητα φτάνει στο 86% ενώ σε θερμικά επεξεργασμένο γυαλί χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο η διαπερατότητα φτάνει στο 96%. Η απαίτηση για το υπέρστρωμα είναι η υψηλή διαπερατότητα στα μεσαία και μεγάλα μήκη κύματος της ορατής ηλιακής ακτινοβολίας ($>500\text{nm}$) και ελάχιστη ως μηδαμινή διαπερατότητα στα μικρά μήκη κύματος ($<500\text{nm}$).

Προκειμένου να καλυφθούν οι συγκεκριμένες απαιτήσεις των υπερστρωμάτων των Φ/Β πλαισίων συνήθως χρησιμοποιούνται προσμίξεις γυαλιού με δημήτριο [3]. Το υπέρστρωμα απαιτείται να μπορεί να απωθήσει υπέρυθρη ακτινοβολία στα μη εκμεταλλεύσιμα μήκη κύματος γεγονός όμως που δεν έχει βρεθεί ακόμα πως θα πραγματοποιηθεί.

Μια πιθανή κρούση αντικειμένων που μπορεί να συμβεί στο Φ/Β συνεπάγεται πιθανή αστοχία του υπερστρώματος. Οι προδιαγραφές των πρώτων υπερστρωμάτων ήταν τέτοιες που τους προσέδιδαν αντοχή στην κρούση από το χαλάζι ενώ σήμερα έχει διαπιστωθεί πως υπάρχει η πιθανότητα ρήξης στο εμπρόσθιο τμήμα του Φ/Β και από μικρό χαλίκι το οποίο μπορεί να προσκρούσει πάνω στο πλαίσιο του Φ/Β μεταφερόμενο από τον αέρα [4]. Η ζημιά στο μπροστινό τμήμα εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο υλικό και οφείλονται στην ευθραυστότητα του γυαλιού ή του πολυμερούς. Οι καιρικές συνθήκες επίσης μπορεί να προκαλέσουν ρήγματα στο πλαίσιο του Φ/Β.

Αν το πλαίσιο δεν στηρίζεται σωστά ή αναπτύχθει μεγάλη θερμοκρασία λόγω μιας θερμής κηλίδας ή ενός ηλεκτρικού τόξου στον πίνακα των κυψελών η πίεση μπορεί να ασκηθεί κατά την τοποθέτηση του πλαισίου και διαφορές θερμοκρασία πάνω από τους 25°C μεταξύ του κέντρου και των άκρων του πλαισίου μπορεί να προκαλέσει φθορά και θραύση του γυαλιού ή του πολυμερούς. Οι αστοχίες αυτού του τύπου έχουν καταστρεπτικές συνέπειες στη λειτουργία και την απόδοση του πλαισίου που σχετίζονται με την απώλεια μηχανικής αντοχής και την είσοδο υγρασίας, οι οποίες με τη σειρά τους ενδέχεται να οδηγήσουν ακόμα και σε θραύση ή καταστροφή των ηλιακών κυψελών [4].



Σχήμα 1.1 Αστοχία λόγω θραύσης του εμπρόσθιου στρώματος ενός Φ/Β πλαισίου [5]

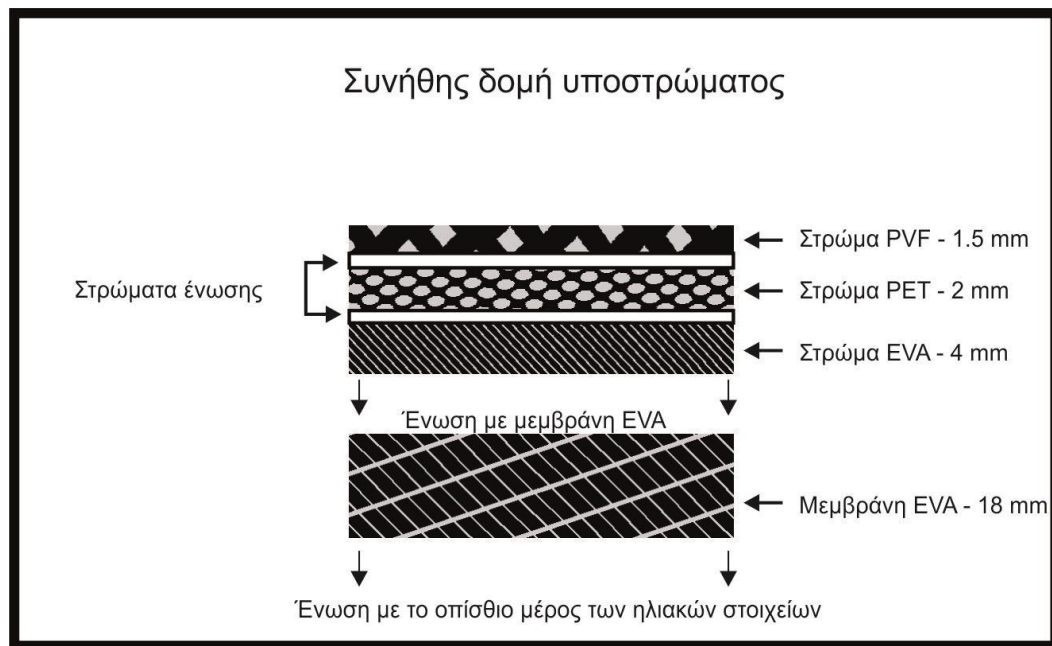
1.3.2 Βλάβες στο οπίσθιο στρώμα (υπόστρωμα)

Το πίσω μέρος ή υπόστρωμα του πάνελ (*back sheet*), αποτελείται από μια συστοιχία υλικών πολλαπλών στρωμάτων που ενώνεται με τα ηλιακά στοιχεία μέσω της μεμβράνης ενθυλάκωσης κάθε στοιχείο της οποίας εξυπηρετεί συγκεκριμένο σκοπό.

Το οπίσθιο τμήμα συνήθως αποτελείται από τα εξής υλικά [6]:

1. TPE : Tedlar (PVF) / Polyester (PET) / EVA
2. TPT : Tedlar (PVF) / Polyester (PET) / Tedlar (PVF)
3. TPAT: Tedlar (PVF) / Polyester (PET) / Aluminum / Tedlar (PVF)
4. TAT: Tedlar (PVF) / Aluminum / Tedlar (PVF)

Από αυτές το Tedlar, προσδίδει στο πλαίσιο ανακλαστικότητα και αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία ενώ το PET προσδίδει διηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες στο πλαίσιο αποτελώντας ένα φυσικό φράγμα κατά την υγρασία. Το EVA αποτελεί μια μεμβράνη ενθυλάκωσης των κυψελών. Η μεμβράνη ενθυλάκωσης (*EVA*) χρησιμοποιείται για την ενθυλάκωση των κυψελών. Σε κάθε περίπτωση η πιο χρησιμοποιημένη συστοιχία είναι η TPE (*Tedlar – Polyester – EVA*).



Σχήμα 1.2 Υλικά που αποτελούν το οπίσθιο τμήμα TPE [6]

Μια πιθανή βλάβη που μπορεί να παρουσιαστεί είναι ο διαχωρισμός των επιμέρους στρωμάτων του υποστρώματος όπως επίσης και ο σχηματισμός φυσαλίδων και ρωγμές. Η εμφάνιση αυτών των βλαβών γίνεται στα μη διαπερατά από αέρια υποστρώματα που αποτελούν προϊόν χημικών αντιδράσεων [7]



Σχήμα 1.3 Υπόστρωμα Φ/Β πλαισίου με εκτεταμένες ρωγμές [5]

Η επιθυμητή κατάσταση για το υπόστρωμα είναι να είναι διαπερατό στα διάφορα αέρια και τις διαβρωτικές ουσίες χωρίς όμως να εισέρχεται υγρασία στο σύστημα που μπορεί να αποδυναμώσει τους δεσμούς συγκράτησης των υλικών δημιουργώντας αποκόλληση τους και ηλεκτροχημική διάβρωση οδηγώντας τελικά στην αστοχία του φωτοβολταϊκού.



Σχήμα 1.4 Υπόστρωμα που έχει υποστεί εκτεταμένη αποκόλληση [8]

Η διαπερατότητα των στρωμάτων σε υγρασία μετριέται με το ρυθμό μετάδοσης ατμών (water vapor transmission rate, WVTR). Ο μικρότερος WVTR εμφανίζεται στη συστοιχία Tedlar®-Αλουμίνιο-Tedlar® (TAT) (Barber, 2002). Ένα από τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης συστοιχίας είναι το ενδιάμεσο στρώμα αλουμινίου που παρουσιάζει τον κίνδυνο αποκόλλησης των υλικών εξαιτίας των ασθενών δεσμών μεταξύ αλουμινίου και Tedlar ενώ στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται και το γεγονός πως το Tedlar απαιτεί ειδική διαχείριση προκειμένου να επιτευχθεί η σύνδεση του με το EVA.

Πίνακας 1.2 WVTR διαφόρων υποστρωμάτων και υλικών [9]

Υλικό	Πάχος (mm)	WVTR (g/m ² – d)
Tedlar/Al/Tedlar (TAT)	0.10	0.02-0.04
Tedlar/PET/EVA (TPE)	0.20	3
PET	0.10	3.4
EVA	0.4-0.5	27-33

Στην περίπτωση χαμηλού WVTR, η υγρασία εισέρχεται στο πάνελ από τις ακμές του πλαισίου δημιουργώντας τον κίνδυνο διάβρωσης αφού στο EVA ο δείκτης υγρασίας είναι υψηλός [9]. Τα συγκεκριμένα προβλήματα οδήγησαν στην πραγματοποίηση πλήθους δοκιμών τεχνητής γήρανσης των υποστρωμάτων οι οποίες απέδειξαν πως αν η θερμοκρασία λειτουργίας των Φ/Β είναι 65° C στο 30% της διάρκειας ζωής τους αυτή μειώνεται στα 19 χρόνια εξαιτίας της διάβρωσης του EVA ενώ αν η θερμοκρασία λειτουργίας μειωθεί κατά 1° C η διάρκεια ζωής αυξάνεται μέχρι και 5 χρόνια [10]. Επιπλέον αποδείχθηκε πως το PET υφίσταται ισχυρή αλλοίωση με την αύξηση της θερμοκρασίας που μπορεί να φτάσει και στην ρωγμή του.



Σχήμα 1.5 Σπασμένο PET λόγω υψηλής θερμοκρασίας [10]

1.3.3 Βλάβες στο πλαίσιο στήριξης

Το πλαίσιο στήριξης ενός Φ/Β όπως και η δομή του απαιτούν την αντοχή σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη λειτουργία ενός Φ/Β συστήματος. Το πλαίσιο προστασίας του Φ/Β είναι συνήθως από σιδηρούχο κράμα αλουμινίου (Al 6063 T5) το οποίο είναι ελαφρύ και με ιδιαίτερες ιδιότητες αντοχής. Το περιμετρικό πλαίσιο κατασκευάζεται υδατοστεγώς χωρίς κοιλότητες ενώ το πλαίσιο στήριξης κατασκευάζεται με κριτήριο το κόστος της εφαρμογής.

Τα πλαίσια στήριξης μπορεί να παρουσιάσουν μηχανικές βλάβες και αστοχίες που σχετίζονται με το μη σωστό υπολογισμό στήριξης ο οποίος για να μπορεί να είναι ικανοποιητικός πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές συνθήκες εγκατάστασης των Φ/Β [11].



Σχήμα 1.6 Δύο διαφορετικοί τρόποι στήριξης των πλαισίων [11]



Σχήμα 1.7 Υποχώρηση πλαισίων στήριξης λόγω δυνατών ανέμων [12]



Σχήμα 1.8 Κατασκευαστικό πρόβλημα στο πλαίσιο [11]

1.4 Βλάβες λόγω ενθυλάκωσης

Η σύνδεση όλων των στρωμάτων σε ένα Φ/Β γίνεται μέσω της ενθυλάκωσης, με τη χρήση πολυμερών διάφανων υλικών με κύριο το EVA. Το EVA μονώνει επιπλέον ηλεκτρικά τα στοιχεία και τα μονώνει από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη διάβρωση. Απαραίτητη προϋπόθεση για το EVA είναι η διαπερατότητα του στο φως προκειμένου να διασφαλίζεται η αποδοτική λειτουργία του πάνελ [13].

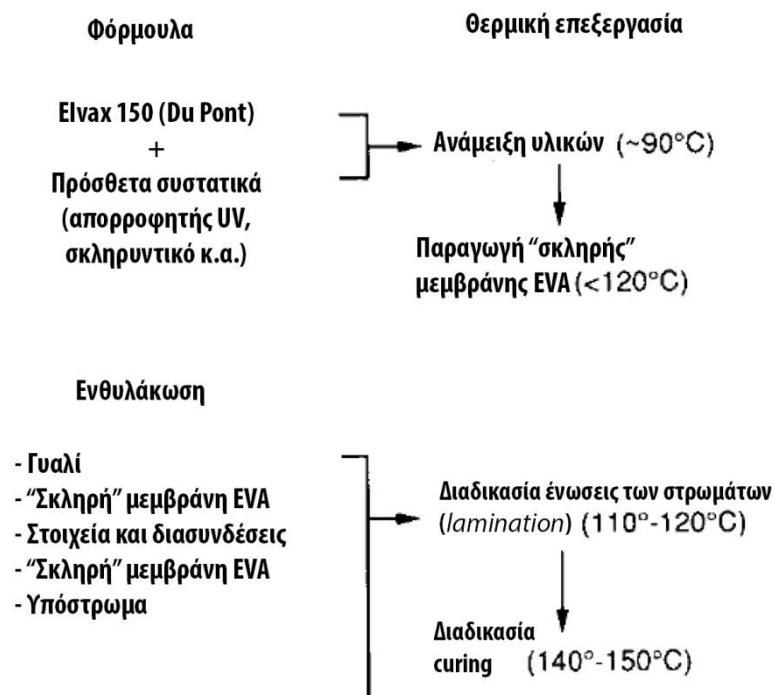
Βασικό υλικό στο EVA θεωρείται το Elvax 150 το οποίο κατασκευάστηκε και κατοχυρώθηκε από την εταιρία DuPont. Το συγκεκριμένο υλικό αναμιγνύεται με “σκληρυντικό” (*curing agent*) (Lupersol 101 ή Lupersol TBEC σε ποσοστό 1,5%), με έναν απορροφητή

υπεριώδους ακτινοβολίας (Cyasorb UV 531 σε ποσοστό 0,3%), με ένα φωτοαντιοξειδωτικό (Tinuvin 770 σε ποσοστό 0,1%) και με ένα θερμοαντιοξειδωτικό (Naugard P σε ποσοστό 0,2%) (Πίνακας 1.3) για να δημιουργήσει ένα “σταθερό” (*stabilized*) EVA που διατηρεί την σκληρότητα του χωρίς να μετατρέπεται σε gel [14].

Πίνακας 1.3 Συστατικά που απαρτίζουν την EVA [15]

Όνομα	Ποσοστό (pph)	Είδος υλικού	Χημική ονομασία
Elvax 150	100	Βασικό συμπολυμερές	Ethylene vinyl acetate copolymer
Cyasorb UV 531	0.3	Απορροφητής UV	2-Hydroxy-4-n-octyloxybenzophenone
Tinuvin 770	0.1	Φωτοαντιοξειδωτικό	Bis(2,2,6,6-tetramethyl-4-piperidiny) sebacetate
Naugard P	0.2	Θερμοαντιοξειδωτικό	Tris(mono-nonylphenyl) phosphite
Lupersol 101	1.5	Σκληρυντικό (αργό)	2,5-Bis(tert-butylidioxy)-2,5-dimethylhexane
Lupersol TBEC	1.5	Σκληρυντικό (ταχύ)	OO-t-Butyl-O-(2-ethylhexyl) monoperoxycarbonate

Αυτή η μορφή της σκληροποιημένης EVA μπορεί να παραχθεί σε μεμβράνες πάχους 0,5mm ενώ ενώνεται με όλα τα στρώματα του πάνελ και υφίσταται θερμική επεξεργασία στους 140-150° C μέχρις ότου μαλακώσει το EVA και συγκεκριμένα μέχρι το 70% σχεδόν μετατραπεί σε gel [14].

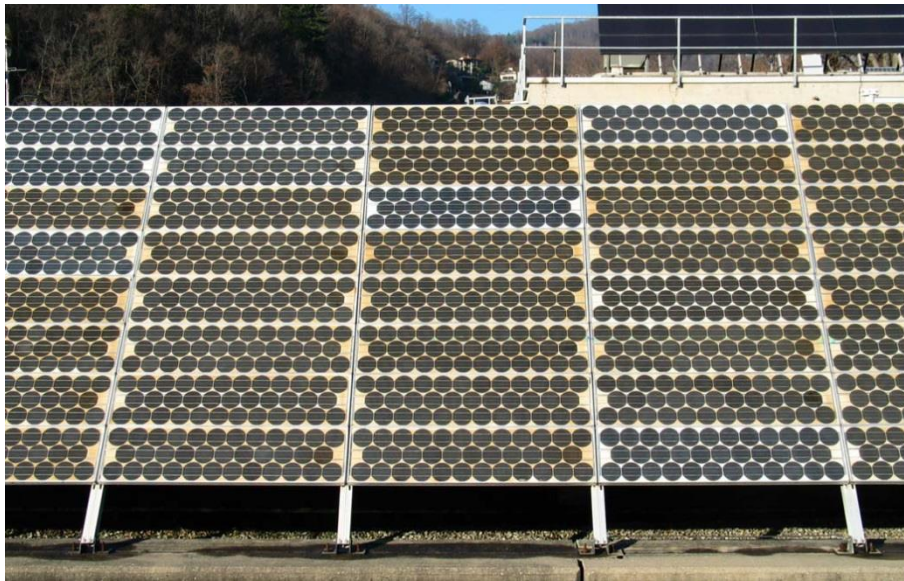


Σχήμα 1.9 Διαδικασία curing [14]

Πριν τη σταθεροποίηση του EVA παράγεται από το συμπολυμερές οξικό οξύ και αλδεΐδη που αποτελούν τα βασικά στοιχεία της αλλοίωσης εξαιτίας του φωτός, η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί με την προσθήκη απορροφητών υπεριώδους ακτινοβολίας όπως επίσης και με τη χρήση αντιοξειδωτικών ουσιών [14]. Η μερική αποκόλληση του EVA από τα στοιχεία και το γυαλί όπως και ο αποχρωματισμός της και η μεγάλη ευθραυστότητα μπορεί να παρατηρηθούν μετά από την έκθεση του πάνελ στις εξωτερικές συνθήκες για χρονικό διάστημα πέντε χρόνων.

1.4.1 Αποχρωματισμός του EVA

Όταν το EVA εκτεθούν στις ατμοσφαιρικές συνθήκες για μεγάλο χρονικό διάστημα το χρώμα τους μετατρέπεται από ανοικτό κίτρινο μέχρι σκούρο καφέ ειδικά στο στρώμα εκείνο που ενώνει το μπροστινό τμήμα του πλαισίου με τον πίνακα των ηλιακών κυψελών. Ο βαθμός αλλοίωσης του EVA εκτιμάται με βάση το πάχος του αποχρωματισμένου πλαισίου.



Σχήμα 1.10 Αποχρωματισμένα στρώματα EVA σε συστοιχία Φ/Β πλαισίων [16]

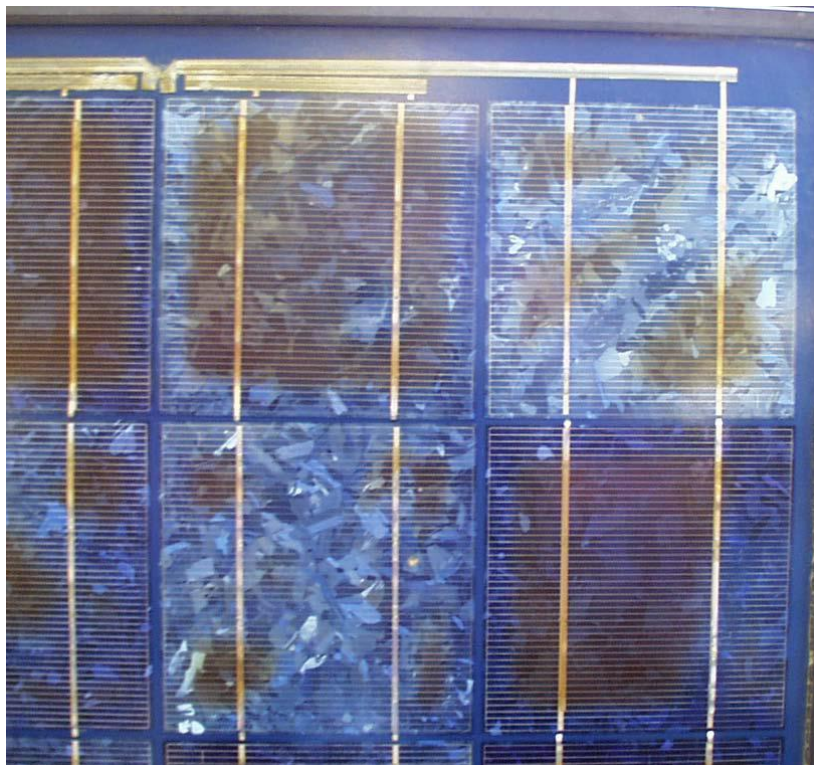
Η αύξηση της θερμοκρασίας όπως και η έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία στις μεμβράνες EVA έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του απορροφητή υπεριώδους ακτινοβολίας. Στο κατάλληλο χαμηλότερο επίπεδο της συγκέντρωσης η μεμβράνη αλλοιώνεται αποχρωματίζεται και παράγεται οξικό οξύ [16]. Η αποχρωματισμένη μεμβράνη μπορεί και απορροφά σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας στο υπεριώδες και στο ορατό φάσμα με αποτέλεσμα τη μείωση των απαιτούμενων φωτονίων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά συνέπεια, το Φ/Β σε αυτήν την περίπτωση υπολειτουργεί και παρουσιάζει μειωμένη απόδοση της τάξης του 50% [17].

Οι Pern, F.J. & Czanderna, A.W (1992) απέδειξαν ότι αν τα πάνελ εκτεθούν για ένα διάστημα 5 ετών, μειώνεται το gel της μεμβράνης όπως επίσης και η συγκέντρωση του απορροφητή UV (*Cyasorb*). Όταν η μείωση του έφτασε το 70% εμφανίστηκε το κίτρινο χρώμα και το gel στο EVA αυξήθηκε κατά 88%. Όσο η αλλοίωση μεγάλωνε μειωνόταν περισσότερο η ποσότητα του απορροφητή και ο αποχρωματισμός είναι πιο έντονος. Όταν το EVA είναι πλήρως αποχρωματισμένο οι μεμβράνες αποτελούνται κυρίως από gel. Στην ίδια εργασία αναφέρεται και η ύπαρξη του οξικού οξέος. Ο βαθμός αποχρωματισμού εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας και το βαθμό έκθεσης των πάνελ στις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Σε πιο πρόσφατη έρευνα [15] αποδείχθηκε πως η χρήση του Lupersol 101, L-101 οδηγεί σε επιτάχυνση του αποχρωματισμού του EVA. Η συγκέντρωση του συγκεκριμένου σκληρυντικού μειώνεται μετά τη θερμική κατεργασία και το εναπομείναντα L-101 συμμετέχει στον αποχρωματισμό του EVA μειώνοντας ταυτόχρονα το θερμοαντιοξειδωτικό συστατικό (*Naugard P*). Όσο περισσότερο διαρκεί η κατεργασία τόσο περισσότερο οξικό οξύ παράγεται στο EVA μειώνοντας την ικανότητα του φωτοαντιοξειδωτικού συστατικού να προστατέψει τη μεμβράνη.

Παρά το γεγονός πως όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του απορροφητή στο EVA τόσο μεγαλύτερη προστασία θα υπάρχει ως προς τον αποχρωματισμό και την αλλοίωση έχει αποδειχθεί πως αυτός ενισχύει τον αποχρωματισμό και ενισχύει και άλλα φαινόμενα αλλοίωσης [15].

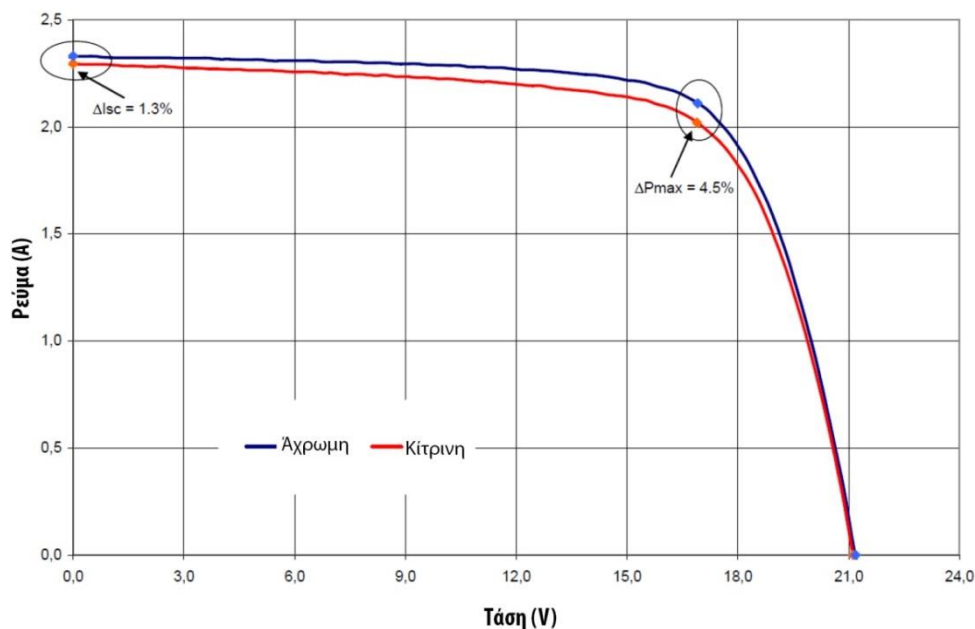
Ο αποχρωματισμός της μεμβράνης οδηγεί στην αύξηση του απορροφούμενου φωτός στο φάσμα υπεριώδους-ορατής ακτινοβολίας. Έχει αποδειχθεί πως όσο μεγαλύτερη είναι η αλλοίωση της μεμβράνης τόσο μειώνεται η απορροφητική ικανότητα στο υπεριώδες και αυξάνεται η απορρόφηση του φωτός [15]. Επιπλέον, όταν η μεμβράνη είναι πλήρως αποχρωματισμένη τόσο μεγαλύτερη είναι η ανακλαστική της ιδιότητα.



Σχήμα 1.11 Αποχρωματισμός EVA σε σκούρο καφέ χρώμα με αλλοίωση στα κεντρικά τμήματα των ηλιακών κυψελών [17]

Το EVA αποχρωματίζεται και στην περίπτωση των πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου των οποίων η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι 40 ± 10 °C όταν είναι τοποθετημένα στο έδαφος και 70 ± 10 °C όταν είναι τοποθετημένα σε οροφή. Όταν το EVA ενός τέτοιου πάνελ θερμανθεί σε συνθήκες χωρίς φως αποχρωματίζεται ελαφρώς και μειώνει την απόδοση του πάνελ κατά 3% ενώ όταν το ίδιο πάνελ εκτεθεί σε υπεριώδη ακτινοβολία υφίσταται έντονο αποχρωματισμό του EVA και μείωση της απόδοσης του κατά 20% περίπου. Κατά συνέπεια, η φωτοθερμική αλλοίωση είναι ισχυρότερη της θερμικής [13].

Η σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V ενός Φ/Β πλαισίου με μη αποχρωματισμένο EVA και ενός ιδίου με EVA κίτρινου χρώματος οδηγεί στο συμπέρασμα πως η μείωση της απόδοσης του Φ/Β στην περίπτωση του μερικού αποχρωματισμού είναι κατά πολύ μικρότερη από την περίπτωση του πλήρη αποχρωματισμού [16] .



Σχήμα 1.12 Απώλειες ισχύος και ρεύματος εξόδου όπως καταγράφονται στην μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V, σε αλλοιωμένη, αποχρωματισμένη μεμβράνη EVA κίτρινου χρώματος [16]

Στον πίνακα 1.4 παρουσιάζονται οι απώλειες σε ένα στοιχείο πυριτίου λόγω αποχρωματισμού της EVA [14].

Πίνακας 1.4 Απώλειες σε ένα στοιχείο πυριτίου λόγω έντονου αποχρωματισμού της EVA [14]

	<i>V_{oc}</i>	<i>I_{sc}</i>	<i>P_{max}</i>	Απώλεια %		
Στοιχείο πυριτίου	0.398	22.54	3.54	-	-	-
EVA καφέ χρώματος	0.347	13.15	1.80	12,81	41,66	49,15
EVA καφέ χρώματος +γυαλί	0.341	12.64	1.70	14,32	43,92	51,98

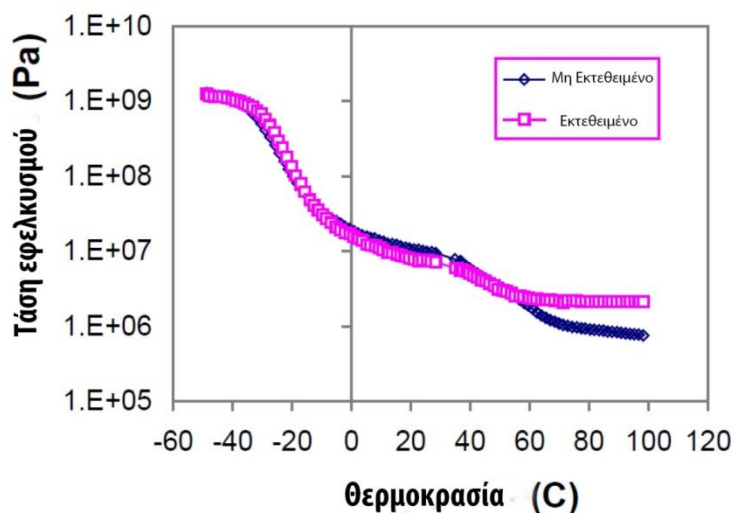
Συμπερασματικά μπορεί να θεωρηθεί πως οι παράγοντες που οδηγούν στον αποχρωματισμό της μεμβράνης μπορούν να ταξινομηθούν σε φυσικούς και χημικούς. Οι χημικοί περιλαμβάνουν τη μέθοδο παρασκευής του EVA, την απώλεια του απορροφητή της υπεριώδους ακτινοβολίας, το σκληρυντικό και τις συνθήκες επεξεργασίας και τις αντιδράσεις ανάμεσα στα στρώματα του πάνελ ενώ, οι φυσικοί αφορούν στην ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας, στην ικανότητα του γυαλιού να απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία, τη διαπερατότητα των πολυμερών υλικών σε αέρια, στο πάχος της μεμβράνης και στην ένωση όλων των στρωμάτων [15].



Σχήμα 1.13 Φ/Β πάνελ με εκτενή αποχρωματισμό των μεμβρανών [5]

1.4.2 Ανακλαστικότητα και απώλεια ελαστικότητας του EVA

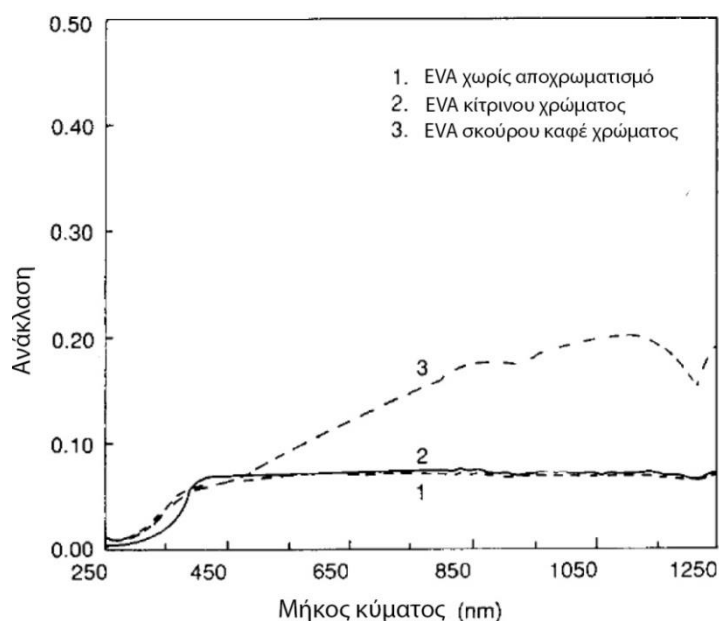
Η έκθεση των πάνελ στις περιβαλλοντικές συνθήκες οδηγεί σε αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του EVA. Έχει αποδειχθεί πως όσο γηραιότερο και πιο απομακρυσμένο είναι το EVA τόσο πιο σκληρό είναι [4].



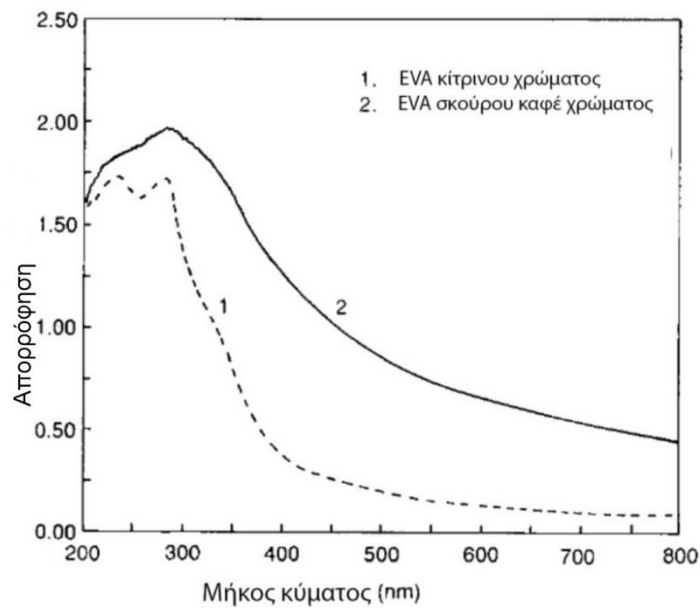
Σχήμα 1.14 Σύγκριση τάσης εφελκυσμού της ελαστικότητας για εκτεθειμένο και μη εκτεθειμένο στρώμα EVA [4]

Στο Σχήμα 1.14 παρουσιάζονται δυο δείγματα έχουν παρόμοια ελαστικότητα μέχρι η θερμοκρασία να ανέλθει στους 50 °C. Έπειτα από αυτό το σημείο το μη εκτεθειμένο δείγμα είναι πολύ ελαστικότερο του γηραιού δείγματος.

