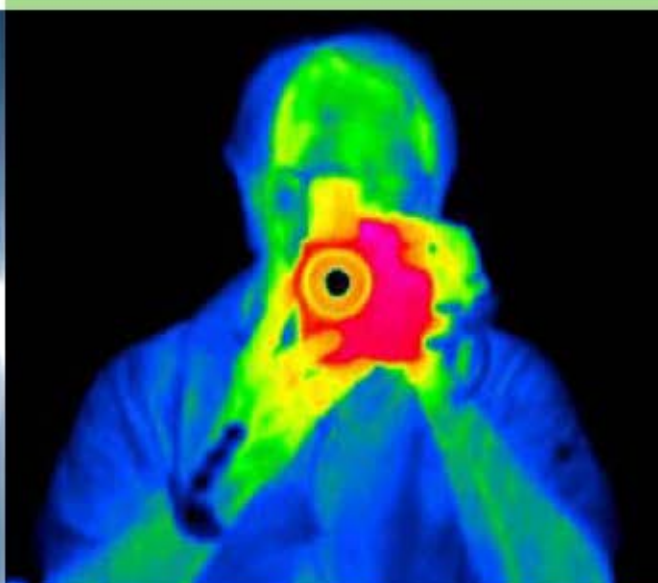




Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Democritus University of Thrace

2013

Διδακτορική Διατριβή



Προηγμένες Τεχνολογίες
Διάγνωσης-Πρόγνωσης Βλαβών
σε Μηχανολογικές Κατασκευές
με Χρήση Εποπτικών Μεθόδων:
Περίπτωση Υπέρυθρης Θερμογραφίας

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης
Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας



Ιωάννης Α. Τσανάκας

Επιβλέπων: Παντελής Ν. Μπότσαρης
Αναπληρωτής Καθηγητής ΔΠΘ



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Democritus University of Thrace

2013

Διδακτορική Διατριβή



Προηγμένες Τεχνολογίες
Διάγνωσης-Πρόγνωσης Βλαβών
σε Μηχανολογικές Κατασκευές
με Χρήση Εποπτικών Μεθόδων:
Περίπτωση Υπέρυθρης Θερμογραφίας

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης
Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας



Ιωάννης Α. Τσανάκας

Επιβλέπων: Παντελής Ν. Μπότσαρης
Αναπληρωτής Καθηγητής ΔΠΘ

Αντίτυπο Διδακτορικής Διατριβής η οποία υποβλήθηκε τον Φεβρουάριο του 2013,
στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης της Πολυτεχνικής Σχολής Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης,
για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του **Διδακτορικού Τίτλου**.

*Original copy of Doctoral Dissertation, submitted in February 2013,
to the Department of Production Engineering and Management, School of Engineering, Democritus University of Thrace
in partial fulfillment of the requirements for the **degree of Doctor of Philosophy (PhD)**.*



Ιωάννης Α. Τσανάκας

BSc/MSc Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΔΠΘ

Copyright © Ιωάννης Α. Τσανάκας, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος / All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Διατριβής, 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 στην χρήση της Διατριβής για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτήν τη Διατριβή εκφράζουν τον συγγραφέα δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

**ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΞΑΝΘΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ-ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΟΠΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ: ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ
ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννης Α. Τσανάκας

Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Παντελής Ν. Μπότσαρης

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. **Π.Ν. Μπότσαρης**, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πολυτεχνική Σχολή ΔΠΘ
2. **Χ. Αραπατσάκος**, Καθηγητής, Πολυτεχνική Σχολή ΔΠΘ
3. **Α. Γαστεράτος**, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πολυτεχνική Σχολή ΔΠΘ
4. **Α. Μοροπούλου**, Καθηγήτρια, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ
5. **Ι. Λυγούρας**, Καθηγητής, Πολυτεχνική Σχολή ΔΠΘ
6. **Ι.Λ. Μπακούρος**, Αναπληρωτής Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
7. **Γ. Γκαϊντατζής**, Επίκουρος Καθηγητής, Πολυτεχνική Σχολή ΔΠΘ

ΞΑΝΘΗ, 2013

στον παππού μου



Πρόλογος

Με την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας κατά τις τελευταίες δεκαετίες, οι μηχανολογικές κατασκευές τείνουν να γίνονται ολοένα και πολυπλοκότερες, με αποτέλεσμα να υπόκεινται σε αντίστοιχα σύνθετες βλάβες ή/και αστοχίες που επηρεάζουν αρνητικά την αξιοπιστία, την διαθεσιμότητα και την ασφαλή λειτουργία τους. Τέτοιες κατασκευές απαντώνται σε ιδιαίτερα κρίσιμους – οικονομικά και τεχνικά – τομείς, όπως οι μηχανουργικές κατεργασίες, τα συστήματα παραγωγής και μεταφορών, ο ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός και τα συστήματα παραγωγής ενέργειας (και, προσφάτως, ανανεώσιμων μορφών ενέργειας). Αυτός ο κρίσιμος μηχανολογικός εξοπλισμός, απαιτείται να είναι διαθέσιμος όταν χρειάζεται και, κατά συνέπεια πλέον, να συντηρείται όχι μέσω πρακτικών προγραμματισμένης ή επιδιορθωτικής συντήρησης (οι οποίες συνεπάγονται αναπόφευκτες διακοπές λειτουργίας) αλλά με δυναμικό τρόπο, βάσει της τρέχουσας κατάστασης και λειτουργίας του. Με αυτά τα δεδομένα, η αντίστοιχη διεθνής έρευνα εγκαταλείπει την πρωταρχική, συμβατική προσέγγιση της *επιδιόρθωσης κατόπιν της αστοχίας* (“fix-it-when-it-breaks”), στρεφόμενη σε προσεγγίσεις *επιδιόρθωσης προ* (ή *για την αποφυγή*) *της αστοχίας* (“fix-it-before-it-breaks”) του κρίσιμου μηχανολογικού εξοπλισμού.

Προς την κατεύθυνση αυτή, η εν λειτουργία (on-line) και σε πραγματικό χρόνο (real-time) παρακολούθηση της κατάστασης (condition monitoring, CM) ενός εξοπλισμού, με σκοπό την διάγνωση και την πρόγνωση βλαβών, αποδεικνύεται καταλυτικής σημασίας για την αποφυγή συμβάντων καταστροφικών αστοχιών. Η υιοθέτηση, λοιπόν, συστημάτων CM και διάγνωσης βλαβών, σε συνδυασμό και συνεργασία με μία ολοκληρωμένη φιλοσοφία και αρχιτεκτονική συστημάτων πρόγνωσης και διαχείρισης της “υγείας” (prognosis and health management, PHM) ενός εξοπλισμού, αποτελούν θεμελιώδη εργαλεία, και συνάμα προκλήσεις, για την επίτευξη της αποτελεσματικότερης δυνατής στρατηγικής συντήρησης.

Ως “απάντηση” στην εξέλιξη πολύπλοκων μηχανολογικών κατασκευών και στην εμφάνιση αυτών των προκλήσεων, η συνακόλουθη εξέλιξη των διαγνωστικών/προγνωστικών λογικών συστημάτων (diagnostic/prognostic reasoning systems), εστίασε στην ανάγκη εντοπισμού και απομόνωσης εκείνου του τμήματος του εξοπλισμού που αποτελεί την πηγή (ή την αιτία) της εκάστοτε βλάβης και, φυσικά, της ενδεχόμενης αστοχίας. Με τον τρόπο αυτό, ο υπεύθυνος συντήρησης δύναται να αφαιρέσει το “προβληματικό” στοιχείο και να επιδιορθώσει (με βεβαιότητα πλέον) την κατάσταση βλάβης σε πραγματικό χρόνο και, συχνά, χωρίς την προϋπόθεση διακοπής λειτουργίας του εξοπλισμού, εξασφαλίζοντας παραγωγικό και οικονομικό όφελος. Ωστόσο, αν και σε αρκετές περιπτώσεις αυτή η στρατηγική εφαρμόζεται επιτυχώς, υπάρχουν ιδιαίτερες καταστάσεις στις οποίες αυτό δεν είναι εφικτό χωρίς την προσθήκη αισθητήρων και, συνακόλουθα, επιπλέον εξοπλισμού. Φυσικά, κάτι τέτοιο αυξάνει τον αριθμό



των στοιχείων που ενδέχεται να αστοχήσουν και ενίοτε δυσκολεύει επιπλέον την προσπάθεια συντήρησης. Με άλλα λόγια, υπάρχουν, ξεκάθαρα, περιπτώσεις στις οποίες η προσθήκη υλικού (hardware) αποδεικνύεται ευεργετική, πλην όμως τα οφέλη από μια βελτιωμένη ικανότητα απομόνωσης βλαβών θα πρέπει να σταθμιστούν έναντι του ενδεχόμενου μείωσης της αξιοπιστίας και αύξησης του κόστους και του βάρους του συνολικού εξοπλισμού. Εστιάζοντας σε αυτόν τον προβληματισμό, η σταδιακή υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών με την αξιοποίηση εποπτικών μεθόδων, προβάλλει ως εξαιρετική ερευνητική πρόκληση για ορισμένες εφαρμογές, καθώς οι συγκεκριμένες μέθοδοι – όπως θα εξηγηθεί αναλυτικότερα στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή – δίνουν άμεση εικόνα της πραγματικής βλάβης, με την ελάχιστη δυνατή χρήση αισθητηρίων.

Με πρωταρχικό κίνητρο αυτήν την πρόκληση, σκοπός της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η ποιοτική και ποσοτική αποτίμηση του δυναμικού αξιοποίησης της υπέρυθρης θερμογραφίας, ως εποπτικής μεθόδου, στην διάγνωση και πρόγνωση βλαβών σε μηχανολογικές κατασκευές, με βασική στόχευση και αντικείμενο εφαρμογής τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πλαίσια. Η δομή αυτής της Διατριβής διαρθρώνεται σε 6 ξεχωριστά Κεφάλαια.

Στο 1^ο Κεφάλαιο, αποσαφηνίζονται βασικές έννοιες και καταγράφεται το θεωρητικό και ερευνητικό υπόβαθρο καθώς και οι ενδεχόμενες ερευνητικές προοπτικές στο ευρύ πεδίο των τεχνολογιών και των συστημάτων διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών στις μηχανολογικές κατασκευές. Στα πλαίσια αυτής της καταγραφής, γίνεται εκτενής αναφορά στο ρόλο και στη σημασία των βημάτων που συνθέτουν ένα τυπικό σύστημα διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών: τις μεθόδους παρακολούθησης, τις τεχνικές επεξεργασίας σήματος και τα διαγνωστικά και προγνωστικά εργαλεία. Ιδιαίτερη δε μνεία γίνεται για τις εποπτικές μεθόδους παρακολούθησης όπου εντάσσεται και η υπέρυθρη θερμογραφία, η οποία αποτελεί, ως μέθοδος, το αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης Διδακτορικής Διατριβής. Τέλος, παρατίθενται και εξηγούνται τα κίνητρα και οι λόγοι επιλογής της περίπτωσης των Φ/Β πλαισίων ως μηχανολογική κατασκευή και αντικείμενο εφαρμογής αυτής της Διατριβής.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει την δομή, λειτουργία και μοντελοποίηση των Φ/Β πλαισίων, με έμφαση στα Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου. Συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος του Κεφαλαίου παρατίθενται οι τυπικές κατασκευαστικές και λειτουργικές παράμετροι του βασικότερου στοιχείου ενός Φ/Β πλαισίου: της ηλιακής κυψέλης. Παραμένοντας σε επίπεδο ηλιακής κυψέλης, ξεχωριστά μελετώνται θέματα ηλεκτρικής απόδοσης των Φ/Β πλαισίων και διακύμανσής της σε σχέση τόσο με εξωτερικούς όσο και με εσωτερικούς παράγοντες. Σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου, το δεύτερο μέρος του Κεφαλαίου εστιάζει στα ηλεκτρικά και θερμικά χαρακτηριστικά και στις οπτικές ιδιότητες των Φ/Β πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου, καθώς και στην συμπεριφορά της απόδοσής τους σε συνθήκες πεδίου. Τέλος, βάσει αυτής της ανάλυσης, τόσο σε επίπεδο ηλιακής κυψέλης, όσο και σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου, στο τρίτο μέρος αυτού του Κεφαλαίου παρουσιάζεται συνοπτικά το αναγκαίο



θεωρητικό (μαθηματικό και φυσικό) υπόβαθρο που σχετίζεται με την ηλεκτρική και την θερμοδυναμική συμπεριφορά των Φ/Β πλαισίων.

Στο 3^ο Κεφάλαιο, παρουσιάζονται η φύση, τα αίτια και τα αποτελέσματα των κυριότερων βλαβών σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου, όπως αυτές καταγράφηκαν στην υφιστάμενη σχετική βιβλιογραφία καθώς και στα δεδομένα και στα ιστορικά εγκαταστάσεων Φ/Β συστημάτων, σε παγκόσμια κλίμακα. Ως βασικό αντικείμενο εφαρμογής της συγκεκριμένης Διδακτορικής Διατριβής, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε βλάβες που πρωτίστως σχετίζονται με Φ/Β πλαίσια τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου. Συγκεκριμένα, από ερευνητικής άποψης, σε αυτό το Κεφάλαιο προσδιορίζονται και σκιαγραφούνται εκείνοι οι τύποι βλαβών, που επιφέρουν αλλαγή στο θερμικό αποτύπωμα των Φ/Β πλαισίων και, συνεπώς, μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλοι για διάγνωση ή/και πρόγνωση με την εφαρμογή της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Κλείνοντας το συνολικό θεωρητικό μέρος αυτής της Διατριβής, το 4^ο Κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη στο βασικό θεωρητικό και πρακτικό υπόβαθρο της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας. Συγκεκριμένα, καλύπτονται θέματα μεταφοράς θερμότητας και αλληλεπίδρασης της θερμικής ακτινοβολίας με την ύλη ενώ αποσαφηνίζονται σημεία σημαντικά για την σωστή προετοιμασία και κατανόηση μιας υπέρυθρης ραδιομέτρησης, όπως ο συντελεστής ικανότητας εκπομπής οι εξωτερικές συνθήκες ατμόσφαιρας και φόντου. Τέλος, ιδιαίτερη αναφορά γίνεται σε θέματα εξοπλισμού, προσεγγίσεων, εφαρμογών υπέρυθρης ραδιομέτρησης, επεξεργασίας θερμικών εικόνων καθώς και ταξινόμησης θερμικών αποτυπωμάτων και βλαβών.

Στο 5^ο Κεφάλαιο έχουν συγκεντρωθεί και παρουσιάζονται, με αναλυτικό τρόπο, τρεις διαφορετικές *διαγνωστικές* μελέτες περιπτώσεων, με τα αντίστοιχα αποτελέσματά τους, οι οποίες εκπονήθηκαν στα πλαίσια της πειραματικής υλοποίησης της συγκεκριμένης Διδακτορικής Έρευνας. Κοινός στόχος των τριών πειραματικών μελετών αποτέλεσε η διερεύνηση της δυναμικής της υπέρυθρης θερμογραφίας, ως εποπτικής μεθόδου, σε επίπεδο *εντοπισμού* και *διάγνωσης* βλαβών σε Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου. Με βάση πάντα αυτήν την κοινή “αφετηρία”-στόχο, οι μελέτες διαφοροποιήθηκαν ως προς τον τρόπο υλοποίησης, τα προς διάγνωση στοιχεία (Φ/Β πλαίσια ή συστοιχίες) ή/και τις τεχνικές ανάλυσης των αποτελεσμάτων και εξαγωγής της εκάστοτε διάγνωσης. Τα ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα αυτών των μελετών αποτελούν τον πρώτο (εκ των δύο), και βασικότερο ίσως, άξονα πειραματικής θεμελίωσης και στοιχειοθέτησης των συμπερασμάτων αυτής της Διδακτορικής Διατριβής. Σημειώνεται ότι, τα αποτελέσματα της διάγνωσης βλαβών συγκεκριμένων Φ/Β πλαισίων, τα οποία παρουσιάζονται σε αυτό το Κεφάλαιο, επαληθεύτηκαν από πρότυπες εργαστηριακές μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε εγκαταστάσεις της εταιρίας κατασκευής Φ/Β πλαισίων ExelSolar™/ExelGroup™ Α.Ε., με την οποία συνεργάστηκε στενά η ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Μηχανολογικού Σχεδιασμού του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ, και πάντα στα πλαίσια της συγκεκριμένης Διδακτορικής Έρευνας.



Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται το θεωρητικό και ερευνητικό υπόβαθρο, η διαδικασία υλοποίησης και τα αποτελέσματα πειραματικής μελέτης, προς την κατεύθυνση της *πρόγνωσης* της εξέλιξης και της επίδρασης βλαβών στην διάρκεια ζωής των Φ/Β πλαισίων, καθώς και στην αξιοπιστία και την τελική απόδοσή τους. Αναλυτικότερα, αρχικά παρουσιάζονται θέματα αξιοπιστίας και πρόγνωσης βλαβών Φ/Β πλαισίων, καθώς και ο ρόλος των δοκιμών τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης τόσο σε κατασκευαστικό επίπεδο, όσο και στο πεδίο. Βάσει της υφιστάμενης κατάστασης σε αυτά τα ερευνητικά πεδία, απώτερος σκοπός του πειραματικού μέρους αυτής της μελέτης περίπτωσης, ήταν η ποσοτική και ποιοτική αποτίμηση της εξέλιξης συγκεκριμένων βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, μέσα από την σύγκριση μετρήσεων υπέρυθρης θερμογραφίας, ηλεκτρικής απόδοσης και μορφολογικών δεδομένων, πριν και μετά την εφαρμογή τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης. Σε συνέχεια των συμπερασμάτων των διαγνωστικών μελετών, τα ενδιαφέροντα αποτελέσματα της μελέτης αυτού του Κεφαλαίου, αποτελούν και τον δεύτερο άξονα πειραματικής επιβεβαίωσης και εξαγωγής των συμπερασμάτων αυτής της Διδακτορικής Διατριβής. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης στα Φ/Β πλαίσια της μελέτης αυτού του Κεφαλαίου, 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), με στόχο την επίτευξη μιας προσεγγιστικής προσομοίωσης μεγάλου μέρους της διάρκειας ζωής ενός Φ/Β πλαισίου στο πεδίο.

Την ολοκλήρωση των προαναφερθέντων Κεφαλαίων, οριοθετεί ξεχωριστή, σύντομη ενότητα, στην οποία παρατίθενται τα ουσιαστικότερα συμπεράσματα και εξετάζεται το επίπεδο επίτευξης του σκοπού και των βασικών στόχων συνεισφοράς της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής. Σταχυολογούνται δε, βάσει της εμπειρίας και των προβληματισμών που αποκομίστηκαν κατά την διάρκεια αυτής της Διατριβής, συγκεκριμένες προτάσεις μελλοντικής αναζήτησης και έρευνας. Τέλος, συγκεντρώνονται και παρατίθενται στο σύνολό τους, οι δημοσιεύσεις σε Διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια και Περιοδικά, όπως αυτές προέκυψαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της Διδακτορικής αυτής Έρευνας και Διατριβής.



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμότατα, και πρώτα απ' όλους, τον κ. **Παντελή Ν. Μπότσαρη**, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης (ΔΠΘ), για την πολύτιμη γνώση, καθοδήγηση, στήριξη και τα κίνητρα που μου παρείχε ως επιβλέπων, σύμβουλος, “συνοδοιπόρος” και φίλος μου από την πρώτη στιγμή, έως την ολοκλήρωση αυτής της Διδακτορικής Διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τα υπόλοιπα δύο μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής αυτής της Διατριβής, και συγκεκριμένα:

- ο τον κ. **Χαράλαμπο Αραπατσάκο**, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ και
- ο τον κ. **Αντώνιο Γαστεράτο**, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ,

για τις πολύτιμες συμβουλές και τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις που αποκόμισα σε τακτά χρονικά διαστήματα συζητήσεων μας, στα πλαίσια υλοποίησης τόσο του θεωρητικού όσο και του πρακτικού μέρους της Διδακτορικής Έρευνας μου.

Οφείλω, επίσης, να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στα υπόλοιπα τέσσερα μέλη που συνθέτουν την Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή αυτής της Διατριβής, και συγκεκριμένα:

- ο την κα. **Αντωνία Μοροπούλου**, Καθηγήτρια του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- ο τον κ. **Ιωάννη Λυγούρα**, Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ.
- ο τον κ. **Ιωάννη Α. Μπακούρο**, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, της Πολυτεχνικής Σχολής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.
- ο τον κ. **Γεώργιο Γκαϊντατζή**, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ.

Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω θερμά την ερευνητική ομάδα του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την καθοδήγηση της Καθηγήτριας κυρίας Αντωνίας Μοροπούλου, και συγκεκριμένα:

- ο τον κ. **Αστέριο Καραγιάννη-Μπακόλα**, Λέκτορα,



- ο την κα. **Μαρία Καρόγλου**, Δρ., Ι.Δ.Α.Χ. και
- ο την κα. **Αικατερίνη Δελέγκου**, Δρ., Ι.Δ.Α.Χ.,

για την εξαιρετική συνεργασία και πολύτιμη βοήθεια τους στον σχεδιασμό και την υλοποίηση του πειραματικού μέρους της προγνωστικής μελέτης αυτής της Διατριβής. Σε θεωρητικά θέματα αυτού του μέρους, καθώς και σε θέματα ενδιαφέροντος Μεταδιδακτορικής Έρευνας, πολύτιμη εμπειρία και γνώση αποκόμισα από τον Καθηγητή κ. **Christophe Ballif** και την Δρ. **Emanuelle Perret-Aebi**, του Ινστιτούτου Μικρομηχανικής, του Ομοσπονδιακού Πολυτεχνείου της Λωζάννης, τους οποίους επίσης θα ήθελα εδώ να ευχαριστήσω.

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω επίσης τον κ. **Γεώργιο Μπάκο**, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ, για την ευγενική παραχώρηση (προς διεξαγωγή μετρήσεων) των εγκατεστημένων Φ/Β πλαισίων του Εργαστηρίου Ενεργειακής Οικονομίας, καθώς και τους κ.κ. **Νικόλαο Πιτσόκο**, Μηχανολόγο Μηχανικό και **Χαράλαμπο Αμανατίδη**, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, για την άριστη συνεργασία μας, στα πλαίσια της διεξαγωγής των πρότυπων ηλεκτρικών μετρήσεων I-V συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω τους κ.κ. **Δημήτριο Χρυσοστόμου**, **Κομνηνό Αγγελάκογλου** και **Γεώργιο Γαλερίδη**, συν-Υποψήφιους Διδάκτορες στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ, για τις συνεργασίες τους σε από κοινού δημοσιεύσεις εργασιών και, φυσικά, για όσες ευχάριστες ή δύσκολες στιγμές μοιραστήκαμε με ανταλλαγή γνώσεων και καημών, εντός και εκτός της Σχολής μας.

Επίσης να ευχαριστήσω, για την συνεργασία μας και την ξεχωριστή συμβολή τους σε αυτήν την Διδακτορική Διατριβή, τους – απόφοιτους πλέον – Διπλωματούχους Μηχανικούς Παραγωγής και Διοίκησης, **Ηρακλή Αμοιρίδη**, **Φαίδρα Φιλιππίδου** και **Μαρία Μπινώλη**, καθώς και τον **Σαράντη Παυλίδη**, προπτυχιακό φοιτητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ.

Για το τέλος, και το σημαντικότερο ίσως, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και ένα μεγάλο ευχαριστώ στην αγαπημένη μου οικογένεια: τους γονείς μου **Άγγελο Τσανάκα** και **Χριστίνα Τσανάκα**, και τον αδερφό μου **Αθανάσιο Τσανάκα**, για την υπομονή, την αγάπη και την αμέριστη συμπαράστασή τους, όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η ποιοτική και ποσοτική αποτίμηση του δυναμικού αξιοποίησης της υπέρυθρης θερμογραφίας, ως εποπτικής μεθόδου, στην διάγνωση και πρόγνωση βλαβών σε μηχανολογικές κατασκευές, με βασική στόχευση και αντικείμενο εφαρμογής τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πλαίσια.

Σε επίπεδο εντοπισμού και διάγνωσης βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, η δυναμική της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας αποτιμήθηκε με την εκπόνηση τριών πειραματικών μελετών περιπτώσεων, διαφοροποιημένων ως προς: i) την προσέγγιση της υπέρυθρης ραδιομέτρησης, ii) τα προς διάγνωση στοιχεία και iii) την τεχνική ανάλυσης των θερμικών αποτυπωμάτων και εξαγωγής της κάθε διάγνωσης. Σε επίπεδο πρόγνωσης της μετάδοσης και της επίδρασης βλαβών στην διάρκεια ζωής των Φ/Β πλαισίων, καθώς και στην αξιοπιστία και τελική απόδοσή τους, 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 τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης σε Φ/Β πλαίσια. Τα συνολικά αποτελέσματα των μελετών, έδειξαν ότι η υπέρυθρη θερμογραφία, συνιστά εξαιρετικά υποσχόμενη μέθοδο διάγνωσης βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, ικανή να ανιχνεύσει και να αποδώσει γρήγορα και αξιόπιστα, το θερμικό αποτύπωμα βλαβών, υπό μορφή θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και “ανωμαλιών” σε κλίμακα ηλιακής κυψέλης. Μάλιστα, στην πλειοψηφία των εφαρμογών, η διάγνωση επιτεύχθηκε με την χρήση απλών τεχνικών επεξεργασίας θερμικών εικόνων, δίχως την προϋπόθεση διακοπής λειτουργίας των υπό έλεγχο Φ/Β πλαισίων. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος εμφάνισε αδυναμία αξιόπιστης πρόγνωσης της εξέλιξης των βλαβών στον χρόνο και ταξινόμησής τους ως προς τον τύπο και την προέλευσή τους, περιοριζόμενη στην ταξινόμησή τους ως προς την θέση, την σοβαρότητα ή/και την έκτασή τους. Απώτερη στόχευση αυτού του πεδίου έρευνας, είναι η αναγωγή του σημαντικού ερευνητικού οφέλους αυτής της Διατριβής, σε κατασκευαστικό, ενεργειακό, οικονομικό/επενδυτικό και – εν τέλει – κοινωνικό όφελος, μέσα από: i) την βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων, ii) την μείωση του κόστους κύκλου ζωής τους, iii) τον σχεδιασμό καταλληλότερων στρατηγικών συντήρησής τους και, iv) τον περιορισμό του κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ένα Φ/Β σύστημα.

Λέξεις-κλειδιά: υπέρυθρη θερμογραφία, φωτοβολταϊκά πλαίσια, διάγνωση βλαβών, πρόγνωση βλαβών, συντήρηση, αξιοπιστία, ανίχνευση ακμών, θερμές κηλίδες, τεχνητή επιταχυνόμενη γήρανση.



Abstract

Scope of this Doctoral Dissertation is the qualitative and quantitative assessment of the potential of infrared (IR) thermography, as a vision-based condition monitoring (CM) method, for fault (defect) diagnosis and prognosis in mechanical structures, with main objective and focus on photovoltaic (PV) modules.

The potential of the intended method for PV modules' fault *diagnosis*, was assessed through three individual case studies, which were diversified as for: i) the performed IR radiometric approach, ii) the inspected elements and iii) the featured thermal image processing and diagnosis technique. Towards the investigation of fault propagation mechanisms and *prognosis* of their long-term impact to the PV modules' efficiency, 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. From the overall results and discussion of both diagnostic and prognostic studies, it was concluded that IR thermography comprises a fairly promising and valuable method of fault diagnosis for PV modules, able provide fast and reliable detection of faults' thermal signatures, in the form of temperature fluctuations and abnormal temperature profiles in solar cells. Moreover, in most cases, this diagnosis was achieved by using simple thermal image processing techniques, without interrupting the operation of any inspected module. On the other hand, the proposed method presented limited reliability in prognosis of fault evolution and/or propagation through the modules' lifetime, as well as weak fault classification ability; in principle, the diagnosed faults can be classified according to their location, severity (in terms of temperature rise) or extent, without providing any classification upon the fault type or source. Ultimate goal of such field of research, is to extend the research benefit obtained from this Doctoral Dissertation towards production, energy, financial/investment and, finally, social benefit, through: i) improved long-term reliability and efficiency, ii) reduced life cycle costs, iii) optimized maintenance scheduling of PV modules, as well as iv) decreased costs of electrical energy produced by a PV system.

Keywords: *infrared thermography; PV modules; fault diagnosis; fault prognosis; maintenance; reliability; edge detection; hot spots; accelerated ageing tests.*



Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ABSTRACT.....	viii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	ix

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	2
2.1 Από το Ελάττωμα στη Βλάβη και την Αστοχία.....	2
2.2 Διάγνωση και Πρόγνωση.....	5
2.3 Μέθοδος και Προσέγγιση, Τεχνική και Τεχνολογία.....	5
3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ.....	7
3.1 Κύριες απαιτήσεις.....	8
3.2 Βασική δομή και επιμέρους βήματα.....	9
3.2.1 Μέθοδοι παρακολούθησης.....	10
3.2.2 Τεχνικές επεξεργασίας σήματος.....	12
3.2.3 Εργαλεία διάγνωσης, ταξινόμησης και πρόγνωσης βλαβών.....	15
4. ΕΠΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	17
5. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ.....	25
5.1 Εφαρμογές μεθόδων παρακολούθησης.....	26
5.2 Εφαρμογές τεχνικών επεξεργασίας σήματος.....	32
5.3 Εφαρμογές εργαλείων διάγνωσης και ταξινόμησης βλαβών.....	34
6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	36
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	51
2. ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....	54
2.1 Βασικές παράμετροι ηλιακών κυψελών.....	54
2.2 Βαθμός απόδοσης ηλιακών κυψελών.....	58
2.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου.....	63
2.3.1 Ηλεκτρικά και θερμικά χαρακτηριστικά.....	65
2.3.2 Οπτικές ιδιότητες.....	68
2.3.3 Απόδοση στο πεδίο.....	69
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....	70
3.1 Το ηλεκτρικό μοντέλο.....	71
3.2 Το θερμοδυναμικό μοντέλο.....	76



3.3 Προσομοίωση ηλεκτρικού και θερμοδυναμικού μοντέλου.....	79
4. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	83
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	84

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΛΑΒΕΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ: Η ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	87
2. ΒΛΑΒΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟΥ.....	89
2.1 Παράγοντες φθοράς στο εμπρόσθιο στρώμα (υπέρστρωμα).....	89
2.2 Βλάβες στο οπίσθιο στρώμα (υπόστρωμα).....	90
2.3 Βλάβες στο πλαίσιο στήριξης.....	92
3. ΒΛΑΒΕΣ ΛΟΓΩ ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗΣ.....	93
3.1 Αποχρωματισμός του EVA.....	93
3.2 Ανακλαστικότητα και απώλεια ελαστικότητας του EVA.....	96
3.3 Βλάβες αποκόλλησης του EVA.....	98
4. ΒΛΑΒΕΣ ΣΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ.....	101
4.1 Θερμές κηλίδες (hot spots).....	102
4.2 Βλάβες συγκολλήσεων.....	106
4.3 Ρωγμές και θραύση ηλιακών κυψελών.....	108
4.4 Βλάβες εσωτερικών διασυνδέσεων.....	111
4.5 Μεταλλική διάβρωση.....	112
5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	113
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑ: ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	118
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	119
2.1 Υπέρυθρη ακτινοβολία και ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	119
2.2 Μεταφορά θερμότητας.....	121
2.2.1 Μεταφορά με αγωγή.....	122
2.2.2 Μεταφορά με διάχυση.....	123
2.2.3 Μεταφορά με ακτινοβολία.....	124
2.3 Θερμική ακτινοβολία και αλληλεπίδραση με την ύλη.....	125
2.3.1 Μέλαν σώμα.....	125
2.3.2 Συντελεστής ικανότητας εκπομπής.....	127
2.3.3 Απορρόφηση, ανάκλαση, μεταφορά.....	129
2.3.4 Μετάδοση στον αέρα και θέματα υπέρυθρης οπτικής.....	130
3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΗΣΗΣ.....	131
3.1 Αρχή λειτουργίας και κατασκευαστικά στοιχεία.....	131
3.2 Τύποι θερμοκαμερών και κριτήρια επιλογής.....	135
4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	139
4.1 Παθητική προσέγγιση.....	139
4.2 Ενεργητική προσέγγιση.....	141
4.3 Παράμετροι και συνθήκες υπέρυθρης ραδιομέτρησης.....	145



4.4 Πεδία εφαρμογών – πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	148
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	151
5.1 Τεχνικές επεξεργασίας.....	152
5.2 Θερμικό αποτύπωμα – Αξιολόγηση και ταξινόμηση βλαβών.....	154
6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	155
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	156

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	160
2. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 1.....	161
2.1 Πειραματική υλοποίηση.....	161
2.1.1 Υλικό και λογισμικό.....	161
2.1.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης.....	163
2.2 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	165
2.2.1 Παθητική προσέγγιση.....	165
2.2.2 Ενεργητική προσέγγιση.....	169
3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 2.....	172
3.1 Πειραματική υλοποίηση.....	172
3.1.1 Υλικό και λογισμικό.....	172
3.1.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης.....	175
3.1.3 Αντιστάθμιση παραμέτρων μέτρησης.....	177
3.2 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	179
3.2.1 Ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος.....	179
3.2.2 Στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων.....	181
3.2.3 Ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας.....	185
4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 3.....	187
4.1 Ανίχνευση ακμών με τον αλγόριθμο Canny.....	187
4.2 Πειραματική υλοποίηση.....	191
4.2.1 Υλικό και λογισμικό.....	191
4.2.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης.....	193
4.2.3 Αντιστάθμιση παραμέτρων μέτρησης.....	194
4.3 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	194
4.3.1 Ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος και γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας.....	194
4.3.2 Στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων.....	199
4.3.3 Διάγνωση και χαρτογράφηση ακμών με τον αλγόριθμο Canny.....	201
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΩΝ.....	206
6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	210
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	211

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	213
2. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ: ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ.....	214
3. ΤΕΧΝΗΤΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗ ΓΗΡΑΝΣΗ – ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC 61215.....	216



4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ.....	225
4.1 Πειραματική υλοποίηση.....	226
4.1.1 Υλικό και λογισμικό.....	226
4.1.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης.....	230
4.1.3 Θερμικοί κύκλοι επιταχυνόμενης γήρανσης.....	232
4.2 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	233
4.2.1 Εξέλιξη θερμικού αποτυπώματος βλαβών.....	233
4.2.2 Εξέλιξη ηλεκτρικής απόδοσης.....	237
4.2.3 Οπτικές παρατηρήσεις.....	243
5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	245
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	246
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	
I. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	249
II. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	253
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	
I. ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ.....	255
II. ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ.....	256
III. ΛΟΙΠΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ.....	257
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	258
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	267
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	269



Κεφάλαιο 1

Τεχνολογίες Διάγνωσης και Πρόγνωσης Βλαβών

Περιεχόμενα

Σελίδα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	2
2.1 Από το Ελάττωμα στη Βλάβη και την Αστοχία.....	2
2.2 Διάγνωση και Πρόγνωση.....	5
2.3 Μέθοδος και Προσέγγιση, Τεχνική και Τεχνολογία.....	5
3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ.....	7
3.1 Κύριες απαιτήσεις.....	8
3.2 Βασική δομή και επιμέρους βήματα.....	9
3.2.1 Μέθοδοι παρακολούθησης.....	10
3.2.2 Τεχνικές επεξεργασίας σήματος.....	12
3.2.3 Εργαλεία διάγνωσης, ταξινόμησης και πρόγνωσης βλαβών.....	15
4. ΕΠΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	17
5. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ.....	25
5.1 Εφαρμογές μεθόδων παρακολούθησης.....	26
5.2 Εφαρμογές τεχνικών επεξεργασίας σήματος.....	32
5.3 Εφαρμογές εργαλείων διάγνωσης και ταξινόμησης βλαβών.....	34
6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	36
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	39

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν Κεφάλαιο αποτελεί, όχι μόνο τυπικά αλλά και χρονικά, το πρώτο μέρος αυτής της Διδακτορικής Διατριβής, καθώς είναι αποτέλεσμα εκτεταμένης βιβλιογραφικής αναζήτησης πάνω σε θέματα εφαρμοσμένων τεχνολογιών πρόγνωσης και διάγνωσης βλαβών, η οποία πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του πρώτου έτους της Διατριβής. Σκοπός της

συγκεκριμένης βιβλιογραφικής αναζήτησης, και κατά συνέπεια αυτού του Κεφαλαίου, είναι η καταγραφή και παρουσίαση των κυριότερων – μέχρι σήμερα – πρακτικών διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών σε μηχανολογικές κατασκευές, με στόχο:

- Την αποτίμηση της αποτελεσματικότητάς τους σε υπάρχοντα πεδία εφαρμογών, με έμφαση στον έλεγχο της φθοράς των κοπτικών εργαλείων.
- Την αξιολόγηση της χρησιμότητας και εφαρμοσιμότητάς τους σε νέα πεδία εφαρμογών.
- Τον καθορισμό εκείνων των ερευνητικών “κενών” και αναγκών που φιλοδοξεί να καλύψει η συγκεκριμένη Διδακτορική Διατριβή.

Πριν την αναλυτική παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου και των συμπερασμάτων της συγκεκριμένης βιβλιογραφικής αναζήτησης, επιλέχθηκε η συγγραφή μιας ενότητας στην οποία επιχειρείται μια εισαγωγή, ερμηνεία και διάκριση των βασικών εννοιών που απαρτίζουν τον τίτλο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, όπως:

- το *ελάττωμα*, η *βλάβη* και η *αστοχία*
- η *διάγνωση* και η *πρόγνωση*
- η *μέθοδος* και η *προσέγγιση*, η *τεχνική* και η *τεχνολογία*.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

2.1 Από το *Ελάττωμα*, στην *Βλάβη* και την *Αστοχία*

Στην επιστήμη του Μηχανικού, είναι δεδομένη η δυσκολία σαφούς διάκρισης μεταξύ εννοιών που σχετίζονται με την λειτουργική ανεπάρκεια ενός εξοπλισμού, μιας συσκευής, ενός υλικού ή μιας κατασκευής. Η σύγχυση που αναπόφευκτα δημιουργείται, στην σχετική βιβλιογραφία, στη χρήση όρων όπως *ελάττωμα*, *σφάλμα*, *βλάβη*, *δυσλειτουργία* και *αστοχία* μπορεί να έγκειται είτε στην διαφορετική αντίληψη των εννοιών από κάθε επιστήμονα ή ειδικότητα Μηχανικού, είτε απλά στην διαφορετική ερμηνεία που αποδίδεται κατά την μετάφραση επιστημονικών/τεχνικών άρθρων από μια γλώσσα σε μια άλλη. Ενδεικτικά, ο όρος *fault* μπορεί να αποδοθεί εξίσου ως *σφάλμα* και ως *βλάβη* και αντίστροφα.

Αυτό που τελικά προτιμάται, για τον περιορισμό της σύγχυσης, είναι ο καθορισμός μιας συμβατικής σειράς διαβάθμισης των εννοιών αυτών, περιγράφοντας την πορεία από την ιδανική (“υγιή”) κατάσταση, στην πλήρη αστοχία. Ωστόσο, το πρόβλημα της διάκρισης αυτών των εννοιών μπορεί να γίνει ακόμα πιο σύνθετο από τη στιγμή που θα επιχειρηθεί να υιοθετηθεί και

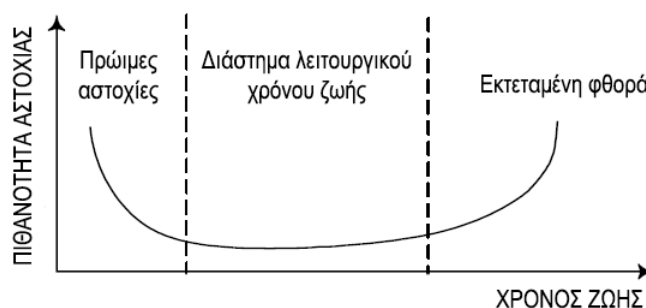
μια επιπλέον “εσωτερική” διαβάθμιση, ξεχωριστά για κάποια από αυτές τις έννοιες. Για παράδειγμα, συναντάται συχνά στην βιβλιογραφία η διαβάθμιση του όρου *fault*, σε *soft faults* και *hard faults*. Βέβαια, εδώ οι όροι “μαλακό/ήπιο” και “σκληρό/ισχυρό” σφάλμα (ή βλάβη) χρησιμοποιούνται μεταφορικά για να αποδώσουν δύο εντελώς διαφορετικές “συμπεριφορές” ενός σφάλματος, την βαθμιαία εξέλιξή του και την ακαριαία εμφάνιση του αντίστοιχα. Για λόγους διευκόλυνσης του αναγνώστη διευκρινίζεται ότι, στο εξής, ο όρος *βλάβη* (που χρησιμοποιείται και στον τίτλο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής) θα αντιστοιχεί στον αγγλικό όρο *fault*, ενώ οι όροι *defect* και *failure* αποδίδονται ως *ελάττωμα* και *αστοχία*, αντίστοιχα.

Με τον όρο *ελάττωμα*, περιγράφεται οποιοδήποτε χαρακτηριστικό ενός προϊόντος το οποίο παρεμποδίζει τη χρησιμότητα του για το σκοπό για τον οποίο έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί. Το φάσμα των συνθηκών που μπορούν να καταστήσουν ελαττωματικό ένα προϊόν είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Ενδεικτικά, ένα προϊόν μπορεί να εμφανίσει ελάττωμα σχεδιασμού ή/και ελάττωμα κατασκευής. Στην πρώτη περίπτωση, το προϊόν έχει σχεδιαστεί ή δοκιμαστεί ανεπαρκώς και, συνεπώς, η ίδια του η σχεδίαση αποδίδει ένα προϊόν το οποίο αδυνατεί να λειτουργήσει ιδανικά (βάσει ορισμένων προδιαγραφών). Στην δεύτερη περίπτωση, αν και ο σχεδιασμός έχει γίνει σωστά, το προϊόν θεωρείται ελαττωματικό, εφόσον – για παράδειγμα – έχουν χρησιμοποιηθεί ανεπαρκή υλικά κατά την κατασκευή του. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα ελάττωμα αποτελεί ικανή, αλλά όχι αναγκαία, συνθήκη τελικής αστοχίας ενός υλικού ή προϊόντος [1].

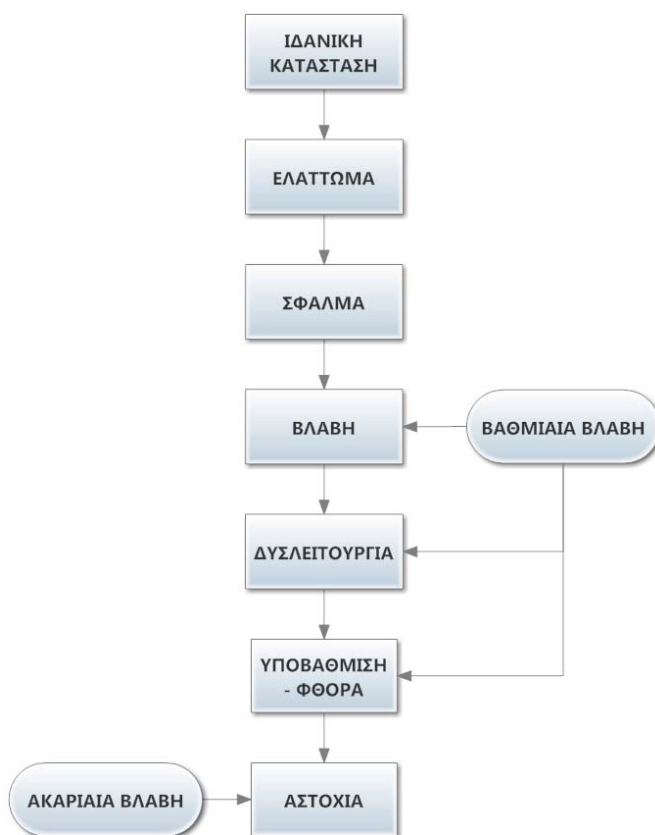
Με τον όρο *βλάβη*, εννοείται εκείνη η κατάσταση ενός προϊόντος στην οποία αυτό οδηγείται σε δυσλειτουργία (*malfunction*) και, υπό συνθήκες, σε εκτεταμένη φθορά (*wear*), υποβάθμιση (*degradation*) ή/και πλήρη αστοχία (*failure*). Όπως προαναφέρθηκε, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις εφαρμογών, είναι πιθανό η βλάβη ενός εξοπλισμού να διακρίνεται σε βαθμιαία και ακαριαία, με κριτήριο τη δριμύτητά της και το χρόνο εμφάνισης και εξέλιξής της. Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι βαθμιαίες βλάβες σχετίζονται περισσότερο με τη φθορά ενός εξοπλισμού και, συνεπώς, η “δράση” τους εκτείνεται επιπλέον στα στάδια της δυσλειτουργίας και της υποβάθμισης/φθοράς. Από την άλλη πλευρά, οι ακαριαίες βλάβες αποτελούν φύσει αιτία πλήρους αστοχίας [1].

Τέλος, ο όρος *αστοχία*, προσδιορίζει την κατάσταση εκείνη ενός εξοπλισμού, στην οποία αυτός εμφανίζει πλήρη αδυναμία λειτουργίας ή εξυπηρέτησης της ανάγκης για την οποία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε. Έχει διαπιστωθεί ότι ο χρόνος ζωής ενός προϊόντος μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιόδους, με κριτήριο την πιθανότητα το προϊόν αυτό να αστοχήσει (Σχήμα 1.1). Συγκεκριμένα, στο πρώτο στάδιο του χρόνου ζωής του η πιθανότητα αστοχίας είναι σημαντικά μεγάλη και αφορά στις περιπτώσεις των λεγόμενων “πρώιμων απωλειών” (μεταφορικά “*infant mortality*”). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, σημαντικό ποσοστό των περιπτώσεων αστοχιών λόγω των ακαριαίων βλαβών που περιγράφηκαν προηγουμένως, σχετίζεται με αυτό ακριβώς το στάδιο. Στη συνέχεια, ακολουθεί το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου

ζωής του προϊόντος, που αντιστοιχεί στον λειτουργικό χρόνο ζωής του, κατά τον οποίο εμφανίζεται η μικρότερη πιθανότητα αστοχίας του. Κατά τη διάρκεια αυτού του διαστήματος, το προϊόν υφίσταται απλά μια μικρή αλλά σταθερή φθορά λόγω γήρανσης. Τέλος, στο τελευταίο στάδιο του χρόνου ζωής η πιθανότητα εμφάνισης αστοχίας στο προϊόν αυξάνεται σημαντικά, ως αποτέλεσμα εκτεταμένης φθοράς του. Βάσει όλων όσων αναφέρθηκαν σε αυτήν την υποενότητα, στο Σχήμα 1.2 δίνεται μια συμβατική διαβάθμιση όρων από την ιδανική κατάσταση ενός προϊόντος, στην αστοχία του [1,2].



Σχήμα 1.1. Περίοδοι στο χρόνο ζωής ενός προϊόντος σε σχέση με την πιθανότητα αστοχίας του.



Σχήμα 1.2. Διαβάθμιση όρων από την ιδανική κατάσταση, στην αστοχία ενός προϊόντος.

2.2 Διάγνωση και Πρόγνωση

Η διάγνωση και η πρόγνωση βλαβών αποσκοπούν στον εντοπισμό και την πρόληψη, αντίστοιχα, καταστάσεων που μπορεί να οδηγήσουν τον εξοπλισμό σε πρόωρη απώλεια, εκτεταμένη φθορά ή πλήρη αστοχία. Αποτελούν δε το “κλειδί” για την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων, ευφυών συστημάτων παραγωγής καθώς και αξιόπιστων εξοπλισμών και προϊόντων, με υψηλό δείκτη διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας.

Ως *διάγνωση* ορίζεται η τέχνη ή η ενέργεια για τον εντοπισμό, προσδιορισμό ή/και απομόνωση της βλάβης ενός εξοπλισμού, βάσει της αξιολόγησης συγκεκριμένων σημάτων και συμπτωμάτων, καθώς και η απόφαση που λαμβάνεται [3,4].

Ως *πρόγνωση* ορίζεται η ενέργεια ή η πράξη που προλέγει την εξέλιξη της βλάβης ή, εναλλακτικά, η κρίση που γίνεται σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη της βλάβης και την κατάσταση ενός εξοπλισμού, βάσει διαθέσιμων πληροφοριών και εμπειρίας [3,4].

Μια διάγνωση βλαβών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εν λειτουργία χρήση αισθητηρίων και εποπτικών συσκευών, για τη συλλογή της απαιτούμενης πληροφορίας σχετικά με την εκάστοτε κατάσταση ενός εξοπλισμού. Με άλλα λόγια, η διάγνωση αφορά στη συσχέτιση μεταξύ των χαρακτηριστικών των σημάτων παρακολούθησης και της κατάστασης του υπό παρακολούθηση εξοπλισμού. Από την άλλη πλευρά, η πρόγνωση βλαβών, προϋποθέτει ακριβή γνώση της μελλοντικής συμπεριφοράς του εξοπλισμού. Η ικανότητα με την οποία παρατηρείται και προβλέπεται με ακρίβεια η εξέλιξη ενός συστήματος [3]:

- δίνει τη δυνατότητα προσδιορισμού της μελλοντικής του κατάστασης,
- παρέχει ενδείξεις ως “πρόδρομους” αστοχιών και
- οδηγεί στη λήψη αποφάσεων προληπτικής συντήρησης, πριν την εμφάνιση καταστροφικών αστοχιών.

Σε επόμενες ενότητες αυτού του Κεφαλαίου γίνεται εκτενέστερη αναφορά στη δομή και την λειτουργία τυπικών συστημάτων διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών, καθώς και σε συγκεκριμένες εφαρμογές και προσεγγίσεις.

2.3 Μέθοδος και Προσέγγιση, Τεχνική και Τεχνολογία

Αντίστοιχη δυσκολία με αυτήν της σαφούς διάκρισης των όρων που περιγράφουν την κατάσταση και την εξέλιξη της φθοράς ενός εξοπλισμού, εμφανίζεται και κατά τη χρήση και ερμηνεία των όρων *μέθοδος (method)*, *προσέγγιση (approach)*, *τεχνική (technique)* και *τεχνολογία (technology)*.

Ο όρος *μέθοδος* αναφέρεται στον καθορισμό, στον σχεδιασμό και στην αναλυτική περιγραφή των βημάτων που απαιτούνται για την διεκπεραίωση μιας συγκεκριμένης εργασίας. Ειδικότερα, μια *επιστημονική μέθοδος* είναι το σύνολο των τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την διερεύνηση ενός φαινομένου ή ενός προβλήματος, με την απόκτηση νέων γνώσεων ή/και την αξιοποίηση, διόρθωση και ολοκλήρωση της υπάρχουσας γνώσης και εμπειρίας. Από την άλλη πλευρά, ο όρος *προσέγγιση* σχετίζεται με μια ευρύτερη, γενικότερη οπτική θεώρηση. Κατά κανόνα, μια προσέγγιση περιλαμβάνει μια σειρά από μεθόδους και δομείται με σαφώς λιγότερο ξεκάθαρο σχεδιασμό και μια μάλλον αόριστη περιγραφή των βημάτων-μεθόδων που απαιτούνται να εφαρμοστούν. Συχνά, στις Θετικές Επιστήμες και την επιστήμη του Μηχανικού, μια προσέγγιση σχετίζεται με ένα σύνολο πεποιθήσεων και θέσεων, με τις οποίες διερευνάται η εφαρμοσιμότητα και η αξιοπιστία μιας πρωτότυπης ή μη εφαρμοσμένης λύσης σε ένα πρόβλημα [5-7].

Βάσει των παραπάνω, θα μπορούσε να συνοψιστεί ότι μια μέθοδος καθορίζεται οργανωτικά με τον σχεδιασμό, συνδέεται θεωρητικά με την προσέγγιση και υλοποιείται πρακτικά με τη χρήση *τεχνικών*. Ως *τεχνική* εννοείται συνήθως μια σειρά από πρακτικές ικανότητες, οι οποίες επιτρέπουν την εύκολη και αποτελεσματική πραγματοποίηση μιας δεδομένης εργασίας. Με άλλα λόγια, λοιπόν, το σύνολο πολλών καθορισμένων και αποτελεσματικών διαδικασιών που έχουν αποδειχθεί χρήσιμες για την επίτευξη συγκεκριμένων αποτελεσμάτων (λ.χ. την παραγωγή ενός προϊόντος, την εκτέλεση ορισμένων λειτουργιών, την επίτευξη ορισμένων στόχων) συνοψίζονται ως *τεχνική*. Ουσιαστικά, οποιαδήποτε τέτοια τεχνική, είναι η αποτελεσματική εφαρμογή συγκεκριμένης τεχνογνωσίας (know-how) με την συλλογή και μετάδοση συγκεκριμένης εμπειρίας (που συνεπάγεται επίσης μια προσεκτική πρακτική ικανότητα), χωρίς να συνοδεύεται απαραίτητα ή να υποστηρίζεται από γνώση του εκάστοτε θεωρητικού υπόβαθρου [7-8].

Αν λοιπόν η τεχνική εξ' ορισμού συνδέεται μόνο με την πρακτική μιας μεθόδου, στον όρο *τεχνολογία*, η κατάληξη “-ολογία” υποδηλώνει την επιπλέον θεωρητική πλευρά, πλην της πρακτικής, που διαφοροποιεί αυτούς τους δύο όρους. Η κατάληξη αυτή εμφανίζεται και σε έννοιες επιστημών (λ.χ. θεολογία, κοινωνιολογία, φιλολογία) υποδηλώνοντας ακριβώς την διττή τους φύση, δηλαδή την πρακτική και την “επιστημονική” ή, τουλάχιστον, θεωρητική πλευρά τους. Στην πραγματικότητα, στην αρχαία ελληνική γλώσσα, ο όρος *τέχνη* ήδη περιελάμβανε μια θεωρητική έκφανση, καθώς χρησιμοποιούνταν για να υποδεικνύει την ικανότητα κάποιου να δικαιολογεί και να γνωρίζει την αποτελεσματικότητα μιας διαδικασίας. Η σύσταση το όρου *τεχνολογία*, στην πλήρη, σύγχρονη έννοια του, είναι συνέπεια της σύγχρονης επιστήμης. *Τεχνολογία*, λοιπόν, είναι η επιστήμη που προσδίδει το θεωρητικό υπόβαθρο σε μια αποτελεσματική εργασία ή διαδικασία. Σε μια εναλλακτική της ερμηνεία, ο όρος αναφέρεται στην κατασκευή, την τροποποίηση, την χρήση και την γνώση των κατάλληλων εργαλείων, μηχανών, τεχνικών, τεχνών, συστημάτων και μεθόδων οργάνωσης, με σκοπό την επίλυση ενός



προβλήματος, την βελτίωση μιας προϋπάρχουσας λύσης σε ένα πρόβλημα, την επίτευξη ενός στόχου ή την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης λειτουργίας [8-9].

Γίνεται σαφές ότι η επιστήμη εμφανίζει στενότερη σχέση με την τεχνολογία παρά με την τεχνική. Από τη μια πλευρά, η τεχνολογία είναι, σε μεγάλο βαθμό – θα μπορούσε κανείς να πει ακόμη και κατ’ ουσία –, μια εφαρμοσμένη επιστήμη. Όταν η επιστημονική έρευνα δημιουργεί ορισμένα γνωστικά προβλήματα, αυτά μπορούν να επιλυθούν, χάρη στην τεχνολογία, με την κατασκευή, την χρήση και την ανάδειξη κατάλληλων συσκευών ή μέσων [8].

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ

Η ανάγκη και επιθυμία ανάπτυξης τεχνολογιών και συστημάτων ακριβούς διάγνωσης και πραγματικής πρόγνωσης βλαβών, εμφανίστηκε και αναδείχθηκε από τη στιγμή που ο άνθρωπος άρχισε να χειρίζεται πολύπλοκο και υψηλού κόστους ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό και σύνθετες κατασκευές. Η οικονομική σημασία της διάγνωσης και της πρόγνωσης βλαβών έγκειται στην επίτευξη υψηλών δεικτών διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας εξοπλισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποτελεσματική αποφυγή αδικαιολόγητων διακοπών στην λειτουργία ενός εξοπλισμού και την δημιουργία ενός ευέλικτου προγράμματος συντήρησης, το οποίο εξυπηρετεί πραγματικές ανάγκες συντήρησης/αντικατάστασης. Ωστόσο, το σημαντικότερο, ίσως, όφελος της διάγνωσης/πρόγνωσης βλαβών, μέσω συστημάτων παρακολούθησης της κατάστασης (condition monitoring, CM), είναι η σημαντική μείωση της πιθανότητας μη προγραμματισμένης αστοχίας και ολοκληρωτικής καταστροφής ενός εξοπλισμού [10,11].

Ιδίως στην περίπτωση συσκευών ή εξαρτημάτων κρίσιμης λειτουργικής σημασίας, μια πιθανή αστοχία τους μπορεί να επηρεάσει ένα ευρύτερο υποσύστημα ή/και να οδηγήσει στη διακοπή της λειτουργίας μιας ολόκληρης μονάδας παραγωγής. Σε ένα ακραίο, πλην όμως ρεαλιστικό παράδειγμα, η καταστροφή μιας απλής αντλίας σε δίκτυο υψηλής πίεσης ατμού μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη διακοπή λειτουργίας μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Βέβαια, το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρήση εφεδρικών μηχανών στα κρίσιμα στάδια της μονάδας. Ωστόσο, αυτή η πρακτική αυξάνει τόσο το μέγεθος και αρχικό κόστος εγκατάστασης της μονάδας, όσο και το κόστος συντήρησης που πρέπει να συμπεριλάβει και τις επιπλέον μηχανές [11].

Σε άλλες, σοβαρότερες περιπτώσεις η καταστροφή ενός και μόνου εξαρτήματος μπορεί να στοιχίσει σε ανθρώπινες ζωές. Κατασκευές της αεροναυπηγικής βιομηχανίας, όπως τα αεροπλάνα και τα ελικόπτερα, φέρουν κρίσιμα μηχανικά εξαρτήματα, όπως άξονες, στροβίλους, έδρανα κύλισης και κιβώτια ταχυτήτων, η βλάβη των οποίων θα μπορούσε να αποβεί μοιραία για τους επιβαίνοντες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η λύση δίνεται με την αύξηση της συχνότητας της προγραμματισμένης συντήρησης και την πρόωρη αντικατάσταση των κρίσιμων εξαρτημάτων.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, έχει καταγραφεί ένα ευρύ φάσμα προσεγγίσεων και στρατηγικών εκτέλεσης χειροκίνητης, ημιαυτοματοποιημένης ή πλήρως αυτοματοποιημένης διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών σε κρίσιμες εφαρμογές εμπορικών και αμυντικών (στρατιωτικών) συστημάτων. Εξίσου πολυάριθμες φιλοσοφίες και αρχιτεκτονικές συστημάτων, άμεσα συνδεδεμένες με αυτά τα διαγνωστικά/προγνωστικά συστήματα, συναντώνται σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Η εξέλιξη αυτών των διαγνωστικών/προγνωστικών λογικών συστημάτων (diagnostic/prognostic reasoning systems) στον χρόνο, εστίασε στην ανάγκη εντοπισμού και απομόνωσης εκείνου του τμήματος του εξοπλισμού που αποτελεί την πηγή (ή την αιτία) της εκάστοτε βλάβης. Αυτό επιτρέπει στο υπεύθυνο συντήρησης απλά να αφαιρέσει το “προβληματικό” στοιχείο και να επιδιορθώσει, με βεβαιότητα πλέον, την κατάσταση βλάβης. Ωστόσο, αν και σε αρκετές περιπτώσεις αυτή η στρατηγική εφαρμόζεται επιτυχώς, υπάρχουν πολλές καταστάσεις στις οποίες αυτό δεν είναι εφικτό χωρίς την προσθήκη αισθητήρων και, συνακόλουθα, καλωδιώσεων. Κάτι τέτοιο, όμως, αυξάνει τον αριθμό των στοιχείων που ενδέχεται να αστοχήσουν και, συνεπώς, ενίοτε δυσκολεύει επιπλέον την προσπάθεια συντήρησης. Υπάρχουν, ξεκάθαρα, περιπτώσεις στις οποίες η προσθήκη υλικού (hardware) αποδεικνύεται ευεργετική, πλην όμως τα οφέλη από μια βελτιωμένη ικανότητα απομόνωσης βλαβών θα πρέπει να σταθμιστούν έναντι του ενδεχόμενου μείωσης της αξιοπιστίας και αύξησης του κόστους και του βάρους του συνολικού εξοπλισμού [10].

3.1 Κύριες απαιτήσεις

Ένα κρίσιμης σπουδαιότητας σημείο κατά την ανάπτυξη αποτελεσματικών τεχνολογιών και συστημάτων πρόγνωσης και διάγνωσης βλαβών σχετίζεται με την ικανότητα εντοπισμού βλαβών σε πρώιμα στάδια όπου η πληροφορία για την φύση και την πηγή της βλάβης καθίσταται χρήσιμη και αξιοποιήσιμη. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται κατά την έναρξη της διαδικασίας ταξινόμησης των βλαβών του υπό παρακολούθηση εξοπλισμού ή συστήματος, για την αποτελεσματική διάγνωση και απομόνωση κάθε βλάβης. Στη συνέχεια, η πρόγνωση της κατάστασης ή/και της αστοχίας προβλέπει την υπολειπόμενη διάρκεια χρήσιμης ζωής του, δηλαδή τη διάρκεια λειτουργίας από τη στιγμή του εντοπισμού της βλάβης μέχρι ένα μη αποδεκτό επίπεδο υποβάθμισης (φθοράς), πριν την πλήρη αστοχία. Επιπλέον, αν η βλάβη που έχει προσδιοριστεί επηρεάζει τη διάρκεια ζωής ενός κρίσιμου στοιχείου του εξοπλισμού, το μοντέλο πρόγνωσης αστοχίας θα πρέπει να το υποδεικνύει.

Προς την κατεύθυνση, λοιπόν, της διάγνωσης και της πρόγνωσης κρίσιμων τύπων αστοχιών θα πρέπει να προσδιοριστούν συγκεκριμένες απαιτήσεις, σχετικά με τον καθορισμό των επιπέδων βεβαιότητας και σοβαρότητας κάθε βλάβης. Κατά κανόνα, η επιδιωκόμενη ακρίβεια και το επίπεδο εντοπισμού για τη διάγνωση καθορίζονται ξεχωριστά, σε σύγκριση με την επιδιωκόμενη προγνωστική ακρίβεια. Κατ’ ελάχιστο, οι ακόλουθες πιθανότητες θα πρέπει να

λαμβάνονται υπόψη, για τον καθορισμό του επιπέδου εντοπισμού και της διαγνωστικής ακρίβειας [10]:

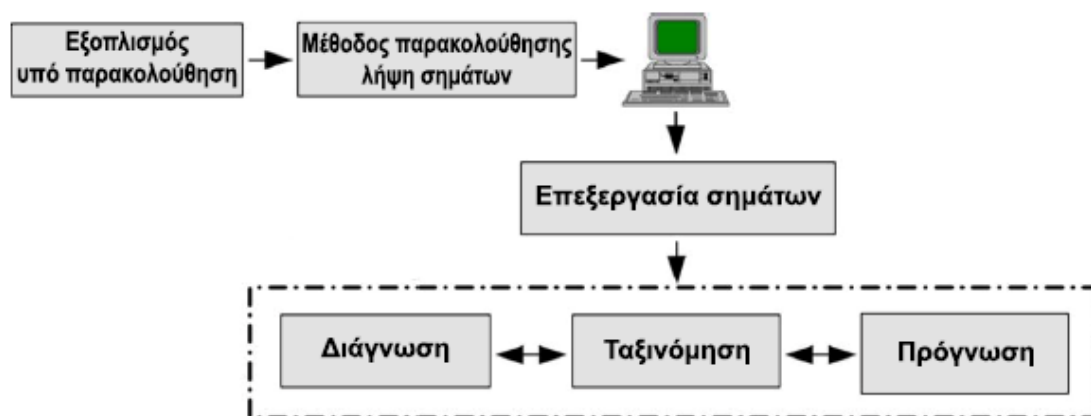
- Η πιθανότητα μιας “ανώμαλης” διάγνωσης (anomaly detection), συμπεριλαμβανομένων του βαθμού λανθάνοντος συναγερμού (false-alarm rate) και της στατιστικής πιθανότητας πραγματικής βλάβης (real fault probability statistics).
- Η πιθανότητα ειδικών ταξινομήσεων διάγνωσης βλαβών με τη χρήση συγκεκριμένων επιπέδων βεβαιότητας και προβλέψεων της σοβαρότητας κάθε βλάβης.

Από την άλλη πλευρά, για τον καθορισμό των απαιτήσεων προγνωστικής ακρίβειας, θα πρέπει πρώτα να προσδιοριστούν [10]:

- Το επίπεδο της υποβάθμισης (degradation level) πέρα από το οποίο η λειτουργία του υπό παρακολούθηση εξοπλισμού θεωρείται ανεπαρκής ή μη ικανοποιητική.
- Η ελάχιστη διάρκεια του χρόνου προειδοποίησης, για να παρασχεθεί η απαραίτητη πληροφορία στον χειριστή και τον συντηρητή, ώστε αυτοί να δράσουν πριν την εμφάνιση της αστοχίας.
- Το ελάχιστον επίπεδο πιθανότητας (minimum probability level) ότι η υπολειπόμενη διάρκεια χρήσιμης ζωής θα είναι ίση ή μεγαλύτερη από το ελάχιστο επίπεδο προειδοποίησης (minimum warning level).

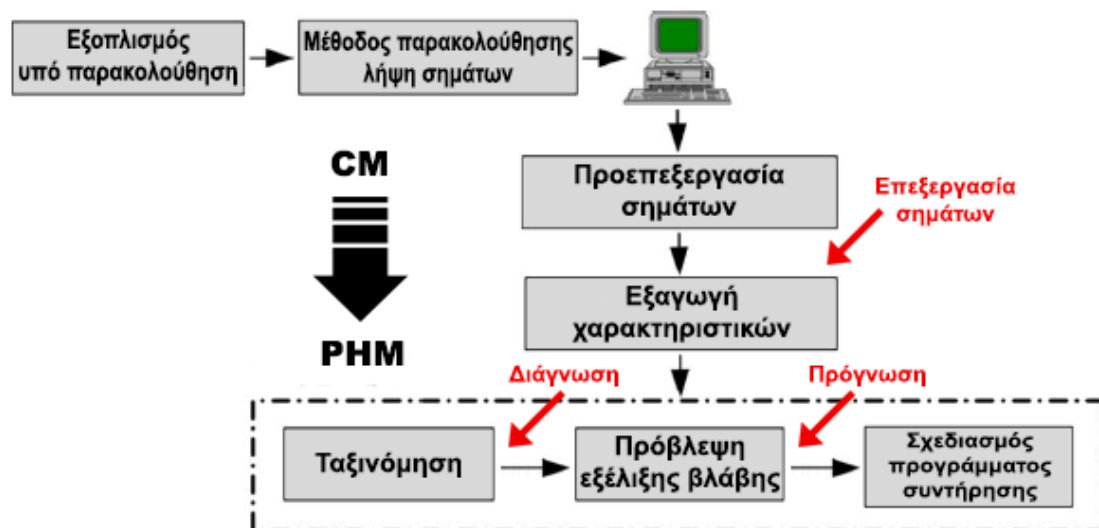
3.2 Βασική δομή και επιμέρους βήματα

Η βασική δομή ενός συστήματος διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών περιλαμβάνει την λήψη και επεξεργασία των σημάτων παρακολούθησης και τα εργαλεία διάγνωσης, ταξινόμησης και πρόγνωσης βλαβών (Σχήμα 1.3) [10-14].