Κατά συνέπεια ο αποχρωματισμός της μεμβράνης συνοδεύεται από τη σκλήρυνση της με αποτέλεσμα τη δημιουργία ανώμαλης επιφάνειας στην πλευρά του πλέγματος και στην αύξηση της ακτινοβολίας και στην μέτρηση της απορροφητικότητας της μεμβράνης και άρα τη μείωση της απόδοσης των στοιχείων [14].



Σχήμα 1.15 Διάγραμμα ανακλαστικότητας στρωμάτων EVA με αλλοιώσεις αποχρωματισμού διαφορετικού χρώματος [14]



Σχήμα 1.16 Διάγραμμα απορροφητικότητας για διαφορετικού χρώματος EVA [14]

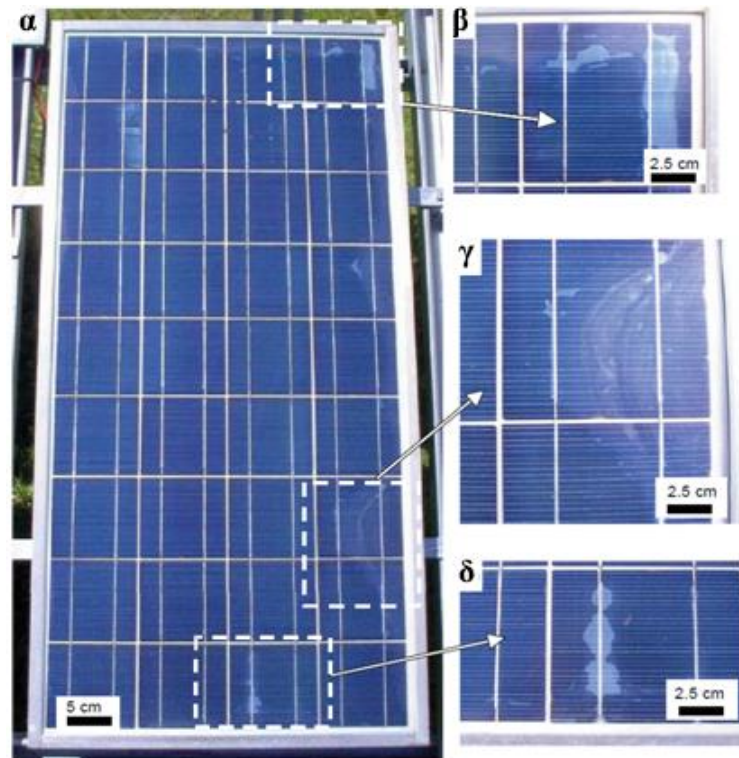
1.4.3 Βλάβες αποκόλλησης του EVA

Η μεμβράνη ενθυλάκωσης όπως ήδη αναφέρθηκε χρησιμοποιείται για την σύνδεση των διαφόρων στρωμάτων που απαρτίζουν το πάνελ. Όταν η σύνδεση αυτή αποτύχει εμφανίζεται αποκόλληση της μεμβράνης. Η αποκόλληση είναι το αποτέλεσμα της έκθεσης στην υπεριώδη ακτινοβολία και στις ατμοσφαιρικές συνθήκες του πάνελ που οδηγεί στην ελάττωση της δύναμης συγκράτησης των στρωμάτων του και κατά συνέπεια στην εισχώρηση αέρα και υγρασίας [16].

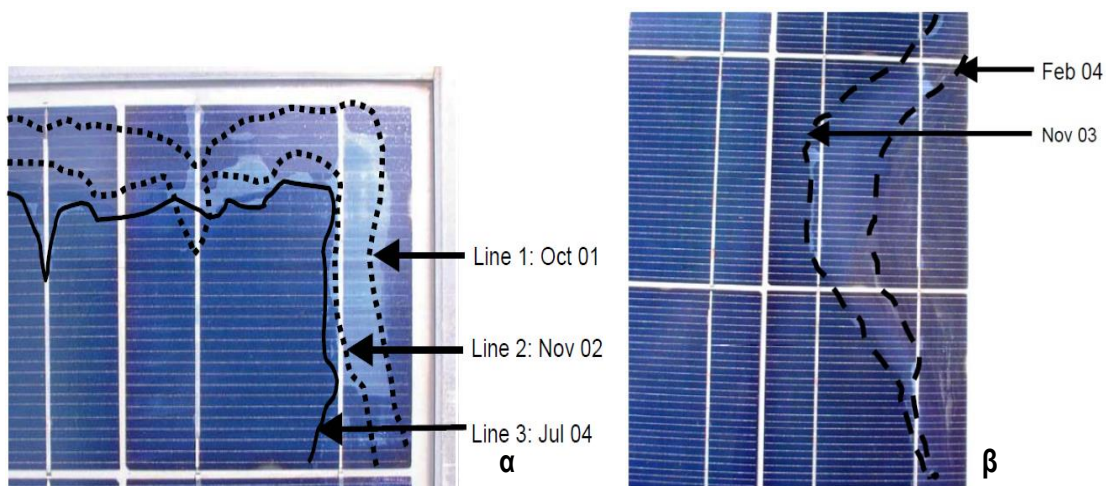


Σχήμα 1.17 Φ/Β πλαίσιο με εκτεταμένη αποκόλληση του στρώματος EVA [5]

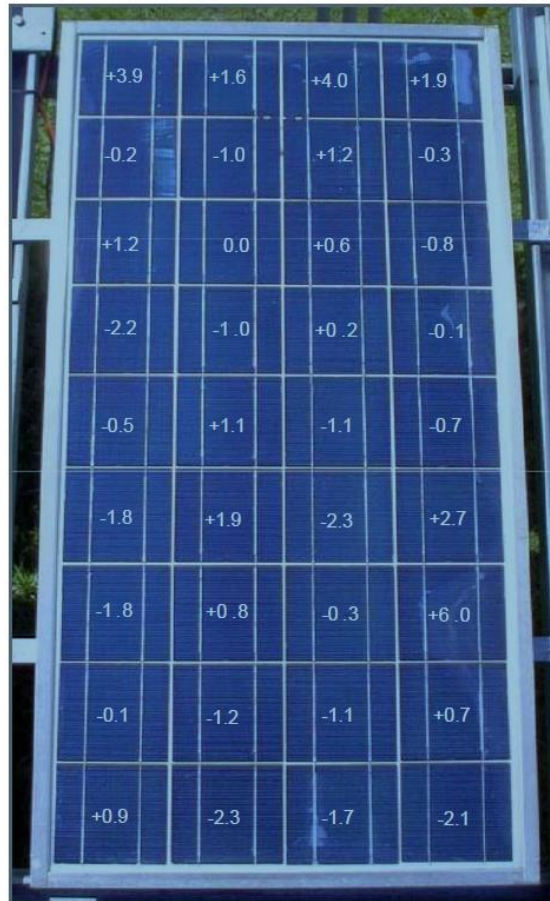
Έχει αποδειχθεί πως η αποκόλληση της μεμβράνης επιδεινώνεται από την παρουσία υγρασίας στο πλαίσιο και την συνεχή έκθεση του. Το πώς εξελίσσεται η βλάβη εξαρτάται από το χρόνο έκθεσης του πλαισίου.



Σχήμα 1.18 Φ/Β πλαίσιο (α) με συγκεκριμένα σημεία αποκόλλησης του στρώματος EVA (β,δ) και εμφάνισης υγρασίας λόγω της αποκόλλησης (γ) [18]



Σχήμα 1.19 Εξέλιξη στον χρόνο του φαινομένου α. της αποκόλλησης και β. της διάχυσης υγρασίας λόγω αποκόλλησης του στρώματος EVA για Φ/Β πλαίσιο του Σχήματος 1.18 [18]



Σχήμα 1.20 Διαφορά θερμοκρασίας ανά ηλιακή κυψέλη του “προβληματικού” πλαισίου σε σχέση με την μέση τιμή της [18]

Στα διαφορετικά στοιχεία του πάνελ αναπτύσσονται διαφορετικές θερμοκρασίες με τις μεγαλύτερες να αναπτύσσονται στα σημεία αποκόλλησης και αποχρωματισμού. Αυτές οι υψηλότερες θερμοκρασίες επιταχύνουν το φαινόμενο της αποκόλλησης, επεκτείνοντας τις αποκολλημένες περιοχές, ενισχύοντας έτσι την εισχώρηση υγρασίας και οδηγώντας τελικά σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση στην απόδοση [18].

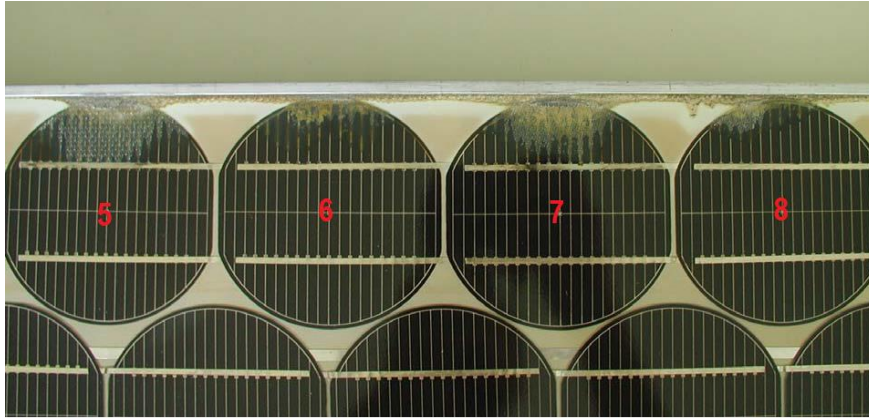


Σχήμα 1.21 Διάβρωση σε επαφή στο εσωτερικό του πάνελ [18]



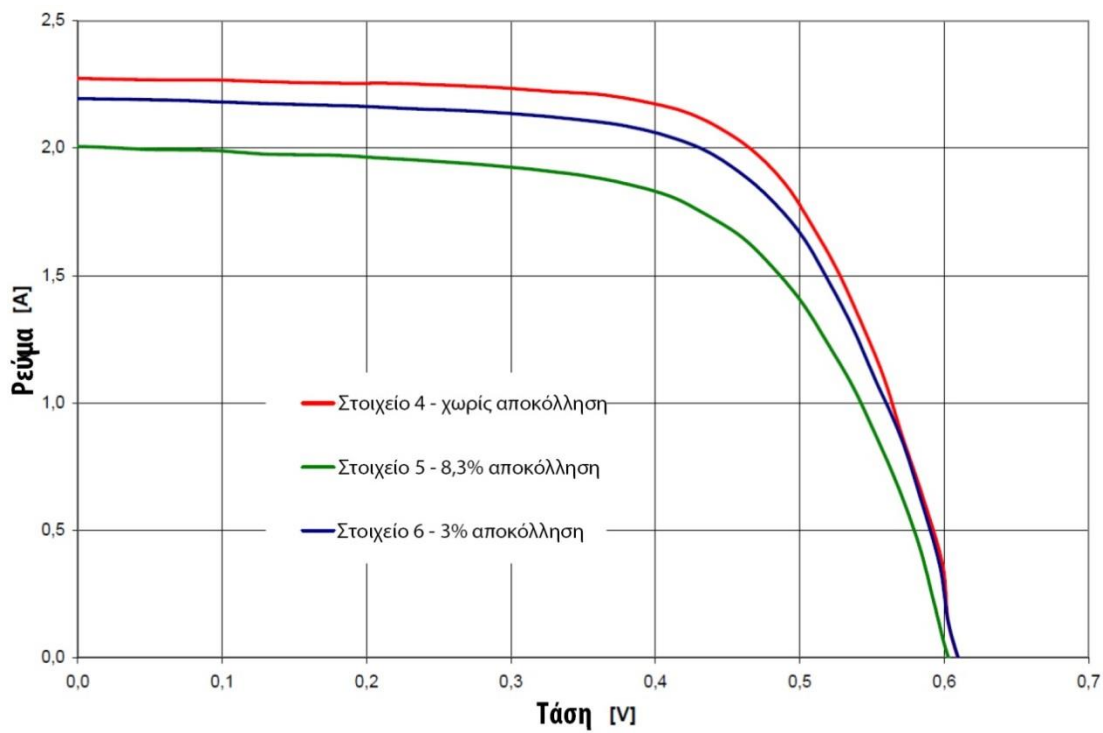
Σχήμα 1.22 Αποκόλληση βαριάς μορφής [16]

Η σύγκριση των πάνελ με αποκόλληση και των πάνελ χωρίς αποκόλληση οδηγεί στη διαπίστωση πως η παρουσία στοιχείων με αποκολλημένη EVA δεν οδηγεί σε ανάλογη μείωση της απόδοσης του πάνελ(Realini, 2003). Συγκεκριμένα η λειτουργία του πάνελ δεν επηρεάζεται από την παρουσία στοιχείων με αποκόλληση.



Σχήμα 1.23 Τέσσερα στοιχεία που έχουν υποστεί αποκόλληση της EVA [16]

Στο Σχήμα 1.24 παρουσιάζεται η σύγκριση στοιχείων με αποκόλληση και χωρίς. Συγκεκριμένα σαν στοιχείο 4 αναφέρεται ένα στοιχείο χωρίς αποκόλληση ενώ τα στοιχεία 5 και 6 είναι τα στοιχεία που απεικονίζονται στο Σχήμα 1.24 [16].

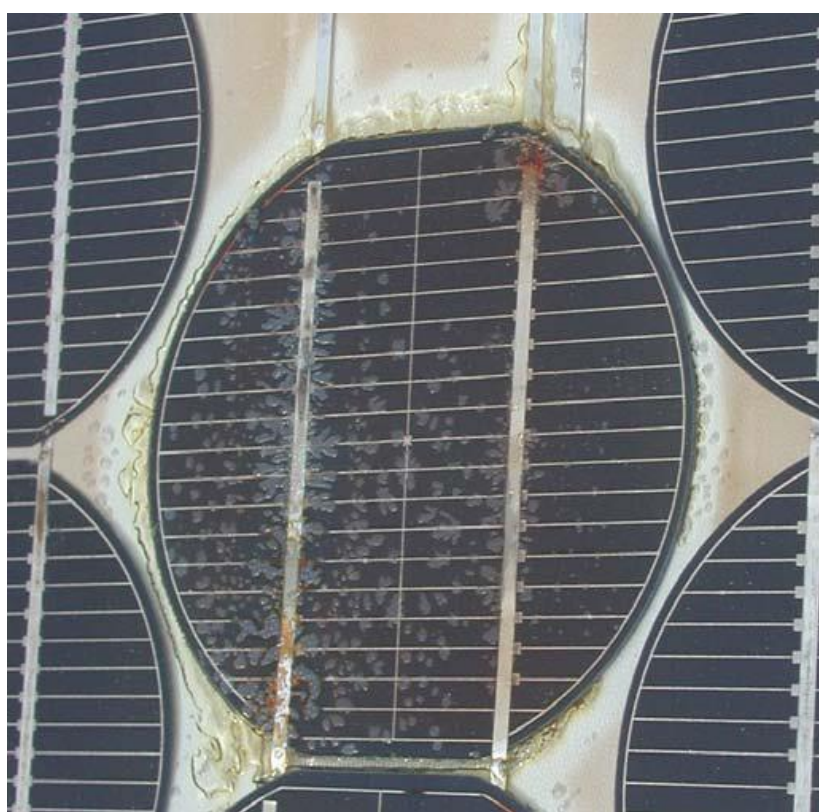


Σχήμα 1.24 Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ τριών στοιχείων με διαφορετικό βαθμό αποκόλλησης [16]

Πίνακας 1.5 Συγκριτικός πίνακας μεταξύ τριών στοιχείων [16]

Αριθμός στοιχείου	Αποκολλημένη περιοχή	P_m (W)	ΔP_m (%)	I_{sc} (A)	ΔI_{sc} (%)
4	0.0%	0.93	-	2.27	-
5	8.3%	0.76	-18.3	2.00	-11.7
6	3.0%	0.87	-6.5	2.20	-3.4

Μέσα σε 20 χρόνια λειτουργίας του συστήματος, υπήρξαν 3 πάνελ στα οποία υπήρξε αποκόλληση που επηρέαζε στοιχεία με θερμή κηλίδα. Το ένα από αυτά χρειαζόταν αντικατάσταση (Σχήμα 1.25).



Σχήμα 1.25 Αποκόλληση σε στοιχείο με θερμή κηλίδα (hot spot) [16]

Ο ρυθμός αποκόλλησης δεν είναι σταθερός και για αυτό τα πάνελ παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό υποβάθμισης. Γενικά η αποκόλληση εξαρτάται από το κλίμα της περιοχής εγκατάστασης για αυτό και συνήθως παρατηρείται περισσότερο σε κλίματα με αυξημένη ζεστή και υγρασία και μάλιστα μπορεί να εμφανιστεί και σε λιγότερο από 5 χρόνια. Αρχικά, με την αποκόλληση εμφανίζεται απώλεια ισχύος λόγω της αποσύνδεσης της μεμβράνης από τα στοιχεία.

Όσον αφορά όμως στην ολική διάρκεια ζωής του πάνελ, η αποκόλληση μπορεί να δημιουργήσει εστία υγρασίας, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα για εκτενή διάβρωση των μεταλλικών επαφών.

Παρά το γεγονός πως οι δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης είναι αποτελεσματικές ως προς τους μηχανισμούς που προκαλούν αποκόλληση έχει αποδειχθεί ότι συνήθως η αποκόλληση εμφανίζεται ανάμεσα στην EVA και τα στοιχεία και σπανιότερα ανάμεσα στην EVA και το εμπρόσθιο γυαλί [5].

Από μετρήσεις που έγιναν σε εκτεθειμένα για καιρό πάνελ και έπειτα από χημικές αναλύσεις και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις χημικές αναλύσεις μη εκτεθειμένων πάνελ, αποδείχθηκε πως η αποκόλληση εξαρτάται από το ηλιακό φως, τη θερμοκρασία και την υγρασία, που μειώνουν κατά πολύ την συγκολλητική ικανότητα του EVA με τα στοιχεία. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι η δύναμη συγκράτησης μεταξύ της μεμβράνης EVA και των ηλιακών στοιχείων είναι μεγαλύτερη, όσο παραμένουν χαμηλά τα επίπεδα φωσφόρου και νατρίου μέσα στο πάνελ [7].



Σχήμα 1.26 Στοιχείο με έντονο το φαινόμενο της αποκόλλησης της EVA [8]

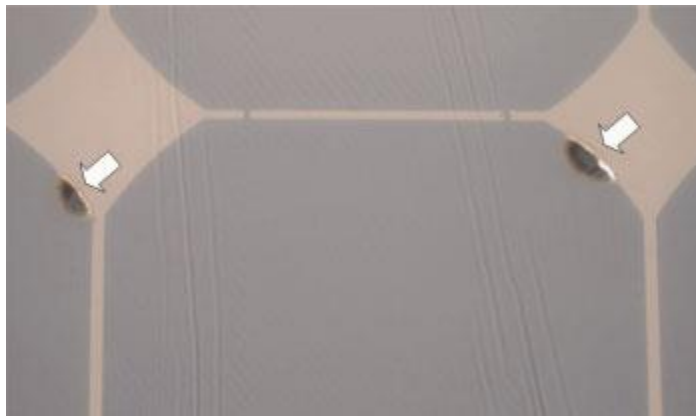
1.5. Βλάβες στον πίνακα ηλιακών κυψελών

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στα Φ/Β γίνεται στον πίνακα ηλιακών κυψελών και όλα τα στρώματα του πλαισίου στοχεύουν στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας, της προστασίας και της στήριξης του πίνακα κυψελών. Η επιλογή των υλικών γίνεται έτσι ώστε να εμποδίζεται η απορρόφηση του μεγαλύτερου μέρους της ακτινοβολίας από τα μπροστινά στρώματα του πλαισίου αλλά να διέρχεται από αυτά ώστε να απορροφάται από τις ηλιακές κυψέλες, για την μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Μεγάλο μέρος (>75%) της απορροφούμενης από τις κυψέλες ηλιακής ακτινοβολίας

διαχέεται ως θερμότητα είτε στο περιβάλλον, είτε στον πίνακα κυψελών, συμβάλλοντας σημαντικά στην θερμική του καταπόνηση ενώ, τόσο στα στάδια της συναρμολόγησης (assembling) των ηλεκτρικών συνδέσεων (strings) των κυψελών και της ενθυλάκωσης, όσο και κατά την μεταφορά και τοποθέτησή του πλαισίου, ο πίνακας κυψελών υφίσταται άμεσες ή έμμεσες μηχανικές καταπονήσεις. Το σύνολο αυτών των θερμομηχανικών καταπονήσεων, σε συνδυασμό με το ιδιαίτερα μικρό πάχος του (~0.5mm), καθιστούν τον πίνακα ηλιακών κυψελών ευαίσθητο σε συγκεκριμένου τύπου βλάβες, οι κυριότερες των οποίων σχετίζονται με την εμφάνιση θερμών κηλίδων, προβλημάτων συγκόλλησης, ρωγμών και θραύσεων, καθώς και προβλημάτων διάβρωσης και εσωτερικών διασυνδέσεων.

1.5.1 Θερμές κηλίδες (hot spots)

Με τον όρο θερμή κηλίδα εννοείται το φαινόμενο που εμφανίζεται στα φωτοβολταϊκά πάνελ και το οποίο αφορά στην περιοχή εκείνη στην οποία αναπτύσσεται ασυνήθιστα υψηλή θερμοκρασία [19]. Η εμφάνιση της θερμής κηλίδας συμβαίνει όταν ένα στοιχείο παράγει λιγότερο ρεύμα από ότι τα υπόλοιπα στοιχεία που είναι συνδεδεμένα σε σειρά και οφείλεται είτε σε μερική σκίαση, είτε σε βλάβη στο στοιχείο, είτε σε αποτυχία των διασυνδέσεων στο πάνελ. Το αποτέλεσμα είναι το ελαττωματικό στοιχείο να μετατρέπεται σε φορτίο που απορροφά ενέργεια από τα γειτονικά του στοιχεία και την αποδίδει με τη μορφή θερμότητας.

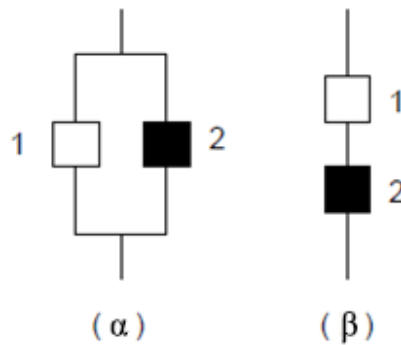


Σχήμα 1.27 Hot spots σε Φ/Β στοιχεία [19]

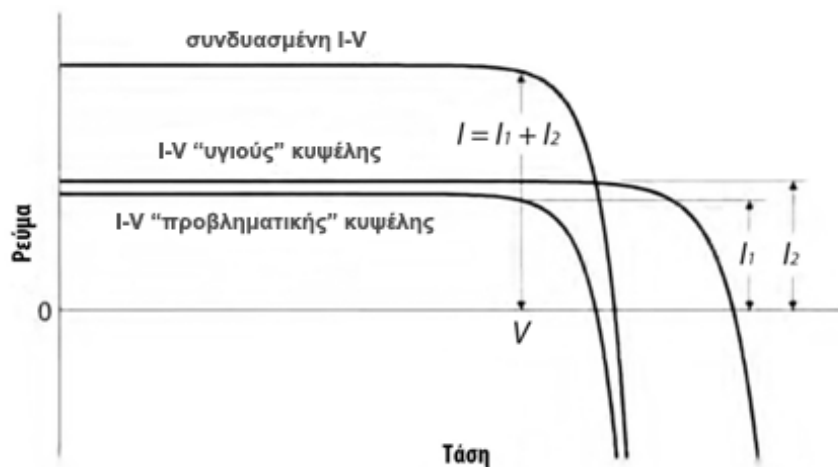
Προϋπόθεση για την εμφάνιση της θερμής κηλίδας είναι η ύπαρξης μιας τουλάχιστον ηλιακής κυψέλης σε ένα Φ/Β που λειτουργεί και η οποία εμφανίζει ρεύμα βραχυκύκλωσης ασυνήθιστα χαμηλότερο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες (‘‘υγιείς’’) κυψέλες που είναι συνδεδεμένες εν σειρά με αυτήν [20]. Η κυψέλη που είναι προβληματική αναγκάζεται να μεταφέρει ρεύμα

περισσότερο από αυτό που μπορεί και λειτουργεί αντίστροφα στο όριο της. Κατά συνέπεια λειτουργεί ως καταβόθρα ενέργειας σε μορφή θερμότητας. Το ποσό της ενέργειας που εναποτίθεται σε μια “προβληματική” κυψέλη λόγω του φαινομένου της θερμής κηλίδας, ισούται με το γινόμενο του ρεύματος εξόδου του πλαισίου και της ανάστροφης τάσης πόλωσης στα άκρα της κυψέλης.

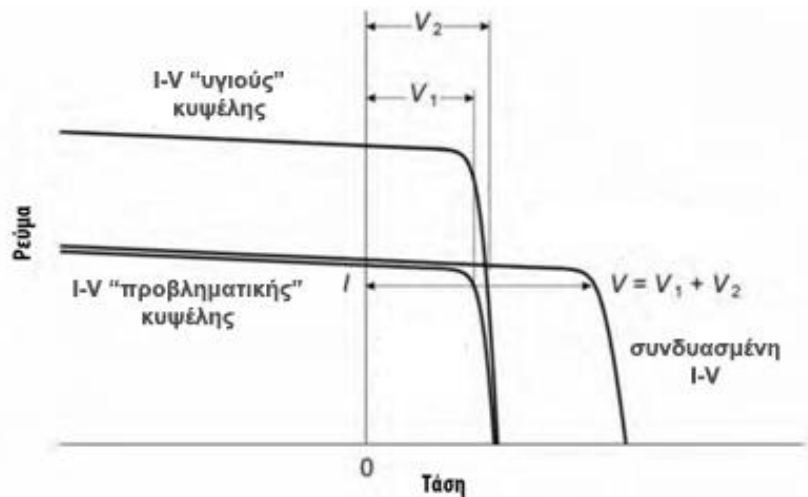
Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V του κυκλώματος ενός Φ/Β εξαρτάται από το αν η προβληματική κυψέλη συνδέεται με τις υπόλοιπες σε σειρά ή παράλληλα. Αναλόγως της συνδεσμολογίας (σε σειρά ή παράλληλα) της “προβληματικής” κυψέλης με τις υπόλοιπες “υγιείς” κυψέλες (Σχήμα 1.29), η χαρακτηριστική καμπύλη I-V του συνολικού κυκλώματος ενός Φ/Β πλαισίου μπορεί να αντιστοιχεί είτε σε αυτήν του Σχήματος 1.30, είτε σε αυτήν του Σχήματος 1.31 αντίστοιχα [26].



Σχήμα 1.28 Συνδεσμολογία “προβληματικής κυψέλης (α) παράλληλα και (β) σε σειρά με το υπόλοιπο κύκλωμα των “υγιών” κυψελών [26]

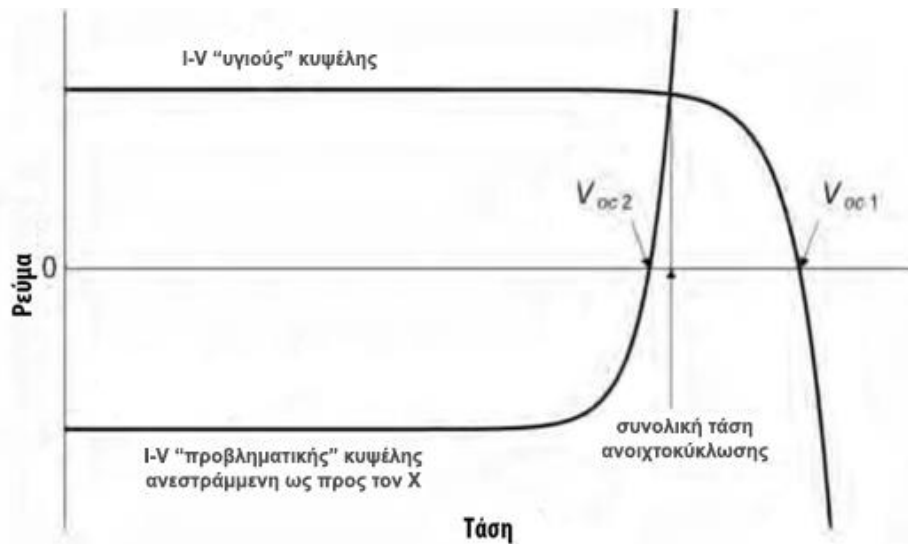


Σχήμα 1.29 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V κυψελών και Φ/Β πλαισίου για την συνδεσμολογία του Σχήματος 1.28-α [26]

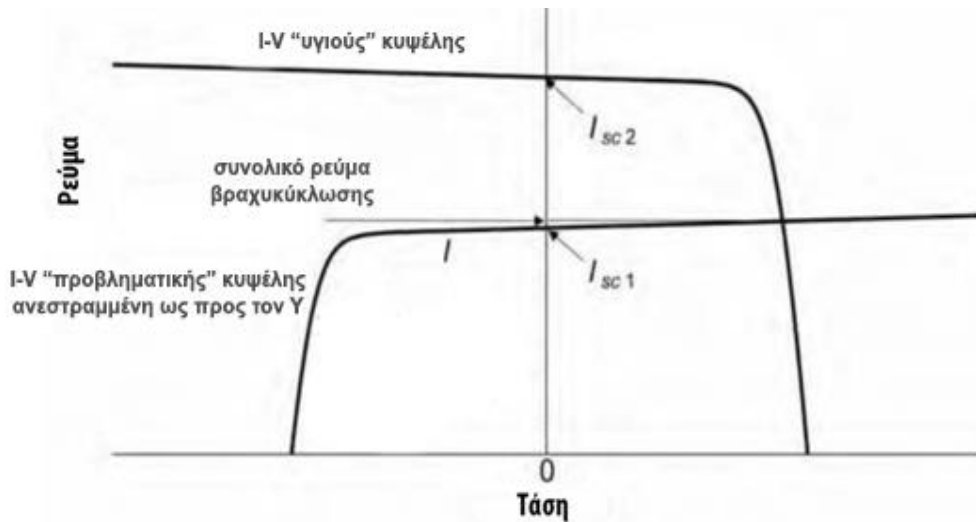


Σχήμα 1.30 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V κυψελών και Φ/Β πλαισίου για την συνδεσμολογία του Σχήματος 1.28-β [29]

Για την παράλληλη συνδεσμολογία κυψελών, στην συνολική χαρακτηριστική καμπύλη I-V του κυκλώματος του Φ/Β πλαισίου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης ISC είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους ρευμάτων βραχυκύκλωσης ISC1 και ISC2. Αντίστοιχα, όταν οι κυψέλες συνδέονται σε σειρά συνδεσμολογία κυψελών, στην συνολική χαρακτηριστική καμπύλη I-V του κυκλώματος του Φ/Β πλαισίου, η τάση ανοιχτοκύκλωσης VOC είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους τάσεων ανοιχτοκύκλωσης VOC1 και VOC2.



Σχήμα 1.31 Γραφικός τρόπος υπολογισμού της συνολικής V_{oc} , για παράλληλη συνδεσμολογία της “προβληματικής” κυψέλης [26]



Σχήμα 1.32 Γραφικός τρόπος υπολογισμού του συνολικού I_{sc} , για εν σειρά συνδεσμολογία της "προβληματικής" κυψέλης [26]

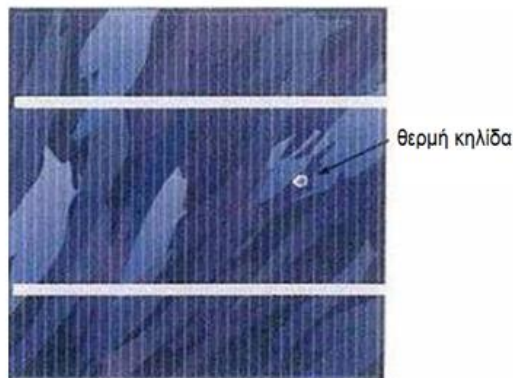
Το συνολικό V_{oc} και του συνολικού I_{sc} του κυκλώματος κυψελών, σε παράλληλη και εν σειρά συνδεσμολογία αντίστοιχα, μπορεί να υπολογιστεί και γραφικά [26].

- Το σημείο τομής της χαρακτηριστικής I-V της "προβληματικής" κυψέλης, ανεστραμμένης ως προς τον άξονα της τάσης (X), και της χαρακτηριστικής I-V της "υγιούς" κυψέλης, δίνει την συνολική (τελική) τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc}
- Το σημείο τομής της χαρακτηριστικής I-V της "προβληματικής" κυψέλης, ανεστραμμένης ως προς τον άξονα του ρεύματος (Y), και της χαρακτηριστικής I-V της "υγιούς" κυψέλης, δίνει το συνολικό (τελικό) ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}

Το πόσο σοβαρή είναι μια βλάβη που προκαλείται από μια θερμή κηλίδα στο ηλεκτρικό κύκλωμα του πίνακα των ηλιακών κυψελών εξαρτάται από το ποσό της θερμότητας που εναποτίθεται σε συνθήκες ανάστροφης πόλωσης και, από την αύξηση της θερμοκρασίας της κυψέλης. Αν η θερμοκρασία της κυψέλης αυξηθεί κατά $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, η ισχύς εξόδου μειώνεται κατά 4% ενώ αν αυξηθεί κατά $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, η ισχύς εξόδου μειώνεται κατά περίπου 10% [27].

Η θερμή κηλίδα δεν γίνεται αντιληπτή με γυμνό μάτι ούτε επιφέρει κάποια οπτική αλλοίωση στον πίνακα ηλιακών κυψελών αλλά υπάρχουν κατάλληλες μέθοδοι ανίχνευσης της όπως η θερμομέτρηση ή η θερμογράφηση του Φ/Β πλαισίου. Η θερμή κηλίδα δημιουργεί ορατές αλλοιώσεις στο υλικό της προβληματικής κυψέλης καθώς το πλαίσιο συνεχίζει να είναι εκτεθειμένο. Με την εξέλιξη της θερμής κηλίδας, η ηλιακή κυψέλη μπορεί να υποστεί ραγίσματα, θραύσεις ή ακόμα και τήξη

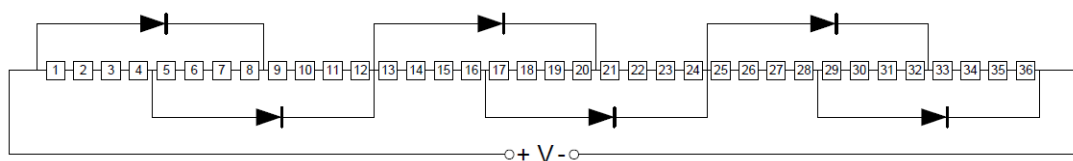
(λιώσιμο) των μεταλλικών μερών της. Οι πιθανές βλάβες λόγω της θερμής κηλίδας μπορεί να αντιμετωπιστούν με τη χρήση διόδων διαφυγής (bypass diodes).



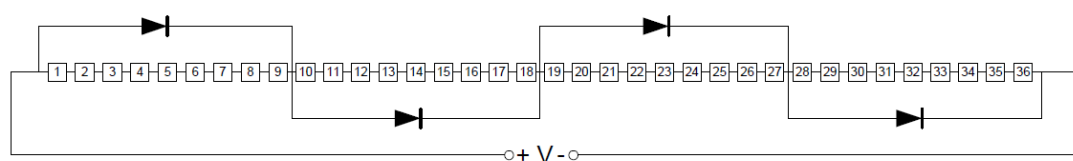
Σχήμα 1.33 Ορατή θερμή κηλίδα σε ηλιακή κυψέλη [9]

Οι δίοδοι διαφυγής συνδέονται αντιπαράλληλα με τη σειρά ηλιακών κυψελών. Σε κανονικές συνθήκες η ανάστροφα πολωμένη δίοδος διαφυγής δεν άγει ενώ όταν υπάρχει θερμή κηλίδα η δίοδος άγει προστατεύοντας την προβληματική κυψέλη και όλο το κύκλωμα από την ανάπτυξη της θερμής κηλίδας.

Συνήθως χρησιμοποιείται, ως πιο οικονομική λύση, μια δίοδος διαφυγή ανά μια σειρά κυψελών. Μια δίοδος διαφυγής μπορεί να καλύπτει μέχρι και 18 κυψέλες στην περίπτωση των Φ/Β πυριτίου. Κατά συνέπεια για ένα τυπικό πλαίσιο 36 κυψελών μπορούν να χρησιμοποιηθούν 2 δίοδοι διαφυγής όμως προκειμένου για μεγαλύτερη ασφάλεια χρησιμοποιούνται 4 δίοδοι. Η τελική τοποθέτηση τους μπορεί να γίνει με αλληλοεπικαλυπτόμενες ή μη των ηλιακών κυψελών [26].



Σχήμα 1.34 Τοποθέτηση διόδων διαφυγής με αλληλεπικαλυπτόμενες κυψέλες [9]



Σχήμα 1.35 Τοποθέτηση διόδων διαφυγής με μη αλληλεπικαλυπτόμενες κυψέλες [9]

1.5.2 Βλάβες συγκολλήσεων

Οι συγκολλήσεις των ηλιακών κυψελών με τα ειδικά σύρματα διασύνδεσης ενός πίνακα κυψελών αποτελούν τους δεσμούς συγκόλλησης και είναι συνήθως μίγματα κασσιτέρου- μολύβδου. Στις συγκολλήσεις του πίνακα κυψελών οι βλάβες που μπορεί να εμφανιστούν είναι η αύξηση της αντίστασης σειράς και η εμφάνιση θερμών κηλίδων στους δεσμούς.

- **Αύξηση της αντίστασης σειράς (R_s)**

Η αντίσταση σειράς συναντάται στην καλωδίωση, στις επαφές του κουτιού διακλάδωσης (junction box), στα σύρματα διασύνδεσης των ηλιακών κυψελών (cell interconnection ribbons), στην επιμετάλλωση των κυψελών καθώς και στις συγκολλήσεις (solder bonds). Οι μεγάλες τιμές της συγκεκριμένης αντίστασης μειώνουν την απόδοση των Φ/Β και εξαρτάται από τον χρόνο λειτουργίας του Φ/Β. Στόχος είναι η όσο το δυνατόν μικρότερη απώλεια των Φ/Β εξαιτίας της αντίστασης σειράς. Παρόλα αυτά οι αναπόφευκτες θερμομηχανικές επιδράσεις τους ημερήσιου και ετήσιου θερμικού κύκλου αυξάνουν την εν λόγω αντίσταση.

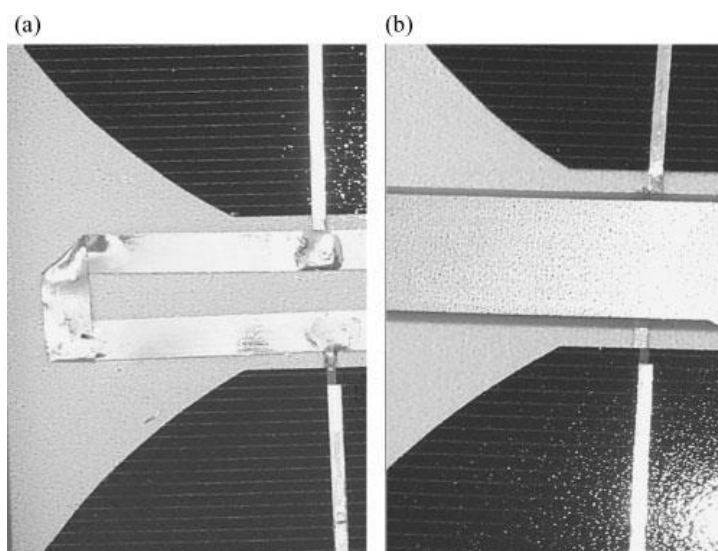
Έχει αποδειχθεί πως οι θερμικές διαστολές και συστολές των συγκολλήσεων είναι η κύρια αιτία αύξησης της αντίστασης σειράς [4]. Οι συστολές και οι διαστολές των συγκολλήσεων αυξάνουν την ευθραυστότητα των μεταλλικών στοιχείων τους οδηγώντας στην φθορά και θραύση τους γεγονός που αυξάνει την αντίσταση σειράς.

- **Θερμές κηλίδες στους δεσμούς συγκολλήσεων**

Οι δεσμοί συγκολλήσεων πολύ ψηλής αντίστασης οδηγούν στην εμφάνιση θερμών κηλίδων στις συγκολλήσεις και έχει αποδειχθεί ότι όταν χρησιμοποιούνται υλικά συγκόλλησης χαμηλότερης ποιότητας είναι δυνατό να δημιουργηθούν στους πίνακες ηλιακών κυψελών θερμές κηλίδες [19].



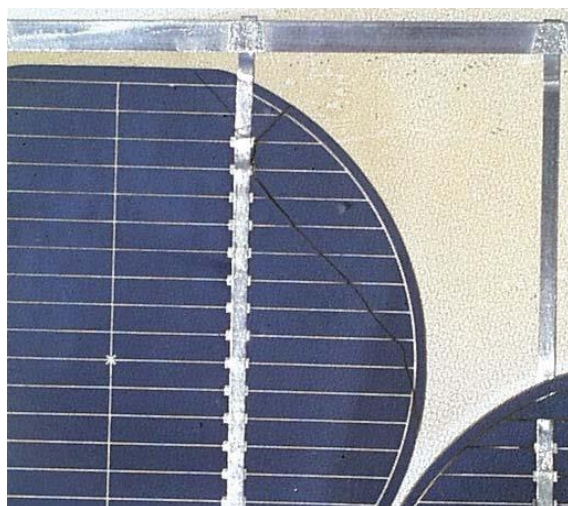
Σχήμα 1.36 Εμφάνιση θερμών κηλίδων στους δεσμούς συγκολλήσεων του πίνακα ηλιακών κυψελών [19]



Σχήμα 1.37 Πίνακας ηλιακών κυψελών με δεσμούς συγκολλήσεων **α.** κακής ποιότητας και **β.** καλής ποιότητας [19]

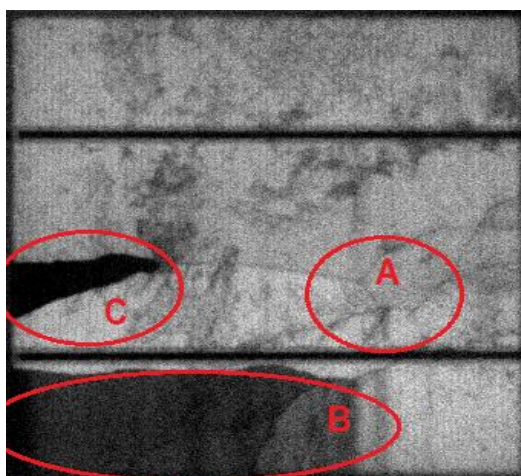
1.5.3 Ρωγμές και θραύση ηλιακών κυψελών

Οι αναπτυσσόμενες μηχανικές τάσεις και ο συνδυασμός θερμομηχανικών καταπονήσεων οδηγούν στη δημιουργία ρωγμών και θραύσης στις ηλιακές κυψέλες. Στην πραγματικότητα, εξαιτίας του πάχους των ηλιακών κυψελών που είναι πολύ μικρό οι ρωγμές και οι μικρορωγμές είναι αναπόφευκτες και η σοβαρότητα τους προσδιορίζεται από το βαθμό επιρροής τους στην απόδοση όλου του Φ/Β [28].



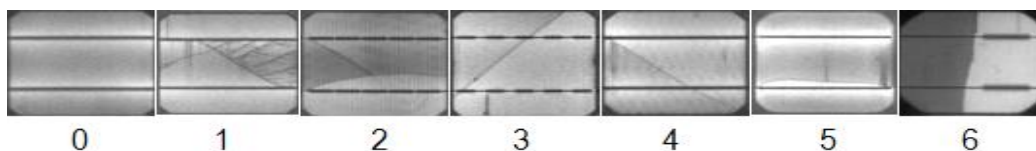
Σχήμα 1.38 Ρωγμή σε ηλιακή κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου [16]

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι ρωγμών και θραύσεων. Ο τύπος “Α” δεν επηρεάζει ουσιαστικά την απόδοση της κυψέλης καθώς δεν αυξάνει την αντίστασή της, όπως συμβαίνει στις άλλες δυο περιπτώσεις. Στον τύπο “Β” υπάρχει μεγάλη αντίσταση, αλλά όχι πλήρης αποκόλληση Φ/Β υλικού από την κυψέλη, όπως συμβαίνει στην – σοβαρότερη – περίπτωση του τύπου “C”.



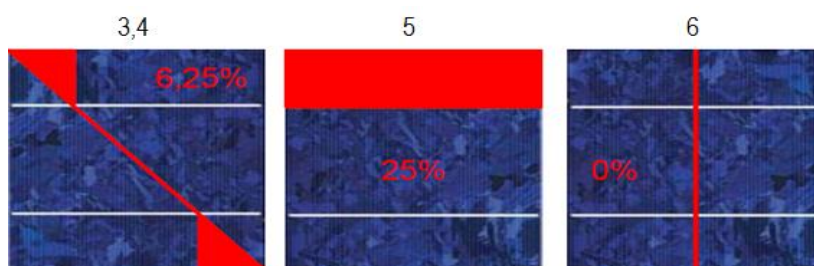
Σχήμα 1.39 Ηλιακή κυψέλη με τρεις τύπους ρωγμών και θραύσεων [28]

Οι ρωγμές των ηλιακών κυψελών μπορούν να ταξινομηθούν με βάση μια κλίμακα από 0 έως 6 και με κριτήριο την γεωμετρία τους.

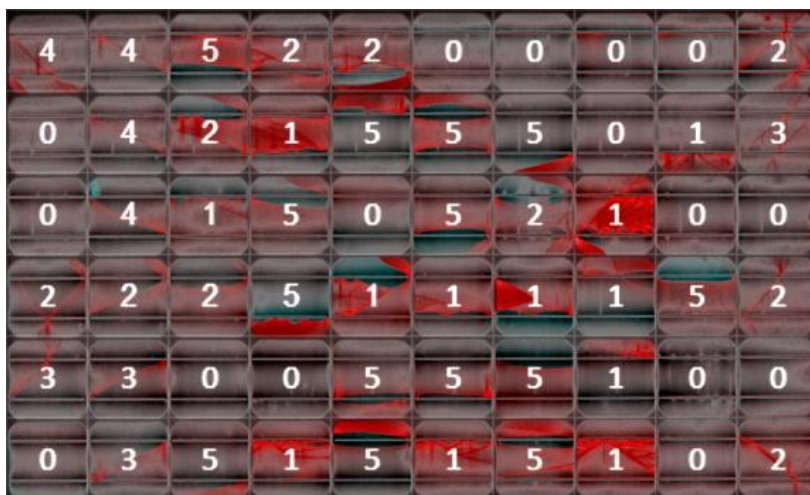


Σχήμα 1.40 Ταξινόμηση ρωγμών ηλιακών κυψελών 0. Καμία ρωγμή, 1. Δενδροειδής ρωγμή, 2. Πολλαπλή ρωγμή, 3. +45° διαγώνια ρωγμή, 4. -45° διαγώνια ρωγμή, 5. Παράλληλη ρωγμή, 6. Κάθετη ρωγμή [28]

Οι περιπτώσεις της δενδροειδούς, της πολλαπλής και της παράλληλης ρωγμής προκαλούν τη μεγαλύτερη απώλεια επιφάνειας [28]. Η ιδανική περίπτωση προφανώς είναι η περίπτωση που δεν υπάρχουν ρωγμές (κατηγορία 0). Οι ρωγμές δεν επιφέρουν καμία μείωση στην απόδοση μιας ηλιακής κυψέλης, καθώς δεν οδηγούν σε απώλειες ενεργού επιφάνειας.



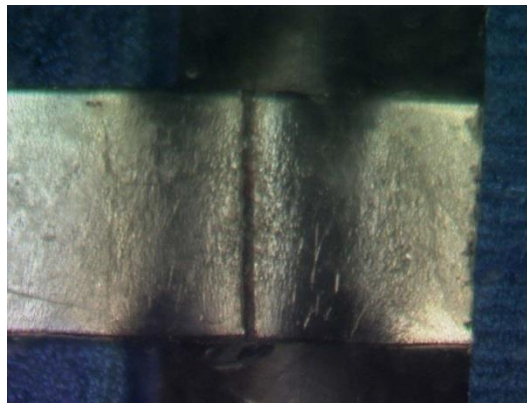
Σχήμα 1.41 Ποσοστό της απώλειας ενεργού επιφάνειας κυψελών, για τις περιπτώσεις ρωγμών του Σχήματος 1.40 [28]



Σχήμα 1.42 Προσδιορισμός τύπων ρωγμών Φ/Β πλαισίου βάσει της ταξινόμησης του Σχήματος 1.40 [28]

1.5.4 Βλάβες εσωτερικών διασυνδέσεων

Οποιαδήποτε επαφή εσωτερικής διασύνδεσης μπορεί να υποστεί μηχανικές και θερμικές τάσεις που μπορούν να τους προκαλέσουν ρήξη με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης σειράς και την εμφάνιση θερμής κηλίδας. Οι συγκεκριμένες βλάβες αντιμετωπίζονται με τη χρήση όσο το δυνατών λεπτότερων διασυνδέσεων και υλικών υψηλής αντοχής [11].



Σχήμα 1.43 Καταπονημένη διασύνδεση κυψέλης, στο όριο ολικής ρήξης της [11]

1.5.5 Μεταλλική διάβρωση

Στους πίνακες ηλιακών κυψελών, η διάβρωση των μεταλλικών στοιχείων και των διασυνδέσεων, σχηματίζεται σε θερμό, υγρό περιβάλλον, από την εισχώρηση υγρασίας, ενώ επίσης ενισχύεται σημαντικά με την απελευθέρωση οξικού οξέος κατά την φθορά και αλλοίωση του στρώματος EVA. Όπως προαναφέρθηκε, η είσοδος της υγρασίας στο πλαίσιο γίνεται συνήθως μέσω του υποστρώματος και των ακμών του πλαισίου.



Σχήμα 1.44 Διάβρωση στις μεταλλικές διασυνδέσεις ενός πίνακα ηλιακών κυψελών [29]

Όπως αναφέρθηκε ήδη το EVA, όταν εκτίθεται σε υγρασία, θερμότητα και υπεριώδους ακτινοβολία, αποσυντίθεται και παράγει οξικό οξύ με αποτέλεσμα τη μείωση του pH της ενθυλάκωσης και την αύξηση των επιπέδων επιφανειακής διάβρωσης. Με τη διοχέτευση στην ατμόσφαιρα, του οξικού οξέος από τη γήρανση του στρώματος EVA, τα μεταλλικά τμήματα και οι διασυνδέσεις του πλαισίου εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή στη ζέστη και την υγρασία, μέχρι να διαβρωθούν [30].

Η διάβρωση των διαφόρων μεταλλικών επαφών και των διασυνδέσεων, οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης διακλάδωσης και της αντίστασης σειράς και κατά συνέπεια στη μείωση της συνολικής απόδοσης του πλαισίου [7].

1.6 Σύνοψη

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο έγινε μια ανασκόπηση των βλαβών που εμφανίζονται στα φωτοβολταϊκά πάνελ. Σαν μια σύνοψη όλων των ανωτέρω, παρατίθενται ο Πίνακας 1.6, ο οποίος αποτελεί ένα συνοπτικό πίνακα βλαβών, με τα αίτια και τα αποτελέσματα της εκάστοτε βλάβης.

Πίνακας 1.6 Συνοπτικός πίνακας βλαβών [31]

Σφάλμα	Αιτία	Αποτέλεσμα
Θραύση στο γυαλί	Μηχανική φόρτιση - κρούση	Εισχώρηση υγρασίας - απώλεια μηχανικής αντοχής
Ραγισμένο Tedlar	Θερμοκρασία	Εισχώρηση υγρασίας - απώλεια μηχανικής αντοχής
Tedlar με αποκόλληση	Υγρασία	Εισχώρηση υγρασίας - απώλεια μηχανικής αντοχής
Σφάλμα στο πλαίσιο	Κατασκευαστικό λάθος - μη σωστή μελέτη	Εισχώρηση υγρασίας - απώλεια στήριξης
Αποχρωματισμός της EVA	UV ακτινοβολία - υγρασία - θερμοκρασία	Υψηλή απορρόφηση ακτινοβολίας - μείωση στην απόδοση του πάνελ
Απώλεια ελαστικότητας της EVA	UV ακτινοβολία - υγρασία - θερμοκρασία	Υψηλή ανάκλαση ακτινοβολίας - μείωση στην απόδοση του πάνελ
Αποκόλληση της EVA	UV ακτινοβολία - υγρασία - θερμοκρασία	Εισχώρηση υγρασίας - μείωση στην απόδοση του πάνελ
Σφάλμα στις συγκολλήσεις	Θερμικές φορτίσεις	Αύξηση της αντίστασης σειράς - κίνδυνος δημιουργίας hot spot
Ραγισμένα στοιχεία	Μηχανική φόρτιση	Απώλεια επιφάνειας των στοιχείων - μείωση στην απόδοση του πάνελ
Hot spots στα στοιχεία	Σκίαση	Τοπικές μεγάλες φθορές σε όλα τα μέρη του πάνελ λόγω υψηλών θερμοκρασιών - μείωση στην απόδοση του πάνελ
Ραγισμένες διασυνδέσεις	Θερμικές φορτίσεις	Αύξηση της αντίστασης σειράς - κίνδυνος δημιουργίας hot spot
Διάβρωση μεταλλικών στοιχείων	Υγρασία	Αλλαγές στην παράλληλη αντίσταση και την αντίσταση σειράς - μείωση στην απόδοση του πάνελ
Σφάλμα στο κουτί διακλάδωσης	Περιβαλλοντικές συνθήκες	Κίνδυνος δημιουργίας ηλεκτρικού τόξου - κίνδυνος δημιουργίας hot spot

Βιβλιογραφία

- [1] Pahrami, B., (1997), 'Defect, Fault, Error, ... , or Failure?', *IEEE transactions on reliability*, vol. 46, no. 4, pp. 450-451
- [2] Pankow, J.W. & Glick, S.H., (2006), *Plasma surface modification of polymer backsheets: origins of future interfacial barrier/backsheets failure*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA
- [3] A. Luque and S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", Wiley-Interscience, Chichester, United Kingdom, 2003.
- [4] D.L. King, M.A. Quintana, J.A. Kratochvil, D.E. Ellibee and B.R. Hansen, "Photovoltaic Module Performance and Durability Following Long-Term Field Exposure", Sandia National Laboratories, Albuquerque, U.S.A., 2000.
- [5] K. Masuda, "Results of Field Tests in Japan", Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories (JET), 2011
- [6] Cosentino, S.R., Levy, S.B. & Tucker, R.T., (2002), *Backside solutions*, Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE
- [7] N.G. Dhere, "Reliability of PV modules and balance-of-system components", Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral (Florida), USA, 2005.
- [8] E.D. Dunlop, "Lifetime performance of crystalline silicon PV modules", European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Renewable Energies Unit, Italy, 2003.
- [9] G.D. Barber, G.J. Jorgensen, K. Terwilliger, S.H. Glick, J. Pern and T.J. McMahon, "New Barrier Coating Materials for PV Module Backsheets", National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, 2002.
- [10] Z. Xia, J.H. Wohlgemuth and D.W. Cunningham, "A lifetime prediction of PV encapsulant and backsheets via time temperature superposition principle", BP Solar International Inc., Frederic, Maryland, USA, 2009.
- [11] J. Wohlgemuth, "Module Component of PV Tutorial", National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, 2010.
- [12] Wohlgemuth, J., Cunningham, D.W., Nguyen, A., Kelly, G. & Amin, D., (2010), *Failure Modes of Crystalline Si Modules*, BP Solar International Inc., Frederic, Maryland, USA
- [13] Pern, F.J., (1993), 'Luminescence and absorption characterization of ethylene-vinyl acetate encapsulant for PV modules before and after weathering degradation', *Polymer Degradation and Stability*, vol. 41, pp. 125-139
- [14] Pern, F.J. & Czanderna, A.W., (1992), 'Characterization of ethylene vinyl acetate (EVA) encapsulant: Effects of thermal processing and weathering degradation on its discoloration', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 25, pp. 3-23

- [15] Pern, F.J., (1997), 'Ethylene-vinyl acetate (EVA) encapsulants for photovoltaic modules: degradation and discoloration mechanisms and formulation modifications for improved photostability', *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, vol. 252, pp. 195-216
- [16] Realini, A., (2003), *MTBF – PVM Mean Time Before Failure of Photovoltaic modules*, Federal Office for Education and Science
- [17] Meyer, E.L. & van Dyk, E., (2004), 'Assessing the Reliability and Degradation of Photovoltaic Module Performance Parameters', *IEEE transactions on reliability*, vol. 53, no. 1, pp. 83-92
- [18] Chamel, J.B., van Dyk, E.E. & Gxasheka, A.R., (2005), 'Investigation of delamination in an edge-defined film-fed growth photovoltaic module', *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 88, pp. 403-411
- [19] Munoz, J., Lorenzo, E., Martinez-Moreno, F., Marroyo, L. & Garcia, M., (2008), 'An Investigation into Hot-Spots in Two Large Grid-Connected PV Plants', *Progress in photovoltaics: research and applications*, vol. 16, pp. 693-701
- [20] J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Passive and Active Thermographic Assessment as a Tool for Condition-Based Performance Monitoring of Photovoltaic Modules", *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 133, 2011
- [21] J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "An Infrared Thermographic Approach as a Hot Spot Detection Tool for Photovoltaic Modules Using Image Histogram and Line Profile Analysis", *International Journal of Condition Monitoring*, 2(1), 2012.
- [22] M. Simon and E.L. Meyer, "Detection and Analysis of Hot-spot Formation in Solar Cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94, 2010
- [23] Designation ASTM E2481-08, "Standard Test Method for Hot Spot Protection Testing of Photovoltaic Modules", ICS Number Code 27.160 (Solar energy engineering), DOI: 10.1520/E2481-08.
- [24] U. Hoyer, A. Burkert, R. Auer and C. Buerhop-Lutz, "Analysis of PV Modules by Electroluminescence and IR Thermography", *Proceedings of The 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC)*, Hamburg, Germany, 2009.
- [25] J. Wohlgemuth and W. Herrmann, "Hot Spot Tests for Crystalline Silicon Modules", *Proceedings of The 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Orlando, U.S.A., 2005.
- [26] S.R. Cosentino, S.B. Levy and R.T Tucker, "Backside solutions", *Photovoltaic Specialists Conference - Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE*, New York, U.S.A., 2002.
- [27] G. Acciani, O. Falcone and S. Vergura, "Typical defects of PV-cells", *Proceedings of The IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Bari, Italy, 2010.
- [28] M. Kontges, I. Kunze, S. Kajari-Schroder, X. Breitenmoser and B. Bjornekleit, "Origin and Consequences of (Micro)-Cracks in Crystalline Silicon Solra modules", *National Renewable Energy Laboratory*, Colorado, USA, 2011.

- [29] G. Mathiak, J. Althaus, S. Menzler, L. Lichtschlager and W. Herrmann, "PV module corrosion by ammonia and salt mist experimental study with full-size modules", TÜV Rheinland, 2012
- [30] V. Saly, M. Ruzinsky, J. Packa and P. Redi, "Examination of Solar Cells and Encapsulations of Small Experimental Photovoltaic Modules", Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics - POLYTRONIC 2nd International IEEE Conference, Zalaegerszeg, Hungary, 2002.
- [31] Ι.Α. Τσανάκας, "Προηγμένες Τεχνολογίες Διάγνωσης-Πρόγνωσης Βλαβών σε Μηχανολογικές Κατασκευές με χρήση εποπτικών μεθόδων : Περίπτωση Υπέρυθρης Θερμογραφίας, Διδακτορική Διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Τομέας Υλικών Διεργασιών & Μηχανολογίας, Ξάνθη 2013.
- [32] Κ. Μουσταφέας, "Μελέτη και Ανάλυση λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Πλαισίων : Σφάλματα σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας", Διπλωματική εργασία, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Τομέας Υλικών Διεργασιών & Μηχανολογίας, Ξάνθη 2012

Κεφάλαιο 2

Τεχνικές επιταχυνόμενης γήρανσης

2.1 Εισαγωγή.....	40
2.2 Υπάρχουσα Κατάσταση	42
2.3 Τεχνητή Επιταχυνόμενη Γήρανση.....	43
2.3.1 Το πρότυπο IEC 61215.....	45
2.4 Σύνοψη.....	52

2.1 Εισαγωγή

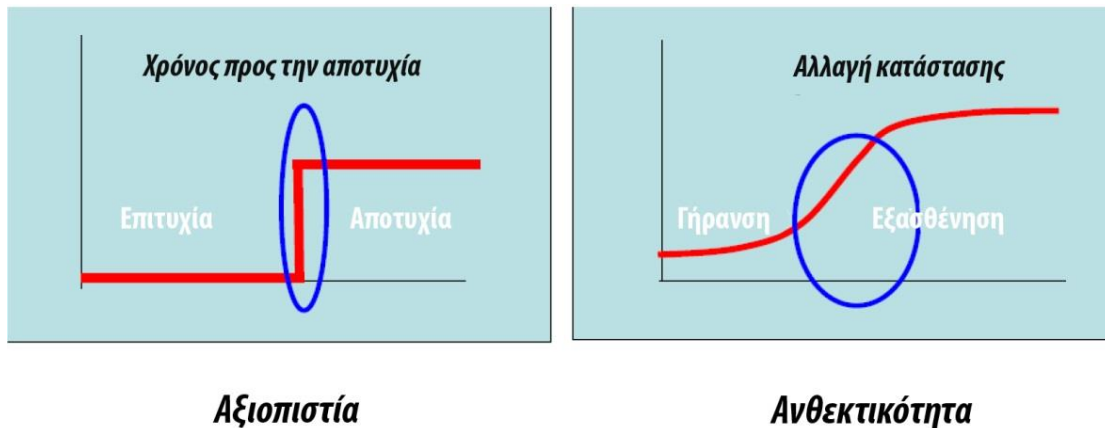
Η μελέτη των βλαβών στα φωτοβολταϊκά οδήγησε στην ανάπτυξη προτύπων που στοχεύουν στην πρόγνωση της εξέλιξης των βλαβών στη διάρκεια των Φ/Β και της επίδραση τους στην αξιοπιστία και στην απόδοση τους. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν θέματα αξιοπιστίας και πιστοποίησης των βλαβών των Φ/Β και θα διασαφηνιστεί ο ρόλος των δοκιμών τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης.

Με τον όρο αξιοπιστία ορίζεται το μέγεθος των απροσδόκητων διακοπών κατά τη χρήση ενός μηχανήματος ή συστήματος που συνήθως προκύπτουν από απροσδόκητες αποτυχίες ενώ με τον όρο πιστοποίηση εννοείται η διαδικασία της επιβεβαίωσης και του καθορισμού του αντικειμένου του αυθεντικού [1]. Η αξιοπιστία αντιπροσωπεύει τις διακοπές στη χρήση του μηχανήματος και αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την πλήρη αξιοποίηση ενός πλαισίου.

Η αξιοπιστία και η πιστοποίηση εκτιμώνται μέσω διαφόρων δοκιμών κατά τη διάρκεια των οποίων στόχος είναι η μεγιστοποίηση των ευκαιριών για την παρατήρηση απροσδόκητων αποτυχιών που πρέπει να επιλυθούν. Όσο λιγότερες είναι οι ευκαιρίες για τη παρατήρηση των απροσδόκητων αποτυχιών, τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα υπάρχει για τη μη μέτρηση της αξιοπιστίας του μηχανήματος στην εκάστοτε δοκιμή. Κατά συνέπεια είναι λεπτό το όριο ανάμεσα στη δοκιμή αξιοπιστίας και στη δοκιμή πιστοποίησης. Γενικά η δοκιμή πιστοποίησης είναι υποσύνολο της δοκιμής αξιοπιστίας αλλά είναι αδύνατη η εκτίμηση της αξιοπιστίας από την δοκιμή πιστοποίησης.

Η βασική παραδοχή είναι ότι όλες οι βλάβες προκαλούνται από ηλεκτρικές, θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις και πως δεν υπάρχουν βλάβες πριν από το τέλος αυτής της χρονικής διάρκειας λειτουργίας που προαναφέρθηκε, ορίζοντας έτσι και την ωφέλιμη ζωή του προϊόντος. Μια δοκιμή αξιοπιστίας εξαρτάται από το χρόνο. Ένας αριθμός από τις μονάδες προϊόντων υπόκειται σε αυτή τη δοκιμή για ένα χρονικό διάστημα και στο τέλος συλλέγονται τα δεδομένα, χρόνος και βλάβες. Ο μέσος χρόνος μεταξύ αποτυχιών (*mean time between failures, MTBF*) καθορίζεται από τον αριθμό των ωρών και των βλαβών στην περίοδο λειτουργίας. Αυτές οι δοκιμές δεν σταματάνε όταν το προϊόν αποτύχει αλλά συνεχίζονται για τον προκαθορισμένο χρόνο. Η αξιοπιστία λοιπόν ορίζεται ως το μέτρο των απρόβλεπτων διακοπών κατά τη διάρκεια της προβλεπόμενης χρήσης του προϊόντος.

Γενικεύοντας, η αξιοπιστία ασχολείται με τη μέτρηση διακριτών, απόλυτων αποτυχιών, ενώ η πιστοποίηση ασχολείται με τη διαδρομή προς αυτές τις αποτυχίες και το χρόνο που θα επιφέρει μη αποδεκτές αλλαγές στη λειτουργία του προϊόντος [2].



Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση αξιοπιστίας και πιστοποίηση [2]

Κατά την μοντελοποίηση της αξιοπιστίας χρησιμοποιείται ο μέσος χρόνος μεταξύ των αστοχιών ως τυχαία μεταβλητή. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και η συνάρτηση ρυθμού αποτυχιών η οποία δείχνει την σχέση μεταξύ της ηλικίας του συστήματος και της συχνότητας αποτυχίας του, ή αλλιώς παρουσιάζει την πιθανότητα αποτυχίας στο χρόνο δεδομένου ότι το σύστημα δεν είχε αποτύχει πριν το . Ο χρόνος μοντελοποιείται σαν καταμετρημένη τυχαία μεταβλητή και η συνάρτηση ρυθμού αποτυχιών ορίζεται από τη σχέση (2.1) [3]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.1)$$

όπου η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ορίζεται ως:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.2)$$

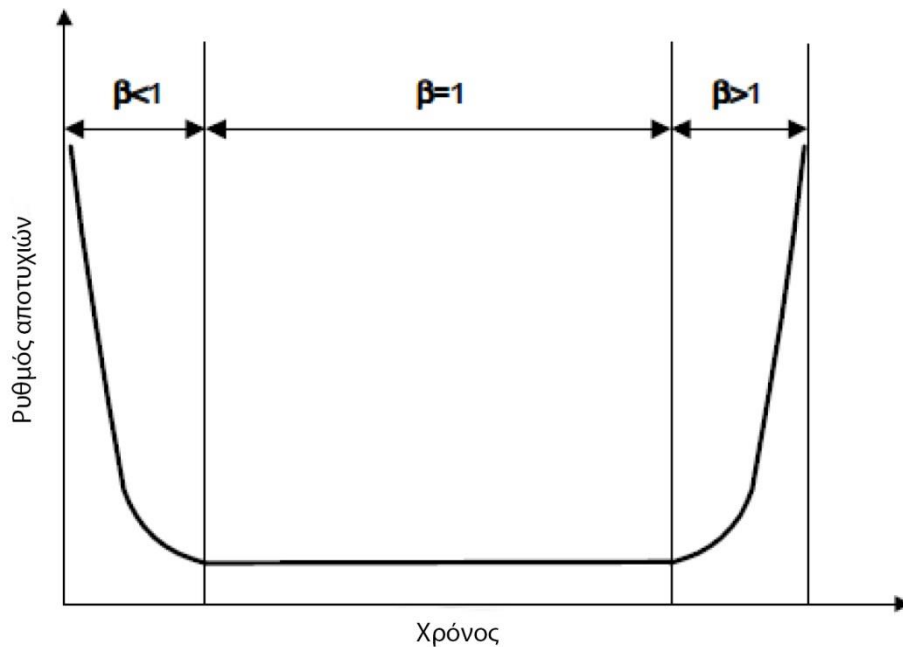
και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής ορίζεται ως (2.3):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.3)$$

Το η είναι μια παράμετρος ευθέως ανάλογη με το δείκτη MTBF ενώ η παράμετρος β παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη φύση της κατάστασης αποτυχιών που βρίσκεται το σύστημα. Αν το β είναι μικρότερο του 1 τότε το σύστημα βρίσκεται στην “βρεφική περίοδο

θνησιμότητας” όπου οι αποτυχίες αρχικά είναι συχνότερες και γίνεται πιο αξιόπιστο με την πάροδο του χρόνου. Αν το β ισούται με το 1 τότε οι όποιες αποτυχίες συμβαίνουν εντελώς τυχαία και λέγεται πως βρίσκεται το σύστημα στη χρήσιμη περίοδο λειτουργίας του. Τέλος αν το β είναι μεγαλύτερο του 1 τότε το σύστημα βρίσκεται στο τέλος της χρήσιμης περιόδου λειτουργίας του και όσο περνάει ο καιρός αυξάνεται ο ρυθμός των αποτυχιών.

Όλα τα παραπάνω μπορούν να οπτικοποιηθούν με τη χρήση της καμπύλης “μπανιέρα” στην οποία φαίνεται ξεκάθαρα η “βρεφική περίοδος θνησιμότητας”, όπου μειώνονται οι αποτυχίες με την πάροδο του χρόνου, ακολουθούμενη από τη “χρήσιμη περίοδο λειτουργίας”, όπου ο ρυθμός των αποτυχιών είναι μικρός και σταθερός και οδηγεί στο τέλος αυτής της περιόδου όπου με την πάροδο του χρόνου αυξάνεται ο ρυθμός των αποτυχιών [3].



Σχήμα 2.2 Η καμπύλη “μπανιέρα” για την αξιοπιστία ενός συστήματος [3]

2.2 Υπάρχουσα κατάσταση

Η ανάπτυξη της έρευνας και της τεχνολογίας των Φ/Β εξαρτάται από τη μακροπρόθεσμη αξιοπιστία και την απόδοση του Φ/Β στη διάρκεια ζωής του [3]. Με βάση αυτό κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για μηδενικά ελαττώματα στην κατασκευή και τον προσδιορισμό των μηχανισμών υποβάθμισης της απόδοσης των Φ/Β [4]. Για την αξιοπιστία του συνόλου των Φ/Β πλαισίων χρησιμοποιούνται διεθνή πρότυπα και συγκεκριμένα τα πρότυπα IEC 61215 [10-11] και IEC 61646 [10-12], τα οποία προσδιορίζουν το σχεδιασμό, τα υλικά κατασκευής και τα ελαττώματα τα οποία είναι

πιθανότερα να οδηγήσουν σε περιπτώσεις πρώιμων απωλειών. Επιπλέον, η υπερηχογραφία, η ενεργητική θερμογραφία και οι απεικονίσεις ηλεκτροφωταύγειας χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των ελαττωματικών κυψελών και της απόρριψής τους. Παρόλα αυτά οι συγκεκριμένες διαδικασίες πιστοποίησης και ελέγχου, δεν είναι σχεδιασμένες να “παρακολουθούν” τους μηχανισμούς βλαβών και αστοχιών που απαντώνται σε πραγματικές συνθήκες πεδίου και οι οποίοι ενδέχεται να περιορίσουν την διάρκεια ζωής του Φ/Β πλαισίου. Η καλύτερη δυνατή κατανόηση και πρόγνωση αυτών των μηχανισμών, έχει ξεχωριστή σημασία, καθώς – υπό διαφορετικές οπτικές γωνίες – μπορεί να προσφέρει:

- Βέλτιστες και ρεαλιστικές χρονικές περιόδους εγγύησης, επαρκείς δοκιμές αξιοπιστίας και βελτιωμένο σχεδιασμό πλαισίων, για τους μελλοντικούς κατασκευαστές.
- Ακριβέστερες εκτιμήσεις της διάρκειας ζωής των Φ/Β πλαισίων και, επομένως, ακριβέστερα μοντέλα ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής, για τους μελλοντικούς επενδυτές.
- Καταλληλότερο σχεδιασμό στρατηγικών συντήρησης, για τους μελλοντικούς διαχειριστές εκτεταμένων Φ/Β συστημάτων και πάρκων.
- Περιορισμό του κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το Φ/Β σύστημα, με ταυτόχρονη αύξηση της αξιοπιστίας του.

2.3 Τεχνητή επιταχυνόμενη γήρανση

Η μελέτη των μηχανισμών εξέλιξης των διαφόρων τύπων βλαβών Φ/Β πλαισίων βασίζεται κυρίως στην αναπαραγωγή, προσομοίωση και ποσοτικοποίηση τους, με την εφαρμογή συγκεκριμένων δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης (accelerated ageing testing, AAT) [7]. Οι εφαρμοζόμενες AAT αποτελούνται από καλά ορισμένες καταπονήσεις που βασίζονται σε διεθνή πρότυπα πιστοποίησης και κυρίως στα ASTM E1171, IEC 61215 και IEC 61646. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών προκύπτουν βάσει κριτηρίων “αποτυχίας/επιτυχίας” (pass/fail), όταν αποτιμάται η αξιοπιστία ενός Φ/Β πλαισίου. Ωστόσο, στα πλαίσια μελέτης των μηχανισμών εξέλιξης βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, τα αποτελέσματα των AAT, μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη προσεγγιστικών προγνωστικών μοντέλων.

Πίνακας 2.1 Δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης για την μελέτη βλαβών Φ/Β πλαισίων [8]

Επιταχυνόμενη καταπόνηση	Σφάλμα
Θερμικός κύκλος (thermal cycling)	Ραγισμένη διασύνδεση
	Ραγισμένη κυψέλη
	Σφάλμα σε συγκόλληση
	Αποκόλληση της μεμβράνης ενθυλάκωσης
	Ανοιχτοκύκλωμα στη σύνδεση του πάνελ
	Ανοιχτοκύκλωμα που οδηγεί σε ηλεκτρικό τόξο
Έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία με υγρασία (damp heat)	Διάβρωση
	Αποκόλληση της μεμβράνης ενθυλάκωσης
	Απώλεια ελαστικότητας της μεμβράνης ενθυλάκωσης
	Αποκόλληση του κουτιού διακλάδωσης
	Ηλεκτροχημική διάβρωση γυαλιού
Κύκλος ψύξης με υγρασία (humidity/freeze)	Αποκόλληση της μεμβράνης ενθυλάκωσης
	Αποκόλληση του κουτιού διακλάδωσης
Έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV test)	Αποκόλληση της μεμβράνης ενθυλάκωσης
	Απώλεια ελαστικότητας της μεμβράνης ενθυλάκωσης
	Αποχρωματισμός της μεμβράνης ενθυλάκωσης
	Προβλήματα γείωσης λόγω σφαλμάτων στο υπόστρωμα
	Αλλοίωση των οπτικών κατόπτρων
Στατική μηχανική καταπόνηση	Ραγισμένη διασύνδεση
	Ραγισμένη κυψέλη
	Σφάλμα σε συγκόλληση
	Ραγισμένο γυαλί
	Σφάλμα στο πλαίσιο αλουμινίου
Δυναμική μηχανική καταπόνηση	Ραγισμένο γυαλί
	Ραγισμένη διασύνδεση
	Ραγισμένη κυψέλη
	Σφάλμα σε συγκόλληση
Δοκιμή θερμών κηλίδων	Θερμές κηλίδες
	Ανεπαρκής προστασία από δίοδο διαφυγής
Δοκιμή χαλαζόπτωσης	Ραγισμένη κυψέλη
	Ραγισμένο γυαλί
	Ραγισμένα οπτικά κάτοπτρα
Θερμική δοκιμή διόδου διαφυγής	Σφάλμα στη δίοδο διαφυγής
	Η υπερθέρμανση της διόδου διαφυγής προκαλεί αλλοιώσεις στην μεμβράνη ενθυλάκωσης, στο υπόστρωμα ή στο κουτί διακλάδωσης
Ψεκασμός με αλάτι	Διάβρωση λόγω θαλασσινού νερού ή υγρασίας
	Διάβρωση λόγω του άλατος που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση χιονιού και πάγου

Οι κυριότερες AAT που αναπτύχθηκαν και εφαρμόζονται στην δοκιμή και μελέτη βλαβών κρυσταλλικού πυριτίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1 [8]. Οι δοκιμές αυτές αποτελούν και την βάση του προτύπου IEC 61215, που χρησιμοποιείται πλέον ευρύτατα από την πλειοψηφία των σύγχρονων κατασκευαστών και το οποίο μελετήθηκε εκτενώς, στα πλαίσια υλοποίησης της παρούσας μελέτης.

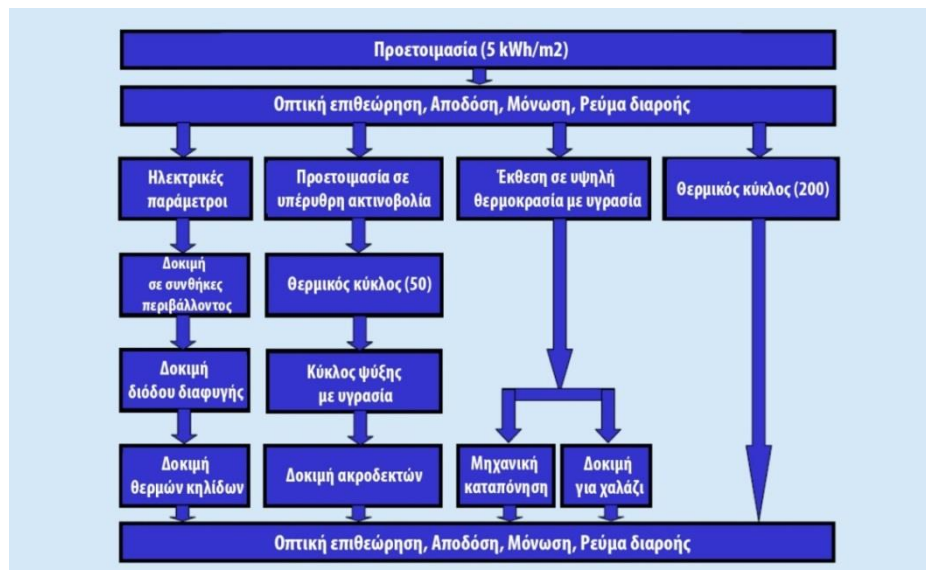
2.3.1 Το πρότυπο IEC 61215

Οι δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης που περιλαμβάνονται στο πρότυπο IEC 61215, ακολουθούν τις ακόλουθες διαδικασίες [10-11]:

Αρχικά προετοιμάζεται το Φ/Β πλαίσιο σε ακτινοβολία $5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. Στη συνέχεια ελέγχονται οι ηλεκτρικές παράμετροι του πλαισίου και εκτίθενται σε συνθήκες περιβάλλοντος και ελέγχονται οι ηλεκτρικές παράμετροι του πλαισίου και πραγματοποιείται η έκθεση τους σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η θερμική δοκιμή της διόδου διαφυγής γίνεται για 1 ώρα σε θερμοκρασία $+75^\circ \text{C}$ στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του πλαισίου και για 1 επιπλέον ώρα σε θερμοκρασία $+75^\circ \text{C}$ στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του πλαισίου επαυξημένο κατά $+25\%$ ($1,25 \times I_{sc}$).

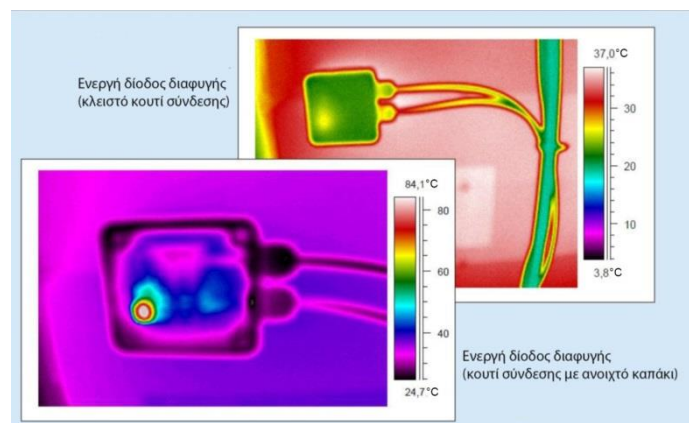
Στη συνέχεια γίνεται δοκιμή θερμών κηλίδων όπου οι 3 κυψέλες με τη χαμηλότερη αντίσταση για 1 ώρα σε ηλιακή ακτινοβολία έντασης $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ και οι 5 κυψέλες με την υψηλότερη R_{sh} εκτίθενται για 5 ώρες σε ηλιακή ακτινοβολία έντασης $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Στη συνέχεια προετοιμάζεται το πλαίσιο σε υπεριώδη ακτινοβολία $15 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, εφαρμογή 50 θερμικών κύκλων από -40°C έως $+85^\circ \text{C}$ και 10 κύκλων ψύξης από $+85^\circ \text{C}$ έως -40°C , με 85% σχετική υγρασία, ακολουθούμενη από δοκιμή των ακροδεκτών του πλαισίου. Η έκθεση σε σταθερές τιμές υψηλής θερμοκρασίας $+85^\circ \text{C}$ και υψηλής σχετικής υγρασίας 85% για χρονικό διάστημα 1000 ωρών και δοκιμάζεται η αντοχή σε 3 κύκλους μηχανικής καταπόνησης, όπου ασκείται κατανεμημένο φορτίο (τάση) 2400 Pa , τόσο στο εμπρόσθιο όσο και οπίσθιο τμήμα του πλαισίου, για χρονικό διάστημα 1 ώρας. Επίσης προβλέπεται και δοκιμή αντοχής σε χαλαζόπτωση, η οποία πραγματοποιείται με την πρόσπτωση σφαιριδίων πάγου, διαμέτρου 25 mm και ταχύτητας 23 m/s , σε 11 διαφορετικά σημεία του πλαισίου. εφαρμόζονται 200 θερμικοί κύκλοι από -40°C έως $+85^\circ \text{C}$ και δοκιμάζεται το ρεύμα διαρροής, στην τάση λειτουργίας του συστήματος.



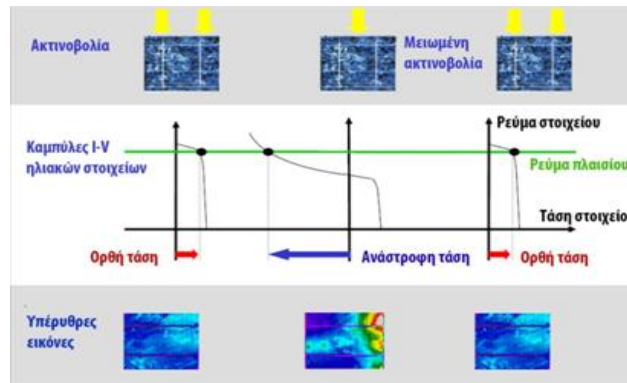
Σχήμα 2.3 Δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης κατά το πρότυπο IEC 61215 [9]

Η υπέρυθρη θερμογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων μιας θερμικής δοκιμής της διόδου διαφυγής. Αν το κουτί διακλάδωσης δεν έχει σωστή μόνωση θα υπάρχει αυξημένη θερμοκρασία στη δίοδο πιθανώς λόγω διάβρωσης ως επακόλουθο της εισχώρησης υγρασίας στο κουτί.



Σχήμα 2.4 Θερμική δοκιμή διόδου διαφυγής [9]

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται μια δοκιμή θερμών κηλίδων, στην οποία η κυψέλη που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία μειωμένης έντασης, εμφανίζει θερμή κηλίδα.



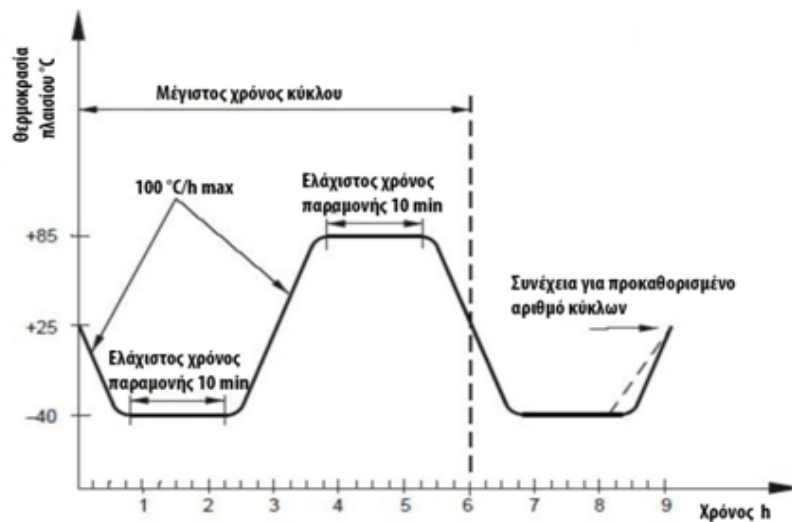
Σχήμα 2.5 Δοκιμή θερμών κηλίδων [9]

Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται ειδικός θερμοθάλαμος δοκιμών στον οποίο τοποθετείται κάθε πλαίσιο, ώστε να υποβληθεί στις απαραίτητες κλιματικές δοκιμές (θερμικοί κύκλοι, κύκλοι ψύξης, υγρασία).



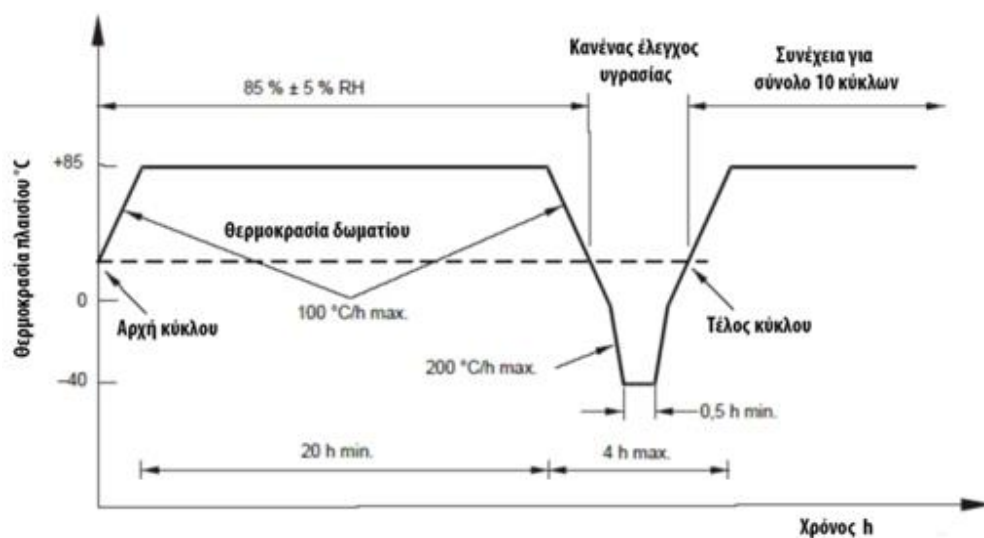
Σχήμα 2.6 Ένας τυπικός θερμοθάλαμος κλιματικών δοκιμών [9]

Από την καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, για τον θερμικό κύκλο στον οποίο υποβάλλεται κάθε πλαίσιο φαίνεται ότι κάθε θερμικός κύκλος εκκινεί με το πλαίσιο να βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 °C). Στη συνέχεια, το πλαίσιο ψύχεται σταδιακά μέχρι την θερμοκρασία των -40 °C, στην οποία παραμένει το λιγότερο για 10 λεπτά και το πλαίσιο θερμαίνεται σταδιακά μέχρι την θερμοκρασία των +85 °C, στην οποία, και πάλι, παραμένει το λιγότερο για 10 λεπτά. Το πλαίσιο επαναψύχεται σταδιακά στους -40 °C και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα προκαθορισμένο αριθμό κύκλων. Σημειώνεται δε ότι οι μεταβολές στη θερμοκρασία του πλαισίου γίνονται με μέγιστο ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας, της τάξεως των 100 °C/ώρα.

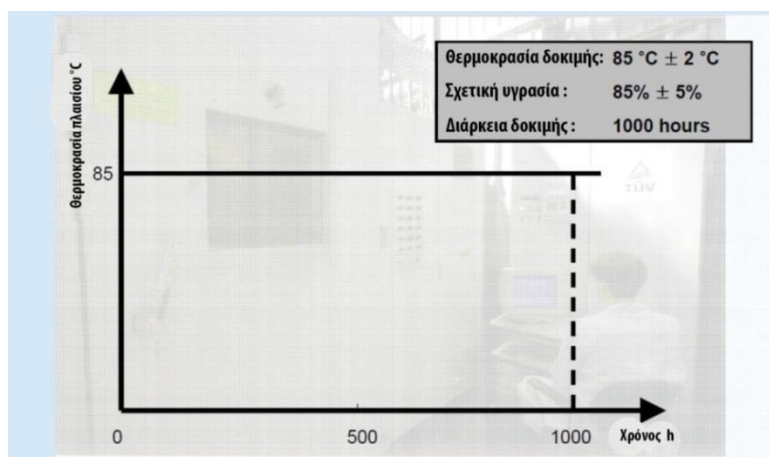


■
Σχήμα 2.7 Ο θερμικός κύκλος [9]

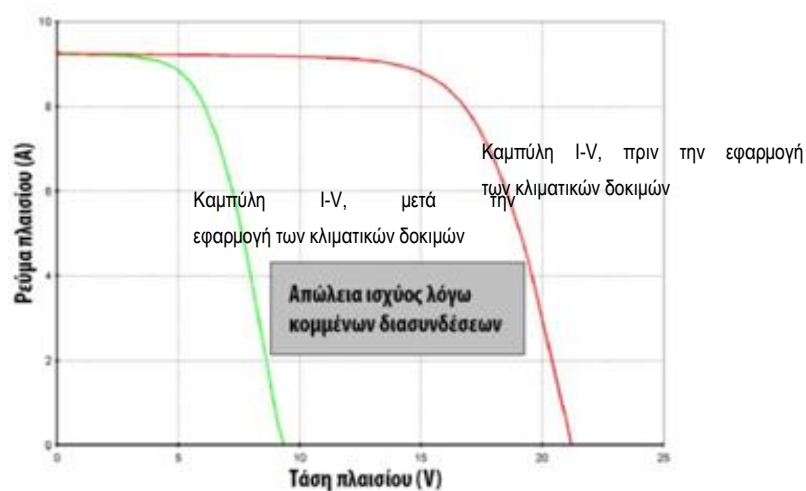
Όσον αφορά στην καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσεως του χρόνου για τον κύκλο ψύξης κάθε πλαισίου, κάθε θερμικός κύκλος ξεκινάει με το πλαίσιο να θερμαίνεται μέχρι την θερμοκρασία των 85 °C, σε περιβάλλον με ελεγχόμενη σχετική υγρασία 85%, και παραμένει εκεί το λιγότερο για 20 ώρες. Ακολουθεί η ψύξη του πλαισίου σταδιακά μέχρι τους 0° C με μέγιστο ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας τους 100 °C/ώρα. Στη συνέχεια το πλαίσιο ψύχεται σταδιακά μέχρι την θερμοκρασία των -40 °C, με ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας, 200 °C/ώρα, όπου και παραμένει το λιγότερο για 30'. Από τη στιγμή που η θερμοκρασία του κύκλου μειωθεί από το επίπεδο της θερμοκρασίας δωματίου, δεν υπάρχει έλεγχος στην παρεχόμενη υγρασία του θαλάμου. Τέλος, το πλαίσιο θερμαίνεται μέχρι την θερμοκρασία των 0 °C και μέχρι την θερμοκρασία των +85 °C, με μέγιστους ρυθμούς μεταβολής της θερμοκρασίας της τάξεως των 200 °C/ώρα και των 100 °C/ώρα αντίστοιχα. Μόλις η αυξανόμενη θερμοκρασία "διέλθει" από το επίπεδο της αρχικής θερμοκρασίας δωματίου, ολοκληρώνεται ένας κύκλος ψύξης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για προκαθορισμένο αριθμό κύκλων. Ο μέγιστος χρόνος που επιτρέπεται να παραμείνει το πλαίσιο κάτω από τη θερμοκρασία δωματίου είναι 4 ώρες.



Σχήμα 2.8 Ο κύκλος ψύξης με υγρασία [9]

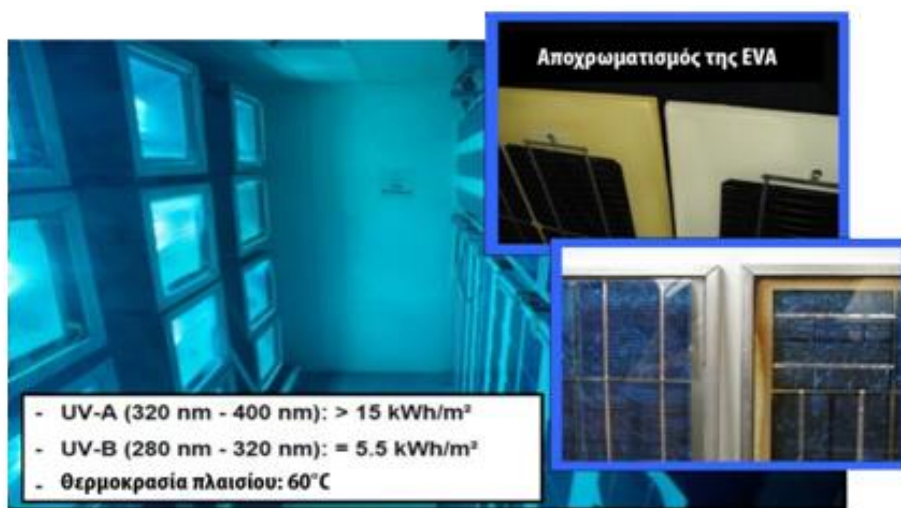


Σχήμα 2.9 Δοκιμή έκθεσης σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας [9]



Σχήμα 2.10 Μετρούμενη απώλεια ισχύος σε Φ/Β πλαίσιο, λόγω κομμένων διασυνδέσεων κυψελών μετά την εφαρμογή κλιματικών δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης [9]

Η διαδικασία προετοιμασίας των Φ/Β πλαισίων σε υπεριώδη ακτινοβολία όπως επίσης και ο αποχρωματισμός της EVA φαίνεται στο Σχήμα 2.11 ενώ, στο Σχήμα 2.12 απεικονίζεται η διάταξη μηχανικής καταπόνησης στην οποία υποβάλλεται κάθε Φ/Β πλαίσιο. Όπως προαναφέρθηκε, η συγκεκριμένη δοκιμή περιλαμβάνει τρεις κύκλους, κατά τους οποίους ασκείται κατανεμημένη τάση 2400 Pa για χρονικό διάστημα 1 ώρας.

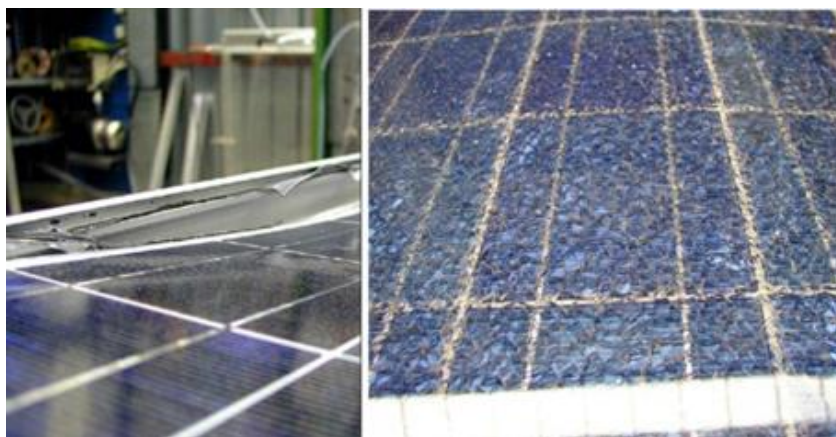


Σχήμα 2.11 Προετοιμασία (preconditioning) έκθεσης Φ/Β πλαισίου σε υπεριώδη ακτινοβολία UV-A και UV-B [9]



Σχήμα 2.12 Διάταξη και διαδικασία δοκιμής μηχανικής καταπόνησης [9]

Στο Σχήμα 2.13 απεικονίζεται η θραύση του υπερστρώματος του γυαλιού, στο εμπρόσθιο τμήμα πλαισίου, το οποίο “απέτυχε” στην δοκιμή μηχανικής καταπόνησης.



Σχήμα 2.13 Αποτυχία πλαισίου, λόγω θραύσης του υπερστρώματος του γυαλιού, κατά τη δοκιμή μηχανικής καταπόνησης [9]

Το πρότυπο IEC 61215, θέτει τα ακόλουθα συγκεκριμένα κριτήρια έγκρισης και πιστοποίησης ενός Φ/Β πλαισίου [11] :

- Το ποσοστό μείωσης της ισχύος εξόδου του Φ/Β πλαισίου μπορεί να είναι έως 8%, μετά το τέλος όλων των δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης.
- Δεν πρέπει να υπάρχει κανένα ανοιχτό κύκλωμα στο Φ/Β πλαίσιο, κατά τη διάρκεια των δοκιμών.
- Δεν πρέπει να παρατηρείται καμιά ορατή βλάβη στο πλαίσιο (λ.χ. αποχρωματισμός στρώματος EVA, ή θραύση).
- Δεν πρέπει να παρατηρείται αλλοίωση στις προδιαγραφές μόνωσης του πλαισίου.
- Τόσο στην αρχή, όσο και στο τέλος κάθε δοκιμής, θα πρέπει να ισχύουν οι προδιαγραφές που τέθηκαν για το ρεύμα διαρροής του πλαισίου.
- Θα πρέπει να πληρούνται οι απαιτήσεις κάθε δοκιμής.

Σε περίπτωση που τα AAT δεν χρησιμοποιούνται για την μελέτη των μηχανισμών φθοράς και βλαβών των Φ/Β πλαισίων, αλλά για την πιστοποίηση του προϊόντος, το πρότυπο IEC 61215 προβλέπει συγκεκριμένη διαδικασία η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια [9,11]:

Αν το δείγμα-πλαίσιο αποτύχει σε μία μεμονωμένη δοκιμή, τότε:

- Το δείγμα επιστρέφεται στον κατασκευαστή για μελέτη.
- Ο κατασκευαστής ενημερώνει τον οργανισμό πιστοποίησης με μια λεπτομερή αναφορά ανάλυσης της βλάβης και των λόγων εμφάνισής της.
- Έχοντας στην κατοχή του την αναφορά του κατασκευαστή, ο οργανισμός πιστοποίησης αποφασίζει ποιες δοκιμές θα πρέπει να επαναληφθούν σε καινούργιο δείγμα.
- Εάν το καινούργιο δείγμα ολοκληρώσει επιτυχώς τις επαναληπτικές δοκιμές στις οποίες θα υποβληθεί, τότε παρέχεται πιστοποίηση.

- Εάν το δείγμα αποτύχει ξανά στις δοκιμές που θα υποβληθεί, τότε ο μηχανολογικός σχεδιασμός του συγκεκριμένου πλαισίου απορρίπτεται.
- Στην περίπτωση που το δείγμα αποτύχει σε πολλαπλές δοκιμές, τότε απορρίπτεται απ' ευθείας.