Σχήμα 1.3. Βασική δομή ενός συστήματος διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών.

Στη βάση μιας γενικότερης τεχνολογίας πρόγνωσης και διάγνωσης βλαβών, η υιοθέτηση ενός συστήματος παρακολούθησης κατάστασης (CM) και διάγνωσης βλαβών ενός εξοπλισμού, σε συνδυασμό και συνεργασία με ένα ολοκληρωμένο σύστημα πρόγνωσης και διαχείρισης της “υγείας” του (prognosis and health management, PHM), αποτελούν θεμελιώδη εργαλεία για την επίτευξη μιας αποτελεσματικής στρατηγικής συντήρησης βάσει κατάστασης (Condition-based Maintenance, CBM). Μια στρατηγική CBM, λοιπόν, προτείνει τη λήψη αποφάσεων και τη διενέργεια δράσεων στηριζόμενων στον έλεγχο και την ανάλυση πληροφοριών σχετικά με την φύση, την σοβαρότητα και τη πιθανή εξέλιξη κάθε βλάβης. Προς αυτήν την κατεύθυνση, μια εναλλακτική, αναλυτική δομή ενός συστήματος διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4. Θα πρέπει να τονιστεί ότι, κατά την παρακολούθηση σύνθετων συστημάτων, η πρόγνωση δεν διαχωρίζεται αυστηρά από την διάγνωση καθώς από κοινού προσδιορίζουν την εμφάνιση μιας ενδεχόμενης βλάβης [10-15].



Σχήμα 1.4. Αναλυτική δομή ενός συστήματος διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών.

3.2.1 Μέθοδοι Παρακολούθησης

Η συλλογή δεδομένων (σημάτων) σχετικά με την φυσική και λειτουργική κατάσταση ενός εξοπλισμού, επιτυγχάνεται με τη χρήση μεθόδων παρακολούθησης, που αποτελούν και το πρώτο ουσιώδες στάδιο στην λειτουργία ενός συστήματος διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών. Τα δεδομένα που συλλέγονται σε αυτό το στάδιο είναι είτε *δεδομένα συμβάντων* ή *δεδομένα κατάστασης*. Ο πρώτος τύπος δεδομένων δίνει πληροφορίες σχετικά με το τι έχει συμβεί, για παράδειγμα μια εγκατάσταση ενός νέου εξοπλισμού, μια διακοπή λειτουργίας, μια επιδιόρθωση ή αλλαγή λιπαντικού ελαίου. Από την άλλη, ο δεύτερος τύπος δεδομένων συνίσταται σε



μετρήσεις και παρατηρήσεις για τις οποίες υπάρχει η πεποίθηση ότι σχετίζονται με την “υγεία”, την ενδεχόμενη φθορά και, γενικότερα, την κατάσταση του εξοπλισμού [10].

Τα δεδομένα κατάστασης συλλέγονται από αισθητήρια που υλοποιούν συγκεκριμένες μεθόδους παρακολούθησης, ανάλογα με το είδος του εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα [10-17]:

- Μηχανικές δονήσεις και ήχος
- Ακουστικές εκπομπές
- Σήματα υπερήχων
- Δυνάμεις
- Κατανάλωση ενέργειας
- Θερμοκρασία
- Εποπτικές μέθοδοι (συμβατική ή τεχνητή όραση, μικροσκοπία, ανάλυση λιπαντικών ελαίων – τριβολογία, ραδιογραφία, υπερηχογραφία και υπέρυθη θερμογραφία).

Υπάρχουν διαφορές μεταξύ των διαφόρων μεθόδων παρακολούθησης, ανάλογα με το σκοπό που χρησιμοποιούνται σε ένα διαγνωστικό/προγνωστικό σύστημα. Για παράδειγμα, ορισμένες από τις μεθόδους παρακολούθησης είναι αποτελεσματικότερες στην ανίχνευση μιας ξαφνικής αστοχίας (ακαριαία βλάβη), ενώ άλλες είναι καταλληλότερες για το έλεγχο της σταδιακής φθοράς που σχετίζεται με βαθμιαίες βλάβες. Συχνά λοιπόν, ακόμα και οι πιο αποτελεσματικές και αξιόπιστες τεχνικές ελέγχου φθοράς, εμφανίζουν τόσο αργή απόκριση στην εφαρμογή τους, που καθίστανται ακατάλληλες για την ανίχνευση αστοχιών λόγω ακαριαίων βλαβών.

Στην πραγματικότητα, οι μηχανικές δονήσεις, ο ήχος, οι ακουστικές εκπομπές και οι υπέρηχοι είναι στο σύνολό τους μετρήσεις δόνησης, αν και το φάσμα συχνότητας που μετράται σε κάθε μια από αυτές τις μεθόδους διαφέρει. Θα πρέπει να σημειωθεί βέβαια, ότι ο ήχος είναι αερομεταφερόμενη δόνηση, την στιγμή που όλες οι άλλες δονήσεις μεταφέρονται με μηχανικό τρόπο μέσω της δομής μιας κατασκευής. Η ανάλυση όλων των μετρήσεων δόνησης θεωρείται, ίσως, η πιο αξιόπιστη μέθοδος παρακολούθησης φθοράς και βλαβών σε εφαρμογές όπως οι ηλεκτρικές μηχανές, οι εργαλειομηχανές και τα έδρανα κύλισης. Σε περίπτωση εμφάνισης συγκεκριμένων τύπων βλαβών, κατά την λειτουργία τέτοιου είδους εξοπλισμού, επέρχεται αλλαγή της δυναμικής κατάστασης του συστήματος και, συνακόλουθα, των παραγόμενων δυνάμεων, με αποτέλεσμα την επιπλέον (μη αναμενόμενη) παραγωγή δονήσεων τόσο στο χαμηλό φάσμα συχνοτήτων, έως 20 KHz (μηχανικές δονήσεις και ήχος), όσο και στο υψηλό φάσμα συχνοτήτων, από 20 έως 80 KHz (υπέρηχοι) και άνω των 100 KHz (ακουστικές εκπομπές). Οι μηχανικές δονήσεις που μεταφέρονται στο εξωτερικό κέλυφος ενός εξοπλισμού μετρώνται με τη χρήση επιταχυνσιομέτρων (accelerometers), ανιχνευτών ταχύτητας (velocity transducers) ή ανιχνευτών μετατόπισης (displacement transducers). Για την δε μέτρηση του

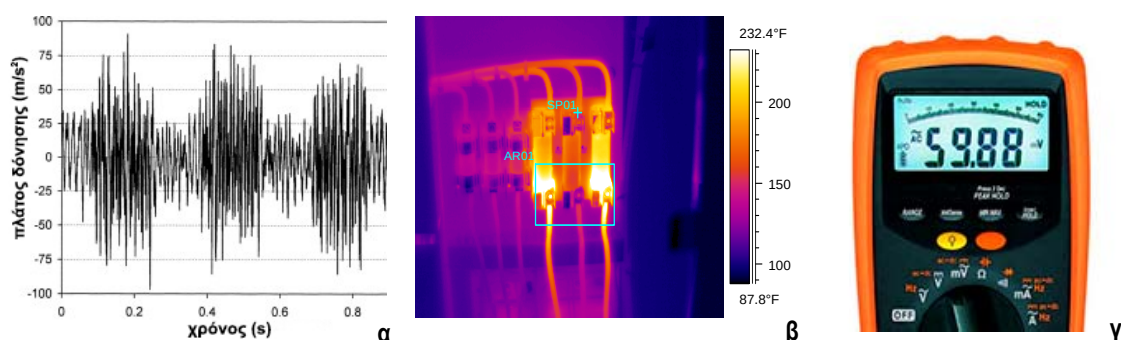
ήχου, των ακουστικών εκπομπών και των υπερήχων χρησιμοποιούνται αντίστοιχα μικρόφωνα, ανιχνευτές ακουστικών εκπομπών (acoustic emission transducers) και συσκευές ανίχνευσης και απεικόνισης παλμών υπερήχων [16-17].

Σε εφαρμογές όπου η λειτουργία ενός εξοπλισμού σχετίζεται με την ανάπτυξη ροπής, τριβής ή άλλων σημαντικών κάθετων, αξονικών και περιστροφικών δυνάμεων, η χρήση δυναμόμετρων για την καταγραφή αδικαιολόγητων διακυμάνσεων τους θεωρείται επίσης μια αξιόλογη μέθοδος διάγνωσης κυρίως βαθμιαίων βλαβών. Εναλλακτικά, η άμεση εξάρτηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από την μεταβολή της δυναμικής κατάστασης ενός ενεργητικού εξοπλισμού, λόγω βλαβών, αξιοποιείται από ειδικούς μετατροπείς ρεύματος. Από την άλλη πλευρά, σε μεγάλο αριθμό συστημάτων και κατασκευών υπό λειτουργία, η εμφάνιση ελαττωμάτων, βλαβών και αστοχιών σε κάποιο τμήμα τους, επιφέρει τοπική αύξηση ή μείωση των επιπέδων θερμοκρασίας τους. Μεταξύ των αιτίων της μεταβολής της θερμικής συμπεριφοράς ενός εξοπλισμού, μπορεί να είναι – για παράδειγμα – η αύξηση των δυνάμεων τριβής, ένα τοπικό βραχυκύκλωμα ή μια υπερφόρτιση ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Αυτή η “θερμική υπογραφή” μιας βλάβης, που επιφέρει διαφοροποίηση στο θερμοκρασιακό προφίλ ενός τμήματος του εξοπλισμού, είναι δυνατό να καταγραφεί είτε με συμβατικές μεθόδους θερμογραφίας (θερμόμετρα επαφής, αισθητήρια θερμοκρασίας, πυρόμετρα), είτε με τη χρήση υπέρυθρης θερμογραφίας [10-17]. Η τελευταία, αν και επίσης αφορά στη μέτρηση θερμοκρασίας, χρησιμοποιεί συστήματα και συσκευές απεικόνισης της κατάστασης ενός εξοπλισμού και εντάσσεται στην κατηγορία των εποπτικών μεθόδων. Οι εποπτικές μέθοδοι δεν αφορούν στην παρακολούθηση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου, αλλά στην άμεση παρακολούθηση της πραγματικής κατάστασης ενός εξοπλισμού. Καθώς η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εστιάζει στην εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας, ως εποπτικής μεθόδου, στη διάγνωση και τη πρόγνωση βλαβών, σε επόμενη ενότητα πραγματοποιείται ξεχωριστή αναφορά στις κυριότερες εποπτικές μεθόδους.

3.2.2 Τεχνικές επεξεργασίας σήματος

Σημαντικός αριθμός μοντέλων, αλγορίθμων και εργαλείων συγκροτούν τις πολυάριθμες τεχνικές επεξεργασίας σήματος που απαντώνται στη βιβλιογραφία, σε εφαρμογές διαγνωστικών και προγνωστικών συστημάτων. Σκοπός αυτών των τεχνικών είναι η ανάλυση, κατανόηση και “μετάφραση” της πληροφορίας την οποία περιέχουν τα σήματα που προσκτώνται από κάθε μέθοδο παρακολούθησης. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής επεξεργασίας, εξαρτάται από τον εκάστοτε τύπο σήματος – και, συνεπώς, πληροφορίας – που έχει προσκτηθεί. Στην περίπτωση των συστημάτων CM που εξετάζονται, η πληροφορία μπορεί να είναι [18]:

- **Κυματομορφή:** Δεδομένα που συλλέγονται, για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, ως χρονοσειρές τιμών. Τυπικά παραδείγματα κυματομορφών είναι τα σήματα δονήσεων και ακουστικών εκπομπών (Σχήμα 1.5-α).
- **Πολυδιάστατο σήμα:** Δεδομένα που συλλέγονται, για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, σε μορφή πολυδιάστατων τιμών. Το πιο κοινό παράδειγμα τέτοιων δεδομένων είναι τα δεδομένα εικόνων, όπως τα υπέρυθρα θερμογραφήματα (θερμικές εικόνες), οι οπτικές εικόνες και οι εικόνες ραδιογραφίας (Σχήμα 1.5-β).
- **Αριθμητική τιμή:** Δεδομένα που συλλέγονται, για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο ως αριθμητικές τιμές μεταβλητών, όπως η θερμοκρασία, η ηλεκτρική τάση κ.ά (Σχήμα 1.5-γ).



Σχήμα 1.5. Χαρακτηριστικά παραδείγματα **α.** σήματος κυματομορφής, **β.** πολυδιάστατου σήματος εικόνας, **γ.** σήματος αριθμητικής τιμής.

Οι κυριότερες κατηγορίες μεθόδων επεξεργασίας σημάτων κυματομορφών σε συστήματα CM είναι: η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (time domain analysis), η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain analysis) και η ανάλυση χρόνου-συχνότητας (time-frequency analysis).

Η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου βασίζεται απ' ευθείας στην ίδια την κυματομορφή του χρόνου. Συνεπώς, μια “κλασική” τεχνική αυτού του είδους της ανάλυσης υπολογίζει τα χαρακτηριστικά των σημάτων κυματομορφών χρόνου ως περιγραφική στατιστική, με τη χρήση στατιστικών παραμέτρων όπως η μέση τιμή (mean value), η τιμή αιχμής ή κορυφή (peak value), η τυπική απόκλιση (standard deviation), η διακύμανση (variance), η διασπορά (dispersion), η μέση τετραγωνική ρίζα (root mean square, RMS), η ασυμμετρία (skewness) και η κύρτωση (kurtosis) [18-19].

Η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας βασίζεται στο μετασχηματισμό του σήματος στο πεδίο της συχνότητας. Το πλεονέκτημα της ανάλυσης αυτού του είδους, συγκριτικά με την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου, έγκειται στην ικανότητά της να προσδιορίζει και να απομονώνει εύκολα από το συνολικό σήμα, στοιχεία συγκεκριμένης συχνότητας, τα οποία εμφανίζουν ξεχωριστό ενδιαφέρον για κάθε εφαρμογή. Η πιο διαδεδομένη τεχνική συμβατικής ανάλυσης στο πεδίο της συχνότητας είναι η ανάλυση φάσματος με τη χρήση γρήγορων μετασχηματισμών

Fourier (fast Fourier transforms). Τα συνηθέστερα επιμέρους εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση φάσματος FFT περιλαμβάνουν την ανάλυση του φάσματος ισχύος (power spectrum), την γραφική απεικόνιση φάσματος, τα φίλτρα συχνοτήτων και την ανάλυση περιβάλλουσας (ή αλλιώς αποδιαμόρφωση εύρους) [18-19]. Ένας σημαντικός, ωστόσο, περιορισμός της ανάλυσης στο πεδίο της συχνότητας είναι η πλήρης αδυναμία που εμφανίζει στο χειρισμό μη σταθερών σημάτων κυματομορφών, τα οποία παράγονται πολύ συχνά σε περιπτώσεις εμφάνισης σφαλμάτων σε μηχανολογικά συστήματα.

Για τη διαχείριση, λοιπόν, μη σταθερών σημάτων κυματομορφών έχει αναπτυχθεί η ανάλυση χρόνου-συχνότητας, η οποία αναλύει σήματα κυματομορφών τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Μια τυπική ανάλυση χρόνου-συχνότητας χρησιμοποιεί κατανομές χρόνου-συχνότητας, οι οποίες αναπαριστούν την ενέργεια ή την ισχύ ενός σήματος κυματομορφής σε συναρτήσεις δύο διαστάσεων: στο χρόνο και στη συχνότητα. Διαδεδομένες τεχνικές ανάλυσης χρόνου-συχνότητας είναι οι σύντομοι χρόνου μετασχηματισμοί Fourier (short-time Fourier transforms, STFT) ή αλλιώς φασματογραφήματα (spectrograms), η κατανομή Wigner-Ville και η ανάλυση/μετασχηματισμοί κυματιδίων (wavelet analysis/transforms) [18-19].

Από την άλλη πλευρά, η επεξεργασία πολυδιάστατων σημάτων αναφέρεται ουσιαστικά στο σύνολο των τεχνικών επεξεργασίας εικόνας, οι οποίες – εκ φύσεως – είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις εποπτικές μεθόδους παρακολούθησης. Η επεξεργασία εικόνας είναι παρεμφερής με την επεξεργασία σημάτων κυματομορφής, πλην όμως πολύπλοκότερη καθώς διαχειρίζεται μια επιπλέον διάσταση [18]. Στην πράξη, οι πρωτογενείς εικόνες (raw images) είναι κατά κανόνα ιδιαίτερα πολύπλοκες. Κατά συνέπεια, οποιαδήποτε άμεση πληροφορία διάγνωσης βλάβης δεν είναι εξ' αρχής διαθέσιμη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι τεχνικές επεξεργασίας εικόνας θα πρέπει να είναι ικανές να απομονώσουν τα χρήσιμα χαρακτηριστικά των πρωτογενών εικόνων. Βέβαια, όταν σε ορισμένες περιπτώσεις, οι πρωτογενείς εικόνες παρέχουν επαρκή και σαφή χαρακτηριστικά για τη διάγνωση μιας βλάβης, ακόμη και με μία απλή παρατήρηση, η επεξεργασία τους μπορεί να παραλειφθεί. Ακόμη όμως και σε αυτές τις περιπτώσεις, η εφαρμογή τεχνικών επεξεργασίας εικόνας μπορεί να προσδώσει σε ένα σύστημα μεγαλύτερη αξιοπιστία, ακρίβεια και αυτοματοποιημένη διαγνωστική ικανότητα. Οι βασικότερες τεχνικές επεξεργασίας εικόνων εποπτικών μεθόδων CM σε συστήματα διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών, είναι οι ακόλουθες [18-21]:

- Ανάλυση κυματιδίων
- Ανάλυση ιστογράμματος και στατιστικών παραμέτρων (histogram and statistical analysis)
- Εφαρμογή κατωφλίου (thresholding)
- Κατάτμηση εικόνας (image segmentation)

- Ανίχνευση ακμών (edge detection)
- Συνέλιξη, φιλτράρισμα, βελτίωση (convolution, filtering, enhancement)
- Ανάλυση πινάκων gray-level co-occurrence (GLCM)
- Γρήγοροι μετασχηματισμοί Hough (fast Hough transforms)
- Ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος (regions of interest, ROI analysis)

Τέλος, όσον αφορά στα δεδομένα αριθμητικών τιμών, σε αυτά περιλαμβάνονται τόσο προσκτημένα πρωτογενή δεδομένα, όσο και τιμές χαρακτηριστικών που εξήχθησαν από την επεξεργασία των πρωτογενών σημάτων. Η διαχείριση και επεξεργασία δεδομένων αριθμητικών τιμών είναι συνήθως απλούστερη απ' ό,τι στην περίπτωση των δεδομένων κυματομορφών και εικόνων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα συσχέτισης (correlation) αυτών των δεδομένων αυξάνεται σημαντικά όταν ο αριθμός των μετρούμενων μεταβλητών είναι μεγάλος. Σε αυτές τις περιπτώσεις η χρήση τεχνικών πολυπαραγοντικής ανάλυσης (multivariate analysis techniques), όπως η ανάλυση κυρίων συνιστωσών (principal component analysis, PCA) και η ανάλυση ανεξάρτητων συνιστωσών (independent component analysis, ICA), κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη [22].

3.2.3 Εργαλεία διάγνωσης, ταξινόμησης και πρόγνωσης βλαβών

Η διαγνωστική βλαβών περιγράφεται ως μια διαδικασία που βασίζεται στην “χαρτογράφηση” της πληροφορίας κατάστασης σε πληροφορία βλάβης, βάσει των μετρήσεων ή/και των χαρακτηριστικών ενός εξοπλισμού. Όπως έχει εξηγηθεί στην Υποενότητα 2.1, μια βλάβη μπορεί έχει είτε άμεσες συνέπειες στην αστοχία ενός εξοπλισμού ή προοδευτική (βαθμιαία) εξέλιξη. Όταν μια βλάβη δεν εμφανίζει άμεσες συνέπειες, πλην των απαιτούμενων για τη διάγνωση και επιδιόρθωσή της, χαρακτηρίζεται ως *ενδεχόμενη* ή *πιθανή αστοχία* (potential failure). Η διαγνωστική δράση που ακολουθεί τον εντοπισμό μιας πιθανής αστοχίας είναι μια ενεργητική συντήρηση (proactive maintenance) η οποία εφαρμόζεται κατόπιν μιας διαδικασίας συντήρησης βάσει κατάστασης. Τυπικό παράδειγμα μια τέτοιας περίπτωσης είναι ένα σήμα συναγερμού που παράγεται από έναν “κανόνα” ο οποίος εφαρμόζεται στα δεδομένα ενός συστήματος CM [18, 23-25].

Αυτή η διαγνωστική διαδικασία “χαρτογράφησης” είναι ευρύτερα γνωστή ως αναγνώριση προτύπων (pattern recognition). Διαχρονικά, η αναγνώριση προτύπων ήταν μια χειροκίνητη εργασία, η οποία εφαρμόζονταν με τη βοήθεια γραφικών εργαλείων, όπως τα γραφήματα φασμάτων ισχύος και φάσης, τα γραφήματα φάσης κυματιδίων, τα κλιμακογράμματα κυματιδίων και τα γραφήματα φασμάτων αυτοπαλινδρόμησης. Ωστόσο, η χειροκίνητη αναγνώριση προτύπων είναι μια αργή και δαπανηρή εργασία, προϋποθέτει σημαντική εμπειρία στο συγκεκριμένο πεδίο διαγνωστικών εφαρμογών και, συνεπώς, άρτια εκπαιδευμένο και εξειδικευμένο προσωπικό. Επομένως, η αυτοματοποιημένη αναγνώριση

προτύπων είναι ιδιαίτερα επιθυμητή σε συστήματα διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών και μπορεί να επιτευχθεί με την ταξινόμηση σημάτων τα οποία βασίζονται στην πληροφορία και με τα χαρακτηριστικά που εξάγονται από τα πρωτογενή σήματα ενός συστήματος CM. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται προσεγγίσεις διάγνωσης βλαβών, με έμφαση στις προσεγγίσεις στατιστικής ανάλυσης και τεχνητής νοημοσύνης.

Η ανάλυση σε ομάδες (cluster analysis), ως μια πολυπαραγοντική μέθοδος στατιστικής ανάλυσης, αποτελεί μια διαδεδομένη προσέγγιση στατιστικής ταξινόμησης βλαβών η οποία ομαδοποιεί τα σήματα σε διαφορετικές “κατηγορίες βλαβών” βάσει της ομοιότητας των χαρακτηριστικών που διαθέτουν. Κατά τη διαδικασία αυτή, επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της διασποράς στο εσωτερικό των ομάδων και η μεγιστοποίηση της διασποράς μεταξύ των ομάδων. Το επακόλουθο αποτέλεσμα μιας διαδικασίας ανάλυσης σε ομάδες είναι ένας αριθμός ετερογενών ομάδων με ομογενή χαρακτηριστικά. Με άλλα λόγια, παρατηρούνται ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών ομάδων, αλλά τα σήματα της κάθε ομάδας είναι (σχεδόν) όμοια [18,26]. Αντίστοιχο εργαλείο στατιστικής διάγνωσης και ταξινόμησης βλαβών είναι τα “κρυφά” μοντέλα Markov (hidden Markov models, HMM) [27].

Κατά την τελευταία δεκαετία, οι εφαρμογές εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence, AI) στη διάγνωση βλαβών μηχανολογικών συστημάτων έχουν παρουσιάσει σημαντική αύξηση και βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τα συμβατικά εργαλεία. Στη βιβλιογραφία, τα δύο δημοφιλέστερα εργαλεία AI θεωρούνται τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks, ANN) και τα έμπειρα συστήματα (expert systems, ES) [18,28]. Άλλα ευρέως εφαρμοσμένα εργαλεία AI περιλαμβάνουν τα συστήματα ασαφούς λογικής (fuzzy logic, FL), τα ασαφή νευρωνικά δίκτυα (fuzzy-neural networks, FNN), τα νευρωνικά-ασαφή συστήματα (neural-fuzzy systems, NFS) και οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (evolutionary algorithms, EA). Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο “μιμείται” τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Αποτελείται δε από απλά στοιχεία επεξεργασίας, συνδεδεμένα μεταξύ τους με συνάψεις, σε μια σύνθετη δομή επιπέδων (layers). Ένα τέτοιο μοντέλο προσεγγίζει μια σύνθετη, μη γραμμική συνάρτηση με πολλαπλές εισόδους και εξόδους (multi-input, multi-output). Κάθε στοιχείο επεξεργασίας ενός ANN συνίσταται σε ένα κόμβο-νευρώνα (node-neuron) και σε ένα συναπτικό βάρος (weight). Τα ANN έχουν την ικανότητα να “μαθαίνουν” μηχανικά μια άγνωστη συνάρτηση, προσαρμόζοντας τα βάρη των στοιχείων τους με τις παρατηρήσεις των εισόδων και των εξόδων τους. Η διαδικασία αυτή συχνά αναφέρεται ως “εκπαίδευση” (training) ενός νευρωνικού δικτύου [18,28-32]. Σε αντίθεση με τα ANN, τα οποία αποκτούν γνώση μέσα από μια διαδικασία “εκπαίδευσης” πάνω σε δεδομένα παρατήρησης με γνωστές εισόδους και εξόδους, τα έμπειρα συστήματα χρησιμοποιούν βάσεις εξειδικευμένης γνώσης πεδίου (domain expert knowledge), σε πρόγραμμα υπολογιστή, και μια αυτοματοποιημένη μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων, για την εκτέλεση συλλογισμών επίλυσης προβλημάτων [33].

Συγκριτικά με τη διαγνωστική, η προγνωστική βλαβών θεωρείται μέχρι και σήμερα σημαντική ερευνητική πρόκληση, όντας η “Αχίλλειος πτέρνα” κάθε συστήματος CM/PHM [10,18]. Στην περιορισμένη διαθέσιμη βιβλιογραφία, καταγράφονται δύο κύριοι τύποι προγνωστικών προσεγγίσεων σε μηχανολογικά συστήματα.

Η πλέον προφανής και ευρέως διαδεδομένη προσέγγιση συνίσταται στην πρόβλεψη του χρόνου που υπολείπεται έως την εμφάνιση μιας αστοχίας (ή ενός ή περισσότερων βλαβών ή πιθανών αστοχιών), με δεδομένα το παρελθόν και το μελλοντικό λειτουργικό “προφίλ”, καθώς και την τρέχουσα κατάσταση του υπό εξέταση εξοπλισμού. Ο χρόνος αυτός καλείται υπολειπόμενη χρήσιμη ζωή (remaining useful life, RUL) ενός εξοπλισμού ή συστήματος [2,3,18]. Βέβαια, μια αποτελεσματική πρόγνωση προϋποθέτει γνώση (ή δεδομένα) σχετικά με τον εκάστοτε μηχανισμό αστοχίας. Η διαδικασία εξέλιξης μιας βλάβης (fault propagation process) συνήθως ανιχνεύεται από ένα μοντέλο πρόβλεψης ή “τάσης” για συγκεκριμένες μεταβλητές κατάστασης. Προς την κατεύθυνση αυτή, υπάρχουν δύο τρόποι για την περιγραφή μιας αστοχίας. Κατά τον πρώτο, θεωρείται ότι η αστοχία εξαρτάται από τις μεταβλητές κατάστασης (οι οποίες αντικατοπτρίζουν το πραγματικό επίπεδο μιας βλάβης) και ένα προκαθορισμένο όριο. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος ορισμός της αστοχίας είναι απλός: μια αστοχία συμβαίνει, όταν μια βλάβη φτάσει στο προκαθορισμένο όριο. Κατά τον δεύτερο, αναπτύσσεται ένα μοντέλο του μηχανισμού αστοχίας, χρησιμοποιώντας διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα. Σε αυτήν την περίπτωση, διάφοροι ορισμοί της αστοχίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν [18]:

- *Μερική αστοχία* όταν ο εξοπλισμός λειτουργεί σε ένα μη ικανοποιητικό επίπεδο.
- *Πλήρης αστοχία* όταν ο εξοπλισμός αδυνατεί πλήρως να εκτελέσει την λειτουργία του.
- *Κατάρρευση* όταν η λειτουργία του εξοπλισμού διακόπτεται.

Τέλος, ο δεύτερος τύπος προγνωστικών προσεγγίσεων σχετίζεται με τη λήψη αποφάσεων διενέργειας προληπτικής συντήρησης ή συντήρησης βάσει κατάστασης, ανάλογα με τη φύση της διαγνωσμένης βλάβης. Όπως και στην περίπτωση των διαγνωστικών εργαλείων, ο τύπος αυτός εμπίπτει στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες: στατιστικά εργαλεία, εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης και εργαλεία βάσει μοντέλων [18,34-36].

4. ΕΠΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

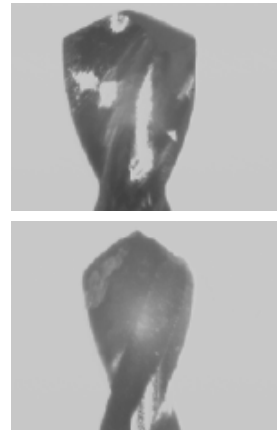
Ως αντικείμενο ειδικότερης μελέτης της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, η εφαρμογή των εποπτικών μεθόδων σε συστήματα CM, με σκοπό τη διάγνωση και την πρόγνωση βλαβών, εξετάζεται ξεχωριστά σε αυτήν την Ενότητα. Με τον όρο “εποπτική μέθοδος” προσδιορίζεται

εκείνη η μέθοδος CM η οποία, ανεξάρτητα από την τεχνική που εφαρμόζει, απεικονίζει την πραγματική μορφολογική ή/και λειτουργική κατάσταση ενός εξοπλισμού, ως αυτή έχει, υποδεικνύοντας συνεπώς την “υπογραφή” μιας ενδεχόμενης φθοράς ή βλάβης σε ένα πολυδιάστατο σήμα (εικόνα) [13-15]. Αν και οι συγκεκριμένες μέθοδοι CM καθιστούν ένα σύστημα διάγνωσης/πρόγνωσης βλαβών περισσότερο αξιόπιστο, λόγω της απουσίας αισθητηρίων, εμφανίζουν, συχνά, σημαντικές δυσκολίες κατά την επεξεργασία των σημάτων τους. Επιπλέον, λόγω της φύσεως τους, συχνά απαιτούν την διακοπή λειτουργίας ενός εξοπλισμού ή/και την αφαίρεση τμημάτων αυτού, προς εποπτικό έλεγχο. Σε αυτές τις περιπτώσεις η εν λειτουργία εφαρμογή μιας εποπτικής μεθόδου θεωρείται πρακτικά αδύνατη. Η υλοποίηση μιας ή περισσότερων εποπτικών μεθόδων μπορεί, ωστόσο, να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική, σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπου οι πρωτογενείς εικόνες καθιστούν μια βλάβη άμεσα αναγνωρίσιμη και ταξινομήσιμη στο σύστημα διάγνωσης/πρόγνωσης, χωρίς την παρεμβολή πολύπλοκων και χρονοβόρων τεχνικών επεξεργασίας εικόνας. Οι εποπτικές μέθοδοι μπορούν, άτυπα, να διαχωριστούν σε μεθόδους μηχανικής, υπολογιστικής, οπτικής και μικροσκοπικής όρασης, εκ των οποίων οι κυριότερες παρουσιάζονται ακολούθως.

ο Μηχανική όραση (Machine vision)

Η μηχανική όραση αφορά στην τεχνολογία και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση αυτοματοποιημένων παρατηρήσεων και επιθεωρήσεων εξοπλισμού, με την παραγωγή και ανάλυση απλών ή στερεοσκοπικών εικόνων στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Το πρώτο βήμα μιας διαδικασίας εφαρμογής μηχανικής όρασης περιλαμβάνει την πρόσκτηση του σήματος εικόνας, με τη χρήση καμερών, φακών και τεχνητής πηγής ή δέσμης φωτός. Στη συνέχεια, μπορούν να αξιοποιηθούν πολυάριθμες διαθέσιμες τεχνικές επεξεργασίας εικόνας, για την εξαγωγή της απαραίτητης πληροφορίας που χρησιμοποιείται σαν είσοδος στο σύστημα διάγνωσης και ταξινόμησης βλαβών. Επιμέρους διαχωρισμοί προσεγγίσεων μηχανικής όρασης γίνονται βάσει της χρωματικής πληροφορίας που περιέχεται στα παραγόμενα σήματα (μονοχρωματικές ή έγχρωμες εικόνες), της ανάλυσης τους (resolution) και της δυνατότητας (ή μη) στιγμιαίας επεξεργασίας των παραγόμενων σημάτων (ταυτόχρονα με τη λήψη τους). Κατά την εφαρμογή της μηχανικής όρασης, η συσκευή απεικόνισης μπορεί να είναι εγκατεστημένη είτε ξεχωριστά από την κύρια μονάδα επεξεργασίας εικόνας ή σε συνδυασμό με αυτή (“ευφυής κάμερα”). Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζεται η προσαρμογή ενός συστήματος μηχανικής όρασης (αριστερά) και ενδεικτικά ληφθέντα σήματα εικόνων (δεξιά), κατά την παρακολούθηση της κατάστασης και της φθοράς διατρητικών κοπτικών εργαλείων (drilling tool condition monitoring).



Σχήμα 1.6. Εφαρμογή συστήματος (αριστερά) και εικόνες (δεξιά) μηχανικής όρασης για CM σε κοπτικά εργαλεία διάτρησης [37].

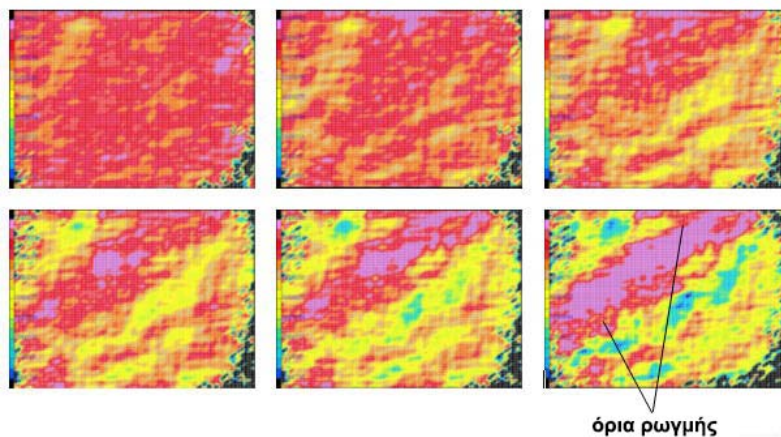
ο Υπολογιστική όραση (Computer vision)

Αν και εμφανίζουν διακριτές διαφορές, η υπολογιστική και η μηχανική όραση σχετίζονται συχνά μεταξύ τους. Η υπολογιστική όραση περιλαμβάνει μεθόδους πρόσκτησης, επεξεργασίας, ανάλυσης και κατανόησης εικόνων και πολυδιάστατων δεδομένων, με σκοπό την παραγωγή αριθμητικής και συμβολικής πληροφορίας, λ.χ. σε μορφή λογικών αποφάσεων. Κίνητρο για την ανάπτυξη αυτών των μεθόδων αποτέλεσε η ανάγκη βελτίωσης των ικανοτήτων της συμβατικής ανθρώπινης όρασης, μέσω της αντίληψης και κατανόησης μιας εικόνας με τη βοήθεια υπολογιστή. Η έννοια της κατανόησης μιας εικόνας μπορεί να θεωρηθεί ως ο διαχωρισμός των συμβολικών πληροφοριών από τα δεδομένα εικόνας, με τη χρήση μοντέλων που αναπτύχθηκαν με τη βοήθεια της γεωμετρίας, της φυσικής, της στατιστικής, καθώς και της θεωρίας μάθησης. Η υπολογιστική όραση περιγράφεται συχνά και ως μια μέθοδος αυτοματοποίησης και ενσωμάτωσης ενός μεγάλου φάσματος τεχνικών επεξεργασίας και αναπαραστάσεων για την βελτιστοποίηση της οπτικής αντίληψης ενός συστήματος. Τυπικά παραδείγματα επιμέρους εργασιών υπολογιστικής όρασης, που απαντώνται και σε αρκετές εφαρμογές CM, είναι η οπτική αναγνώριση (optical detection), η ανάλυση κίνησης (motion analysis), η ανακατασκευή δισδιάστατων και τρισδιάστατων σκηνών (2-d and 3-d scene reconstruction) και η αποκατάσταση εικόνων (image restoration) [38].

ο Οπτική όραση: Οπτική μετρολογία και ολογραφία (optical metrology/holography)

Το φως μιας δέσμης laser, με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού, μπορεί να παράγει ακριβείς μεθόδους μη-επαφής, για μετρήσεις μεγέθους, θέσης ή μικρών μετατοπίσεων στην επιφάνεια ενός εξοπλισμού, οι οποίες μπορούν να ενταχθούν σε μια εφαρμογή CM ενός συστήματος διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών. Συγκεκριμένα, η συμβολομετρία δέσμης laser

(οπτική ολογραφία) εφαρμόζεται σε υψηλής ακριβείας μετρήσεις μετατοπίσεων, καθώς και σε ορισμένες περιπτώσεις μετρήσεων επιπέδου δονήσεων σε μηχανολογικές κατασκευές. Κατά την ανάπτυξη μιας επιφανειακής ή υποεπιφανειακής (χαμηλού βάθους) βλάβης ενός τμήματος εξοπλισμού, είναι δυνατό να μεταβληθεί η κατανομή της πίεσης/φόρτισής του, με αποτέλεσμα η βλάβη να γίνεται ανιχνεύσιμη υπό την μορφή επιφανειακής μετατόπισης. Στην κοινότερη μέθοδο οπτικής ολογραφίας, μια δέσμη φωτός laser διαχωρίζεται σε δύο δέσμες ακτινών. Η μία δέσμη χρησιμοποιείται για τον φωτισμό της υπό έλεγχο επιφάνειας και η άλλη λογίζεται ως δέσμη αναφοράς. Όταν οι δύο δέσμες συνδυάζονται εκ νέου, δίνουν ως αποτέλεσμα ένα ολόγραμμα το οποίο καταγράφεται σε ειδικό ολογραφικό φιλμ. Όταν αυτό το ολόγραμμα φωτιστεί, με τη σειρά του, από μια δέσμη φωτός laser, αναπαράγεται η εικόνα του εξεταζόμενου δείγματος, το προφίλ της οποίας εμφανίζει ανομοιομορφίες, σε μορφή κροσσών συμβολής, στα σημεία ανάπτυξης οποιασδήποτε επιφανειακής μετατόπισης. Η συχνότητα και το πλάτος των κροσσών συμβολής αποτελούν δείκτες μέτρησης αυτής της επιφανειακής μετατόπισης [39]. Μια εικόνα οπτικής ολογραφίας μπορεί να αναπαραχθεί σε 2 ή 3 διαστάσεις. Στο Σχήμα 1.7 παρουσιάζονται οι προκύπτουσες ψευδοχρωματικές εικόνες από μια εφαρμογή οπτικής ολογραφίας δέσμης laser, για την ανίχνευση της εξέλιξης ρωγμών σε στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος. Για ευρείας κλίμακας επιθεωρήσεις και ανίχνευση βλαβών εξοπλισμού, καταλληλότερη λύση αποτελούν τα οπτικά συστήματα laser, με τη χρήση ισχυρών δεσμών laser και διασκορπιστών οπτικών δεσμών (optical beam spreaders).

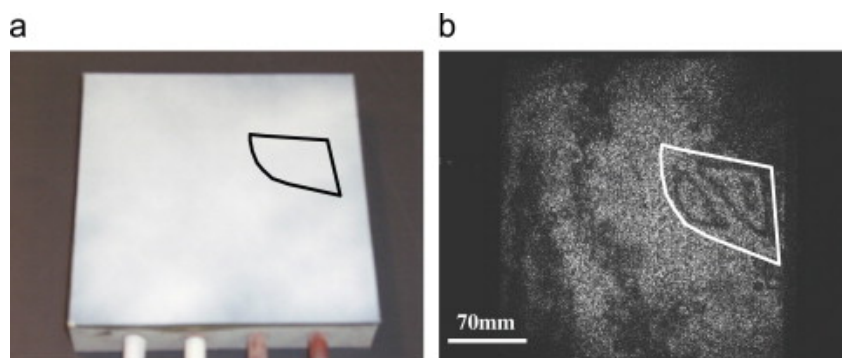


Σχήμα 1.7. Εικόνες οπτικής ολογραφίας δέσμης laser οι οποίες υποδεικνύουν την εξέλιξη μιας ρωγμής σε στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος [40].

ο **Οπτική όραση: Διατμητική επιβολή – Τομογραφία laser (laser shearography)**

Μία άλλη οπτική μέθοδος παρακολούθησης, παρεμφερής με την οπτική ολογραφία, είναι η καταγραφή με διατμητική επιβολή (laser shearography) ή απλά τομογραφία laser. Η

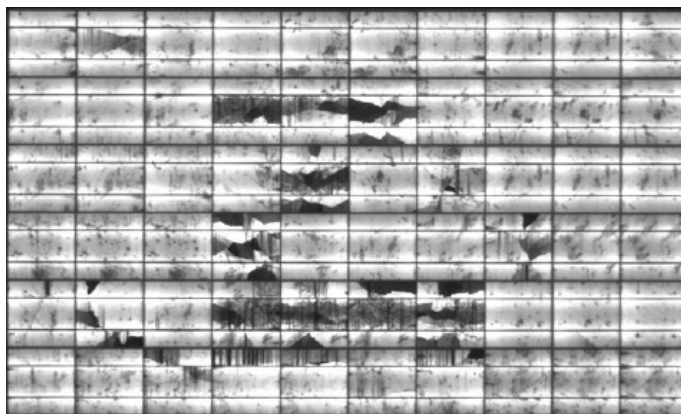
συγκεκριμένη τεχνική είναι βασισμένη στη χρήση δέσμης laser για την ανίχνευση και τον υπολογισμό επιφανειακών ανωμαλιών (μετατοπίσεων και παραμορφώσεων) χωρίς να απαιτείται επαφή με την επιφάνεια του υπό εξέταση εξοπλισμού. Αναπτύχθηκε με σκοπό να υπερβεί τους περιορισμούς της συμβατικής οπτικής ολογραφίας, καταργώντας την ανάγκη της δέσμης αναφοράς. Επίσης, στη μέθοδο αυτή, δεν απαιτείται ειδική απομόνωση του συστήματος παρακολούθησης από κραδασμούς. Κατά συνέπεια, η διατμητική επιβολή καθίσταται πρακτικά εφαρμόσιμη ακόμη και σε εργοστασιακό περιβάλλον. Σε συστήματα CM και διάγνωσης/παρακολούθησης βλαβών, η συγκεκριμένη μέθοδος αποκαλύπτει ελαττώματα και βλάβες στη δομή του εξοπλισμού, μέσω αναγνώρισης των παραμορφωτικών ανωμαλιών που αυτές προκαλούν. Άλλες εφαρμογές της συγκεκριμένης μεθόδου, αποτελούν ο υπολογισμός παραμορφώσεων, ο χαρακτηρισμός υλικών, η ανίχνευση κατάλοιπων τάσεων, ο εντοπισμός διαρροών και οι μελέτες κραδασμών [41,42]. Η ευαισθησία της μεθόδου θεωρείται πολύ υψηλή. Συγκεκριμένα, ένα σύστημα τομογραφίας laser δύναται να εντοπίζει αλλαγές σε εφελκυστικές τάσεις της τάξεως των 0.1 microstrain, με ρυθμό καρέ βίντεο. Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό αποτέλεσμα εφαρμογής τομογραφίας laser για την ανίχνευση αποκολλήσεων που έχουν τεχνητά δημιουργηθεί σε στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος.



Σχήμα 1.8. Ανίχνευση τεχνητής αποκόλλησης (b) σε στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος (a) με χρήση τομογραφίας laser [43].

ο Οπτική όραση: Ανάλυση ηλεκτροφωταύγειας (electroluminescence, EL analysis)

Η ανάλυση ηλεκτροφωταύγειας είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος στο πεδίο της διάγνωσης φθοράς και βλαβών, κυρίως, ηλεκτρικά ημιαγωγικών υλικών και πολυμερών. Βασίζεται στο ομώνυμο οπτικό και ηλεκτρονικό φαινόμενο, κατά το οποίο ένα υλικό εκπέμπει φως σε απόκριση μιας ροής ηλεκτρικού ρεύματος ή ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά την ανακατανομή ηλεκτρονίων και οπών σε ένα υλικό, το οποίο συνήθως είναι ημιαγωγός. Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια απελευθερώνουν ενέργεια ως φωτόνια, εκπέμποντας φως.



Σχήμα 1.9. Ανίχνευση ρωγμών σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο κυψελών πολυκρυσταλλικού πυριτίου με τη χρήση ηλεκτροφωτάυγειας [44].

Το γεγονός ότι η ύπαρξη οπών (κενών φορτίων) σε στερεά διηλεκτρικά υλικά θεωρείται, σε πολλές περιπτώσεις, ως μία από τις κυριότερες αιτίες αστοχίας τους, καθιστά την μέθοδο αυτή ιδανική εναλλακτική λύση στην έρευνα της ηλεκτρικής φθοράς και υποβάθμισης πολυμερών και ημιαγωγών, βρίσκοντας ήδη ευρεία εφαρμογή στην διάγνωση βλαβών ηλιακών κυψελών. Μια τέτοια εφαρμογή παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.9.

ο **Οπτική όραση: Ραδιογραφία πραγματικού χρόνου (real-time radiography)**

Μια εικόνα ραδιογραφίας ακτίνων-Χ ή νετρονίων σχηματίζεται σε μια φθορίζουσα οθόνη, η οποία είναι τοποθετημένη πίσω από το υπό εξέταση υλικό και η οποία μετατρέπει τις ακτίνες-Χ σε ορατό φως. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ακτινοσκόπηση. Η εικόνα που προκύπτει με αυτή τη διαδικασία είναι, συνήθως, σχετικά αχνή. Για τον λόγο αυτό, η ακτινοσκόπηση εφαρμόζεται προς το παρόν μόνο σε λεπτά μη μεταλλικά υλικά.

Αν, ωστόσο, η οθόνη μετατροπής είναι ενσωματωμένη σε ένα σύστημα το οποίο συμπεριλαμβάνει μια συσκευή συζευγμένου φορτίου, γνωστότερη ως CCD (charged-couple device), τότε οι εικόνες που παράγονται σε πραγματικό χρόνο είναι αρκετά πιο έντονες και μπορούν να προβληθούν σε μια οθόνη υπολογιστή ή τηλεόρασης, υλοποιώντας μιας μέτρηση ραδιογραφίας [45]. Κατά κανόνα, μια εικόνα ραδιογραφίας συντίθεται από πολλά εικονοστοιχεία (pixels). Εν συνεχεία, πολυάριθμα προγράμματα υπολογιστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περεταίρω βελτίωση της εικόνας.

Στο Σχήμα 1.10 παρουσιάζονται ενδεικτικές λήψεις εικόνων ραδιογραφίας για την ανίχνευση μικρορωγμών σε φτερά αεροπλάνου [46]. Σε συγκεκριμένες εφαρμογές και με τον σημερινό εξοπλισμό ραδιογραφίας, είναι δυνατό να επιτευχθεί αρκετά ικανοποιητική ευαισθησία στην ανίχνευση ελαττωμάτων και βλαβών. Εξάλλου, το κόστος των φθορίζοντων οθονών έχει πλέον μειωθεί σημαντικά και οι ταχύτητες παρατήρησης μπορούν να είναι ιδιαίτερα υψηλές για

εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, αν η παραγόμενη εικόνα προβληθεί μέσω τηλεόρασης και φθορίζοντος εξοπλισμού, με τη χρήση σωλήνα ακτίνων-X μικροεστίασης (microfocus X-ray tube), επιτυγχάνεται περεταίρω βελτίωση της ποιότητας εικόνας. Αξίζει να σημειωθεί, τέλος, ότι χρήση ενός συστήματος τηλεόρασης στην ακτινοσκόπηση, μειώνει τον κίνδυνο λόγω ακτινοβολίας. Βέβαια, ο σωλήνας ακτίνων-X θα πρέπει να παραμένει επαρκώς θωρακισμένος.



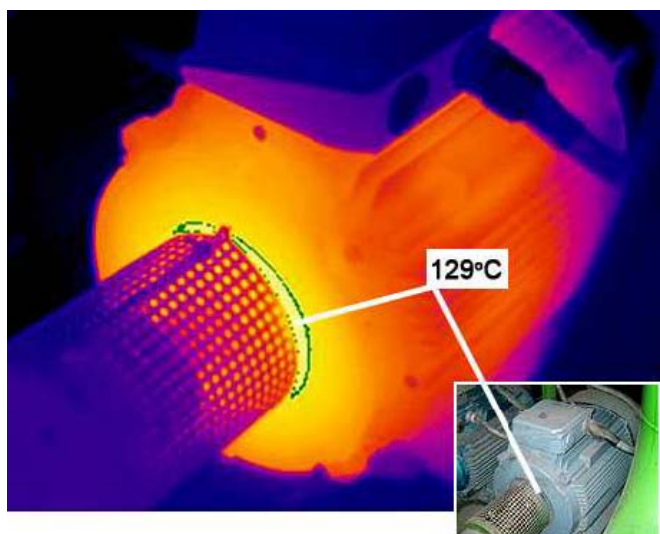
Σχήμα 1.10. Εφαρμογή ραδιογραφίας για την ανίχνευση μικρορωγμών σε φτερά αεροπλάνου.

ο **Οπτική όραση: Υπέρυθρη θερμογραφία (infrared thermography, IRT)**

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μια μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας μιας επιφάνειας μέσω μέτρησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας που αυτή εκπέμπει. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην αρχή ότι κάθε σώμα εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία η οποία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του (Νόμος του Planck). Η εκπεμπόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία στη συνέχεια ανιχνεύεται από ειδικές μικροβολομετρικές διατάξεις συστοιχιών εστιακού επιπέδου (focal plane array - FPA microrobolometers) και μετατρέπεται, συνήθως, σε πολυδιάστατο σήμα θερμικής εικόνας, μέσω απεικονιστικών συστημάτων, όπως οι θερμοκάμερες και οι θερμικοί αναλυτές [47-50]. Μια θερμική εικόνα αντιστοιχεί την κλίμακα των μετρούμενων θερμοκρασιών είτε σε κλίμακα του γκρι (gray scale), είτε σε διάφορες ψευδοχρωματικές κλίμακες, όπως η κλίμακα rainbow (rainbow scale). Ένα παράδειγμα θερμικής εικόνας δίνεται στο Σχήμα 1.11 όπου παρουσιάζεται το θερμοκρασιακό προφίλ μιας υπό λειτουργία ηλεκτρικής μηχανής, σε ψευδοχρωματική κλίμακα.

Ενταγμένη λοιπόν σε ένα σύστημα CM/PHM, η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί σημαντικότατο εργαλείο ανίχνευσης “ύποπτων” θερμοκρασιακών προφίλ και διαφορών που συνδέονται με μη αναμενόμενα θερμά ή ψυχρά σημεία ενός εξοπλισμού και, συνεπώς, με την εμφάνιση ή την εξέλιξη μιας βλάβης. Με την μελέτη και ανάλυση αυτών των θερμοκρασιακών προφίλ, μια βλάβη μπορεί να περιγραφεί, να διαγνωσθεί και να ταξινομηθεί βάσει της λεγόμενης θερμικής “υπογραφής” της (fault thermal signature). Καθώς αποτελεί το βασικό αντικείμενο

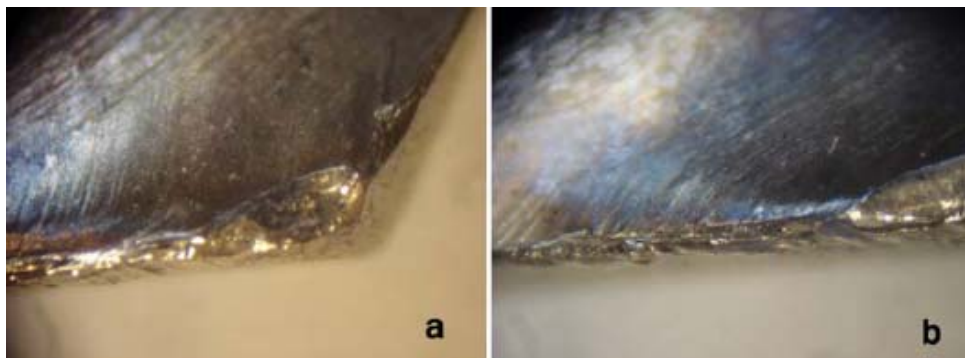
μελέτης της παρούσας διδακτορικής διατριβής, η μέθοδος της υπέρυθρης θερμογραφίας θα παρουσιαστεί και θα εξηγηθεί διεξοδικά σε ξεχωριστό Κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4).



Σχήμα 1.11. Θερμική εικόνα μιας εν λειτουργία ηλεκτρικής μηχανής [16].

ο Μικροσκοπική όραση

Η μέθοδος της οπτικής μικροσκοπίας περιλαμβάνει τη διέλευση του ορατού φωτός – μεταδιδόμενου ή ανακλώμενου σε ένα αντικείμενο – μέσα από μονούς ή πολλαπλούς φακούς οι οποίοι επιτρέπουν τη λήψη μεγεθυμένων εικόνων του υπό εξέταση αντικειμένου. Η προκύπτουσα εικόνα μπορεί να ανιχνευτεί απ' ευθείας από το ανθρώπινο μάτι, να εμφανιστεί σε ειδική φωτογραφική πλάκα (επιφάνεια) ή να συλληφθεί με ψηφιακό τρόπο και στη συνέχεια να υποβληθεί στην κατάλληλη τεχνική επεξεργασίας [51,52]. Οι κυριότεροι περιορισμοί μιας συμβατικής οπτικής μικροσκοπίας έγκεινται σε τρία βασικά μειονεκτήματά της: i) μόνο η απεικόνιση σκοτεινών ή έντονα διοπτρικών αντικειμένων θεωρείται αποτελεσματική, ii) η περίθλαση περιορίζει την μέγιστη ανάλυση στα 0.2 μm περίπου και iii) το παρεμβαλλόμενο φως από σημεία εκτός του εστιακού επιπέδου του φακού, μειώνει την ευκρίνεια της παραγόμενης εικόνας μικροσκοπίας. Οι περιορισμοί αυτοί είναι δυνατό να ξεπεραστούν, σε μεγάλο βαθμό, με την εφαρμογή διαφορετικών, νέων μεθόδων οπτικής και ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι οι μικροσκοπίες φωτεινού και σκοτεινού πεδίου (bright and dark field microscopy), η μικροσκοπία φθορισμού (fluorescence microscopy), η ομοεστιακή μικροσκοπία (confocal microscopy), η μικροσκοπία ραδιογραφίας (x-ray microscopy), η μικροσκοπία ηλεκτρονίων (scanning-electron microscopy, SEM) και η μικροσκοπία οπτικών ινών (fiber optic microscopy, FOM). Στο Σχήμα 1.12 δίνονται δύο λήψεις εικόνων συμβατικού οπτικού μικροσκοπίου για τον οπτικό έλεγχο της φθοράς των ακμών κοπτικού εργαλείου.



Σχήμα 1.12. Εικόνες συμβατικού οπτικού μικροσκοπίου για τον οπτικό έλεγχο της φθοράς των ακμών κοπτικού εργαλείου [17].

5. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΚΟΠΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

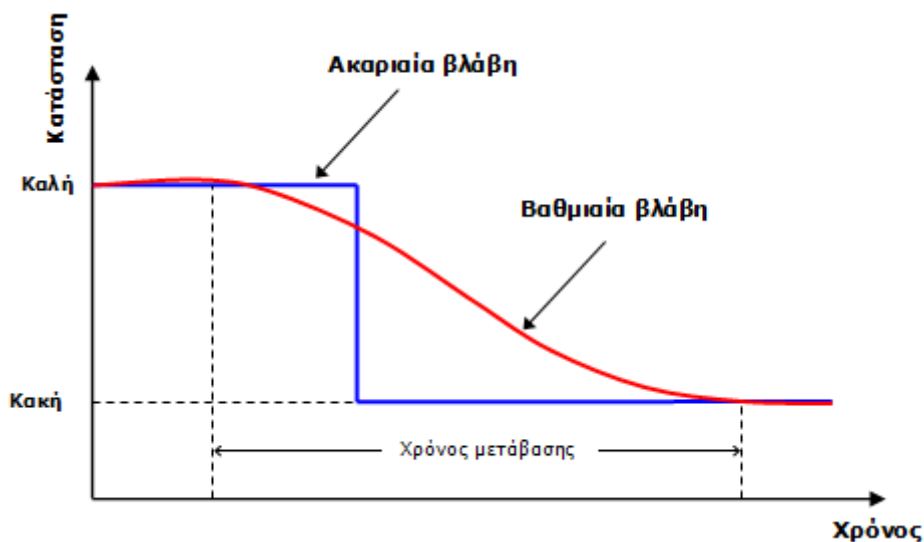
Ένα από τα βασικότερα μέρη μιας εργαλειομηχανής είναι το κοπτικό εργαλείο και ορισμένες από τις πιο σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την διαδικασία κοπής σε ένα αυτοματοποιημένο βιομηχανικό περιβάλλον, αφορούν στην κατάσταση των κοπτικών εργαλείων. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να συλλεχθούν χρησιμοποιώντας συστήματα παρακολούθησης κατάστασης των κοπτικών εργαλείων (tool condition monitoring, TCM). Στα πλαίσια μιας οποιαδήποτε στρατηγικής συντήρησης εργαλειομηχανών, η πρακτική του TCM χρίζει ιδιαίτερης σημασίας, καθώς [13-15]:

- Πλήρως αυτοματοποιημένη παραγωγή είναι δυνατή μόνο εάν υπάρχει μια μέθοδος για την παρακολούθηση της φθοράς και την ανίχνευση της θραύσης των κοπτικών εργαλείων.
- Η φθορά των κοπτικών εργαλείων επηρεάζει την ποιότητα της επιφάνειας και τις διαστάσεις των κομματιών που κατασκευάζονται ενώ η θραύση (αποτυχία) του κοπτικού εργαλείου αποτελεί την κυριότερη αιτία μη προγραμματισμένης διακοπής λειτουργίας της εργαλειομηχανής.
- Στα σύγχρονα συστήματα εργαλειομηχανών, περίπου το 20% του “νεκρού χρόνου” αποδίδεται σε αποτυχία του κοπτικού εργαλείου, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένη παραγωγικότητα και σημαντικές οικονομικές ζημιές.
- Ο αυτοματοποιημένος έλεγχος παραγωγής δεν είναι ρεαλιστικά εφικτός χωρίς μέσα για τη παρακολούθηση της φθοράς εργαλείων.

Κατά κανόνα, η απόφαση αντικατάστασης ενός φθαρμένου κοπτικού εργαλείου λαμβάνεται βάσει συντηρητικών εκτιμήσεων σχετικά με τη διάρκεια ζωής του, χωρίς να

λαμβάνεται υπόψη το ενδεχόμενο αιφνίδιων αστοχιών, όπως η θραύση. Αυτή η στρατηγική συντήρησης οδηγεί σε έναν άσκοπο μεγάλο αριθμό αλλαγών κοπτικών εργαλείων και, κατά συνέπεια, σε σημαντικές απώλειες ωφέλιμου χρόνου παραγωγής και οικονομικών πόρων. Ένα αξιόπιστο σύστημα TCM θα πρέπει, λοιπόν, να επιτρέπει τη βέλτιστη αξιοποίηση του συνολικού κύκλου ζωής του κοπτικού εργαλείου [13-15].

Η κατάσταση του κοπτικού εργαλείου επηρεάζεται σημαντικά από σφάλματα (βλάβες) που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια μιας μηχανουργικής κατεργασίας. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.13, οι βλάβες αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους, τις βαθμιαίες (soft faults) και τις ακαριαίες (hard faults). Οι βαθμιαίες βλάβες αναπτύσσονται προοδευτικά με το χρόνο, δημιουργώντας μια σταδιακή φθορά του κοπτικού εργαλείου. Από την άλλη πλευρά, οι ακαριαίες βλάβες εμφανίζονται στιγμιαία, προκαλώντας απότομη αποκοπή της λειτουργίας του κοπτικού εργαλείου. Με άλλα λόγια, μπορεί να ειπωθεί ότι οι βαθμιαίες βλάβες οδηγούν σε προβλέψιμη κατάσταση, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες προς πρόγνωση (prognosis) από ένα σύστημα TCM, σε αντίθεση με τις ακαριαίες βλάβες στις οποίες παρατηρείται μεν δυνατότητα διάγνωσης (diagnosis), αλλά όχι και πρόβλεψής τους. Τόσο οι βαθμιαίες, όσο και οι ακαριαίες βλάβες πάντως, σχετίζονται άμεσα με ένα πλήθος παραμέτρων και αντίστοιχων μεθόδων παρακολούθησης οι οποίες καταγράφονται και εφαρμόζονται στη διεθνή βιβλιογραφία και έρευνα [13-15].



Σχήμα 1.13. Βαθμιαίες και ακαριαίες βλάβες στη διάρκεια ζωής ενός κοπτικού εργαλείου [15].

5.1 Εφαρμογές μεθόδων παρακολούθησης

Η δημιουργία μιας βλάβης ή φθοράς σε ένα κοπτικό εργαλείο είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία. Επιπλέον, είναι γενικώς αποδεκτό ότι τόσο τα υπάρχοντα αναλυτικά

μοντέλα, όσο και οι αριθμητικές μέθοδοι, που έχουν έως σήμερα υιοθετηθεί, εμφανίζουν περιορισμένη ακρίβεια ως μέθοδοι παρακολούθησης της κατάστασης ενός κοπτικού εργαλείου. Προς αυτήν την κατεύθυνση, οι απομένουσες επιλογές είναι είτε η εν λειτουργία παρακολούθηση (on-line monitoring) με σκοπό την έμμεση (indirect) εκτίμηση της κατάστασης ή η άμεση (direct) παρακολούθηση, η οποία συνήθως πραγματοποιείται εκτός λειτουργίας (off-line monitoring).

Κατά κανόνα, οι μέθοδοι άμεσης παρακολούθησης δίνουν τη δυνατότητα άμεσης μέτρησης του μεγέθους της βλάβης, κυρίως μέσω συστημάτων απεικόνισης. Με άλλα λόγια, αυτές οι μέθοδοι “μετρούν” την πραγματική βλάβη ως αυτή έχει, προσφέροντας ευκολία εφαρμογής και υψηλή αξιοπιστία. Ωστόσο, η υλοποίηση ενός εν λειτουργία TCM με χρήση αυτών των μεθόδων, έχει αποδειχθεί, έως σήμερα, ανέφικτη σε πραγματικό βιομηχανικό/κατασκευαστικό περιβάλλον. Κυριότερος λόγος αυτής της αδυναμίας, αποτελεί το γεγονός ότι ο εν λειτουργία εντοπισμός και η μέτρηση της περιοχής φθοράς του κοπτικού εργαλείου προϋποθέτουν είτε την αφαίρεσή του από την εργαλειομηχανή, μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα λειτουργίας, είτε την ενσωμάτωση της συσκευής παρακολούθησης στην εργαλειομηχανή. Γίνεται κατανοητό όμως ότι, από τη φύση τους, αυτές οι λύσεις είναι τεχνικά και οικονομικά ανεπαρκείς, καθώς επιφέρουν σημαντική αύξηση του “νεκρού χρόνου” και απώλεια του χρόνου παραγωγής [13-15,53].

Από την άλλη πλευρά, αντί της πραγματικής βλάβης/φθοράς, οι μέθοδοι έμμεσης παρακολούθησης μετρούν μια παράμετρο-δείκτη η οποία είναι συνάρτηση της φθοράς. Ευρέως διαδεδομένες παράμετροι, που χρησιμοποιούνται ως δείκτες φθοράς του κοπτικού εργαλείου σε μεθόδους έμμεσης παρακολούθησης, είναι οι δυνάμεις κοπής, οι μηχανικές δονήσεις, οι ακουστικές εκπομπές, η θερμοκρασία και το ρεύμα κινητήρων περιστροφής ή/και πρόωσης. Παρά το γεγονός ότι αυτές οι μέθοδοι χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό και υψηλό κόστος λόγω της χρήσης πολυάριθμων αισθητήριων, εμφανίζουν το μεγάλο πλεονέκτημα της δυνατότητας εφαρμογής τους εν λειτουργία. Συγκεκριμένα, σε ένα τυπικό σύστημα TCM έμμεσης παρακολούθησης, τα σήματα των προαναφερθέντων παραμέτρων λαμβάνονται και αναλύονται με σκοπό να δώσουν μια εν λειτουργία διάγνωση σχετικά με την εξέλιξη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου και την επίδρασή της στην εκτιμώμενη υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του.

Στον Πίνακα 1.1, δίνεται μια σύνοψη των μεθόδων έμμεσης και άμεσης παρακολούθησης βλαβών σε κοπτικά εργαλεία, οι οποίες εφαρμόστηκαν και καταγράφηκαν στην διαθέσιμη βιβλιογραφία [13-15]. Όπως γίνεται αντιληπτό με τον Πίνακα 1.1, υπάρχει μια εμφανής “τάση”, μεταξύ των σχετικών ερευνητών, στην χρήση είτε συγκεκριμένων έμμεσων μεθόδων (ρεύμα κινητήρα περιστροφής, δυνάμεις κοπής, μηχανικές δονήσεις και ακουστικές εκπομπές) ή άμεσων μεθόδων. Στις τελευταίες συμπεριλαμβάνονται, στην συντριπτική τους πλειοψηφία, εποπτικές μέθοδοι όπως η μηχανική/υπολογιστική όραση (machine/computer vision), η μικροσκοπική όραση και η οπτική όραση (ραδιογραφία, υπερηχογραφία και υπέρυθρη θερμογραφία). Στη συνέχεια γίνεται εκτενέστερη αναφορά στις κυριότερες μεθόδους έμμεσης και

άμεσης παρακολούθησης, καθώς και σε αντίστοιχες εφαρμογές τους που καταγράφηκαν στην βιβλιογραφία.