2.4 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι τεχνικές επιταχυνόμενης γήρανσης που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι δοκιμές που μπορεί να πραγματοποιηθούν για την επιταχυνόμενη γήρανση των φωτοβολταϊκών πλαισίων βασίζονται σε διεθνή πρότυπα όπως το IEC 61215 που περιγράφεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

Βιβλιογραφία

- [1] Pahrani, B., (1997), 'Defect, Fault, Error, ... , or Failure?', *IEEE transactions on reliability*, vol. 46, no. 4, pp. 450-451
- [2] Scott, K.P., (2010), *Weather Durability of PV Modules; Developing a Common Language for Talking about PV Reliability*, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy
- [3] Pregelj, A., Begovic, M., Rohatgi, A. & Ristow, (2001), A., *Estimation of PV system reliability parameters*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA
- [4] King, D.L., Quintana, M.A., Kratochvil, J.A., Ellibee, D.E. & Hansen, B.R., (2000), *Photovoltaic Module Performance and Durability Following Long-Term Field Exposure*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico
- [5] Sander, M., Henke, B., Schweizer, S., Ebert, M. & Bagdahn, J., (2010), *PV module defect detection by combination of mechanical and electrical analysis methods*, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE
- [6] Gambogi, W.J., McCord, E.F., Rosenfeld, H.D., Senigo, R.H., Peacock, S. & Stika, K.M., *Failure analysis methods applied to PV module reliability*, E.I. DuPont de Nemours & Co., Inc., Wilmington, Delaware, U.S.
- [7] Crozier, J.L., van Dyk, E.E., Vorster, F.J., (2011), *Characterization of cell mismatch in a multi-crystalline silicon photovoltaic module*, Department of Physics, Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elizabeth, South Africa
- [8] Wohlgemuth, J., (2012), *IEC 61215: What it is and isn't*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA
- [9] TUV Rheinland, *Type approval qualification of Photovoltaic "Modules Procedures and test experiences"*, TUV Rheinland Korea Ltd.
- [10] Wohlgemuth, J.H. & Kurtz, S., (2011), *Reliability Testing Beyond Qualification as a Key Component in Photovoltaic's Progress Toward Grid Parity*, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA
- [11] IEC 61215, *Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*

Κεφάλαιο 3

Εξοπλισμός-πειραματική διάταξη

3.1 Εισαγωγή.....	55
3.2 Πειραματική υλοποίηση.....	55
3.2.1 Υλικό.....	55
3.2.2 Λογισμικό	66
3.3 Σύνοψη.....	73

3.1 Εισαγωγή

Έχει αποδειχθεί πως υπέρυθρη θερμογραφία στην διάγνωση βλαβών και, γενικά, της κατάστασης και της απόδοσης Φ/Β πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου αποτελεί μία ιδιαίτερα ελκυστική μέθοδο. Τα ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα των διαγνωστικών μελετών δίνουν τη δυνατότητα αξιολόγησης της θέσης, της έκτασης, καθώς και του θερμικού/ενεργειακού αντίκτυπου κάθε βλάβης στο Φ/Β πλαίσιο. Παρόλα αυτά ο διαγνωστικός έλεγχος είναι στιγμιαίου χαρακτήρα, παρέχει ελάχιστες πληροφορίες σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη μιας βλάβης και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται για βραχυπρόθεσμες αξιολογήσεις. Υπάρχει πάντα όμως η αναγκαιότητα για την κατανόηση του μηχανισμού διάδοσης κάθε βλάβης, της πρόγνωσης της πιθανής εξέλιξης της, της πρόβλεψης εμφάνισης νέων βλαβών και της ποιοτικής και ποσοτικής πρόβλεψης/ εκτίμησης της επίδρασης κάθε βλάβης στην θερμική συμπεριφορά και τελικά στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου.

Είναι κατανοητό ότι η εξέλιξη και η παρακολούθηση μιας βλάβης δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί για την τυπική διάρκεια ζωής του Φ/Β αφού αυτή είναι 20 ή 25 χρόνια. Για αυτό είναι επιθυμητή η εφαρμογή μια διαδικασίας τεχνητής γήρανσης που θα προβλέπει τις βλάβες κατά την επιταχυνόμενη γήρανση του Φ/Β.

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρία Φ/Β προκειμένου να εκτιμηθεί η εξέλιξη των βλαβών τους στη διαδικασία επιταχυνόμενης γήρανσης, η οποία εφαρμόστηκε με θερμικούς κύκλους σε ειδικό θερμοθάλαμο, ούτως ώστε να προσομοιωθεί προσεγγιστικά μέρος του πραγματικού χρόνου ζωής και η αντίστοιχη γήρανσή των πλαισίων σε συνθήκες πεδίου. Οι παράμετροι που αξιολογήθηκαν κατά την εφαρμογή της τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης, στην συγκεκριμένη μελέτη, ήταν η εξέλιξη του θερμικού αποτυπώματος των βλαβών, η μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης και η μορφολογία κάθε Φ/Β πλαισίου. Απώτερος, συνολικός σκοπός της μελέτης ήταν η εξαγωγή πιθανών προγνωστικών συμπερασμάτων ως προς την θερμική, ηλεκτρική και μορφολογική συμπεριφορά τόσο των “υγιών” όσο και των “προβληματικών” Φ/Β πλαισίων σε αντίστοιχη έκθεση τους σε πραγματικές κλιματικές συνθήκες πεδίου.

3.2 Πειραματική υλοποίηση

Κατά την πειραματική υλοποίηση της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε υλικό και λογισμικό τα χαρακτηριστικά των οποίων παρατίθενται στις υποενότητες που ακολουθούν.

3.2.1 Υλικό

Αντικείμενο εφαρμογής της προγνωστικής μελέτης επιταχυνόμενης γήρανσης αποτέλεσαν 3 Φ/Β πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου, τα οποία, για τις ανάγκες της μελέτης ορίστηκαν ως PV-1, PV-2 και PV-3. Το PV-1 είναι ένα Φ/Β πλαίσιο της εταιρίας Siemens™, τύπου SM6 (Παράρτημα), αποτελούμενο από 33 ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Σύμφωνα με τις κατασκευαστικές προδιαγραφές, σε STC, το πλαίσιο SM6 εμφανίζει μέγιστη ισχύ εξόδου $P_{\max} = 6 \text{ Wp}$ (για την οποία $I_{\max} = 0.39 \text{ A}$ και $V_{\max} = 15 \text{ V}$), ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{SC} = 0.42 \text{ A}$ και τάση ανοιχτού κυκλώματος

$V_{OC} = 19.5 \text{ V}$. Τα PV-2 και PV-3 είναι δύο όμοια Φ/Β πλαίσια της εταιρίας ETSolar™, τύπου ET-M53605 (Παράρτημα) το καθένα από τα οποία αποτελείται από 36 ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Κάθε Φ/Β πλαίσιο ET-M53605 χαρακτηρίζεται, σε STC, από μέγιστη ισχύ εξόδου $P_{\max} = 5 \text{ Wp}$ (για την οποία $I_{\max} = 0.285 \text{ A}$ και $V_{\max} = 17.82$), ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{SC} = 0.315 \text{ A}$ και τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{OC} = 21.96 \text{ V}$.

Σημειώνεται ότι, τα PV-2 και PV-3 αγοράστηκαν (καινούργια) τρεις εβδομάδες πριν την έναρξη της μελέτης, ενώ η ηλικία του πλαισίου PV-1 ήταν 10 έτη, χωρίς ωστόσο δεν έχει εκτεθεί ποτέ σε συνθήκες πεδίου. Σύμφωνα με την αρχική διαγνωστική θερμογράφηση των πλαισίων, στα PV-1 και PV-3 διαγνώστηκαν δύο και μία, αντίστοιχα, περιπτώσεις, ασυνήθιστα θερμών περιοχών (θερμών κηλίδων), ενώ το PV-2 παρουσίαζε φυσιολογική λειτουργία.



Σχήμα 3.1 Το Φ/Β τύπου Siemens™ SM6 (PV-1)



Σχήμα 3.2 Το Φ/Β πλαίσιο τύπου ET Solar™ ET-M53605 (PV-2, PV-3)

Κάθε ένα από τα Φ/Β πλαίσια υποβλήθηκε σε υπέρυθρη θερμογράφηση πεδίου πριν την έναρξη, στο μέσο και στο πέρας της διαδικασίας τεχνητής γήρανσης, ώστε να καταγραφούν τα αντίστοιχα θερμοκρασιακά προφίλ των πλαϊσίων και τυχόν διαφοροποιήσεις στα θερμικά αποτυπώματα των όποιων βλαβών σε αυτά. Στο σύνολό τους, οι υπέρυθρες θερμογραφήσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του φορητού θερμικού αναλυτή (θερμοκάμερας) Mikron™/Impac™, μοντέλο IVN 780-P. Το οποίο φέρει έναν μικροβολομετρικό ανιχνευτή μη ψυχόμενης 320×240 συστοιχίας εστιακού επιπέδου (uncooled focal plane array, UFPA). Το εύρος μετρούμενων θερμοκρασιών του συγκεκριμένου μοντέλου εκτείνεται από -40 έως +1000 °C, με θερμοκρασιακή ανάλυση της τάξεως των 0.1 °C, ανάλυση θερμικής εικόνας 320×240 εικονοστοιχείων, IFOV στα 1.5 mrad (σε οπτικό πεδίο 27°×20°) και φασματικό εύρος υπέρυθρης ακτινοβολίας από 8 έως 14 μm.



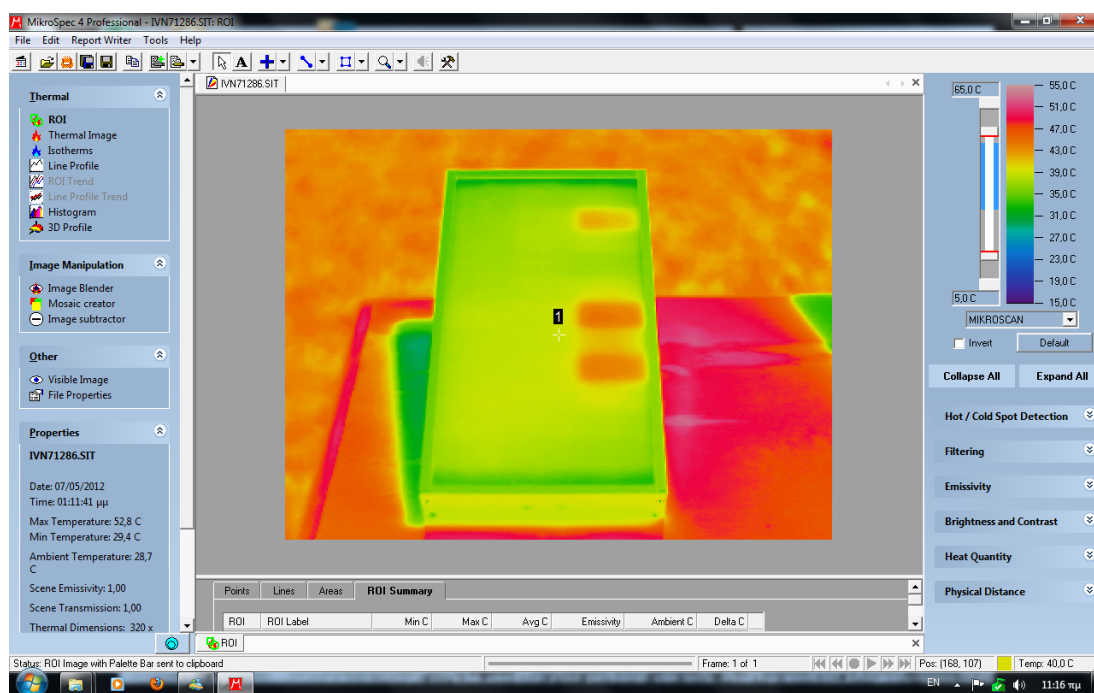
Σχήμα 3.3 Ο φορητός θερμικός αναλυτής Mikron™/Impac™ IVN 780-P

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν από το IVN 780-P, επαληθεύτηκαν με συγκεκριμένες μετρήσεις υπέρυθρης θερμογραφίας με την χρήση μιας δεύτερης θερμοκάμερας, της εταιρίας FLIR™, μοντέλο B200 (Σχήμα 3.4). Το συγκεκριμένο μοντέλο φέρει έναν μικροβολομετρικό ανιχνευτή μη ψυχόμενης 200×150 συστοιχίας εστιακού επιπέδου (uncooled focal plane array, UFPA). Το εύρος μετρούμενων θερμοκρασιών του συγκεκριμένου μοντέλου εκτείνεται από -20 έως +120 °C, με θερμοκρασιακή ανάλυση της τάξεως των 0.08 °C, ανάλυση θερμικής εικόνας 200×150 εικονοστοιχείων, IFOV στα 2.18 mrad και φασματικό εύρος μετρούμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας από 7.5 έως 13 μm.



Σχήμα 3.4 Ο φορητός θερμικός αναλυτής FLIR™ B200

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται ένα θερμογράφημα του PV-1, κατά το μέσο της εκτέλεσης του πειράματος, όπου παρατηρούνται τρεις θερμές κηλίδες η μέτρηση του οποίου ελήφθησε με τον φορητό θερμικό αναλυτή IVN 780-P.



Σχήμα 3.5 Θερμογράφημα του PV-1 στο μέσο του πειράματος της τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης στο λογισμικό MikroSpec^R 4.0 PRO

Η ανάλυση των θερμικών εικόνων που ελήφθησαν από την θερμοκάμερα IVN 780-P, για την μελέτη κάθε θερμικού αποτυπώματος στην εξέλιξη της διαδικασίας τεχνητής γήρανσης, πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού MikroSpec[®] 4.0 PRO της εταιρίας Mikron™/Impac™. Κάθε ηλιακή κυψέλη και κάθε σειρά (string) ηλιακών κυψελών των Φ/Β πλαισίων θεωρήθηκαν ως πολυγωνικές και γραμμικές ROI, αντίστοιχα.

Ακολούθησαν έλεγχοι με μικροσκόπιο οπτικών ινών. Η μικροσκοπία οπτικών ινών είναι μη καταστρεπτική τεχνική που χρησιμοποιείται για τη λήψη μικροσκοπικών εικόνων σε διάφορες μεγεθύνσεις, εξετάζοντας επί τόπου τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιφανειών των υλικών, όπως την υφή, και τους διάφορους τύπους φθοράς.

Το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το i_score moritex (Σχήμα 3.6) και ο φακός που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των εικόνων ήταν μεγέθυνσης x30, x50.



Σχήμα 3.6 Μικροσκόπιο οπτικών ινών i_score moritex

Στο Σχήμα 3.7 παρατίθεται ενδεικτικά έλεγχος πιθανής βλάβης με τη χρήση μικροσκοπίου οπτικών ινών.



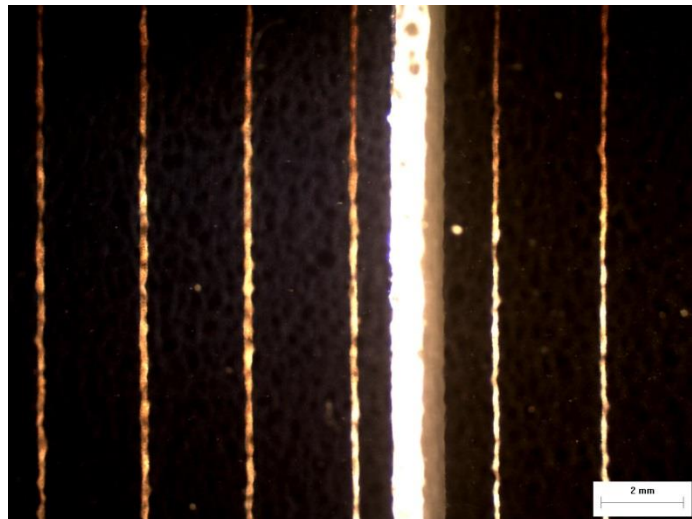
Σχήμα 3.7 Έλεγχος πιθανής βλάβης σε Φ/Β πλαίσιο με χρήση οπτικής μικροσκοπίας

Επίσης στα πλαίσια της προδιεργασίας του πειράματος υπήρξε συνεργασία με το εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, της μονάδα μεταλλογραφικής μελέτης καθώς και της έκθεσης αντικειμένων πραγματογνωμοσυών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών (ΕΜΠ), για την εξέταση τυχόν βλαβών στα δείγματά μας με την χρήση στερεοσκοπίου.



Σχήμα 3.8 Στερεοσκόπιο στο οποίο εξετάστηκε το δείγμα

Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται μία ενδεικτική εικόνα με χρήση στερεοσκοπίου.



Σχήμα 3.9 Εικόνα στερεοσκοπίου του PV-1, πριν την εφαρμογή τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης

Για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής απόδοσης των Φ/Β πλαισίων, σε κάθε στάδιο της τεχνητής γήρανσής τους, πραγματοποιήθηκαν συμβατικές ηλεκτρικές μετρήσεις των μεγεθών I_{sc} και V_{oc} κάθε πλαισίου, υπό συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας, με την χρήση ψηφιακού πολυμέτρου της εταιρίας Range™, τύπος RE69 41/2 DMM που αποτελεί ένα όργανο με ακρίβεια της τάξης του 0.1%, και εύρος

μετρούμενων τιμών DC ρεύματος 2 mA ~ 10 A DC και εύρος μετρούμενων τιμών DC τάσεων 200 mV ~ 1000 V.



Σχήμα 3.10 Το πολύμετρο Range™ RE69 4 1/2 DMM

Στο Σχήμα 3.11 και 3.12 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι μετρήσεις ρεύματος βραχυκύκλωσης και τάσης ανοιχτοκύκλωσης των Φ/Β πλαισίων στο πεδίο.



Σχήμα 3.11 Μέτρηση τάσης ανοιχτού κυκλώματος Φ/Β πλαισίου



Σχήμα 3.12 Μέτρηση ρεύματος βραχυκύκλωσης Φ/Β πλαισίου

Οι αναμενόμενες θερμοκρασίες των κυψελών υπολογίστηκαν εμπειρικά και καταγράφηκαν από τοπικό μετεωρολογικό σταθμό, η θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα T_a , η σχετική υγρασία H_r και η ταχύτητα ανέμου V_f , ενώ οι τιμές της έντασης G_T ηλιακής ακτινοβολίας μετρήθηκαν με το φορητό πυρανόμετρο KIMO™ SL 200. Το πυρανόμετρο SL 200 μπορεί να μετρήσει ένταση G_T από 1 έως 1300 W/m², με ακρίβεια μέτρησης 5% και ανάλυση της τάξεως του 1 W/m². Το φασματικό εύρος μηκών κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας που μετράται από το συγκεκριμένο όργανο, κυμαίνεται από 400 έως 1100 nm. Η μέτρηση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε Φ/Β πλαίσιο, πραγματοποιήθηκε με την τοποθέτηση του αισθητηρίου του οργάνου σε επίπεδο παράλληλο με το επίπεδο του πλαισίου.



Σχήμα 3.13 Το πυρανόμετρο KIMO™ SL 200

Στο Σχήμα 3.14 απεικονίζεται η μέτρηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου με την χρήση πυρανομέτρου.



Σχήμα 3.14 Μέτρηση προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου με την χρήση πυρανομέτρου

Οι θερμικοί κύκλοι της επιταχυνόμενης γήρανσης των Φ/Β σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν σε ημιβιομηχανικό θερμοθάλαμο ελέγχου κλιματικών δοκιμών της εταιρίας Angelantoni Industrie™, τύπος GTS600 (Σχήμα 3.15). Όλες οι μετρήσεις έγιναν στην Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ και σε συνεργασία με την ερευνητική ομάδα του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών. Ο θερμοθάλαμος GTS600 μπορεί να ελέγχει τη θερμοκρασία δοκιμών εύρους από -20 έως +80 °C, με ακρίβεια ± 1 °C σε σταθερές συνθήκες, ελέγχει τη σχετική υγρασία σε εύρος από 10% έως 98% και ωφέλιμες διαστάσεις (μήκος×βάθος×ύψος) 800×800×1000 (σε mm). Η περιορισμένη χωρητικότητα του συγκεκριμένου διαθέσιμου θερμοθαλάμου, ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως για την εφαρμογή επιταχυνόμενης γήρανσης δομικών υλικών, ήταν και το βασικό κριτήριο επιλογής των προαναφερθέντων Φ/Β πλαισίων, κατάλληλων διαστάσεων, για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας. Ο σχεδιασμός και προγραμματισμός των θερμικών κύκλων της διαδικασίας γήρανσης και ο έλεγχος των κλιματικών συνθηκών και της λειτουργίας του GTS600 πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του λογισμικού WinKratos® της εταιρίας Angelantoni Industrie™, σε ηλεκτρονικό υπολογιστή διασυνδεδεμένο με την μονάδα ελέγχου του θερμοθαλάμου.



Σχήμα 3.15 Ο ημιβιομηχανικός θερμοθάλαμος ελέγχου κλιματικών δοκιμών, τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης, Angelantoni TM GTS 600

Στο Σχήμα 3.16 φαίνονται ο ημιβιομηχανικός θερμοθάλαμος καθώς επίσης και ο υπολογιστής μέσω του οποίου ρυθμίζονται οι παράμετροι του πειράματος (θερμοκρασία, υγρασία).



Σχήμα 3.16 Έλεγχος ημιβιομηχανικού θερμοθαλάμου από υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Winkratos

Η ορθή λειτουργία του θερμοθαλάμου υποστηρίζεται από τον παρακάτω ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό: ψυκτήρας, αεροσυμπιεστής, καταλύτης και αεροφυλάκιο. Το κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.17 Ψυκτήρας, καταλύτης και αεροφυλάκιο (από αριστερά προς τα δεξιά)



Σχήμα 3.18 Αεροσυμπιεστής

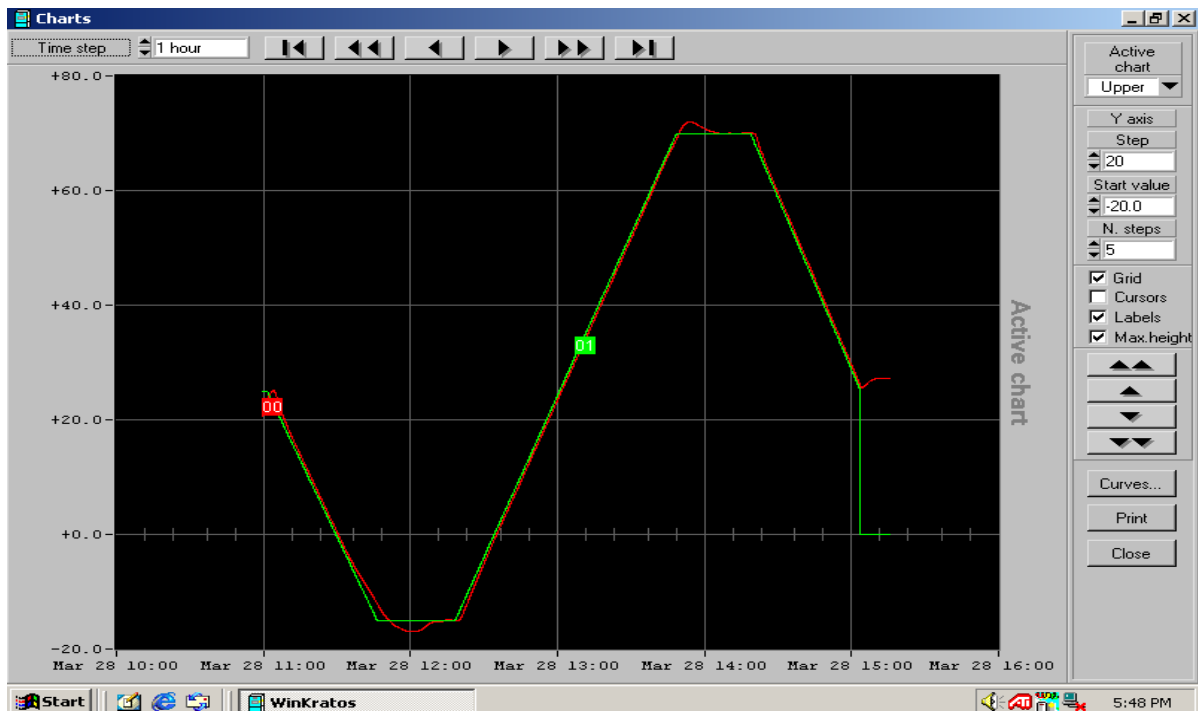
Στο Σχήμα 3.19 παρουσιάζεται η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων εντός του θερμοθαλάμου.



Σχήμα 3.19 Φ/Β πλαίσια εντός του θερμοθαλάμου

3.2.2 Λογισμικό

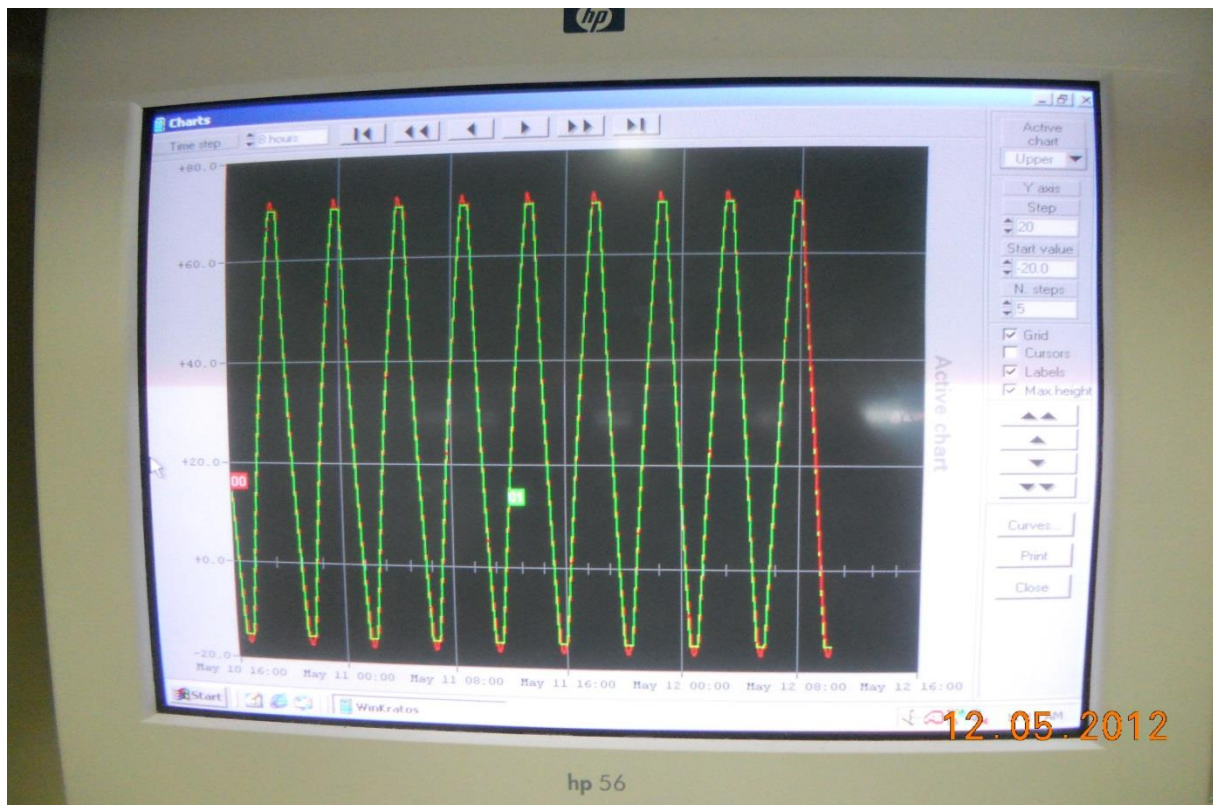
Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ήταν το Winkratos. Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζεται η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας (άξονας Υ) συναρτήσει του χρόνου (άξονας Χ), για τον θερμικό κύκλο που σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε στα πλαίσια της επιταχυνόμενης γήρανσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων αυτής της εργασίας. Ο συγκεκριμένος θερμικός κύκλος σχεδιάστηκε στα πρότυπα του αντίστοιχου προτεινόμενου θερμικού κύκλου του προτύπου IEC 61215, λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη το περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών ελέγχου του θερμοθαλάμου GTS600.



Σχήμα 3.20 Ο θερμικός κύκλος που εφαρμόστηκε κατά την διαδικασία τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 3.20, το εύρος τιμών θερμοκρασίας του θερμικού κύκλου που υιοθετήθηκε, ορίστηκε από -15 έως $+70$ °C, επιλογή στην οποία οδηγήθηκε η ερευνητική ομάδα κατόπιν εμφάνισης επανειλημμένων τεχνικών αστοχιών και διακοπών λειτουργίας του θερμοθαλάμου κατά την προσέγγιση των θερμοκρασιακών ορίων του. Κάθε, λοιπόν, θερμικός κύκλος της μελέτης σχεδιάστηκε να εκκινεί με τα πλαίσια να βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 °C). Στη συνέχεια, τα πλαίσια ψύχονται σταδιακά, με ρυθμό μείωσης 48 °C/ώρα, μέχρι την θερμοκρασία των -15 °C, στην οποία παραμένουν για 30 λεπτά. Κατόπιν, τα πλαίσια θερμαίνονται σταδιακά, με ρυθμό αύξησης 48 °C/ώρα, μέχρι την θερμοκρασία των $+70$ °C, στην οποία, και πάλι, παραμένουν για 30 λεπτά.

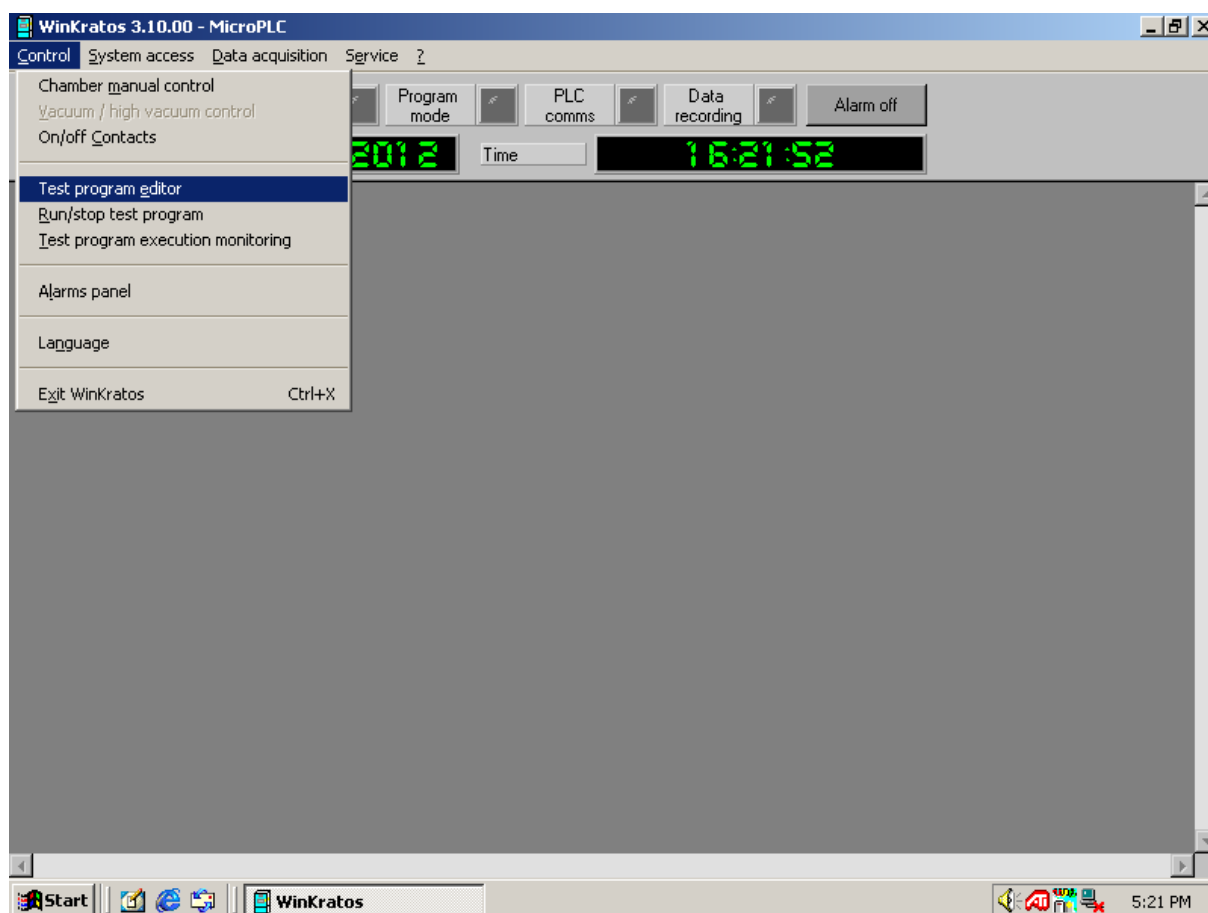
Τέλος, τα πλαίσια επαναψύχονται σταδιακά μέχρι την θερμοκρασία των -15 °C, ενώ, ενδιάμεσα, μόλις η μειούμενη θερμοκρασία φτάσει στους $+25$ °C, ολοκληρώνεται ένας θερμικός κύκλος. Η συνολική διαδικασία τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης των Φ/Β πλαισίων, περιελάμβανε την εφαρμογή 106 θερμικών κύκλων, ωστόσο ολοκληρώθηκε σε δύο στάδια (των 53 κύκλων έκαστο), για τις ανάγκες διεξαγωγής των ενδιάμεσων μετρήσεων ηλεκτρικής απόδοσης και υπέρυθρης θερμογραφίας. Ο δε συνολικός καθαρός χρόνος διεξαγωγής της γήρανσης υπολογίστηκε στις ~ 480 ώρες ή 20 ημέρες. Στο Σχήμα 3.21 δίνεται ενδεικτικά το απόσπασμα μιας ακολουθίας 9 θερμικών κύκλων.



Σχήμα 3.21 Ακολουθία εννέα θερμικών κύκλων της τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης

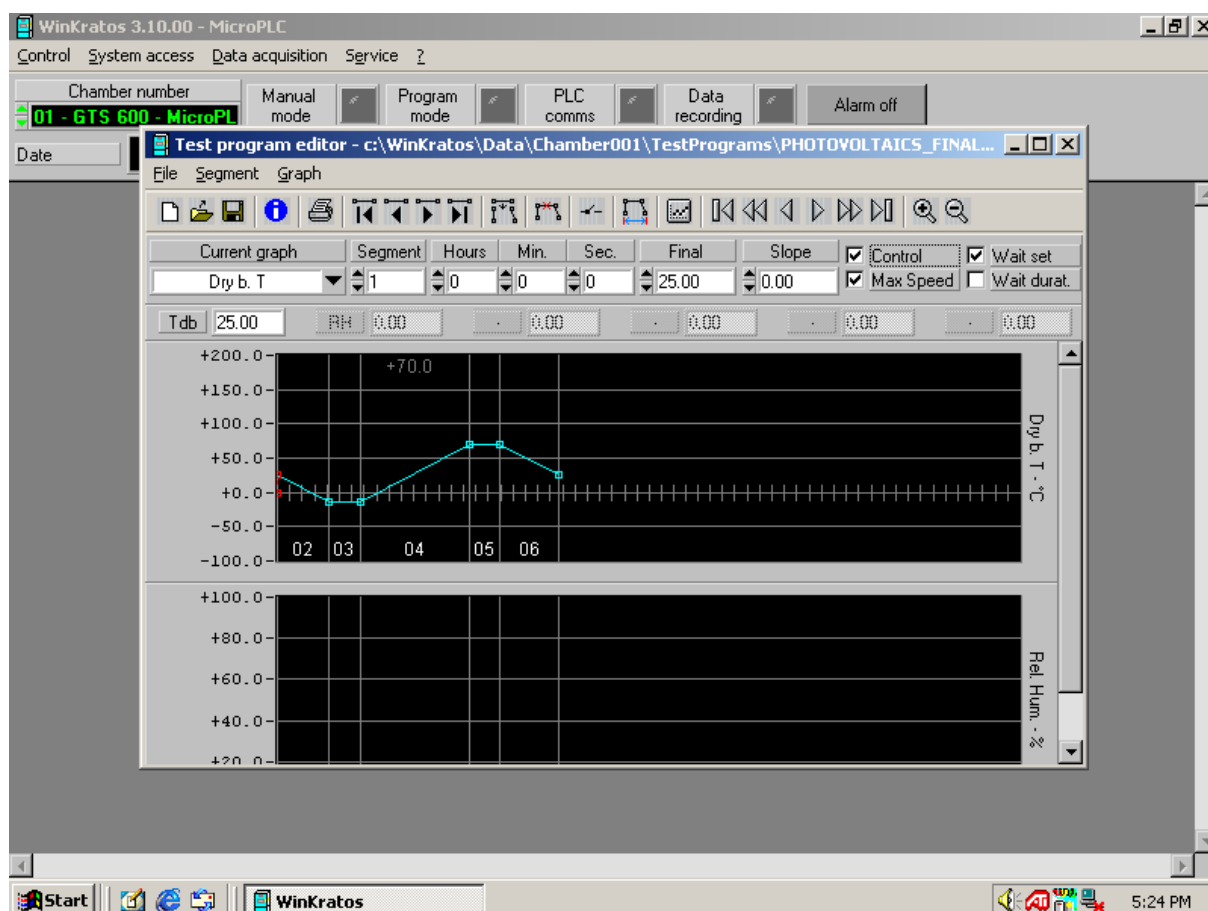
Στα Σχήματα που ακολουθούν δίνονται διάφορα χαρακτηριστικά του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.22 παρουσιάζεται το εισαγωγικό περιβάλλον του λογισμικού Winkratos με τα διάφορα πεδία τα οποία ο χρήστης μπορεί να παραμετροποιήσει ανάλογα με το πείραμα που θέλει να εκτελέσει.



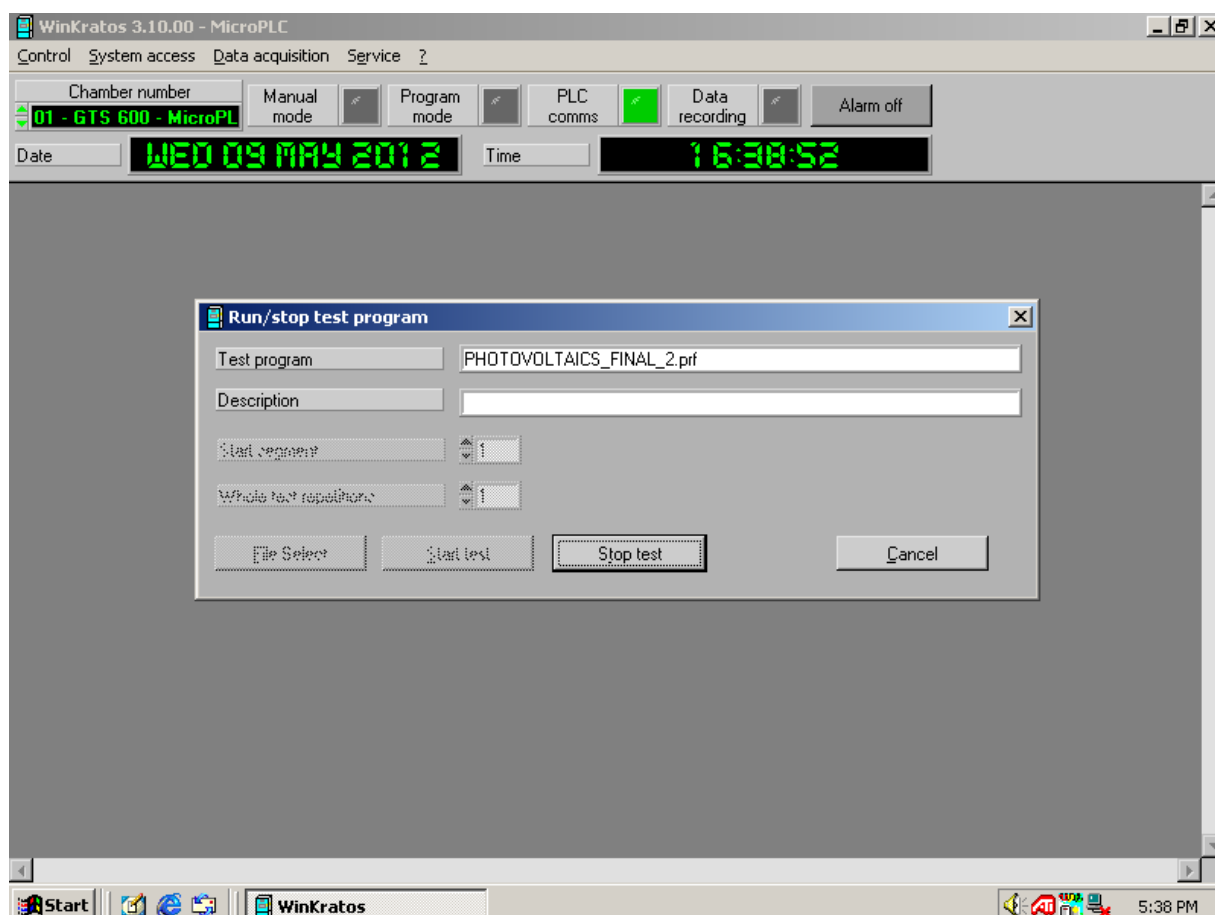
Σχήμα 3.22 Έναρξη πειράματος στο λογισμικό πακέτο Winkratos

Στο Σχήμα 3.23 δίνεται μια αρχική εκτίμηση του θερμικού κύκλου που θα χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της εκτέλεσης του πειράματος. Ενδεικτικά, φαίνεται το εύρος των θερμοκρασιών τις οποίες πρέπει να προσεγγίσει ο θάλαμος κατά την εκτέλεση της τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης (π.χ. θερμοκρασίες από $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$).



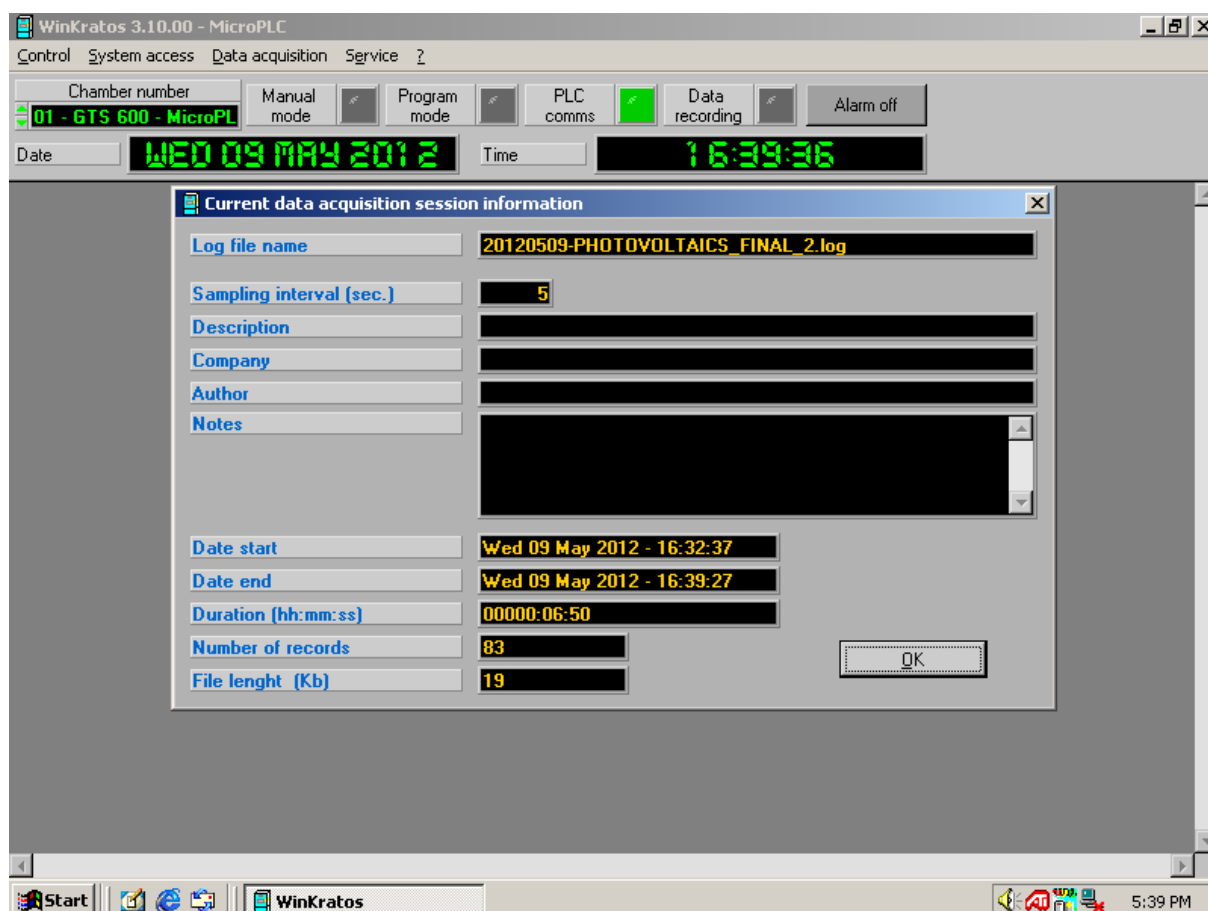
Σχήμα 3.23 Ορισμός χαρακτηριστικών πειράματος (π.χ. θερμοκρασίες)

Στη συνέχεια, δίνεται η δυνατότητα έναρξης / λήξης της πειραματικής διαδικασίας. Αυτό μπορεί να γίνει είτε επειδή το πείραμα έφτασε στο τέλος του, είτε επειδή προέκυψαν ενδεχόμενες αποτυχίες κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Τέτοιες αποτυχίες μπορεί να είναι η διακοπή της παροχής νερού, ή η διακοπή της παροχής ηλεκτρικής ισχύος, γι 'αυτό και δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα της προσωρινής διακοπής της πειραματικής διαδικασίας.



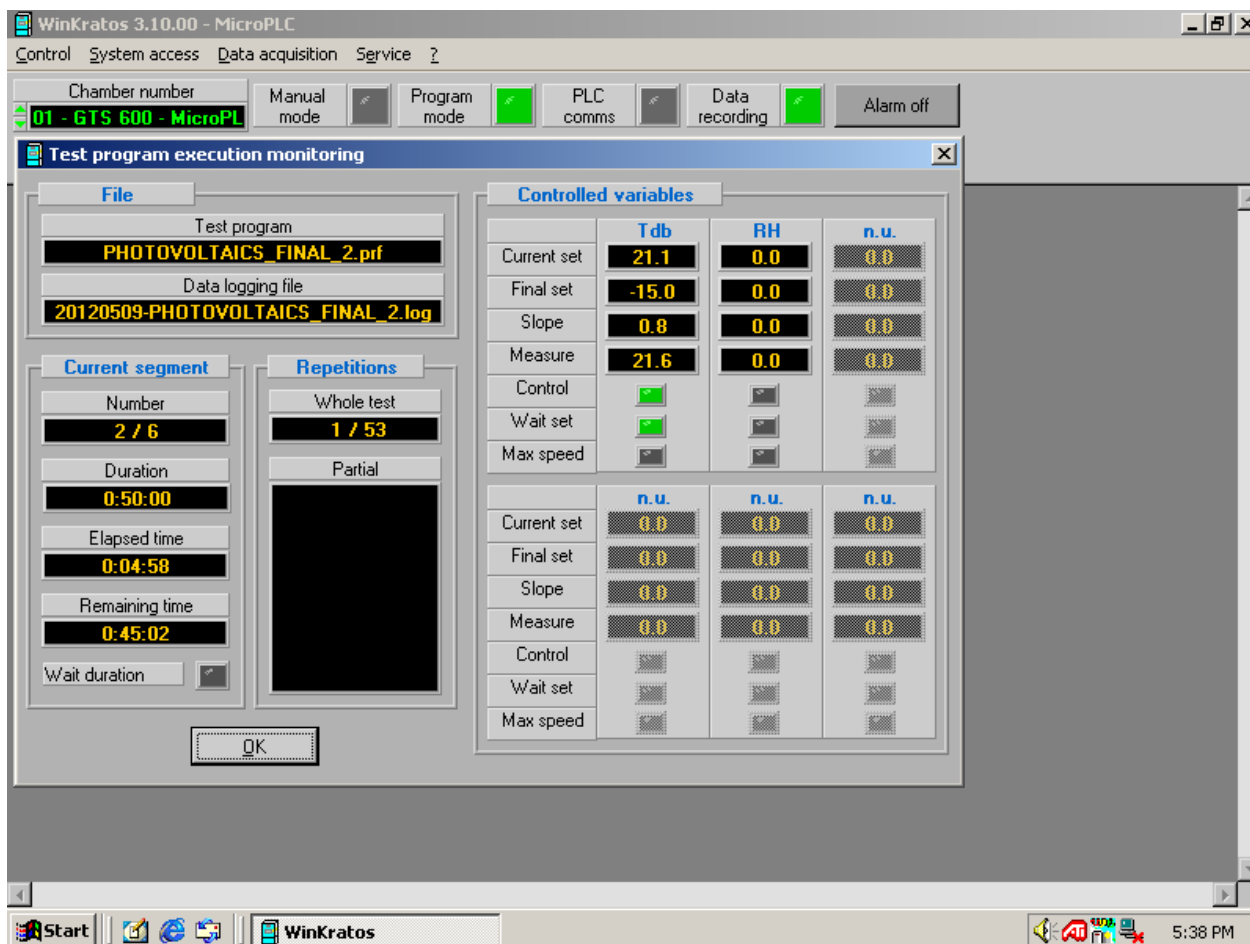
Σχήμα 3.24 Εκτέλεση/Διακοπή πειράματος

Επιπρόσθετα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μεταβαίνει στο περιβάλλον που φαίνεται στο Σχήμα 3.25, προκειμένου να ενημερώνεται για την ημερομηνία έναρξης / λήξης του πειράματος, την διάρκεια, και τον αριθμό των καταγραφών καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος της τεχνητής γήρανσης.



Σχήμα 3.25 Διάφορα χαρακτηριστικά πειράματος (υπεύθυνος πειράματος, διάρκεια πειράματος, αριθμός καταγραφών)

Τέλος, στο Σχήμα 3.26, ο χρήστης μπορεί να αντλήσει πληροφορίες για τον αριθμό των σημείων στο οποίο βρίσκεται το πείραμα, για τον αριθμό των κύκλων που έχουν πραγματοποιηθεί, για τον χρόνο που έχει διανύσει αλλά και για τον χρόνο που απομένει έως ότου ολοκληρωθεί. Επίσης, μπορεί να βρει σε ποια θερμοκρασία βρίσκεται την εκάστοτε στιγμή ο θάλαμος, αλλά και τον ρυθμό με τον οποίο θα προσεγγίσει το επόμενο σημείο / θερμοκρασιακό νούμερο.



Σχήμα 3.26 Παράθυρο εξέλιξης και αποτελεσμάτων εκτέλεσης πειράματος

3.3 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία του πειράματος, τα υλικά και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Αντικείμενο εφαρμογής της προγνωστικής μελέτης επιταχυνόμενης γήρανσης αποτέλεσαν 3 Φ/Β πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Κάθε ένα από τα Φ/Β πλαίσια υποβλήθηκε σε υπέρυθρη θερμογράφηση πεδίου πριν την έναρξη, στο μέσο και στο πέρας της διαδικασίας τεχνητής γήρανσης, ώστε να καταγραφούν τα αντίστοιχα θερμοκρασιακά προφίλ των πλαισίων και τυχόν διαφοροποιήσεις στα θερμικά αποτυπώματα των όποιων βλαβών σε αυτά. Για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής απόδοσης των Φ/Β πλαισίων, σε κάθε στάδιο της τεχνητής γήρανσής τους, πραγματοποιήθηκαν συμβατικές ηλεκτρικές μετρήσεις των μεγεθών I_{SC} και V_{OC} κάθε πλαισίου, υπό συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας. Οι υπέρυθρες θερμογραφήσεις πεδίου και οι μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών των Φ/Β πραγματοποιήθηκαν στην οροφή του κτηρίου του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θερμογραφήθηκαν σε

συνθήκες βραχυκύκλωσης και καθαρού ουρανού έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη θερμική φόρτιση. Η κλίση του οριζόντιου πλαισίου ως προς το οριζόντιο επίπεδο ήταν σταθερή και ίση με 35° με νότιο προσανατολισμό και σε σταθερή απόσταση $d=1,5\text{m}$ ως προς το οπτικό σύστημα της θερμοκάμερας.

Βιβλιογραφία

- [1]. Winkratos control system, Industrial Handbook, Angelantoni Industrie S. p. A. Cod. 513259-Rel. 300801
- [2]. Design qualification and type approval of PV modules acc. To IEC 61215: 2005 / IEC 61646:M2008 January 2009
- [3]. ESPEC Solar Application Guide, Review of the IEC 61646 methods, ESPEC NORTH AMERICA, INC., Copyright 2009, Hudsonville, Michigan, USA.

Κεφάλαιο 4

Διαδικασία γήρανσης

4.1 Εισαγωγή.....	76
4.2 Συνθήκες μετρήσεων.....	76
4.3 Εξέλιξη θερμικού αποτυπώματος βλαβών	77
4.4 Εξέλιξη της ηλεκτρικής απόδοσης.....	81
4.5 Οπτικές παρατηρήσεις.....	84
4.6 Σύνοψη.....	94

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία υλοποίησης και τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης, προς την κατεύθυνση της πρόγνωσης της εξέλιξης των θερμών κηλίδων και, γενικά, βλαβών στην διάρκεια ζωής ενός Φ/Β πλαισίου και της επίδρασής τους στην τελική απόδοσή του, και πάντα σε σχέση με τον εντοπισμό τους με την χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας. Η μελέτη εκπονήθηκε σε συνεργασία με την ερευνητική ομάδα της Καθηγήτριας Α. Μοροπούλου, του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με την εφαρμογή δοκιμών τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης σε Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου, μικρής ισχύος και συγκεκριμένου θερμοκρασιακού προφίλ.

Βάσει της υφιστάμενης κατάστασης σε αυτά τα ερευνητικά πεδία, το πειραματικό μέρος αυτής της μελέτης συνίσταται σε μια προσπάθεια διερεύνησης της δυναμικής των θερμικών αποτυπωμάτων, στην πρόγνωση της εξέλιξης των βλαβών και, εν τέλει, της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων, στην διάρκεια ζωής τους. Στα πλαίσια, λοιπόν, αυτής της προσπάθειας, τρία Φ/Β πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου, μικρής ισχύος (από 5 έως 6 W) και διαγνωσμένου θερμικού αποτυπώματος, υποβλήθηκαν σε ελεγχόμενη (τεχνητή) επιταχυνόμενη γήρανση, με την εφαρμογή δοκιμών θερμικών κύκλων. Απώτερος σκοπός της μελέτης ήταν η ποσοτική και ποιοτική αποτίμηση της εξέλιξης συγκεκριμένων βλαβών στα Φ/Β πλαίσια, μέσα από την σύγκριση μετρήσεων υπέρυθρης θερμογραφίας, ηλεκτρικής απόδοσης και μορφολογικών δεδομένων, πριν και μετά την εφαρμογή της τεχνητής γήρανσης. Σημειώνεται ότι, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης στα Φ/Β πλαίσια της μελέτης πραγματοποιήθηκαν με στόχο την επίτευξη μιας προσεγγιστικής προσομοίωσης μεγάλου μέρους της διάρκειας ζωής ενός Φ/Β πλαισίου στο πεδίο.

Η κλίση του οριζόντιου πλαισίου ως προς το οριζόντιο επίπεδο ήταν σταθερή και ίση με 35° με νότιο προσανατολισμό και σε σταθερή απόσταση $d=1,5\text{m}$ ως προς το οπτικό σύστημα της θερμοκάμερας.

4.2 Συνθήκες μετρήσεων

Οι υπέρυθρες θερμογραφήσεις πεδίου και οι μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών των Φ/Β πραγματοποιήθηκαν στην οροφή του κτηρίου του τμήματος Χημικών Μηχανικών από τις 13/3/12 μέχρι και τις 15/6/12. Από τον τοπικό μετεωρολογικό σταθμό καταγράφηκαν τα δεδομένα των περιβαλλοντικών συνθηκών και συγκεκριμένα η θερμοκρασία του αέρα, T_o , η σχετική υγρασία H_r , η ταχύτητα ανέμου V_f και η ένταση G_T της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του πλαισίου.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θερμογραφήθηκαν σε συνθήκες βραχυκύκλωσης και καθαρού ουρανού έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη θερμική φόρτιση και κατά συνέπεια μεγαλύτερη

διαφορά θερμοκρασίας, ΔT , στα ενδεχόμενα προβληματικά σημεία του πίνακα ηλιακών κυψελών και να αποφεύγεται ο κίνδυνος ανεπιθύμητης αντανάκλασης της θερμικής ακτινοβολίας από τα νέφη στη μετρούμενη επιφάνεια του πλαισίου.



Σχήμα 4.1 Η τοποθέτηση των Φ/Β για τη λήψη των θερμογραφημάτων και των ηλεκτρικών μετρήσεων.

4.3 Εξέλιξη θερμικού αποτυπώματος βλαβών

Η υπέρυθρη θερμογραφία όπως ήδη αναφέρθηκε αποτελεί ένα αξιόπιστο μέσο αποτύπωσης βλαβών για κάθε Φ/Β πλαίσιο με τη μορφή θερμών κηλίδων. Στην παρούσα εργασία αποτυπώθηκε η εξέλιξη των βλαβών επιταχυνόμενης γήρανσης κατά τη διάρκεια των θερμικών κύκλων για τα τρία θεωρούμενα Φ/Β πάνελ. Το θερμοκρασιακό προφίλ κάθε Φ/Β πλαισίου μπορεί, με την κατάλληλη ανάλυση εικόνων υπέρυθρης θερμογραφίας, να υποδείξει με αξιόπιστο και ακριβή τρόπο την παρουσία βλαβών, υπό μορφή θερμών κηλίδων. Σε αυτήν την μελέτη, διερευνήθηκε η επίδραση των θερμικών κύκλων επιταχυνόμενης γήρανσης στην εξέλιξη του θερμικού αποτυπώματος των βλαβών αυτού του τύπου.

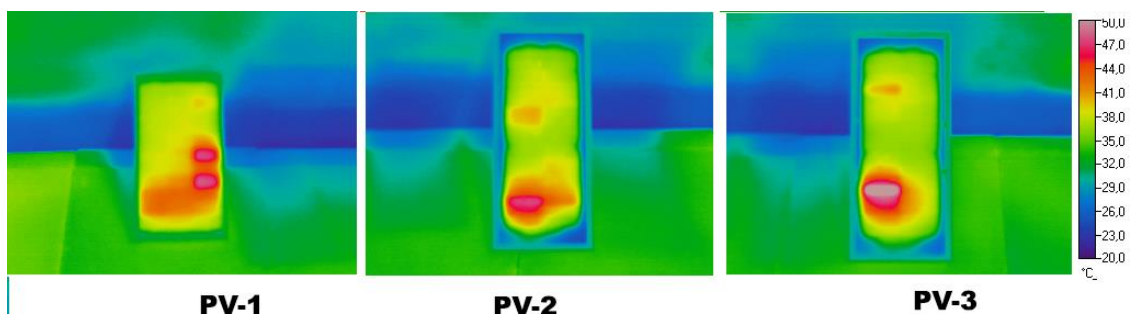
Προκειμένου να διαπιστωθεί η θεωρητική και η πραγματική θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων, η διακύμανση της διαφοράς θερμοκρασίας στις προβληματικές περιοχές αλλά και ο τρόπος και η κατεύθυνση της πιθανής μετάδοσης των θερμών κηλίδων όπως επίσης και να γίνει εμφανής η ύπαρξη ελαττωματικών περιοχών και θερμών κηλίδων χρησιμοποιήθηκε η θερμοκάμερα και

ελήφθησαν θερμογραφήματα των τριών φωτοβολταϊκών πριν την εφαρμογή της τεχνητής γήρανσης στο μέσο και στο πέρας αυτής.

Η θεωρητική θερμοκρασία της κυψέλης T_c υπολογίζεται από τη σχέση (4.1) [1]:

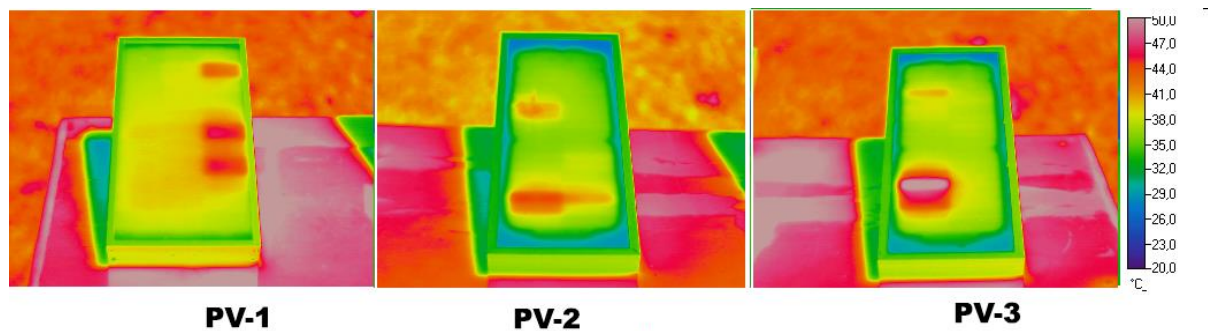
$$T_c = T_a + \left(\frac{0.32}{8.91 + 2 \cdot V_f} \right) \cdot G_T \quad (4.1)$$

Η πιθανότητα ύπαρξης βλάβης εντοπίζεται από την παραπάνω σχέση όταν η μετρούμενη θερμοκρασία των κυψελών διαφέρει από την T_c για διαφορά θερμοκρασίας μεγαλύτερης των 5°C . Τα θερμογραφήματα που ελήφθησαν για τα τρία Φ/Β πλαίσια στην αρχή της γήρανσης στο μέσο και στο πέρας αυτής φαίνονται στα Σχήματα 4.1-4.3.



Σχήμα 4.2 Η εξέλιξη των θερμοκρασιακών προφίλ των PV-1, PV-2 και PV-3 πριν την έναρξη της διαδικασίας γήρανσης

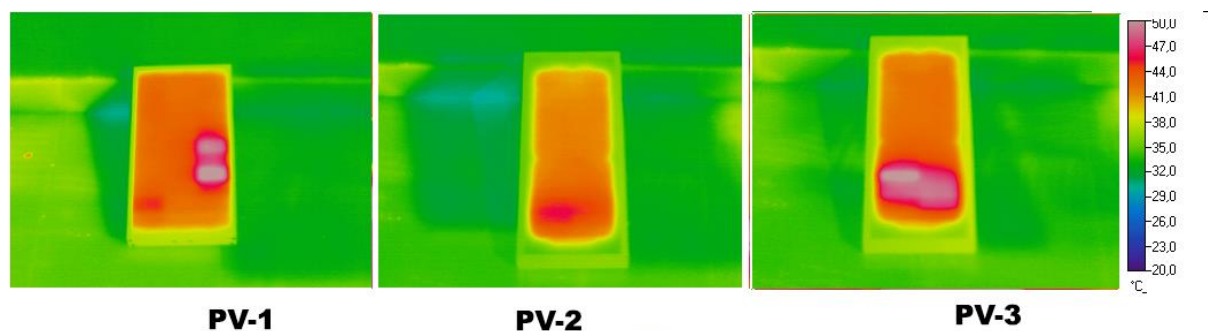
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 στο PV-1 υπάρχουν δυο κυψελίδες οι οποίες παρουσιάζουν ασυνήθιστο θερμοκρασιακό προφίλ σε σχέση με τις υπόλοιπες. Για τις συγκεκριμένες πειραματικές μετρήσεις η θεωρητική θερμοκρασία της κυψέλης ήταν $38,7^\circ \text{C}$ ενώ η ανάλυση ROI που πραγματοποιήθηκε για το συγκεκριμένο πλαίσιο έδωσε μέση τιμή θερμοκρασίας για τις περισσότερες κυψέλες ίση με 38°C πολύ κοντά στη θεωρητική τιμή. Στο PV-2 υπάρχει μια ύποπτη περιοχή με ασυνήθιστο θερμοκρασιακό προφίλ στο κάτω μέρος του πλαισίου, ενώ στο PV-3 πριν την έναρξη της διαδικασίας γήρανσης υπάρχει μια περιοχή με ασυνήθιστο θερμοκρασιακό προφίλ κοντά στο μέσο της αριστερής πλευράς του πλαισίου. Η ύποπτη περιοχή στο PV-2 δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια ως θερμή κηλίδα. Για το PV-3 η διαφορά θερμοκρασίας υπολογίστηκε στους $21,1^\circ \text{C}$ και υποδεικνύει την ένδειξη πως μπορεί να υπάρχει θερμή κηλίδα.



Σχήμα 4.3 Η εξέλιξη των θερμοκρασιακών προφίλ PV-1, PV-2 και PV-3 στο μέσο της διαδικασίας γήρανσης (53 κύκλοι)

Από το Σχήμα 4.2 φαίνεται πως μετά από 53 κύκλους επιταχυνόμενης γήρανσης στο PV-1 σχηματίζονται δύο θερμές κηλίδες οι οποίες υπάρχουν πριν την εκκίνηση της διαδικασίας επιταχυνόμενης γήρανσης. Οι θερμές κηλίδες συνεχίζουν να υπάρχουν και κατά τη διαδικασία της γήρανσης επηρεάζοντας τη θερμική συμπεριφορά των γειτονικών κυψελών. Κατά τη διαδικασία της επιταχυνόμενης γήρανσης η απόκλιση της θερμοκρασίας ΔT για το PV-1 δεν είχε σημαντικές διαφορές από την αρχική. Αυτή η απουσία απόκλισης μπορεί να αποδοθεί στη συσσωρευμένη γήρανση του πλαισίου. Η μετρούμενη θερμοκρασία λειτουργίας ήταν $38,7^{\circ}\text{C}$ που ήταν πολύ κοντά στη θεωρητική τιμή που υπολογίστηκε στους $38,5^{\circ}\text{C}$. Για τις θερμές κηλίδες η διαφορά θερμοκρασίας ήταν $\Delta T = 7,1^{\circ}\text{C}$.

Για το PV-2 στο μέσο της διαδικασίας γήρανσης η διαφορά θερμοκρασίας υπολογίστηκε ίση με $5,3^{\circ}\text{C}$ ενώ για το PV-3 αποδεικνύεται η ύπαρξη θερμής κηλίδας η οποία μεταδίδεται στις γειτονικές κυψέλες αυξάνοντας τη συνολική προβληματική περιοχή του πλαισίου.