Πίνακας 1.1. Σύνοψη εφαρμοσμένων μεθόδων έμμεσης και άμεσης παρακολούθησης βλαβών σε κοπτικά εργαλεία, που καταγράφηκαν στην διαθέσιμη βιβλιογραφία.

Μέθοδος παρακολούθησης	Αριθμός Αναφοράς
Ρεύμα κινητήρα περιστροφής	[60, 61, 62, 86, 87, 88, 99, 102, 125, 127, 143, 148, 153, 157]
Ρυθμός πρόωσης	[75, 94, 97, 98, 99, 131, 153]
Δυνάμεις κοπής	[53, 54, 55, 68, 77, 80, 83, 84, 86, 87, 88, 94, 95, 97, 101, 102, 105, 106, 108, 110, 111, 123, 124, 125, 126, 127, 130, 132, 143, 145, 150, 152, 155, 156, 157, 159]
Ταχύτητα κοπής	[75, 94, 97, 100]
Μηχανικές δονήσεις	[59, 73, 85, 87, 89, 98, 101, 102, 105, 106, 125, 126, 131, 132, 135, 144, 145, 150, 156, 157]
Θόρυβος κοπής	[90, 143]
Σήματα υπερήχων	[82]
Ακουστικές εκπομπές	[54, 55, 56, 57, 58, 70, 73, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 87, 89, 95, 99, 100, 106, 124, 126, 134, 144, 150, 151, 154, 156, 159]
Μετατόπιση	[99, 102, 126, 134, 140]
Θερμοκρασία εργαλείου	[75, 120]
Τραχύτητα	[90, 109, 128, 144]
Λοιπές έμμεσες μέθοδοι	[63, 64, 102, 122, 129, 144]
Άμεσες μέθοδοι (Εποπτικές)	[65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 88, 91, 92, 93, 96, 104, 107, 109, 118, 119, 130, 140, 146, 149]

ο Δυνάμεις κοπής

Οι δυνάμεις ροπής, πρόωσης και εφελκυσμού αποτελούν στο σύνολό τους τις δυνάμεις κοπής που εμφανίζονται σε μια τυπική μηχανουργική κατεργασία και οι οποίες σχετίζονται έντονα με τη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Η λογική πίσω από την “ιδέα” της παρακολούθησης των δυνάμεων αυτών βασίζεται στο γεγονός ότι η τιμή των συγκεκριμένων δυναμικών παραμέτρων αυξάνεται με την προοδευτική αύξηση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου, λόγω της αυξανόμενης τριβής μεταξύ του εργαλείου και του κατεργαζόμενου κομματιού.

Ιδιαίτερα δε στην περίπτωση της διάτρησης, η παρακολούθηση των δυνάμεων ροπής και πρόωσης αποτελεί την πιο κοινή μέθοδο για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με την έκταση της φθοράς του κοπτικού εργαλείου. Ωστόσο, σε πρόσφατη μελέτη [55], προκύπτει ότι η δύναμη πρόωσης εμφανίζει χαμηλή συσχέτιση με την εξέλιξη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου, σε αντίθεση με την δύναμη ροπής η οποία αποδεικνύεται καταλληλότερος δείκτης φθοράς σε ένα σύστημα TCM, για την περίπτωση της διάτρησης.

Βέβαια θα πρέπει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα και με άλλη μελέτη [110], οι δυνάμεις κοπής επηρεάζονται σημαντικά από τις υπό μελέτη πειραματικές συνθήκες, όπως οι συνθήκες κοπής, το υλικό κατεργασίας και ο τύπος του κοπτικού εργαλείου. Πράγματι, για παράδειγμα, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα κοπής, τόσο μεγαλύτερες κοπτικές δυνάμεις μετρώνται.

Συνεπώς, η αύξηση των δυνάμεων κοπής είναι συχνά παρερμηνεύσιμη, καθώς μπορεί να σχετίζεται είτε με μια συνακόλουθη φθορά του κοπτικού εργαλείου ή με μια απλή αλλαγή των συνθηκών κοπής. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι συστήματα TCM που βασίζονται στην παρακολούθηση των δυνάμεων κοπής θα πρέπει να αναπτύσσονται για συγκεκριμένες συνθήκες κοπής. Σε αντίστοιχο συμπέρασμα καταλήγει και η μελέτη [13], στην οποία αναφέρεται ότι η διάγνωση φθοράς εργαλείων διάτρησης μπορεί να βασιστεί στην μέθοδο της παρακολούθησης των δυνάμεων ροπής και πρόωσης, μόνον εφόσον έχει οριστεί πολύ μικρή ανοχή στη σκληρότητα των κατεργαζόμενων κομματιών, καθιστώντας την συγκεκριμένη μέθοδο δύσκολα επιτεύξιμη υπό πραγματικές συνθήκες κατεργασίας.

ο Μηχανικές δονήσεις

Η λεπτομερής ανάλυση του σήματος δόνησης, το οποίο παράγεται κατά τη διαδικασία κοπής, παρέχει πολλές πληροφορίες για την κατάστασή του κοπτικού εργαλείου. Συγκεκριμένα, τα σήματα δόνησης περιέχουν πληροφορίες για τις φυσικές συχνότητες του προς κατεργασία αντικειμένου, των εξαρτημάτων, της ατράκτου και της ίδιας της μηχανής [15]. Οι παραγόμενες δονήσεις σε ένα δυναμικό σύστημα κατεργασίας κοπής αλληλεπιδρούν με την ύπαρξη φθοράς, διότι η δυναμική αντίδραση αυξάνεται με την αύξηση των δυνάμεων κοπής. Η παρακολούθηση των μηχανικών δονήσεων είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη έμμεση μέθοδος σε συστήματα TCM. Λόγω, ωστόσο, του ισχυρού θορύβου που παράγεται κατά την διάτρηση, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν είναι τόσο δημοφιλής για την περίπτωση της συγκεκριμένης κατεργασίας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις των δονήσεων χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε συστήματα TCM, από τη στιγμή που έγινε ευκολότερη η εγκατάσταση των επιταχυνσιομέτρων κοντά στην περιστρεφόμενη άτρακτο, χωρίς να είναι αναγκαίες οι μετατροπές στα μηχανικά της μέρη, στο κομμάτι κατεργασίας ή στα κοπτικά εργαλεία [17]. Για την αποφυγή της απόσβεσης των παραγόμενων σημάτων και της επίδρασης της ακαμψίας του κοπτικού εργαλείου στις ιδιότητες της διάτρησης, είναι επίσης δυνατή η τοποθέτηση αισθητηρίου στην τράπεζα κατεργασίας, κοντά στην περιοχή διάτρησης. Με κατάλληλη μόνωση τους, τα επιταχυνσιόμετρα έχουν καλή αντοχή στην έκθεση σε λιπαντικά υγρά, γρέζια, καθώς και στις ηλεκτρομαγνητικές και θερμικές επιρροές. Βέβαια, όπως και στην περίπτωση των δυνάμεων κοπής, είναι δεδομένη η αδυναμία κι αυτής της μεθόδου, λόγω της συσχέτισης των παραγόμενων δονήσεων με το υλικό κατεργασίας του κομματιού, τις συνθήκες κοπής, καθώς και τη δομή της εργαλειομηχανής.

ο Ακουστικές εκπομπές

Αντιθέτως από τις μηχανικές δονήσεις (μικρότερες των 20 KHz) που παράγονται κατά την κατεργασία, ένα εύρος υψηλότερων συχνοτήτων χρησιμοποιείται για τη διάγνωση φθοράς.

Δονήσεις με εύρος συχνοτήτων από 20 KHz μέχρι 80 KHz, αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως υπερηχητικές δονήσεις (Ultrasonic Vibrations) [17], ενώ δονήσεις με συχνότητες μεγαλύτερες των 100 KHz ονομάζονται ακουστικές εκπομπές (Acoustic Emissions, AE).

Η ακουστική εκπομπή αναφέρεται στην παραγωγή παροδικών ελαστικών ηχητικών κυμάτων που παράγονται από μια ξαφνική ανακατανομή της πίεσης σε ένα υλικό. Η μηχανική διαδικασία αφαίρεσης μετάλλου από ένα κομμάτι με τη χρήση κοπτικών εργαλείων, απαιτεί την πλαστική παραμόρφωση του μετάλλου σε υψηλές δυνάμεις ροπής. Σε πολλές περιπτώσεις όμως η θραύση του κοπτικού εργαλείου παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην παραγωγή AE, σε σύγκριση με την προοδευτική φθορά. Στο σύνολό τους οι μηχανουργικές κατεργασίες αφαίρεσης υλικού είναι πηγές ακουστικών εκπομπών και η παρακολούθηση των σημάτων AE που παράγονται κοντά στην περιοχή κατεργασίας, μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες που σχετίζονται με τη φθορά των κοπτικών ακμών του εργαλείου.

Λόγω του μεγάλου εύρους συχνοτήτων των AE, είναι αναγκαίος ο συνδυασμός κατάλληλων αισθητηρίων με υπερεπατά φίλτρα, ώστε τα σήματα να προστατευθούν από τον παραγόμενο θόρυβο των χαμηλών δονήσεων του συστήματος. Αποτελέσματα από τη χρήση της μεθόδου των AE σε κατεργασίες διάτρησης, έχουν δείξει ότι η διάγνωση φθοράς σε τρυπάνια διαμέτρου από 1 μέχρι 3 mm είναι εφικτή και με πολύ καλά αποτελέσματα [53]. Επίσης αναφέρεται ότι, σε τόσο μικρής διαμέτρου τρυπάνια, η ανάλυση του ρεύματος κινητήρα περιστροφής, καθώς και οι κοπτικές δυνάμεις δεν είναι ικανά μεγέθη για την πρόγνωση της θραύσης των κοπτικών εργαλείων, σε αντίθεση με τα σήματα των ακουστικών εκπομπών [59]. Τέλος, ο υπολογισμός του μέσου όρου των ακουστικών εκπομπών σε συχνότητες από 0.1 μέχρι 1 MHz, προτείνεται για την πρόγνωση φθοράς ή θραύσης των τρυπανιών [17]. Δυστυχώς, και σε αυτή την μέθοδο, παρατηρείται ανεπιθύμητα υψηλή εξάρτηση των παραγόμενων AE από τις συνθήκες κατεργασίας.

ο Ρεύμα κινητήρα περιστροφής

Έρευνες έχουν δείξει ότι, η παρακολούθηση του ρεύματος των κινητήρων της απράκτου (περιστροφής) και της πρόωσης, μπορεί να συμβάλλει επιτυχώς στην ανίχνευση φθοράς κοπτικών εργαλείων (κατά κύριο λόγο στην περίπτωση της κατεργασίας διάτρησης). Οι ενδείξεις προέρχονται από τις διακυμάνσεις των τιμών των ρευμάτων αυτών, τις οποίες προκαλούν οι δονήσεις λόγω των κοπτικών δυνάμεων και της ροπής. Διάφοροι αλγόριθμοι επεξεργασίας σήματος και λήψης αποφάσεων έχουν χρησιμοποιηθεί, ώστε να διερευνηθεί αν η συγκεκριμένη μέθοδος δίνει την καλύτερη ένδειξη για τον έλεγχο της φθοράς τρυπανιών [17].

Ο βασικότερος αλγόριθμος πραγματοποιεί έλεγχο του κατώτατου ορίου του ρεύματος στον στάτη του κινητήρα περιστροφής. Το σήμα του ρεύματος “συλλέγεται” από τον στάτη και ελέγχεται συγκρινόμενο με ένα προκαθορισμένο κατώτατο όριο, που σχετίζεται με την

κατεργασία, το υλικό και το κοπτικό εργαλείο. Σήματα στα οποία το ρεύμα του στάτη υπερβαίνει το κατώτατο όριο, λόγω της αυξανόμενης ροπής, αντιστοιχούν σε κοπτικό εργαλείο το οποίο έχει υποστεί καταστροφική θραύση (αστοχία, ακαριαία βλάβη).

Αξίζει να σημειωθεί ότι, το πραγματικό ρεύμα στάτη δεν είναι σε μεγάλο βαθμό ευαίσθητο στις μεταβολές της ροπής, λόγω του περιορισμένου εύρους διακύμανσής του. Εντούτοις, ο χρόνος απόκρισης για την ανίχνευση μιας σοβαρής βλάβης (αστοχίας) σε κοπτικά εργαλεία είναι αποδεκτός. Από την άλλη πλευρά, η σχεδόν μηδενική ευαισθησία της μεθόδου σε περιπτώσεις μικρής φθορά του κοπτικού εργαλείου, καθιστά τον απλό έλεγχο κατώτατων ορίων αναξιόπιστο. Το ρεύμα του κινητήρα ατράκτου είναι γενικά ένα μετρήσιμο μέγεθος ίδιας φύσεως με τη ροπή. Και τα δύο μεγέθη καθορίζουν την ποσότητα της δύναμης που χρησιμοποιείται στην κοπτική διαδικασία και επίσης “συμβουλεύουν” για τη δυναμική της κοπής.

ο Άμεσες (εποπτικές) μέθοδοι

Στην περίπτωση των κοπτικών εργαλείων, οι άμεσες μέθοδοι χρησιμοποιούν τεχνικές τεχνητής όρασης για να μετρήσουν την πλευρική τους φθορά ή τη φθορά κρατήρα. Όπως προαναφέρθηκε, τα συστήματα TCM που βασίζονται σε εποπτικές μεθόδους θεωρούνται περισσότερο κατάλληλα για ανίχνευση ακαριαίων, εκτεταμένων βλαβών (λ.χ. θραύσεων) σε εργαλειομηχανές εκτός λειτουργίας, παρά για την εν λειτουργία παρακολούθηση φθοράς.

Διάφορες έρευνες έχουν εξετάσει τη χρήση της μηχανικής/υπολογιστικής όρασης (machine/computer vision) για την μέτρηση της υψής επιφανείας του κοπτικού εργαλείου. Στην [65], παρουσιάζεται μια σχετική εφαρμογή. Στο συγκεκριμένο σύστημα ο στόχος ήταν η εξαγωγή της “υπογραφής” εκείνης της υψής επιφανείας που αντιστοιχεί στη φθορά του κοπτικού εργαλείου και στο διάκρισή της από την αντίστοιχη “υπογραφή” της υψής επιφανείας ενός “υγιούς” εργαλείου. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας εικόνων, με σημαντική επιτυχία διάγνωσης της βλάβης στο κοπτικό εργαλείο. Παρόμοιες προσεγγίσεις έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία, στις οποίες ως τεχνικές λήψης εικόνων από την περιοχή φθοράς εφαρμόζονται:

- **Μηχανική ή υπολογιστική όραση**, όπου χρησιμοποιούνται κυρίως στερεοσκοπικές (stereoscopic) ή απλές κάμερες, αισθητήρες CCD (charge coupled devices), καθώς και οπτοηλεκτρονικές διατάξεις.
- **Μικροσκοπική όραση**, όπου χρησιμοποιούνται συνήθως μικροσκόπια οπτικών ινών (fiber optic microscopes, FOM), δέσμης laser (laser microscopy) ή ηλεκτρονίων (scanning electron microscopes, SEM). Στην περίπτωση της διάγνωσης βλαβών σε κοπτικά εργαλεία με χρήση μικροσκοπικής όρασης, μπορεί να ενταχθεί και η τεχνική της μικροσκοπικής ανάλυσης των γρεζιών

(υποπροϊόντων των κατεργασιών κοπής) που συνήθως συναντάται στην βιβλιογραφία με τον όρο wear debris analysis.

- **Οπτική όραση**, όπου κοινότερη εφαρμογή αποτελούν οι υπέρηχοι και σε μικρότερο βαθμό (λόγω υψηλού κόστους εξοπλισμού) η ραδιογραφία και υπέρυθη θερμογραφία.

5.2 Εφαρμογές τεχνικών επεξεργασίας σήματος

Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών TCM σε κοπτικά εργαλεία, εμφανίζεται το πρόβλημα της επιλογής της κατάλληλης τεχνικής επεξεργασίας σήματος. Από την μία πλευρά, οι περισσότεροι εξεζητημένες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, αν και εμφανίζουν σημαντική ευαισθησία στην ανίχνευση βαθμιαίων βλαβών (προοδευτικής φθοράς), είναι ιδιαίτερα “αργές” στη χρήση τους και, κατά συνέπεια, αποτυγχάνουν να εντοπίσουν περιπτώσεις όπου το εργαλείο εμφανίζει θραύση (ακαριαία βλάβη). Επιπλέον αυτές οι τεχνικές, εμφανίζουν και ανεπιθύμητα υψηλή ευαισθησία στις συνθήκες κοπής, γεγονός που οδηγεί σε σημαντικές δυσκολίες κατά την τελική διάγνωση της φθοράς. Από την άλλη πλευρά, οι απλούστερες τεχνικές επεξεργασίας σήματος χαρακτηρίζονται από υψηλή ταχύτητα απόκρισης, δεν επηρεάζονται από τις συνθήκες κοπής, ωστόσο – αναπόφευκτα – εμφανίζουν και χαμηλή ευαισθησία στην φθορά.

Πίνακας 1.2. Σύνοψη εφαρμοσμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος, που καταγράφηκαν στην διαθέσιμη βιβλιογραφία.

Τεχνική Επεξεργασίας Σήματος	Αριθμός αναφοράς
Χρονοσειρές (time series)	[76, 126, 134, 152]
Μετασχηματισμοί Fourier (Fast –FFT, short-time STFT, discrete - DFT)	[59, 62, 64, 80, 75, 98, 100, 105, 106, 122, 126, 131, 132, 143, 144, 145, 157, 159]
Ανάλυση φάσματος	[54, 61, 129, 131, 135, 145, 157]
Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου	[53, 54, 59, 73, 77, 78, 79, 80, 84, 85, 88, 89, 97, 100, 109, 124, 126, 131, 132, 134, 143, 148, 157]
Βασική ανάλυση ιστογράμματος	[69, 119]
Εφαρμογή κατωφλίου / κατάτμηση εικόνας (thresholding / segmentation)	[69, 93, 146, 149]
Στατιστικές παράμετροι	[53, 54, 55, 58, 60, 61, 67, 73, 75, 77, 78, 79, 80, 84, 86, 87, 88, 89, 91, 95, 100, 102, 105, 111, 113, 123, 124, 126, 131, 132, 134, 143, 145, 148, 154, 155, 157]
Ανάλυση πινάκων gray-level co-occurrence (GLCM)	[69, 109]
Ανάλυση κυματιδίων (wavelet analysis)	[53, 62, 70, 80, 82, 83, 91, 100, 106, 126, 131, 150, 151, 153]
Ανίχνευση ακμών (edge detection)	[72, 92, 146]
Συναρτήσεις ετεροσυσχέτισης (cross-correlation)	[105, 146]
Γρήγοροι μετασχηματισμοί Hough (fast Hough transforms)	[107, 146]
Διαγράμματα Taylor (log-log ανάλυση)	[140]
Λοιπές τεχνικές	[61, 65, 66, 67, 69, 93, 100, 102, 111, 114, 123, 127, 144, 149]

Μια σύνοψη των τεχνικών επεξεργασίας σήματος, οι οποίες εφαρμόστηκαν και καταγράφηκαν στην διαθέσιμη βιβλιογραφία για εφαρμογές TCM σε κοπτικά εργαλεία, δίνεται στον Πίνακα 1.2. Όπως προκύπτει, οι στατιστικές παράμετροι, η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου, οι μετασχηματισμοί Fourier και η ανάλυση κυματιδίων αποτελούν τις επικρατέστερες – μεταξύ άλλων – τεχνικές επεξεργασίας σήματος σε αυτού του είδους τις εφαρμογές.

ο Στατιστικές παράμετροι και ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Ένα σήμα στο πεδίο του χρόνου συνήθως είτε δεν περιέχει ικανοποιητική ποσότητα πληροφορίας ή απαιτεί πολύ χρονοβόρα επεξεργασία. Ιδιαίτερα τα σήματα που προέρχονται από αισθητήρια δυνάμεων κοπής δεν εμφανίζουν καμία συσχέτιση με τη φθορά του κοπτικού εργαλείου στο πεδίο του χρόνου. Ωστόσο, η συμπληρωματική χρήση διαφόρων στατιστικών παραμέτρων μπορεί σε αρκετές περιπτώσεις να αποδειχθεί πολλά υποσχόμενη [13]. Για παράδειγμα, η κλίση της δύναμης πρόωσης έχει αναγνωριστεί ότι είναι κατάλληλη παράμετρος επεξεργασίας για την πρόβλεψη της αστοχίας (ακαριαίας βλάβης) του εργαλείου. Από την άλλη πλευρά, καθώς το κοπτικό εργαλείο γηράσκει (υπόκειται σε σταδιακή φθορά), η απαιτούμενη δύναμη ροπής αυξάνεται και, σε αντιστοιχία, το ρεύμα του κινητήρα περιστροφής αυξάνεται επίσης. Σε αυτήν την περίπτωση, η ενεργός τιμή (RMS) του ρεύματος αποτελεί πολύτιμο δείκτη πρόγνωσης της φθοράς.

ο Μετασχηματισμοί Fourier

Οι μετασχηματισμοί Fourier, συμπεριλαμβανομένων των γρήγορων μετασχηματισμών Fourier, των μετασχηματισμών Fourier σύντομου χρόνου και των διακριτών μετασχηματισμών Fourier (DFT), χρησιμοποιούνται για να αποδώσουν το περιεχόμενο ενός σήματος στο πεδίο της συχνότητας, ώστε να δύναται να συσχετιστεί με την εξέλιξη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου. Πράγματι, έχει βρεθεί ότι, το φάσμα ισχύος της δύναμης ροπής μεταβάλλεται από περιορισμένης ζώνης (band limited) σε ευρείας ζώνης (wide band) καθώς το κοπτικό εργαλείο υπόκειται σε φθορά. Επίσης, το ενεργειακό περιεχόμενο των υψηλών συχνοτήτων των δυνάμεων κοπής θεωρείται χρήσιμος δείκτης ακαριαίων βλαβών καθώς αυξάνεται όσο το κοπτικό εργαλείο προσεγγίζει σε κατάσταση θραύσης και, συνεπώς, αστοχίας [13].

ο Ανάλυση κυματιδίων

Έχει αναφερθεί ότι, η ανάλυση κυματιδίων ίσως αποτελεί το “τέλειο” εργαλείο για τις περισσότερες εφαρμογές όπου απαιτείται αυτοματοποιημένη παρακολούθηση μιας κατεργασίας [13]. Ωστόσο, προς το παρόν, δεν έχει πραγματοποιηθεί ικανοποιητική σύγκριση, στην

καταγραφείσα βιβλιογραφία, με τους μετασχηματισμούς Fourier και τις στατιστικές παραμέτρους. Σε μελέτη του 2006 [70], παρουσιάζεται μια τεχνική βασισμένη στην ανάλυση κυματιδίων σημάτων ακουστικών εκπομπών για εφαρμογή σε σύστημα TCM. Τα αποτελέσματα έδειξαν η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο παρακολούθησης φθοράς των κοπτικών εργαλείων, με την επιπλέον χρήση μιας συνάρτησης επιλογής επιπέδου κατωφλίου (threshold value selection function). Επιπροσθέτως, σε άλλη μελέτη [62], εφαρμόστηκε η ανάλυση διακριτών μετασχηματισμών κυματιδίων (discrete wavelet transform, DWT) για την εκτίμηση της φθοράς κοπτικών εργαλείων από σήματα ρεύματος κινητήρων περιστροφής και πρόωσης. Η τεχνική των DWT αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη και το συνολικό σύστημα παρείχε επιτυχώς ακριβή εκτίμηση της φθοράς του εργαλείου διάτρησης, υπό διαφορετικές, μάλιστα, συνθήκες.

5.3 Εφαρμογές εργαλείων διάγνωσης και ταξινόμησης βλαβών

Τα εργαλεία διάγνωσης/ταξινόμησης βλαβών, διαδραματίζουν τον σημαντικό ρόλο της ταξινόμησης των σημάτων, που προηγουμένως ελήφθησαν από τις μεθόδους παρακολούθησης και επεξεργάστηκαν από τις τεχνικές επεξεργασίας σήματος, και της λήψης διαγνωστικών αποφάσεων, με ταχύτητα και ακρίβεια, σχετικά με το μέγεθος της πιθανής βλάβης/φθοράς. Τα κυριότερα εργαλεία διάγνωσης και ταξινόμησης βλαβών, που εφαρμόστηκαν και καταγράφηκαν στην διαθέσιμη βιβλιογραφία, δίνονται στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3. Σύνοψη εφαρμοσμένων εργαλείων διάγνωσης και ταξινόμησης βλαβών, που καταγράφηκαν στην διαθέσιμη βιβλιογραφία.

Εργαλείο ταξινόμησης βλαβών	Reference number
Αναγνώριση προτύπων (pattern recognition)	[76, 87, 126, 143]
Θεωρία Adaptive Resonance (ART)	[57, 159]
Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks, ANN)	[53, 68, 74, 74, 75, 77, 80, 82, 85, 90, 94, 96, 97, 126, 131, 133, 145, 156, 157, 158, 159]
Σύντηξη δεδομένων/αισθητήρων (data/sensor fusion)	[55, 126, 143, 157]
Βάσει μικροϋπολογιστή (microcomputer-based)	[79, 123, 127, 146, 155]
Γραμμική παλινδρόμηση (linear regression)	[61, 69, 83, 86, 106, 108, 126]
Ασαφής λογική (fuzzy logic, FL)	[73, 84, 86, 88, 97, 125, 126, 134, 153]
Κρυφά μοντέλα Markov (hidden Markov models, HMM)	[53, 98, 110, 152]
Μηχανές υποστήριξης διανυσμάτων (support vector machines, SVM)	[100, 124, 154]
Βάσει κανόνα/γνώσης (knowledge/rule based)	[101, 102]
Λοιπά εργαλεία ταξινόμησης	[57, 62, 74, 75, 83, 91, 97, 110, 115, 116, 119, 120, 126, 130, 143, 146, 149]

ο Ασαφής λογική

Η ασαφής λογική έχει δοκιμαστεί επιτυχώς σε πολυάριθμα πεδία εφαρμογών, μεταξύ αυτών η διαγνωστική και η αυτοματοποιημένη παρακολούθηση μηχανών. Ενδεικτικά, σε μελέτη του 2004 [73] παρουσιάζεται μια συγκεκριμένη “πυχή” συστήματος FL, το οποίο εφαρμόζεται στην παρακολούθηση της κατάστασης μιας εργαλειομηχανής και μιας κατεργασίας κοπής. Κύριος στόχος αυτής της έρευνας ήταν η δημιουργία μιας στρατηγικής παρακολούθησης της φθοράς κοπτικού εργαλείων η οποία να μπορεί να “εξαλείφει” την ανεπιθύμητη εξάρτηση των συμπτωμάτων (δεικτών) φθοράς από τις συνθήκες κοπής. Δυστυχώς παρατηρήθηκε μια μη ικανοποιητική ταξινόμηση βλαβών στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εξήχθησαν δε αρκετά κρίσιμα μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, τα συστήματα που βασίζονται σε εργαλεία FL εμφανίζουν σημαντικά μεγάλη ευαισθησία στην ποσότητα και την ποιότητα της πληροφορίας που λαμβάνεται στη είσοδο (input) ενός TCM. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην εν λόγω εφαρμογή, καθορίζονταν σε μεγάλο βαθμό από την μέθοδο συλλογής πληροφοριών φθοράς. Επιπλέον, η απόδοση αυτών των συστημάτων μπορεί να υποβαθμιστεί κατά σημαντικό βαθμό, με την αύξηση του πλήθους εισόδων ή των ασαφών κανόνων (fuzzy rules). Επίσης, στο σύστημα διαπιστώθηκε σχετικά χαμηλή ικανότητα “μάθησης”. Ωστόσο, συνοψίστηκε ότι, τα παραπάνω μειονεκτήματα δεν οδηγούν απαραίτητα στην πλήρη αγνόηση της προοπτικής των εργαλείων FL, τα οποία σε διαφορετικές συνθήκες ή εφαρμογές έχουν δυνατότητες να αποδώσουν καλύτερα ακόμα κι από ένα νευρωνικό δίκτυο.

ο Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Αυτή τη στιγμή, είναι γενικώς αποδεκτό ότι οι μέθοδοι έμμεσης παρακολούθησης, με χρήση αισθητηρίων, αποτελούν την πρακτικά καλύτερη λύση για αξιόπιστο TCM [12]. Από την άλλη πλευρά, τα τελευταία χρόνια, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN), έχει αποδειχθεί ότι είναι ικανά να μοντελοποιούν επιτυχώς τις σύνθετες σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών εισόδων των σημάτων από τα αισθητήρια και της πληροφορίας της φθοράς του κοπτικού εργαλείου. Τα ANN εμφανίζουν ορισμένες ιδιότητες που τα καθιστούν ιδανικά στην αποτελεσματική διαχείριση “πακέτων” πληροφοριών με ασυνέχειες ή υψηλό θόρυβο. Εξίσου ισχυρό εργαλείο μοντελοποίησης θορυβωδών σημάτων από δυναμικά συστήματα αποτελούν και τα “κρυφά” μοντέλα Markov (HMM).

Σε μελέτη του 2005 [54], παρουσιάζεται μια συγκριτική μελέτη της απόδοσης των ANN και των HMM για εφαρμογή σε TCM, η οποία καταγράφει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο εργαλείων. Το βασικό πλεονέκτημα τόσο των ANN, όσο και των HMM είναι η ικανότητά τους να πραγματοποιούν συνεχείς εκτιμήσεις. Συγκριτικά, όμως, με τα HMM, τα ANN εμφανίζουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και υψηλές απαιτήσεις σε εμπειρία και όγκο

εργασίας δοκιμής-και-σφάλματος (trial-and-error work) για να επιτύχουν μια αξιόπιστη στρατηγική παρακολούθησης κατάστασης. Σημαντικό, επίσης, πλεονέκτημα των HMM αποτελεί το γεγονός ότι, εφόσον το “πρόβλημα” γίνει καλά κατανοητό, η υλοποίηση μιας στρατηγικής παρακολούθησης κατάστασης και ταξινόμησης βλαβών απλοποιείται, καθώς υπάρχουν εύκολα διαθέσιμα μοντέλα ανεπτυγμένα σε υπολογιστή. Ωστόσο, τα HMM περιέχουν τυπικά μεγάλο αριθμό παραμέτρων και, συνεπώς, απαιτούν μεγάλα ποσά πληροφορίας για τον ορθό υπολογισμό τους. Τέλος, τα HMM δεν χρησιμοποιούνται, συνήθως, για συνεχείς εκτιμήσεις, αλλά περισσότερο για τη διεκπεραίωση εντολών ταξινόμησης.

Στην μελέτη [74], τα ANN χρησιμοποιούνται για την πρόγνωση της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου. Η σύγκριση η οποία γίνεται στην ίδια μελέτη, μεταξύ των ANN και της γραμμικής παλινδρόμησης, υποδεικνύει την υπεροχή των ANN σε αποτελεσματικότητα. Τέλος, στην μελέτη [75], η εφαρμογή ANN συγκρίνεται με την μέθοδο του σχεδιασμού πειραμάτων (design of experiments, DOE). Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν ότι, τα NN προσεγγίζουν καλύτερα τις πειραματικά μετρούμενες τιμές της πλευρικής φθοράς των κοπτικών εργαλείων, καθώς εμφανίζουν μικρότερες τιμές μέσου σφάλματος σε σχέση με την περίπτωση του DOE.

6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στο Κεφάλαιο αυτό αποσαφηνίστηκαν βασικές έννοιες και καταγράφηκαν το θεωρητικό και ερευνητικό υπόβαθρο καθώς και οι ενδεχόμενες προοπτικές εκείνου του μέρους της Διδακτορικής Διατριβής που αφορά στο ευρύ πεδίο των τεχνολογιών και των συστημάτων διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών στις μηχανολογικές κατασκευές. Στα πλαίσια δε αυτής της καταγραφής, έγινε εκτενής αναφορά στο ρόλο και στη σημασία των βημάτων που συνθέτουν ένα τυπικό σύστημα διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών: τις μεθόδους παρακολούθησης, τις τεχνικές επεξεργασίας σήματος και τα διαγνωστικά/προγνωστικά εργαλεία.

Ιδιαίτερη μνεία έγινε για τις εποπτικές μεθόδους παρακολούθησης στις οποίες εντάσσεται η υπέρυθρη θερμογραφία, που αποτελεί, ως μέθοδος, το αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης Διατριβής. Βάσει των συμπερασμάτων και των παρατηρήσεων που προέκυψαν από την αναζήτηση και καταγραφή των ευρύτερα εφαρμοσμένων μεθόδων παρακολούθησης, η επιλογή της υπέρυθρης θερμογραφίας, ως εν δυνάμει μεθόδου παρακολούθησης σε ένα διαγνωστικό/προγνωστικό σύστημα, έγινε με γνώμονα τα εξής κριτήρια:

- Εμφανίζει πρωτοτυπία υλοποίησης σε συγκεκριμένες εφαρμογές.
- Αποτελεί μέθοδο η οποία, στην πλειοψηφία των εφαρμογών, μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς την προϋπόθεση της διακοπής λειτουργίας ή/και αφαίρεσης του υπό έλεγχο εξοπλισμού (παρακολούθηση εν λειτουργία).

- Η παράμετρος της θερμοκρασίας είναι, ούτως ή άλλως, ιδιαίτερα αξιόπιστος δείκτης εμφάνισης ελαττωμάτων, βλάβης ή/και ενδεχόμενης αστοχίας.
- Λόγω της υψηλής της ευαισθησίας στην ανίχνευση ενδεχόμενων βλαβών, υπάρχει προοπτική να διερευνηθεί η εφαρμοσιμότητά της τόσο για τη διάγνωση μιας βλάβης, όσο και – υπό προϋποθέσεις – για τη πρόγνωσή της, πριν αυτή οδηγήσει σε αστοχία.

Ως προς το αντικείμενο εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου παρακολούθησης, ως αρχικός στόχος τέθηκε η υλοποίηση πρόγνωσης και διάγνωσης βλαβών σε κοπτικά εργαλεία εργαλειομηχανών. Προς αυτή την κατεύθυνση, πραγματοποιήθηκε ξεχωριστή, εκτεταμένη βιβλιογραφική αναζήτηση με σκοπό την αξιολόγηση της προοπτικής ενός τέτοιου συστήματος, με βάση την εφαρμογή της υπέρυθρης θερμογραφίας, και τον καθορισμό εκείνων των ερευνητικών “κενών” και αναγκών που φιλοδοξεί να καλύψει η συγκεκριμένη Διδακτορική Διατριβή. Βάσει, λοιπόν, αυτής της αναζήτησης διαπιστώθηκε ένας διαφαινόμενος “κορεσμός” στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογών, με την ύπαρξη (ήδη) εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων διάγνωσης/πρόγνωσης βλαβών σε κοπτικά εργαλεία. Ωστόσο, ως αποτέλεσμα αυτής της ερευνητικής αναζήτησης και προσπάθειας, προέκυψαν οι εξής τέσσερις δημοσιεύσεις σε έγκυρα, διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια και Περιοδικά (κατά χρονολογική σειρά) [15,160-162]:

- ✓ P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "State-of-the-art in Methods Applied to Tool Condition Monitoring (TCM) in Unmanned Machining Operations: A Review", 21st International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management - COMADEM, 11-13 June 2008, Prague, Czech Republic.
- ✓ P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "A Preliminary Study for the Efficiency of the Wear Debris Analysis and Thermography as Independent or Integrated Fault Diagnosis Methods in Tool Wear Monitoring", The 5th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies - CM and MFPT, 15-18 July 2008, Edinburgh, Scotland/United Kingdom.
- ✓ P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "Mechanical and Thermal Signatures as Indirect Tool Wear Monitoring Indices - Case study: Drilling", 22nd International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management - COMADEM, 9-11 June 2009, San Sebastian, Spain.
- ✓ J.A. Tsanakas, P.N. Botsaris, I.G. Amiridis, G.A. Galeridis, "Evaluation of Sensor-Based Condition Monitoring Methods as In-Process Tool Wear and Breakage Indices – Case Study: Drilling", Diagnostyka, 2(62), 2012.

Ως αναθεωρημένος (και τελικός) στόχος, σχετικά με το αντικείμενο εφαρμογής της συγκεκριμένης Διδακτορικής Διατριβής, τέθηκε η εφαρμογή της διαγνωστικής/προγνωστικής

μελέτης υπέρυθρης θερμογραφίας σε φωτοβολταϊκά συστήματα και, συγκεκριμένα, σε φωτοβολταϊκά πλαίσια. Κίνητρα για την επιλογή της συγκεκριμένης περίπτωσης εφαρμογής αποτέλεσαν τα ακόλουθα δεδομένα:

- Η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων, οι εφαρμογές τους στην καθημερινότητα και οι σχετικές επενδύσεις, εξελίσσονται με ραγδαίους ρυθμούς την τελευταία δεκαετία, καθώς, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αποτελούν μοχλό της σύγχρονης, αειφόρου ανάπτυξης.
- Ειδικότερα στην Ελλάδα, όπου η αγορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων γνωρίζει σημαντική πρόοδο τα τελευταία χρόνια, τόσο σε επίπεδο παραγωγής, όσο και σε επίπεδο επενδύσεων, διαφαίνεται πλέον η ανάγκη στόχευσης και σε επίπεδο έρευνας προς την κατεύθυνση της συντήρησης και της παρακολούθησης λειτουργίας αυτών των συστημάτων.
- Εξάλλου, λόγω ακριβώς της ανάπτυξης αυτών των συστημάτων στην Ελλάδα, η συγκεκριμένη διαγνωστική/προγνωστική μελέτη μπορεί να δοκιμαστεί πειραματικά και να μελετηθεί σε πληθώρα εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστοιχιών και πάρκων.
- Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και, συνακόλουθα, η εμφάνιση ενδεχόμενων ελαττωμάτων, βλαβών και αστοχιών σε αυτό, συνδέονται άμεσα με την διακύμανση της θερμοκρασίας στην επιφάνειά του. Όπως προαναφέρθηκε στην Ενότητα 4 του παρόντος Κεφαλαίου, και θα αναλυθεί εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 4, η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί ιδανικό εργαλείο ανίχνευσης, οπτικοποίησης και ανάλυσης τέτοιων διακυμάνσεων θερμοκρασίας.
- Έως σήμερα, τα ενδεχόμενα ελαττώματα, οι βλάβες ή οι αστοχίες που εμφανίζονται στην διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ανιχνεύονται και αποτιμώνται κυρίως στο στάδιο κατασκευής και συναρμολόγησής τους. Αντίθετα, από την στιγμή της εγκατάστασής τους στο πεδίο, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια υπόκεινται στις βασικές μόνο διαδικασίες συντήρησης και παρακολούθησης, που ωστόσο συχνά αποδεικνύονται ανεπαρκείς, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις.
- Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, λοιπόν, αποτελούν μια σχετικά νέα, “δοκιμαζόμενη” ακόμα, τεχνολογία σε θέματα διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών, ιδιαίτερα σε πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες πεδίου, τις οποίες δεν λαμβάνουν υπόψη τα υπάρχοντα πρότυπα πιστοποίησης αξιοπιστίας.
- Υπάρχουν, συνεπώς, σημαντικά ερευνητικά “κενά” των οποίων η κάλυψη εμφανίζεται ως πρόκληση για τη διεθνή επιστημονική έρευνα.
- Τέλος, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων εντάσσεται, φυσικά, στο ευρύτερο πεδίο εφαρμογών μηχανολογικών συστημάτων που αποτελούν και βασική στόχευση της παρούσας Διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 2, που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας, καθώς και η ηλεκτρική και θερμοδυναμική μοντελοποίηση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. B. Parhami, "Defect, Fault, Error, ..., or Failure?", IEEE Transactions on Reliability, 46(4), 1997.
2. S. Mourad and Y. Zorian, "Principles of Testing Electronic Systems", Chapt. 2, John Wiley & Sons, U.S.A., 2000.
3. J.H. Suh, S.R.T. Kumara and S.P. Mysore, "Machinery Fault Diagnosis and Prognosis: Application of Advanced Signal Processing Techniques", Annals of the CIRP, 48, 1999.
4. Π.Α. Δρακάτος, "Διαγνωστική - Πρόγνωση στην Τεχνολογία", Τόμος Ι, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις, Πάτρα, 2001.
5. A.S. Goldhaber, M.M. Nieto, "Photon and Graviton Mass Limits", Reviews of Modern Physics (American Physical Society), 82, 2008.
6. Oxford English Dictionary - entry for "scientific", Oxford University Press, United Kingdom, 1997.
7. H.D. Brown, "Teaching by principles: an interactive approach to language pedagogy", Chapter 2: A "methodical" history of language teaching, Pearson Education Inc., 2006.
8. E. Agazzi, "From Technique to Technology: The Role of Modern Science", Philosophy & Technology, 4(2), 1998.
9. Merriam-Webster online Dictionary - entry for "technology", [<http://www.merriam-webster.com/>], Encyclopædia Britannica Inc., προσπελάστηκε: 11/2012.
10. G. Vachtsevanos, F.L. Lewis, M. Roemer, A. Hess and B. Wu, "Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems", John Wiley & Sons, U.S.A., 2006.
11. Σ.Ι. Λουτρίδης, "Πρόγνωση και Διάγνωση Βλαβών σε Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα με Συνδυασμένη Επεξεργασία του Σήματος στα Πεδία του Χρόνου και Συχνότητας", Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Γενικό Τμήμα – Τομέας Φυσικής, Θεσσαλονίκη, 2003.
12. A.G. Rehorn, J. Jiang, and P.E. Orban, "State-of-the-art in methods and results in tool condition monitoring: a review," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26, 2005.
13. E. Jantunen, "A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42, 2002.

14. K.F. Martin, "A review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 34, 1994.
15. P.N. Botsaris, J.A. Tsanakas, "State-of-the-art in Methods Applied to Tool Condition Monitoring (TCM) in Unmanned Machining Operations: A Review", *Proceedings of the 21st International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management – COMADEM*, Prague, Czech Republic, 2008.
16. Ι. Καλλιμάνης, "Διάγνωση και Πρόγνωση Βλαβών στους Γεωργικούς Ελκυστήρες", Μεταπτυχιακή Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Αθήνα 2010.
17. Η. Αμοιρίδης, "Παρακολούθηση Λειτουργικών Παραμέτρων Κέντρου Κατεργασίας και Εκτίμηση Φθοράς Κοπτικών Εργαλείων: Περίπτωση Διάρτησης", Διπλωματική Εργασία, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Ξάνθη, 2009.
18. D. Lin, "A Survey of Signal Processing and Decision Technologies for CBM", [<http://www.livingreliability.com/en/>], προσπελάστηκε: 11/2012.
19. N.V. Kirianaki, S.Y. Yurish, N.O. Shpak and V.P. Deynega, "Data Acquisition and Signal Processing for Smart Sensors", John Wiley and Sons, Ltd., United Kingdom, 2002.
20. J.C. Russ, "The Image Processing Handbook", CRC Press, Boca Raton, U.S.A., 2002.
21. M.S. Nixon and A.S. Aguado, "Feature Extraction and Image Processing", Newnes-Elsevier, Oxford, 2002.
22. C.M. Stellman, K.J. Ewing, F. Bucholtz and I.D. Aggarwal, "Monitoring the Degradation of a Synthetic Lubricant Oil Using Infrared Absorption, Fluorescence Emission and Multivariate Analysis: A Feasibility Study", *Lubrication Engineering*, 55, 1999.
23. J.H. Williams, A. Davies and P.R. Drake, "Condition-based Maintenance and Machine Diagnostics", Chapman & Hall, London, 1994.
24. J. Korbicz, J. M. Koscielny, Z. Kowalczyk and W. Cholewa, "Fault Diagnosis", Springer, Berlin, 2004.
25. W. Wang and J. Sharp, "Modelling Condition-based Maintenance Decision Support, Condition Monitoring: Engineering the Practice, John Wiley & Sons, United Kingdom, 2002.
26. M. Artes, L. Del Castillo and J. Perez, "Failure Prevention and Diagnosis in Machine Elements Using Cluster", *Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibration*, Stockholm, Sweden, 2003.
27. C. Bunks, D. McCarthy and T. Al-Ani, "Condition-based Maintenance of Machines Using Hidden Markov Models", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14, 2000.
28. A. Siddique, G. S. Yadava and B. Singh, "Applications of Artificial Intelligence Techniques for Induction Machine Stator Fault Diagnostics: Review", *Proceedings of the*



- IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, New York, U.S.A., 2003.
29. M.J. Roemer, C. Hong and S.H. Hesler, "Machine Health Monitoring and Life Management Using Finite Element-based Neural Networks", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, 118, 1996.
 30. E.C. Larson, D.P. Wipf and B.E. Parker, "Gear and Bearing Diagnostics Using Neural Network-based Amplitude and Phase Demodulation", Proceedings of the 51st Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach, U.S.A., 1997.
 31. B. Li, M.-Y. Chow, Y. Tipsuwan and J.C. Hung, "Neural-network-based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 47, 2000.
 32. Y. Fan and C.J. Li, "Diagnostic Rule Extraction from Trained Feedforward Neural Networks, Mechanical Systems and Signal Processing, 16, 2002.
 33. C.H. Hansen, R.K. Autar and J.M. Pickles, "Expert systems for Machine Fault Diagnosis", Acoustics Australia, 22, 1994.
 34. E. Phelps, P. Willett and T. Kirubarajan, "A Statistical Approach to Prognostics" Proceedings of SPIE on Component and Systems Diagnostics, Prognosis and Health Management, Bellingham, U.S.A., 2001.
 35. P. Wang and G. Vachtsevanos, "Fault Prognostics Using Dynamic Wavelet Neural Networks", Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 15, 2001.
 36. A. Ray and S. Tangirala, "Stochastic Modeling of Fatigue Crack Dynamics for On-line Failure Prognostics", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 4, 1996.
 37. H.-H. Kim, S. Chung, S.-C. Kim, W.-H. Jee and S.-C. Chung, "Condition Monitoring of Micro-Drilling Processes on Glass by Using Machine Vision", ASPE Proceedings, Monterey, U.S.A., 2006.
 38. D.A. Forsyth and J. Ponce, "Computer Vision: A Modern Approach", 2nd Edition, Prentice Hall, 2011.
 39. The British Institute of Non-Destructive Testing (BINDT): Optical metrology and holography, [http://www.bindt.org/About_us/About_NDT/Optical_metrology_and_holography.html], προσπελάστηκε: 11/2012.
 40. J. Hegger, S. Görtz and J. Niewels, "The Use of Laser-Interferometry (ESPI) in Analysis of Reinforced Concrete Structures", Proceedings of The 6th International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, Germany, 2003.
 41. The British Institute of Non-Destructive Testing (BINDT): Laser shearography, [http://www.bindt.org/About_us/About_NDT/Laser-based_inspection.html], προσπελάστηκε: 11/2012.

42. Π.Μ. Φραντζεσκάκης, "Παραμετρική ανάλυση μη καταστροφικού ελέγχου ολογραφικής συμβολομετρίας για αποκόλληση σε πολυστρωματικό υλικό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου, Αθήνα, 2007.
43. Y.H. Huang, S.P. Ng, L.Liu, C.L. Li, Y.S. Chen and Y.Y. Hung, "NDT&E Using Shearography with Impulsive Thermal Stressing and Clustering Phase Extraction", Optics and Lasers in Engineering, 47, 2009.
44. M. Köntges, S. Kajari-Schröder, I. Kunze and U. Jahn, "Crack Statistic Of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, 2011.
45. The British Institute of Non-Destructive Testing (BINDT): Real-time radiography and radioscopy, [http://www.bindt.org/About_us/About_NDT/Realtime_radiography_and_radioscopy.html], προσπελάστηκε: 11/2012.
46. J. Xu, T. Liu, X.M. Yin, B.S. Wong and S.B. Hassan, "Automatic X-ray Crack Inspection for Aircraft Wing Fastener Holes", Proceedings of 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, Hamburg, Germany, 2000.
47. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Non-Destructive in Situ Evaluation of a PV Module Performance Using Infrared Thermography", Proceedings of The 6th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies - CM & MFPT, Dublin, Republic of Ireland, 2009.
48. Π.Ν. Μπότσαρης, Ι.Α. Τσανάκας, "Θερμογραφία και εφαρμογές της στην επιστήμη του Μηχανικού", Εκπαιδευτικό υλικό σεμιναρίου στα πλαίσια του προγράμματος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας "e-Μηχανικοί: Εκπαίδευση Μηχανικών στις τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών".
49. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Passive and Active Thermographic Assessment as a Tool for Condition-based Performance Monitoring of Photovoltaic Modules" Journal of Solar Energy Engineering, 133(2), 021012, 2011.
50. The British Institute of Non-Destructive Testing (BINDT): Thermography, [http://www.bindt.org/About_us/About_NDT/Thermography.html], προσπελάστηκε: 1/2012.
51. B. Voutou, E.-C. Stefanaki and K. Giannakopoulos, "Electron Microscopy: The Basics", Physics of Advanced Materials Winter School, Thessaloniki, Greece, 2008.
52. J.C. Mertz, "Introduction to Optical Microscopy", Roberts and Company publishers, U.S.A., 2009.
53. E. Jantunen, "Indirect Multisignal Monitoring and Diagnosis of Drill Wear", VTT publications, Espoo, Finland, 2006.



54. C. Scheffer, H. Engelbrecht, and P. S. Heyns, "A comparative evaluation of neural networks and hidden Markov models for monitoring tool wear," *Neural Computing & Applications*, 14, 2005.
55. R. Heinemann, S. Hinduja, and G. Barrow, "Use of process signals for tool wear progression sensing in drilling small deep holes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33, 2006.
56. X. Li, "A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42, 2001.
57. I. N. Tansel, M. Trujillo, A. Nedbouyan, C. Velez, W. Y. Bao, T. T. Arkan, and B. Tansel, "Micro-end-milling - III. Wear estimation and tool breakage detection using acoustic emission signals," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 38, 1998.
58. J. S. Kim, M. C. Kang, B. J. Ryu, and Y. K. Ji, "Development of an on-line tool-life monitoring system using acoustic emission signals in gear shaping," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 1999.
59. D. E. Dimla, "The correlation of vibration signal features to cutting tool wear in a metal turning operation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, 2002.
60. K. J. Lee, T. M. Lee, and M. Y. Yang, "Tool wear monitoring system for CNC end milling using a hybrid approach to cutting force regulation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 2005.
61. N. Constantinides and S. Bennett, "An investigation of methods for the on-line estimation of tool wear," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 27, 1987.
62. L. A. Franco-Gasca, G. Herrera-Ruiz, R. Peniche-Vera, R. d. J. Romero-Troncoso, and W. Leal-Tafolla, "Sensorless tool failure monitoring system for drilling machines," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 2006.
63. N. A. Abukhshim, P. T. Mativenga, and M. A. Sheikh, "Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 2006.
64. W. Gong, W. Li, T. Shirakashi, and T. Obikawa, "An active method of monitoring tool wear states by impact diagnostic excitation," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 2004.
65. C. Bradley and Y. S. Wong, "Surface texture indicators of tool wear - A machine vision approach," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17, 2001.
66. A. Karthik, S. Chandra, B. Ramamoorthy, and S. Das, "3D tool wear measurement and visualisation using stereo imaging," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37, 1997.



67. J. Jurkovic, M. Korosec, and J. Kopac, "New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 2005.
68. S. H. Yeo, L. P. Khoo, and S. S. Neo, "Tool condition monitoring using reflectance of chip surface and neural network," *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, 2000.
69. D. Kerr, J. Pengilley, and R. Garwood, "Assessment and visualisation of machine tool wear using computer vision," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, 2006.
70. X. Chen and B. Li, "Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33, 2006.
71. S. Kurada and C. Bradley, "A review of machine vision sensors for tool condition monitoring," *Computers in Industry*, 34, 1997.
72. M. Sortino, "Application of statistical filtering for optical detection of tool wear," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 2003.
73. A. Sokolowski, "On some aspects of fuzzy logic application in machine monitoring and diagnostics," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17, 2004.
74. D. K. Ojha and U. S. Dixit, "An economic and reliable tool life estimation procedure for turning," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 2005.
75. S. K. Choudhury and G. Bartarya, "Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 2003.
76. H. V. Ravindra, Y. G. Srinivasa, and R. Krishnamurthy, "Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting," *Wear*, 212, 1997.
77. K. Jemielniak, L. Kwiatkowski, and P. Wrzosek, "Diagnosis of tool wear based on cutting forces and acoustic emission measures as inputs to a neural network," *Journal of Intelligent Manufacturing*, 9, 1998.
78. C. Beggan, M. Woulfe, P. Young, and G. Byrne, "Using acoustic emission to predict surface quality," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15, 1999.
79. S. Vajpayee and A. Sampath, "Development of a microcomputer-based AE system for tool condition monitoring," *Computers and Industrial Engineering*, 18, 1990.
80. H. Gao and M. Xu, "Intelligent tool condition monitoring system for turning operations," *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 3498, 2005.
81. S. X. Zheng, R. McBride, J. S. Barton, J. D. C. Jones, K. F. Hale, and B. E. Jones, "Intrinsic optical fibre sensor for monitoring acoustic emission," *Sensors and Actuators*, 31, 1992.

82. N. H. Abu-Zahra and J. H. Lange, "Tool chatter monitoring in turning operations using wavelet analysis of ultrasound waves," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20, 2002.
83. Y. Choi, R. Narayanaswami, and A. Chandra, "Tool wear monitoring in ramp cuts in end milling using the wavelet transform," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23, 2003.
84. O. Yumak and H. M. Ertunc, "Tool wear condition monitoring in drilling processes using fuzzy logic," *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 4234, 2006.
85. X. Li, S. Dong, and P. K. Venuvinod, "Hybrid learning for tool wear monitoring," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 2000.
86. Z. G. Wang, W. Lawrenz, R. Rao, and A. Hope, "Feature-filtered fuzzy clustering for condition monitoring of tool wear," *Journal of Intelligent Manufacturing*, 7, 1996.
87. P. Fu and A. Hope, "Intelligent classification of cutting tool wear states," *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 3973, 2006.
88. V. Susanto and J. C. Chen, "Fuzzy logic based in-process tool-wear monitoring system in face milling operations," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3, 2003.
89. M. Lee, C. E. Thomas, and D. G. Wildes, "Review: prospects for in-process diagnosis of metal cutting by monitoring vibration signals," *Journal of Materials Science*, 22, 1987.
90. S. Y. Lin, J. C. Lin, C. C. Lin, W. Y. Jywe, and B. J. Lin, "Life prediction system using a tool's geometric shape for high-speed milling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, 2006.
91. G. P. Stachowiak, P. Podsiadlo, and G. W. Stachowiak, "Shape and texture features in the automated classification of adhesive and abrasive wear particles," *Tribology Letters*, 24, 2006.
92. H. S. Lim, S. M. Son, Y. S. Wong, and M. Rahman, "Development and evaluation of an on-machine optical measurement device," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 2006.
93. J. U. Jeon and S. W. Kim, "Optical flank wear monitoring of cutting tools by image processing," *Wear*, 127, 1988.
94. K. Venkatesh, M. Zhou, and R. J. Caudill, "Design of artificial neural networks for tool wear monitoring," *Journal of Intelligent Manufacturing*, 8, 1997.
95. Y. M. Niu, Y. S. Wong, and G. S. Hong, "An intelligent sensor system approach for reliable tool flank wear recognition," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14, 1998.
96. S. K. Choudhury, V. K. Jain, and R. Rao, "On-line monitoring of tool wear in turning using a neural network," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 1997.



97. B. Sick, "Classifying the wear of turning tools with neural networks," Proceedings of 7th International Conference on Artificial Neural Networks, Lausanne, Switzerland, 1997.
98. A. G. Vallejo, J. A. Nolasco-Flores, R. Morales-Menendez, L. E. Sucar, and C. A. Rodriguez, "Tool-wear monitoring based on continuous hidden Markov models," Lecture Notes in Computer Science (LNCS), 3773, 2005.
99. F. Ferraz and R. T. Coelho, "Data acquisition and monitoring in machine tools with CNC of open architecture using internet," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26, 2005.
100. S. Jie, G. S. Hong, M. Rahman, and Y. S. Wong, "Feature extraction and selection in tool condition monitoring system," Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), 2557, 2002.
101. I. H. Choi and J. D. Kim, "Development of monitoring system on the diamond tool wear," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39, 1999.
102. S. Y. Hong, "Knowledge-based diagnosis of drill conditions," Journal of Intelligent Manufacturing, 4, 1993.
103. W. P. Robbins, B. Bischoff, and S. Ramalingen, "Insert-mounted thin film sensors for real-time monitoring of tool conditions," Thin Solid Films, 166, 1988.
104. J. P. Chubb and J. Billingham, "Coated cutting tools - A study of wear mechanisms in high speed machining," Wear, 61, 1980.
105. D. Shi, D. A. Axinte, and N. N. Gindy, "Development of an online machining process monitoring system: a case study of the broaching process," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 34, 2006.
106. A. Al-Habaibeh and N. N. Gindy, "Self-learning algorithm for automated design of condition monitoring systems for milling operations," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18, 2001.
107. M. A. Mannan, Z. Mian, and A. A. Kassim, "Tool wear monitoring using a fast Hough transform of images of machined surfaces," Machine Vision and Applications, 15, 2004.
108. Z. Chen and X. Zhang, "Monitoring of tool wear using feature vector selection and linear regression," Lecture Notes in Computer Science (LNCS), 3611, 2005.
109. Y. S. Wong, A. Y. C. Nee, X. Q. Li, and C. Relsdorf, "Tool condition monitoring using laser scatter pattern," Journal of Materials Processing Technology, 63, 1997.
110. H. M. Ertunc and C. Oysu, "Drill wear monitoring using cutting force signals," Mechatronics, 14, 2003.
111. I. Vilcek and J. Madl, "Cepstral Analysis in Tool Monitoring," in Emerging Solutions for Future Manufacturing Systems, IFIP International Federation for Information Processing, 159, 2005.



112. D. E. Dimla, "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations - A review of methods," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 2000.
113. T. Radhakrishnan and S. M. Wu, "On-line hole quality evaluation for drilling composite material using dynamic data," *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, 103, 1981.
114. R. W. Barker, G. A. Kluthe, and M. J. Hinich, "Monitoring rotating tool wear using higher-order spectral features," *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, 115, 1993.
115. K. Ramamurthi and C. L. Hough, "Intelligent real-time predictive diagnostics for cutting tools and supervisory control of machining operations," *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, 115, 1993.
116. I. N. Tansel, O. Rodriguez, and C. Mekdecı, "Detection of tool breakage in microdrilling operation with RCE neural networks," *PED, ASME*, 47, 1992.
117. L. Dan and J. Mathew, "Tool wear and failure monitoring techniques for turning - A review," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 30, 1990.
118. K. B. Pedersen, "Wear measurement of cutting tools by computer vision," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 30, 1990.
119. M. Castejon, E. Alegre, J. Barreiro, and L. K. Hernandez, "On-line tool wear monitoring using geometric descriptors from digital images," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 2007.
120. P. Mathew, "Use of predicted cutting temperatures in determining tool performance," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 29, 1989.
121. G. E. D'Errico, "A systems theory approach to modelling of cutting temperature with experimental identification," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37, 1996.
122. G. B. Jeong, D. H. Kim, and D. Y. Jang, "Real time monitoring and diagnosis system development in turning through measuring a roundness error based on three-point method," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 2005.
123. S. Spiewak and S. M. Wu, "Tool wear monitoring and breakage detection based on "intelligent filtering"," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 28, 1988.
124. J. Sun, G. S. Hong, Y. S. Wong, M. Rahman, and Z. G. Wang, "Effective training data selection in tool condition monitoring system," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 2006.
125. R. X. Du, M. A. Elbestawi, and S. Li, "Tool condition monitoring in turning using fuzzy set theory," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 32, 1992.



126. W. T. Kwon and K. F. Ehmann, "Tool wear monitoring by using the imaginary part of the transfer function of the cutting dynamics," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 34, 1994.
127. J. E. Kaye, D. H. Yan, N. Popplewell, and S. Balakrishnan, "Predicting tool flank wear using spindle speed change," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 35, 1995.
128. F. Caiazzo, G. S. Palazzo, and R. Pasquino, "A no contact capacitive sensor to mechanical working control," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36, 1996.
129. A. Donovan and W. Scott, "On-line monitoring of cutting tool wear through tribo emf analysis," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 35, 1995.
130. S. N. Huang, K. K. Tan, Y. S. Wong, C. W. d. Silva, H. L. Goh, and W. W. Tan, "Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 2007.
131. I. Abu-Mahfouz, "Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 2003.
132. D. E. Dimla and P. M. Lister, "On-line metal cutting tool condition monitoring. I: force and vibration analyses," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 2000.
133. D. E. Dimla and P. M. Lister, "On-line metal cutting tool condition monitoring. II: tool-state classification using multi-layer perceptron neural networks," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 2000.
134. G. Pontuale, F. A. Farrelly, A. Petri, and L. Pitolli, "A statistical analysis of acoustic emission signals for tool condition monitoring (TCM)," *Acoustics Research Letters Online (ARLO)*, 4, 2002.
135. A. Devillez and D. Dudzinski, "Tool vibration detection with eddy current sensors in machining process and computation of stability lobes using fuzzy classifiers," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, 2007.
136. C. Tomas, "Tool break/wear detection using a tracking minimum of detected vibrational signal," in *Pergamon PATSEARCH United States: General Electric Company*, 4894644, 1990.
137. C. Tomas, "Cutting tool wear detection apparatus and method," in *Pergamon PATSEARCH United States: General Electric Company*, 483165, 1990.
138. P. Bandyopadhyay, D. A. Blaser, B. D. Kaminski, and Y. H. Lee, "Tool wear measurement by machine vision," in *Pergamon PATSEARCH United States: General Motors Corporation*, 4845763, 1990.



139. K. Mayer, V. Richey, and H. P. Schneider, "Device for early detection of breaks and marginal wear in the cutting edges of tools," in Pergamon PATSEARCH Germany: Fried Krupp GmbH, 4885530, 1990.
140. M. Olsson, S. Soderberg, S. Jacobson, and S. Hogmark, "Simulation of cutting tool wear by a modified pin-on-disc test," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 29, 1989.
141. G. Galante, A. Lombardo, and A. Passannanti, "Tool-life modelling as a stochastic process," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 38, 1998.
142. K. Jemielniak, "Commercial tool condition monitoring systems," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15, 1999.
143. P. Fu, A. Hope, and G. A. King, "A neurofuzzy pattern recognition algorithm and its application in tool condition monitoring process," Proceedings of 4th International Conference on Signal Processing, Beijing, China, 1998.
144. S. Saravanan, G. S. Yadava, and P. V. Rao, "Condition monitoring studies on spindle bearing of a lathe," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28, 2005.
145. H. Chelladurai, V. K. Jain, and N. S. Vyas, "Development of a cutting tool condition monitoring system for high speed turning operation by vibration and strain analysis," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 37, 2008.
146. W. Wang, Y. S. Wong, and G. S. Hong, "Flank wear measurement by successive image analysis," Computers in Industry, 56, 2005.
147. K. Szwajka, "Laboratory versus industrial cutting force sensor in tool condition monitoring system," Journal of Physics: Conference Series, 13, 2005.
148. W. Amer, Q. Ahsan, R. I. Grosvenor, and P. W. Prickett, "Machine tool condition monitoring system using tooth rotation energy estimation (TREE) technique," in Emerging Technologies and Factory Automation – ETFA, 1, 2005.
149. A. A. Kassim, M. A. Mannan, and M. Jing, "Machine tool condition monitoring using workpiece surface texture analysis," Machine Vision and Applications, 11, 2000.
150. H. Zeng, T. B. Thoe, X. Li, and J. Zhou, "Multi-modal sensing for machine health monitoring in high speed machining," Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Informatics, Singapore, Republic of Singapore, 2006.
151. X. Li and X. Yao, "Multi-scale statistical process monitoring in machining," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52, 2005.
152. H. M. Ertunc, K. A. Loparo, E. Ozdemir, and H. Ocak, "Real time monitoring of tool wear using multiple modelling method," in Electric Machines and Drives Conference – IEMDC, Cambridge (Massachusetts), USA, 2001.



153. X. Li, S. K. Tso, and J. Wang, "Real-time tool condition monitoring using wavelet transforms and fuzzy techniques," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews, 30, 2000.
154. J. Sun, G. S. Hong, M. Rahman, and Y. S. Wong, "The application of nonstandard support vector machine in tool condition monitoring system," in Electronic Design, Test and Applications Symposium – DELTA, Perth, Australia, 2004.
155. P. C. Tseng and W. C. Teng, "The design of a single-chip tool monitoring system for on-line turning operation," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 24, 2004.
156. H. Gao, H. Gao, C. Chen, Y. Su, and M. Xu, "The investigation of a self-adjusting tool wear monitoring system," in Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang, China, 2006.
157. M. A. Elbestawi, M. Dumitrescu, and E. G. Ng, "Tool Condition Monitoring in Machining," in Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing: Springer London, 2006.
158. M. A. Elbestawi and M. Dumitrescu, "Tool condition monitoring in machining - Neural networks," IFIP International Federation for Information Processing, Information Technology for Balanced Manufacturing Systems, 220, 2006.
159. L. I. Burke and S. Rangwala, "Tool condition monitoring in metal cutting: a neural network approach," Journal of Intelligent Manufacturing, 2, 1991.
160. P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "A Preliminary Study for the Efficiency of the Wear Debris Analysis and Thermography as Independent or Integrated Fault Diagnosis Methods in Tool Wear Monitoring", Proceedings of The 5th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies - CM and MFPT, Edinburgh, Scotland/United Kingdom, 2008
161. P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "Mechanical and Thermal Signatures as Indirect Tool Wear Monitoring Indices - Case study: Drilling", Proceedings of The 22nd International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management - COMADEM, San Sebastian, Spain, 2009.
162. J.A. Tsanakas, P.N. Botsaris, I.G. Amiridis, G.A. Galeridis, "Evaluation of Sensor-Based Condition Monitoring Methods as In-Process Tool Wear and Breakage Indices – Case Study: Drilling", Diagnostyka, 2(62), 2012.