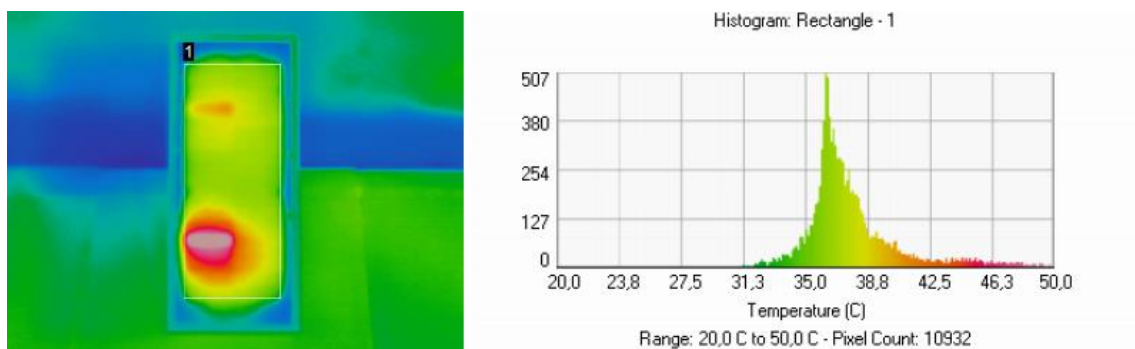
Σχήμα 4.4 Η εξέλιξη των θερμοκρασιακών προφίλ PV-1, PV-2 και PV-3 στο τέλος της διαδικασίας γήρανσης (106 κύκλοι)

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας γήρανσης στο PV-1 μετρήθηκε θερμοκρασία λειτουργίας ίση με $41,9^{\circ}\text{C}$ και η θερμοκρασία των θερμών κηλίδων στους 49°C ενώ η αναμενόμενη

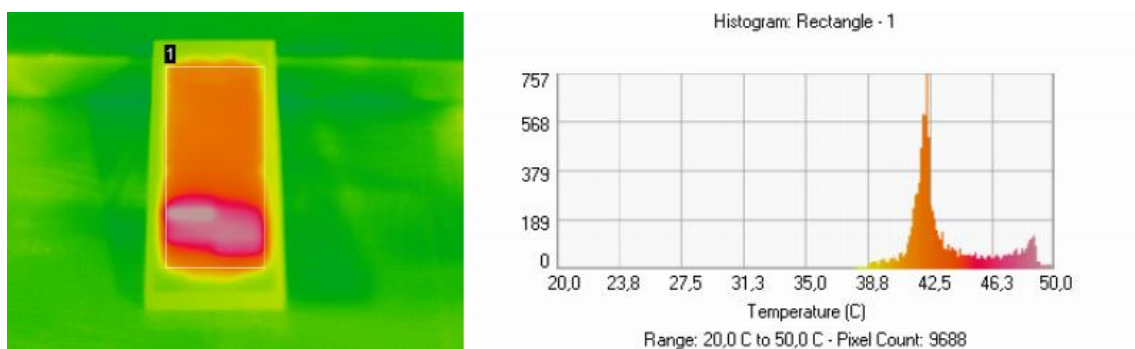
τιμή θερμοκρασίας είναι 42,9° C. Κατά συνέπεια υπάρχει μια απόκλιση της τάξης του 2.3% για τις υγιείς κυψέλες και $\Delta T=6,1^\circ \text{C}$ για τις θερμές κηλίδες.

Η αντίστοιχη διαφορά θερμοκρασίας για το PV-2 είναι 3,7° C ενώ στο PV-3 επιβεβαιώνεται η επέκταση της θερμής κηλίδας στις γειτονικές κηλίδες αφού πλέον καλύπτει η συγκεκριμένη περιοχή τέσσερις κυψέλες μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας γήρανσης.

Κατά συνέπεια στα υπό μελέτη πλαίσια και ειδικότερα στο PV-3 μετά την διαδικασία της τεχνητής γήρανσης μειώνεται η διαφορά θερμοκρασίας χωρίς όμως να υποβαθμίζεται στη συγκεκριμένη κυψελίδα η επίδραση της θερμής κηλίδας. Μια πιθανή εξήγηση της μείωσης της ΔT είναι το ότι από την κάθε θερμή κηλίδα εκτονώνεται η θερμότητα που περιέχεται σε αυτήν προς την επιφάνεια του κάθε πλαισίου.



Σχήμα 4.5 Ανάλυση ιστογράμματος για το θερμοκρασιακό προφίλ του PV-3 πριν την εφαρμογή των θερμικών κύκλων επιταχυνόμενης γήρανσης της μελέτης



Σχήμα 4.6 Ανάλυση ιστογράμματος για το θερμοκρασιακό προφίλ του PV-3 μετά την ολοκλήρωση των 103 θερμικών κύκλων επιταχυνόμενης γήρανσης της μελέτης

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η παρατηρούμενη μείωση της τιμής του ΔT κατά την επίδραση της τεχνητής γήρανσης, δεν συνεπάγεται υποβάθμιση της δριμύτητας της θερμής κηλίδας και της επίδρασής της στην μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης του κάθε πλαισίου. Μπορεί ωστόσο να εξηγηθεί, ως αποτέλεσμα της “εκτόνωσης” της συσσωρευμένης θερμότητας από κάθε θερμή κηλίδα προς την

συνολική επιφάνεια του εκάστοτε πλαισίου, την κατανομή της σε μεγαλύτερη επιφάνεια (ειδικότερα όπως στην περίπτωση του PV-3) και στην συνολικά υψηλότερη θερμοκρασία των “υγιών” περιοχών κάθε πλαισίου.

4.4 Εξέλιξη της ηλεκτρικής απόδοσης

Η ύπαρξη μιας ή περισσοτέρων θερμών κηλίδων στο πλαίσιο επιδρά σημαντικά στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου και κατά συνέπεια στη συνολική απόδοση του Φ/Β πλαισίου. Η βασική αιτία της μείωσης της απόδοσης είναι η ανάστροφη πόλωση της λειτουργίας των προβληματικών κυψελών. Επιπλέον η ηλεκτρική απόδοση επηρεάζεται από τη συσσωρευμένη φθορά και την αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή όπου θεωρείται προβληματική.

Κατά συνέπεια η μέτρηση των κύριων ηλεκτρικών παραμέτρων εξόδου των PV-1, PV-2 και PV-3 στο πεδίο επιτρέπει τον ποσοτικό προσδιορισμό της επίδρασης της γήρανσης και των θερμών κηλίδων στην ηλεκτρική απόδοση κάθε πλαισίου. Για να προσδιοριστεί η εξέλιξη της ηλεκτρικής απόδοσης, (n%) για τα εξεταζόμενα πλαίσια σε κάθε στάδιο γήρανσης ακολουθήθηκε η ακόλουθη διαδικασία.

1. Καταγράφηκαν οι κατασκευαστικές και ηλεκτρικές παράμετροι των πλαισίων.
2. Υπολογίστηκε η ηλεκτρική απόδοση για κάθε πλαίσιο.
3. Τα I_{SC} και V_{SC} του βήματος 1, ανήχθηκαν για τις περιβαλλοντικές συνθήκες κάθε μέτρησης, και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες θεωρητικές (αναμενόμενες) τιμές τους, σε κάθε στάδιο γήρανσης και για κάθε πλαίσιο.
4. Βάσει της τιμής της V_{SC} του βήματος 3, υπολογίστηκε ο αντίστοιχος αναμενόμενος συντελεστής πλήρωσης FF , σε κάθε στάδιο γήρανσης και για κάθε πλαίσιο.
5. Από τον προσδιορισμό των μεγεθών I_{SC} , V_{SC} και FF των βημάτων 3 και 4, υπολογίστηκε η αναμενόμενη μέγιστη τιμή ηλεκτρικής ισχύος εξόδου P_{max} και η αναμενόμενη n , σε κάθε στάδιο γήρανσης και για κάθε πλαίσιο.
6. Μετρήθηκε το ηλεκτρικό πεδίο (με την χρήση του πολυμέτρου RE69) και καθορίστηκαν οι πραγματικές τιμές των I_{SC} και V_{SC} , σε κάθε στάδιο γήρανσης και για κάθε Φ/Β πλαίσιο.
7. Βάσει της πραγματικής (μετρούμενης) τιμής της V_{SC} του βήματος 6, υπολογίστηκε ο πραγματικός συντελεστής πλήρωσης FF , σε κάθε στάδιο γήρανσης και για κάθε πλαίσιο.
8. Από τον προσδιορισμό των μεγεθών I_{SC} , V_{SC} και FF των βημάτων 6 και 7, υπολογίστηκε η πραγματική μέγιστη τιμή ηλεκτρικής ισχύος εξόδου P_{max} και τη πραγματική απόδοση n , σε κάθε στάδιο γήρανσης και για κάθε πλαίσιο.

9. Προσδιορίστηκε η μείωση της απόδοσης Δn για κάθε πλαίσιο, σε κάθε στάδιο γήρανσης, από την σύγκριση των τιμών της αναμενόμενης και της πραγματικής τιμής n , όπως αυτές προέκυψαν από τα βήματα 5 και 8 αντίστοιχα.

Πιο αναλυτικά από τις κατασκευαστικές προδιαγραφές και τις ηλεκτρικές παραμέτρους για κάθε πλαίσιο προσδιορίστηκαν οι τιμές μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος εξόδου $P_{\max-0}$ (W) (με τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές ρεύματος $I_{\max-0}$ (A) και τάσης $V_{\max-0}$ (V)), του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{SC-0} (A), της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{OC-0} (V), του συντελεστή πλήρωσης FF_0 (%) και του θερμοκρασιακού συντελεστή c (V/°C) της V_{OC} . Επιπλέον προσδιορίστηκε το εμβαδόν της ωφέλιμης επιφάνειας A (m²) των ηλιακών κυψελών. Η ηλεκτρική απόδοση υπολογίζεται από τη σχέση [2].

$$n_0 = \frac{P_{\max-0}}{A \cdot G_{T-0}} = \frac{V_{\max-0} \cdot I_{\max-0}}{A \cdot G_{T-0}} = \frac{V_{OC-0} \cdot I_{SC-0} \cdot FF_0}{A \cdot 1000} \quad (4.2)$$

Στη συνέχεια, οι θεωρητικές τιμές των I_{SC} και V_{OC} , για κάθε πλαίσιο, ανηγμένες στις περιβαλλοντικές συνθήκες κάθε μέτρησης (και αντίστοιχα κάθε σταδίου γήρανσης), υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (4.3) και (4.4) :

$$I_{SC} = \frac{G_T}{G_{T-0}} \cdot I_{SC-0} = \frac{G_T}{1000} \cdot I_{SC-0} \quad (4.3)$$

$$V_{OC} = V_{OC-0} + c \cdot (T_c - T_{c-0}) = V_{OC-0} + c \cdot (T_c - 25) \quad (4.4)$$

Από την τελευταία σχέση υπολογίζεται στη συνέχεια ο αναμενόμενος συντελεστής FF αναγόμενος στις περιβαλλοντικές συνθήκες κάθε μέτρησης από τη σχέση (4.5) [3].

$$FF = \frac{V_{OC} - \ln(V_{OC} + 0.72)}{V_{OC} + 1} \quad (4.5)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις η αναμενόμενη ισχύς εξόδου δίνεται από τη σχέση (4.6) [2]

$$P_{\max} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (4.6)$$

Η ανηγμένη αναμενόμενη ηλεκτρική απόδοση για κάθε πλαίσιο υπολογίζεται βάση της $P_{\max}$ από τη σχέση (4.7) [2]

$$n = \frac{P_{\max}}{A \cdot G_T} \quad (4.7)$$

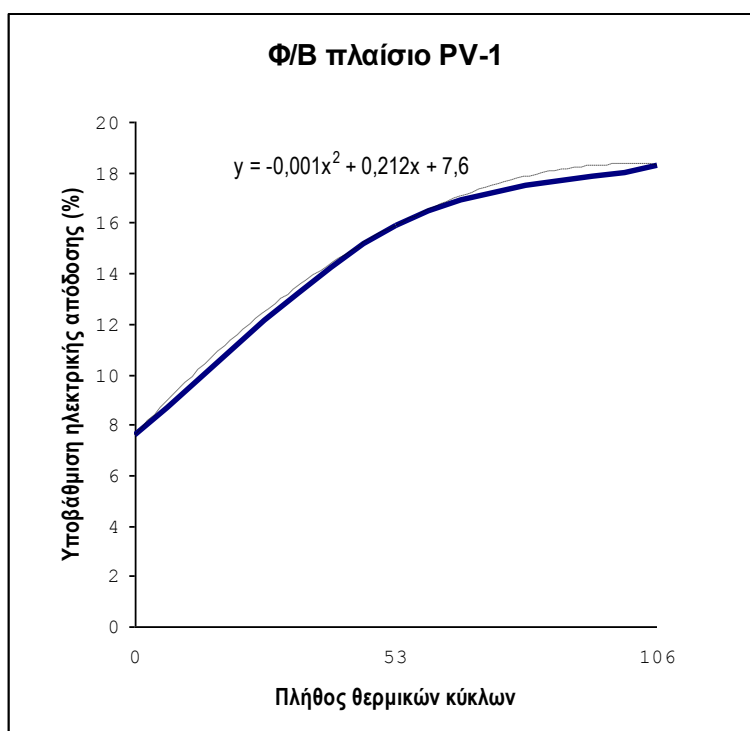
Οι μετρούμενες πραγματικές τιμές των I_{SC} και V_{OC} , η διαδικασία υπολογισμού των FF , $P_{\max}$ και n , για τις ηλεκτρικές μετρήσεις πριν την έναρξη, στο μέσο και μετά το πέρας (106) της επιταχυνόμενης γήρανσης θερμικών κύκλων είναι ακριβώς όμοια με αυτήν του υπολογισμού των αντίστοιχων αναμενόμενων τιμών. Με αυτόν τον τρόπο, τελικά υπολογίζεται η ζητούμενη ποσοστιαία μείωση Δn της απόδοσης κάθε πλαισίου, για κάθε στάδιο γήρανσης, από την σύγκριση των τιμών της αναμενόμενης και της πραγματικής τιμής n . Τα συνολικά αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών, των ηλεκτρικών μετρήσεων καθώς και οι υπολογισθείσες Δn (%) για τα Φ/Β πλαίσια της μελέτης, πριν την έναρξη (0 θερμικοί κύκλοι), στο μέσο (53 θερμικοί κύκλοι) και μετά το πέρας (106 θερμικοί κύκλοι) της επιταχυνόμενης γήρανσης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Κατασκευαστικές και θεωρητικές τιμές κύριων ηλεκτρικών παραμέτρων και αποτελέσματα ηλεκτρικών παραμέτρων και αποτελέσματα ηλεκτρικών μετρήσεων για κάθε Φ/Β πλαίσιο, πριν την έναρξη (0), στο μέσο (53) και μετά το πέρας (106) της επιταχυνόμενης γήρανσης θερμικών κύκλων.

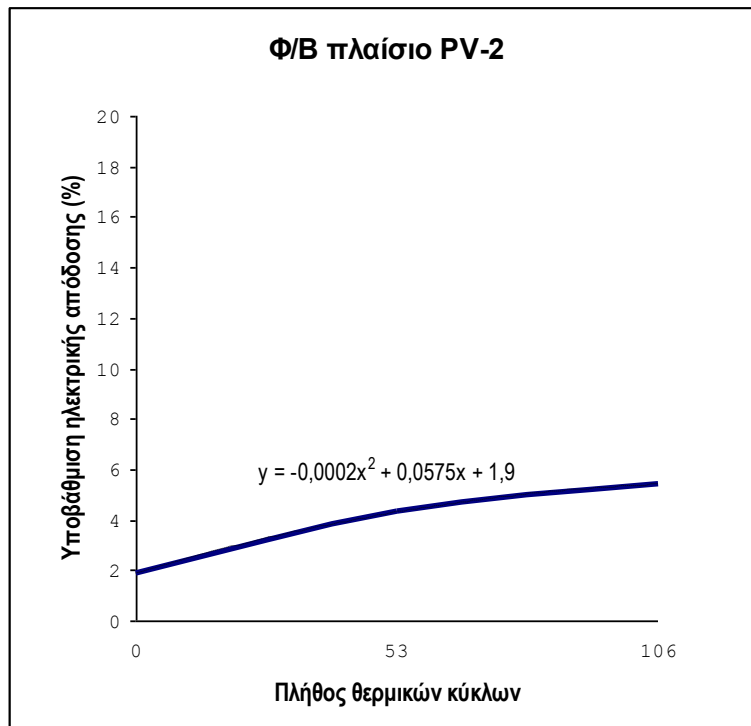
Παράμετρος	Τιμή @ STC	Θεωρητικές (αναμενόμενες)			Μετρούμενες (πραγματικές)			
		τιμές			τιμές			
		0	53	106	0	53	106	
PV-1	P _{max} (W)	6.00	5.657	5.545	5.766	5.228	4.664	4.713
	I _{max} (A)	0.39						
	I _{sc} (A)	0.42	0.401	0.397	0.411	0.374	0.342	0.350
	V _{max} (V)	15.00						
	V _{oc} (V)	19.50	19.346	19.192	19.269	19.200	18.800	18.600
	FF (%)	73	72.9	72.8	72.8	72.8	72.5	72.4
	C (V/°C)	-0.077						
	A (m²)	0.0445						
	n (%)	13.49	13.3	13.2	3.3	12.3	11.1	10.8
	Δn (%)					-7.6	-15.9	-18.3
PV-2	P _{max} (W)	5.00	4.716	4.626	4.809	4.625	4.426	4.548
	I _{max} (A)	0.285						
	I _{sc} (A)	0.315	0.301	0.298	0.308	0.295	0.290	0.298
	V _{max} (V)	17.82						
	V _{oc} (V)	21.96	21.798	21.636	21.717	21.800	21.300	21.300
	FF (%)	72	71.9	71.8	71.9	71.9	71.7	71.7
	C (V/°C)	-0.081						
	A (m²)	0.0397						
	n (%)	12.60	12.4	12.3	12.4	12.2	11.8	11.7
	Δn (%)					-1.9	-4.3	-5.4
PV-3	P _{max} (W)	5.00	4.716	4.626	4.809	4.460	4.106	4.127
	I _{max} (A)	0.285						
	I _{sc} (A)	0.315	0.301	0.298	0.308	0.286	0.272	0.278
	V _{max} (V)	17.82						
	V _{oc} (V)	21.96	21.798	21.636	21.717	21.700	21.100	20.800
	FF (%)	72	71.9	71.8	71.9	71.9	71.5	71.4
	C (V/°C)	-0.081						
	A (m²)	0.0397						
	n (%)	12.60	12.4	12.3	12.4	11.8	10.9	10.6
	Δn (%)					-5.4	-11.2	-14.2

Μελετώντας τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών μετρήσεων στον Πίνακα 4.1, παρατηρείται πράγματι μια εμφανής υποβάθμιση της ηλεκτρικής απόδοσης των PV-1, PV-2 και PV-3, η οποία επαληθεύει την επίδραση τόσο των θερμικών κύκλων γήρανσης, όσο και των θερμών κηλίδων που διαγνώστηκαν βάσει της υπέρυθρης θερμογράφησης. Τα Σχήματα 4.6, 4.7 και 4.8 παρουσιάζουν τις καμπύλες εξέλιξης της ποσοστιαίας υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης από τους 0 (πριν την γήρανση) έως τους 106 (μετά την γήρανση) θερμικούς κύκλους, για τα PV-1, PV-2 και PV-3, αντίστοιχα, καθώς και τις βέλτιστες, πολυωνυμικές καμπύλες τάσης αυτών. Προκύπτει μάλιστα ότι, αν και τα τρία πλαίσια υποβλήθηκαν στην διαδικασία τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης, υπό διαφορετική “αφετηρία” κατάστασης, βλαβών και ηλεκτρικής απόδοσης, η καταγραφείσα υποβάθμιση εμφανίζει τα εξής – κοινά για όλα τα πλαίσια – χαρακτηριστικά:

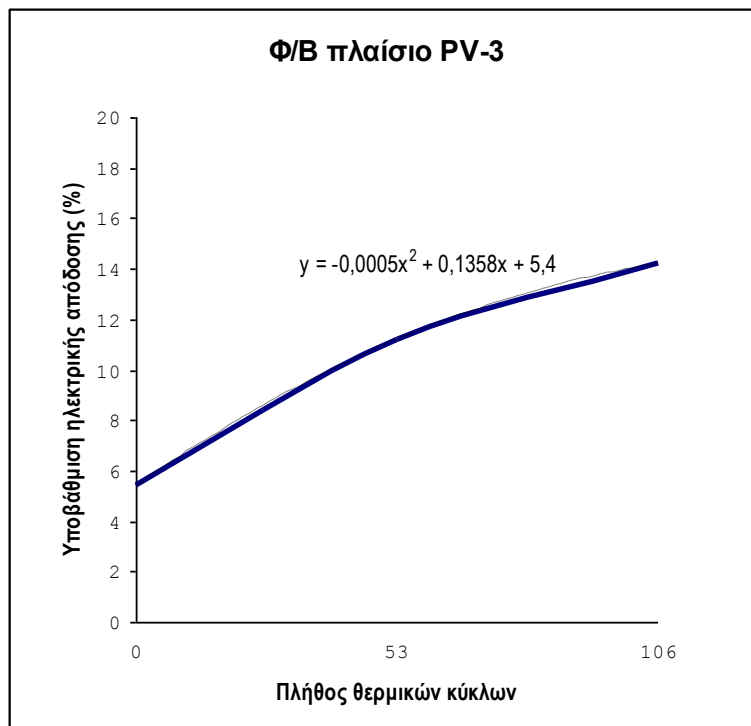
- Κατά το διάστημα μεταξύ 0 και 53 θερμικών κύκλων, ο ρυθμός υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος (κατά 4 φορές για το PV-1, κατά 2.5 φορές για τα PV-2 και PV-3) από τον αντίστοιχο για το διάστημα μεταξύ 53 και 106.
- Η υποβάθμιση της ηλεκτρικής απόδοσης μετά την ολοκλήρωση των 106 θερμικών κύκλων, είναι κατά προσέγγιση 2.5 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη πριν την εφαρμογή των θερμικών κύκλων.



Σχήμα 4.7 Εξέλιξη της ποσοστιαίας υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης του PV-1 από τους 0 (πριν την γήρανση) έως τους 106 (μετά την γήρανση) θερμικούς κύκλους



Σχήμα 4.8 Εξέλιξη της ποσοστιαίας υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης του PV-2 από τους 0 (πριν την γήρανση) έως τους 106 (μετά την γήρανση) θερμικούς κύκλους



Σχήμα 4.9 Εξέλιξη της ποσοστιαίας υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης του PV-3 από τους 0 (πριν την γήρανση) έως τους 106 (μετά την γήρανση) θερμικούς κύκλους

Στον Πίνακα 4.2, δίνονται οι περιβαλλοντικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την αρχική ρύθμιση της θερμοκάμερας (αντιστάθμιση της ατμόσφαιρας), τον υπολογισμό της αναμενόμενης θερμικής απόκρισης της επιφάνειας των ηλιακών κυψελών και την αναγωγή των κατασκευαστικών τιμών I_{sc} και V_{oc} κάθε πλαισίου (αντιστάθμιση των συνθηκών ηλεκτρικών μετρήσεων). Ως *INITIAL STATE*, *HALF-AGED* και *AGED* έχουν οριστεί αντίστοιχα οι μετρήσεις πριν την έναρξη, στο μέσο και κατόπιν ολοκλήρωσης της διαδικασίας γήρανσης. Η συνολική διάρκεια της διαδικασίας γήρανσης ανήλθε στις 480 ώρες (~20 ημέρες), με τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ των μετρήσεων του Πίνακα 6.2, να αντιστοιχεί στις 240 ώρες (ως *HALF-AGED* ορίστηκε το απόλυτο ήμισυ της συνολικής διάρκειας της διαδικασίας γήρανσης).

Πίνακας 4.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων και των ηλεκτρικών μετρήσεων της μελέτης.

Μέτρηση	INITIAL STATE	HALF-AGED	AGED
Θερμοκρασία κυψελών (°C) κατά την ηλεκτρική μέτρηση ($t < 5 \text{ min}$)	27	29	28
Θερμοκρασία αέρα (°C)	23	24	26
Σχετική υγρασία (%)	35	30	30
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	5,3	6	4,8
G_T (W/m ²)	955	945	978

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας οι υπολογιζόμενες τιμές συνοψίζονται ακολούθως:

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο PV1 με δύο θερμές κηλίδες

Θεωρητικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως βάσει κατασκευαστή: $I_{sc}=0.42\text{A}$

Μετρούμενο ρεύμα βραχυκυκλώσεως κάτω από πρότυπες συνθήκες: $I_{sc,m}=0.4\text{A}$

Θεωρητική τάση ανοικτού κυκλώματος βάσει κατασκευαστή: $V_{oc}=19.5\text{V}$

Μετρούμενη τάση ανοικτού κυκλώματος σε πρότυπες συνθήκες: $V_{oc,m}=21,96\text{V}$

Θεωρητικός βαθμός απόδοσης βάσει κατασκευαστή: 13.5%

Μετρούμενος βαθμός απόδοσης σε πρότυπες συνθήκες: 12,58%

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο PV2

Θεωρητικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως βάσει κατασκευαστή: $I_{sc}=0,315\text{A}$

Μετρούμενο ρεύμα βραχυκυκλώσεως κάτω από πρότυπες συνθήκες: $I_{sc,m}=0.3\text{A}$

Θεωρητική τάση ανοικτού κυκλώματος βάσει κατασκευαστή: $V_{oc}=21,96\text{V}$

Μετρούμενη τάση ανοικτού κυκλώματος σε πρότυπες συνθήκες: $V_{oc,m}=21,8\text{V}$

Θεωρητικός βαθμός απόδοσης βάσει κατασκευαστή: 12,6%

Μετρούμενος βαθμός απόδοσης σε πρότυπες συνθήκες: 12,51%

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο PV3 με μια θερμή κυλίδα

Θεωρητικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως βάσει κατασκευαστή: $I_{sc}=0.315A$

Μετρούμενο ρεύμα βραχυκυκλώσεως κάτω από πρότυπες συνθήκες: $I_{sc,m}=0.3A$

Θεωρητική τάση ανοικτού κυκλώματος βάσει κατασκευαστή: $V_{OC}=21,96V$

Μετρούμενη τάση ανοικτού κυκλώματος σε πρότυπες συνθήκες: $V_{OC,m}=21,3V$

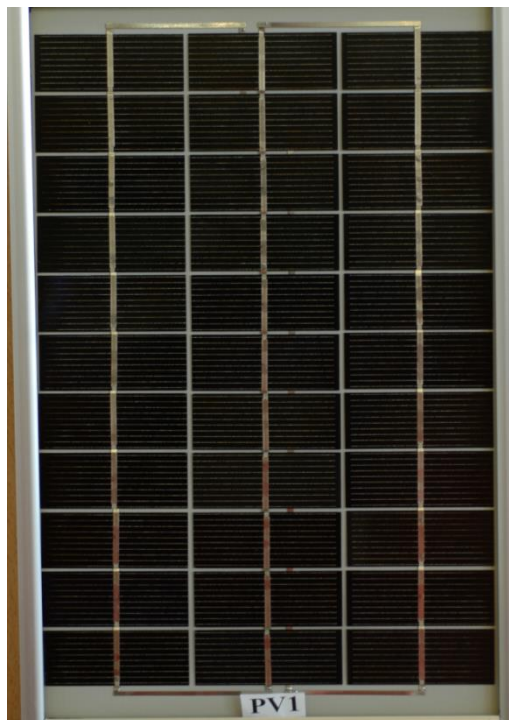
Θεωρητικός βαθμός απόδοσης βάσει κατασκευαστή: 12,6%

Μετρούμενος βαθμός απόδοσης σε πρότυπες συνθήκες: 12,2%

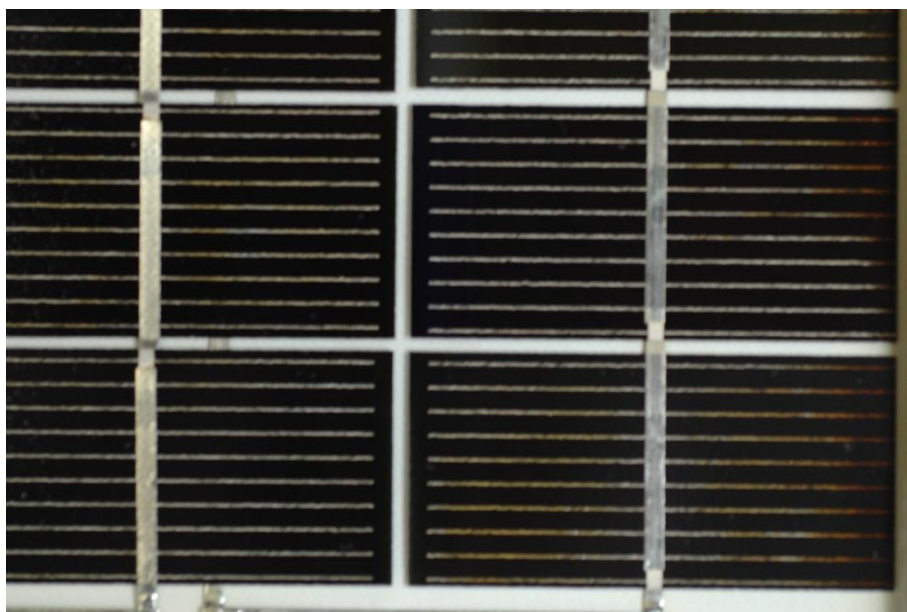
4.5 Οπτικές παρατηρήσεις

Εκτός από την εξέλιξη του θερμοκρασιακού προφίλ και της ηλεκτρικής απόδοσης των πλαισίων μελετήθηκε και η πιθανή επίπτωση των θερμικών κύκλων της επιταχυνόμενης γήρανσης στα μορφολογικά χαρακτηριστικά κάθε Φ/Β. Η οπτική παρατήρηση έγινε με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου στην Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Για τη λήψη χρησιμοποιήθηκε η φωτογραφική μηχανή Nikon D70 με φακό τύπου AF MICRO NIKKOR 60 mm . Στη συνέχεια, ακολουθούν οι φωτογραφίες για το κάθε πάνελ ξεχωριστά.

Στο Σχήμα 4.9 το Φ/Β πάνελ PV-1



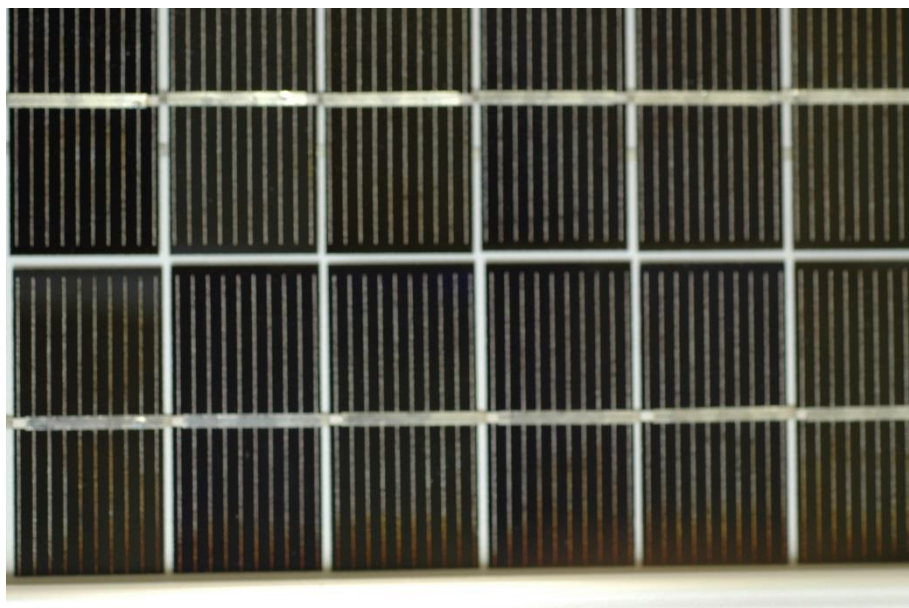
Σχήμα 4.10 Το Φ/Β δείγμα PV-1 πριν την έναρξη του πειράματος



Σχήμα 4.11 Εικόνα του PV-1 στο οποίο παρατηρείται εκτεταμένος αποχρωματισμός του EVA (καφέ χρώμα)



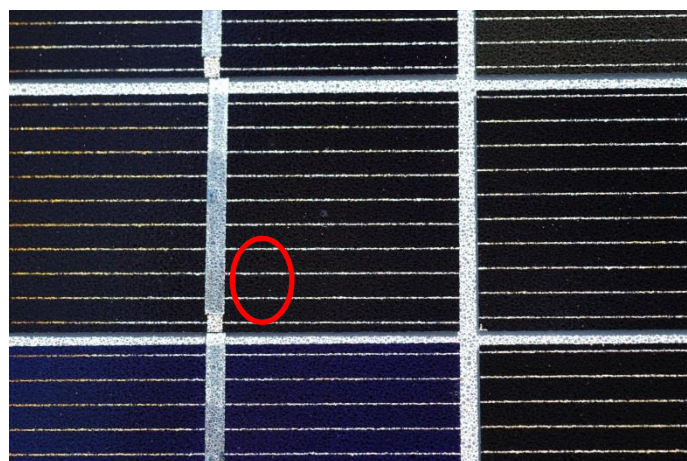
Σχήμα 4.12 Εικόνα του PV-1 σε τμήματα κυψελών με πιθανότητα μελλοντικής εμφάνισης όπου παρατηρούνται "χαλάρωση" της μεταλλικής διασύνδεσης



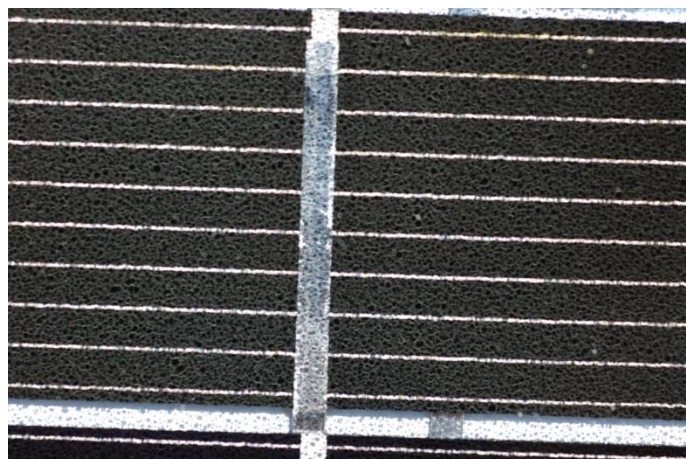
Σχήμα 4.13 Εικόνα του PV-1 σε τμήμα κυψέλης με θερμή κηλίδα, όπου παρατηρείται εκτεταμένη αλλοίωση του στρώματος ενθυλάκωσης EVA (κυανό χρώμα)

Όπως φαίνεται από τις εικόνες στο PV-1 μετά την ολοκλήρωση των 106 κύκλων παρουσιάζεται εκτεταμένος αποχρωματισμός του στρώματος ενθυλάκωσης του EVA (καφέ χρώμα). Επιπλέον, υπάρχουν περιοχές στις οποίες υπάρχει σοβαρή πιθανότητα εμφάνισης θερμής κηλίδας μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας επιταχυνόμενης γήρανσης αφού παρουσιάζονται σημεία χαλαρής σύνδεσης και αποχρωματισμού στο στρώμα ενθυλάκωσης.