Κεφάλαιο 2

Λειτουργία και Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Περιεχόμενα

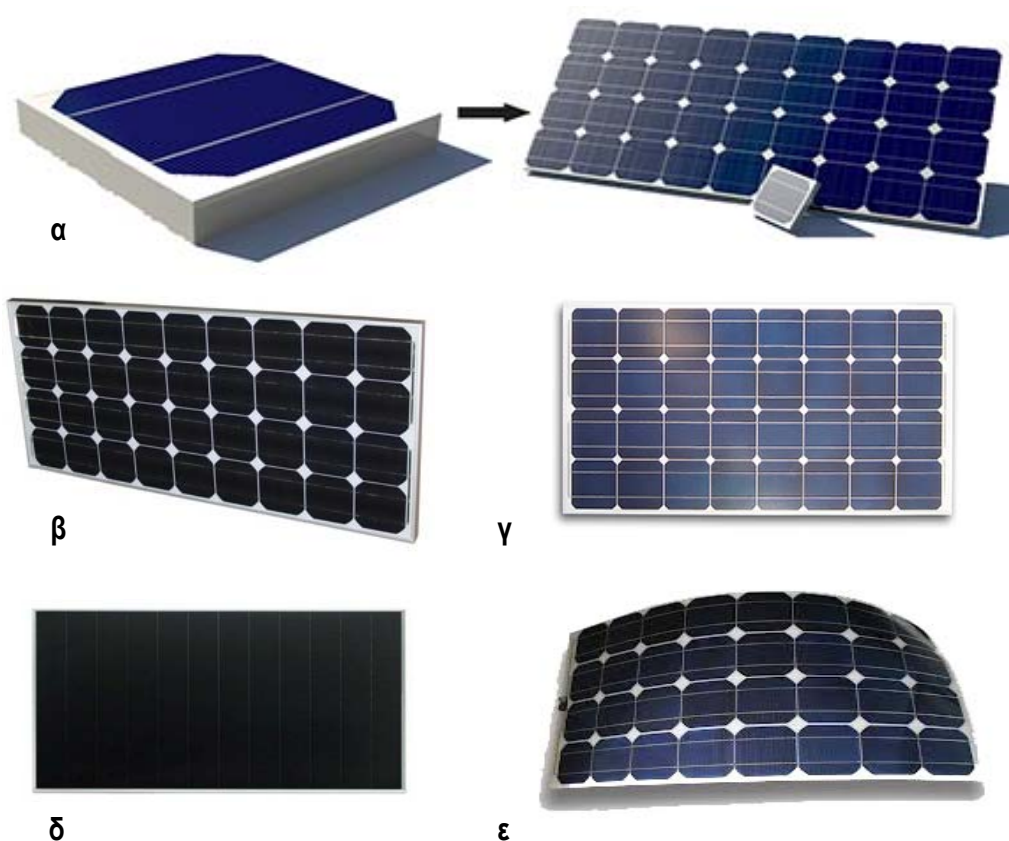
Σελίδα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	51
2. ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....	54
2.1 Βασικές παράμετροι ηλιακών κυψελών.....	54
2.2 Βαθμός απόδοσης ηλιακών κυψελών.....	58
2.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου.....	63
2.3.1 Ηλεκτρικά και θερμικά χαρακτηριστικά.....	65
2.3.2 Οπτικές ιδιότητες.....	68
2.3.3 Απόδοση στο πεδίο.....	69
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....	70
3.1 Το ηλεκτρικό μοντέλο.....	71
3.2 Το θερμοδυναμικό μοντέλο.....	76
3.3 Προσομοίωση ηλεκτρικού και θερμοδυναμικού μοντέλου.....	79
4. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	83
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	84

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, με την εμπέδωση της σημασίας της αειφόρου ανάπτυξης, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων έχει εδραιωθεί ως μια από τις σημαντικότερες και πιο διαδεδομένες εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Βασικό στοιχείο ενός Φ/Β συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ο όρος *φωτοβολταϊκό πλαίσιο* (photovoltaic module) αναφέρεται στο τελικό προϊόν της συναρμολόγησης ηλεκτρικά διασυνδεδεμένων *ηλιακών κυψελών* (solar cells) (Σχήμα 2.1-α) σε μία κλειστή δομή στρωμάτων υλικών. Σήμερα, από κατασκευαστικής άποψης, η πλειοψηφία των ηλιακών κυψελών στα Φ/Β πλαίσια είναι είτε τύπου *κρυσταλλικού πυριτίου* (crystalline silicon),

είτε τύπου *λεπτού υμενίου* (thin film). Συγκεκριμένα, σε εφαρμογές όπου απαιτείται ηλεκτροπαραγωγή ευρείας κλίμακας (λ.χ. *φωτοβολταϊκά πάρκα*) χρησιμοποιούνται, κατά πρώτο λόγο, Φ/Β πλαίσια *μονοκρυσταλλικού πυριτίου* (mono-crystalline silicon, m-cSi) (Σχήμα 2.1-β) ή *πολυκρυσταλλικού πυριτίου* (poly-crystalline silicon, p-cSi) (Σχήμα 2.1-γ), τα οποία εμφανίζουν υψηλότερη απόδοση και, συνεπώς, υψηλότερη παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας συγκριτικά με τα πλαίσια λεπτού υμενίου. Σε περιπτώσεις, ωστόσο, όπου λόγοι αρχικού κόστους ή/και αισθητικής το επιβάλλουν, και υπάρχει επάρκεια διαθέσιμου χώρου εγκατάστασης, προτιμώνται συχνότερα τα Φ/Β πλαίσια λεπτού υμενίου (Σχήμα 2.1-δ).



Σχήμα 2.1. α. Από την ηλιακή κυψέλη στο Φ/Β πλαίσιο και ενδεικτικά παραδείγματα Φ/Β πλαισίων: β. μονοκρυσταλλικού πυριτίου, γ. πολυκρυσταλλικού πυριτίου, δ. λεπτού υμενίου, ε. ελαφριάς ημιεύκαμπτης δομής.

Η συντριπτική πλειοψηφία των εμπορικά διαθέσιμων και εγκατεστημένων εφαρμογών, αφορά σε συμπαγή, άκαμπτα Φ/Β πλαίσια. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει καταγραφεί σημαντική εξέλιξη και στην ανάπτυξη τεχνολογιών ελαφρών και εύκαμπτων ή ημιεύκαμπτων Φ/Β πλαισίων (lightweight and flexible/semi-flexible modules) (Σχήμα 2.1-ε). Προς το παρόν, τέτοιοι τύποι πλαισίων υλοποιούνται ευκολότερα με τη χρήση της τεχνολογίας λεπτού υμενίου και

συναντούν εφαρμογή κυρίως στην ενσωμάτωση σε κτίρια (building integrated photovoltaics, BIPV) ή άλλες προηγμένες κατασκευές.

Αν και ένα Φ/Β σύστημα αποτελείται από πολυάριθμο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, περίπου το 50% του κόστους κεφαλαίου μιας επένδυσης Φ/Β συστήματος σχετίζεται αποκλειστικά με το Φ/Β πλαίσιο [1,2]. Κατά συνέπεια, ο χρόνος αποπληρωμής μιας τέτοιας επένδυσης, καθορίζεται – κατά μεγάλο μέρος – από τρεις βασικούς παράγοντες: την αρχική ισχύ εξόδου, τον ρυθμό υποβάθμισης ισχύος εξόδου και τη διάρκεια ζωής του Φ/Β πλαισίου. Η πιστοποιημένη αξιοπιστία και ο συνδυασμός βέλτιστης απόδοσης και διαθεσιμότητας αποτελούν, λοιπόν, πρωταρχικές απαιτήσεις για κάθε Φ/Β πλαίσιο, στην λογική μιας επικερδούς και ασφαλούς επένδυσης. Προς την κατεύθυνση αυτή, αναδεικνύεται η ανάγκη εντοπισμού, περιορισμού ή/και απομόνωσης κάθε ελαττώματος ή βλάβης που μπορεί να συνιστά αιτία υποβάθμισης της απόδοσης και πιθανής αστοχίας ενός Φ/Β πλαισίου.

Όπως αναφέρθηκε στη σύνοψη του 1^{ου} Κεφαλαίου, στα πλαίσια αυτής της Διδακτορικής Διατριβής θα διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα και η εφαρμοσιμότητα της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας στη διάγνωση και πρόγνωση βλαβών Φ/Β πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου Φ/Β πλαισίου έγινε με γνώμονα τα εξής δεδομένα:

- Η συντριπτική πλειοψηφία των εγκατεστημένων, προς διάγνωση, φωτοβολταϊκών πλαισίων, τόσο σε Φ/Β συστοιχίες όσο και σε Φ/Β πάρκα, είναι τεχνολογίας (τύπου) κρυσταλλικού πυριτίου.
- Αν και τα Φ/Β πλαίσια λεπτού υμενίου εμφανίζουν υψηλότερο ρυθμό υποβάθμισης της απόδοσής τους στη διάρκεια του χρόνου ζωής τους, θεωρούνται περισσότερο “ανθεκτικά” σε ελαττώματα και βλάβες που σχετίζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας τους (λ.χ. λόγω σκίασης ή εμφάνισης ρωγμών στη Φ/Β επιφάνειά τους). Εξάλλου, συνήθεις βλάβες σε πλαίσια αυτού του τύπου σχετίζονται συνήθως με προβλήματα ηλεκτροχημικής διάβρωσης, η οποία ωστόσο δεν επιφέρει σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας τους [3,4]. Κατά συνέπεια, η μέθοδος της υπέρυθρης θερμογραφίας δεν μπορεί να θεωρηθεί ενδεδειγμένη για την έγκαιρη και αξιόπιστη διάγνωση βλαβών αυτού του τύπου.
- Αντίθετα, διαφαίνεται ότι η εφαρμογή ενός συστήματος CM υπέρυθρης θερμογραφίας ενδείκνυται καλύτερα για την περίπτωση των Φ/Β πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου, στα οποία οι συχνότερα εμφανιζόμενες βλάβες σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με τοπική αύξηση της θερμοκρασίας.

Πριν την καταγραφή των κυριότερων τύπων ελαττωμάτων και βλαβών που είναι πιθανό να εμφανίζονται στη διάρκεια ζωής ενός Φ/Β πλαισίου, και τα οποία αναλύονται στο 3^ο

Κεφάλαιο, είναι απαραίτητη η σκιαγράφιση – σε αυτό το Κεφάλαιο – του βασικού θεωρητικού υπόβαθρου που διέπει την δομή, λειτουργία και μοντελοποίηση των Φ/Β πλαισίων.

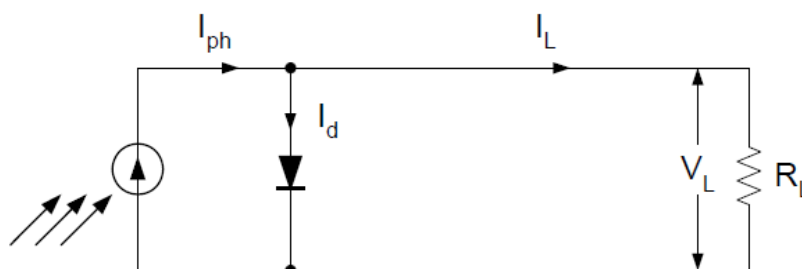
2. ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

2.1 Βασικές παράμετροι ηλιακών κυψελών

Ξεκινώντας από το βασικό στοιχείο ενός Φ/Β πλαισίου, την ηλιακή κυψέλη, ορίζονται συγκεκριμένες παράμετροι οι οποίες έχουν ξεχωριστή σημασία στην κατανόηση της χαρακτηριστικής λειτουργίας (I-V) του Φ/Β πλαισίου, καθώς και του αντίστοιχου ηλεκτρικού μοντέλου, το οποίο παρουσιάζεται διεξοδικά στην Υποενότητα 3.1.

ο Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc})

Στο βασικό ισοδύναμο κύκλωμα μιας ιδανικής ηλιακής κυψέλης (Σχήμα 2.2), το ρεύμα βραχυκύκλωσης ταυτίζεται με το **φωτόρευμα** I_{ph} που παράγεται, λόγω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, από την πρόσπτωση της φωτεινής ηλιακής ακτινοβολίας στον ημιαγωγό της ηλιακής κυψέλης. Με άλλα λόγια, το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το ρεύμα που διαρρέει το συγκεκριμένο κύκλωμα όταν το φορτίο στα άκρα του κυκλώματος είναι μηδενικό (περίπτωση βραχυκυκλώματος) [5,6].



Σχήμα 2.2. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ιδανικής ηλιακής κυψέλης.

ο Ρεύμα σκότους διόδου (I_d)

Στο ίδιο κύκλωμα, η απεικονιζόμενη δίοδος αντιστοιχεί σε μια φωτοδίοδο της οποίας το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει της έντασης του φωτός της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην ηλιακή κυψέλη. Κατά την ανάστροφη πόλωση της δίοδου (απόλυτο σκοτάδι) κυκλοφορεί ένα πολύ μικρό ρεύμα μέσα από την δίοδο το οποίο ονομάζεται **ρεύμα σκότους διόδου**. Το ρεύμα αυτό είναι της τάξεως των μA , αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της έντασης

του φωτός στην δίοδο και εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός και της έντασης της φωτεινής ροής πάνω στην δίοδο [5,6].

ο Τελικό ρεύμα (I_L)

Το *τελικό ρεύμα*, σύμφωνα με το κύκλωμα του Σχήματος 2.2, ορίζεται ως η διαφορά του ρεύματος σκότους διόδου από το ρεύμα βραχυκύκλωσης (φωτόρευμα). Κατά συνέπεια, το τελικό ρεύμα δίνεται από τη σχέση:

$$I_L = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_L}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

όπου I_0 είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου, επίσης γνωστό και ως ρεύμα διαρροής, q είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο ($1.6 \times 10^{-19} C$), V_L η τάση στα άκρα της κυψέλης, A ένας συντελεστής της διόδου που, ανάλογα με την ποιότητα και την κατασκευή της, λαμβάνει τιμές από 1 έως 2, k η σταθερά του Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} J / K$) και T η απόλυτη θερμοκρασία της ηλιακής κυψέλης σε βαθμούς Kelvin. Να σημειωθεί ότι τόσο το I_0 όσο και το I_{ph} εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά κάθε ηλιακής κυψέλης [5,6].

ο Τάση ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc})

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης λαμβάνεται θέτοντας $I_L = 0$ στη Σχέση 2.1. Στη συνέχεια, λύνοντας την εξίσωση ως προς V_L , προκύπτει ότι:

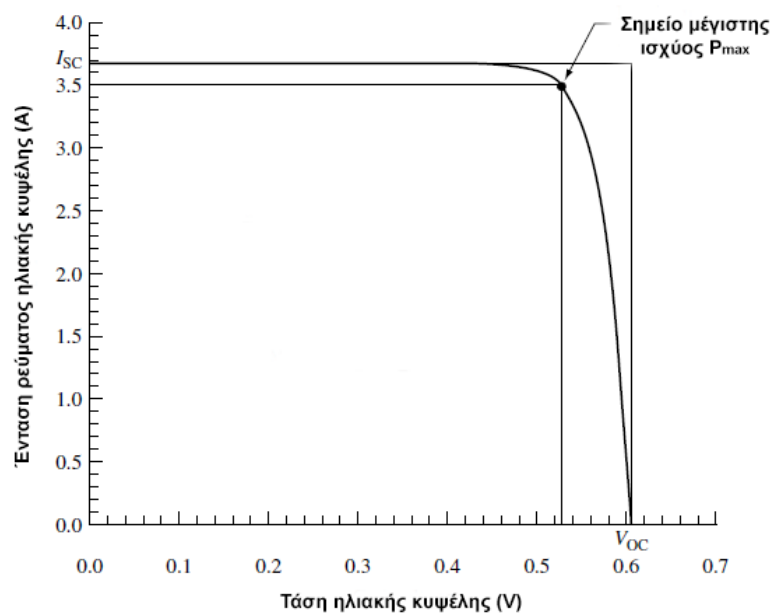
$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (2.2)$$

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης αντιστοιχεί στη τάση μέγιστου φορτίου στα άκρα του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος της ηλιακής κυψέλης [5,6].

ο Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος (I-V)

Η ηλιακή κυψέλη ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζει ασυνήθιστη συμπεριφορά. Ενώ οι περισσότερες ηλεκτρικές πηγές διατηρούν τη τάση τους σταθερή στην περιοχή ονομαστικής λειτουργίας τους, στην περίπτωση των ηλιακών κυψελών η τάση V_L στα

άκρα του κυκλώματος μεταβάλλεται ραγδαία και μη γραμμικά συναρτήσει της έντασης του τελικού ρεύματος I_L , ακόμα και αν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας παραμένει σταθερή. Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενες τιμές φορτίου R_L , η τάση και η ένταση του ρεύματος της ηλιακής κυψέλης λαμβάνουν αντίστοιχα τιμές από 0 έως V_{OC} (όπου $R_L \rightarrow \infty$) και από 0 έως I_{SC} (όπου $R_L=0$). Αυτή η σχέση μεταξύ της έντασης I_L και της τάσης V_L στα άκρα μιας ηλιακής κυψέλης περιγράφεται γραφικά από την *χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος*, ή κοινώς την *χαρακτηριστική I-V* της ηλιακής κυψέλης, ενδεικτικό παράδειγμα της οποίας δίνεται στο Σχήμα 2.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την χαρακτηριστική I-V μιας ηλιακής κυψέλης είναι η ένταση G_T της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία T της κυψέλης, ο συντελεστής A της κυψέλης, το ανάστροφο ρεύμα κόρου I_0 , η παράλληλη και η εν σειρά αντίσταση R_{sh} και R_s αντίστοιχα και ο συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor) [5,6]. Οι αντιστάσεις R_{sh} και R_s , οι οποίες εκφράζουν αντίστοιχα τις απώλειες από τις διαρροές ρεύματος και την δυσκολία κίνησης των φορέων φορτίου μέσα στον ημιαγωγό, υπεισέρχονται κατά την μοντελοποίηση του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος μιας μη ιδανικής κυψέλης, το οποίο παρουσιάζεται στην επόμενη Ενότητα.



Σχήμα 2.3. Ενδεικτικό παράδειγμα χαρακτηριστικής I-V ηλιακής κυψέλης [5].

ο Συντελεστής πλήρωσης (Fill Factor)

Ο συντελεστής πλήρωσης FF (επίσης γνωστός και ως συντελεστής καμπύλης) αποτελεί μέτρο της “αιχμηρότητας” του σημείου καμπής της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V και

είναι ενδεικτικός της ποιότητας της ηλιακής κυψέλης. Σε μία μη ιδανική ηλιακή κυψέλη, ο συντελεστής πλήρωσης μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης σειράς R_s , ενώ τείνει να αυξηθεί για μεγάλες τιμές τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} . Θεωρητικά, ο συντελεστής FF μπορεί να λάβει τιμές από 0 έως 1. Ωστόσο, ρεαλιστικά, σε μια μη ιδανική κυψέλη ο συντελεστής πλήρωσης λαμβάνει συνήθως τιμές από 0.7 έως 0.9 και οπωσδήποτε μικρότερες από 1 (ιδεατή περίπτωση).

Ο συντελεστής πλήρωσης δίνεται από τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_{max} προς το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{SC} και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} της ηλιακής κυψέλης (Σχέση 2.3) [5,6]. Σε μια χαρακτηριστική I-V, όπως αυτή στο Σχήμα 2.3, ο συντελεστής FF δίνεται από το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη (το οποίο ορίζεται από το σημείο μέγιστης ισχύος P_{max}) προς το εμβαδόν του ορθογωνίου που ορίζουν οι τιμές I_{SC} και V_{OC} .

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (2.3)$$

ο Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς (P_{max})

Η ισχύς εξόδου, δηλαδή η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μιας ηλιακής κυψέλης δίνεται από το γινόμενο του ρεύματος εξόδου I_{out} και της τάσης εξόδου V_{out} , ανά πάσα στιγμή και σε συνθήκες ακτινοβολίας (Σχέση 2.4) [5,6].

$$P_{out} = V_{out} \cdot I_{out} \quad (2.4)$$

Η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς εξόδου δίνεται αντίστοιχα από τη Σχέση 2.5:

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (2.5)$$

όπου V_{max} και I_{max} είναι οι τιμές της τάσης και του ρεύματος εξόδου της ηλιακής κυψέλης που αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης ισχύος, όπως αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 2.3. Εναλλακτικά, βάσει του ορισμού του συντελεστή πλήρωσης, η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς μπορεί να δοθεί και από την επίλυση της εξίσωσης που περιγράφεται από τη Σχέση 2.3, ως προς P_{max} :

$$P_{max} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (2.6)$$

2.2 Βαθμός απόδοσης ηλιακών κυψελών

Ο βαθμός απόδοσης μιας ηλιακής κυψέλης δίνεται από τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_{\max}$ της κυψέλης προς το γινόμενο της επιφάνειάς της A (σε cm^2) και της έντασης G_T της ηλιακής ακτινοβολίας (Σχέση 2.7) [5-7].

$$n = \frac{P_{\max}}{A \cdot G_T} = \frac{V_{\max} \cdot I_{\max}}{A \cdot G_T} = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{A \cdot G_T} \quad (2.7)$$

Ο βαθμός απόδοσης μιας ηλιακής κυψέλης, και συνεπώς ενός Φ/Β πλαισίου, δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά τόσο από εσωτερικούς όσο και από εξωτερικούς παράγοντες. Ως κυριότεροι εσωτερικοί παράγοντες θεωρούνται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της ηλιακής κυψέλης (που αντικατοπτρίζονται στην τιμή της αντίστασης R_s), οι οπτικές απώλειες, η γήρανση και η χωροταξική τοποθέτηση των ηλιακών κυψελών στο Φ/Β πλαίσιο. Από την άλλη πλευρά, στους εξωτερικούς παράγοντες περιλαμβάνονται η ηλιακή ακτινοβολία, η σκίαση, η θερμοκρασία, ο άνεμος και η ρύπανση [7].

ο Η αντίσταση R_s

Η αντίσταση R_s είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες καθορισμού του βαθμού απόδοσης μιας ηλιακής κυψέλης. Ουσιαστικά, η R_s παρεμβάλλεται στην κίνηση των φορέων φορτίου μέσα στον ημιαγωγό. Κατά συνέπεια, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας της κυψέλης και της επαφής p-n του ημιαγωγού-υλικού, τόσο μεγαλύτερη είναι και η R_s και, συνακόλουθα, οι αντίστοιχες απώλειες ισχύος. Ως εκ τούτου, η επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης στις ηλιακές κυψέλες, προϋποθέτει – μεταξύ άλλων – μικρή τιμή αντίστασης σειράς R_s [5-7].

ο Οι οπτικές απώλειες

Οι οπτικές απώλειες στις ηλιακές κυψέλες ενός Φ/Β πλαισίου αναφέρονται στη διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του Φ/Β πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανakλαστικό επίστρωμα, υλικό φωτοβολταϊκών στοιχείων) σε κανονικές συνθήκες πεδίου, σε σχέση με την αντίστοιχη σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (standard test conditions, STC). Η ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος της όψεως του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με

την αντίστοιχη τιμή σε STC, αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στην επιφάνειά του, ιδιαίτερα σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60°.

Επίσης, οι οπτικές απώλειες σχετίζονται και με τη διαφοροποίηση του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Για ηλιακές κυψέλες και Φ/Β πλαίσια ευρείας φασματικής περιοχής, η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται σχετικά ανεξάρτητη από τις μεταβολές του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στον βαθμό απόδοσής τους κατά τη διάρκεια της ημέρας, σταθμίζονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση και εξαλείφονται. Αντίθετα, σε ηλιακές κυψέλες και Φ/Β πλαίσια στενής φασματικής περιοχής οι ετήσιες απώλειες που παρατηρούνται στο βαθμό απόδοσης δεν θεωρούνται αμελητέες.

Επιπλέον οπτικές απώλειες παρατηρούνται λόγω διαφοροποίησης στην πόλωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μέση ετήσια επίδραση του παράγοντα αυτού προσδιορίζεται, κατά προσέγγιση, στο 2% επί της τιμής του βαθμού απόδοσης. Τέλος, οπτικές απώλειες παρατηρούνται και λόγω χαμηλών τιμών της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, χαμηλές τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας $G_T < 200 \text{ W/m}^2$ οδηγούν σε μείωση του βαθμού απόδοσης μιας ηλιακής κυψέλης. Αν και σε εμπορικά Φ/Β πλαίσια, ηλιακών κυψελών υψηλής ποιότητας, οι συγκεκριμένες οπτικές απώλειες θεωρούνται ήσσονος σημασίας, καταγράφονται περιπτώσεις όπου οι ενεργειακές αυτές απώλειες λαμβάνονται υπόψη και υπολογίζονται προσεγγιστικά στο 3% επί της τιμής του βαθμού απόδοσης, κατά ετήσιο μέσο όρο [7-8].

ο Η γήρανση

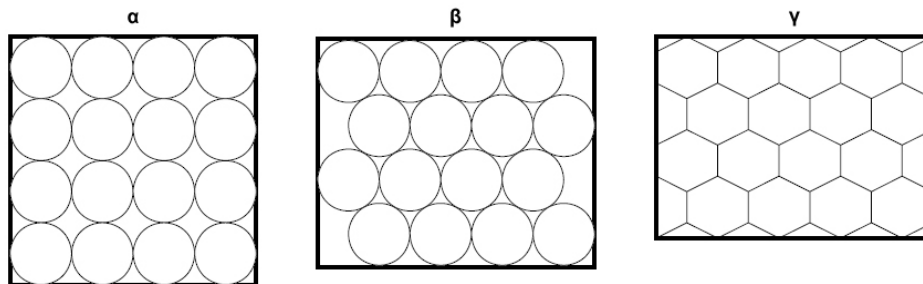
Με την πάροδο του χρόνου, λόγω της φθοράς (γήρανσης) των ηλιακών κυψελών, των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και των υπόλοιπων στοιχείων που απαρτίζουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, έχει παρατηρηθεί μία βαθμιαία πτώση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία υπολογίζεται από 1% έως 2% ετησίως [7].

ο Η χωροταξική τοποθέτηση

Ο βαθμός απόδοσης ενός συνόλου ηλιακών κυψελών, τοποθετημένων σε ένα Φ/Β πλαίσιο, επηρεάζεται έμμεσα από τη χωροταξική τους τοποθέτηση στο πλαίσιο. Συγκεκριμένα, όσο πιο πυκνά είναι τοποθετημένες μεταξύ τους οι ηλιακές κυψέλες, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο συντελεστής κάλυψης (coverage ratio, CR) του πλαισίου.

Ως CR ορίζεται ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών κυψελών, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου. Η τιμή του CR κυμαίνεται από 0.78 για κυκλικά στοιχεία (κυψέλες) σε παράλληλα στοιχισμένες σειρές (Σχήμα 2.4-α), 0.88 για

κυκλικά στοιχεία συγχωνευμένα μεταξύ τους (Σχήμα 2.4-β) και φτάνει έως και 0.98 για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία (Σχήμα 2.4-γ) [7].



Σχήμα 2.4. Τρόποι χωροθέτησης ηλιακών κυψελών σε Φ/Β πλαίσιο: **α.** παράλληλη στοίχιση κυκλικών στοιχείων, **β.** συγχώνευση κυκλικών στοιχείων, **γ.** ορθογωνικά ή εξαγωνικά στοιχεία.

ο Η ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια ηλιακή κυψέλη, και συνεπώς από ένα Φ/Β πλαίσιο, σε ετήσια βάση είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση και την τοπολογία εγκατάστασης. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της κυψέλης είναι, με τη σειρά της, άμεσα εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Εφόσον δεν χρησιμοποιούνται στρεφόμενες βάσεις ενός ή δύο αξόνων, οι ηλιακές κυψέλες και τα Φ/Β πλαίσια πρέπει να έχουν κατάλληλο προσανατολισμό και βέλτιστη γωνία κλίσης ώστε να μεγιστοποιείται η προσλαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια. Μεγαλύτερο ποσό προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και, συνεπώς, μεγαλύτερη παραγόμενη ενέργεια και απόδοση [7].

ο Η σκίαση

Ένας άλλος παράγοντας επίδρασης στον βαθμό απόδοσης των Φ/Β πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των ηλιακών κυψελών και των Φ/Β πλαισίων (λ.χ. παρακείμενα κτήρια, βλάστηση), είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης όπου προκαλείται σκίαση λόγω αναγκαστικής επικάλυψης παράλληλων Φ/Β συστοιχιών. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης ενδέχεται να είναι σοβαρές. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που αυτή προκαλεί.

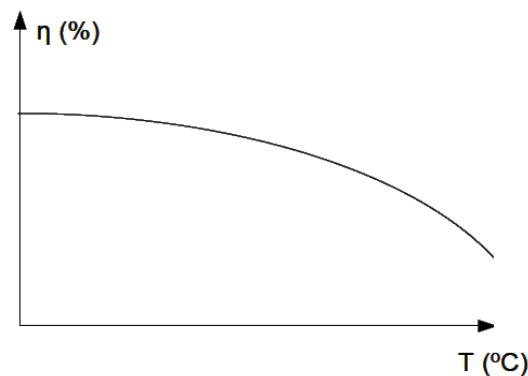
Καθώς ένα τυπικό Φ/Β πλαίσιο αποτελείται από ηλιακές κυψέλες, ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, συνδεδεμένες συνήθως σε σειρά, η σκίαση ή η βλάβη μιας και μόνο ηλιακής κυψέλης, θα μπορούσε να επιφέρει ολική αχρήστευση του πλαισίου. Κατά κανόνα, ένα

σκιασμένο στοιχείο συμπεριφέρεται όπως μία διόδος p-n, η οποία, σε κλειστό κύκλωμα, δέχεται από τις υπόλοιπες “υγιείς” ηλιακές κυψέλες μία υψηλή ανάστροφη τάση η που οδηγεί σε ραγδαία φθορά και μείωση της απόδοσης της. Σε αρκετές περιπτώσεις, η τιμή αυτής της τάσης μπορεί να φτάσει την τιμή της τάσης διάσπασης της σκιασμένης ή ελαττωματικής κυψέλης, προκαλώντας την καταστροφή της. Στην πράξη, για τυπικά Φ/Β πλαίσια, το σκιασμένο στοιχείο λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται – υπό μορφή θερμότητας – η ενέργεια που παράγουν οι “υγιείς” κυψέλες. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως *φαινόμενο θερμής κηλίδας* (hot spot heating effect) [6-10].

Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το Φ/Β πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους παράκαμψης (bypass diodes), οι οποίες συνδέονται παράλληλα με τις κυψέλες που είναι συνδεδεμένες σε σειρά, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του Φ/Β πλαισίου, ακόμα και αν κάποια ηλιακή κυψέλη υστερεί ή αστοχεί. Το φαινόμενο του hot spot, καθώς και οι υπόλοιπες κυριότερες βλάβες που καταγράφονται στη διάρκεια ζωής ενός Φ/Β πλαισίου, θα αναλυθούν εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 3.

ο Η θερμοκρασία

Η αύξηση της θερμοκρασίας της ηλιακής κυψέλης οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού. Η αύξηση αυτή οδηγεί με τη σειρά της σε περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Κατά συνέπεια, εμφανίζεται ισχυρό ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, το οποίο συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και του FF. Παράλληλα μειώνεται και η απόδοση της ηλιακής κυψέλης.



Σχήμα 2.5. Μεταβολή της απόδοσης μιας ηλιακής κυψέλης, συναρτήσει της θερμοκρασίας της.

Η τυπική καμπύλη μεταβολής της απόδοσης μιας ηλιακής κυψέλης, συναρτήσει της θερμοκρασίας της, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Αν ο συντελεστής απόδοσης μιας ηλιακής κυψέλης σε μια δεδομένη θερμοκρασία (°C) είναι n , η τιμή του σε μια διαφορετική θερμοκρασία θ θα είναι :

$$n_{\theta} = n \cdot \sigma_{\theta} \quad (2.8)$$

όπου σ_{θ} είναι ένας αδιάστατος θερμοκρασιακός συντελεστής διόρθωσης της απόδοσης. Στη δεδομένη θερμοκρασία, ο σ_{θ} είναι ίσος με τη μονάδα, και μειώνεται κατά περίπου 0.005 ανά βαθμό αύξησης θερμοκρασίας, για τυπικές εμπορικές ηλιακές κυψέλες πυριτίου [5-7].

ο Ο άνεμος

Η ταχύτητα του ανέμου, παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας της ηλιακής κυψέλης και, συνεπώς, στη διακύμανση της απόδοσής της, όπως αυτό εξηγήθηκε προηγουμένως (Σχήμα 2.5). Συγκεκριμένα, μεγάλες ταχύτητες ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα την απαγωγή θερμότητας από το Φ/Β πλαίσιο και, συνεπώς, μειώνουν την θερμοκρασία λειτουργίας των ηλιακών κυψελών στο πλαίσιο. Ειδικότερα όταν οι άνεμοι είναι βόρειοι και είναι συνήθως ψυχροί, τα Φ/Β πλαίσια λειτουργούν σε σημαντικά χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις αντίστοιχες σε συνθήκες άπνοιας, για την ίδια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας. Το αντίθετο συμβαίνει για την περίπτωση των θερμών ανέμων [7,11].

ο Η ρύπανση

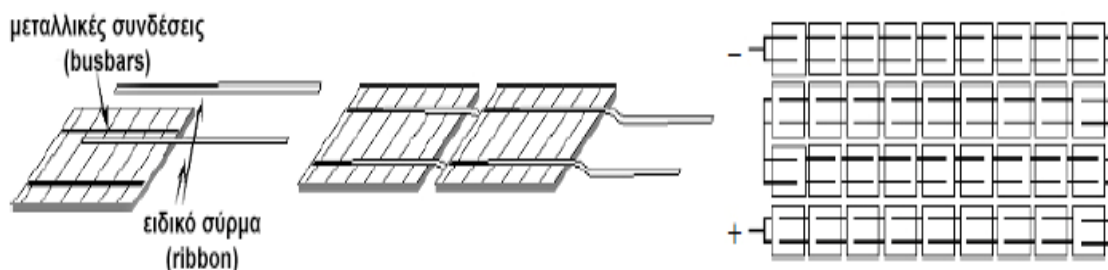
Η απόδοση και, συνακόλουθα, η ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Β πλαισίων μπορεί να μειωθεί από παράγοντες ρύπανσης της επιφάνειάς τους καθώς και από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλάτων, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Ιδιαίτερα σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές παρατηρείται σημαντικότερη επίδραση της ρύπανσης λόγω της αιθάλης και των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας τα οποία προσκολλώνται ισχυρά στην επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται περιοδικός καθαρισμός των Φ/Β πλαισίων με απορρυπαντικά προϊόντα και χρήση νερού. Σε ειδικότερες περιπτώσεις, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες επιλέγεται να τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον υπό κλίση 45° ώστε να μειώνεται το ποσοστό συγκράτησης σκόνης και σωματιδίων.

Όταν το Φ/Β πλαίσιο εγκαθίσταται σε μία περιοχή που εκτιμάται ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, θεωρείται σκόπιμο να προβλέπεται στους σχετικούς υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας σ_p , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει το ρυπασμένο πλαίσιο προς την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται όταν η επιφάνειά του είναι καθαρή. Η τιμή του σ_p είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα όσο

εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του Φ/Β πλαισίου, όσο συχνότερες είναι οι χιονοπτώσεις στην περιοχή, κλπ [7,8].

2.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου

Καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια ηλιακή κυψέλη κρυσταλλικού πυριτίου είναι ιδιαίτερα μικρή και, κατά συνέπεια, ανεπαρκής για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, επιλέγεται η διασύνδεση πολλών κυψελών, οι οποίες δημιουργούν έναν πίνακα ηλιακών κυψελών (cell matrix). Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτός ο πίνακας απαντάται ενσωματωμένος σε μια συγκεκριμένη κλειστή δομή στρωμάτων υλικών, ενσωματωμένων σε ένα ενιαίο Φ/Β πλαίσιο. Στον πίνακα, οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται εν σειρά με ειδικό σύρμα (ribbon) αλουμινίου ή χαλκού, μέσω των μεταλλικών συνδέσεων τους (busbars) στην εμπρός επιφάνεια και της συγκόλλησής τους στο πίσω αγωγίμο μέρος τους. Ένας τυπικός πίνακας ηλιακών κυψελών αποτελείται από 36 κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου, οι οποίες, εν σειρά συνδεδεμένες και υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, παράγουν μέγιστη τάση εξόδου περίπου $P_{\max}=15\text{ V}$, κατάλληλη για τη φόρτιση ενός συσσωρευτή 12 V. Βέβαια, καθώς αναπτύσσονται συνεχώς εφαρμογές διασύνδεσής Φ/Β συστημάτων σε ηλεκτρικά δίκτυα και ενσωμάτωσης Φ/Β πλαισίων σε κτίρια, επιλέγονται αντίστοιχα διαφορετικές διαμορφώσεις πινάκων κυψελών. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η εν σειρά διασύνδεση κυψελών κρυσταλλικού πυριτίου καθώς και ένας ολοκληρωμένος τυπικός πίνακας 36 ηλιακών κυψελών.



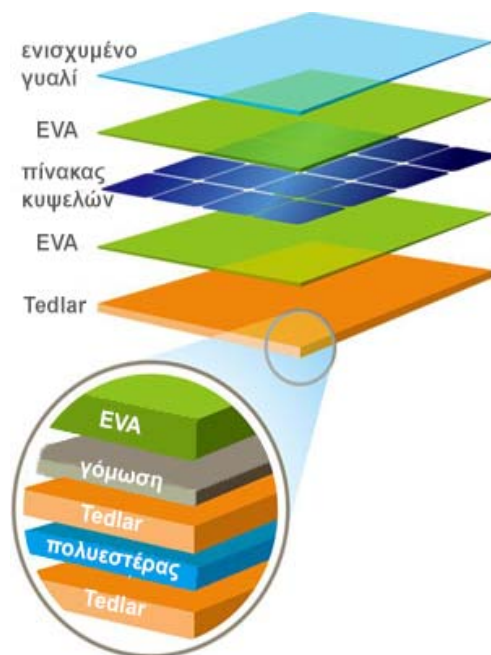
Σχήμα 2.6. Εν σειρά διασύνδεση κυψελών κρυσταλλικού πυριτίου και ολοκληρωμένος τυπικός πίνακας 36 ηλιακών κυψελών.

Μετά τη διαμόρφωση της συστοιχίας των κυψελών, ο πίνακας πρέπει να ενθυλακώνεται κατάλληλα ώστε το τελικό προϊόν (το Φ/Β πλαίσιο) να χαρακτηρίζεται από αξιόπιστη λειτουργία για μεγάλο χρονικό διάστημα, συνήθως άνω των 20 ετών. Στο στάδιο αυτό δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε συγκεκριμένους παράγοντες όπως:

- Ακαμψία στην επιβολή μηχανικών φορτίων
- Προστασία από ακραίες καιρικές συνθήκες και υγρασία

- Προστασία από κρούσεις (λ.χ. χαλαζόπτωση)
- Ηλεκτρική απομόνωση για την ανθρώπινη ασφάλεια

Στη βάση αυτών των ζητούμενων, ο μηχανολογικός σχεδιασμός ενός τυπικού Φ/Β πλαισίου κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) περιλαμβάνει τη διαμόρφωση μιας ενιαίας δομής διαφορετικών, αλληλεπικαλυπτόμενων στρωμάτων (τύπου sandwich) που ενσωματώνονται στη συνέχεια σε ειδικό πλαίσιο (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7. Τυπική δομή και αλληλουχία στρωμάτων υλικών ενός συσσωματώματος Φ/Β πλαισίου κρυσταλλικού πυριτίου [10].

Ως υπέρστρωμα, στην εμπρός όψη ενός πλαισίου χρησιμοποιείται συνήθως ενισχυμένο νατράσβεστο γυαλί (tempered soda-lime glass) με πάχος που ποικίλει από 2 έως 3 mm, το οποίο παρέχει την απαραίτητη μηχανική ακαμψία και προστασία στο πλαίσιο, επιτρέποντας παράλληλα τη διέλευση του φωτός. Το ενισχυμένο γυαλί του υπέρστρωματος επιλέγεται να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας στις ηλιακές κυψέλες. Στα σύγχρονα Φ/Β πλαίσια c-Si χρησιμοποιείται γυαλί με δημήτριο, το οποίο απορροφά σε σημαντικό ποσοστό την υπεριώδη ακτινοβολία, αυξάνοντας περεταίρω την αξιοπιστία τους [6]. Αμέσως μετά το στρώμα του ενισχυμένου γυαλιού, ο πίνακας των ηλιακών κυψελών (τυπικού πάχους 0.5 mm) επικαλύπτεται εκατέρωθεν από δύο στρώματα υλικού ενθυλάκωσης (encapsulant ή pottant material) πάχους 0.25 mm το καθένα. Έως σήμερα, το δημοφιλέστερο υλικό ενθυλάκωσης είναι το συμπολυμερές αιθυλένιο-βινυλίου οξικό άλας (ethylene-vinyl acetate, EVA), ένα είδος θερμοπλαστικού το οποίο

συντίθεται από μακρά μόρια με σκελετό ατόμων άνθρακα σε απλούς ομοιοπολικούς δεσμούς. Τέλος, το εξωτερικό στρώμα της πίσω μη φωτιζόμενης πλευράς του πλαισίου (υπόστρωμα) αποτελείται συνήθως από ένα φύλλο σύνθετου πλαστικού με την πατενταρισμένη ονομασία Tedlar® φθοριούχο πολυβινύλιο (polyvinyl fluoride, PVF), το οποίο λειτουργεί ως “φράγμα” υγρασίας και διαβρωτικών παραγόντων. Σε ορισμένες περιπτώσεις Φ/Β πλαισίων, αντί του Tedlar® στην πίσω πλευρά προτιμάται ένα δεύτερο φύλλο ενισχυμένου γυαλιού, όμοιο με αυτό του υπέρστρωματος, το οποίο αυξάνει την προστασία του πλαισίου [6].

2.3.1 Ηλεκτρικά και θερμικά χαρακτηριστικά

Στην πλειοψηφία των Φ/Β πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου, όπου οι ηλιακές κυψέλες είναι εν σειρά συνδεδεμένες, η τάση εξόδου του πλαισίου (V_{out-M}) είναι ίση με το γινόμενο της τάσης εξόδου της μίας ηλιακής κυψέλης (V_{out-C}) επί το πλήθος N των συνολικών συνδεδεμένων κυψελών στο πλαίσιο. Το δε ρεύμα εξόδου του πλαισίου I_{out-M} ταυτίζεται με το ρεύμα εξόδου της μίας ηλιακής κυψέλης I_{out-C} (Σχέσεις 2.9-2.10) [6]. Στην περίπτωση ύπαρξης κυψελών με ανόμοια χαρακτηριστικά (π.χ. λόγω κάποιου ελαττώματος), τότε το ρεύμα I_{out-M} καθορίζεται από την κυψέλη με το ελάχιστο ρεύμα I_{out-C} .

$$V_{out-M} = N \cdot V_{out-C} \quad (2.9)$$

$$I_{out-M} = I_{out-C} \quad (2.10)$$

Από την άλλη πλευρά, για ηλιακές κυψέλες σε παράλληλη συνδεσμολογία στο Φ/Β πλαίσιο, ισχύουν – κατ’ αντιστοιχία – οι ακόλουθες σχέσεις [6]:

$$V_{out-M} = V_{out-C} \quad (2.11)$$

$$I_{out-M} = N \cdot I_{out-C} \quad (2.12)$$

Όπως ακριβώς μια ηλιακή κυψέλη, έτσι και κάθε Φ/Β πλαίσιο φέρει συγκεκριμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, όπως το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοιχτοκύκλωσης και η μέγιστη συνολική ισχύς εξόδου, η οποία αντιστοιχεί στις μέγιστες τιμές ρεύματος και τάσης εξόδου. Τα χαρακτηριστικά αυτά προκύπτουν από την αντίστοιχη καμπύλη I-V του Φ/Β πλαισίου η οποία προσδιορίζεται σε STC: θερμοκρασία κυψελών $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας $G_T = 1000\text{ W/m}^2$, και μάζα αέρα (φασματική κατανομή) $AM=1.5$. Η μέγιστη ισχύς εξόδου ενός Φ/Β πλαισίου σε STC, καλείται και ισχύς αιχμής (peak power) και δίνεται σε W_p .

Βέβαια, οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, στο πεδίο, διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες STC, καθώς παρατηρούνται έντονες διαφοροποιήσεις και διακυμάνσεις, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την ηλεκτρική απόδοση του πλαισίου, προκαλώντας συγκεκριμένες απώλειες σε σχέση με τη βέλτιστη τιμή της σε STC. Οι απώλειες αυτές σχετίζονται κυρίως με την γωνιακή κατανομή και το φασματικό περιεχόμενο του ηλιακού φωτός, την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία λειτουργίας των ηλιακών κυψελών. Αναμφίβολα, η γνώση και η πρόγνωση της αναμενόμενης απόκρισης ενός Φ/Β πλαισίου υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας κρίνεται απαραίτητη για τη σωστή και ακριβή αποτίμηση της ετήσιας ηλεκτροπαραγωγής ενός Φ/Β συστήματος στο πεδίο. Η επίδραση της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας στην απόδοση της ηλιακής κυψέλης υπόκειται σε συγκεκριμένους, καλά γνωστούς φυσικούς μηχανισμούς. Θεωρητικά, η γνώση αυτών θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στην ανάπτυξη αντίστοιχων φυσικών μοντέλων λειτουργίας ενός Φ/Β πλαισίου. Ωστόσο, η υιοθέτηση τέτοιων μοντέλων κρίνεται πρακτικά αδύνατη, σε πραγματικές συνθήκες πεδίου [6].

Αντί των φυσικών μοντέλων, προτιμάται η εφαρμογή συγκεκριμένων, ιδιαίτερα απλών μεθόδων “ερμηνείας” της διακύμανσης της απόδοσης και της χαρακτηριστικής I-V, υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Προς αυτή την κατεύθυνση, έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένες προτυποποιημένες μεθοδολογίες που εφαρμόζονται σε τεχνολογίες Φ/Β πλαισίων. Αυτές οι μεθοδολογίες θεωρούνται εφαρμόσιμες σε ένα περιορισμένο εύρος συνθηκών θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες ωστόσο προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πραγματικές συνθήκες που συναντώνται και στις δοκιμές των Φ/Β πλαισίων και απαιτούν έναν μικρό αριθμό εύκολα υπολογίσιμων παραμέτρων, όπως:

- Η **σταθερή κατάσταση ισορροπίας ισχύος**, η οποία – ανά πάσα στιγμή – καθορίζει την αναμενόμενη θερμοκρασία T_c της κυψέλης. Ως είσοδος (input), κατά τον υπολογισμό αυτής της παραμέτρου χρησιμοποιείται η απορροφούμενη ισχύς φωτεινότητας, μέρος της οποίας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, με το υπόλοιπο να διαχέεται στο περιβάλλον. Μια κοινή απλοποιητική παραδοχή που ακολουθείται, ορίζει ότι η θερμοκρασία κυψέλης και περιβάλλοντος είναι γραμμική συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συντελεστής που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό εξαρτάται από το είδος της εγκατάστασης του Φ/Β πλαισίου, την ταχύτητα ανέμου, την περιβάλλουσα υγρασία, κ.ο.κ. Ουσιαστικά, αυτές οι πληροφορίες “περιέχονται” στην *Θερμοκρασία Ονομαστικής Λειτουργίας Κυψέλης* (Nominal Operating Cell Temperature, NOCT), η οποία ορίζεται ως η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $T_a = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι $G_T = 800\text{ W/m}^2$ και η ταχύτητα του ανέμου είναι $V_f = 1\text{ m/s}$. Τυπικές τιμές της NOCT υπολογίζονται

κοντά στους 45 °C. Για διαφορετικές τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, η αναμενόμενη θερμοκρασία μιας ηλιακής κυψέλης μπορεί να δοθεί από τη Σχέση 2.13 [6].

$$T_c = T_a + G_T \cdot \frac{(NOCT - 20 \text{ }^\circ\text{C})}{800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} \quad (2.13)$$

- Το **ρεύμα βραχυκύκλωσης του Φ/Β πλαισίου** I_{SC-M} , το οποίο θεωρείται αυστηρώς ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης θεωρείται ότι αυξάνεται ελάχιστα με την αύξηση της θερμοκρασίας κυψέλης. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής α δίνει τη σχετική αύξηση του I_{SC-M} ανά βαθμό Κελσίου. Συνδυάζοντας τις δύο αυτές παραδοχές, το ρεύμα βραχυκύκλωσης του Φ/Β πλαισίου, για αυθαίρετη τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας κυψέλης, υπολογίζεται από τη Σχέση 2.14. Για ηλιακές κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου, τυπικές τιμές του θερμοκρασιακού συντελεστή α κυμαίνονται στο 0.4% ανά βαθμό Κελσίου [6].

$$I_{SC-M}(T_c, G_T) = I_{SC-M}(STC) \cdot \frac{G}{1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_{cell} - 25 \text{ }^\circ\text{C})] \quad (2.14)$$

- Η **τάση ανοιχτοκύκλωσης του Φ/Β πλαισίου** V_{OC-M} , η οποία εμφανίζει ισχυρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία, μειούμενη γραμμικά σε σχέση με αυτήν. Η γνώση ενός θερμοκρασιακού συντελεστή β επιτρέπει τον προσδιορισμό της V_{OC-M} , για αυθαίρετη τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας κυψέλης, σύμφωνα με τη Σχέση 2.15. Εδώ, η εξάρτηση από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας “κρύβεται” πίσω από την παράμετρο T_c . Τυπικές τιμές του θερμοκρασιακού συντελεστή β κυμαίνονται στα 2 mV/°C ανά εν σειρά συνδεδεμένη κυψέλη [6].

$$V_{OC-M}(T_c, G_T) = V_{OC-M}(STC) - \beta \cdot (T_c - 25 \text{ }^\circ\text{C}) \quad (2.15)$$

- Η **μέγιστη ισχύς εξόδου** και, συνακόλουθα, η **απόδοση του Φ/Β πλαισίου** n_M επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων συναρτήσει της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας κυψέλης. Η παράμετρος γ ορίζεται ως η σχετική μείωση της απόδοσης του Φ/Β πλαισίου ανά βαθμό Κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας κυψέλης και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της n_M , για αυθαίρετη τιμή έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας κυψέλης, σύμφωνα με τη Σχέση 2.16. Συνήθεις τιμές της γ κυμαίνονται κοντά στο 0.5% ανά βαθμό Κελσίου [6].

$$n_M(T_c, G_T) = n_M(STC) \cdot [1 - \gamma \cdot (T_c - 25 \text{ }^\circ\text{C})] \quad (2.16)$$

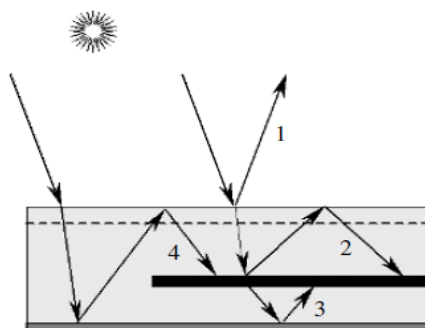
2.3.2 Οπτικές ιδιότητες

Η διαδικασία της ενθυλάκωσης του πίνακα ηλιακών κυψελών, κατά την κατασκευή ενός Φ/Β πλαισίου, επηρεάζει σημαντικά τις οπτικές ιδιότητες του. Μετά την ολοκλήρωση της ενθυλάκωσης, αυτές οι ιδιότητες πρέπει να βελτιστοποιούνται με γνώμονα το τελικό κόστος και την απόδοση του Φ/Β πλαισίου. Κατά συνέπεια, επιβάλλεται να λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένες “παρενέργειες” της ενθυλάκωσης στις οπτικές ιδιότητες των κυψελών, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι οι ακόλουθες [6]:

- Οι δείκτες διάθλασης του ενισχυμένου γυαλιού και του EVA συμπίπτουν, κατά προσέγγιση, λαμβάνοντας τιμή κοντά στο 1.5, μεταξύ της αντίστοιχης τιμής για τον αέρα και για το πυρίτιο (Si). Σε αυτή την περίπτωση, η ενθυλάκωση “δρα” ως ένα παχύ αντανakλαστικό (antireflective, AR) στρώμα. Σε ηλιακές κυψέλες c-Si με καλή ποιότητα επιφάνειας, αυτή η αντανakλαστική ιδιότητα θεωρείται ικανοποιητική κατά την λειτουργία του τελικού Φ/Β πλαισίου, χωρίς να απαιτείται η χρήση επιπλέον αντανakλαστικής επικάλυψης (antireflective coating, ARC).
- Στην περίπτωση ανάγκης εφαρμογής ενός στρώματος ARC, κατά τον σχεδιασμό του πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι η κυψέλη φωτίζεται μέσω ενός συγκεκριμένου δείκτη διάθλασης, ο οποίος για το ARC είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο του αέρα.
- Τα στρώματα του γυαλιού και του EVA απορροφούν ορισμένη ποσότητα φωτός, στο εύρος των μικρών μηκών κύματος (<500 nm).
- Τυπικά, αντανakλαση της τάξεως του 4% επέρχεται στην διαχωριστική επιφάνεια αέρα-γυαλιού. Στιλπνότερες επιφάνειες και επιστρώσεις ARC μπορούν να περιορίσουν σημαντικά τη συγκεκριμένη απώλεια.
- Με κατάλληλη διαμόρφωση της επιφάνειας των κυψελών (σε μορφή μικροσκοπικών κεκλιμένων “πυραμίδων”) το φως που ανακλάται από τις μεταλλικές επαφές και την επιφάνεια των κυψελών δύναται να ανακτηθεί μερικώς με νέα ανάκλαση/επιστροφή στην εσωτερική διαχωριστική επιφάνεια.
- Αν και η ικανότητα της κυψέλης να “παγιδεύει” το φως φαίνεται να περιορίζεται με τη ενθυλάκωση (λόγω διαφοράς στο δείκτη διάθλασης), σημαντικό μέρος της διαφεύγουσας ακτινοβολίας “παγιδεύεται” στο υπέρστρωμα του γυαλιού, με αποτέλεσμα η τελική απορροφητική ικανότητα του συνολικού συστήματος μένει σχεδόν ανεπηρέαστη.

- Για ηλιακές κυψέλες που δεν φέρουν στο πίσω μέρος τους μεταλλική κατοπτρική επιφάνεια, η ποσότητα του φωτός που μεταφέρεται μέσω των κυψελών μπορεί να ανακτηθεί με την τοποθέτηση ενώ ξεχωριστού ανακλαστήρα στο πίσω κάλυμμα του Φ/Β πλαισίου. Ο ίδιος σκοπός εξυπηρετείται ήδη εφόσον ως πίσω κάλυμμα έχει επιλεγθεί λευκό πλαστικό τύπου Tedlar®.
- Το ίδιο λευκό πλαστικό πίσω κάλυμμα, τύπου Tedlar®, δεδομένου ότι αντανάκλα μέσω διάχυσης, επιτρέπει την απορρόφηση μέρους του φωτός που προσπίπτει στην επιφάνεια μεταξύ των ηλιακών κυψελών.

Τα συνολικά οπτικά φαινόμενα που εμφανίζονται σε μία ολοκληρωμένη πολυστρωματική δομή Φ/Β πλαισίου, κατόπιν της διαδικασίας ενθυλάκωσης, συνοψίζονται στο Σχήμα 2.8 [6].



Σχήμα 2.8. Οπτικές επιδράσεις της ενθυλάκωσης στο Φ/Β πλαίσιο: **1.** αντανάκλαση του γυαλιού, **2.** “παγίδευση” της ανακλώμενης από τις κυψέλες ακτινοβολίας, **3.** “παγίδευση” της μεταφερόμενης μέσω των κυψελών ακτινοβολίας, **4.** συλλογή και απορρόφηση υπόλοιπης, προσπίπτουσας στην επιφάνεια μεταξύ των κυψελών, ακτινοβολίας.

2.3.3 Απόδοση στο πεδίο

Η μεγάλη διάρκεια ζωής προβάλλεται ως ένα από τα κυριότερα προτερήματα των Φ/Β πλαισίων. Σήμερα μάλιστα, η πλειοψηφία των κατασκευαστών Φ/Β πλαισίων παρέχει εγγύηση διάρκειας άνω των 20 χρόνων, ενώ η επίτευξη των 30 χρόνων διάρκειας ζωής αποτελεί τον επόμενο, βραχυπρόθεσμο στόχο. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι, για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, το Φ/Β πλαίσιο αναμένεται να συνεχίσει την λειτουργία του, παρέχοντας δηλαδή ηλεκτρική ισχύ, με απόδοση παρόμοια με την αντίστοιχη αρχική και χωρίς φθορά ή υποβάθμιση η οποία να διακινδυνεύει την ασφάλεια ή την οπτική εμφάνιση του εξοπλισμού [6].

Κατά κανόνα, δύο παράγοντες καθορίζουν αυτήν την διάρκεια ζωής: i) η αξιοπιστία (reliability), η οποία σχετίζεται με την πρόωρη αστοχία του εξοπλισμού και ii) η αντοχή (durability), η οποία αναφέρεται στην βαθμιαία υποβάθμιση και φθορά που οδηγούν τελικά στην μείωση της ηλεκτροπαραγωγής σε μη αποδεκτά επίπεδα. Η σχέση κόστους-

αποτελεσματικότητας (cost-effectiveness), το ισοζύγιο απόσβεσης ενέργειας (energy payback balance) και η δημόσια αποδοχή (public acceptance) της παραγόμενης από το Φ/Β σύστημα ενέργειας, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αξιοπιστία και τη μεγάλη διάρκεια ζωής των Φ/Β πλαισίων.

Παγκοσμίως, πολυάριθμα Φ/Β συστήματα λειτουργούν ήδη για περισσότερο από 20 χρόνια, γεγονός που επιτρέπει τόσο στην επιστημονική όσο και στην κατασκευαστική κοινότητα να συλλέξει πολύτιμα δεδομένα σχετικά με τους κυριότερους μηχανισμούς φθοράς και υποβάθμισης της απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου. Τα Φ/Β πλαίσια τα οποία εγκαθίστανται και λειτουργούν στο πεδίο, υποβάλλονται σε στατικά και δυναμικά μηχανικά φορτία, ημερήσιους και εποχιακούς θερμικούς κύκλους, έκθεση σε ακτινοβολία, υγρασία, κρούσεις (όπως η χαλαζόπτωση), επικάλυψη και συσσώρευση ακαθαρσιών, μερική σκίαση, κ.α. Έτσι λοιπόν, αρκετοί κοινοί τύποι φθοράς και αστοχίας σχετίζονται με τη συνδυασμένη επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων και των πιθανών κατασκευαστικών ελλείψεων. Επιπλέον αυτών, παρακολουθείται και η – εξαρτώμενη από την τοποθεσία εγκατάστασης – σταθερή υποβάθμιση της ισχύος εξόδου του Φ/Β πλαισίου, στην περίπτωση της οποίας το ρεύμα βραχυκύκλωσης και ο συντελεστής πλήρωσης είναι οι παράμετροι που πλήττονται περισσότερο. Σε αρκετές περιπτώσεις, αυτή η υποβάθμιση αποδείχθηκε ότι σχετίζεται με την αντίστοιχη υποβάθμιση των στρωμάτων ενθυλάκωσης EVA του Φ/Β πλαισίου. Εκτεταμένη αναφορά στους κυριότερους μηχανισμούς φθοράς και βλαβών και στην επίδραση τους στην απόδοση των Φ/Β πλαισίων c-Si στο πεδίο, γίνεται στο Κεφάλαιο 3.

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Η μοντελοποίηση της λειτουργίας σύνθετων συστημάτων αποτελούσε ανέκαθεν μια ιδιαίτερη πολύπλοκη διαδικασία και, ταυτόχρονα, πρόκληση για κάθε Επιστήμονα. Μάλιστα, με την χαρακτηριστική φράση “*All models are wrong; some models are useful.*” (George E.P. Box, 1979) υποδηλώνεται εύστοχα ότι, αν και θεωρείται ουσιαστικά δεδομένη η αδυναμία ολοκληρωμένης και ακριβούς μοντελοποίησης της λειτουργίας ενός συστήματος, η υλοποίηση συγκεκριμένων προσεγγιστικών μοντέλων αυτού, δύναται να παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα.

Όπως έγινε αντιληπτό στις προηγούμενες ενότητες, τα παραγόμενα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός Φ/Β πλαισίου – δηλαδή το ρεύμα και η ισχύς εξόδου – εξαρτώνται άμεσα τόσο από την ηλιακή ακτινοβολία, όσο και από τη θερμοκρασία των ηλιακών κυψελών. Κατά συνέπεια, για τον σχεδιασμό, την παρακολούθηση και την αποτίμηση της απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου, απαιτείται η ανάπτυξη ενός ικανοποιητικά ακριβούς μοντέλου, κατάλληλης πολυπλοκότητας, το οποίο θα πρέπει να είναι σε θέση να δίνει αξιόπιστη “πρόβλεψη” των χαρακτηριστικών I-V και P-V εξόδου, υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στη βιβλιογραφία,

έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα που βασίζονται τόσο στα ηλεκτρικά, όσο και στα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου, και τα οποία αποτελούν τη βάση υλοποίησης αντίστοιχων μοντέλων προσομοίωσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή [12-21].

3.1 Το ηλεκτρικό μοντέλο

Όπως αναλύθηκε στην Υποενότητα 2.2, από ηλεκτρικής άποψης, το ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β πλαισίου είναι το αποτέλεσμα της διασύνδεσης ενός συνόλου ηλιακών κυψελών, είτε εν σειρά ή παράλληλα, με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή. Συνεπώς ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός ηλεκτρικού μοντέλου Φ/Β πλαισίου, μπορούν ουσιαστικά να αναχθούν στην αντίστοιχη μελέτη διαφόρων εκδοχών του ηλεκτρικού μοντέλου μιας ηλιακής κυψέλης.

ο Περίπτωση 1: Η ιδανική κυψέλη (Μοντέλο μίας διόδου)

Όπως παρουσιάστηκε στην Υποενότητα 2.1, η ιδανική κυψέλη μπορεί, θεωρητικά, να μοντελοποιηθεί ως μια πηγή ρεύματος σε αντι-παράλληλη σύνδεση με μία δίοδο (Σχήμα 2.2, σελίδα 54). Σε αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα, κατά τη λειτουργία του Φ/Β πλαισίου (και συνεπώς της κάθε κυψέλης) χωρίς φορτίο, η τιμή του I_{ph} είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του I_0 και η Σχέση 2.2, μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$V_{OC} = \frac{AkT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (2.17)$$

Η Σχέση 2.17 δίνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ιδανικής κυψέλης, σε συνάρτηση με το φωτόρευμα. Από την άλλη πλευρά, σε συνθήκες βραχυκύκλωσης των άκρων της κυψέλης ($V_L = 0$), το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC} ταυτίζεται με το φωτόρευμα I_{ph} .

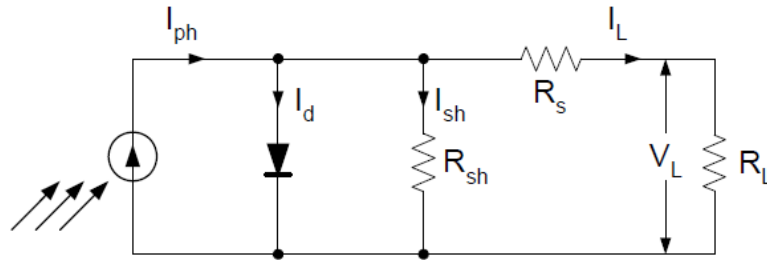
Κατά τη λειτουργία του Φ/Β πλαισίου υπό φορτίο, το ρεύμα φορτίου I_L υπολογίζεται από τη Σχέση 2.18. Κατά τη λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V, η βέλτιστη (μέγιστη) τάση V_{max} δίνεται από τη λύση της εξίσωσης που περιγράφεται από τη Σχέση 2.19 [5-7,12].

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(q \cdot \frac{I_L \cdot R_L}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (2.18)$$

$$\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 = \left(1 + \frac{qV_{max}}{AkT}\right) \cdot \exp\left(\frac{qV_{max}}{AkT}\right) \quad (2.19)$$

ο Περίπτωση 2: Μοντέλο μίας διόδου και δύο αντιστάσεων

Η μοντελοποίηση του Φ/Β πλαισίου με βάση το μοντέλο της ιδανικής ηλιακής κυψέλης είναι μεν εύκολα και γρήγορα υλοποιήσιμη, υστερεί ωστόσο – σε σημαντικό βαθμό, όπως είναι φυσικό – σε ακρίβεια. Ένα βελτιωμένο μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος ηλιακής κυψέλης πρέπει, λοιπόν, να συμπεριλάβει την επίδραση των απωλειών των αντιστάσεων R_s (σειράς) και R_{sh} (διακλάδωσης) στην πραγματική ηλεκτρική συμπεριφορά ενός Φ/Β πλαισίου [5-7,12]. Το βελτιωμένο ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει, με την προσθήκη αυτών των αντιστάσεων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9. Η αντίσταση σειράς παρεμβάλλεται στην κίνηση των φορέων φορτίου μέσα στον ημιαγωγό και λαμβάνει συνήθεις τιμές από 1 έως 20 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, ενώ η αντίσταση διακλάδωσης εκφράζει τις απώλειες από τις διαρροές ρεύματος, που εμφανίζονται λόγω κατασκευαστικών ελαττωμάτων, και λαμβάνει τιμές από 20 μέχρι και 1000 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.



Σχήμα 2.9. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ηλιακής κυψέλης μίας διόδου και δύο αντιστάσεων.

Οι αντιστάσεις R_s και R_{sh} μειώνουν σημαντικά την απόδοση της ηλιακής κυψέλης καθώς επηρεάζουν τόσο την τάση V_L όσο και το ρεύμα I_L . Στην περίπτωση αυτού του μοντέλου, το ρεύμα I_L υπολογίζεται από την Σχέση 2.20. Στη συγκεκριμένη εξίσωση, η οποία είναι μη γραμμική, οι παράμετροι I_{ph} , A , R_s και R_{sh} εξαρτώνται από τις κατασκευαστικές ανοχές και εμφανίζουν διακυμάνσεις ανάλογες της θερμοκρασίας.

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_L + I_L \cdot R_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_L + I_L \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.20)$$

Από τη Σχέση 2.20, και για λειτουργία Φ/Β πλαισίου χωρίς φορτίο (όπου $V_L = V_{OC}$ και $I_L = 0$), προκύπτει η Σχέση 2.21, ενώ από την ίδια σχέση, και για συνθήκες βραχυκύκλωσης (όπου $V_L = 0$ και $I_{SC} = I_{ph}$), προκύπτει η Σχέση 2.22.

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{OC}}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{OC}}{R_{sh}} \quad (2.21)$$

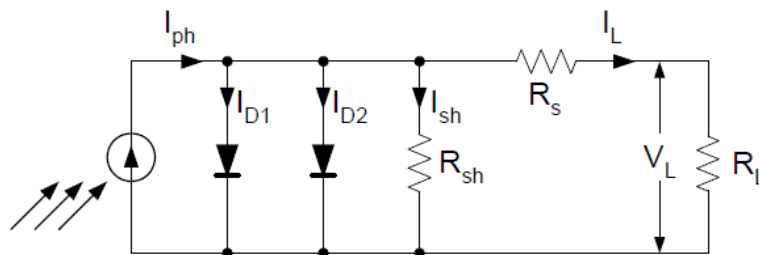
$$I_{SC} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \cdot \frac{I_{SC} \cdot R_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{SC} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.22)$$

Τέλος, για λειτουργία του συγκεκριμένου ηλεκτρικού μοντέλου στο σημείο μέγιστης ισχύος της χαρακτηριστικής I-V, όπου $V_L = V_{max}$, το αναμενόμενο μέγιστο ρεύμα εξόδου προσδιορίζεται από τη λύση της εξίσωσης που περιγράφεται από τη Σχέση 2.23.

$$I_L = I_{max} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{max} + I_{max} \cdot R_s}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{max} + I_{max} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.23)$$

ο Περίπτωση 3: Μοντέλο δύο διόδων και δύο αντιστάσεων

Για εφαρμογές προσομοίωσης και ελέγχου Φ/Β πλαισίων όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια, τα ηλεκτρικά μοντέλα μια διόδου αντικαθίστανται από αντίστοιχα μοντέλα δύο ή τριών διόδων [5-7,12]. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας ηλιακής κυψέλης, με βάση το μοντέλο δύο διόδων και δύο αντιστάσεων. Κατά τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση, χρησιμοποιούνται – όπως και στην Περίπτωση 2 – οι αντιστάσεις R_s και R_{sh} , μια δίοδος D1 η οποία συνήθως θεωρείται ιδανική, με συντελεστή κατασκευής $A_1=1$, ρεύμα κόρου I_{S1} (λόγω διάχυσης) και ρεύμα σκότους $I_{D1} = I_{S1} \cdot \exp \left(q \cdot \frac{V_D}{A_1 kT} \right)$ και επιπλέον μία δίοδος D2 η οποία θεωρείται μη ιδανική, με συντελεστή $A_2 \neq 1$, ρεύμα κόρου I_{S2} (λόγω επανασύνδεσης) και ρεύμα σκότους $I_{D2} = I_{S2} \cdot \exp \left(q \cdot \frac{V_D}{A_2 kT} \right)$.



Σχήμα 2.10. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ηλιακής κυψέλης δύο διόδων και δύο αντιστάσεων.

Το ρεύμα εξόδου I_L της κυψέλης (και συνεπώς του Φ/Β πλαισίου, για σύνδεση εν σειρά), με βάση το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα, δίνεται από τη Σχέση 2.24.

$$I_L = I_{ph} - I_{S1} \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_L + I_L \cdot R_s}{A_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_L + I_L \cdot R_s}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{V_L + I_L \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.24)$$

Από τη Σχέση 2.24, και για λειτουργία Φ/Β πλαισίου χωρίς φορτίο (όπου $V_L = V_{OC}$ και $I_L = 0$), προκύπτει η Σχέση 2.25, ενώ από την ίδια σχέση, και για συνθήκες βραχυκύκλωσης (όπου $V_L = 0$ και $I_{SC} = I_{ph}$), προκύπτει η Σχέση 2.26.

$$0 = I_{ph} - I_{S1} \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{OC}}{A_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{OC}}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{OC}}{R_{sh}} \quad (2.25)$$

$$I_{SC} = I_{ph} - I_{S1} \left[\exp \left(q \cdot \frac{I_{SC} \cdot R_s}{A_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp \left(q \cdot \frac{I_{SC} \cdot R_s}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{I_{SC} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.26)$$

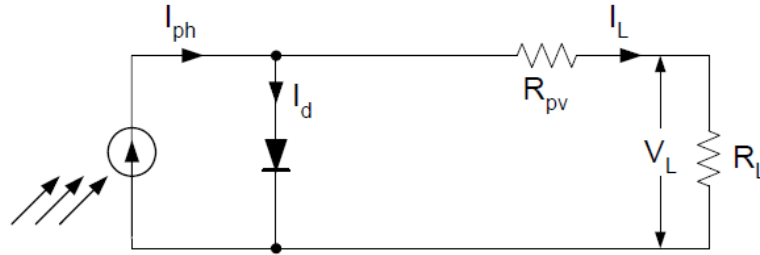
Τέλος, για λειτουργία του συγκεκριμένου ηλεκτρικού μοντέλου στο σημείο μέγιστης ισχύος της χαρακτηριστικής I-V, όπου $V_L = V_{max}$, το αναμενόμενο μέγιστο ρεύμα εξόδου προσδιορίζεται από τη λύση της εξίσωσης που περιγράφεται από τη Σχέση 2.27.

$$I_{max} = I_{ph} - I_{S1} \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{max} + I_{max} \cdot R_s}{A_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{max} + I_{max} \cdot R_s}{A_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{max} + I_{max} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.27)$$

Αντίστοιχη ανάλυση, ακολουθείται και στην “επέκταση” του συγκεκριμένου μοντέλου, στην οποία χρησιμοποιείται και ένας τρίτος παράλληλος κλάδος μιας διόδου D3. Η συγκεκριμένη παραλλαγή των τριών διόδων και των δύο αντιστάσεων χρησιμοποιείται για ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια.

ο Περίπτωση 4: Μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων

Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας ηλιακής κυψέλης, με βάση το μοντέλο των τεσσάρων παραμέτρων [5-7,12]. Το συγκεκριμένο μοντέλο εμφανίζει την μεγαλύτερη ακρίβεια και καθίσταται ιδανικό για εφαρμογές προσομοίωσης όπου απαιτούνται αξιόπιστες προβλέψεις της διακύμανσης της ηλεκτρικής συμπεριφοράς και των κύριων ηλεκτρικών μεγεθών ενός Φ/Β πλαισίου, κατά τη επίδραση εξωτερικών παραγόντων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.11, στο ισοδύναμο κύκλωμα περιλαμβάνεται ένας απλός, παράλληλος κλάδος διόδου και μια εν σειρά αντίσταση R_{PV} , ως συνδυασμός των R_s και R_{sh} , η οποία δεν συνιστά ωμική αντίσταση, αφού παίρνει είτε θετικές, είτε αρνητικές τιμές.



Σχήμα 2.11. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ηλιακής κυψέλης μοντέλου τεσσάρων παραμέτρων.

Για την περιγραφή αυτού του μοντέλου απαιτείται ο υπολογισμός τεσσάρων παραμέτρων του κυκλώματος, οι οποίες είναι η αντίσταση R_{pv} , η θερμοκρασία T , το ρεύμα κορεσμού I_0 και το φωτόρευμα I_{ph} . Η αντίσταση R_{pv} υπολογίζεται από την Σχέση 2.28.

$$R_{pv} = -M \cdot \frac{I_{sc}}{I_{max}} + \frac{V_{max}}{I_{max}} \cdot \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{max}}\right) \quad (2.28)$$

όπου ο συντελεστής M δηλώνει την κλίση $\frac{dV}{dI}$ η οποία καλείται διαφορική αντίσταση και προσδιορίζεται είτε γραφικά, με βάση την χαρακτηριστική καμπύλη I-V της ηλιακής κυψέλης, είτε υπολογιστικά, από τη εμπειρική Σχέση 2.29.

$$M = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \cdot \left(-5.411 \cdot \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} + 6.450 \cdot \frac{V_{max}}{V_{oc}} + 3.417 \cdot \frac{I_{max}}{I_{sc}} - 4.422 \right) \quad (2.29)$$

Στην περίπτωση αυτού του μοντέλου, το ρεύμα εξόδου I_L υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης της Σχέσης 2.30. Στη συγκεκριμένη μη γραμμική εξίσωση, οι παράμετροι I_{ph} , R_{pv} και A εξαρτώνται από τις κατασκευαστικές ανοχές της κυψέλης. Από τη Σχέση 2.30, για λειτουργία Φ/Β πλαισίου χωρίς φορτίο (όπου $V_L = V_{oc}$ και $I_L = 0$), προκύπτει η Σχέση 2.31.

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_L + I_L \cdot R_{pv}}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (2.30)$$

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{oc}}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (2.31)$$

Αντίστοιχα, για συνθήκες βραχυκύκλωσης (όπου $V_L = 0$ και $I_{SC} = I_{ph}$), προκύπτει η Σχέση 2.32.

$$I_{SC} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \cdot \frac{I_{SC} \cdot R_{PV}}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (2.32)$$

Τέλος, για λειτουργία του συγκεκριμένου ηλεκτρικού μοντέλου στο σημείο μέγιστης ισχύος της χαρακτηριστικής I-V, όπου $V_L = V_{max}$, το αναμενόμενο μέγιστο ρεύμα εξόδου προσδιορίζεται από τη λύση της εξίσωσης που περιγράφεται από τη Σχέση 2.33.

$$I_{max} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{max} + I_{max} \cdot R_{PV}}{AkT} \right) - 1 \right] \quad (2.33)$$

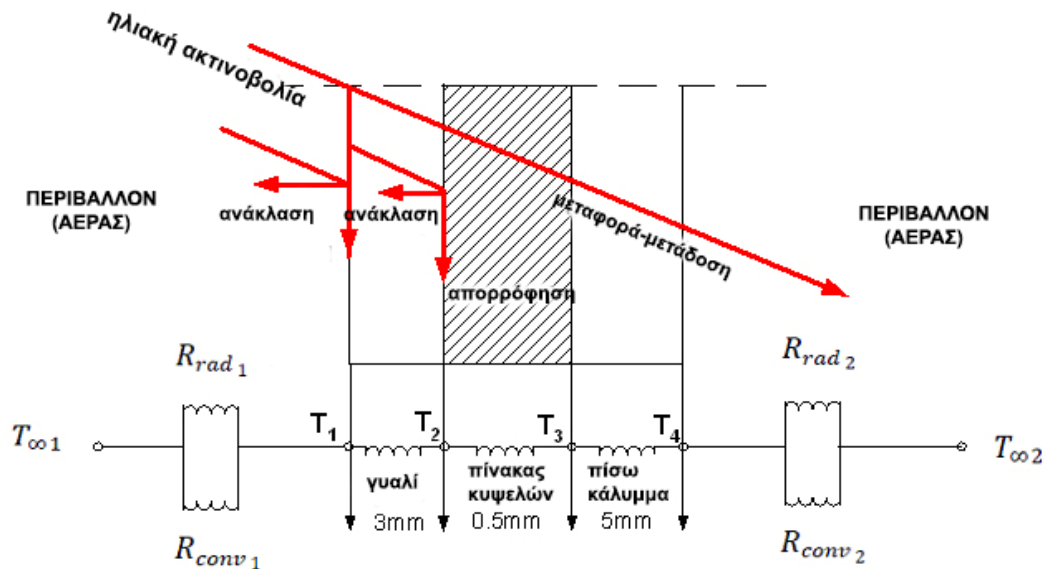
3.2 Το θερμοδυναμικό μοντέλο

Εκτός από την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός Φ/Β πλαισίου λόγω της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του παίζει και η αναπτυσσόμενη θερμότητα. Καθώς λοιπόν το Φ/Β πλαίσιο συνιστά μια εν γένει ενεργειακή εφαρμογή, γίνεται αντιληπτό ότι η λειτουργία του σχετίζεται άμεσα με την μεταφορά θερμότητας και, κατά συνέπεια, η μελέτη της απόδοσής του, κατά την λειτουργία του, μπορεί να εξετασθεί από ενεργειακή/θερμοδυναμική σκοπιά [15,16].

Οι δύο βασικές συνιστώσες που συνεισφέρουν στην ενεργειακή απόδοση του Φ/Β πλαισίου είναι η ηλεκτρική και η θερμική ενέργεια. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από μια ηλιακή κυψέλη, ως αποτέλεσμα του Φ/Β φαινομένου, σχετίζεται με ένα μικρό μέρος (<25%) της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Αντίθετα το μεγαλύτερο ποσοστό (>75%) της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα Φ/Β πλαίσιο, είτε συσσωρεύεται σε αυτό ως θερμότητα (και, συνακόλουθα, εμφανίζεται ως αύξηση της θερμοκρασίας του πλαισίου και των κυψελών), είτε διαφεύγει στο περιβάλλον. Μάλιστα, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι οι δύο αυτές συνιστώσες, της ηλεκτρικής και της θερμικής ενέργειας, δρουν “ανταγωνιστικά”. Ενώ η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε χρήσιμες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής από Φ/Β συστήματα, η προκύπτουσα θερμότητα είτε “χάνεται” στο περιβάλλον ανεκμετάλλευτη, είτε χρησιμοποιείται σε εφαρμογές Φ/Β-θερμικών και ηλιακών-θερμικών συστημάτων (Combi) [10].

Η δομή ενός Φ/Β πλαισίου, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην Υποενότητα 2.3, μπορεί να μοντελοποιηθεί και, αντίστοιχα, να αναλυθεί ως ένα πολυστρωματικό θερμοδυναμικό τοίχωμα, τυπικά αποτελούμενο από ένα στρώμα γυαλιού (συνήθως πάχους 3 mm), δύο πολύ λεπτά στρώματα EVA (0.25 mm έκαστο), τον πίνακα ηλιακών κυψελών c-Si (0.5 mm) και το πίσω κάλυμμα (Tedlar® ή γυαλί, συνήθως 5 mm). Αν τα δύο στρώματα EVA θεωρηθούν αμελητέα,

λόγω μικρής επιφάνειας (πάχους) επαφής, το προσεγγιστικό θερμοδυναμικό μοντέλο ενός Φ/Β πλαισίου συνίσταται από τρία κύρια στρώματα: το στρώμα γυαλιού, τον πίνακα κυψελών και το πίσω κάλυμμα (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12. Το Φ/Β πλαίσιο ως θερμοδυναμικό μοντέλο [10].

Κατά κανόνα, για τη μεταφορά θερμότητας από την εμπρός προς την πίσω επιφάνεια ενός Φ/Β πλαισίου, δύο μηχανισμοί εμφανίζουν τον σημαντικότερο ρόλο: η διάχυση και η ακτινοβολία. Στο Σχήμα 2.12 ως T συμβολίζονται οι επιμέρους θερμοκρασίες στις επιφάνειες των στρωμάτων, R_{rad} είναι η αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, και R_{conv} η αντίσταση στη διάχυση. Για μονοδιάστατη ροή θερμότητας (κάθετα στην επιφάνεια των στρωμάτων), ομοιόμορφη θερμοκρασία γυαλιού, ημισταθερή κατάσταση συστήματος και αμελητέες ωμικές απώλειες στη κυψέλη και στο πλαίσιο, η εξίσωση ενεργειακής ισορροπίας για μια ηλιακή κυψέλη στο Φ/Β πλαίσιο, περιγράφεται στη Σχέση 2.34.

$$\dot{E}_n = \dot{Q}_{Ta} + \dot{Q}_{Tb} + \dot{E}_e \quad (2.34)$$

όπου $\dot{E}_n$ το ποσό της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας στο Φ/Β πλαίσιο (J), $\dot{Q}_{Ta}$ οι συνολικές θερμικές απώλειες από την κυψέλη προς το περιβάλλον (J), $\dot{Q}_{Tb}$ η συνολική μεταφορά θερμότητας από την κυψέλη προς το πίσω κάλυμμα (J) και $\dot{E}_e$ το ποσό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (J).

Η θερμοκρασιακή εξάρτηση της ενεργειακής απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου, μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τη Σχέση 2.35 [22-24]. Εναλλακτικά, η ηλεκτρική απόδοσή του πλαισίου

– υπό όρους εξέργειας – δίνεται από τη Σχέση 2.36 [25]. Σημειώνεται ότι ως εξέργεια ορίζεται το διαθέσιμο προς εκμετάλλευση ποσό ενέργειας ενός συστήματος από το περιβάλλον, το οποίο είναι μετατρέψιμο σε όλες τις άλλες μορφές ενέργειας.

$$n = n_o [1 - 0.0045 \cdot (\bar{T}_c - \bar{T}_a)] \quad (2.35)$$

$$\Psi_e = n_c [1 - 0.0045 \cdot (T_c - 25^\circ \text{C})] \quad (2.36)$$

όπου n η ενεργειακή απόδοση του Φ/Β πλαισίου (%), n_o η ηλεκτρική απόδοση του Φ/Β πλαισίου υπό STC, Ψ_e η ηλεκτρική απόδοση του Φ/Β πλαισίου (%), n_c η ηλεκτρική απόδοση της ηλιακής κυψέλης (%), T_c η θερμοκρασία της ηλιακής κυψέλης ($^\circ\text{C}$) και T_a η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^\circ\text{C}$). Η δε έκφραση της συνολικής ενέργειας Ψ_{PV} (εξέργειας ή διαθέσιμης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας) ενός Φ/Β πλαισίου δίνεται από τη Σχέση 2.37 [18].

$$\Psi_{PV} = \frac{V_{\max} \cdot I_{\max} - \left[1 - \left(\frac{T_a}{T_c}\right)\right] \cdot \dot{Q}}{E_{XG}} \quad (2.37)$$

όπου E_{Xsolar} είναι η εξέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας (W) και $\dot{Q}$ το ποσό της μεταφερόμενης θερμότητας με διάχυση και ακτινοβολία (J), το οποίο υπολογίζεται ως:

$$\dot{Q} = h_{ca} A \cdot (T_c - T_a) \quad (2.38)$$

όπου A το εμβαδό της Φ/Β επιφάνειας (m^2). Ο συντελεστής συναγωγιμότητας h_{ca} υπολογίζεται από την εμπειρική Σχέση 2.39 ενώ η θερμοκρασία της ηλιακής κυψέλης μπορεί να υπολογιστεί από την ημι-εμπειρική Σχέση 2.40 [26].

$$h_{ca} = 5.7 + 3.8 \cdot V_f \quad (2.39)$$

$$T_c = T_a + \left(\frac{0.32}{8.91 + 2 \cdot V_f} \right) \cdot G_T \quad (2.40)$$

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, γίνεται εμφανές ότι η ηλεκτρική ενέργεια ή, υπό όρους εξέργειας, η συνολική ενεργειακή απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου επηρεάζεται άμεσα από την θερμική ενέργεια, η οποία διαχέεται στο σύστημα, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας. Αν

θεωρηθεί ότι η θερμοκρασία T_c της ηλιακής κυψέλης είναι προσεγγιστικά ίση με την θερμοκρασία T_M του Φ/Β πλαισίου, τότε ο προσδιορισμός ή η μέτρηση της T_M μπορεί να βοηθήσει στην αποτίμηση της απόδοσης του πλαισίου. Έτσι, κατά την ανάλυση της θερμικής απόκρισης των Φ/Β πλαισίων, στις πειραματικές μελέτες που παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 5 και 6, η μετρούμενη θερμοκρασία T_M , και συνεπώς T_c , κάθε πλαισίου, συγκρίνεται με την αντίστοιχη αναμενόμενη, για τον εντοπισμό συγκεκριμένων περιοχών “ανώμαλου” θερμοκρασιακού προφίλ, οι οποίες φυσικά οδηγούν το “προβληματικό” σε μειωμένη Φ/Β πλαίσιο σε μειωμένη απόδοση και ισχύ εξόδου. Η άμεση συσχέτιση της ύπαρξης τέτοιων περιοχών ασυνήθιστα υψηλών θερμοκρασιών, όπως οι θερμές κηλίδες, με την μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης του Φ/Β πλαισίου, είναι δυνατό να προσδιοριστεί και να επιβεβαιωθεί και με την χρήση μοντέλων προσομοίωσης της ηλεκτρικής ή/και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς ενός Φ/Β πλαισίου, παραδείγματα των οποίων δίνονται στην Υποενότητα που ακολουθεί.

3.3 Προσομοίωση ηλεκτρικού και θερμοδυναμικού μοντέλου

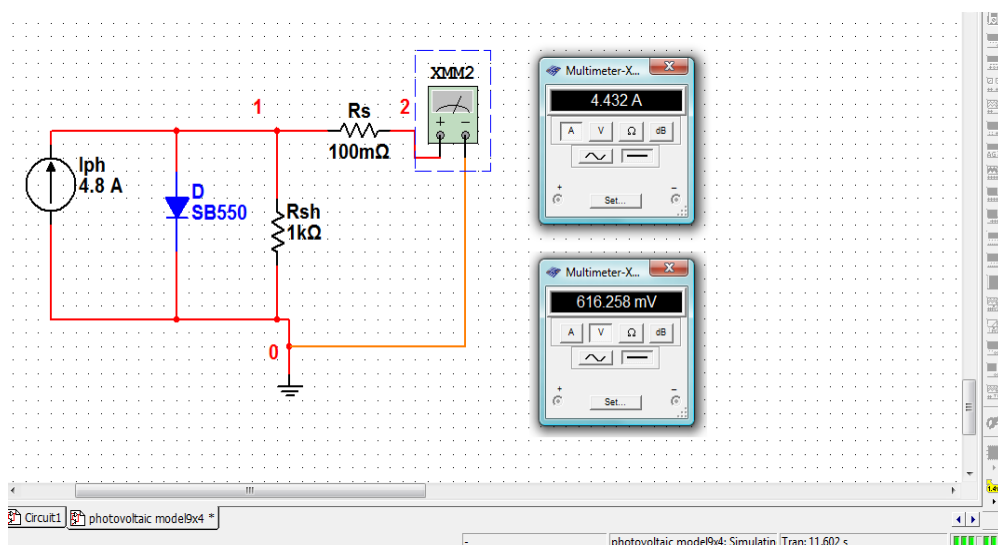
Η προσομοίωση της ηλεκτρικής και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς μίας ηλιακής κυψέλης ή/και ενός Φ/Β πλαισίου, μπορεί να αποτελέσει ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο διάγνωσης/πρόγνωσης βλαβών και, κατ’ επέκταση, αποτίμησης της λειτουργίας ενός Φ/Β συστήματος. Η υλοποίηση ενός μοντέλου προσομοίωσης Φ/Β πλαισίου βασίζεται κυρίως στη χρήση συγκεκριμένων λογισμικών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, δημοφιλέστερα εκ των οποίων είναι το Matlab/Simulink® της Mathworks™, το MultiSim® της National Instruments™, το PSpice® της Cadence Design Systems™ και το Multiphysics® της COMSOL™. Τα τρία πρώτα λογισμικά βρίσκουν εφαρμογή στην ανάπτυξη ηλεκτρικών μοντέλων, ενώ το τελευταίο χρησιμοποιείται κυρίως στην υλοποίηση θερμοδυναμικών μοντέλων και μοντέλων μεταφοράς θερμότητας. Σε αυτήν την Υποενότητα παρουσιάζονται, ενδεικτικά (λόγω περιορισμένου χώρου), δύο παραδείγματα εφαρμογών προσομοίωσης ηλεκτρικού και θερμοδυναμικού μοντέλου. Το πρώτο παράδειγμα αποτελεί μελέτη περίπτωσης προσομοίωσης του ηλεκτρικού μοντέλου ενός Φ/Β πλαισίου, η οποία αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου Μηχανολογικού Σχεδιασμού του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης [27]. Το δεύτερο παράδειγμα αποτελεί άποψη ενός πρότυπου υβριδικού μοντέλου ηλεκτρικής και θερμοδυναμικής προσομοίωσης ενός Φ/Β πλαισίου, το οποίο αναπτύχθηκε το 2012 από τους H.F. Tsai και H.L. Tsai, στα Πανεπιστήμια Ching Yun και Da-Yeh, αντίστοιχα, της Ταϊβάν [19].

ο Προσομοίωση ηλεκτρικού μοντέλου

Κατά τη διάρκεια αυτής της Διδακτορικής Έρευνας πραγματοποιήθηκε προσπάθεια μοντελοποίησης και προσομοίωσης του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος ενός εμπορικού

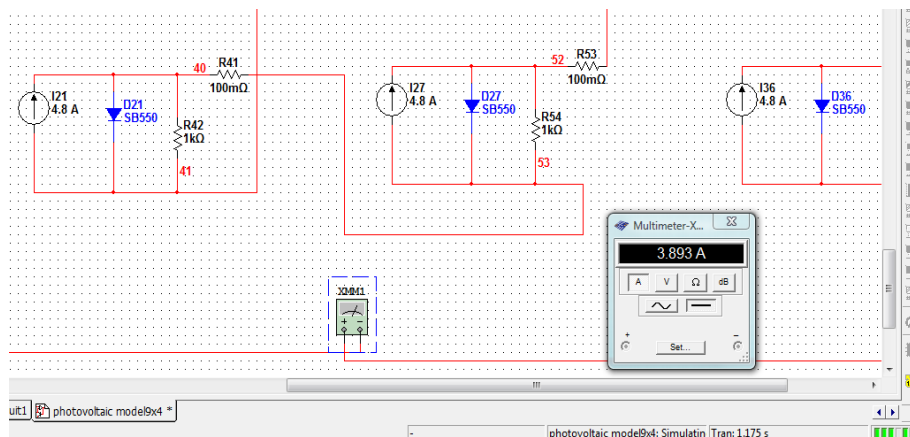
Φ/Β πλαισίου μονοκρυσταλλικού πυριτίου της εταιρίας Siemens™, τύπου SP75 (Παράρτημα Α), στο οποίο είχαν ήδη διαγνωστεί 4 περιπτώσεις κυψελών, οι οποίες έφεραν αντίστοιχες βλάβες (θερμές κηλίδες, hot spots) [26,27]. Σύμφωνα με τις κατασκευαστικές προδιαγραφές, σε STC, το Φ/Β πλαίσιο SP75 παρέχει μέγιστη τάση εξόδου $P_{\max} = 75 \text{ W}_P$, στην οποία οι τιμές του ρεύματος και της τάσης εξόδου είναι $I_{\max} = 4.4 \text{ A}$ και $V_{\max} = 17.1 \text{ V}$ αντίστοιχα, ενώ εμφανίζει ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{SC} = 4.8 \text{ A}$ και τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{OC} = 21.7 \text{ V}$.

Καθώς ζητούμενο αυτής της μελέτης δεν ήταν τόσο η διερεύνηση της ακρίβειας των ηλεκτρικών μοντέλων προσομοίωσης, αλλά η διερεύνηση της επίδρασης των διαγνωσμένων βλαβών στην ηλεκτρική συμπεριφορά και στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου, για την προσομοίωση επιλέχθηκε το μοντέλο της μιας διόδου και των δύο αντιστάσεων (Υποενότητα 3.1, σελίδα 72) με πηγή ρεύματος $I_{ph} = I_{SC} = 4.8 \text{ A}$. Τόσο το μοντέλο, όσο και η προσομοίωση, υλοποιήθηκαν με το λογισμικό MultiSim®. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των αντιστάσεων R_s και R_{sh} , καθώς και του τύπου της διόδου στο υπό προσομοίωση ηλεκτρικό μοντέλο επιλέχθηκαν με βάση τα ζητούμενα χαρακτηριστικά εξόδου κάθε ηλιακής κυψέλης, εκ των 36 που αποτελούν κάθε Φ/Β πλαίσιο SP75, ούτως ώστε να επιτυγχάνονται οι προαναφερθείσες κατασκευαστικές προδιαγραφές. Το Σχήμα 2.13 παρουσιάζει το τελικό μοντέλο προσομοίωσης για κάθε ηλιακή κυψέλη του Φ/Β πλαισίου SP75, υπό κανονική (βέλτιστη) λειτουργία. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, η σύνδεση ενός εικονικού πολύμετρου στα άκρα του κυκλώματος της κυψέλης, δίνει μετρούμενη τιμή ρεύματος εξόδου $I_L = 4.432 \text{ A}$, μειωμένη κατά περίπου 0.4 A από το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{SC} ή ισοδύναμα I_{ph}), λόγω των ωμικών απωλειών, και τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{OC} \approx 0.616 \text{ V}$.



Σχήμα 2.13. Μοντέλο προσομοίωσης μιας ηλιακής κυψέλης του Φ/Β πλαισίου SP75 [26,27].

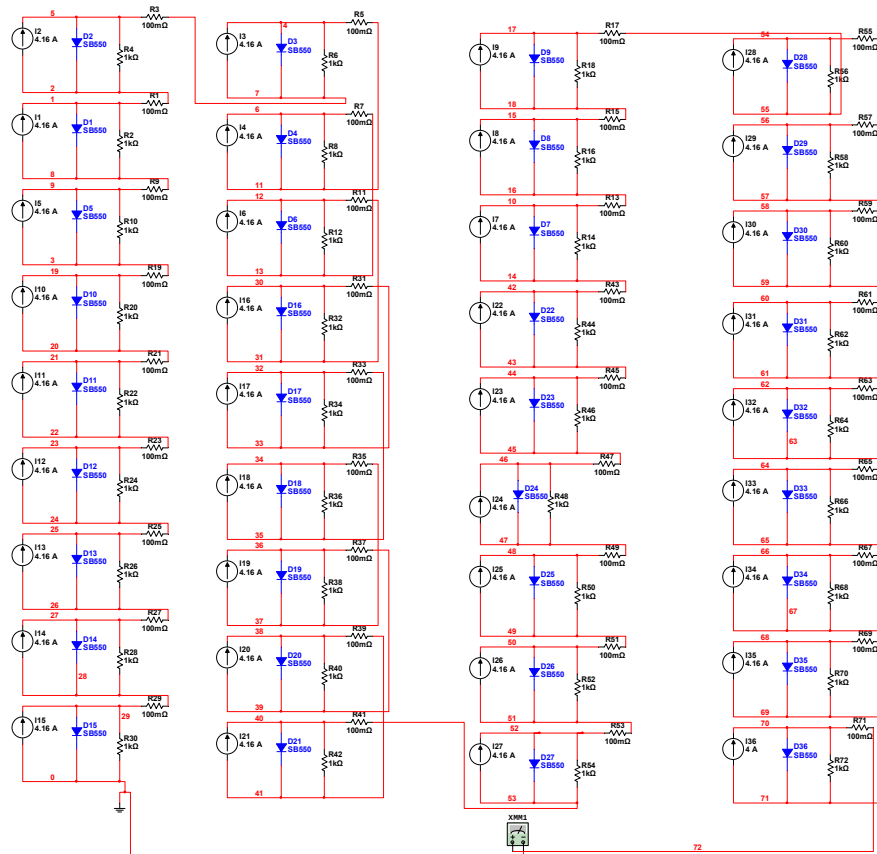
Έστω ότι, σύμφωνα με το κύκλωμα του Σχήματος 2.13, ορίζονται ως “0-A” και “2-A” ο αρνητικός ακροδέκτης 0 (γείωση) και ο θετικός ακροδέκτης 2 αντίστοιχα, της κυψέλης A και ως “0-B” και “2-B” ο αρνητικός ακροδέκτης 0 (γείωση) και ο θετικός ακροδέκτης 2 αντίστοιχα, της κυψέλης B του Φ/B πλαισίου, τότε η εν σειρά σύνδεση των κυψελών A-B μοντελοποιείται με την σύνδεση του ακροδέκτη 0-A με τον 2-B και του ακροδέκτη 2-A με τον 0-B. Προφανώς, η μοντελοποίηση του συνολικού κυκλώματος του Φ/B πλαισίου ολοκληρώνεται με την εν σειρά σύνδεση 36 όμοιων ηλιακών κυψελών που περιγράφονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.13. Το τελικό, λοιπόν, κύκλωμα δίνει τιμή τάσης ανοιχτοκυκλώματος $V_{OC} = (36 \times 0.616) = 21.9$ V, αρκετά κοντά (με απόκλιση 0.9%) στην αντίστοιχη του κατασκευαστή, και ρεύμα εξόδου $I_L = 4.432$ A.



Σχήμα 2.14. Απόκριση του μοντέλου προσομοίωσης του Φ/B πλαισίου SP75 στην εμφάνιση hot spot σε μία ηλιακή κυψέλη [26,27].

Όπως προαναφέρθηκε στην Υποενότητα 2.2, η εμφάνιση ενός hot spot (λόγω π.χ. σκίασης) συνεπάγεται τη λειτουργία της αντίστοιχης κυψέλης υπό ανάστροφη πόλωση ή ανάστροφο ρεύμα (reversed bias). Εξετάστηκε, λοιπόν, η απόκριση του μοντέλου προσομοίωσης υπό την επίδραση της συγκεκριμένης ηλεκτρικής συμπεριφοράς μιας κυψέλης που φέρει hot spot. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.14, υπό την επίδραση 4 hot spot, το τελικό μετρούμενο ρεύμα εξόδου εμφανίζει μειωμένη τιμή ($I_L = 3.893$ A) η οποία, είναι ακριβώς η (ελάχιστη) τιμή του ρεύματος εξόδου των ελαττωματικών κυψελών. Αντίστοιχα καταγράφεται μικρή μείωση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Συμπερασματικά, στην απόκρισή του, το προσομοιωμένο μοντέλο του Φ/B πλαισίου SP75, με 4 ελαττωματικές κυψέλες (hot spots), υπέδειξε ηλεκτρική ισχύ εξόδου μειωμένη κατά περίπου 10% η οποία επαληθεύθηκε από αντίστοιχες ελεγχόμενες μετρήσεις της χαρακτηριστικής I-V του πλαισίου, σε STC συνθήκες, που πραγματοποιήθηκαν σε ειδικό προσομοιωτή, από την εταιρία κατασκευής Φ/B πλαισίων ExelSolar™/ExelGroup™ A.E., με την οποία συνεργάστηκε το Εργαστήριο Μηχανολογικού

Σχεδιασμού, στα πλαίσια της εν λόγω Διδακτορικής Διατριβής (Παράρτημα Β). Στο Σχήμα 2.15, δίνεται άποψη του συνολικού ηλεκτρικού μοντέλου προσομοίωσης της εν λόγω μελέτης, στο οποίο διακρίνονται τα 36 επι μέρους – συνδεδεμένα σε σειρά – ηλεκτρικά ισοδύναμα κυκλώματα των αντίστοιχων ηλιακών κυψελών του Φ/Β πλαισίου SP75.

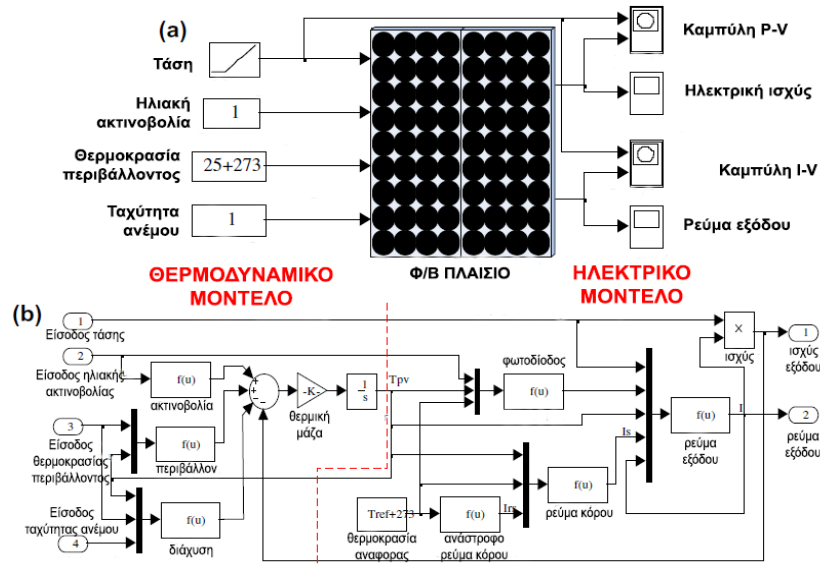


Σχήμα 2.15. Το συνολικό ηλεκτρικό μοντέλο προσομοίωσης του Φ/Β πλαισίου SP75.

ο Προσομοίωση ηλεκτρικού/θερμοδυναμικού μοντέλου

Στην μελέτη των H.F Tsai και H.L. Tsai [19], παρουσιάζεται ένα καινοτόμο ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης το οποίο περιγράφει τόσο τα ηλεκτρικά όσο και τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά ενός εμπορικού Φ/Β πλαισίου σε συνθήκες λειτουργίας. Το μοντέλο και η προσομοίωση υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον Matlab/Simulink®, με βάση τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των προδιαγραφών του κατασκευαστή σε STC αλλά και σε συνθήκες NOCT. Η αξιολόγηση του μοντέλου προσομοίωσης έγινε με βάση την εκτίμηση της θερμοκρασίας των κυψελών και της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου του πλαισίου, καθώς και τη διακύμανση αυτών υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης, το προτεινόμενο μοντέλο επιβεβαιώθηκε και η αντίστοιχη

προσομοίωση αποδείχθηκε ότι δίνει αποτελέσματα σε εξαιρετική συμφωνία με τα πραγματικά χαρακτηριστικά εξόδου του Φ/Β πλαισίου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.16 το εν λόγω μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από δύο διακριτά τμήματα αριστερά και δεξιά, τα οποία αντίστοιχα περιγράφουν τις εισόδους του θερμοδυναμικού και τις εξόδους του ηλεκτρικού μοντέλου, βάσει των πρώτων.



Σχήμα 2.16. Γενικό (a) και αναλυτικό (b) διάγραμμα του προτεινόμενου ηλεκτρικού/θερμοδυναμικού μοντέλου [19].

4. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που διέπει την δομή, λειτουργία και μοντελοποίηση των Φ/Β πλαισίων, με έμφαση στα Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου, τα οποία και αποτελούν το πεδίο εφαρμογής της συγκεκριμένης Διδακτορικής Διατριβής. Συγκεκριμένα, στο πρώτο μέρος του Κεφαλαίου παρατέθηκαν οι τυπικές κατασκευαστικές και λειτουργικές παράμετροι του βασικότερου στοιχείου ενός Φ/Β πλαισίου: της ηλιακής κυψέλης. Παραμένοντας σε επίπεδο ηλιακής κυψέλης, ξεχωριστά μελετήθηκε το θέμα της ηλεκτρικής απόδοσης και της διακύμανσής της σε σχέση τόσο με εξωτερικούς όσο και με εσωτερικούς παράγοντες. Περνώντας σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου, το δεύτερο μέρος του Κεφαλαίου εστίασε στα ηλεκτρικά και θερμικά χαρακτηριστικά και στις οπτικές ιδιότητες των Φ/Β πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου, καθώς και στην συμπεριφορά της απόδοσής τους σε συνθήκες πεδίου. Τέλος, βάσει της ανάλυσης που έγινε, τόσο σε επίπεδο ηλιακής κυψέλης, όσο και σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου, στο τρίτο μέρος αυτού του Κεφαλαίου παρουσιάστηκε συνοπτικά το αναγκαίο θεωρητικό (μαθηματικό και φυσικό) υπόβαθρο που

σχετίζεται με την ηλεκτρική και την θερμοδυναμική συμπεριφορά των Φ/Β πλαισίων. Η ξεχωριστή σημασία του τελευταίου μέρους αυτού του Κεφαλαίου έγκειται στο γεγονός ότι η μοντελοποίηση και, συνακόλουθα, η προσομοίωση της ηλεκτρικής και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς μίας ηλιακής κυψέλης ή/και ενός Φ/Β πλαισίου, μπορεί να αποτελέσει ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο αποτίμησης της λειτουργίας και διάγνωσης/πρόγνωσης βλαβών σε ένα Φ/Β σύστημα. Προς αυτή την κατεύθυνση, και στα πλαίσια αυτής της Διδακτορικής Έρευνας, αναπτύχθηκε το ηλεκτρικό μοντέλο προσομοίωσης που παρουσιάστηκε στην Υποενότητα 3.3 και μελετήθηκε ως προς την πρακτικότητα και την εφαρμοσιμότητά του (σε βοηθητικό ρόλο) στη διάγνωση βλαβών (hot spot) σε συγκεκριμένα Φ/Β πλαίσια, με εφαρμογή μετρήσεων υπέρυθρης θερμογραφίας και ηλεκτρικών χαρακτηριστικών. Το μοντέλο αυτό αποτέλεσε μέρος δύο επιστημονικών εργασιών, οι οποίες υποβλήθηκαν και δημοσιεύτηκαν (κατά χρονολογική σειρά) σε ένα διεθνές Επιστημονικό Συνέδριο και σε ένα διεθνές Επιστημονικό Περιοδικό [27,28]:

- ✓ J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Quantifying the Impact of Hot Spots on the Performance of Photovoltaic Modules by Infrared Thermography and a Simulation Model", Proceedings of The 2nd International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium - ELCAS2, Nisyros, Greece, 2011.
- ✓ J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "On the Detection of Hot Spots in Operating Photovoltaic Arrays through Thermal Image Analysis and a Simulation Model", Materials Evaluation, (in press 2013).

Με θεωρητικό "εφόδιο" το συγκεκριμένο Κεφάλαιο, η παρούσα Διδακτορική Διατριβή συνεχίζεται στο 3^ο Κεφάλαιο, το οποίο πλέον εστιάζει σε ενδιαφέροντα θέματα βλαβών ή/και αστοχιών ηλιακών κυψελών και Φ/Β πλαισίων, ένα πεδίο με – αρκετές ακόμα – άγνωστες πτυχές που χρίζουν αναλυτικής μελέτης. Ως κύριο κίνητρο για τη διερεύνηση της σοβαρότητας, της συχνότητας εμφάνισης και της φύσης διαφόρων τύπων βλαβών, προβάλλει η ανάγκη καθορισμού βλαβών Φ/Β πλαισίων, κατάλληλων για αξιόπιστη και αποτελεσματική διάγνωση ή/και πρόγνωση με την εφαρμογή της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. S. Mau, T. Krametz, W. Jahna and H. Fechner, "Quality Testing for PV Modules According to Standards and Performance Control for Supporting Manufacturing",

- Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition—EUPVSEC, Paris, France, 2004.
2. J.A. Tsanakas, D. Chrysostomou, P.N. Botsaris and A. Gasteratos, "Fault Diagnosis of Photovoltaic Modules through Image Processing and Canny Edge Detection on Field Thermographic Measurements", ASME Journal of Solar Energy Engineering, (in press 2013).
 3. S. Kurtz, D. Miller, M. Kempe, N. Bosco, K. Whitefield, J. Wohlgemuth, N. Dhere and T. Zgonena, "Evaluation of High-Temperature Exposure of Photovoltaic Modules", Proceedings of 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, U.S.A., NREL/CP-520-45986, 2009.
 4. J. Wohlgemuth, "IEC-61215: What it is and isn't", NREL PV Module Reliability Workshop, Golden (Colorado), U.S.A., 2012.
 5. G.N. Tiwari and S. Dubey, "Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications", The Royal Society of Chemistry - RSC Publishing, Cambridge, United Kingdom, 2010.
 6. A. Luque and S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", Wiley-Interscience, Chichester, United Kingdom, 2003.
 7. Σ.Ε. Τετελένης, "Προσδιορισμός Παραμέτρων Γήρανσης Φωτοβολταϊκών Στοιχείων", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, Αθήνα, 2011.
 8. Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, "Φωτοβολταϊκά Συστήματα", Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2007.
 9. M. Simon and E.L. Meyer, "Detection and Analysis of Hot-Spot Formation in Solar Cells", Solar Energy Materials & Solar Cells, 94(2), 2010.
 10. 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, Vol. 133, 021012 (2011).
 11. T.K.H. Carlsson, "Experimental Setup for Full Scale Field Tests of CdTe and CIS Thin-Film PV Modules", Master Thesis, Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, Espoo, 2001.
 12. J.A. Ramos Hernanz, J.J. Campayo Martín, I. Zamora Belver, J. Larrañaga Lesaka, E. Zulueta Guerrero and E. Puelles Pérez, "Modelling of Photovoltaic Module", Proceedings of The International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada, Spain, 2010.
 13. G.N. Tiwari, R.K. Mishra and S.C. Solanki, "Photovoltaic Modules and Their Applications: A Review on Thermal Modelling" Applied Energy, 88, 2011.

14. S. Rustemli and F. Dincer, "Modeling of Photovoltaic Panel and Examining Effects of Temperature in Matlab/Simulink", *Electronics and Electrical Engineering*, 3(109), 2011.
15. E.A. de la Breteque, "Thermal Aspects of c-Si Photovoltaic Module Energy Rating", *Solar Energy*, 83(9), 2009.
16. M. Davis, "Electrical, Mechanical, and Thermal Modeling of Photovoltaic Modules: An Overview", NREL PV Module Reliability Workshop, Denver (Colorado), U.S.A., 2010.
17. K.-H. Chao, S.-H. Hob and M.-H. Wang, "Modeling and Fault Diagnosis of a Photovoltaic System", *Electric Power Systems Research*, 78, 2008.
18. A.S. Joshi, I. Dincer and B.V. Reddy, "Performance Analysis of Photovoltaic Systems: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2009.
19. H.-F. Tsai and H.-L. Tsai, "Implementation and Verification of Integrated Thermal and Electrical Models for Commercial PV Modules", *Solar Energy*, 86, 2012.
20. G.M. Tina and S. Scrofani, "Electrical and Thermal Model for PV Module Temperature Evaluation", *Proceedings of The 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON*, Ajaccio, France, 2008.
21. E.I. Ortiz-Rivera and F.Z. Peng, "Analytical Model for a Photovoltaic Module Using the Electrical Characteristics Provided by the Manufacturer Data Sheet", *Proceedings of The 36th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Recife, Brazil, 2005.
22. T. Schott, "Operational Temperatures of PV Modules", *Proceedings of the 6th PV Solar Energy Conference*, 1985.
23. D.L. Evans, "Simplified Method for Predicting PV Array Output", *Solar Energy*, 27, 1981.
24. E. Skoplaki and J.A. Palyvos, "On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A review of Efficiency/Power Correlations", *Solar Energy*, 83(5), 2009.
25. H.A. Zondag, D.W. De Vries, W.G.J. Van Helden, R.J.C. Van Zolengen and A.A. Van Steenhoven, "The Thermal and Electrical Yield of a PV-Module Collector", *Solar Energy*, 72(2), 2002.
26. E. Skoplaki, A.G. Boudouvis and J.A. Palyvos, "A Simple Correlation for the Operating Temperature of Photovoltaic Modules of Arbitrary Mounting", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92(11), 2008.
27. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Quantifying the Impact of Hot Spots on the Performance of Photovoltaic Modules by Infrared Thermography and a Simulation Model", *Proceedings of The 2nd International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium - ELCAS2*, Nisyros, Greece, 2011.
28. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "On the Detection of Hot Spots in Operating Photovoltaic Arrays through Thermal Image Analysis and a Simulation Model", *Materials Evaluation*, (in press 2013).



Κεφάλαιο 3

Βλάβες σε Φωτοβολταϊκά Πλαίσια – Η Υφιστάμενη Κατάσταση

Περιεχόμενα

Σελίδα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	87
2. ΒΛΑΒΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟΥ.....	89
2.1 Παράγοντες φθοράς στο εμπρόσθιο στρώμα (υπέρστρωμα).....	89
2.2 Βλάβες στο οπίσθιο στρώμα (υπόστρωμα).....	90
2.3 Βλάβες στο πλαίσιο στήριξης.....	92
3. ΒΛΑΒΕΣ ΛΟΓΩ ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗΣ.....	93
3.1 Αποχρωματισμός του EVA.....	93
3.2 Ανακλαστικότητα και απώλεια ελαστικότητας του EVA.....	96
3.3 Βλάβες αποκόλλησης του EVA.....	98
4. ΒΛΑΒΕΣ ΣΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ.....	101
4.1 Θερμές κηλίδες (hot spots).....	102
4.2 Βλάβες συγκολλήσεων.....	106
4.3 Ρωγμές και θραύση ηλιακών κυψελών.....	108
4.4 Βλάβες εσωτερικών διασυνδέσεων.....	111
4.5 Μεταλλική διάβρωση.....	112
5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	113
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	114

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως συμβαίνει σε κάθε ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό, έτσι και στα Φ/Β πλαίσια, η εμφάνιση και εξέλιξη συγκεκριμένων τύπων βλαβών, δυσχεραίνει την αποδοτική λειτουργία τους και αλλοιώνει την μορφολογία τους, με επιπτώσεις τόσο οικονομικές, όσο και συστημικές. Σήμερα, δεδομένης της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης και χρήσης Φ/Β πλαισίων στην ανάπτυξη και εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων ευρείας κλίμακας, σημαντική επιστημονική έρευνα, σε



παγκόσμιο επίπεδο, εστιάζει στην επίτευξη υψηλών επιπέδων αξιοπιστίας (reliability), αντοχής (durability) και, συνεπώς, διαθεσιμότητας (availability) και αξιοποίησής (utilization) τους. Προβάλλει, λοιπόν, απώτερη η ανάγκη ανάπτυξης διαγνωστικών/προγνωστικών συστημάτων CM, για τον περιορισμό ή/και την απομόνωση κάθε πιθανής πηγής δυσλειτουργίας, βλάβης ή ασυνήθιστα υποβαθμισμένης απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου. Η εφαρμογή μιας τέτοιας στρατηγικής μάλιστα, επιβάλλεται να αφορά τόσο το στάδιο παραγωγής ενός Φ/Β πλαισίου (υπενθυμίζοντας της σημασία των πρώιμων “απωλειών”), όσο και στα στάδια εγκατάστασης και λειτουργίας του, στο πεδίο (βαθμιαία φθορά).

Σε κάθε σχετική έρευνα, ένα βήμα πριν από την ανάπτυξη ενός συστήματος CM σε Φ/Β πλαίσια, θα πρέπει να αναγνωριστεί και να μελετηθεί η προέλευση, συχνότητα εμφάνισης και η σοβαρότητα κάθε πηγής βλάβης. Αν αναλογιστεί κανείς ότι ο λειτουργικός χρόνος ζωής ενός Φ/Β πλαισίου αγγίζει ή και ξεπερνά τα 20 χρόνια, και οι παλαιότερες αντίστοιχες εγκαταστάσεις υφίστανται μόλις εδώ και δύο με τρεις δεκαετίες, γίνεται άμεσα κατανοητό ότι η έρευνα για τον προσδιορισμό όλων των τύπων βλαβών στη διάρκεια ζωής ενός Φ/Β πλαισίου, βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη και εμφανίζει σημαντικά “κενά” και αβεβαιότητες.

Η γνώση της αιτίας, της φύσης και της θέσης μιας βλάβης, καθώς και χαρακτηριστικών όπως η συχνότητα εμφάνισης και η σοβαρότητα κάθε τύπου βλάβης έχουν ιδιαίτερη σημασία στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου παρακολούθησης κατά την υλοποίηση ενός CM. Έτσι λοιπόν, στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι κυριότερες βλάβες ή αιτίες βλαβών σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου, με το αντίστοιχο θεωρητικό τους υπόβαθρο, όπως αυτές καταγράφηκαν κατόπιν εκτεταμένης σχετικής βιβλιογραφικής αναζήτησης και συλλογής δεδομένων εγκαταστάσεων – ανά τον κόσμο – Φ/Β συστημάτων. Όντας το αντικείμενο εφαρμογής της συγκεκριμένης Διδακτορικής Διατριβής, 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 καταγραφέντες τύποι βλαβών μπορούν να ταξινομηθούν και να μελετηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Βλάβες στα εξωτερικά στρώματα του συσσωματώματος 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 ελαστικότητας 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.

2. ΒΛΑΒΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Η αξιοπιστία ενός Φ/Β πλαισίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα υλικά που απαρτίζουν την πολυστρωματική δομή του. Το γυαλί αποτελεί ίσως το υλικό με την ευρύτερη χρήση σε πλαίσια τόσο κρυσταλλικού πυριτίου όσο και λεπτού υμενίου. Χρησιμοποιείται δε ως εξωτερικό στρώμα, συνήθως στο εμπρόσθιο αλλά και στο οπίσθιο τμήμα του πλαισίου, εμφανίζοντας ωστόσο μειονεκτήματα όπως το αυξημένο βάρος του, το υψηλό κόστος του και η ευθραυστότητά του. Από την άλλη πλευρά, οι μεμβράνες πολυμερών αποτελούν μια εναλλακτική λύση απέναντι στο γυαλί, καθώς είναι ελαφρύτερες, μικρότερου κόστους και ανθεκτικότερες στη θραύση. Εντούτοις όμως, και σε αντίθεση με το γυαλί, οι μεμβράνες εμφανίζουν ανεπιθύμητα υψηλή διαπερατότητα στην υγρασία [1].

2.1 Παράγοντες φθοράς στο εμπρόσθιο στρώμα (υπέρστρωμα)

Ο ρόλος του υπερστρώματος στα Φ/Β πλαίσια συνίσταται στην παροχή μηχανικής ακαμψίας, οπτικής διαφάνειας, ηλεκτρικής απομόνωσης στο ηλεκτρικό κύκλωμα των ηλιακών κυψελών και προστασίας από ακραίες επιδράσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος. Λόγω, λοιπόν, αυτού του ρόλου του, πρέπει να αποφεύγεται η θραύση του.

Το γυαλί, το οποίο συνήθως χρησιμοποιείται ως υπέρστρωμα, έχει υποστεί θερμική επεξεργασία για την ενίσχυση της ακαμψίας του και είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο, ώστε να εμφανίζει υψηλή διαπερατότητα στο φως. Ενδεικτικά, η διαπερατότητα στο φως για το κοινό γυαλί ανέρχεται τυπικά στο 86%, ενώ σε θερμικά επεξεργασμένο γυαλί χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο αυτή η διαπερατότητα αγγίζει το 96%. Εξειδικεύοντας σε κυματικό επίπεδο, το υπέρστρωμα πρέπει να εμφανίζει υψηλή διαπερατότητα στα μεσαία και μεγάλα μήκη κύματος της ορατής ηλιακής ακτινοβολίας (>500 nm) και ελάχιστη έως μηδαμινή διαπερατότητα στα μικρά μήκη κύματος (<500 nm), στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας, η οποία αποτελεί φθοροποιοί παράγοντα για την μεμβράνη ενθυλάκωσης. Για τον σκοπό αυτό, κατά την κατασκευή των υπερστρωμάτων των Φ/Β πλαισίων, τις τελευταίες δύο δεκαετίες, χρησιμοποιούνται προσμίξεις ενισχυμένου γυαλιού με το στοιχείο δημήτριο (cerium) [2]. Επιπλέον επιθυμητό χαρακτηριστικό του υπερστρώματος είναι και η δυνατότητα απώθησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας, στα μήκη κύματος που δεν είναι εκμεταλλεύσιμα από τις ηλιακές κυψέλες (>700 nm), καθώς η συγκεκριμένη ακτινοβολία αυξάνει τη θερμοκρασία λειτουργίας όλου του πλαισίου, μειώνοντας έτσι την απόδοσή του. Παρόλα αυτά όμως δεν έχει βρεθεί ακόμα μια οικονομικά αποδεκτή μέθοδος υλοποίησης ενός στρώματος απόρριψης της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Οι κρούσεις αντικειμένων (λ.χ. σε ενδεχόμενη χαλαζόπτωση) στο Φ/Β πλαίσιο αποτελούν σημαντικό παράγοντα φθοράς ή και αστοχίας του υπερστρώματος. Ιστορικά, τα

πρώτα υλικά υπερστρώματος προδιαγράφονταν να αντέχουν στην κρούση από χαλάζι διαμέτρου 2.54 cm και βάρους 8 g και ταχύτητας 23 m/s. Νεότερες έρευνες έδειξαν ότι δύναται να επέλθει αστοχία (λόγω ρήξης) στο εμπρόσθιο στρώμα από μικρό χαλίκι (βάρους 2-4 g) που μεταφέρεται με τον αέρα σε σχετικά μικρές ταχύτητες (10-15 m/s) [3]. Οι λόγοι για τους οποίους ενδέχεται να σπάσει το εμπρόσθιο στρώμα του πλαισίου σχετίζονται με το υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί. Το χαλάζι, όπως και τα μεταφερόμενα με τον αέρα χαλίκια, μπορούν να σπάσουν το γυαλί ή το πολυμερές (περίπτωση αστοχίας) ή να επιφέρουν ρήγματα σε αυτό (περίπτωση βλάβης). Ρήγματα επίσης επέρχονται και από μηχανικές φορτίσεις λόγω χιονιού ή πολύ ισχυρού ανέμου.

Η κακή στήριξη του πλαισίου, η υψηλή θερμοκρασία που μπορεί να αναπτυχθεί από μια θερμή κηλίδα ή από ένα ηλεκτρικό τόξο στον πίνακα κυψελών, η υψηλή πίεση που μπορεί να ασκηθεί κατά την κατασκευή ή κατά την τοποθέτηση του πλαισίου και διαφορές θερμοκρασίας άνω των 25 °C μεταξύ του κέντρου και των άκρων του πλαισίου, αποτελούν επίσης παράγοντες φθοράς και ενδεχόμενης αστοχίας (θραύσης) του γυαλιού ή του πολυμερούς (Σχήμα 3.1). Μια αστοχία αυτού του τύπου έχει καταστρεπτικές συνέπειες στην 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 3.1. Αστοχία λόγω θραύσης του εμπρόσθιου στρώματος ενός Φ/Β πλαισίου [4].

2.2 Βλάβες στο οπίσθιο στρώμα (υπόστρωμα)

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 (Υποενότητα 2.3), το εξωτερικό στρώμα της οπίσθιας μη φωτιζόμενης πλευράς του πλαισίου (υπόστρωμα ή back sheet) αποτελείται από γυαλί ή, συνηθέστερα, από ένα φύλλο σύνθετου (συστοιχίας) πλαστικού με την πατενταρισμένη ονομασία Tedlar® φθοριούχο πολυβινύλιο (polyvinyl fluoride, PVF), το οποίο λειτουργεί ως

“φράγμα” υγρασίας και διαβρωτικών παραγόντων. Σε δυσμενής συνθήκες, ενδέχεται να επέλθει διαχωρισμός των επιμέρους στρωμάτων που απαρτίζουν την συστοιχία του υποστρώματος, σχηματισμός φυσαλίδων, ρωγμή (Σχήμα 3.2) ή διόγκωση. Βλάβες αυτού του τύπου εμφανίζονται κυρίως όταν το υπόστρωμα είναι μη διαπερατό στα διάφορα αέρια που δημιουργούνται από χημικές αντιδράσεις μέσα στο πλαίσιο, οδηγώντας στη συνέχεια σε διόγκωση, σχηματισμό φυσαλίδων και τέλος στην αποκόλληση των υλικών της συστοιχίας του. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίζουν κυρίως οι κατασκευαστές Φ/Β πλαισίων που χρησιμοποιούν γυαλί ή φύλλα αλουμινίου ως υλικό υποστρώματος του πλαισίου [5].



Σχήμα 3.2. Υπόστρωμα Φ/Β πλαισίου με εκτεταμένες ρωγμές [4].



Σχήμα 3.3. Υπόστρωμα που έχει υποστεί εκτεταμένη αποκόλληση [6].

Για να αποφευχθούν προβλήματα και βλάβες αυτού του τύπου θα πρέπει το υπόστρωμα να μπορεί να “αναπνέει”, να είναι δηλαδή διαπερατό στα διάφορα αέρια και τις διαβρωτικές ουσίες, όπως το οξικό οξύ που παράγεται από την μεμβράνη ενθυλάκωσης (EVA), ώστε αυτά να



μπορούν να εξέλθουν του πλαισίου από το οπίσθιο στρώμα. Ταυτόχρονα όμως με την εξαγωγή των όποιων διαβρωτικών ουσιών, υπάρχει κίνδυνος ταυτόχρονης εισόδου υγρασίας στο υπόστρωμα. Η υγρασία (τα μόρια του νερού) αποδυναμώνει τους επιφανειακούς δεσμούς συγκράτησης των υλικών, οδηγώντας έτσι στην αποκόλληση τους (Σχήμα 3.3), ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο την περεταίρω διείσδυση υγρασίας. Η ύπαρξη μεγάλης ποσότητας υγρασίας μέσα στο συσσωμάτωμα του πλαισίου μπορεί να προκαλέσει ηλεκτροχημικές διαβρώσεις και, τελικά, να οδηγήσει ολόκληρο το Φ/Β πλαίσιο σε αστοχία.

Ένας δείκτης που δείχνει τη διαπερατότητα των υποστρωμάτων στην υγρασία είναι ο ρυθμός μετάδοσης υδρατμών (water vapor transmission rate, WVTR). Η συστοιχία υλικών Tedlar®-Αλουμίνιο-Tedlar® (TAT) εμφανίζει τον χαμηλότερο WVTR, έχοντας όμως δυο βασικά μειονεκτήματα [7]: i) Περιέχει ενδιάμεσο στρώμα αλουμινίου, με σαφή κίνδυνο αποκόλλησης των υλικών λόγω ασθενών συνδετικών δεσμών μεταξύ του αλουμινίου και του Tedlar® και ii) περιέχει Tedlar® ως ακραίο εσωτερικό στρώμα το οποίο χρειάζεται ειδική μεταχείριση για να επιτευχθεί επαρκής δεσμός με το υλικό ενθυλάκωσης (EVA). Όταν το υπόστρωμα έχει πολύ χαμηλό δείκτη WVTR, ο κύριος δρόμος εισόδου υγρασίας στο πάνελ είναι μέσω των ακμών του πλαισίου. Από τη στιγμή που η υγρασία εισχωρήσει μέχρι το στρώμα του EVA, υπάρχει πλέον σοβαρός κίνδυνος διάβρωσης καθώς στο EVA ο δείκτης WVTR είναι πολύ υψηλός. Γίνεται δε 50-100 φορές υψηλότερος όσο η EVA θερμαίνεται κατά τη λειτουργία του πλαισίου [7].

Λόγω των ανωτέρω προβλημάτων, έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες δοκιμές τεχνητής (επιταχυνόμενης) γήρανσης των υποστρωμάτων. Οι δοκιμές αυτές έδειξαν ότι αν τα Φ/Β πλαίσια λειτουργούν σε θερμοκρασία υποστρώματος 65 °C για το 30% της διάρκειας ζωής τους, η διάρκεια ζωής τους αναμένεται να μειωθεί στα 19 χρόνια, ως αποτέλεσμα ακριβώς της διάβρωσης (λόγω υγρασίας) του στρώματος EVA. Αν η θερμοκρασία λειτουργίας μειωθεί μόλις κατά 1 °C, η διάρκεια ζωής των Φ/Β πλαισίων αυξάνεται κατά 3-5 χρόνια [8].

2.3 Βλάβες στο πλαίσιο στήριξης

Η δομή ενός Φ/Β πλαισίου και το πλαίσιο στήριξής του πρέπει να είναι ικανά να αντέχουν σε (πιθανόν ακραίες) περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης (πεδίου) κατά τη λειτουργία ενός Φ/Β συστήματος. Το υλικό που χρησιμοποιείται ως περιμετρικό πλαίσιο προστασίας του συσσωματώματος του Φ/Β πλαισίου είναι συνήθως το αλουμίνιο (συγκεκριμένα, συνήθως τύπου *Alu. 6063 T5*) καθότι ελαφρύ και ανθεκτικό. Η κατασκευή του περιμετρικού πλαισίου πρέπει σαφώς να είναι υδατοστεγής και να μην περιέχει κοιλότητες στις οποίες μπορεί να συκρατηθεί νερό. Σε ορισμένες περιπτώσεις Φ/Β εγκαταστάσεων, παρατηρήθηκαν μηχανικές βλάβες και αστοχίες στα περιμετρικά πλαίσια των Φ/Β πλαισίων, οι οποίες αφορούσαν κυρίως τη μη σωστή μελέτη στήριξης των πλαισίων κατά την εγκατάστασή τους (Σχήμα 3.4). Σπανιότερα, έχουν παρατηρηθεί και κατασκευαστικά βλάβες στα περιμετρικά πλαίσια οι οποίες

έγιναν εμφανείς στην εξέλιξη της ζωής του Φ/Β πλαισίου, λόγω της συσσώρευσης θερμικών ή μηχανικών τάσεων [9].



Σχήμα 3.4. Κατασκευαστικό πρόβλημα στο περιμετρικό πλαίσιο του Φ/Β πλαισίου [9].

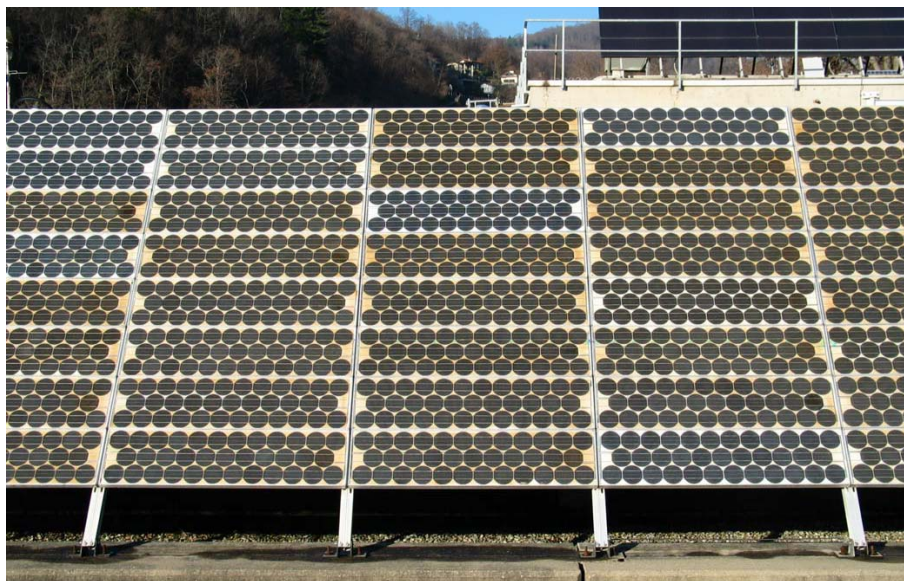
3. ΒΛΑΒΕΣ ΛΟΓΩ ΕΝΘΥΛΑΚΩΣΗΣ

Η ενθυλάκωση του πίνακα ηλιακών κυψελών γίνεται με σκοπό την σωστή συσσωμάτωση όλων των στρωμάτων υλικών που απαρτίζουν ένα Φ/Β πλαίσιο. Έως σήμερα, το δημοφιλέστερο υλικό ενθυλάκωσης είναι το συμπολυμερές αιθυλένιο-βινυλίου οξικό άλας (ethylene-vinyl acetate, EVA), ένα είδος θερμοπλαστικού το οποίο συντίθεται από μακρά μόρια με σκελετό ατόμων άνθρακα σε απλούς ομοιοπολικούς δεσμούς. Βέβαια, εκτός από την ενθυλάκωση, το EVA εξυπηρετεί και στην ηλεκτρική μόνωση των ηλιακών κυψελών καθώς και στην προστασία και την μόνωση τους από τις περιβαλλοντικές επιδράσεις και τη διάβρωση. Επιπλέον, το στρώμα της ενθυλάκωσης – όπως ακριβώς και το υπέρστρωμα του γυαλιού – πρέπει να έχει άριστη διαπερατότητα στο ηλιακό φως. Το στρώμα EVA εφαρμόζεται πάντα σε πρόσμιξη με αντιοξειδωτικά υλικά και απορροφητές υπεριώδους ακτινοβολίας, προκειμένου να επιτευχθεί μακροπρόθεσμη σταθερή απόδοση της ενθυλάκωσης και, συνακόλουθα, αξιόπιστη λειτουργία του Φ/Β πλαισίου [10].