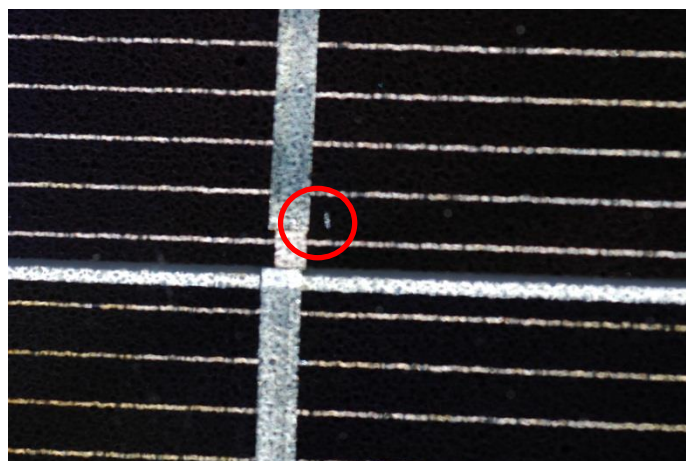
Για το μέσο της γήρανσης (53 κύκλοι) οι αντίστοιχες παρατηρήσεις φαίνονται στα σχήματα:



Σχήμα 4.14 Ελαττωματική Φ/Β κυψελίδα στο μέσον του πειράματος

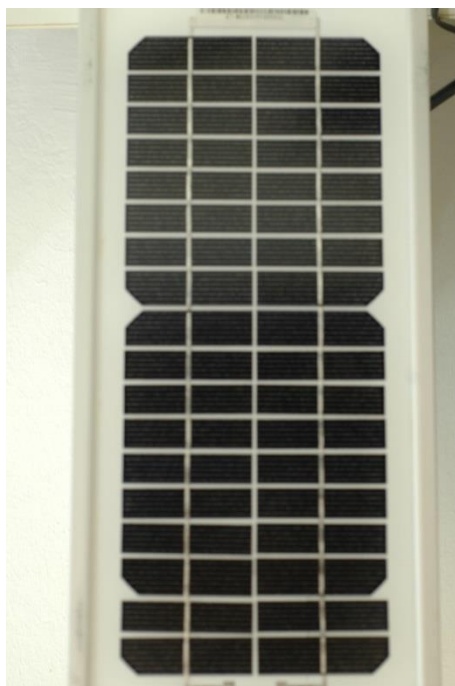


Σχήμα 4.15 Γκρίζες αποχρωματισμένες περιοχές όπου αρχίζουν και είναι εμφανείς οι πόροι του υλικού

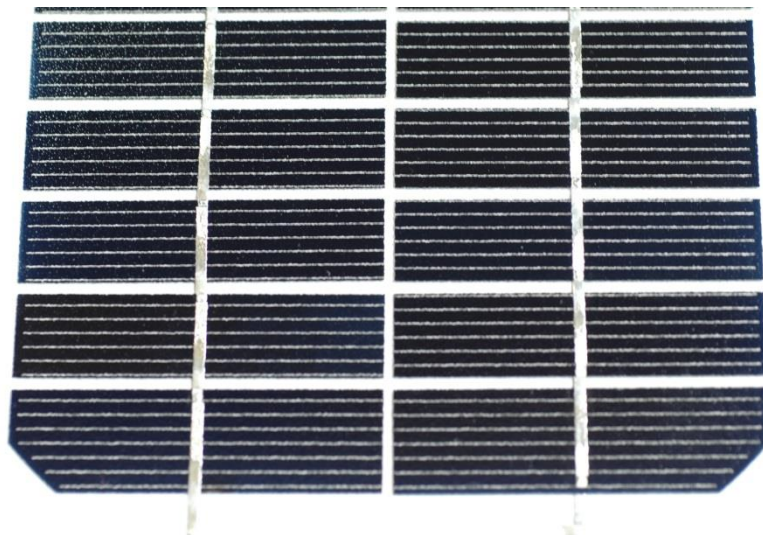


Σχήμα 4.16 Ελαττωματική κυψέλη με πιθανότητα εμφάνισης θερμής κηλίδας

Στα σχήματα 4.16-4.17 φαίνονται οι φωτογραφίες που ελήφθησαν για το Φ/Β πλαίσιο PV-3.



Σχήμα 4.17 Το Φ/Β πλαίσιο PV-3, πριν την έναρξη του πειράματος

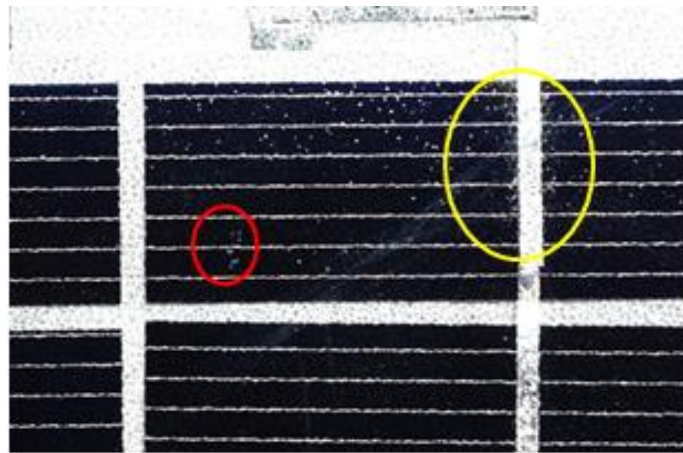


Σχήμα 4.18 Εικόνα του PV-3, σε τμήμα κυψέλης με θερμή κηλίδα, όπου παρατηρείται εκτεταμένη αλλοίωση του στρώματος ενθυλάκωσης EVA (κυανό χρώμα)

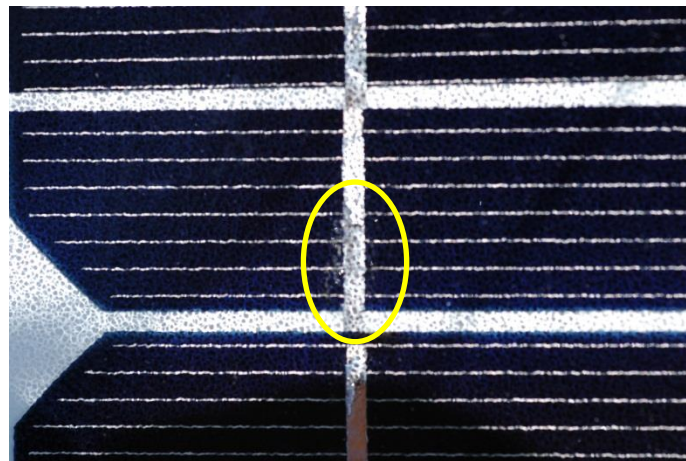
Όπως φαίνεται από τα σχήματα στο τμήμα της κυψέλης που έχει παρατηρηθεί με ανώμαλο θερμοκρασιακό προφίλ εμφανίζεται εκτεταμένη αλλοίωση του στρώματος ενθυλάκωσης.

Οι παρατηρούμενες αλλοιώσεις είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης των PV1 και PV3 όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως. Οι συγκεκριμένες αλλοιώσεις είναι το αποτέλεσμα της συνδυαστικής επίδρασης των ήδη υπαρχόντων κηλίδων και της επιταχυνόμενης γήρανσης.

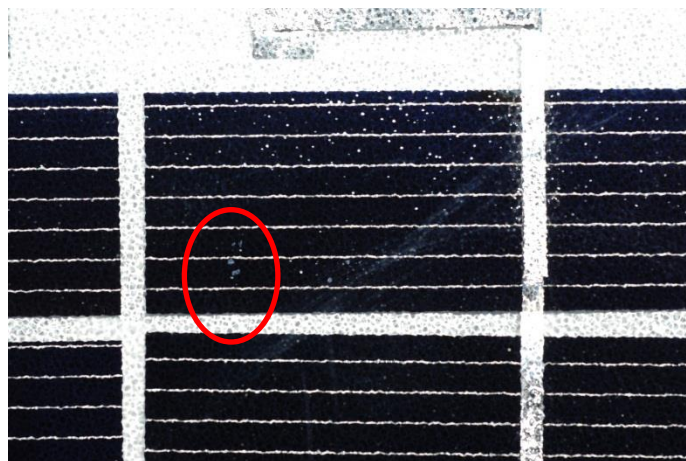
Αντίστοιχα στο μέσο της γήρανσης οι αντίστοιχες παρατηρήσεις που ελήφθησαν φαίνονται στα Σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 4.19 Με κόκκινο σημειώνεται ελαττωματική κυψέλη και με κίτρινο σημειώνεται πρόβλημα στις καλωδιώσεις



Σχήμα 4.20 Με κίτρινο σημειώνεται πρόβλημα στις καλωδιώσεις και παρατηρούνται ελαττώματα στην κατασκευή



Σχήμα 4.21 Με κόκκινο σημειώνεται ελαττωματική περιοχή στην ηλιακή κυψελίδα

4.6 Σύνοψη

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε η διαδικασία γήρανσης και τα αποτελέσματα της πειραματικής αυτής μελέτης που περιελάμβανε την εφαρμογή θερμικών κύκλων επιταχυνόμενης γήρανσης, προς την κατεύθυνση της πρόγνωσης της εξέλιξης βλαβών στην διάρκεια ζωής των Φ/Β πλαισίων και της επίδρασής τους στην αξιοπιστία και την τελική απόδοσή τους. Με βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής αυτής μελέτης εξαγάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών μετρήσεων απόδοσης των Φ/Β πλαισίων πριν την έναρξη, στο μέσο και μετά το πέρας της επιταχυνόμενης γήρανσης θερμικών κύκλων εμφανίζονται να είναι περισσότερο ενδεικτικά της γήρανσης των Φ/Β πλαισίων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των θερμικών εικόνων.
- Από την άλλη πλευρά, ωστόσο, τα αποτελέσματα των υπέρυθρων θερμογραφίσεων της μελέτης, σε αντίθεση με τις ηλεκτρικές μετρήσεις, παρείχαν πληροφορίες για την ακριβή θέση συγκεκριμένων βλαβών θερμών κηλίδων και τον τρόπο πιθανής μετάδοσής τους κατά τη γήρανση του κάθε πλαισίου.
- Οι εικόνες οπτικής μικροσκοπίας των Φ/Β πλαισίων μετά την εφαρμογή των θερμικών κύκλων επαλήθευσαν την ύπαρξη και την θέση συγκεκριμένων αλλοιώσεων και βλαβών στα στρώματα της δομής των Φ/Β πλαισίων, όπως αυτές είχαν εντοπιστεί από την ανάλυση των αντίστοιχων θερμικών εικόνων.
- Επίσης: i) ορίζοντας το PV-2 ως πλαίσιο αναφοράς, ii) θεωρώντας ότι η αναμενόμενη (φυσιολογική) ετήσια υποβάθμιση της ηλεκτρικής απόδοσης ενός τυπικού Φ/Β c-Si πλαισίου ανέρχεται στο 0.7% και iii) λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνολική ποσοστιαία υποβάθμιση $\Delta\eta$ της απόδοσης του PV-2 μετά την ολοκλήρωση των 103 θερμικών κύκλων ανήλθε στο 5.2%, μπορεί να εκτιμηθεί ότι η συγκεκριμένη συνολική δοκιμή επιταχυνόμενης γήρανσης προσεγγίζει μια αντίστοιχη φυσιολογική γήρανση ενός Φ/Β πλαισίου στο πεδίο, διάρκειας ~8

ετών. Διευκρινίζεται ότι, για τον συγκεκριμένο υπολογισμό, ως πλαίσιο αναφοράς ορίστηκε το PV-2 καθώς ήταν “καθαρό” από βλάβες και η ηλεκτρική απόδοσή του πριν την εφαρμογή των θερμικών κύκλων δεν εμφάνιζε σημαντική απόκλιση από την μέγιστη ηλεκτρική απόδοσή σε STC, λόγω της απουσίας βλαβών.

- Με άλλα λόγια, προκύπτει το συμπέρασμα ότι σε διάστημα 8 ετών έκθεσης των PV-1, PV-2 και PV-3 στο πεδίο, σύμφωνα με την πρόγνωση της μελέτης, θα προέκυπτε *πιθανή* μείωση της ηλεκτρικής απόδοσής τους, κατά 18.3%, 5.4% και 14.2% αντίστοιχα.

Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με την ανάλυση και σύνοψη αντίστοιχων μελετών ανά τον κόσμο, δεν υφίσταται ρεαλιστική δυνατότητα ακριβούς προσδιορισμού και αντιστοίχισης των ωρών επιταχυνόμενης γήρανσης με τα έτη φυσιολογικής φθοράς στο πεδίο, καθώς η τελευταία επηρεάζεται από πλήθος εξωτερικών παραγόντων, όπως η τεχνολογία του Φ/Β πλαισίου, η γεωγραφική τοποθεσία εγκατάστασης, οι κλιματολογικές συνθήκες, η συντήρηση, κ.α.

Βιβλιογραφία

- [1]. SKOPLAKI, E. A. P., J.A. 2009. On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A review of Efficiency/Power Correlations. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 83.
- [2]. LUQUE, A. A. H., S. 2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. *Wiley-Interscience, Chichester, United Kingdom*, .
- [3]. GREEN, M. A. 1981. Solar Cell Fill Factors: General Graph and Empirical Expressions. *Solid-State Electronics*, 24.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας για τη διάγνωση και πρόγνωση των βλαβών των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν τρία φωτοβολταϊκά πλαίσια για την αξιολόγηση των βλαβών τους με τη χρήση της θερμογραφίας.

Αποδείχθηκε ότι η θερμογραφία είναι ικανή μέθοδος που επιτρέπει την ανίχνευση και την απόδοση με μεγάλη ευαισθησία του θερμικού αποτυπώματος βλαβών με τη μορφή θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στις ηλιακές κυψέλες.

Στο σύνολο των εξεταζόμενων Φ/Β πλαισίων οι μετρούμενες θερμοκρασίες λειτουργίας κυμάνθηκαν πολύ κοντά στις αναμενόμενες ενώ επιβεβαιώθηκε η μειωμένη απόδοση και προβληματική λειτουργία των πλαισίων PV1 και PV3 που παρουσίαζαν θερμές κηλίδες στην επιφάνειά τους.

Θα μπορούσε να ειπωθεί πως ο σημαντικότερος περιορισμός της υπέρυθρης θερμογραφίας ως προς τη διάγνωση των Φ/Β πλαισίων είναι πως απαιτεί τον ακριβή προσδιορισμό της αιτίας των βλαβών γεγονός που δεν μπορεί πάντα να επιτευχθεί με την οπτική παρατήρηση. Επιπλέον οι μετρήσεις της θερμογραφίας εξαρτώνται άμεσα από τις συνθήκες στις οποίες πραγματοποιείται η μέτρηση και από την ύπαρξη του γυαλιού στο μπροστινό τμήμα του Φ/Β με αποτέλεσμα να γίνεται πολλές φορές η μέτρηση υπό γωνία και να υπάρχει απώλεια στην ακρίβεια της μέτρησης.

Μελλοντική έρευνα

Βέβαια, όπως έγινε αντιληπτό με τα αποτελέσματα των διαγνωστικών μελετών, η υπέρυθρη θερμογραφία εμφανίζει υψηλή ευαισθησία στην ανίχνευση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και “ανωμαλιών”, οι οποίες μάλιστα συχνά ανιχνεύονται πρόωρα, προσφέροντας προοπτική εφαρμογής όχι μόνο διαγνωστικού ελέγχου σε υπάρχουσες βλάβες, αλλά και – υπό προϋποθέσεις – προγνωστικού ελέγχου, πριν η βλάβη εξελιχθεί σε μη αναστρέψιμη, καταστροφική αστοχία. Έτσι λοιπόν, σε επίπεδο πρόγνωσης της εξέλιξης και της επίδρασης βλαβών στην διάρκεια ζωής των Φ/Β πλαισίων, καθώς και στην αξιοπιστία και στην τελική απόδοσή τους, η δυναμική της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας αποτιμήθηκε με την εκπόνηση πειραματικής μελέτης, σκοπός της οποίας ήταν η διερεύνηση της εξέλιξης συγκεκριμένων βλαβών στον χρόνο, μέσα από την σύγκριση μετρήσεων υπέρυθρης θερμογραφίας, ηλεκτρικής απόδοσης και μορφολογικών δεδομένων, πριν και μετά την εφαρμογή τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης σε Φ/Β πλαίσια. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, όπως αυτά παρατέθηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, μπορούν να συνοψιστούν τα εξής συμπεράσματα:

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις απόδοσης των Φ/Β πλαισίων διαφαίνονται περισσότερο ενδεικτικές της γήρανσης των Φ/Β πλαισίων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των μετρήσεων υπέρυθρης θερμογραφίας, ως προς την διακύμανση του επιπέδου του ΔT , στα εξελισσόμενα στον χρόνο “προβληματικά” σημεία.

Από την άλλη πλευρά, η υπέρυθρη θερμογραφία, σε αντίθεση με τις ηλεκτρικές μετρήσεις, αποδεικνύεται αποτελεσματική στο να παρέχει πληροφορίες για την ακριβή θέση συγκεκριμένων βλαβών θερμών κηλίδων και τον τρόπο πιθανής μετάδοσής τους κατά τη γήρανση του κάθε πλαισίου. Εικόνες οπτικών παρατηρήσεων (λ.χ. οπτική μικροσκοπία) των Φ/Β πλαισίων, πριν, κατά την διάρκεια και μετά την εφαρμογή οποιασδήποτε δοκιμής επιταχυνόμενης γήρανσης, δύνανται να υποδεικνύουν και επαληθεύουν την ύπαρξη και την θέση συγκεκριμένων αλλοιώσεων και βλαβών στα στρώματα της δομής των Φ/Β πλαισίων.

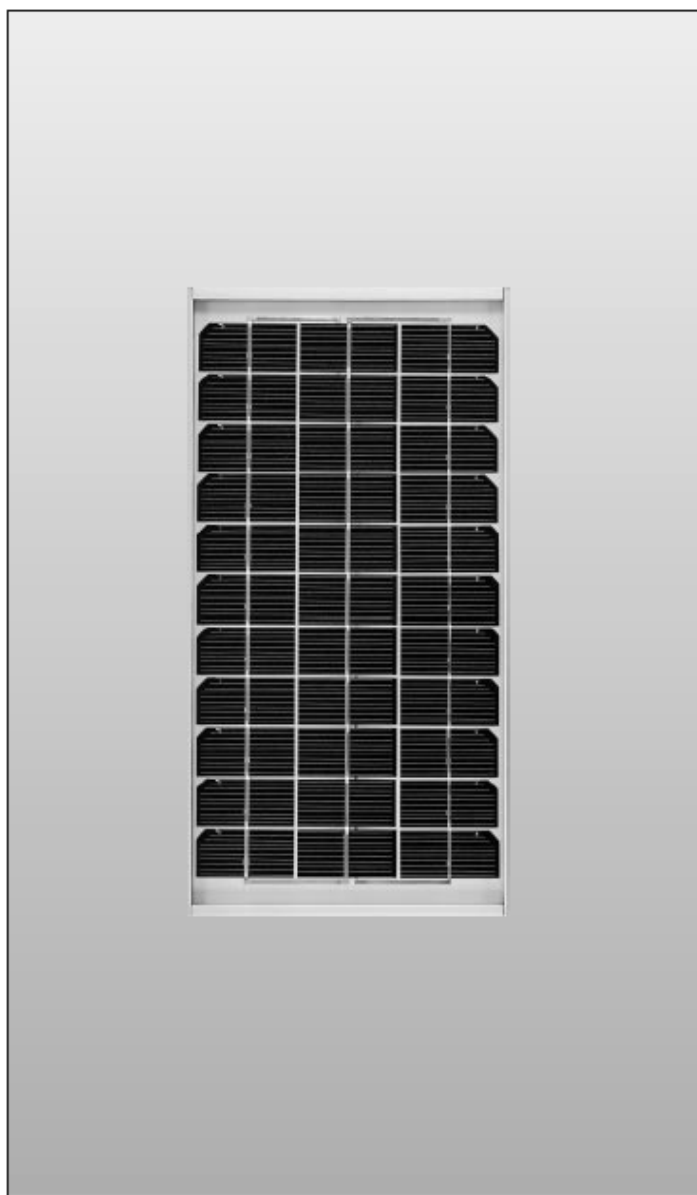
Η πρόγνωση του ποσοστού υποβάθμισης της απόδοσης και – ενδεχομένως – της εξέλιξης του θερμικού αποτυπώματος βλαβών “προβληματικών” Φ/Β πλαισίων, στην διάρκεια πραγματικού χρόνου έκθεσής τους στο πεδίο, μπορεί κατ’ εκτίμηση να διαμορφωθεί βάσει: i) του μετρούμενου (πραγματικού) ποσοστού υποβάθμισης της απόδοσης για “υγιή” Φ/Β πλαίσια (πλαίσια αναφοράς), μετά την ολοκλήρωση δοκιμής επιταχυνόμενης γήρανσης, και στη συνέχεια ii) συσχέτισής αυτού του ποσοστού με την αντίστοιχη θεωρητική τιμή ετήσιας υποβάθμισης ADR (συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0.7% και 1%). Έτσι, για παράδειγμα, σε μία προγνωστική μελέτη επιταχυνόμενης γήρανσης “προβληματικών” και “υγιών” Φ/Β πλαισίων (έστω με $ADR=0.7\%$), μια μετρούμενη τιμή συνολικής υποβάθμισης της απόδοσης των “υγιών” πλαισίων ίση με 7%, συνεπάγεται εκτιμώμενη πρόγνωση βλαβών και υποβάθμιση της απόδοσης των προβληματικών πλαισίων, αντίστοιχη με 10 έτη πραγματικού χρόνου έκθεσής τους στο πεδίο.

Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με την σύνοψη αντίστοιχων μελετών ανά τον κόσμο, δεν υφίσταται ρεαλιστική δυνατότητα ακριβούς προσδιορισμού και αντιστοίχησης του συνολικού χρόνου επιταχυνόμενης γήρανσης με τα έτη φυσιολογικής φθοράς στο πεδίο, καθώς η τελευταία επηρεάζεται από πλήθος εξωτερικών παραγόντων, όπως η τεχνολογία του Φ/Β πλαισίου, η τοπολογία της εγκατάστασης, οι κλιματολογικές συνθήκες, οι διαδικασίες συντήρησης του συστήματος, κ.α.

Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι οποιαδήποτε προσπάθεια μελέτης πρόγνωσης βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, εμφανίζει τον σημαντικότερο περιορισμό της χρήσης είτε σημαντικού όγκου δεδομένων και αναφορών πραγματικής γήρανσης στο πεδίο, είτε δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει εν γένει αβεβαιότητα ακρίβειας της πρόγνωσης. Στην πρώτη περίπτωση, η θεωρητική προσέγγιση βασίζεται σε δεδομένα άλλων εγκαταστάσεων συστημάτων και, πιθανώς, διαφορετικών τύπων βλαβών, κλιματολογικών και τοπολογικών συνθηκών, κ.α., και όχι των υπό εξέταση Φ/Β πλαισίων. Στην δεύτερη περίπτωση, οποιαδήποτε τεχνητή επιταχυνόμενη γήρανση οδηγεί αναπόφευκτα σε μία προσέγγιση πρόγνωσης βλαβών καταστροφικού χαρακτήρα, καθώς προϋποθέτει την διακοπή λειτουργίας και αφαίρεση των Φ/Β πλαισίων από την εγκατάσταση, καθώς και την εφαρμογή πιθανώς καταστροφικών δοκιμών όπως λ.χ. οι θερμικοί κύκλοι και οι μηχανικές καταπονήσεις.

Παράρτημα

Solar module SM6



When it comes to reliable and environmentally-friendly generation of electricity from sunlight, solar modules from Siemens provide the perfect solution. Manufactured in compliance with the most stringent quality standards, Siemens Solar modules are designed to withstand the toughest environmental conditions and are characterized by their long service life. Siemens Solar modules are covered by a 10-year limited warranty on power output – your guarantee of trouble-free solar power generation.

PowerMax® technology

Siemens' proprietary PowerMax® technology optimizes the energy production of individual cells and solar modules for all types of environmental conditions. PowerMax® process optimization includes a special refining technique for ingots, a clean room semiconductor grade production process, and a multi-stage proprietary TOPS™ (Texture Optimized Pyramidal Surface) process. The TOPS process incorporates the formation of textured pyramids on the surface of the solar cell. These pyramids are then specially treated to passivate the surface which optimizes the cell's optical properties for maximum absorption of photons from the sun's light. TOPS also maximizes photon absorption from direct and diffused light (typical under cloudy conditions). This means that light absorption is especially high, even at low light levels. Siemens PowerMax® solar cells deliver maximum energy throughout the day.

Solar module

Model:	SM6
Rated power:	6 Watts
Limited warranty:	10 Years

Certifications and Qualifications

- UL-Listing 1703
- MIL Standard 883C
- JPL Specification No. 5101-161
- CE mark
- FM Certification

Σχήμα Π1. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών φ/β πλαισίου Siemens™ SM6 (σελίδα 1)

Intelligent module design

- All cells are electrically matched to assure the greatest power output possible.
- Ultra-clear tempered glass provides excellent light transmission and protects from wind, hail, and impact.
- Tension and corrosion-resistant anodized aluminum module frame ensures dependable performance, even through harsh weather conditions and in marine environments.

High quality

- Every module is subject to final factory review, inspection, and testing to assure compliance with electrical, mechanical, and visual criteria.
- 30 PowerMax[®] single-crystalline solar cells deliver excellent performance even in reduced light or poor weather conditions.
- Cell surfaces are treated with the Textured Optimized Pyramidal Surface (TOPS[™]) process to generate more energy from available light.
- Solar cells are laminated between a multi-layered polymer backsheet and layers of ethylene vinyl acetate (EVA) for environmental protection, moisture resistance, and electrical isolation.
- Durable back sheet provides the module underside with protection from scratching, cuts, breakage, and most environmental conditions.
- Laboratory tested and certified for a wide range of operating conditions.
- Ground continuity of less than 1 ohm for all metallic surfaces.
- Manufactured in ISO 9001 certified facilities to exacting Siemens quality standards.

Easy installation

- Lightweight aluminum frame and pre-drilled mounting holes for easy installation.
- Sealed terminal cover includes color-coded lead wires for fast, safe, and easy field connections.

Performance warranty

- 10 Year limited warranty on power output.

Further information on solar products, systems, principles, and applications is available in the Siemens Solar product catalog.

Siemens modules are recyclable.

Siemens Solar GmbH

A joint venture of
Siemens AG and Bayernwerk AG
Postfach 46 07 05
D-80915 München
Germany

Solar module SM6

Electrical parameters		
Maximum power rating P_{max}	[W _p] ¹⁾	6
Rated current I_{MPP}	[A]	0.39
Rated voltage V_{MPP}	[V]	15.0
Short circuit current I_{SC}	[A]	0.42
Open circuit voltage V_{OC}	[V]	19.5
Thermal parameters		
NOCT ²⁾	[°C]	45±2
Temp. coefficient: short-circuit current		1.2 mA/°C
Temp. coefficient: open-circuit voltage		-0.77 V/°C
Qualification test parameters ³⁾		
Temperature cycling range	[°C]	-40 to +85
Humidity freeze, Damp heat	[% RH]	85
Maximum system voltage	[V]	25
Wind loading PSF	[N/m ²]	50 [2400]
Maximum distortion ³⁾	[°]	1.2
Hailstone impact	Inches [mm]	1.0 [25]
	MPH [m/s]	52 [v=23]
Weight	Pounds [kg]	2.2 [1.0]

¹⁾ W_p (Watt peak) = Peak power
(Minimum W_p = 5 Watts)
Air Mass AM = 1.5
Irradiance $E = 1000 \text{ W/m}^2$
Cell temperature $T_c = 25^\circ\text{C}$

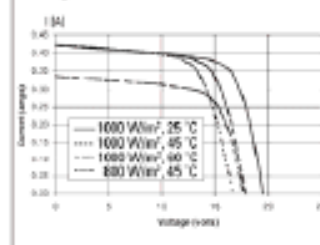
²⁾ Normal Operating Cell Temperature at:
Irradiance $E = 800 \text{ W/m}^2$
Ambient temperature $T_a = 20^\circ\text{C}$
Wind speed $V_{ws} = 1 \text{ m/s}$

³⁾ Diagonal lifting of module plane

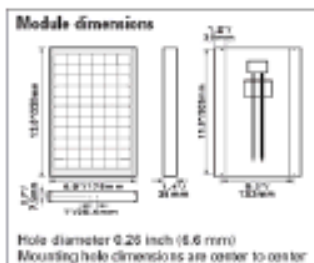
⁴⁾ Per IEC 1215 test requirements

⁵⁾ 12 Volt configuration

Voltage-current characteristic⁴⁾



Your address for photovoltaics from Siemens Solar



Hole diameter 0.25 inch (6.4 mm)

Mounting hole dimensions are center-to-center



Status 3/96 - Subject to modification

Siemens Showa Solar Pte. Ltd.

Blk. 164 Kallang Way
#05-14/15 Kallang Ayer Industrial Park
Singapore 349248
Tel: 65-842-3886
Fax: 65-842-3887



Printed in U.S.A.

Order No. 019820, Rev. C

Σχήμα Π2. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών φ/β πλαισίου SiemensTM SM6 (σελίδα 2)



Photovoltaics is our passion

ET Module

ET-M53605 5Wp

EFFICIENCY

- Low voltage-temperature coefficient ensures high-temperature operation
- Exceptional low-light performance combined with high sensitivity to light enables excellent energy delivery

MATERIALS

- Highest quality, high-transmission tempered glass provides enhanced stiffness and impact resistance
- Advanced EVA encapsulation system with triple-layer back sheet meets the most stringent safety requirements for high-voltage operation
- A sturdy, anodized aluminum frame allows modules to be easily roof-mounted with a variety of standard mounting systems
- Ultra reliable bypass diodes prevent damage through overheating due to shaded or defective cells

BENEFITS

- Manufactured in an ISO 9001:2000 certified plant
- High efficiency, high safety, high reliability
- Output power tolerance of $\pm 3\%$
- 25-year limited warranty on power output, 5-year limited warranty on materials and workmanship



Σχήμα Π3. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών φ/β πλαισίου ETSolar™ ET-M53605 (σελίδα 1)

ET Module

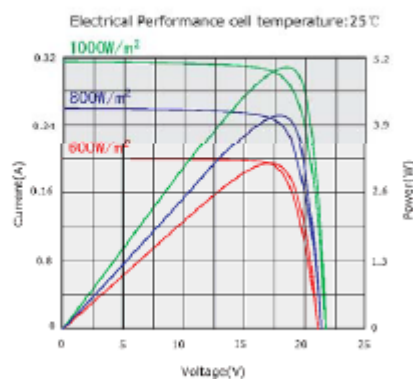
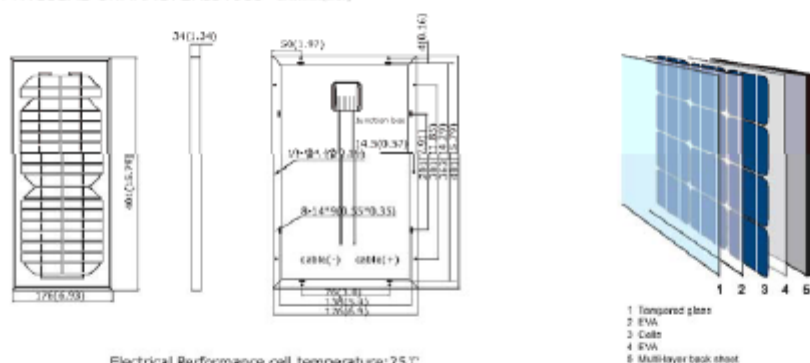
ET-M53605

SPECIFICATIONS

Model type	ET-M53605
Peak power (Pmax)	5W
Weight	1.2kg (2.6lbs)
Dimensions	401 x 176 x 24mm 15.8 x 6.9 x 1.3inch
Maximum power voltage (Vmp)	17.82V
Maximum power current (Imp)	0.285A
Open circuit voltage (Voc)	21.96V
Short circuit current (Isc)	0.315A
Maximum system voltage	DC 1000V
Temp. Coeff. of Isc (TK Isc)	0.058 %/°C
Temp. Coeff. of Voc (TK Voc)	-0.367 %/°C
Temp. Coeff. of Pmax (TK Pmax)	-0.485 %/°C
Normal Operating Cell Temperature	44.4±2°C

Note: the specifications are obtained under the Standard Test Conditions (STC): 1000 W/m² solar irradiance, 3.5 Air Mass, and cell temperature of 25°C.

PHYSICAL CHARACTERISTICS Unit:mm(inch)



ET Solar

Available from: www.solar-wind.co.uk

Σχήμα Π4. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών φ/β πλαισίου ETSolar™ ET-M53605 (σελίδα 2)



Σαράντης Α. Παυλίδης

Τίτλος: Τεχνικές Επιταχυνόμενης Γήρανσης Φ/Β πλαισίων

ο ref ΔΕ 012014