3.1 Αποχρωματισμός του EVA

Οι αλλοιωμένες μεμβράνες EVA που έχουν εκτεθεί στην ατμόσφαιρα για πάνω από 5 χρόνια, εμφανίζουν χρώμα που κυμαίνεται από ανοιχτό κίτρινο μέχρι σκούρο καφέ (Σχήμα 3.5). Από τα δύο στρώματα μεμβρανών EVA που χρησιμοποιούνται σε ένα Φ/Β πλαίσιο,

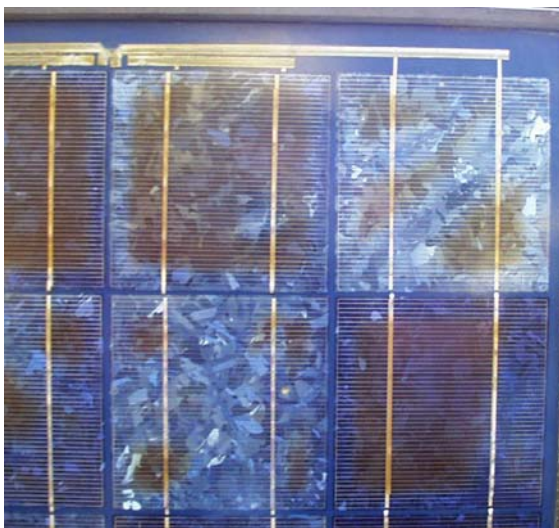
αποχρωματισμός εμφανίζεται στην μεμβράνη που ενώνει το εμπρόσθιο στρώμα του πλαισίου (όπου συνήθως συναντάται σαν υλικό το γυαλί) με τον πίνακα ηλιακών κυψελών. Βλέποντας μια αλλοιωμένη μεμβράνη EVA σε τομή, παρατηρείται ότι το αποχρωματισμένο κίτρινο ή καφέ στρώμα υπάρχει στην εμπρός πλευρά της μεμβράνης (σε επαφή με το υπέρστρωμα), με την, αποκαλούμενη, πλευρά δικτύου (σε επαφή με το πίνακα κυψελών) να παραμένει καθαρή. Το πάχος του αποχρωματισμένου στρώματος αποτελεί δείκτη του βαθμού αλλοίωσης του EVA.



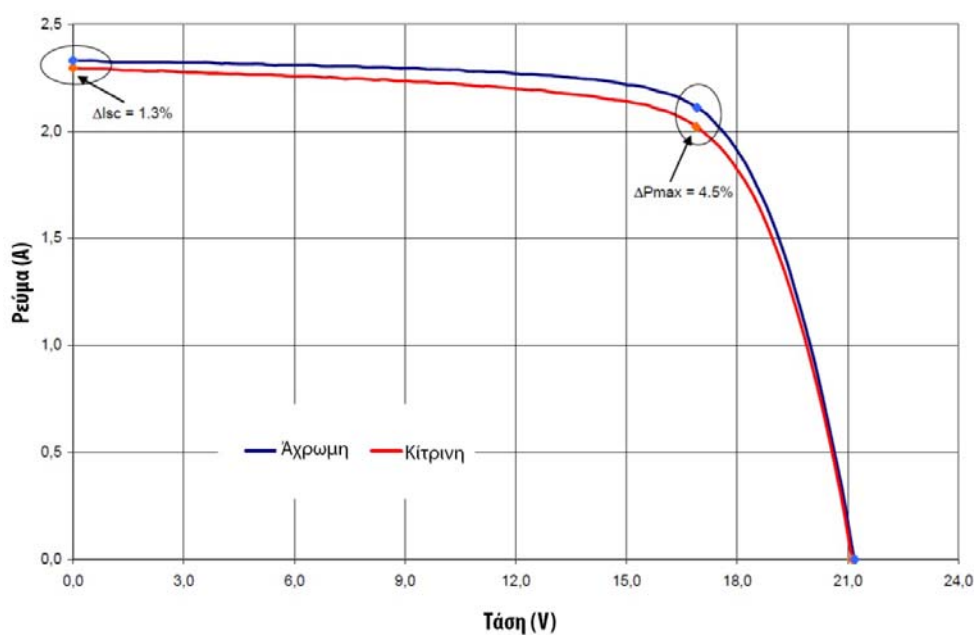
Σχήμα 3.5. Αποχρωματισμένα στρώματα EVA σε συστοιχία Φ/Β πλαισίων [11].

Σε μια μεμβράνη EVA, η συγκέντρωση του απορροφητή υπεριώδους ακτινοβολίας (Cyasorb) μειώνεται σταδιακά όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και υπάρχει έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία. Όταν η συγκέντρωση φτάσει σε ένα κρίσιμο χαμηλότερο επίπεδο αρχίζει η αλλοίωση της μεμβράνης, η οποία οδηγεί στον σταδιακό αποχρωματισμό της και την ανάπτυξη οξικού οξέος [11]. Το τελευταίο ευθύνεται και για το καφέ χρώμα της αποχρωματισμένης μεμβράνης (Σχήμα 3.6). Η καφέ, πλέον, μεμβράνη EVA απορροφά σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας στο υπεριώδες και στο ορατό φάσμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των “ωφέλιμων” φωτονίων που απαιτούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και, συνεπώς την υπολειτουργία του Φ/Β πλαισίου. Έχει αποδειχθεί ότι σε συγκεκριμένες περιπτώσεις καφέ αποχρωματισμού, η μείωση της απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου μπορεί να φτάσει ακόμα και στο 50% [12].

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/Β πλαισίου με μη αποχρωματισμένο EVA και ενός ιδίου με EVA κίτρινου χρώματος. Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 3.7, σε περιπτώσεις αλλοίωσης μεμβρανών με κίτρινο αποχρωματισμό η τυπική μείωση στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου κυμαίνεται από 4% έως 6%, αρκετά μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη για την περίπτωση του καφέ αποχρωματισμού [11].



Σχήμα 3.6. Αποχρωματισμός EVA σε σκούρο καφέ χρώμα με εντονότερο αλλοίωση στα κεντρικά τμήματα των ηλιακών κυψελών [12].



Σχήμα 3.7. Απώλειες ισχύος και ρεύματος εξόδου όπως καταγράφονται στην μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V, σε αλλοιωμένη, αποχρωματισμένη μεμβράνη EVA κίτρινου χρώματος [11].

Ο κυριότεροι παράγοντες που οδηγούν στον αποχρωματισμό μιας μεμβράνης EVA είναι:

- Το πάχος και η σύσταση (βάσει της φόρμουλας παρασκευής) της ίδιας της μεμβράνης
- Η απώλεια του απορροφητή Cyasorb
- Οι συνθήκες της χημικής διαδικασίας σκλήρυνσης των πολυμερών στρωμάτων (curing)
- Η ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας

- Η ικανότητα απορρόφησης υπεριώδους ακτινοβολίας από το υλικό του υπερστρώματος.
- Η διαπερατότητα σε αέρια των πολυμερών υλικών του πλαισίου
- Η διαδικασία συσσωμάτωσης όλων των στρωμάτων που απαρτίζουν ένα πλαίσιο (encapsulation-lamination).

Σε πραγματικές συνθήκες πεδίου, τα Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου λειτουργούν συνήθως σε θερμοκρασίες 40 ± 10 °C (όταν είναι εγκατεστημένα στο έδαφος) ή 70 ± 10 °C (όταν είναι εγκατεστημένα σε οροφή). Σύμφωνα με έρευνες, η επίδραση της φωτοθερμικής καταπόνησης ενός Φ/Β πλαισίου στην πρόκληση αποχρωματισμού του στρώματος της μεμβράνης EVA, υπερισχύει σε σχέση με την αντίστοιχη της θερμικής καταπόνησης. Συγκεκριμένα, η θέρμανση της μεμβράνης EVA ενός Φ/Β πλαισίου σε ειδικούς θαλάμους (φούρνους) δοκιμών, σε θερμοκρασίες 85 ± 2 °C για 198 ημέρες και χωρίς ηλιακό φως, προκάλεσε ελαφρύ κίτρινο αποχρωματισμό και μείωση της απόδοσης του πλαισίου κατά περίπου 3%. Αντίστοιχα, η έκθεση του ίδιου τύπου πλαισίου σε υπεριώδη ακτινοβολία (με χρήση ειδικών UV λαμπτήρων) σε θερμοκρασία 85 ± 2 °C και για το ίδιο χρονικό διάστημα (198 ημέρες), προκάλεσε καφέ αποχρωματισμό της μεμβράνης EVA και μείωση της απόδοσης του πλαισίου κατά 15-19% [13].

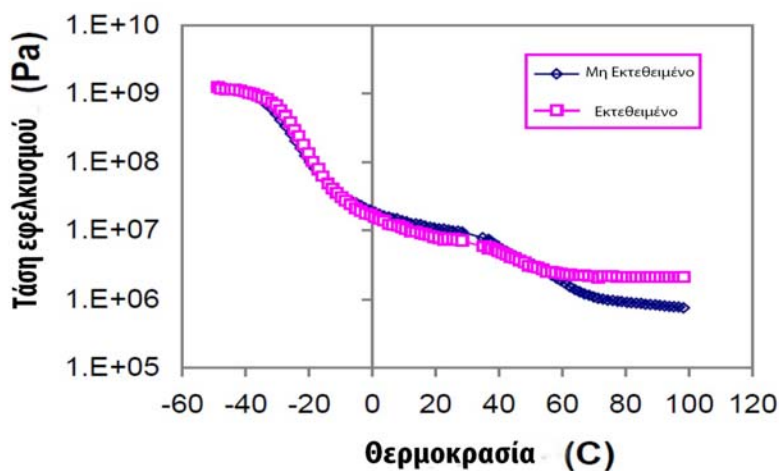
3.2 Ανακλαστικότητα και απώλεια ελαστικότητας του EVA

Κατά την έκθεση ενός Φ/Β πλαισίου στις περιβαλλοντικές συνθήκες, και με την πάροδο των ετών, οι μηχανικές ιδιότητες του EVA μεταβάλλονται. Από πειραματικές μελέτες, που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα EVA Φ/Β πλαισίων με διαφορετικό βαθμό έκθεσης στο πεδίο, αποδείχθηκε ότι όσο “γηραιότερο” και εντονότερα αποχρωματισμένο (καφέ χρώμα) ήταν το δείγμα, τόσο μικρότερη ελαστικότητα παρουσίαζε [3].

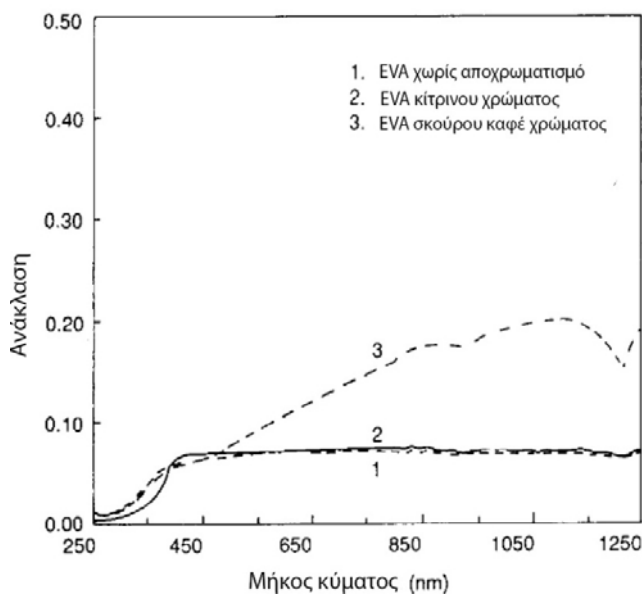
Σε μια απόπειρα να ποσοτικοποιηθεί αυτή η παρατήρηση, συγκριθήκαν οι μετρήσεις ελαστικότητας ενός νέου, μη εκτεθειμένου στο πεδίο, στρώματος EVA και ενός αντίστοιχου το οποίο συλλέχθηκε από ένα Φ/Β πλαίσιο, εκτεθειμένο σε τροπικό κλίμα για διάρκεια 7 ετών [3]. Στην συγκεκριμένη συγκριτική μελέτη, μετρήθηκε η τάση εφελκυσμού της ελαστικότητας των δειγμάτων, συγκριτικά με τη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα (Σχήμα 3.8) έδειξαν ότι τα δυο δείγματα εμφανίζουν παρόμοια ελαστικότητα μέχρι την θερμοκρασία των 50 °C, από την οποία και πάνω, το μη εκτεθειμένο δείγμα αποδεικνύεται πολύ ελαστικότερο από το αντίστοιχο εκτεθειμένο στο πεδίο.

Εκτός, λοιπόν, από την αλλοίωση αποχρωματισμού, ένα στρώμα εκτεθειμένο στο πεδίο, δύναται να υποστεί και απώλεια ελαστικότητας (σκλήρυνση), η οποία με τη σειρά της, λόγω της μη απόλυτα επίπεδης επιφάνειας του πίνακα κυψελών, οδηγεί στην δημιουργία επιφανειακών ανωμαλιών στην πλευρά δικτύου, με αναπόφευκτο αποτέλεσμα μια σημαντική, μη επιθυμητή

αύξηση στην ανακλαστικότητα του EVA. Προφανώς, η αύξηση του συντελεστή ανάκλασης του στρώματος EVA, οδηγεί στην μείωση της απόδοσης του Φ/Β πλαισίου, λόγω της αντίστοιχης μείωσης της απορροφητικότητάς του σε ηλιακή ακτινοβολία. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.9, η ανακλαστική ικανότητα ενός έντονα αλλοιωμένου (με καφέ αποχρωματισμό) EVA είναι διπλάσια απ' ότι στην αρχική και στην περίπτωση του κίτρινου αποχρωματισμού μέχρι τα 800nm μήκος κύματος, και ακόμα μεγαλύτερη για μεγαλύτερα μήκη κύματος [14]. Κατά συνέπεια, το φως που διέρχεται μέσα από την σκούρα καφέ μεμβράνη EVA είναι 14-15% λιγότερο από ότι στην κίτρινη.



Σχήμα 3.8. Σύγκριση τάσης εφελκυσμού της ελαστικότητας για εκτεθειμένο και μη εκτεθειμένο στρώμα EVA στο πεδίο [3].



Σχήμα 3.9. Διάγραμμα ανακλαστικότητας στρωμάτων EVA με αλλοιώσεις αποχρωματισμού διαφορετικού χρώματος [14].

3.3 Βλάβες αποκόλλησης του EVA

Όπως έχει εξηγηθεί, πρωταρχικός ρόλος των στρωμάτων EVA είναι η ένωση (ενθυλάκωση) των διάφορων στρωμάτων που απαρτίζουν το συσσωμάτωμα ενός Φ/Β πλαισίου. Η αποκόλληση αυτών των στρωμάτων (Σχήμα 3.10) συνιστά μία συχνά εμφανιζόμενη βλάβη Φ/Β πλαισίου, η οποία είναι το αποτέλεσμα της απώλειας της δύναμης πρόσφυσης (adhesion strength) μεταξύ του EVA και των στρωμάτων εκατέρωθεν αυτού. Αιτία αυτής της απώλειας είναι η παρατεταμένη έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία και στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η αποκόλληση των στρωμάτων EVA συχνά οδηγεί, με τη σειρά της, σε εκτεταμένη εισχώρηση αέρα και υγρασίας (δημιουργώντας αντίστοιχες φυσαλίδες) και, κατά συνέπεια, μείωση της απόδοσης του Φ/Β πλαισίου ή/και πλήρη αστοχία του [11].

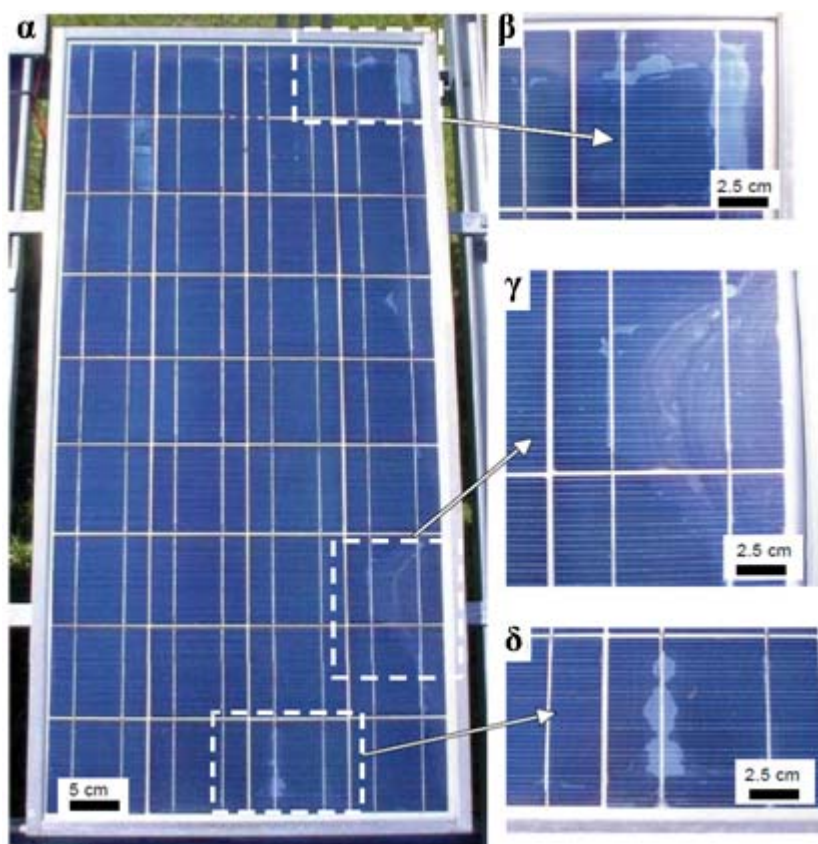


Σχήμα 3.10. Φ/Β πλαίσιο με εκτεταμένη αποκόλληση του στρώματος EVA [4].

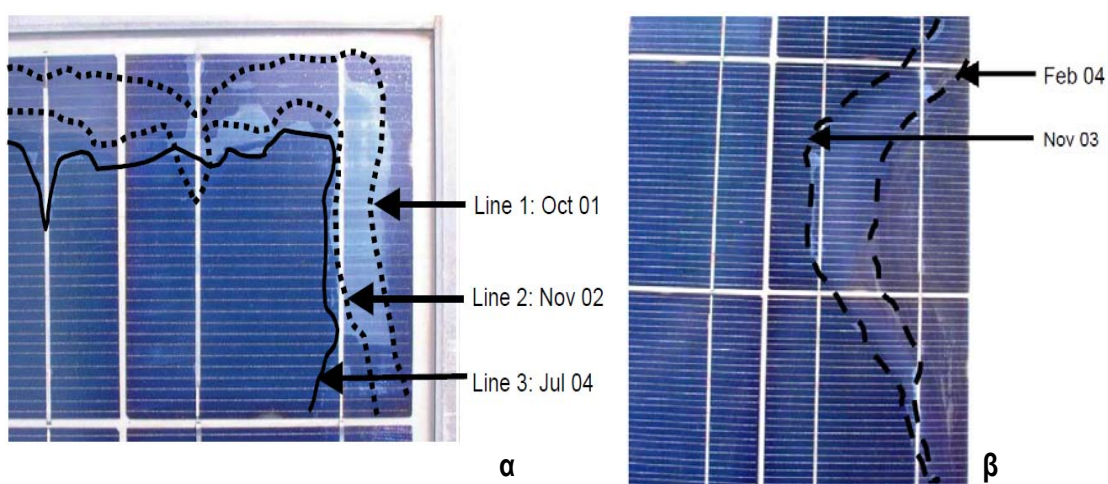
Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται περίπτωση Φ/Β πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου, εγκατεστημένου στην Ν. Αφρική στο οποίο το στρώμα EVA εμφάνισε αποκόλληση σε συγκεκριμένα τμήματα. Σε σύντομο χρονικό διάστημα από την εμφάνιση της αποκόλλησης, το κενό στρώμα που δημιουργήθηκε, σε συνδυασμό με την μικρή υδατοστεγανότητα του πλαισίου, επέτρεψαν την εισχώρηση ανεπιθύμητης υγρασίας. Αυτή η εισχώρηση υγρασίας και ο αποχρωματισμός που δημιουργήθηκε από αυτήν, φαίνονται στο Σχήμα 3.11-γ. Η παρουσία υγρασίας στο πλαίσιο και η συνεχής έκθεση του στο πεδίο, επιδείνωσαν επιπλέον το φαινόμενο της αποκόλλησης της EVA, με συνέπεια τη σημαντική μείωση της απόδοσης του Φ/Β πλαισίου.

Στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζεται η εξέλιξη της βλάβης (αποκόλλησης και διάχυσης υγρασίας) του Σχήματος 3.11-β με τη πάροδο του χρόνου. Εκτός από την αυξητική τάση της αποκόλλησης με την πάροδο του χρόνου (Σχήμα 3.12-α), παρατηρήθηκε διαφοροποίηση της αντίστοιχης διάχυσης υγρασίας, με την πάροδο του χρόνου. Μάλιστα, παρατηρήθηκε και

υποχώρηση (Σχήμα 3.12-β) της υγρασίας κατά τους – θερινούς, για την Ν. Αφρική – μήνες (Νοέμβριο-Φεβρουάριο), παρά το ότι το φαινόμενο της αποκόλλησης συνέχισε να εξελίσσεται.

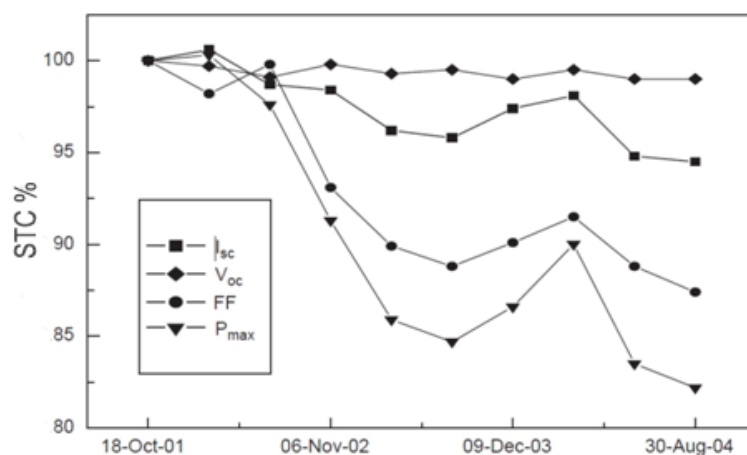


Σχήμα 3.11. Φ/Β πλαίσιο (α) με συγκεκριμένα σημεία αποκόλλησης του στρώματος EVA (β,δ) και εμφάνισης υγρασίας λόγω της αποκόλλησης (γ) [15].

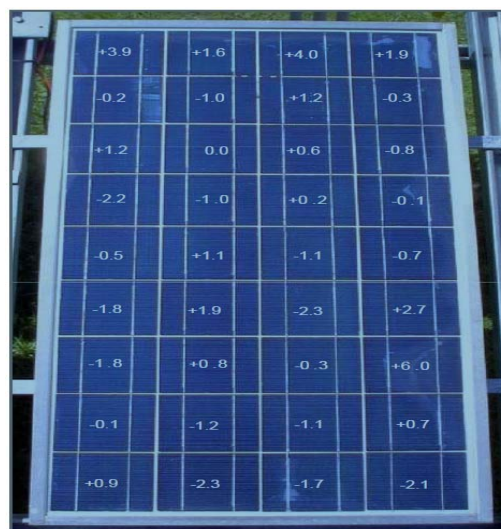


Σχήμα 3.12. Εξέλιξη στον χρόνο του φαινομένου α. της αποκόλλησης και β. της διάχυσης υγρασίας λόγω αποκόλλησης του στρώματος EVA για Φ/Β πλαίσιο του Σχήματος 3.11 [15].

Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται η επί % ποσοστιαία μείωση τεσσάρων βασικών ηλεκτρικών παραμέτρων (I_{sc} , V_{oc} , FF, P_{max}) του συγκεκριμένου “προβληματικού” Φ/Β πλαισίου, συγκριτικά με τις αρχικές μετρήσεις σε STC (100%). Η μείωση του I_{sc} πιθανότατα οφείλεται στην αποκόλληση και τον αποχρωματισμό περιοχών του EVA που συντελούν στην μείωση της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τις αντίστοιχες κυψέλες, ενώ η μείωση στον FF είναι ενδεικτική του αυξανόμενου αριθμού παρασιτικών αντιστάσεων (R_{sh}). Το Φ/Β πλαίσιο εμφάνισε, τελικά, συνολική απόδοση μειωμένη κατά 16% [15]. Διευκρινίζεται ότι, ως αποτέλεσμα του γινομένου των επιμέρους μειώσεων του ρεύματος και της τάσης εξόδου του πλαισίου, η καμπύλη της P_{max} εμφανίζεται με εντονότερη ποσοστιαία μείωση κατά μήκος του χρόνου.



Σχήμα 3.13. Επί % ποσοστιαία μείωση βασικών των I_{sc} , V_{oc} , FF και P_{max} του “προβληματικού” πλαισίου συγκριτικά με τις αρχικές μετρήσεις σε STC (100%) [15].



Σχήμα 3.14. Διαφορά θερμοκρασίας ανά ηλιακή κυψέλη του “προβληματικού” πλαισίου σε σχέση με την μέση τιμή της [15].

Για το ίδιο Φ/Β πλαίσιο, στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται οι διαφορές θερμοκρασίας που μετρώνται σε κάθε ηλιακή κυψέλη, σε σχέση με την μέση θερμοκρασία του πλαισίου, ήτοι 41.1 °C. Σύμφωνα και με το Σχήμα 3.14, παρατηρείται ότι για τις περιοχές του πλαισίου στις οποίες το στρώμα EVA έχει εμφανίσει αποχρωματισμό και αποκόλληση, οι αντίστοιχες ηλιακές κυψέλες εμφανίζουν υψηλότερες θερμοκρασίες έως και κατά 6 °C. Αυτές οι υψηλότερες θερμοκρασίες επιταχύνουν το φαινόμενο της αποκόλλησης αυξάνοντας την έκταση των περιοχών αποκόλλησης του EVA, ενισχύοντας, συνεπώς, την εισχώρηση υγρασίας, οδηγώντας, τελικά, σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης του Φ/Β πλαισίου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, η αποκόλληση του EVA δεν εξελίσσεται ντετερμινιστικά και με ένα σταθερό ρυθμό, με αποτέλεσμα να υπάρχουν Φ/Β πλαίσια με πολλή εντονότερη αποκόλληση από άλλα που ενδέχεται να είναι και τελείως “υγιή”. Δυστυχώς, μέχρι σήμερα, οι υφιστάμενες δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης δεν αποδεικνύονται αποτελεσματικές στην πρόβλεψη και την αποτροπή των μηχανισμών που προκαλούν αποκόλληση, με αποτέλεσμα να γίνεται πολύ δύσκολη η μελέτη της συγκεκριμένης βλάβης σε εργαστηριακό επίπεδο. Σε επίπεδο δε έκθεσης πεδίου, το δείγμα θεωρείται – ακόμη – μη ικανοποιητικό για ασφαλή συμπεράσματα ως προς τον ακριβή μηχανισμό εμφάνισης και εξέλιξης αυτού του τύπου βλάβης. Μέχρι στιγμής, πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι η αποκόλληση εμφανίζεται συχνότερα στη διαχωριστική επιφάνεια EVA και πίνακα ηλιακών κυψελών και πολύ σπανιότερα μεταξύ του EVA και του υπερστρώματος (γυαλιού) [3].

4. ΒΛΑΒΕΣ ΣΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ

Ο πίνακας ηλιακών κυψελών, όντας το τμήμα που αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να θεωρηθεί το σημαντικότερο στοιχείο ενός Φ/Β πλαισίου. Ουσιαστικά, όλα τα στρώματα του συσσωματώματος του πλαισίου, εξυπηρετούν λειτουργίες που σχετίζονται με την βελτιστοποίηση της λειτουργίας, την προστασία και την στήριξη του πίνακα κυψελών. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα υλικά του συσσωματώματος επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας να μην απορροφάται από τα εμπρόσθια στρώματα του πλαισίου, αλλά να διέρχεται από αυτά ώστε να απορροφάται από τις ηλιακές κυψέλες, για την μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια. Βέβαια, πολύ 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. Επιπλέον, 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.

4.1 Θερμές κηλίδες (*hot spots*)

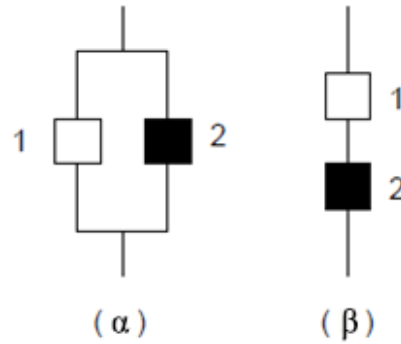
Το φαινόμενο της θερμής κηλίδας (*hot spot*) εμφανίζεται στις ηλιακές κυψέλες ενός Φ/Β πλαισίου, είτε σε περιπτώσεις ελαττωματικού υλικού, είτε λόγω μερικής σκίασης ή λανθασμένης σύνδεσής τους. Σε όλες τις περιπτώσεις πάντως, κοινό σύμπτωμα εμφάνισης θερμής κηλίδας αποτελεί η τοπική υπερθέρμανση των “προβληματικών” κυψελών, η εξέλιξη της οποίας έχει ως αποτέλεσμα – αναλόγως της σοβαρότητας της βλάβης – την εκτεταμένη φθορά ή/και την ολική αστοχία και καταστροφή του πλαισίου.

Από ηλεκτρικής άποψης, το φαινόμενο της θερμής κηλίδας εμφανίζεται όταν υπάρχει τουλάχιστον μία ηλιακή κυψέλη, σε ένα εν λειτουργία Φ/Β πλαίσιο, η οποία εμφανίζει ρεύμα βραχυκύκλωσης ασυνήθιστα χαμηλότερο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες (“υγιείς”) κυψέλες που είναι συνδεδεμένες εν σειρά με αυτήν [16-21]. Τότε, η “προβληματική” κυψέλη “εξαναγκάζεται” να μεταφέρει ρεύμα υψηλότερο από τις δυνατότητές της, πολώνεται ανάστροφα (*reverse bias*), λειτουργώντας κοντά στο κατώφλι κατάρρευσης της διόδου της. Συνακόλουθα, δεν συμπεριφέρεται πλέον ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά 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. Από άποψη μεταφοράς θερμότητας, η σχέση μεταξύ της εναποτιθέμενης θερμικής ενέργειας στην κυψέλη (κυρίως μέσω διάχυσης) και της επακόλουθης αύξησης της θερμοκρασίας της, δίνεται από την Σχέση 3.1. ως [22]:

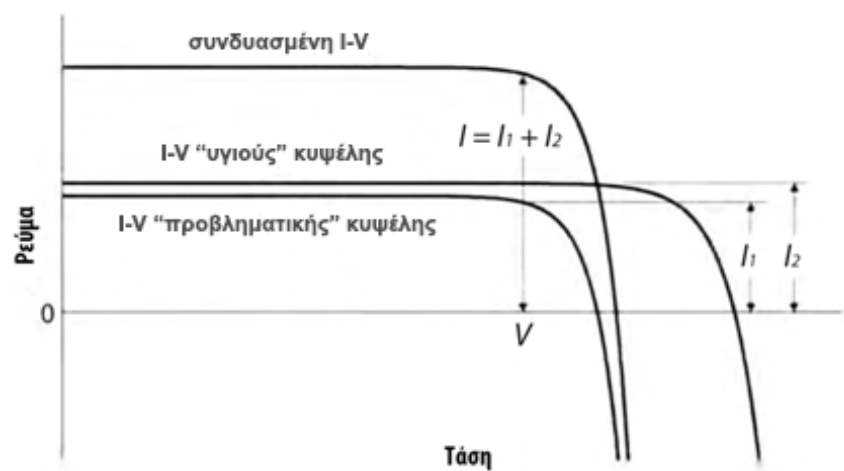
$$\Delta P_{conv} = h \cdot A \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.1)$$

όπου ΔP_{conv} είναι η επιπλέον εναποτιθέμενη θερμική ενέργεια στην κυψέλη (σε W), A η επιφάνεια της κυψέλης (σε m^2), h ο συντελεστής συναγωγιμότητας, ο οποίος για τον αέρα (σε επαφή με την επιφάνεια της κυψέλης) μπορεί να θεωρηθεί ίσος με $10W/m^2K$, T_1 είναι η αρχική θερμοκρασία της κυψέλης (σε K) και T_2 η τελική θερμοκρασία της κυψέλης (σε K), αυξημένη λόγω του φαινομένου της θερμής κηλίδας.

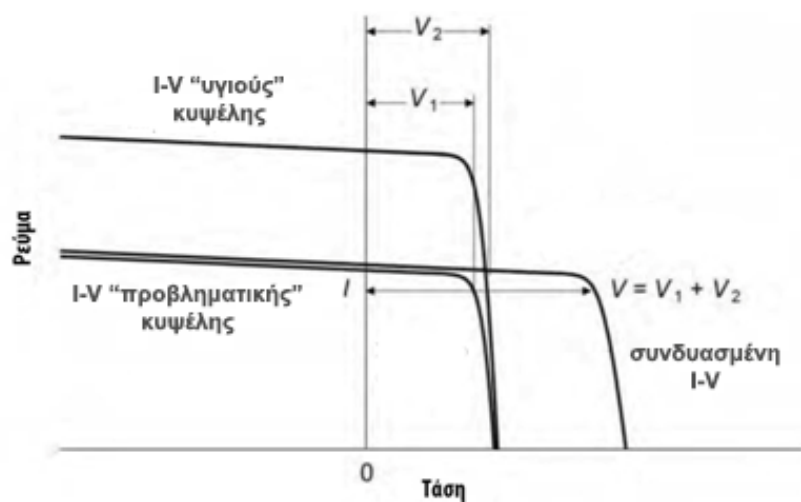
Αναλόγως της συνδεσμολογίας (σε σειρά ή παράλληλα) της “προβληματικής” κυψέλης με τις υπόλοιπες “υγιείς” κυψέλες (Σχήμα 3.15), η χαρακτηριστική καμπύλη I-V του συνολικού κυκλώματος ενός Φ/Β πλαισίου μπορεί να αντιστοιχεί είτε σε αυτήν του Σχήματος 3.16, είτε σε αυτήν του Σχήματος 3.17 αντίστοιχα [23].



Σχήμα 3.15. Συνδεσμολογία “προβληματικής” κυψέλης (α) παράλληλα και (β) σε σειρά με το υπόλοιπο κύκλωμα των “υγιών” κυψελών [23].

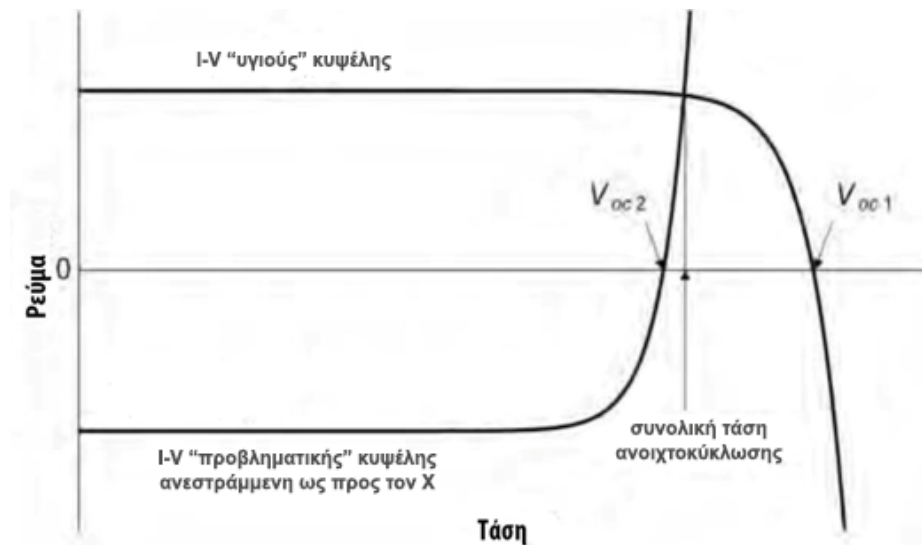


Σχήμα 3.16. Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V κυψελών και Φ/B πλαισίου για την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.15-α [23].

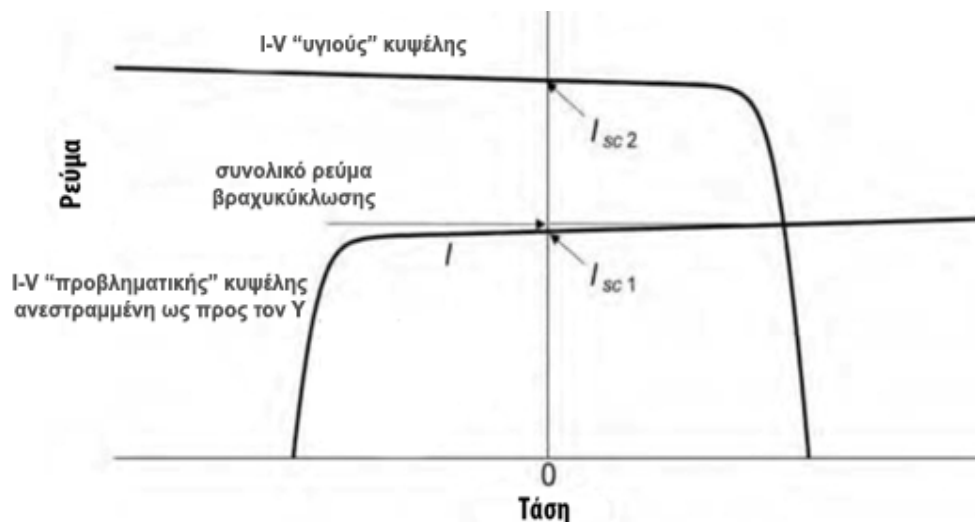


Σχήμα 3.17. Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V κυψελών και Φ/B πλαισίου για την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.15-β [23].

Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, από το Σχήμα 3.16, ότι, για παράλληλη συνδεσμολογία κυψελών, στην συνολική χαρακτηριστική καμπύλη I-V του κυκλώματος του Φ/Β πλαισίου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους ρευμάτων βραχυκύκλωσης I_{sc1} και I_{sc2} . Αντίστοιχα, για εν σειρά συνδεσμολογία κυψελών, σύμφωνα με το Σχήμα 3.17, στην συνολική χαρακτηριστική καμπύλη I-V του κυκλώματος του Φ/Β πλαισίου, η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους τάσεων ανοιχτοκύκλωσης V_{oc1} και V_{oc2} .



Σχήμα 3.18. Γραφικός τρόπος υπολογισμού της συνολικής V_{oc} , για παράλληλη συνδεσμολογία της “προβληματικής κυψέλης” [23].



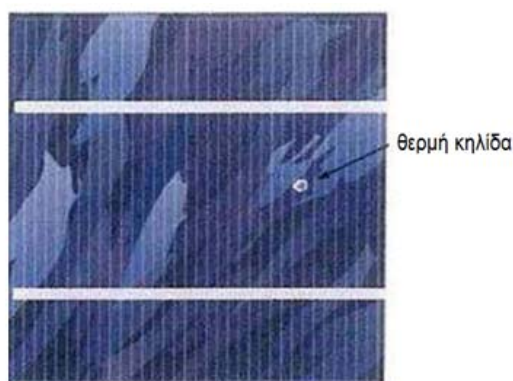
Σχήμα 3.19. Γραφικός τρόπος υπολογισμού του συνολικού I_{sc} , για εν σειρά συνδεσμολογία της “προβληματικής κυψέλης” [23].

Ο υπολογισμός της συνολικής V_{oc} και του συνολικού I_{sc} του κυκλώματος κυψελών, σε παράλληλη και εν σειρά συνδεσμολογία αντίστοιχα, μπορεί να γίνει και με γραφικό τρόπο [23]:

- 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} (Σχήμα 3.18).
- 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} (Σχήμα 3.19).

Η σοβαρότητα (severity) της βλάβης που προκαλείται λόγω μιας θερμής κηλίδας στο ηλεκτρικό κύκλωμα του πίνακα ηλιακών κυψελών, σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα της εναποτιθέμενης θερμότητας σε συνθήκες ανάστροφης πόλωσης και, συνεπώς, με την αύξηση της θερμοκρασίας της κυψέλης (Σχέση 3.1). Τυπικά, μία αύξηση της θερμοκρασίας κυψέλης της τάξεως των 10 °C, επιφέρει μείωση της ισχύος εξόδου κατά περίπου 4% (“ήπια” θερμή κηλίδα ή light hot spot). Αντίστοιχα, αύξηση της θερμοκρασίας κυψέλης κατά 18 °C, επιφέρει μείωση της ισχύος εξόδου κατά περίπου 10% (“οξεία” θερμή κηλίδα ή “strong” hot spot) [24].

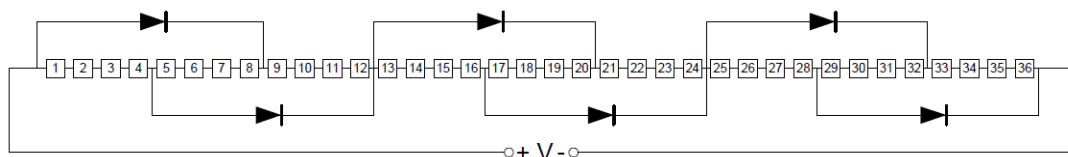
Κατά τα πρώτα στάδια εμφάνισής της, μια θερμή κηλίδα δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι, ούτε επιφέρει κάποια οπτική αλλοίωση στον πίνακα ηλιακών κυψελών. Μπορεί ωστόσο να ανιχνευτεί εγκαίρως με κατάλληλη θερμομέτρηση ή θερμογράφηση του Φ/Β πλαισίου. Όσο το Φ/Β πλαίσιο συνεχίζει να εκτίθεται στο πεδίο (και συνεπώς σε επιπλέον θερμομηχανική καταπόνηση και παράγοντες φθοράς ή βλαβών), η θερμή κηλίδα ενδέχεται να αρχίσει να δημιουργεί, ορατές πλέον, μορφολογικές αλλοιώσεις στο υλικό της “προβληματικής” κυψέλης (Σχήμα 3.20). Κατά την εξέλιξη της θερμής κηλίδας, αναλόγως της σοβαρότητάς της, η ηλιακή κυψέλη μπορεί να υποστεί ραγίσματα, θραύσεις ή ακόμα και τήξη (λιώσιμο) των μεταλλικών μερών της. Περιπτώσεις τέτοιων αστοχιών λόγω θερμών κηλίδων, είναι δυνατόν να αποφευχθούν με τη χρήση διόδων διαφυγής (bypass diodes).



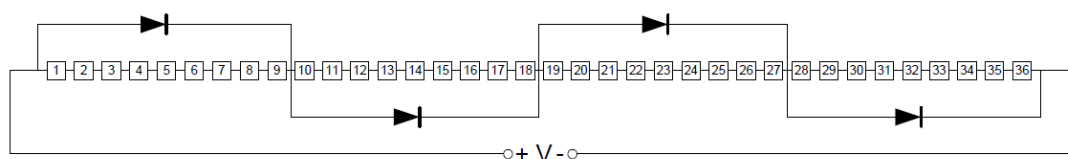
Σχήμα 3.20: Ορατή θερμή κηλίδα σε ηλιακή κυψέλη [7].

Η δίοδος διαφυγής συνδέεται αντιπαράλληλα με μία σειρά (string) ηλιακών κυψελών. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, κάθε κυψέλη είναι ορθά πολωμένη και, συνεπώς, η ανάστροφα πολωμένη δίοδος διαφυγής δεν άγει. Όταν εμφανιστούν συνθήκες δημιουργίας θερμής κηλίδας, όταν δηλαδή μία τουλάχιστον ηλιακή κυψέλη πολωθεί ανάστροφα (ή, ισοδύναμα, όταν εμφανισθεί διαφορά στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως μεταξύ ορισμένων ηλιακών κυψελών), η δίοδος διαφυγής πλέον άγει και προστατεύει την “προβληματική” κυψέλη και, συνεπώς, όλο το κύκλωμα ηλιακών κυψελών, από τις επιπτώσεις μιας ενδεχόμενης θερμής κηλίδας.

Πρακτικά, για την πλήρη προστασία ενός Φ/Β πλαισίου από φαινόμενα θερμών κηλίδων, θα έπρεπε να αντιστοιχεί μια δίοδος διαφυγής για κάθε ηλιακή κυψέλη, κάτι το οποίο όμως είναι ανέφικτο λόγω του επακόλουθου υψηλού κόστους του τελικού κυκλώματος. Η συνηθέστερη, λοιπόν, πρακτική είναι η χρησιμοποίηση μίας δίοδου διαφυγής κατά μήκος μιας ομάδας κυψελών. Ο μέγιστος αριθμός κυψελών που δύναται να καλύπτει μία δίοδος διαφυγής είναι 15 με 18, για Φ/Β πλαίσια πυριτίου. Οριακά λοιπόν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν 2 δίοδοι διαφυγής για ένα τυπικό πλαίσιο 36 κυψελών. Ωστόσο, για λόγους ασφαλείας, χρησιμοποιούνται συχνά 4 δίοδοι διαφυγής (ανά 9 κυψέλες) ώστε το Φ/Β πλαίσιο να καθίσταται λιγότερο ευάλωτο στο φαινόμενο των θερμών κηλίδων. Όσον αφορά την τελική τοποθέτηση των δίοδων διαφυγής, οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν δύο τρόπους αλληλοεπικάλυψης ή μη των ηλιακών κυψελών (Σχήματα 3.21 - 3.22) [23].



Σχήμα 3.21. Τοποθέτηση διόδων διαφυγής με αλληλεπικαλυπτόμενες κυψέλες [7].



Σχήμα 3.22. Τοποθέτηση διόδων διαφυγής με μη αλληλεπικαλυπτόμενες κυψέλες [7].

4.2 Βλάβες συγκολλήσεων

Ο όρος *δεσμοί συγκόλλησης* (solder bonds) αναφέρεται στις συγκολλήσεις των ηλιακών κυψελών με τα ειδικά σύρματα διασύνδεσης (ribbons) ενός πίνακα ηλιακών κυψελών και αποτελούνται κυρίως από μίγμα κασσιτέρου και μόλυβδου. Οι κυριότερες βλάβες που

εμφανίζονται στις συγκολλήσεις του πίνακα κυψελών ενός πλαισίου, είναι η αύξηση της αντίστασης σειράς (R_s) και η εμφάνιση θερμών κηλίδων στους δεσμούς.

ο 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). Όπως έχει προαναφερθεί, μεγάλες τιμές της R_s οδηγούν σε σημαντική μείωση της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων. Όσο αυξάνεται ο χρόνος λειτουργίας ενός Φ/Β πλαισίου στο πεδίο, η συνακόλουθη σταδιακή αύξηση της R_s οδηγεί σε ετήσια μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος μέχρι και 0.5%. Κατά κανόνα, οι σχεδιαστές και οι κατασκευαστές Φ/Β πλαισίων προσπαθούν να μειώνουν κατά το δυνατόν περισσότερο τις απώλειες που οφείλονται στην R_s , είτε σε επίπεδο ηλιακών κυψελών είτε σε επίπεδο συνδέσεων και επαφών στο πλαίσιο. Ωστόσο, οι δεδομένες θερμομηχανικές επιδράσεις του ημερήσιου και του ετήσιου θερμικού κύκλου στο πεδίο, αναπόφευκτα οδηγούν σε πάγια αύξηση της R_s .

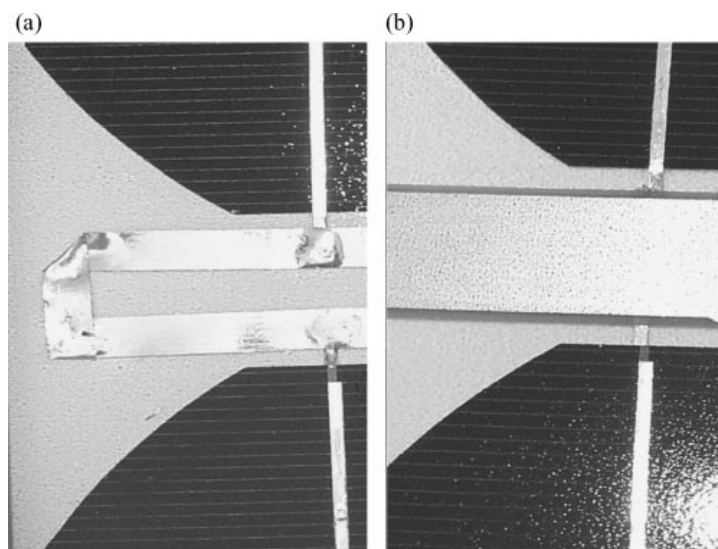
Σε ερευνητική μελέτη, διαπιστώθηκε ότι οι θερμικές διαστολές και συστολές που υφίστανται οι συγκολλήσεις σε συνθήκες πεδίου αποτελούν την κυρίαρχη αιτία αύξησης της R_s σε αυτές [3]. Συγκεκριμένα, λόγω αυτών των θερμικών διαστολών και συστολών, τα μεταλλικά στοιχεία των συγκολλήσεων γίνονται περισσότερο εύθραυστα, με αποτέλεσμα την φθορά τους και τη διάσπασή τους σε κόκκους κασσίτερου και μολύβδου. Σε ακραίες περιπτώσεις μάλιστα, οι μηχανικές αυτές τάσεις, ενδέχεται να οδηγήσουν μέχρι και στη θραύση των συγκολλήσεων, οδηγώντας, φυσικά, σε ραγδαία αύξηση της αντίστασης R_s .

ο Θερμές κηλίδες στους δεσμούς συγκολλήσεων

Το φαινόμενο των θερμών κηλίδων στους δεσμούς συγκολλήσεων (Σχήμα 3.23), σχετίζεται συνήθως με δεσμούς συγκολλήσεων πολύ υψηλής αντίστασης και αναφέρεται συχνά και ως RSB (resistive solder bonds). Ερευνητική μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε Φ/Β πάρκο στην Ισπανία [25] έδειξε ότι οι θερμές κηλίδες στους δεσμούς συγκολλήσεων είναι πιθανότερο να εμφανιστούν σε πλαίσια και πίνακες ηλιακών κυψελών με συγκολλήσεις και υλικά συγκολλήσεων χαμηλής ποιότητας. Στο Σχήμα 3.24 παρουσιάζεται η σύγκριση πινάκων κυψελών με δεσμούς συγκολλήσεων κακής και καλής ποιότητας (Σχήμα 3.24-α και Σχήμα 3.24-β αντίστοιχα). Παρόλο που το φαινόμενο αυτό είναι σπάνιο, έχει μεγάλη επίδραση στην μείωση της απόδοσης του Φ/Β πλαισίου και ενίοτε σχετίζεται με την ανάπτυξη υψηλότατων θερμοκρασιών στο Φ/Β πλαίσιο ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) οι οποίες, όπως είναι φυσικό, ενδέχεται να προκαλέσουν εκτεταμένη καταστροφή, πυρκαγιά και, φυσικά, τήξη των υλικών του πλαισίου.



Σχήμα 3.23. Εμφάνιση θερμών κηλίδων στους δεσμούς συγκολλήσεων του πίνακα ηλιακών κυψελών [25].

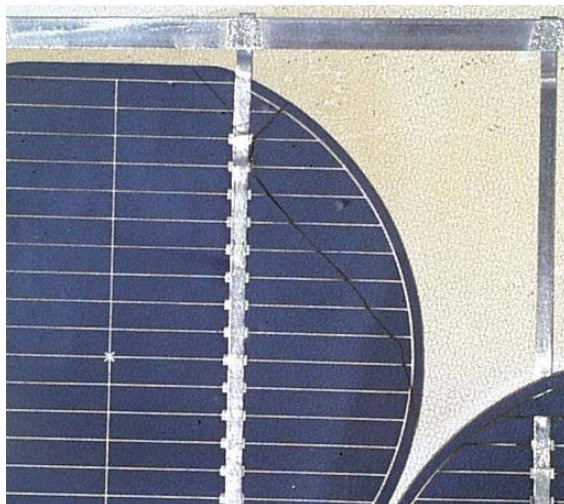


Σχήμα 3.24. Πίνακας ηλιακών κυψελών με δεσμούς συγκολλήσεων **α.** κακής ποιότητας και **β.** καλής ποιότητας [25].

4.3 Ρωγμές και θραύση ηλιακών κυψελών

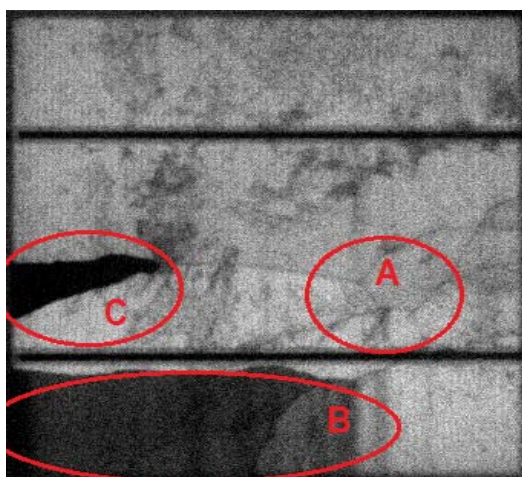
Οι ρωγμές (cracks) και η θραύση (breakage) στις ηλιακές κυψέλες (Σχήμα 3.25) προκύπτουν κυρίως από μηχανικές τάσεις ή συνδυασμό θερμομηχανικών καταπονήσεων. Λόγω του πολύ μικρού πάχους του πίνακα ηλιακών κυψελών (<0.5 mm), ουσιαστικά όλες οι ηλιακές κυψέλες εμφανίζουν ρωγμές ή μικρορωγμές (microcracks) στη διάρκεια ζωής τους. Το ζητούμενο

για την αποτίμηση της σοβαρότητας αυτού του τύπου βλαβών, είναι να προσδιοριστεί ο βαθμός επιρροής της κάθε ρωγμής στην απόδοση ολόκληρου του Φ/Β πλαισίου [26].



Σχήμα 3.25. Ρωγμή σε ηλιακή κυψέλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου[11].

Στην ηλιακή κυψέλη του Σχήματος 3.26 παρουσιάζονται τρεις διαφορετικοί τύποι ρωγμών και θραύσεων. Ο τύπος “Α” δεν επηρεάζει ουσιαστικά την απόδοση της κυψέλης καθώς δεν επιφέρει αύξηση της αντίστασής της, όπως συμβαίνει στις άλλες δυο περιπτώσεις. Στον τύπο “Β” παρουσιάζεται μεν αυξημένη αντίσταση, ωστόσο δεν υπάρχει πλήρης αποκόλληση Φ/Β υλικού από την κυψέλη, όπως συμβαίνει στην – σοβαρότερη – περίπτωση του τύπου “C”.

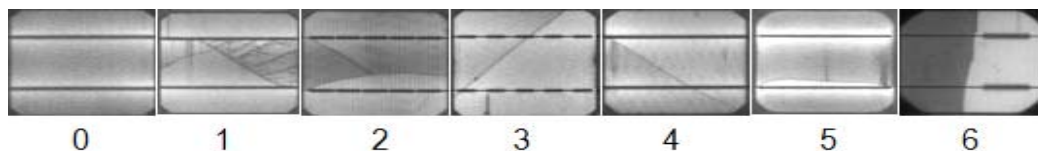


Σχήμα 3.26. Ηλιακή κυψέλη με τρεις τύπους ρωγμών και θραύσεων [26].

Έχει αποδειχθεί ότι μικρές ρωγμές σε ολιγάριθμες ηλιακές κυψέλες δεν επιφέρουν σοβαρή απώλεια ισχύος εξόδου ενός Φ/Β πλαισίου [26]. Είναι μάλιστα αξιοσημείωτο ότι ακόμα και η ύπαρξη μικρών ρωγμών στις μισές κυψέλες ενός πλαισίου, επιφέρει απώλεια ισχύος μόλις

κατά 1%. Στην περίπτωση δε όπου όλες οι κυψέλες ενός Φ/Β πλαισίου φέρουν μικρές ρωγμές, τότε εμφανίζεται μια απώλεια ισχύος μόλις κατά 2.5%. Όσον αφορά πάντως, συγκεκριμένα στον τύπο “C” του Σχήματος 3.26, πειραματικές μετρήσεις έδειξαν πως η απώλεια υλικού δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 8% της συνολικής επιφάνειας της ηλιακής κυψέλης, καθώς σε περιπτώσεις μεγαλύτερης απώλειας, εμφανίζεται σημαντικός κίνδυνος δημιουργίας θερμής κηλίδας η οποία θα οδηγήσει σε άμεση απώλεια ισχύος του Φ/Β πλαισίου.

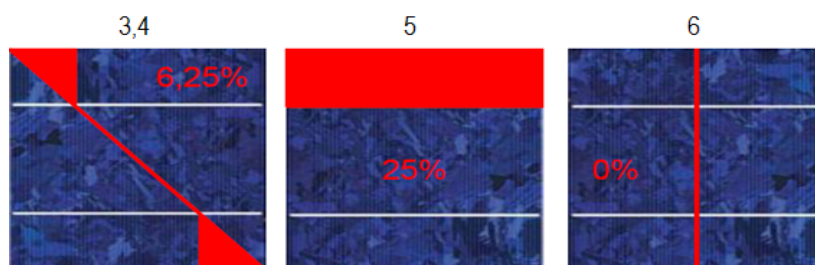
Σε πρόσφατη μελέτη [26], προτείνεται η ταξινόμηση των ρωγμών ηλιακών κυψελών βάσει μιας κλίμακας από 0 έως 6 και με κριτήριο όχι την απώλεια επιφάνειας, αλλά την γεωμετρία τους (Σχήμα 3.27). Διευκρινίζεται ότι η κλίμακα αυτή δεν αποτελεί κλίμακα διαβάθμισης κατάστασης (π.χ. από την καλύτερη στη χειρότερη), αλλά μία κλίμακα διακριτών περιπτώσεων γεωμετρίας των ρωγμών.



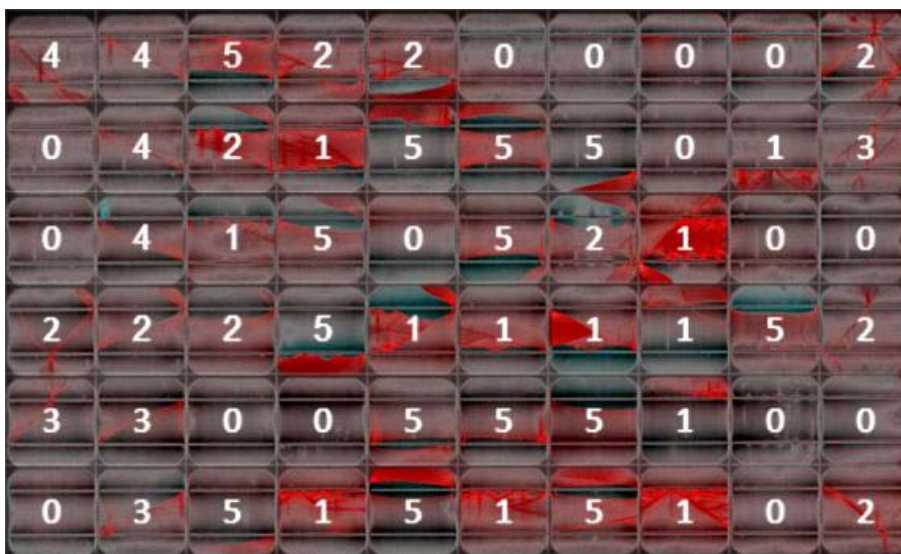
Σχήμα 3.27. Ταξινόμηση ρωγμών ηλιακών κυψελών [26]:

0. καμία ρωγμή, 1. δενδροειδής ρωγμή, 2. πολλαπλή ρωγμή, 3. +45° διαγώνια ρωγμή,
4. -45° διαγώνια ρωγμή, 5. παράλληλη ρωγμή, 6. κάθετη ρωγμή

Όπως αναφέρεται στην ίδια μελέτη [26], οι περιπτώσεις 1,2 και 5 είναι αυτές που προκαλούν τη μεγαλύτερη απώλεια επιφάνειας. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το Σχήμα 3.28 η (χειρότερη) περίπτωση 5 οδηγεί σε απώλειες επιφάνειας κατά περίπου 25%. Επίσης, οι περιπτώσεις 3 και 4 οδηγούν σε απώλειες της τάξεως του 6.25%, ενώ τέλος, στην περίπτωση 6 (όπως προφανώς και στην 0) δεν παρατηρούνται απώλειες επιφάνειας. Με άλλα λόγια, οι κάθετες – ως προς τις επαφές διασύνδεσης των κυψελών – ρωγμές δεν επιφέρουν καμία μείωση στην απόδοση μιας ηλιακής κυψέλης, καθώς δεν οδηγούν σε απώλειες ενεργού επιφάνειας. Στο Σχήμα 3.29 απεικονίζεται η ανάλυση και η ταξινόμηση των ρωγμών ενός Φ/Β πλαισίου βάσει της κλίμακας που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.27.



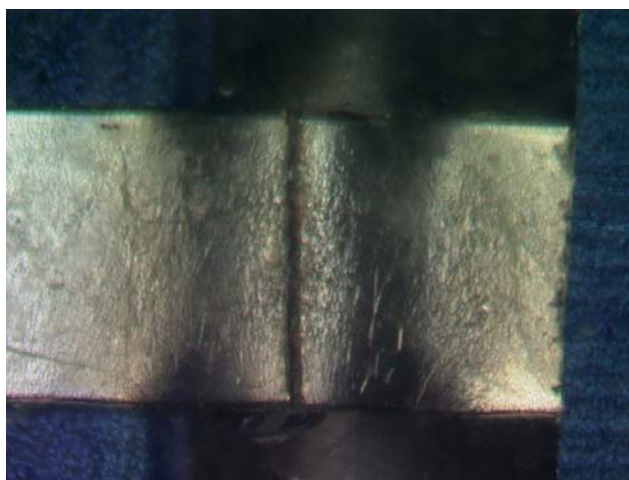
Σχήμα 3.28. Ποσοστό της απώλειας ενεργού επιφάνειας κυψελών, για τις περιπτώσεις ρωγμών του Σχήματος 3.27 [26].



Σχήμα 3.29. Προσδιορισμός τύπων ρωγμών Φ/Β πλαίσιο βάσει της ταξινόμησης του Σχήματος 3.27 [26].

4.4 Βλάβες εσωτερικών διασυνδέσεων

Τυπικά, οποιαδήποτε επαφή εσωτερικής διασύνδεσης (busbar) δύναται να υποστεί ρήξη (Σχήμα 3.30) λόγω μηχανικών (πρωτίστως) και θερμικών τάσεων που ασκούνται από την επαναλαμβανόμενη συστολή και διαστολή των υλικών, κατά τους ετήσιους και ημερήσιους θερμικούς κύκλους λειτουργίας ενός πλαισίου στο πεδίο. Άμεση επίπτωση μιας τέτοιας ρήξης είναι η αύξηση της αντίστασης σειράς, με επακόλουθο κίνδυνο ανάπτυξης θερμής κηλίδας. Τρόποι πρόληψης αυτού του τύπου βλαβών είναι η χρήση υλικών υψηλής αντοχής και η διαμόρφωση – κατά το δυνατόν – λεπτότερων διασυνδέσεων ώστε να παρέχεται μεγαλύτερη ελαστικότητα και, κατά συνέπεια, αντοχή στις συστολές και τις διαστολές [9].



Σχήμα 3.30. Καταπονημένη διασύνδεση κυψέλης, στο όριο ολικής ρήξης της [9].

4.5 Μεταλλική διάβρωση

Στους πίνακες ηλιακών κυψελών, η διάβρωση των μεταλλικών στοιχείων (Σχήμα 3.31) και 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 στην Υποενότητα 2.2, η είσοδος της υγρασίας στο πλαίσιο γίνεται συνήθως μέσω του υποστρώματος και των ακμών του πλαισίου.



Σχήμα 3.31. Διάβρωση στις μεταλλικές διασυνδέσεις ενός πίνακα ηλιακών κυψελών [27].

Το στρώμα EVA, κατά την έκθεσή του σε συνθήκες πεδίου, όπως νερό (υγρασία), θερμότητα και υπεριώδης ακτινοβολία, αποσυντίθεται και παράγει οξικό οξύ. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση του pH της ενθυλάκωσης με συνακόλουθη αύξηση των επιπέδων επιφανειακής διάβρωσης. Έχει παρατηρηθεί ότι με τη διοχέτευση στην ατμόσφαιρα, των πτητικών ουσιών (κυρίως οξικού οξέως), που παράγονται 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 [28].

Λόγω της διάβρωσης των διαφόρων μεταλλικών επαφών, των busbars και των διασυνδέσεων, επέρχεται αύξηση της συνολικής τιμής, τόσο της αντίστασης διακλάδωσης (R_{sh}), όσο και της αντίστασης σειράς (R_s) του πλαισίου, με αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής του απόδοσης. Από ενδεικτικά πειραματικά αποτελέσματα βρέθηκε πως, κατόπιν 150 ημερών γήρανσης ενός πλαισίου, η εμφάνιση διάβρωσης σε αυτό επέφερε σημαντική αύξηση της R_s , μείωση του FF και, συνεπώς, σημαντική μείωση της απόδοσης του πλαισίου. Μάλιστα, η μείωση της απόδοσης, άγγιξε το 60% μετά από 3750 ώρες εργαστηριακής επιταχυνόμενης γήρανσης, οι οποίες προσεγγιστικά αντιστοιχούν σε 75 χρόνια έκθεσης στο πεδίο [5].



5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν η φύση, τα αίτια και τα αποτελέσματα των κυριότερων βλαβών σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου, όπως αυτές καταγράφηκαν στην υφιστάμενη σχετική βιβλιογραφία και στα δεδομένα/ιστορικά εγκαταστάσεων Φ/Β συστημάτων σε παγκόσμια κλίμακα. Όντας το αντικείμενο εφαρμογής της συγκεκριμένης Διδακτορικής Διατριβής, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε σε εκείνους τους τύπους βλαβών που πρωτίστως σχετίζονται με Φ/Β πλαίσια τεχνολογίας κρυσταλλικού πυριτίου. Ως κύριο κίνητρο για τη διεξαγωγή αυτής της βιβλιογραφικής έρευνας, αποτέλεσε η ανάγκη προσδιορισμού εκείνων των τύπων βλαβών, που επιφέρουν αλλαγή στο θερμικό αποτύπωμα των Φ/Β πλαισίων και, συνεπώς, μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλοι για διάγνωση ή/και πρόγνωση με την εφαρμογή της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας. Η σύνοψη των χαρακτηριστικών των κυριότερων βλαβών που παρουσιάστηκαν σε αυτό το Κεφάλαιο, δίνεται στον Πίνακα 3.1 [29].

Πίνακας 3.1. Σύνοψη κυριότερων βλαβών σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου.

Βλάβη	Αίτια	Αποτέλεσμα
Θραύση υπερστρώματος (γυαλιού)	Μηχανική φόρτιση – κρούση	Εισχώρηση υγρασίας – απώλεια μηχανικής αντοχής
Ρωγμή υποστρώματος (Tedlar)	Θερμοκρασία	Εισχώρηση υγρασίας – απώλεια μηχανικής αντοχής
Αποκόλληση υποστρώματος (Tedlar)	Υγρασία	Εισχώρηση υγρασίας – απώλεια μηχανικής αντοχής
Βλάβη στο πλαίσιο	Κατασκευαστικό σφάλμα – μη επαρκής σχεδιομελέτη	Εισχώρηση υγρασίας - απώλεια στήριξης
Αποχρωματισμός του EVA	UV ακτινοβολία – υγρασία – θερμοκρασία	Υψηλή απορρόφηση ακτινοβολίας στο EVA – μείωση στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου
Απώλεια ελαστικότητας του EVA	UV ακτινοβολία – υγρασία – θερμοκρασία	Υψηλή ανάκλαση ακτινοβολίας – μείωση στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου
Αποκόλληση του EVA	UV ακτινοβολία – υγρασία – θερμοκρασία	Εισχώρηση υγρασίας – μείωση στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου
Βλάβη συγκολλήσεων	Θερμική φόρτιση	Αύξηση της αντίστασης σειράς – κίνδυνος δημιουργίας θερμής κηλίδας
Ρωγμή ή/και θραύση κυψελών	Θερμική/μηχανική φόρτιση	Απώλεια επιφάνειας των στοιχείων – μείωση στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου
Θερμή κηλίδα	Σκίαση – ρωγμή – θραύση – κακή συγκόλληση	Εκτεταμένη φθορά ή/και τήξη τμημάτων του πλαισίου – μείωση στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου
Ρωγμή στις διασυνδέσεις των κυψελών	Θερμική φόρτιση	Αύξηση της αντίστασης σειράς – κίνδυνος δημιουργίας θερμής κηλίδας
Διάβρωση μεταλλικών στοιχείων	Διάχυση υγρασίας	Αύξηση των αντιστάσεων διακλάδωσης και σειράς – μείωση στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου



Με βάση τον Πίνακα 3.1 και τα χαρακτηριστικά κάθε τύπου βλάβης που παρουσιάστηκαν στον παρόν Κεφάλαιο, διαφαίνεται ότι η υπέρυθρη θερμογράφηση ενός Φ/Β πλαισίου εμφανίζει εξαιρετική προοπτική εφαρμογής διάγνωσης ή/και πρόγνωσης των κυριότερων τύπων βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, όπως:

- Αποχρωματισμοί και αποκολλήσεις του στρώματος EVA (encapsulation/delamination faults και “bubbles”)
- Βλάβες συγκολλήσεων και εσωτερικών συνδέσεων (interconnection mismatches και string/busbar misalignments)
- Ρωγμές ή/και θραύσεις κυψελών (cracks/microcracks και cell breakages)
- Θερμές κηλίδες (hot spots)

Αφήνοντας πλέον, το ευρύ πεδίο των Φ/Β πλαισίων και των βλαβών τους, το οποίο μελετήθηκε στα Κεφάλαια 2 και 3, η παρούσα Διδακτορική Διατριβή συνεχίζεται με το Κεφάλαιο 4, όπου παρουσιάζονται, με – κατά το δυνατόν – συνοπτικό, περιεκτικό και κατανοητό τρόπο το θεωρητικό υπόβαθρο, οι κυριότερες προσεγγίσεις και οι βασικότερες εφαρμογές και πρακτικές της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. J.W. Pankow and S.H. Glick, "Plasma Surface Modification of Polymer Backsheets: Origins of Future Interfacial Barrier/Backsheet Failure", National Renewable Energy Laboratory, Colorado, U.S.A., 2006.
2. A. Luque and S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", Wiley-Interscience, Chichester, United Kingdom, 2003.
3. 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.
4. K. Masuda, "Results of Field Tests in Japan", Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories (JET), 2011.
5. N.G. Dhere, "Reliability of PV modules and balance-of-system components", Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral (Florida), USA, 2005.
6. 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.



7. 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.
8. Z. Xia, J.H. Wohlgemuth and D.W. Cunningham, "A lifetime prediction of PV encapsulant and backsheet via time temperature superposition principle", BP Solar International Inc., Frederic, Maryland, USA, 2009.
9. J. Wohlgemuth, "Module Component of PV Tutorial", National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, 2010.
10. F.J. Pern, "Luminescence and absorption Characterization of ethylene-vinyl acetate encapsulant for PV modules before and after weathering degradation", Polymer Degradation and Stability, 41, 1993.
11. A. Realini, "MTBF – PVm Mean Time Before Failure of Photovoltaic modules", Federal Office for Education and Science, 2003.
12. E.L. Meyer and E. van Dyk, "Assessing the Reliability and Degradation of Photovoltaic Module Performance Parameters", IEEE Transactions on Reliability, 53(1), 2004.
13. F.J. Pern, "Ethylene-vinyl acetate (EVA) encapsulants for photovoltaic modules: degradation and discoloration mechanisms and formulation modifications for improved photostability", Die Angewandte Makromolekulare Chemie, 252, 1997.
14. F.J. Pern and A.W. Czanderna, "Characterization of ethylene vinyl acetate (EVA) encapsulant: Effects of thermal processing and weathering degradation on its discoloration", Solar Energy Materials and Solar Cells, 25, 1992.
15. J.B. Chamel, E.E. van Dyk and A.R. Gxasheka, "Investigation of delamination in an edge-defined film-fed growth photovoltaic module", Solar Energy Materials & Solar Cells, 88, 2005.
16. 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.
17. 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.
18. M. Simon and E.L. Meyer, "Detection and Analysis of Hot-spot Formation in Solar Cells", Solar Energy Materials & Solar Cells, 94, 2010.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
 22. J.A. Tsanakas, D. Chrysostomou, P.N. Botsaris and A. Gasteratos, "Fault Diagnosis of Photovoltaic Modules through Image Processing and Canny Edge Detection on Field Thermographic Measurements", ASME Journal of Solar Energy Engineering, (in press 2013).
 23. 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.
 24. 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.
 25. J. Munoz, E. Lorenzo, F. Martinez-Moreno, L. Marroyo and M. Garcia, "An Investigation into Hot-Spots in Two Large Grid-Connected PV Plants", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 16, 2008.
 26. M. Kontges, I. Kunze, S. Kajari-Schroder, X. Breitenmoser and B. Bjorneklett, "Origin and Consequences of (Micro)-Cracks in Crystalline Silicon Solar modules", National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, 2011.
 27. 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", TUV Rheinland, 2012.
 28. 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.
 29. Κ. Μουσταφέας, "Μελέτη και ανάλυση λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων: Σφάλματα σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας", Διπλωματική Εργασία, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Ξάνθη, 2012.



Περιεχόμενα

Σελίδα

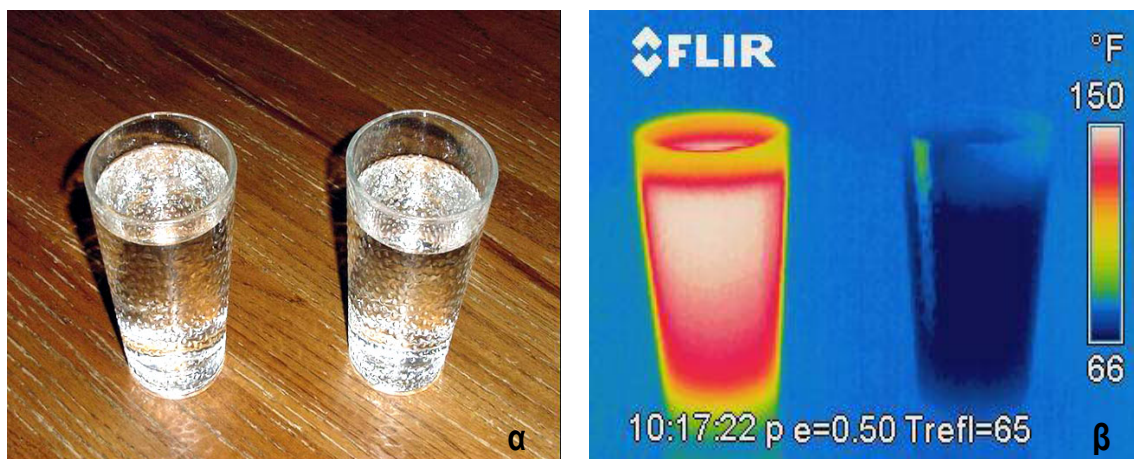
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	118
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	119
2.1 Υπέρυθρη ακτινοβολία και ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	119
2.2 Μεταφορά θερμότητας.....	121
2.2.1 Μεταφορά με αγωγή.....	122
2.2.2 Μεταφορά με διάχυση.....	123
2.2.3 Μεταφορά με ακτινοβολία.....	124
2.3 Θερμική ακτινοβολία και αλληλεπίδραση με την ύλη.....	125
2.3.1 Μέλαν σώμα.....	125
2.3.2 Συντελεστής ικανότητας εκπομπής.....	127
2.3.3 Απορρόφηση, ανάκλαση, μεταφορά.....	129
2.3.4 Μετάδοση στον αέρα και θέματα υπέρυθρης οπτικής.....	130
3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΗΣΗΣ.....	131
3.1 Αρχή λειτουργίας και κατασκευαστικά στοιχεία.....	131
3.2 Τύποι θερμοκαμερών και κριτήρια επιλογής.....	135
4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	139
4.1 Παθητική προσέγγιση.....	139
4.2 Ενεργητική προσέγγιση.....	141
4.3 Παράμετροι και συνθήκες υπέρυθρης ραδιομέτρησης.....	145
4.4 Πεδία εφαρμογών – πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	148
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	151
5.1 Τεχνικές επεξεργασίας.....	152
5.2 Θερμικό αποτύπωμα – Αξιολόγηση και ταξινόμηση βλαβών.....	154
6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	155
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	156

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 1, η εφαρμογή εποπτικών μεθόδων σε ένα σύστημα CM, υπό την μορφή μηχανικής/υπολογιστικής ή οπτικής όρασης προσφέρει το σημαντικό πλεονέκτημα του εντοπισμού και της απεικόνισης μιας βλάβης ως αυτή έχει. Με την αλματώδη πρόοδο – κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες – των τεχνολογιών μικροσυστημάτων και αισθητήρων, της ηλεκτρονικής και της επιστήμης των υπολογιστών, τα συστήματα υπέρυθρης απεικόνισης (infrared (IR) thermal imaging) αναγνωρίζονται πλέον ως ένα επιπλέον πολύτιμο εργαλείο ελέγχου και διαγνωστικής βλαβών, με ευρύτατο πεδίο εφαρμογών.

Γενικά, ο όρος *θερμογραφία* αναφέρεται στο σύνολο των τεχνικών καταγραφής της επιφανειακής θερμοκρασίας ενός αντικειμένου, ανεξάρτητα από το φυσικό φαινόμενο στο οποίο βασίζονται. Ειδικότερα όμως, ο όρος *υπέρυθρη θερμογραφία* (IR thermography, IRT) αφορά:

- στην ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο και η οποία είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του, και
- στην “αποτύπωσή” της σε θερμική εικόνα (μέσω συστημάτων υπέρυθρης απεικόνισης).



Σχήμα 4.1. Εικόνα **α.** φωτογραφίας και **β.** υπέρυθρης θερμογραφίας. Η υπέρυθρη θερμογραφία “αποκαλύπτει” τη διαφορά μεταξύ δύο φαινομενικά όμοιων (βάσει φωτογραφίας) ποτηριών [1].

Για να γίνει άμεσα κατανοητή η έννοια της IRT, μπορεί κανείς να σκεφτεί ότι η φωτογραφία περιγράφεται ως “απεικόνιση του φωτός” (Σχήμα 4.1-α) ενώ υπέρυθρη θερμογραφία ως “απεικόνιση της θερμότητας” (Σχήμα 4.1-β). Με βάση την διάκριση των μεθόδων παρακολούθησης που έγινε στο Κεφάλαιο 1, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι μια μέθοδος απλής θερμογραφίας (λ.χ. με χρήση αισθητηρίων επαφής) αποτελεί – εξ’ ορισμού – μια μάλλον έμμεση μέθοδο παρακολούθησης της κατάστασης ενός εξοπλισμού μέσω της θερμοκρασίας του. Αντίθετα, η υπέρυθρη θερμογραφία, περιλαμβάνοντας πάντα ένα σύστημα απεικόνισης,

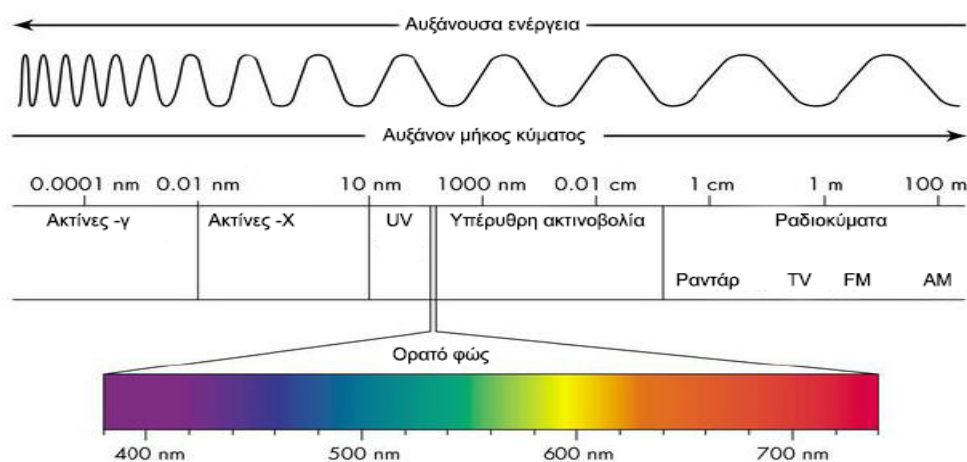
συνιστά μια άμεση (εποπτική μέθοδο) παρακολούθησης, στο ευρύτερο πεδίο της οπτικής όρασης. Καθώς, μάλιστα, χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση και τον χαρακτηρισμό της κατάστασης ενός υλικού (μιας κατασκευής ή ενός εξοπλισμού) χωρίς να το καταστρέφει ή να έρχεται σε επαφή με αυτό, η υπέρυθρη θερμογραφία θεωρείται επίσης μια μέθοδος μη επαφής και μη καταστροφικού ελέγχου (non-contact και non-destructive testing, NDT).

Το παρόν Κεφάλαιο πραγματεύεται το βασικό θεωρητικό και πρακτικό υπόβαθρο της εποπτικής NDT μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας, ολοκληρώνοντας το συνολικό θεωρητικό μέρος αυτής της Διδακτορικής Διατριβής. Συγκεκριμένα, εξετάζονται σύντομα και περιεκτικά θέματα μεταφοράς θερμότητας, αλληλεπίδρασης της θερμικής ακτινοβολίας με την ύλη και ικανότητας εκπομπής, ως προς τη σημασία τους στην σωστή προετοιμασία μιας υπέρυθρης θερμογράφησης και στην κατανόηση της θερμικής απόκρισης ενός υλικού. Επίσης αναλύονται θέματα εξοπλισμού IRT, καθώς και προσεγγίσεων, παραμέτρων, συνθηκών και εφαρμογών υπέρυθρης θερμογράφησης. Τέλος, παρουσιάζονται οι συνηθέστερες πρακτικές επεξεργασίας θερμικών εικόνων και ταξινόμησης θερμικών αποτυπωμάτων βλαβών.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Υπέρυθρη ακτινοβολία και ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το εύρος της περιοχής συχνοτήτων (ή μηκών κύματος αντίστοιχα) όλων των ηλεκτρομαγνητικών (η/μ) κυμάτων ονομάζεται *ηλεκτρομαγνητικό φάσμα* και εκτείνεται θεωρητικά από σχεδόν μηδενικές συχνότητες, έως το άπειρο. Με βάση τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των η/μ κυμάτων που περιλαμβάνονται σε αυτό, το η/μ φάσμα χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές-ζώνες (Σχήμα 4.2) [1-3].



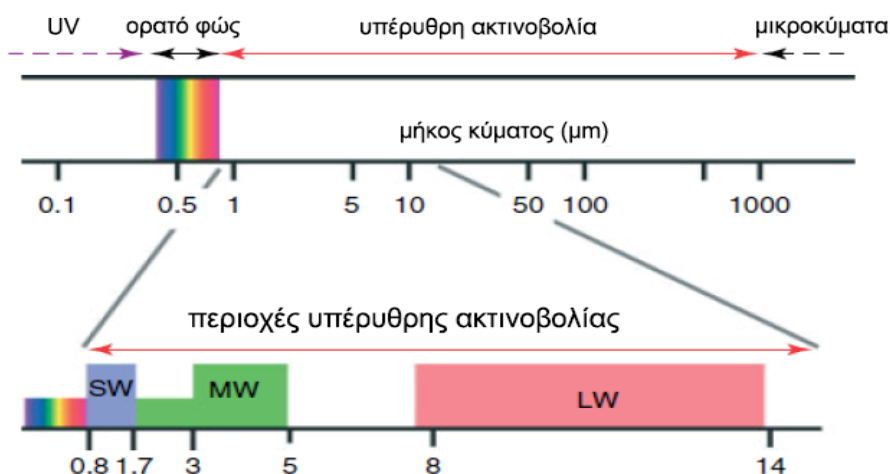
Σχήμα 4.2. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Με σειρά αυξάνοντος μήκους κύματος, οι βασικές διακριτές περιοχές του η/μ φάσματος αντιστοιχούν στις ακτίνες γ και α , στην υπεριώδη (UV) ακτινοβολία, στο ορατό φως, στην υπέρυθη ακτινοβολία και στα ραδιοκύματα. Με κριτήριο την ενέργεια που αυτές οι ακτινοβολίες μεταφέρουν, το η/μ φάσμα μπορεί να χωριστεί και σε δύο άλλες μεγάλες κατηγορίες: την ιονίζουσα και την μη ιονίζουσα η/μ ακτινοβολία.

Ιονίζουσα είναι η ακτινοβολία που μεταφέρει μεγάλη ποσότητα ενέργειας ($E > 10$ eV), η οποία είναι ικανή να εισχωρήσει στην ύλη και να προκαλέσει ιοντισμό, να διασπάσει βίαια χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει βιολογικές βλάβες σε οργανικά κύτταρα. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν το μεγαλύτερο μέρος της (ηλιακής) υπεριώδους ακτινοβολίας, η κοσμική ακτινοβολία και οι ακτινοβολίες α και γ . Από την άλλη πλευρά, μη ιονίζουσα είναι η ακτινοβολία που μεταφέρει σχετικά μικρή ποσότητα ενέργειας, η οποία δεν δύναται να προκαλέσει άμεσα ιοντισμό της ύλης, ωστόσο σχετίζεται με θερμικές ή χημικές επιδράσεις σε αυτήν και σε οργανικά κύτταρα, οι οποίες άλλοτε θεωρούνται ευεργετικές και άλλοτε επιβλαβείς. Γνωστότερες μη ιονίζουσες ακτινοβολίες είναι ένα μικρό μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας (μεγάλα μήκη κύματος), το ορατό φως, η υπέρυθη ακτινοβολία, τα μικροκύματα, τα ραδιοκύματα, και τα εκπεμπόμενα η/μ κύματα των ηλεκτρικών συσκευών [2-4].

Η υπέρυθη ακτινοβολία, στην ανίχνευση της οποίας – όπως προαναφέρθηκε – βασίζεται η υπέρυθη θερμογραφία, εκτείνεται στο η/μ φάσμα ως συνέχεια (με αυξανόν μήκος κύματος) της ερυθρής ορατής ακτινοβολίας, στην περιοχή μηκών κύματος από 0.75 μm έως 1 mm. Χωρίζεται δε σε τρεις επιμέρους περιοχές, σε σχέση με την απόστασή της από την περιοχή του ερυθρού ορατού φωτός, δηλαδή σε σχέση με το μήκος κύματός της (Σχήμα 4.3) [1-4]:

- Η κοντινή (SW) υπέρυθη ακτινοβολία με μήκη κύματος από 0.75 έως 2 μm .
- Η μέση (MW) υπέρυθη ακτινοβολία με μήκη κύματος από 2 έως 5 μm .
- Η μακρινή (LW) υπέρυθη ακτινοβολία με μήκη κύματος από 7 έως 14 μm .



Σχήμα 4.3. Επιμέρους περιοχές της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Φυσικά, η υπέρυθρη ακτινοβολία, ανεξαρτήτως μήκους κύματος, δεν είναι ορατή με το ανθρώπινο μάτι. Ωστόσο, οι MW και LW υπέρυθρες ακτινοβολίες μπορούν να γίνουν αισθητές με την αφή, ως θερμότητα στο ανθρώπινο δέρμα. Καθημερινά παραδείγματα MW και LW υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η θερμότητα που γίνεται αισθητή στον άνθρωπο από την ηλιακή ακτινοβολία, από μια φλόγα, από μια ηλεκτρική θερμική αντίσταση, κλπ (Σχήμα 4.4). Από την άλλη πλευρά, η SW υπέρυθρη ακτινοβολία δεν φέρει κάποιο θερμικό περιεχόμενο και συνεπώς δεν γίνεται αισθητή ούτε ως θερμότητα. Χρησιμοποιείται, ωστόσο, στην καθημερινότητα, σε εφαρμογές απομακρυσμένου ελέγχου (remote controlling, π.χ. τηλεκοντρόλ τηλεόρασης) και μεταφοράς δεδομένων σε κοντινές αποστάσεις (infrared data association (IrDA), π.χ. θύρες υπερύθρων κινητών τηλεφώνων) [1,2].

Πρωταρχική πηγή της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι η *θερμότητα* ή αλλιώς η *θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία* (thermal infrared radiation), η οποία εκπέμπεται από όλα τα σώματα στη φύση, με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν ($0\text{ }^{\circ}\text{K}$ ή $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). Μάλιστα, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία ενός σώματος, τόσο περισσότερη θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία αυτό εκπέμπει. Επιπλέον, κάθε σώμα μπορεί να δέχεται θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία. Στο εξής, χάριν απλότητας, η θερμική υπέρυθρη ακτινοβολία θα αναφέρεται ως υπέρυθρη ακτινοβολία. Ο όρος “θερμότητα” είναι ταυτόσημος με τον όρο “θερμική ενέργεια” και αναφέρεται στη μεταφορά ενός ποσού ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από ένα αντικείμενο σε ένα άλλο [1].

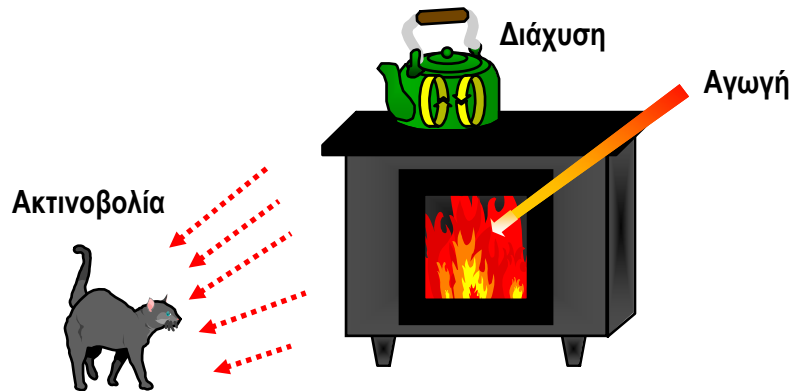


Σχήμα 4.4. Παραδείγματα μέσης (MW) και μακρινής (LW) υπέρυθρης ακτινοβολίας [1].

2.2 Μεταφορά θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας (ΜΘ) μπορεί να γίνει με τρεις βασικούς μηχανισμούς, οι οποίοι είναι οι εξής:

- Μεταφορά με αγωγή
- Μεταφορά με διάχυση (θερμική μεταβίβαση)
- Μεταφορά με ακτινοβολία



Σχήμα 4.5. Επίδραση των τριών βασικών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας σε έναν χώρο [1].

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα συνύπαρξης των τριών βασικών μηχανισμών ΜΘ στον ίδιο χώρο. Συγκεκριμένα, για παράδειγμα, μεταφορά με αγωγή (μεταξύ δύο στερεών) εμφανίζεται κατά την θέρμανση των στερεών τοιχωμάτων της σόμπας από τα στερεό υλικό (ξύλο) που καίγεται σε αυτήν. Αντίστοιχα, μεταφορά με διάχυση (μεταξύ ρευστών ή μεταξύ ρευστού και στερεού) συμβαίνει κατά τη θέρμανση του ρευστού περιεχομένου της χύτρας, από το στερεό τοίχωμα της σόμπας. Τέλος, η γάτα θερμαίνεται δεχόμενη την θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα τοιχώματα της σόμπας. Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί ΜΘ, αναλύονται στις Υποενότητες 2.2.1 - 2.2.3 που ακολουθούν.

2.2.1 Μεταφορά με αγωγή

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή πραγματοποιείται με άμεση επαφή μεταξύ των τμημάτων ενός στερεού ή μεταξύ δύο στερεών σωμάτων. Η μετάδοση συμβαίνει πάντοτε από μια μάζα υψηλής θερμοκρασίας προς μια μάζα χαμηλότερης, ακολουθώντας τις αρχές του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής. Υπό σταθερές συνθήκες και για μονοδιάστατη ροή θερμότητας, η θερμική αγωγή δίνεται από τον Νόμο Μεταφοράς του Fourier (Σχέση 4.1) [5,6].

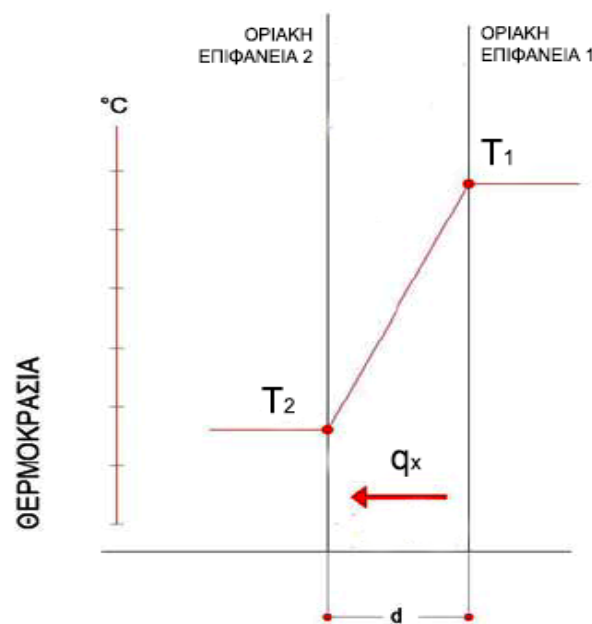
$$q_x = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

όπου q_x είναι η ροή θερμότητας (W), λ είναι ο συντελεστής αναλογίας της εξίσωσης (W/m·K) και $\frac{dT}{dx}$ είναι η διαφορική μεταβολή της θερμοκρασίας T και του μήκους x . Η δυσκολία της μεταφοράς της θερμότητας με αγωγή μεταξύ των σωμάτων, καθορίζεται από τον συντελεστή αναλογίας λ , ο οποίος ονομάζεται *συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας* ή απλά *αγωγιμότητα*.

Παραδείγματα καλών αγωγών της θερμότητας (δηλαδή υλικών με υψηλό συντελεστή λ), είναι τα μέταλλα, ενώ αντίστοιχα παράδειγμα κακών αγωγών είναι τα πλαστικά, το ξύλο και ο αέρας.

Στην περίπτωση ενός ομογενούς επίπεδου υλικού (Σχήμα 4.6), επιφάνειας A (m^2) και πάχους d (m) του οποίου ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι σταθερός και στις οριακές του επιφάνειες η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή (έστω σε τιμές T_1 και T_2 σε βαθμούς K), για μονοδιάστατη ροή θερμότητας, η Σχέση 4.1 λαμβάνει ακόλουθη διατύπωση [6]:

$$q_x = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{d} \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.6. Αγωγή θερμότητας σε ομογενές επίπεδο υλικό [6].

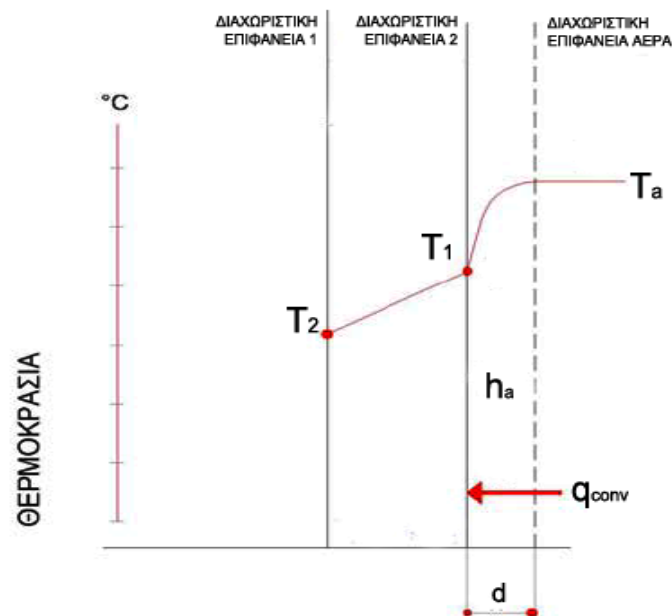
2.2.2 Μεταφορά με διάχυση

Η μεταφορά θερμότητας με διάχυση συμβαίνει μέσω της μάζας δύο ρευστών ή ενός ρευστού και ενός στερεού, με την κίνηση τους και, όπως και στην αγωγή, προϋποθέτει την ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των δύο μαζών. Η κίνηση που γίνεται σε φυσικό μέσο όπου υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές ή διαφορά πυκνοτήτων (λ.χ. ο ψυχρός αέρας κινείται καθοδικά, ενώ ο θερμός αέρας ανόδικα), χαρακτηρίζεται ως φυσική διάχυση. Αντίθετα, η κίνηση που γίνεται βεβιασμένα (λ.χ. με χρήση ανεμιστήρων ή ανεμοπίεσης) ονομάζεται βίαιη (εξαναγκασμένη) διάχυση. Οι συνθήκες εξαναγκασμένης διάχυσης εξαρτώνται από το είδος, τις φυσικές ιδιότητες, την ταχύτητα ροής και την θερμοκρασία του ρευστού, καθώς και από την μορφή και το μέγεθος του σώματος στην επιφάνεια του οποίου λαμβάνει χώρα η διάχυση της

θερμότητας [5,6]. Για την περίπτωση του Σχήματος 4.7, το ποσό q_{conv} της μεταφερόμενης θερμότητας με διάχυση (σε W), μεταξύ του αέρα (θερμοκρασίας T_a) και ενός ομογενούς επίπεδου υλικού επιφάνειας A (θερμοκρασίας T_1), δίνεται από τον Νόμο του Newton για την ψύξη και υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση 4.3 [6].

$$q_{conv} = h_a \cdot A \cdot (T_a - T_1) \quad (4.3)$$

Ο συντελεστής αναλογίας h_a της εξίσωσης, ονομάζεται συντελεστής θερμικής συναγωγιμότητας και δίνεται σε $W/m^2 \cdot K$.



Σχήμα 4.6. Διάχυση (συναγωγή) θερμότητας μεταξύ αέρα και ομογενούς επίπεδου υλικού [6].

2.2.3 Μεταφορά με ακτινοβολία

Όπως αναφέρθηκε και στην Υποενότητα 2.1, οποιοδήποτε σώμα στη φύση, με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν ($0 \text{ } ^\circ K$ ή $-273 \text{ } ^\circ C$) εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία, μεταφέροντας θερμική ενέργεια και, συνεπώς, θερμότητα. Η ακτινοβολία αυτή οφείλεται στην εσωτερική θερμική ενέργεια του υλικού, η μετάδοση (εκπομπή) της οποίας είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του υλικού, ενός συντελεστή ικανότητας εκπομπής και διαφόρων άλλων παραμέτρων [2]. Καθώς σχετίζεται άμεσα με την μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας, ο συγκεκριμένος μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας, οι βασικές έννοιες και οι φυσικοί νόμοι που τον διέπουν καθώς και η αλληλεπίδραση της υπέρυθρης (θερμικής) ακτινοβολίας με την ύλη, θα

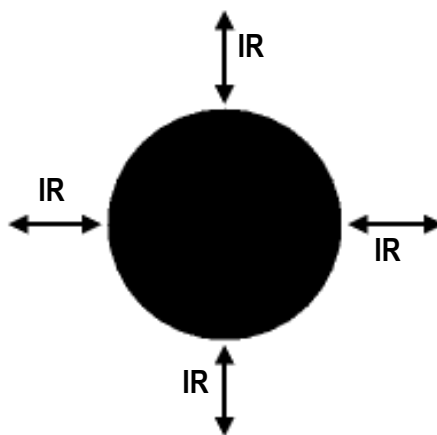
μελετηθούν διεξοδικότερα στην Υποενότητα 2.3 που ακολουθεί. Θα πρέπει πάντως να σημειωθεί ότι η ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ δύο σωμάτων με ακτινοβολία διέπεται από δύο κύρια χαρακτηριστικά που την ξεχωρίζουν από τους άλλους μηχανισμούς ΜΘ [5,6]:

- Λόγω της ηλεκτρομαγνητικής της φύσεως, η ανταλλαγή θερμότητας συμβαίνει ακόμη και χωρίς την παρουσία ενός φυσικού μέσου.
- Ενώ η αγωγιμότητα και η συναγωγή σταματούν να υφίστανται όταν τα θερμοδυναμικά συστήματα, μεταξύ των οποίων λαμβάνει χώρα η μετάδοση θερμότητας, αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία, η ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία – όντας δυναμικό φαινόμενο – συμβαίνει ακόμα και μεταξύ όμοιων επιφανειών σε θερμική ισορροπία.

2.3 Θερμική ακτινοβολία και αλληλεπίδραση με την ύλη

2.3.1 Μέλαν σώμα

Ως *μέλαν σώμα* ορίζεται εκείνο το σώμα το οποίο, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία T , απορροφά όλη την προσπίπτουσα σε αυτό θερμική ακτινοβολία. Επιπλέον, για δεδομένη θερμοκρασία και μήκος κύματος, κανένα άλλο σώμα δεν μπορεί να εκπέμψει περισσότερη θερμική ακτινοβολία σε σύγκριση με το μέλαν σώμα [1,2,5,6]. Με άλλα λόγια, το μέλαν σώμα θεωρείται ότι απορροφά και εκπέμπει το μεγαλύτερο δυνατό πόσο θερμικής ακτινοβολίας. Η αμοιβαία αυτή σχέση μεταξύ απορρόφησης και εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας, που πιθανόν να δημιουργεί κάποια σύγχυση, θα μελετηθεί στην επόμενη Υποενότητα. Επισημαίνεται ότι, στην πράξη δεν υπάρχουν μέλανα σώματα, είναι δηλαδή ιδεατά και χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας και τη σύγκριση των πραγματικών σωμάτων ως προς αυτήν. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται ένα απλό μοντέλο μέλανος σώματος.

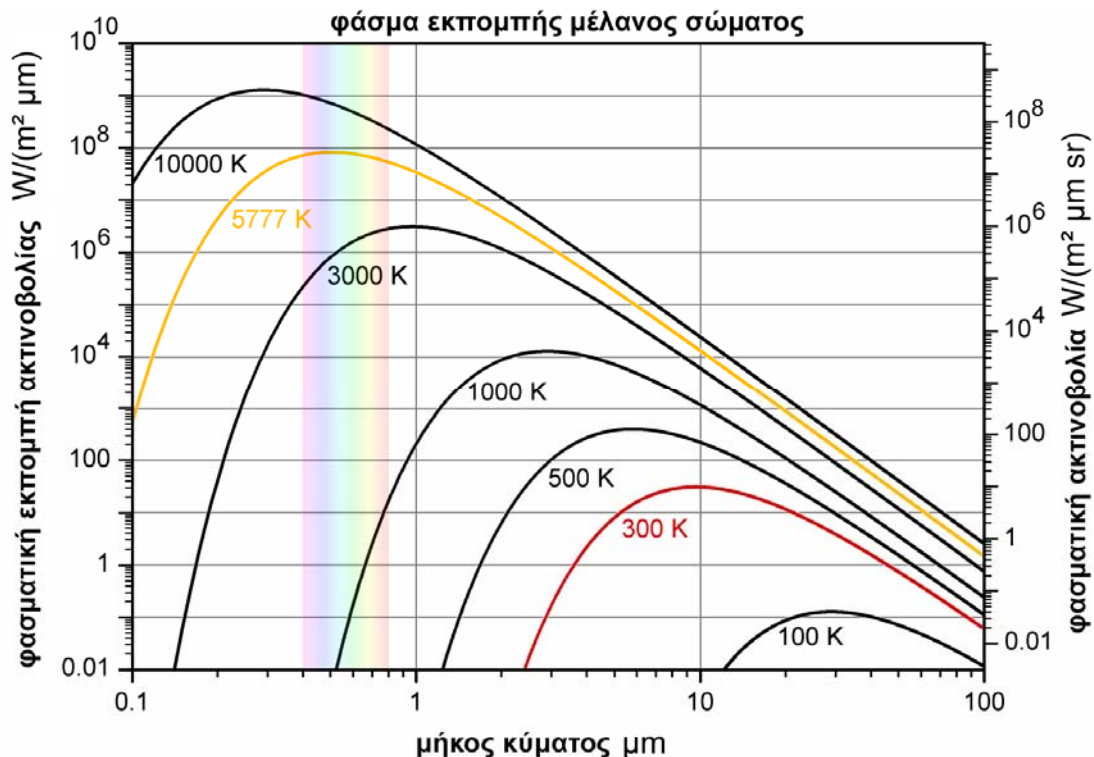


Σχήμα 4.7. Σχηματική απεικόνιση ενός μέλανος σώματος [1].

Ο Max Planck (1858-1947), κατάφερε να περιγράψει την φασματική κατανομή S_λ της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος, για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας T (σε K), με την Σχέση 4.4, η οποία και αποτελεί το Νόμο του Planck [2,5,6]:

$$S_\lambda(T) = \frac{2\pi \cdot hc^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (4.4)$$

όπου h η σταθερά του Planck (ίση με $6.6 \cdot 10^{-34}$ J·s), c η ταχύτητα του φωτός (ίση με $3 \cdot 10^8$ m/s), λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (σε μm) και k η σταθερά του Boltzmann (ίση με $1.4 \cdot 10^{-23}$ J/K). Ο Νόμος του Planck για την ακτινοβολία αποτελεί την βασική σχέση για τις μετρήσεις θερμοκρασίας χωρίς επαφή, όπως η υπέρυθρη θερμογράφηση, και συνδέει την ένταση της φασματικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος με το μήκος κύματος και τη θερμοκρασία. Για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας T , η Σχέση 4.4 παράγει μια οικογένεια καμπυλών. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 4.8, ένα μέλαν σώμα σε υψηλότερη θερμοκρασία εκπέμπει μεγαλύτερο ποσό θερμικής ακτινοβολίας σε σύγκριση με το αντίστοιχο σε χαμηλότερη θερμοκρασία, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος.



Σχήμα 4.8. Φασματική κατανομή εκπομπής του μέλανος σώματος για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας [5,6].

Διαφορίζοντας την Σχέση 4.4 ως προς λ , για την μέγιστη τιμή $\lambda_{\max}$ προκύπτει η εξίσωση του Νόμου μετατόπισης του Wien (Σχέση 4.5), ο οποίος πρακτικά εκφράζει με μαθηματικό τρόπο την κοινή παρατήρηση ότι τα χρώματα του ορατού φάσματος μεταβάλλονται από το ερυθρό προς το πορτοκαλί, το κίτρινο, κ.ο.κ., καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία ενός ακτινοβολητή θερμότητας [2,5,6].

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (\text{σε } \mu\text{m}) \quad (4.5)$$

Στην Σχέση 4.5, η σταθερά αναλογίας b ονομάζεται συντελεστής του Wien και λαμβάνεται προσεγγιστικά ίση με $2900 \mu\text{m}\cdot\text{K}$. Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, το μήκος κύματος κάθε χρώματος ταυίζεται με εκείνο που υπολογίζεται για το $\lambda_{\max}$, ίσο δηλαδή με $2900/T \mu\text{m}$.

2.3.2 Συντελεστής ικανότητας εκπομπής

Αν αντί να διαφοριστεί, η Σχέση 4.4 ολοκληρωθεί στο διάστημα από $\lambda = 0$ έως $\lambda = \infty$, λαμβάνεται ο συνολική τιμή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας Q_B ενός μέλανος σώματος [2]:

$$Q_B = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{σε } \text{W/m}^2) \quad (4.6)$$

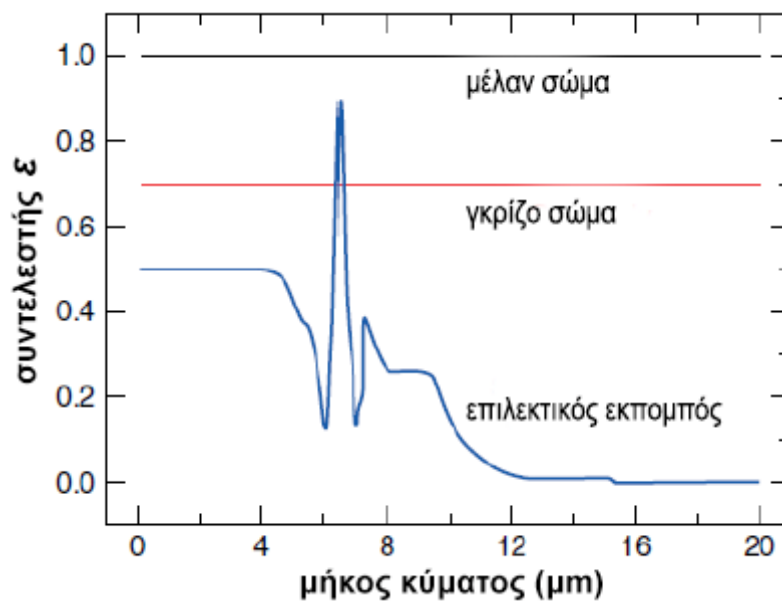
Η Σχέση 4.6 συνιστά τον Νόμο των Stefan-Boltzmann, σύμφωνα με τον οποίο η συνολική ισχύς ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος είναι ανάλογη της 4ης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του. Ο συντελεστής αναλογίας σ ονομάζεται σταθερά Stefan-Boltzmann και λαμβάνεται κατά προσέγγιση ίση με $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Κατ' αναλογία, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία Q ενός πραγματικού σώματος, σε μία απόλυτη θερμοκρασία T , είναι εξ' ορισμού πάντοτε μικρότερη – κατά έναν συντελεστή ε – από αυτήν του μέλανος σώματος και με βάση τον Νόμο των Stefan-Boltzmann, δίνεται από τη Σχέση 4.7 [1,2,5,6].

$$Q = \varepsilon \cdot Q_B = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{σε } \text{W/m}^2) \quad (4.7)$$

Ο συντελεστής ε ονομάζεται *συντελεστής ικανότητας εκπομπής* (emissivity factor ή απλά emissivity) και ορίζεται ως το πηλίκο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από ένα πραγματικό σώμα θερμοκρασίας T προς την εκπεμπόμενη ακτινοβολία του μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία [1]. Ο συντελεστής ικανότητας εκπομπής είναι αδιάστατο μέγεθος, λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 και δείχνει κατά πόσο η συμπεριφορά ενός πραγματικού σώματος (ως προς την εκπομπή και την απορρόφηση της θερμικής ακτινοβολίας) “προσεγγίζει” την συμπεριφορά του

μέλανος σώματος, για το οποίο εξ' ορισμού ισχύει ότι $\varepsilon = 1$. Με βάση τον συντελεστή ικανότητας εκπομπής, ορίζονται τρία είδη σωμάτων – πηγών ακτινοβολίας (Σχήμα 4.9) [2]:

- Το μέλαν σώμα, για το οποίο ισχύει πάντα $\varepsilon = 1$.
- Το τεφρό (γκρίζο) σώμα, για το οποίο ισχύει $\varepsilon < 1$ (σταθερό).
- Ο επιλεκτικός εκπομπός, για τον οποίο το ε μεταβάλλεται συναρτήσει του μήκους κύματος της ακτινοβολίας.

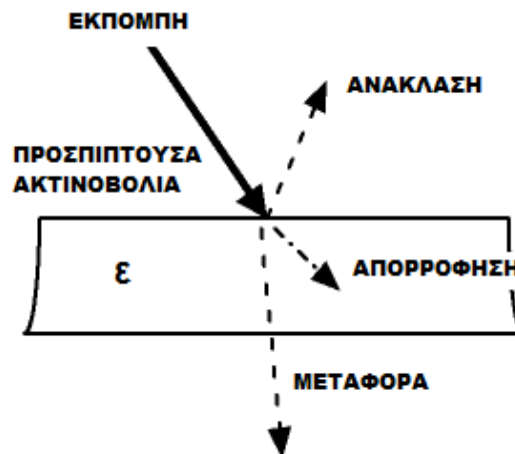


Σχήμα 4.9. Συντελεστές ικανότητας εκπομπής για τρία βασικά είδη πηγών ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος της [2].

Τα μη αγώγιμα υλικά (όπως πλαστικό, ξύλο κ.λπ.) εμφανίζουν αρκετά υψηλό συντελεστή ε , συνήθως μεγαλύτερο από 0.6. Ιδιαίτερα σε ματ, σκουρόχρωμες επιφάνειες το ε πλησιάζει σε τιμές κοντά στη μονάδα. Από την άλλη πλευρά, στα περισσότερα αγώγιμα υλικά (όπως τα μέταλλα) ο συντελεστής ε λαμβάνει τιμές μικρότερες του 0.4, αλλά αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού. Ιδιαίτερα σε λείες (στιλπνές) και καθαρές μεταλλικές επιφάνειες, το ε λαμβάνει πολύ μικρές τιμές, κοντά στο 0, ενώ μεταβάλλεται με τη φυσική κατάσταση και τη χημική σύσταση της επιφάνειας (λ.χ. οξείδωση σε μεταλλικές επιφάνειες). Εκτός από το υλικό και την επιφάνεια ενός σώματος, επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή ικανότητας εκπομπής είναι η γωνία παρατήρησης, το μήκος κύματος και η θερμοκρασία του σώματος [1,2,5,6]. Αξίζει να υπογραμμιστεί ότι, σε κάθε υπέρυθρη θερμογράφηση ενός σώματος, όπως θα εξηγηθεί και σε επόμενη Υποενότητα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ακριβής τιμή του συντελεστή ε του σώματος-στόχου, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια και αξιοπιστία μέτρησης της θερμοκρασίας του.

2.3.3 Απορρόφηση, ανάκλαση, μεταφορά

Έστω ότι ένα σώμα εκπέμπει ένα ποσό Q θερμικής ακτινοβολίας. Όπως συμβαίνει για κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, προσπίπτοντας στην επιφάνεια ενός υλικού (στερεού ή ρευστού), η θερμική ακτινοβολία θα απορροφηθεί κατά ένα μέρος Q_a , θα ανακλαστεί κατά ένα άλλο μέρος Q_r , ενώ η υπόλοιπη (Q_t) θα μεταφερθεί/διαφύγει μέσα από το υλικό (Σχήμα 4.10) [1].



Σχήμα 4.10. Αλληλεπίδραση μιας προσπίπτουσας θερμικής ακτινοβολίας Q με τυχαία επιφάνεια υλικού [1].

Αν θεωρηθούν οι αντίστοιχοι συντελεστές απορρόφησης ε_A , ανάκλασης ε_R και μεταφοράς ε_T , τότε θα ισχύει [1]:

$$\varepsilon_A + \varepsilon_R + \varepsilon_T = 1 \quad (4.8)$$

Από τη στιγμή που τα περισσότερα υλικά στη φύση είναι αδιαφανή ή στην καλύτερη περίπτωση ημιδιαπερατά στη θερμική ακτινοβολία, μπορεί να θεωρηθεί ότι $\varepsilon_T = 0$, οπότε η Σχέση 4.8 γίνεται:

$$\varepsilon_A + \varepsilon_R = 1 \quad (4.9)$$

Όμως, σύμφωνα με τον ορισμό του μέλανος σώματος, όπως αυτός διατυπώθηκε στην Υποενότητα 2.3.1: “μέλαν σώμα είναι εκείνο το σώμα το οποίο, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία T , απορροφά όλη την προσπίπτουσα σε αυτό θερμική ακτινοβολία”. Με άλλα λόγια, για το μέλαν σώμα ισχύει $\varepsilon_R = 0$ και η Σχέση 4.9 γράφεται πλέον ως:

$$\varepsilon_A = 1 \quad (4.10)$$

Συνεπώς, αφού και ο συντελεστής ικανότητας εκπομπής του μέλανος σώματος είναι εξ' ορισμού ίσος με την μονάδα, σύμφωνα με την Σχέση 4.10, για το μέλαν σώμα θα ισχύει:

$$\varepsilon_A = \varepsilon = 1 \quad (4.11)$$

Η Σχέση 4.11 επιβεβαιώνει ακριβώς την αμοιβαία αυτή σχέση μεταξύ απορρόφησης και εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας, όπως αυτή αναφέρθηκε και στην Υποενότητα 2.3.1. Έτσι λοιπόν, υλικά με μεγάλο συντελεστή ικανότητας εκπομπής, χαρακτηρίζονται επίσης από υψηλό συντελεστή απορρόφησης και, συνεπώς, από χαμηλό συντελεστή ανάκλασης της θερμικής ακτινοβολίας. Αντίθετα, υλικά με χαμηλό συντελεστή ικανότητας εκπομπής, εμφανίζουν επίσης χαμηλή απορροφητικότητα αλλά και υψηλή ανακλαστικότητα στην θερμική ακτινοβολία [1,6].

2.3.4 Μετάδοση στον αέρα και θέματα υπέρυθρης οπτικής

Κατά τον σχεδιασμό φακών συλλογής υπέρυθρης ακτινοβολίας, είναι πολύ σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από την υγρασία (H_2O), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και τα οξείδια του αζώτου (N_2O) της ατμόσφαιρας, η οποία οδηγεί στον καθορισμό συγκεκριμένων μόνο “παραθύρων” μετάδοσης της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, ενώ οι υδρατμοί (υγρασία) είναι ο κύριος απορροφητής της υπέρυθρης ακτινοβολίας για μήκη κύματος από 1 έως 4 μm , το CO_2 εμφανίζει σημαντική απορρόφηση για μήκη κύματος των 2.7 μm και για την περιοχή μηκών κύματος από 4 έως 5 μm . Προκύπτει επομένως ότι, τα δύο κυριότερα “παράθυρα” υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι οι περιοχές μηκών κύματος 3.2 – 4.2 μm και 8 – 14 μm [1]. Οι περιοχές αυτές είναι και οι περιοχές μηκών κύματος για την ανίχνευση των οποίων κατασκευάζονται οι περισσότεροι φακοί υπέρυθρης ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται στον εξοπλισμό υπέρυθρης θερμογράφησης.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, εκ των πραγμάτων, οι φακοί υπέρυθρης ακτινοβολίας διαφέρουν από τους κοινούς φακούς ορατής ακτινοβολίας, στα εξής καίρια σημεία [1]:

- Το εύρος των κατάλληλων υλικών που μπορούν να επιλεγούν για την κατασκευή υπέρυθρων φακών, είναι κατά πολύ μικρότερο σε σχέση με τους αντίστοιχους για την ορατή ακτινοβολία. Τα συνηθέστερα από αυτά τα υλικά είναι το γερμάνιο (Ge) και το σεληνίδιο του ψευδαργύρου (ZnSe), τα οποία εμφανίζουν υψηλό δείκτη διάθλασης και χαμηλό δείκτη διασποράς.
- Εξαιτίας του υψηλότερου κόστους των υλικών αυτών και του σχετικά χαμηλού δείκτη μετάδοσης της ακτινοβολίας, το πάχος των φακών πρέπει να είναι πολύ μικρό.

- Τα μεγάλα – συγκριτικά με την ορατή ακτινοβολία – μήκη κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, περιορίζουν τις απαιτήσεις σε υψηλή ανάλυση εικόνας (image resolution). Κατά συνέπεια, χαμηλές φαινομενικά αναλύσεις, της τάξεως των 320×240 ή 640×480 εικονοστοιχείων (pixels) θεωρούνται ικανοποιητικές.
- Τα υλικά που περιβάλλουν το χώρο παρατήρησης (π.χ. τοίχοι) εκπέμπουν και αυτά υπέρυθρη ακτινοβολία, συνεισφέροντας στο λεγόμενο σφάλμα φόντου (background error), το οποίο πρέπει να εξαλείφεται ή, στην χειρότερη περίπτωση, να ισοσταθμίζεται.
- Οι ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι συνήθως γραμμικές συστοιχίες σε αντίθεση με τους ανιχνευτές ορατής ακτινοβολίας όπως το φωτογραφικό φιλμ ή το ανθρώπινο μάτι. Οι ανιχνευτές αυτοί, που είναι αντικείμενο μελέτης στην Υποενότητα 3 που ακολουθεί, συχνά πρέπει να ψύχονται.
- Το υλικό του ανιχνευτή υπέρυθρης ακτινοβολίας εκπέμπει και αυτό υπέρυθρη ακτινοβολία. Θα πρέπει, λοιπόν, να ελέγχεται συχνά το ενδεχόμενο αυτοανίχνευσης του ίδιου του ανιχνευτή (φαινόμενο Narcissus ή αυτοαπεικόνισης), ιδιαίτερα εμπρός από έντονα ανακλαστικές επιφάνειες [1,4].

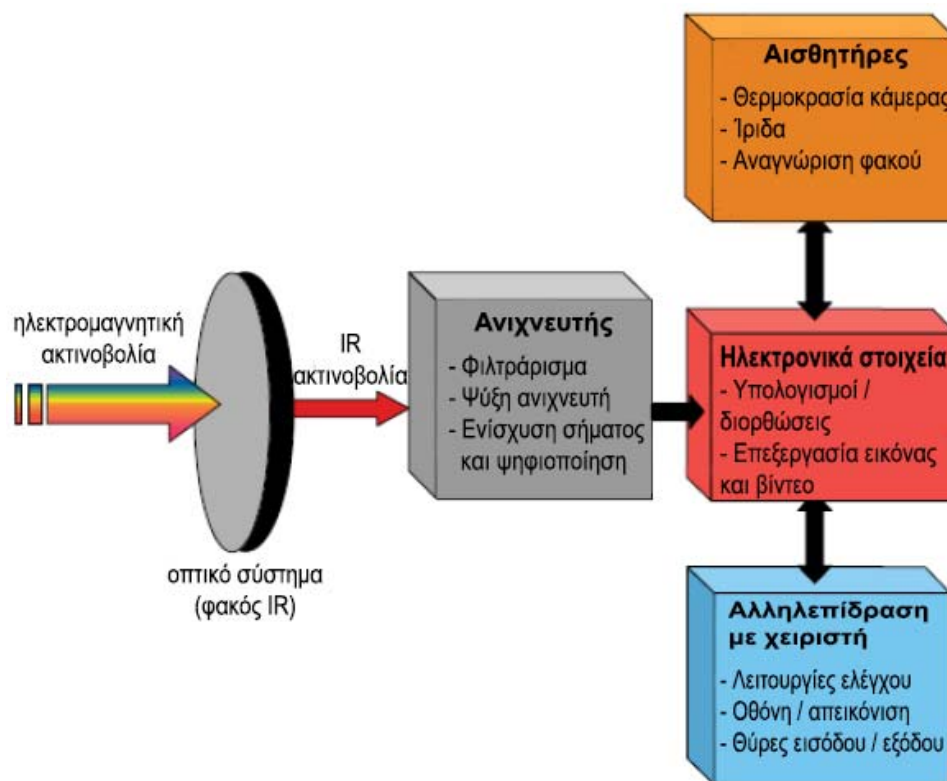
3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΗΣΗΣ

3.1 Αρχή λειτουργίας και κατασκευαστικά στοιχεία

Η υπέρυθρη θερμογράφηση (IRT) ή αλλιώς θερμική απεικόνιση είναι μια μέθοδος προσδιορισμού της χωρικής κατανομής και της χρονικής εξάρτησης της θερμότητας στα υπό εξέταση αντικείμενα. Το σύστημα απεικόνισης που χρησιμοποιείται για την IRT, μετασχηματίζει μια εικόνα υπέρυθρης ακτινοβολίας σε μια εικόνα ορατού φωτός. Συγκεκριμένα, η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος απεικόνισης συνίσταται στην δημιουργία μιας εικόνας κατανομής ορατής ακτινοβολίας, η οποία είναι ανάλογη της κατανομής της υπέρυθρης ακτινοβολίας, και επομένως ανάλογη της χωρικής κατανομής της θερμοκρασίας του ή του συντελεστή ικανότητας εκπομπής του αντικειμένου.

Τα συστήματα απεικόνισης IRT, λοιπόν, οπτικοποιούν τις αόρατες – στο ανθρώπινο μάτι – υπέρυθρες ακτίνες και παρέχουν με ακρίβεια μη καταστροφικές και εξ' αποστάσεως μετρήσεις θερμοκρασίας. Με άλλα λόγια, με την υπέρυθρη θερμογραφία δεν μετράται απ' ευθείας η θερμοκρασία μιας επιφάνειας, αλλά η μεταβολή της επιφανειακής της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Καθώς συχνά οι διάφορες ανωμαλίες σε ένα υλικό δημιουργούν τοπικές διαφορές στην επιφανειακή του θερμοκρασία, η υπέρυθρη θερμογράφηση δύναται να ανιχνεύει την θέση, την έκταση ή/και την σοβαρότητα αυτών των ατελειών, βλαβών ή αστοχιών στο αντίστοιχο αντικείμενο.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.11 απεικονίζονται τα κυριότερα τμήματα ενός συστήματος υπέρυθρης απεικόνισης και οι αντίστοιχες λειτουργίες τους. Από το σύνολο της διάχυτης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η υπέρυθρη ακτινοβολία του αντικειμένου-στόχου συλλέγεται από το οπτικό σύστημα (φακός IR) και, αφού φιλτραριστεί, καταλήγει σε έναν ανιχνευτή υπέρυθρης ακτινοβολίας ή σε μία συστοιχία εστιακού επιπέδου (focal plane array, FPA), ο οποίος την μετατρέπει σε ηλεκτρονικό, ψηφιοποιημένο σήμα και, τελικά, σε εικόνα (θερμική εικόνα, thermal image) [2].

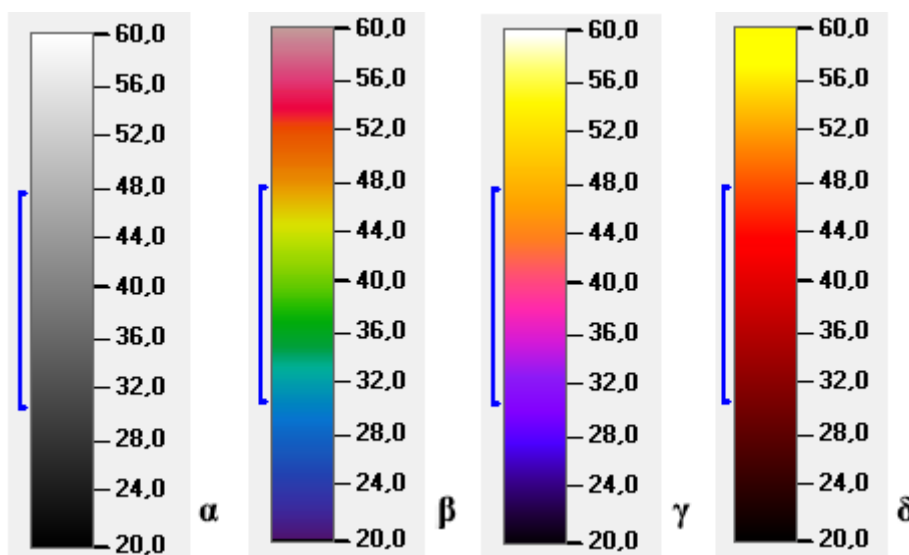


Σχήμα 4.11. Τμήματα και βασικές λειτουργίες ενός συστήματος υπέρυθρης απεικόνισης [2].

Τα συστήματα υπέρυθρης απεικόνισης (ή θερμοκάμερες) δίνουν ως έξοδο εικόνες τυπικά μονοχρωματικές, καθώς είναι γενικά σχεδιασμένα να λειτουργούν με έναν απλό τύπο αισθητήρα, ο οποίος ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Από την άλλη πλευρά, οι έγχρωμες θερμοκάμερες απαιτούν πολύπλοκότερο σχεδιασμό ώστε να διακρίνουν τα διαφορετικά μήκη κύματος και το χρώμα. Εξάλλου, η χρωματική πληροφορία έχει μικρό νόημα στην αποτύπωση περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος εκτός ορίων του ορατού φωτός (όπως η υπέρυθρη περιοχή), καθώς δεν αναγνωρίζονται από την ανθρώπινη όραση. Κατά συνέπεια, αυτό που στην πραγματικότητα συχνά εφαρμόζεται στην υλοποίηση μιας τυπικής υπέρυθρης απεικόνισης, είναι η παρουσίαση των μονοχρωματικών εικόνων σε ψευδοχρωματική κλίμακα, όπου οι μεταβολές στο σήμα εξόδου

της θερμοκάμερας αποτυπώνονται με μεταβολές του χρώματος και όχι της έντασης φωτός [1,7]. Η τεχνική αυτή ονομάζεται “διαστρωμάτωση πυκνότητας” (density slicing). Αν και η ανθρώπινη όραση έχει μεγαλύτερη δυνατότητα ανίχνευσης διαφορών στην ένταση του φωτός συγκριτικά με τις χρωματικές διαφορές, η δυνατότητα αυτή μειώνεται δραματικά υπό συνθήκες υψηλής φωτεινότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις η τεχνική του density slicing αποκτά επιπλέον αξία.

Συμβατικά, σε μια θερμική εικόνα, τα φωτεινότερα (άρα και θερμότερα) τμήματα της εικόνας χρωματίζονται συνήθως λευκά ή ροζ, οι ενδιάμεσες θερμοκρασίες απεικονίζονται με αποχρώσεις του ερυθρού και του κίτρινου, ενώ τα σκοτεινότερα (ψυχρότερα) τμήματα απεικονίζονται συνήθως με αποχρώσεις του πράσινου και του κυανού. Ανεξάρτητα πάντως από την χρωματική απόδοση που υιοθετείται, σε όλες τις ψευδοχρωματικές θερμικές εικόνες παρέχεται μια συγκεκριμένη χρωματική παλέτα (κλίμακα), η οποία αντιστοιχεί αποχρώσεις με προκαθορισμένες τιμές θερμοκρασίας (Σχήμα 4.12) [1].



Σχήμα 4.12. Παραδείγματα διαφορετικών εκδοχών χρωματικής/θερμοκρασιακής κλίμακας:
α. κλίμακα του γκρι (gray scale), β. κλίμακα ουράνιου τόξου (rainbow scale), γ. κλίμακα πρίσματος (prism scale) και δ. κλίμακα θερμού μετάλλου (hot metal scale) [1].

Όπως προαναφέρθηκε, η θερμική εικόνα είναι ουσιαστικά το αποτέλεσμα της μετατροπής της υπέρυθρης ακτινοβολίας σε ηλεκτρονικό σήμα, συνήθως με την βοήθεια ενός αισθητήρα-ανιχνευτή τύπου FPA. Οι ανιχνευτές FPA εμφανίστηκαν στις αρχές τις δεκαετίας του 1970, ως μέρος ενός νέου, τότε, τύπου συσκευής απεικόνισης, ο οποίος δημιούργησε νέα δεδομένα στο χώρο της υπέρυθρης θερμογραφίας, απλοποιώντας την κατασκευή μιας θερμοκάμερας. Οι FPA κατασκευάζονται συνδυάζοντας την τεχνολογία της φωτολιθογραφίας και της τεχνικής επεξεργασίας πυριτίου [2]. Με αυτή την τεχνολογία, το μόνο που απαιτείται για την κατασκευή μιας θερμοκάμερας είναι το οπτικό σύστημα (optics), ο FPA, η σχετική ηλεκτρονική

διάταξη και, για ορισμένες τεχνολογίες ανιχνευτών, μια μονάδα ψύξης του ανιχνευτή. Αυτές οι διατάξεις, αν και εμφανίζουν ομοιότητες με τις συμβατικές κάμερες CCD, που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 4 του Κεφαλαίου 1, δεν απαιτούν κανένα μηχανισμό ηλεκτρομηχανικής σάρωσης για το σχηματισμό της εικόνας. Παράλληλα, έχουν μικρότερο βάρος και είναι λιγότερο εύθραυστες σε σχέση με τις πυροηλεκτρικές λυχνίες (pyroelectric tubes) [7]. Τα δε σήματα εικόνας προσκτώνται απευθείας από έναν οδηγό ολοκληρωμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος (on-chip electronics drive). Μέχρι σήμερα, έχουν εμφανιστεί πολυάριθμες τεχνολογίες FPA, όπως [7]:

- οι θερμικές πυροηλεκτρικές συστοιχίες (thermal-based pyroelectric arrays)
- οι διηλεκτρικές συστοιχίες (dielectric arrays)
- το όριο Schottky (Schottky barrier),
- το κρυσταλλικό υπερπλέγμα (superlattice),
- οι εσωτερικοί φωτονικοί ανιχνευτές (intrinsic photonic detectors),
- η τεχνολογία Z-επιπέδου (Z-plane technology)
- οι συστοιχίες μικροβολομέτρων (microbolometers arrays)

Από την άλλη πλευρά, τα παλαιότερα συμβατικά υπέρυθρα συστήματα, που αποτελούνται από έναν απλό ενιαίο ανιχνευτή υπέρυθρης ακτινοβολίας, φέρουν έναν επιπλέον μηχανισμό ηλεκτρομηχανικής σάρωσης και για τον λόγο αυτό καλούνται υπέρυθρα ραδιόμετρα ανίχνευσης (IR scanning radiometers, IRSR) [2]. Οι μετρήσεις των IRSR βασίζονται στον Νόμο του Planck που αναλύθηκε στην Υποενότητα 2.3.1.

Στην πραγματικότητα, ανεξαρτήτως τεχνολογίας, οι ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας ανιχνεύουν σε δύο διαφορετικές περιοχές του υπέρυθρου φάσματος, οι οποίες και αντιστοιχούν στα λεγόμενα “παράθυρα” υπέρυθρης ακτινοβολίας, όπως αυτά ορίστηκαν στην Υποενότητα 2.3.4. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ανιχνευτές που λειτουργούν στην περιοχή του παραθύρου μηκών κύματος $3.2 - 4.2 \mu\text{m}$ (MW υπέρυθρη ακτινοβολία) αποδεικνύονται πιο οικονομικοί. Ωστόσο οι ανιχνευτές του παραθύρου μηκών κύματος $8 - 14 \mu\text{m}$ (LW υπέρυθρη ακτινοβολία) εμφανίζουν καλύτερη απόδοση, λόγω της δυνατότητας ανίχνευσης υψηλότερων θερμοκρασιακών διαφορών.

Τα δεδομένα που συλλέγονται από έναν ανιχνευτή, υπό μορφή ηλεκτρονικού σήματος εξόδου, παρουσιάζονται σε οθόνη (συνήθως τύπου υγρών κρυστάλλων, LCD) και μπορούν να επεξεργαστούν, σε περιορισμένο βαθμό, μέσω του ενσωματωμένου επεξεργαστή της ίδιας της θερμοκάμερας ή να μεταφερθούν και να αποθηκευτούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία. Το εύρος των τιμών θερμοκρασίας που δύναται να μετρήσει ένα τυπικό σύστημα υπέρυθρης θερμογράφησης κυμαίνεται, συνήθως, από -20 έως 800°C , ενώ μπορεί να επεκταθεί έως 1500°C ή ακόμα και 2000°C , με την χρήση ειδικών φίλτρων και φακών [2]. Με την ολοκλήρωση της κατασκευής και του ποιοτικού ελέγχου της, κάθε

θερμοκάμερα υποβάλλεται, σε διαδικασία βαθμονόμησης (calibration), με την χρήση μελανών σωμάτων αναφοράς. Βέβαια, πλην της αρχικής τους βαθμονόμησης, οι σύγχρονες θερμοκάμερες φέρουν ενσωματωμένο αλγόριθμο αυτόματης βαθμονόμησης, ο οποίος συνήθως “τρέχει” κατά τον αυτοέλεγχο της θερμοκάμερας, σε κάθε ενεργοποίησή της (initial self-check) [1].

3.2 Τύποι θερμοκαμερών και κριτήρια επιλογής

Οι θερμοκάμερες μπορούν γενικά να χωριστούν σε δύο τύπους. Στον πρώτο τύπο ανήκουν οι θερμοκάμερες των οποίων ο ανιχνευτής υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι ψυχόμενος, ενώ στο δεύτερο τύπο κατατάσσονται οι θερμοκάμερες μη ψυχόμενου ανιχνευτή [1,6,7].

ο Ψυχόμενοι ανιχνευτές

Οι ανιχνευτές αυτοί εσωκλείονται εν κενώ σε ειδική θήκη κρυογενούς ψύξης, γεγονός που αυξάνει σημαντικά την ευαισθησία τους, καθώς η θερμοκρασία τους είναι πολύ χαμηλότερη από αυτήν των υπό ανίχνευση αντικειμένων-στόχων. Τυπικές θερμοκρασίες ψύξης των ανιχνευτών κυμαίνονται από 4 έως 110 °K, με αυτές των 80-90 °K να είναι οι συνηθέστερες. Χωρίς ψύξη, οι συγκεκριμένοι ανιχνευτές θα “θαμπώνονταν” από την ίδια τους την θερμική ακτινοβολήση [7].

Σημαντικό μειονέκτημα των θερμοκαμερών αυτού του τύπου είναι το υψηλό κόστος παραγωγής και λειτουργίας τους. Οι διαδικασίες της ψύξης και της κένωσης είναι τόσο ενεργοβόρες όσο και χρονοβόρες καθώς η θερμοκάμερα χρειάζεται αρκετά λεπτά για να ψυχθεί ώστε να μπορεί να λειτουργήσει. Αν και οι διατάξεις ψύξης και ελέγχου της πίεσης είναι, κατά κανόνα, ογκώδεις και υψηλότατου κόστους, οι θερμοκάμερες ψυχόμενου ανιχνευτή παρέχουν άριστη ποιότητα θερμικών εικόνων σε σύγκριση με τις θερμοκάμερες μη ψυχόμενου ανιχνευτή.

Όσον αφορά στη διαδικασία ψύξης του ανιχνευτή, σύμφωνα με την βασική προσέγγιση, χρησιμοποιείται υψηλής καθαρότητας άζωτο σε υψηλή πίεση. Το αέριο αυτό στη συνέχεια διαστέλλεται μέσω ενός μικρού ακροφυσίου και μεταβιβάζεται σε έναν μικροσκοπικό εναλλάκτη θερμότητας με αποτέλεσμα την ψύξη του ανιχνευτή με βάση το φαινόμενο Joule-Thomson [1,7].

Για τη κατασκευή του ανιχνευτή χρησιμοποιούνται βολόμετρα (θερμόμετρα) πυριτίου (Si), ψυχόμενα με υγρό ήλιο (He) και μια ευρεία ποικιλία φθηνότερων ημιαγωγικών διατάξεων στενού διακένου, όπως [7]:

- Ίνδιο – Αντιμόνιο (In-Sb)
- Ίνδιο – Αρσενικό (In-As)
- Υδράργυρος – Κάδμιο – Τελλούριο (Zn-Cd-Te)
- Σουλφίδιο του Μολύβδου (PbS)

- Σελήνιο – Μόλυβδος (Se-Pb)

- ο **Μη ψυχόμενοι ανιχνευτές**

Οι θερμοκάμερες μη ψυχόμενου ανιχνευτή χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα ο οποίος λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή έναν αισθητήρα σταθεροποιημένο (με τη χρήση μικρών διατάξεων ελέγχου θερμοκρασίας) σε μία θερμοκρασία κοντά στην θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι σύγχρονοι μη ψυχόμενοι ανιχνευτές, στο σύνολό τους, χρησιμοποιούν αισθητήρια που λειτουργούν με βάση την μεταβολή της αντίστασης, της τάσης ή του ρεύματος τους όταν αυτά προσβάλλονται και θερμαίνονται από υπέρυθρη ακτινοβολία. Στη συνέχεια, αυτές οι μεταβολές μετρώνται και συγκρίνονται με τις τιμές αναφοράς κατά την αρχική θερμοκρασία (θερμοκρασία λειτουργίας) των αισθητηρίων [7].

Η θερμοκρασία των μη ψυχόμενων ανιχνευτών πρέπει να σταθεροποιείται ώστε να επιτυγχάνεται μείωση του επιπέδου θορύβου στην θερμική εικόνα. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τύπος ανιχνευτών δεν απαιτεί ψύξη σε χαμηλές θερμοκρασίες και, επομένως, δεν φέρει ογκώδη, ενεργοβόρα και υψηλού κόστους κρυογενικά ψυκτικά. Κατά συνέπεια, οι θερμοκάμερες αυτού του τύπου εμφανίζουν μικρότερο μέγεθος και, φυσικά, χαμηλότερο κόστος. Από την άλλη πλευρά όμως, η ανάλυση και η ποιότητα των παραγόμενων θερμικών εικόνων τείνουν να είναι χαμηλότερες, σε σύγκριση με τις θερμοκάμερες ψυχόμενων ανιχνευτών. Το μειονέκτημα αυτό οφείλεται στη διαδικασία κατασκευής τους, η οποία – προς το παρόν – επηρεάζεται σημαντικά από την περιορισμένη, διαθέσιμη τεχνολογία [1,7].

Η κατασκευή μη ψυχόμενων ανιχνευτών βασίζεται κυρίως στα πυροηλεκτρικά και φερροηλεκτρικά υλικά, καθώς και στη μικροβολομετρική τεχνολογία. Όσον αφορά στα υλικά κατασκευής των συστοιχίων των ανιχνευτών, σε αυτά περιλαμβάνονται το οξείδιο του βαναδίου (V_2O_5), η άμορφη σιλικόνη (a-Si), το λανθάνιο μαγγανικό βαρίου (lanthanum barium manganite, LBM), το ζirkονικό-τιτανικό άλας μολύβδου (lead zirconate titanate, PZT), το διφθοριούχο πολυβινυλιδένιο PVDF (polyvinylidene difluoride, PVDF), κ.α. [7].

Διαπιστώνεται καθημερινά και θεωρείται, πλέον, δεδομένο ότι οι θερμοκάμερες συνιστούν ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο εποπτικού, προληπτικού και μη καταστροφικού ελέγχου, με την υλοποίηση μετρήσεων υπέρυθρης θερμογραφίας. Στο εμπόριο υπάρχουν πολυάριθμες εταιρίες κατασκευής διαφορετικών τύπων θερμοκαμερών, κάθε ένας από τους οποίους εξυπηρετεί εφαρμογές συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Καθώς αυξάνονται συνεχώς οι ανάγκες αξιόπιστης, γρήγορης και ακριβούς παρακολούθησης της κατάστασης ενός εξοπλισμού, οι νέες τεχνολογίες θερμοκαμερών συνοδεύονται από ολοένα και υψηλότερες προδιαγραφές και δυνατότητες. Τα σημαντικότερα κριτήρια, στα οποία πρέπει να εφιστάται η προσοχή κατά την επιλογή του καταλληλότερου συστήματος υπέρυθρης θερμογράφησης, είναι τα ακόλουθα [2]:



ο Φορητότητα

Σε αρκετές περιπτώσεις, η φορητότητα και το βάρος της θερμοκάμερας είναι καίριας σημασίας, σε συνάρτηση πάντα με την εφαρμογή και την τοποθεσία ενός ελέγχου υπέρυθρης θερμογράφησης. Για παράδειγμα, όταν μελετάται ο εξοπλισμός ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων υψηλής τάσης ή εκτεταμένων βιομηχανικών εγκαταστάσεων, η παράμετρος της φορητότητας καθορίζει σημαντικά το επίπεδο ασφάλειας και πρακτικότητας της μέτρησης.

ο Ευχρηστία

Είναι πολύ σημαντικό η θερμοκάμερα να χαρακτηρίζεται από ευκολία χρήσης και να συνοδεύεται από πρακτικό λογισμικό επεξεργασίας των θερμικών εικόνων και εξαγωγής αντίστοιχων θερμογραφικών αναφορών. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό ότι τα μετρούμενα αποτελέσματα παρουσιάζουν τις μικρότερες δυνατές αποκλίσεις σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές θερμοκρασίας, καθώς περιορίζεται η πιθανότητα λανθασμένης μέτρησης.

ο Ποιότητα θερμοκάμερας

Προδιαγραφές και χαρακτηριστικά όπως το μεγάλο εύρος μετρούμενων θερμοκρασιών, η υψηλή ανάλυση θερμοκρασίας και θερμικής εικόνας, η ακρίβεια, καθώς και εργαλεία μέτρησης όπως η σημειακή μέτρηση (cross), η μέτρηση καθορισμένης περιοχής (box) ή η μέτρηση εκατέρωθεν συγκεκριμένου ορίου (threshold) ή ισόθερμου (isotherm), συνιστούν καθοριστικούς παράγοντες επίτευξης ποιοτικής, στοχευμένης και αξιόπιστης θερμογράφησης.

ο Απομακρυσμένος έλεγχος

Σε ειδικές εφαρμογές και περιπτώσεις μετρήσεων, λ.χ. σε δυσμενές, για τον άνθρωπο, περιβάλλον μέτρησης ή σε ενδεχόμενη έλλειψη χώρου, η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου και χειρισμού (remote controlling) της θερμοκάμερας αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα.

ο Αυτονομία

Σε περιπτώσεις μετρήσεων πεδίου (εξωτερικού χώρου), εκτεταμένων εγκαταστάσεων ή αργά εξελισσόμενων φαινομένων, οι οποίες συνήθως συνεπάγονται χρονοβόρες λήψεις, χωρίς την δυνατότητα παροχής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο, απαιτείται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών που παρέχουν την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια λειτουργίας της θερμοκάμερας.

ο Κόστος

Φυσικά, καθοριστικότατο κριτήριο επιλογής μιας θερμοκάμερας είναι το κόστος αγοράς, λειτουργίας και συντήρησής της, καθώς – κατά γενική ομολογία – η απόκτηση ενός εξοπλισμού υπέρυθρης θερμογράφησης και δη θερμοκάμερας, θεωρείται αρκετά δαπανηρή επένδυση, λόγω της υψηλής τεχνολογίας. Σε περιπτώσεις που απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό χειρισμού, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και πιθανό κόστος εργασίας ή/και τεχνικής υποστήριξης. Γενικά, πριν την αγορά θερμογραφικού εξοπλισμού είναι σημαντικό να γίνεται προσεκτικός και ρεαλιστικός συμβιβασμός μεταξύ αναμενόμενου ολικού κόστους, αποτελεσματικότητας χρήσης (απόδοσης) και κάλυψης εφαρμογών.

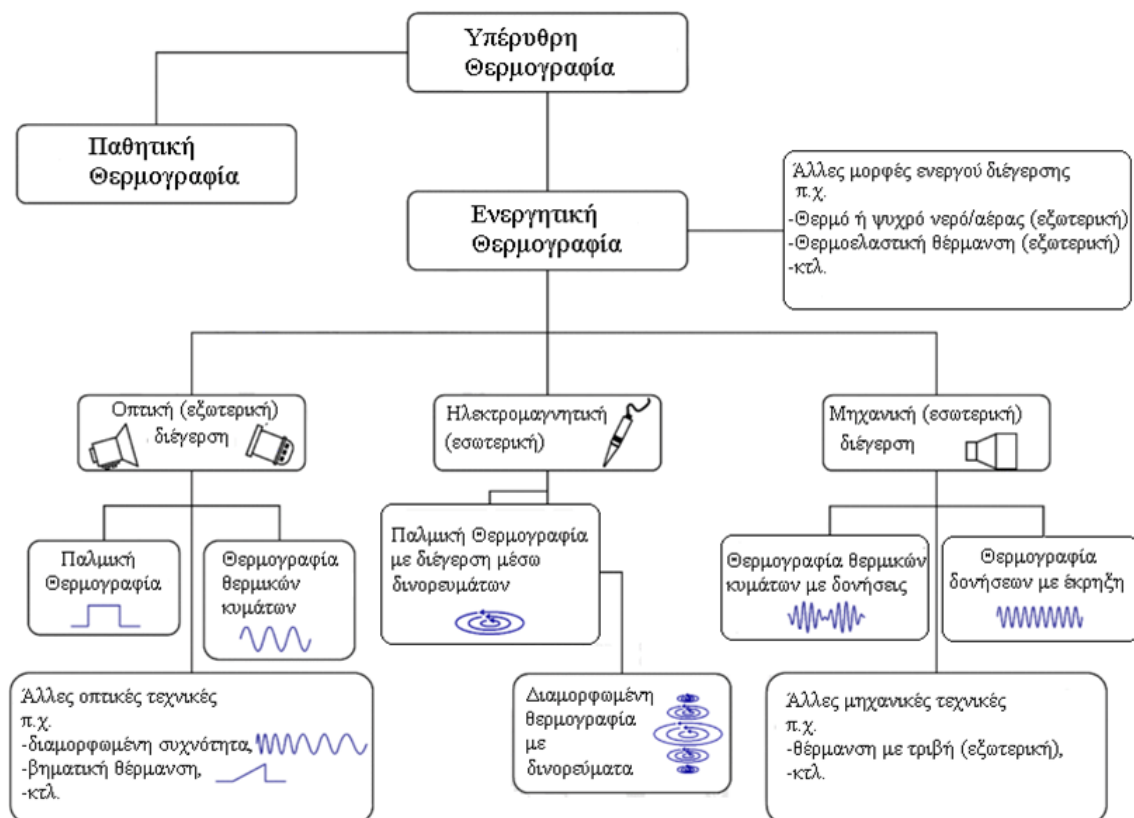
Με την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης Υποενότητας, όπου συζητήθηκαν θέματα εξοπλισμού υπέρυθρης θερμογράφησης, στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται μια τυπική θερμοκάμερα (ή αλλιώς φορητός θερμικός αναλυτής), καθώς και τα βασικά εξωτερικά της χαρακτηριστικά. Η συγκεκριμένη θερμοκάμερα του Σχήματος 4.13 είναι η θερμοκάμερα μη ψυχόμενου ανιχνευτή συστοιχίας εστιακού επιπέδου (uncooled focal plane array, UFPA), η οποία χρησιμοποιήθηκε και κατά την εκπόνηση του συνόλου των πειραματικών μελετών αυτής της Διδακτορικής Διατριβής. Αναλυτικότερα κατασκευαστικά στοιχεία αυτής της θερμοκάμερας δίνονται στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 4.13. Βασικά εξωτερικά χαρακτηριστικά μιας τυπικής θερμοκάμερας [1].

4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΥΠΕΡΥΘΡΗΣ ΘΕΡΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η διεξαγωγή της καταλληλότερης δυνατής μέτρησης υπέρυθρης θερμογραφίας (ή αλλιώς υπέρυθρης ραδιομέτρησης) αποτελεί, ίσως, την βασικότερη προϋπόθεση για την υλοποίηση ακριβούς και αξιόπιστου θερμογραφικού ελέγχου. Προς αυτήν την κατεύθυνση είναι πρωτεύουσας σημασίας η ουσιαστική γνώση των κυριότερων προσεγγίσεων και παραμέτρων ρύθμισης μιας υπέρυθρης ραδιομέτρησης, βάσει των συνθηκών μέτρησης και της ζητούμενης εφαρμογής. Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται, στο σύνολό τους, οι βασικότερες τεχνικές υπέρυθρης ραδιομέτρησης που απαντώνται στην διεθνή βιβλιογραφία. Ανεξαρτήτως εφαρμογής, εμφανίζονται δύο προσεγγίσεις υπέρυθρης θερμογραφίας, στις οποίες ομαδοποιούνται όλες οι παρακάτω τεχνικές: i) η *παθητική προσέγγιση* (παθητική θερμογραφία) και ii) η *ενεργητική προσέγγιση* (ενεργητική θερμογραφία) [7,8].



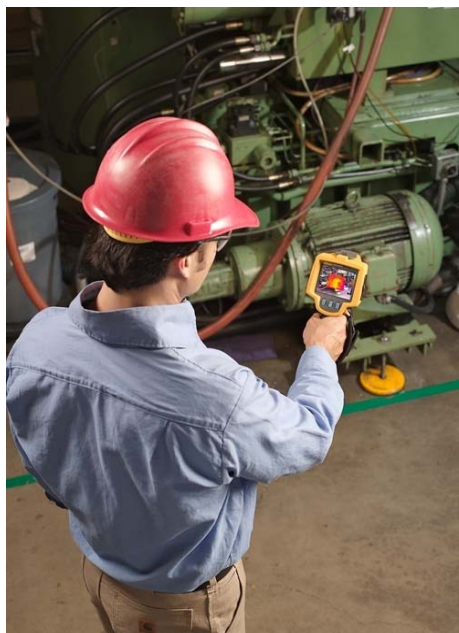
Σχήμα 4.14. Προσεγγίσεις και τεχνικές υπέρυθρης θερμογραφίας (ραδιομέτρησης) [1,8].

4.1 Παθητική προσέγγιση

Η παθητική προσέγγιση (passive thermography) εφαρμόζεται σε περιπτώσεις υπέρυθρης θερμογράφησης εξοπλισμού εν λειτουργία (on-line), στην φυσική του θέση, είτε με

μετρήσεις πεδίου (field measurements), είτε σε κλειστό, πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας (operating conditions). Στην παθητική προσέγγιση, μια ενδεχόμενη βλάβη υποδεικνύεται σε μία θερμική εικόνα ως ασυνήθιστο θερμοκρασιακό προφίλ και συσχετίζεται με τον όρο-κλειδί της *θερμοκρασιακής διαφοράς* μεταξύ της θερμοκρασίας του μετρούμενου αντικειμένου-στόχου και μιας θερμοκρασίας αναφοράς (λ.χ. της ονομαστικής θερμοκρασίας λειτουργίας μιας συσκευής) [7,9]. Η θερμοκρασιακή αυτή διαφορά ορίζεται διεθνώς, στην βιβλιογραφία, ως *delta-T value* (ΔT) ή, συχνότερα, ως *hot spot* [7]. Επιβάλλεται να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι δεν πρέπει να γίνεται σύγχυση του συγκεκριμένου όρου με τον όρο της θερμής κηλίδας (hot spot) που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, ως συνήθης τύπος βλάβης Φ/Β πλαισίων.

Κατά κανόνα, μια τιμή $\Delta T \geq 5$ °C θεωρείται ότι συνιστά “υποψία” βλάβης, ενώ μεγαλύτερες τιμές του ΔT υποδεικνύουν σοβαρές περιπτώσεις δυσλειτουργίας, βλαβών ή/και αστοχιών του υπό εξέταση εξοπλισμού [7]. Γενικώς, η παθητική θερμογραφία εφαρμόζεται για την υλοποίηση περισσότερο *ποιοτικών* μετρήσεων και συμπερασμάτων, καθώς ο σκοπός σε αυτή την προσέγγιση είναι απλά να υποδειχθούν ενδεχόμενες “ανωμαλίες” ή βλάβες στο μετρούμενο αντικείμενο-στόχο. Βέβαια, σε περιπτώσεις όπου υπάρχει διαθέσιμη και αξιόπιστη η θερμική μοντελοποίηση του υπό εξέταση εξοπλισμού, η παθητική θερμογραφία δύναται να δώσει και *ποσοτική* πληροφορία, η οποία μπορεί, στη συνέχεια, να συσχετιστεί με την επιφανειακή θερμοκρασία συγκεκριμένων περιπτώσεων βλαβών [7]. Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα παθητικής προσέγγισης, σε κλειστό χώρο, όπου μετράται το θερμοκρασιακό προφίλ μιας εν λειτουργία ηλεκτρικής μηχανής, με σκοπό την ανίχνευση ενδεχόμενων βλαβών είτε στα μηχανολογικά, είτε στη ηλεκτρικά της στοιχεία.



Σχήμα 4.15. Παράδειγμα παθητικής προσέγγισης στην υπέρυθρη θερμογράφιση εν λειτουργία ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού [1].

4.2 Ενεργητική προσέγγιση

Σε αντίθεση με την παθητική προσέγγιση, όπου το αντικείμενο-στόχος αναπτύσσει σημαντική εσωτερική θερμοκρασία λόγω του τρόπου ή του περιβάλλοντος λειτουργίας του, κατά την ενεργητική προσέγγιση (active thermography) απαιτείται η απόδοση ενός ποσού θερμικής ενέργειας στο υπό θερμογράφιση αντικείμενο, ούτως ώστε να επιτευχθούν ενδεχόμενες σημαντικές θερμοκρασιακές διαφορές στο θερμοκρασιακό του προφίλ, υποδεικνύοντας την παρουσία υποεπιφανειακών “ανωμαλιών” [7]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση θερμογραφίας εφαρμόζεται κυρίως στον έλεγχο και τον χαρακτηρισμό υλικών, σε εργαστηριακό περιβάλλον, με αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες μέτρησης.

Με κριτήριο το είδος της εξωτερικής θερμικής διέγερσης που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή μιας υπέρυθρης θερμογράφησης αυτού του τύπου, καταγράφονται πολυάριθμες τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας (βλ. επίσης Σχήμα 4.14), οι οποίες μπορούν ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες κύριες κατηγορίες: i) θερμογραφία στιγμιαίων θερμικών παλμών, ii) θερμογραφία βηματικής θερμικής διέγερσης, iii) “εστιασμένη” (lock-in) θερμογραφία, iv) επαγωγική θερμογραφία και v) θερμογραφία δονήσεων/υπερήχων [1,7]. Λόγω ακριβώς της ανάγκης χρήσης ειδικών, συχνά υψηλότατου κόστους, διατάξεων εξωτερικής θερμικής διέγερσης, το κόστος μιας θερμογράφησης ενεργητικής προσέγγισης είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μιας παθητικής προσέγγισης.

ο Θερμογραφία στιγμιαίων θερμικών παλμών (pulsed thermography, PT)

Η θερμογραφία στιγμιαίων θερμικών παλμών αποτελεί, ίσως, την ευρύτερα διαδεδομένη τεχνική ενεργητικής θερμογραφίας, λόγω του ότι εμφανίζει ορισμένα σπουδαία πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα, μεταξύ άλλων, η μέθοδος αυτή προσφέρει ταχεία θερμική επισκόπηση του αντικειμένου-στόχου και υψηλή ακρίβεια για τη πλειοψηφία των υλικών [7].

Κατά την PT, το υπό εξέταση δείγμα θερμαίνεται από θερμικούς παλμούς μικρής διάρκειας. Στη συνέχεια, καταγράφεται η απόκριση της καμπύλης θερμοκρασίας του (?), κατά την επαναφορά της στην αρχική τιμή της. Οι εφαρμοζόμενοι θερμικοί παλμοί επιτυγχάνονται συνήθως με τη χρήση λαμπτήρων στιγμιαίας λάμψης (flash lamps) και διαρκούν από μερικά ms για υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας (όπως τα μέταλλα), έως μερικά s για υλικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας (όπως τα πλαστικά και το ξύλο). Ο απαιτούμενος εξοπλισμός μιας τυπικής διάταξης ενεργητικής θερμογραφίας τύπου PT (Σχήμα 4.16), συνοψίζεται στα εξής στοιχεία [1,7]:

- Ένας ή περισσότεροι λαμπτήρες στιγμιαίας λάμψης
- Μία τράπεζα στήριξης της διάταξης των λαμπτήρων

- Μια μονάδα πρόσκτησης δεδομένων (data acquisition unit) συνδεδεμένη σε ηλεκτρονικό υπολογιστή
- Ένας ελεγκτής (controller) για το συγχρονισμό της μονάδας πρόσκτησης δεδομένων με την διάταξη των λαμπτήρων
- Μία θερμοκάμερα υψηλής ανάλυσης, με δυνατότητα συγχρονισμού (triggering) με την διάταξη του controller
- Προστατευτική μάσκα (για την προστασία της όρασης του χειριστή από την επαναλαμβανόμενη έκθεση στις ισχυρές λάμπες των λαμπτήρων)



Σχήμα 4.16. Τυπική διάταξη ενεργητικής θερμογραφίας στιγμιαίων θερμικών παλμών [1].

ο Θερμογραφία βηματικής θερμικής διέγερσης (step-heating thermography, SHT)

Στην περίπτωση της θερμογραφίας βηματικής θερμικής διέγερσης, εξετάζεται η κατανομή της αύξησης της επιφανειακής θερμοκρασίας του υπό εξέταση δείγματος, το οποίο θερμαίνεται με την εφαρμογή συνεχών παλμών θερμικής διέγερσης ή θερμικών παλμών μεγάλης διάρκειας [7].

Ένα παράδειγμα SHT είναι η τροφοδότηση ενός αγωγίμου μεταλλικού αγωγού με ηλεκτρικό ρεύμα, με αποτέλεσμα την θερμική του διέγερση, λόγω της εναπόθεσης θερμότητας (φαινόμενο Joule). Κατά τη διάρκεια της παροχής του συνεχούς παλμού θερμικής διέγερσης, ελέγχεται η ομοιομορφία (ή μη) της κατανομής της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του αγωγού. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός μιας τυπικής διάταξης ενεργητικής θερμογραφίας τύπου SHT, αποτελείται από τα εξής στοιχεία [1,7]:

- Μία πηγή βηματικής θερμικής διέγερσης (λ.χ. τροφοδοτικό ρεύματος/τάσης)

- Μία τράπεζα στήριξης της πηγής βηματικής θερμικής διέγερσης
- Μια μονάδα πρόσκτησης δεδομένων (data acquisition unit) συνδεδεμένη σε ηλεκτρονικό υπολογιστή
- Ένας ελεγκτής (controller) για τον συγχρονισμό της μονάδας πρόσκτησης δεδομένων με την πηγή βηματικής θερμικής διέγερσης (προαιρετικά)
- Μία θερμοκάμερα υψηλής ανάλυσης, με (προαιρετική) δυνατότητα συγχρονισμού (triggering) με την διάταξη του controller

ο **“Εστιασμένη” (Lock-in) θερμογραφία (LIT)**

Στην περίπτωση αυτή της lock-in θερμογραφίας, παράγονται θερμικά κύματα μέσα στο υπό θερμογράφιση δείγμα και ανιχνεύονται εξ αποστάσεως. Η παραγωγή θερμικών κυμάτων επιτυγχάνεται, για παράδειγμα, με την περιοδική εναπόθεση θερμότητας στην επιφάνεια του δείγματος, ενώ παράλληλα η προκύπτουσα μεταβολή της θερμοκρασίας του καταγράφεται από απόσταση με την ανίχνευση των θερμικών υπέρυθρων εκπομπών από μια θερμοκάμερα [7].

Για την περιοδική εναπόθεση θερμότητας, στην LIT χρησιμοποιούνται ειδικά πιστόλια θερμού αέρα (hot air guns), λαμπτήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας, ειδικοί προβολείς (projectors) κ.α. Αν και η υπέρυθρη θερμογραφία θεωρείται “επιφανειακή” μέθοδος, καθώς ανιχνεύει επιφανειακές ανωμαλίες, η τεχνική LIT παρέχει μερική δυνατότητα ελέγχου υποεπιφανειακών βλαβών (μέγιστο έως 5 mm, για ίνες γυαλιού ή άνθρακα) [7].



Σχήμα 4.17. Τυπική διάταξη ενεργητικής lock-in θερμογραφίας [1].

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός μιας τυπικής διάταξης ενεργητικής θερμογραφίας τύπου LIT (Σχήμα 4.17), συνοψίζεται στα εξής στοιχεία [1,7]:

- Μια πηγή περιοδικής εναπόθεσης θερμότητας (hot air guns, λαμπτήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας, projectors, κ.ο.κ.)
- Μία τράπεζα στήριξης της πηγής περιοδικής εναπόθεσης θερμότητας
- Μία μονάδα πρόσκτησης δεδομένων (data acquisition unit) συνδεδεμένη σε ηλεκτρονικό υπολογιστή
- Ένας ελεγκτής (controller) για τον συγχρονισμό της μονάδας πρόσκτησης δεδομένων με την πηγή περιοδικής εναπόθεσης θερμότητας
- Μία θερμοκάμερα υψηλής ανάλυσης, με δυνατότητα συγχρονισμού (triggering) με την διάταξη του controller

ο Επαγωγική θερμογραφία (induction thermography, IT)

Στην επαγωγική θερμογραφία (IT), εφαρμόζεται θερμοηλεκτρική διέγερση, με επαγωγικό τρόπο, με την παραγωγή δινορρευσμάτων [7]. Στόχος αυτής της ειδικής κατηγορίας ενεργητικής θερμογραφίας είναι να εντοπιστούν ηλεκτροαγώγιμες αστοχίες ή ασυνήθιστες διαφορές της αγωγιμότητας υλικών, σε συγκεκριμένο βάθος και συχνότητα. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός μιας τυπικής διάταξης ενεργητικής θερμογραφίας τύπου IT (Σχήμα 4.18), περιλαμβάνει [1,7]:

- Ένα ή περισσότερα επαγωγικά πηνία
- Μια γεννήτρια υψηλών συχνοτήτων
- Μια μονάδα πρόσκτησης δεδομένων (data acquisition unit) συνδεδεμένη σε ηλεκτρονικό υπολογιστή
- Μία θερμοκάμερα υψηλής ακριβείας ψυχόμενου ανιχνευτή



Σχήμα 4.18. Τυπική διάταξη επαγωγικής θερμογραφίας [1].

ο Θερμογραφία δονήσεων/υπερήχων (vibrothermography, VT)

Κατά τη ενεργητική θερμογραφία VT, υπό από την επίδραση μηχανικών δονήσεων ή υπερήχων, παράγεται θερμότητα λόγω τριβής, ακριβώς σε σημεία που είναι προβληματικά

(όπως ρωγμές), τα οποία και αναγνωρίζονται, στη συνέχεια, σε θερμική εικόνα που παράγεται από ένα σύστημα υπέρυθρης απεικόνισης [7]. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός μιας τυπικής διάταξης ενεργητικής θερμογραφίας τύπου VT (Σχήμα 4.19), συνοψίζεται στα εξής στοιχεία [1,7]:

- Μια πηγή δονήσεων/υπερήχων (sound source / ultrasonic sonotrode)
- Ένας μηχανισμός κίνησης για την μεταφορά και προσέγγιση της πηγής δονήσεων στο υπό θερμογράφηση δείγμα
- Ένα πλαίσιο τοποθέτησης και στήριξης τόσο της πηγής δονήσεων, όσο και του μηχανισμού κίνησης
- Μια μονάδα πρόσκτησης δεδομένων (data acquisition unit) συνδεδεμένη σε ηλεκτρονικό υπολογιστή
- Μία θερμοκάμερα υψηλής ακριβείας ψυχόμενου ανιχνευτή
- Ακουστικά προστασίας της ακοής του χειριστή από τους παραγόμενους ήχους



Σχήμα 4.19. Τυπική διάταξη θερμογραφίας δονήσεων/υπερήχων [1].

4.3 Παράμετροι και συνθήκες υπέρυθρης ραδιομέτρησης

Πριν από την εφαρμογή κάθε υπέρυθρης ραδιομέτρησης και, ιδιαίτερα, σε πραγματικές συνθήκες πεδίου, όπου οι περιβαλλοντικές παράμετροι και η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζουν σημαντικά το φάσμα και την ένταση της ανιχνευόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας, επιβάλλεται να ακολουθείται μια διαδικασία ρυθμίσεων παραμέτρων του ραδιομετρικού εξοπλισμού. Οι ρυθμίσεις αυτές επικεντρώνονται κυρίως στις παραμέτρους: i) του *συντελεστή ικανότητας εκπομπής* (emissivity factor), ii) της *αντιστάθμισης του φόντου* (background compensation), iii) της *αντιστάθμισης της ατμόσφαιρας* (ambient compensation) και iv) της *γεωμετρικής διακριτικής ικανότητας* (instantaneous field of view, IFOV) [1,6,7,9].

ο Συντελεστής ικανότητας εκπομπής

Ο συντελεστής emissivity, ο οποίος μελετήθηκε διεξοδικά στην Υποενότητα 2.3.2, αποτελεί την σημαντικότερη, ίσως παράμετρο ρύθμισης σε μία υπέρυθρη ραδιομέτρηση, καθώς είναι αυτή που επηρεάζει στον μεγαλύτερο βαθμό την ακρίβεια και την επαναληψιμότητα μιας μέτρησης. Επιφάνειες με χαμηλό emissivity (συνήθως λείες, μεταλλικές) συμπεριφέρονται ως “καθρέπτες” υπέρυθρης ακτινοβολίας και καθιστούν μια ραδιομέτρηση ιδιαίτερα δύσκολη, αφού το ποσό της εκπεμπόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας από το αντικείμενο-στόχο μεταβάλλεται από την παρεμβαλλόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία άλλων σωμάτων, πλησίον (συνήθως εμπρός και εκατέρωθεν) του στόχου, λόγω έντονων ανακλάσεων. Η επίδραση του συντελεστή ικανότητας εκπομπής του αντικειμένου, μπορεί να αντισταθμιστεί με την εκ των προτέρων ρύθμιση της πραγματικής τιμής του, για το υλικό της επιφάνειας-στόχου που μετράται, δυνατότητα που προσφέρεται στην συντριπτική πλειοψηφία των σύγχρονων θερμοκαμερών [1,2,7].

Ωστόσο, η γνώση του emissivity κάθε υλικού, πριν αυτό θερμογραφηθεί, συνοδεύεται συχνά από μια μάλλον έντονη αβεβαιότητα (emissivity uncertainty), καθώς η συγκεκριμένη παράμετρος δεν εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το κάθε υλικό, αλλά θεωρητικά είναι ασταθής, έντονα μεταβαλλόμενη συναρτήσει της θερμοκρασίας και της ποιότητας της μετρούμενης επιφάνειας, του σχήματος του αντικειμένου-στόχου και της γωνίας μέτρησης. Ως εκ τούτου, για την εύρεση του emissivity του υπό μέτρηση υλικού, σε τυχαίες συνθήκες μέτρησης, η χρήση πινάκων τιμών, όπως ο Πίνακας 4.1, έχει μεν “συμβουλευτικό” χαρακτήρα, δεν θεωρείται ωστόσο “ασφαλής” πρακτική [1,2,7].

Πίνακας 4.1. Ενδεικτικές τιμές συντελεστή ικανότητας εκπομπής (%) βασικών υλικών [1].

Αντικείμενο	Emissivity factor %	Αντικείμενο	Emissivity factor %
Αλουμίνιο (λείο)	2...15	Πορσελάνη	85...95
Αλουμίνιο (οξειδωμένο)	25	Κεραμικά	85...95
Χάλυβας (λείος)	10...30	Γυαλί / γυαλί χαλαζία	72...87
Χάλυβας (οξειδωμένος)	60...80	Βερνίκι	85...95
Χαλκός (εμπορικός)	7	Ξύλο	80...92
Χαλκός (οξειδωμένος)	65...88	Νερό	95
Πλαστικό PVC	85...95	Χαρτί	92...95
Καουτσούκ	85...95	Ύφασμα	75...95

Καθώς όμως, όπως προαναφέρθηκε, η ρύθμιση της σωστής τιμής emissivity πριν από κάθε ραδιομέτρηση, είναι καθοριστικής σημασίας για την ακρίβεια της μετρούμενης θερμοκρασίας, ο υπολογισμός του emissivity γίνεται με βάση δύο εμπειρικές τεχνικές.

Κατά την πρώτη τεχνική, τοποθετείται μαύρη ειδική ταινία (με γνωστό $\varepsilon \approx 1$) στην επιφάνεια του υπό θερμογράφιση σώματος, και μετράται με την θερμοκάμερα η θερμοκρασία T_{film} της επιφάνειας του σώματος, στο σημείο όπου έχει τοποθετηθεί η ταινία. Στη συνέχεια,

θερμογραφείται ένα γειτονικό σημείο “καθαρής” επιφάνειας (ακάλυπτης από την ταινία) στο ίδιο σώμα και, από την θερμοκάμερα, ο συντελεστής ε ρυθμίζεται σταδιακά έως ότου αυτή να μετρά θερμοκρασία $T = T_{film}$. Έτσι, ο συντελεστής ε για τον οποίο η νέα μετρούμενη θερμοκρασία T ισούται με την T_{film} , είναι ο ζητούμενος συντελεστής emissivity του αντικείμενου-στόχου [2]. Κατά την δεύτερη τεχνική, χρησιμοποιείται ένα ακριβές θερμόμετρο επαφής για την μέτρηση της θερμοκρασίας επιφάνειας (έστω $T_{contact}$) του υπό θερμογράφηση σώματος. Η μέτρηση αυτή με το θερμόμετρο επαφής, απαλλαγμένη από την αβεβαιότητα του emissivity, θεωρείται αξιόπιστη και ακριβής. Στη συνέχεια, με χρήση θερμοκάμερας, μετράται η θερμοκρασία επιφάνειας (έστω T_{IR}) του ίδιου σώματος και, από την θερμοκάμερα, ο συντελεστής ε ρυθμίζεται σταδιακά έως ότου $T_{IR} = T_{contact}$. Προφανώς, ο συντελεστής ε για τον οποίο επέρχεται η συγκεκριμένη ισότητα, είναι ο ζητούμενος συντελεστής emissivity του αντικείμενου-στόχου [1,7].

ο Αντιστάθμιση του φόντου

Η αντιστάθμιση του φόντου μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην υπέρυθρη ραδιομέτρηση. Οι σύγχρονες θερμοκάμερες διαθέτουν ενσωματωμένο (built-in) αλγόριθμο ο οποίος παρέχει την δυνατότητα κατάλληλης διόρθωσης του σφάλματος φόντου, ώστε να αντισταθμίζεται η επίδραση αντικειμένων που βρίσκονται κοντά στο αντικείμενο-στόχο. Η δυνατότητα αυτή καλείται αντιστάθμιση ανακλώμενης θερμοκρασίας (reflected temperature compensation, RTC) [1,10].

Αν τα αντικείμενα που βρίσκονται στο φόντο εκπέμπουν μεγαλύτερες ποσότητες υπέρυθρης ακτινοβολίας σε σύγκριση με το υλικό του στόχου, είτε λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας τους, είτε λόγω μεγαλύτερου συντελεστή ε , η προερχόμενη από το φόντο υπέρυθρη ακτινοβολία προστίθεται στην ανιχνευόμενη ακτινοβολία από την θερμοκάμερα, προκαλώντας σφάλμα στη μέτρηση. Με άλλα λόγια λοιπόν, η RTC χρησιμοποιείται για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας σε υπέρυθρες ραδιομετρήσεις στις οποίες, λόγω της ύπαρξης πολύ υψηλής θερμοκρασίας φόντου (ομοιόμορφα κατανεμημένης), επιπλέον θερμική ενέργεια ανακλάται από το υλικό του στόχου.

ο Αντιστάθμιση της ατμόσφαιρας

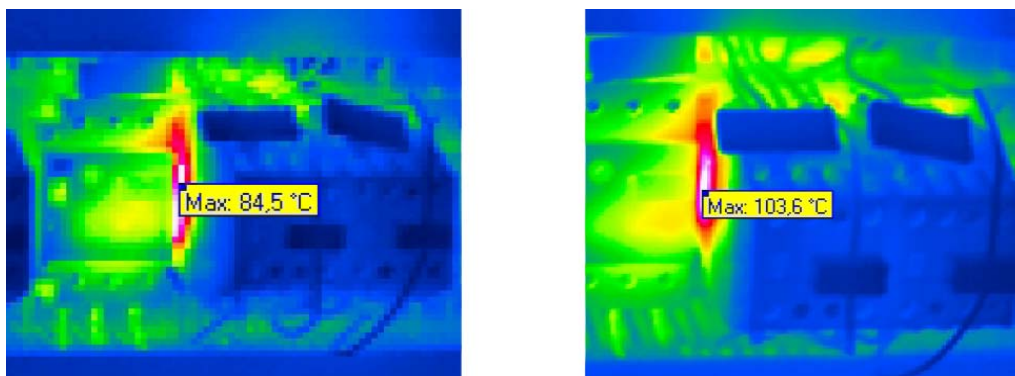
Εκτός από τις συνθήκες του φόντου, τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας που παρεμβάλλεται μεταξύ της θερμοκάμερας και του υπό μέτρηση αντικείμενου, ενδέχεται επίσης να επηρεάσουν την ακρίβεια της ραδιομέτρησης. Συγκεκριμένα, αν η απόσταση θερμοκάμερας-στόχου (lens-target ratio) είναι μεγάλη και το υπό θερμογράφηση αντικείμενο βρίσκεται σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε η υπέρυθρη ακτινοβολία των

αντικειμένων που περιβάλλουν τον στόχο, καθώς και η ίδια η ατμόσφαιρα, θα αντανακλώνται από το αντικείμενο προς τον αισθητήρα της θερμοκάμερας και θα μετρώνται σαν επιπλέον εκπεμπόμενη ακτινοβολία, προκαλώντας, φυσικά, ανακρίβεια στην τελική μέτρηση.

Όπως και στην περίπτωση της αντιστάθμισης φόντου (RTC), οι σύγχρονες θερμοκάμερες διαθέτουν ενσωματωμένο αλγόριθμο ο οποίος παρέχει την δυνατότητα κατάλληλης αντιστάθμισης της ατμόσφαιρας. Η τιμή της αντιστάθμισης (ambient compensation value, ACV) υπολογίζεται αυτόματα βάσει των τιμών-εισόδων (inputs) της θερμοκρασίας αέρα, της σχετικής υγρασίας και της απόστασης από το αντικείμενο [1,10]. Συνεπώς, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια ραδιομέτρησης και χρήσης της ACV, ο χειριστής είναι απαραίτητο να γνωρίζει και να παρέχει στη θερμοκάμερα τις παραπάνω παραμέτρους.

ο Γεωμετρική διακριτική ικανότητα

Γεωμετρική διακριτική ικανότητα καλείται το ελάχιστο μέγεθος αντικειμένου που, για συγκεκριμένη απόσταση θερμοκάμερας-στόχου, προβάλλεται σε ένα εικονοστοιχείο (pixel) του αισθητηρίου. Συνήθως δε εκφράζεται με τον όρο IFOV (instantaneous field of view) και μετράται σε mrad. Γενικά, για μια αξιόπιστη υπέρυθρη ραδιομέτρηση, το ελάχιστο μετρούμενο μέγεθος αντικειμένου σε συγκεκριμένη απόσταση, είναι αυτό που καλύπτει την επιφάνεια δύο έως τεσσάρων pixels. Κατά συνέπεια, για την καλύτερη δυνατή επαναληψιμότητα και αξιοπιστία μιας μέτρησης, θα πρέπει η απόσταση της θερμοκάμερας-στόχου να διατηρείται σταθερή και να χρησιμοποιούνται θερμοκάμερες που έχουν την ίδια ανάλυση αισθητήρα και την ίδια IFOV [1].



Σχήμα 4.20. Επίδραση της διαφορετικής IFOV στην ακρίβεια της υπέρυθρης ραδιομέτρησης [1].

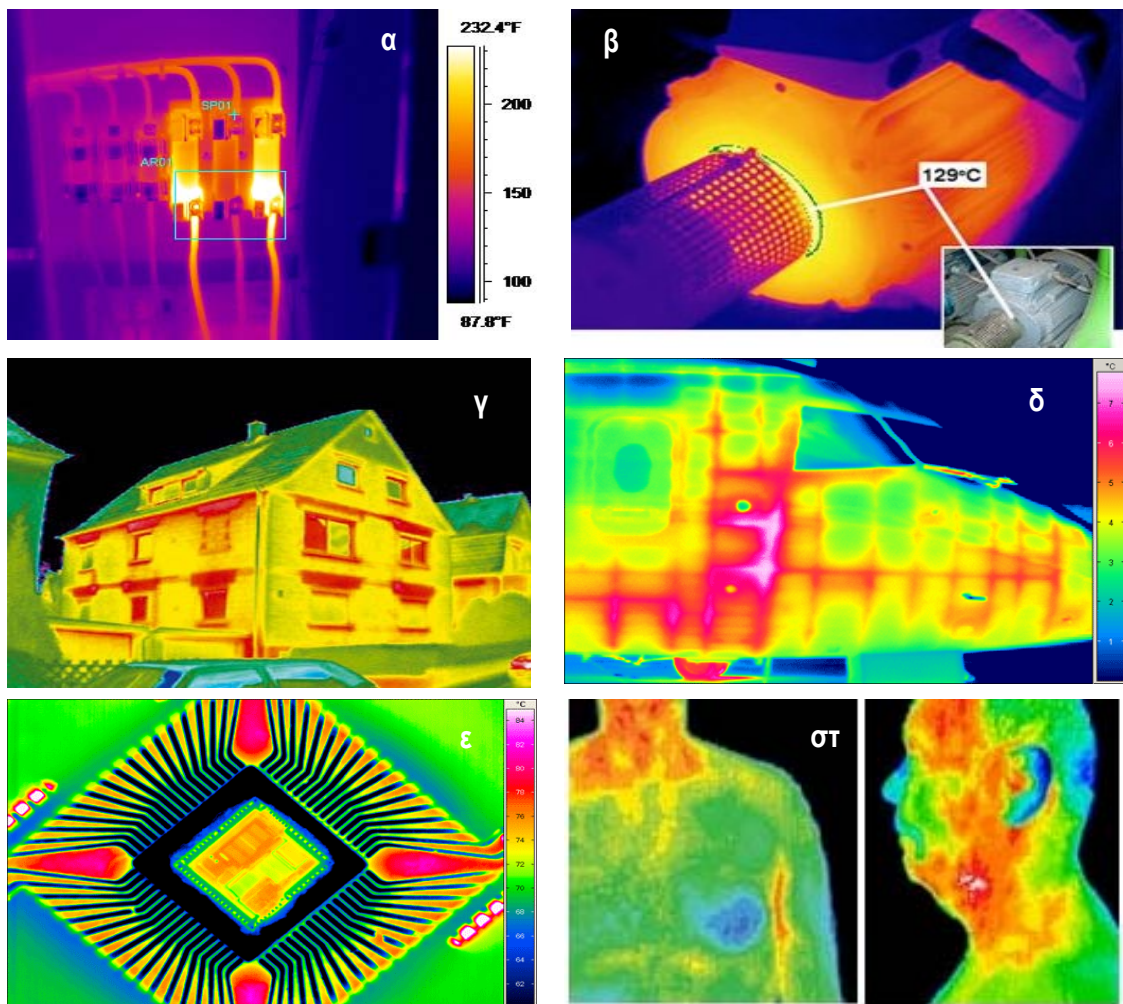
4.4 Πεδία εφαρμογών – πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί πολύτιμο εργαλείο ανίχνευσης και διάγνωσης βλαβών, αστοχιών, ασυνήθιστων θερμοκρασιακών προφίλ και προβλημάτων σε πολλαπλά πεδία εφαρμογών, εκ των οποίων τα κυριότερα συνοψίζονται στα εξής [2]:



- **Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός και συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.** Η υπέρυθρη θερμογραφία θεωρείται η πιο διαδεδομένη μέθοδος μη καταστροφικού ελέγχου και προληπτικής συντήρησης για όλες τις ηλεκτρικές και μηχανολογικές εγκαταστάσεις (Σχήμα 4.21), οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν: καλωδιώσεις, συστήματα διανομής, μετασχηματιστές, μονωτήρες, ασφάλειες, διακόπτες, ηλεκτρικές μηχανές, στοιχεία μηχανών (ένσφαιροι τριβείς, περιστρεφόμενοι άξονες, κ.α.), τμήματα σωληνώσεων, λέβητες, κ.α.. Ιδιαίτερα δε κατά την τελευταία διετία, η υπέρυθρη θερμογραφία συναντάται και σε πολλά υποσχόμενες εφαρμογές επιθεώρησης συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως τα Φ/Β συστήματα και τα συστήματα ανεμογεννητριών.
- **Κτιριακές εγκαταστάσεις.** Η υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιείται επίσης στην μελέτη των κατασκευών και των κτιριακών εγκαταστάσεων (Σχήμα 4.21), βοηθώντας στον εντοπισμό γεωμετρικών και κατασκευαστικών θερμογεφυρών, ελλιπούς μόνωσης, κακής αεροστεγάνωσης, επιφανειακών ρωγμών, υγρασίας κ.α.
- **Περιβαλλοντικές εφαρμογές.** Η χρήση της υπέρυθρης θερμογραφίας σε περιβαλλοντικές επιθεωρήσεις συντελεί στον εντοπισμό αστικών θερμικών νησίδων, στην θερμική καταγραφή θαλάσσιας (υπεράκτιας) και παράκτιας ρύπανσης (λ.χ. από υδρογονάνθρακες), ρύπανσης ποταμών και λιμνών (λ.χ. από θερμά, υγρά πυρηνικά απόβλητα), καθώς και στην πρόληψη περιπτώσεων πυρκαγιών σε εκτεταμένες δασικές εκτάσεις.
- **Πετροχημικές εφαρμογές.** Η υπέρυθρη θερμογραφία εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις διυλιστηρίων για την αξιολόγηση τους, τον εντοπισμό απωλειών μόνωσης των καυστήρων, την ανίχνευση διαρροών, τον έλεγχο της απόδοσης εναλλακτών θερμότητας και τον προσδιορισμό της στάθμης δεξαμενών.
- **Εφαρμογές ηλεκτρονικής και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.** Σε αυτό το πεδίο εφαρμογών, η υπέρυθρη θερμογραφία βοηθά στην ηλεκτρική και θερμική επιθεώρηση των συγκολλήσεων και των συνδέσεων διαφόρων μικροεξαρτημάτων και ηλεκτρονικών στοιχείων που ενσωματώνονται σε ψηφιακά και ολοκληρωμένα κυκλώματα (Σχήμα 4.21), καθώς και στην θερμική χαρτογράφηση ημιαγωγών.
- **Αεροναυπηγική.** Στην περίπτωση της αεροναυπηγικής (Σχήμα 4.21), η υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σημείων εισροής υγρασίας ή αέρα, πιθανών ρωγμών, διαβρώσεων και ατελειών στο κέλυφος ενός αεροσκάφους, καθώς και για την επιθεώρηση των μηχανικών μερών του, των τροχών, των φτερών, κ.α.
- **Αυτοκινητοβιομηχανία.** Η υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιείται στο πεδίο αυτό, κυρίως για τον θερμικό έλεγχο των ελαστικών και τον έλεγχο θερμομηχανικής καταπόνησης στις αναρτήσεις και τα κιβώτια ταχυτήτων.

- **Ιατρική.** Η μελέτη της θερμοκρασίας του ανθρώπινου σώματος χρησιμοποιείται συχνά για τον εντοπισμό προβλημάτων υγείας (Σχήμα 4.21). Έτσι, σήμερα, η υπέρυθρη θερμογραφία αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη διαγνωστική μέθοδο, η οποία επιτρέπει στον γιατρό να αναγνωρίσει θερμικές ενδείξεις ασθενειών στην επιφάνεια του δέρματος του ασθενή, προβλημάτων του κυκλοφορικού συστήματος, καθώς και πολλές περιπτώσεις όγκων, συχνά μάλιστα πριν εμφανιστούν σοβαρότερα ή/και μη αναστρέψιμα προβλήματα. Σε αντίθεση, μάλιστα, με άλλες προηγμένες διαγνωστικές μεθόδους όπως η αξονική τομογραφία και η ραδιογραφία, η υπέρυθρη θερμογραφία είναι απόλυτα ασφαλής, ταχύτερη, τελείως ανώδυνη και δεν προκαλεί δυσφορία στον εξεταζόμενο ασθενή. Υπολείπεται ωστόσο, προς το παρόν, των καθιερωμένων διαγνωστικών μεθόδων σε ακρίβεια και κόστος εξοπλισμού.



Σχήμα 4.21. Παραδείγματα εφαρμογών IRT: **α.** και **β.** ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, **γ.** επιθεώρηση κτιρίων, **δ.** αεροναυπηγική, **ε.** ολοκληρωμένα κυκλώματα, **στ.** ιατρική [1,2].

Η παρούσα Ενότητα των μετρήσεων υπέρυθρης θερμογραφίας ολοκληρώνεται με τον Πίνακα 4.2, όπου παρουσιάζονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου, ανεξαρτήτως πεδίου εφαρμογής.

Πίνακας 4.2. Κυριότερα πλεονεκτήματα (+) και μειονεκτήματα (-) της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας, ανεξαρτήτως πεδίου εφαρμογής [1,4,7,9,11].

	
1. Ταχύς ρυθμός ελέγχου. 2. Μη καταστροφική μέθοδος. 3. Δεν απαιτείται επαφή με το προς μέτρηση αντικείμενο. 4. Ασφάλεια προσωπικού. 5. Μια θερμική εικόνα είναι σχετικά εύκολο να “μεταφραστεί” ακόμη και από μη εξειδικευμένο προσωπικό. 6. Απαιτούνται σχετικά απλές τεχνικές επεξεργασίας των θερμικών εικόνων. 7. Μεγάλο εύρος εφαρμογών. 8. Δυνατότητα πρόληψης ή/και πρόγνωσης σε ορισμένες περιπτώσεις πρώιμων βλαβών.	1. Υψηλό κόστος και πολυπλοκότητα των διατάξεων θερμικής διέγερσης. 2. Κίνδυνος εμφάνισης ψευδών ενδείξεων λόγω επίδρασης του φόντου ή της ατμόσφαιρας. 3. Υψηλό κόστος εξοπλισμού. 4. Ανιχνεύονται μόνο βλάβες που σχετίζονται με μεταβολή του θερμικού αποτυπώματος του εξοπλισμού. 5. Περιορισμένη δυνατότητα διάγνωσης υποπιφανειακών βλαβών σε μεγάλο βάθος. 6. Αβεβαιότητες σχετικά με τον συντελεστή ικανότητας εκπομπής.

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Η ανάλυση των θερμικών εικόνων που λαμβάνονται σε κάθε υπέρυθρη θερμογράφιση παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την επιφανειακή θερμοκρασιακή κατανομή σε ένα αντικείμενο. Περαιτέρω επεξεργασία των θερμικών εικόνων πολλές φορές μπορεί να “αποκαλύψει” πιθανές ανωμαλίες στην θερμική υπογραφή του υπό εξέταση αντικειμένου, οι οποίες στην πρωτογενή μορφή της θερμικής εικόνας (raw thermal images) ήταν συγκεχυμένες ή μη ορατές. Οι προκύπτουσες πληροφορίες από αυτήν την επεξεργασία, σε συνδυασμό με δεδομένα σχετικά με την φυσική δομή και την θερμοδυναμική κατάσταση του εξοπλισμού, χρησιμοποιούνται για την τελική εκτίμηση του επιπέδου φθοράς και τον χαρακτηρισμό ή/και την ταξινόμηση της βλάβης ή της αστοχίας. Υπάρχει, λοιπόν, ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο

έρευνας, μέσα από την σχετική βιβλιογραφία, το οποίο αφορά στην εφαρμογή υπαρχόντων και στην ανάπτυξη νέων τεχνικών επεξεργασίας θερμικών εικόνων [12].

5.1 Τεχνικές επεξεργασίας

Η πλειοψηφία των τεχνικών επεξεργασίας που έχουν καταγραφεί και εφαρμόζονται στην ανάλυση θερμικών εικόνων αφορούν σε δημοφιλείς μεθόδους και αλγορίθμους, των οποίων η αποτελεσματικότητα θεωρείται αποδεδειγμένη κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, σε εφαρμογές υπολογιστικής όρασης και επεξεργασίας συμβατικής εικόνας. Τέτοιες μέθοδοι είναι η ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος (regions of interest, ROI analysis), η ανάλυση γραμμικών προφίλ (line profile analysis), η στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων (histogram statistical analysis), το φιλτράρισμα (filtering), η εξαγωγή χαρακτηριστικών (feature extraction), κ.α.

Στις μελέτες των C. Ibarra-Castanedo et al., S. Vergura et al. και M. Kosikowski et al. [13-15] προτείνονται ορισμένα εργαλεία προεπεξεργασίας των θερμικών εικόνων, όταν αυτές – στην πρωτογενή τους μορφή – δεν παρέχουν ικανοποιητική πληροφορία για την κατάσταση του υπό εξέταση εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, στην μελέτη των C. Ibarra-Castanedo et al. [13], προτείνεται ο περιορισμός του θορύβου, με την χρήση φίλτρων όπως το Gaussian και το φίλτρο διαμέσου (median). Επίσης, στην ίδια μελέτη, οι συγγραφείς προτείνουν απλές τεχνικές αφαίρεσης (subtraction), όπως η χωρική και η χρονική αναφορά (spatial and temporal reference), οι τελεστές εξομάλυνσης (smoothing operators), τα υπερπαρατά φίλτρα και οι τελεστές Sobel (Sobel operators) οι οποίες επιτρέπουν την εξάλειψη των ανεπιθύμητων σημάτων και την εξαγωγή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Στην ίδια μελέτη, τέλος, παρουσιάζονται επίσης πολυάριθμες τεχνικές βελτίωσης των “αχνών” θερμικών υπογραφών, στις οποίες περιλαμβάνονται: i) ο υπολογισμός της θερμικής αντίθεσης (thermal contrast computation), ii) η κανονικοποίηση (normalization), iii) η θερμογραφία φάσης παλμού (pulsed phase thermography, PPT), iv) η θερμογραφία κύριας συνιστώσας (principal component thermography, PCT), v) η 1^η και η 2^η παράγωγος, vi) η ποσοτική επεξεργασία (αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων και κατάτμησης) και vii) η στατιστική ανάλυση της “συμπεριφοράς” συγκεκριμένων περιοχών ενδιαφέροντος.

Στην μελέτη των S. Vergura et al. [14], προτείνεται η χρήση φίλτρων median και Gaussian και στη συνέχεια η εφαρμογή της ανίχνευσης ακμών, σε θερμικές εικόνες με “φτωχό” περιεχόμενο ακατάλληλο για άμεση διάγνωση. Από την άλλη πλευρά, στην μελέτη των M. Kosikowski et al. [15], προτείνονται τεχνικές με βάση διακριτούς και συνεχείς μετασχηματισμούς κυματιδίων. Στην ίδια εργασία, η χωρική κλίμακα αναπαράστασης (space-scale representation) χρησιμοποιείται για την ανίχνευση θερμικών ανομοιομορφιών στις επιφανειακές στρώσεις των υπό εξέταση αντικειμένων.

Στόχος της μελέτης των I. Abdel-Qader et al. [16], ήταν η επίτευξη αυτόματου εντοπισμού υποεπιφανειακών ελαττωμάτων σε καταστώματα γεφυρών από σκυρόδεμα, με τη χρήση

υπέρυθρης θερμογραφίας. Ο αλγόριθμός που αναπτύχθηκε από τους συγγραφείς για αυτόν το σκοπό, βασίστηκε στην προσέγγιση των “αναπτυσσόμενων περιοχών” (region growing approach), η οποία κατατμήνι την θερμική εικόνα σε “ελαττωματικές” και “υγιείς” περιοχές, χρησιμοποιώντας μια ολοκληρωμένη μέθοδο προσαρμοζόμενου κατωφλίου (adaptive thresholding). Στις περισσότερες περιπτώσεις της συγκεκριμένης μελέτης, οι προσκτημένες πρωτογενείς θερμικές εικόνες υποβλήθηκαν σε προεπεξεργασία με τη χρήση ενός 3×3 φίλτρου Gaussian, προκειμένου να εξομαλυνθούν τα ακραία, απομονωμένα φωτεινά εικονοστοιχεία. Μια άλλη ενδιαφέρουσα προσέγγιση καταγράφεται στην μελέτη των Y.-C. Chou et al. [17], όπου προτείνεται ένα σύστημα με τον τίτλο ITADA (Infrared Thermography Anomaly Detection Algorithm), η υλοποίηση του οποίου βασίζεται στην αρχή της στατιστικής επιλογής κατωφλίου του Otsu, με την χρήση ιστογραμμάτων στην κλίμακα του γκρι.

Στην μελέτη των Y.A. Plotnikov et al. [18], επιχειρείται μια σύγκριση μεταξύ των μεθόδων θερμικής αντίθεσης (thermal contrast), χρονικής παραγώγου (time derivative) και ανάλυσης φάσης (phase analysis), για την οπτικοποίηση ελαττωμάτων και βλαβών, στην θερμική εικόνα. Στην ίδια εργασία, η διαδικασία της εξαγωγής ακμών (edge extraction), με βάση των υπολογισμό της κλίσης της εικόνας (image gradient computation), εφαρμόστηκε στην ανάλυση εικόνων φάσης. Στα συμπεράσματα της εργασίας, συνοψίζεται ότι η θερμική αντίθεση αποδεικνύεται η καταλληλότερη παράμετρος για την υλοποίηση της εξαγωγής ακμών των περιοχών της θερμικής εικόνας που αντιστοιχούν σε ελαττώματα. Στα ίδια συμπεράσματα αναφέρεται, επιπλέον, ότι η κορυφή της κλίσης (peak slope) της εικόνας, μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική χαρακτηριστική μέτρησης του βάθους ενός ελαττώματος.

Στην μελέτη των L. Bai et al. [19], παρουσιάζεται μια τεχνική επεξεργασίας θερμικών εικόνων, η οποία συνδυάζει την ανάλυση τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Μια διαδικασία interframe comparison denoise και ένα φίλτρο προσαρμοζόμενου τύπου χρησιμοποιήθηκαν στην ίδια εργασία, για την υποβάθμιση των επιπέδων θορύβου στις θερμικές εικόνες. Στην δε μελέτη των A. Savelyev et al. [20], εφαρμόζονται τεχνικές γεωαναφοράς (georeferencing) και μωσαϊκού (mosaicing), σε συνδυασμό με αυτοματοποιημένη στατιστική ανάλυση, σε θερμικές εικόνες οι οποίες προσκτήθηκαν με σκοπό την χαρτογράφηση των θερμοκρασιών εδάφους, σε μια Πανεπιστημίουπολη. Στην ίδια εργασία, εφαρμόζεται επίσης η τεχνική της επέκτασης του ιστογράμματος (histogram stretching), με τιμές ορίων βάσει της ανισότητας του Chebyshev, για τη βελτίωση της οπτικής αντίθεσης των εικόνων.

Η επεξεργασία θερμικών εικόνων είναι αρκετά διαδεδομένη και σε εφαρμογές ιατρικής. Για παράδειγμα, τεχνικές όπως το φιλτράρισμα, η σύμπτυξη δεδομένων (data compression), η αύξηση της ψευδοχρωματικής αντίθεσης (false colour enhancement), η ανάλυση ιστογραμμάτων και περιοχών ενδιαφέροντος, έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία [21-23]. Επίσης, περισσότερο προηγμένες και πετυχημένες τεχνικές για την επεξεργασία θερμικών εικόνων παθητικής θερμογραφίας, θεωρούνται οι υπολογισμοί χαρακτηριστικών βάσει στατιστικών παραμέτρων 1^{ης}

και 2^{ης} τάξης, η ανάλυση κύριων συνιστωσών, η γραμμική διαχωριστική ανάλυση (linear discriminant analysis, LDA), τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, η ταξινόμηση πλησιέστερων στοιχείων (k-nearest neighbor classification, NCC) και αντίστοιχοι αλγόριθμοι, καθώς επίσης και η ανίχνευση ακμών. Ειδικότερα για την ανίχνευση ακμών, στην μελέτη των N. Scales et al. [21], προτείνεται μια προσέγγιση σειρών ανιχνευτών ακμών Canny, λόγω της ανοχής τους στον θόρυβο και στην ικανότητα τους να διαχειρίζονται εξίσου ψευδώς-αρνητικές και ψευδώς-θετικές ενδείξεις. Για την τεχνικές ενεργητικής θερμογραφίας, περισσότερο διαδεδομένες θεωρούνται οι τεχνικές επεξεργασίας βάσει μετασχηματισμών, όπως οι μετασχηματισμοί Fourier και κυματιδίων. Από την άλλη πλευρά, η αποτελεσματικότητα της χρήσης πολυφασματικής ανάλυσης στην επεξεργασία σειρών θερμικών εικόνων, βρίσκεται προς το παρόν υπό επιστημονική διερεύνηση [23].

Πλην των πολυάριθμων προαναφερθέντων επιστημονικών εργασιών, συναντώνται, τέλος, συγκεκριμένα κεφάλαια βιβλίων [4,7,24], όπου εξετάζονται θέματα τεχνικών επεξεργασίας θερμικών εικόνων, όπως η βελτιστοποίηση εικόνων τόσο στο χωρικό πεδίο όσο και στο πεδίο της συχνότητας (frequency/spatial domain image enhancement), αλγόριθμοι εντοπισμού, τεχνητά, νευρωνικά δίκτυα, στατιστικές μέθοδοι, PPT, ανάλυση κυματιδίων, αλγόριθμοι σύντηξης, αφαίρεσης ή κατάτμησης εικόνων και αναγνώριση προτύπων.

5.2 Θερμικό αποτύπωμα – Αξιολόγηση και ταξινόμηση βλαβών

Όπως γίνεται αντιληπτό, η διαγνωστική ικανότητα της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας έγκειται ουσιαστικά στην υψηλή της ευαισθησία κατά την αναγνώριση “ανώμαλων”, ανομοιόμορφων θερμοκρασιακών προφίλ, τα οποία συχνά συνιστούν ενδείξεις ελαττωματικών εξαρτημάτων και κατασκευών, βλαβών, φθοράς ή/και αστοχίας ενός εξοπλισμού.

Με άλλα λόγια, υπάρχει ένα λεγόμενο *θερμικό αποτύπωμα* ή αλλιώς μια *θερμική υπογραφή*, που αντιστοιχεί σε κάθε υπό εξέταση αντικείμενο. Το θερμικό αποτύπωμα διαφοροποιείται τόσο ως προς την μορφή του, όσο και ως προς την θερμική του απόκριση, όταν το αντικείμενο περάσει από μια “υγιή” σε μία “προβληματική” κατάσταση και αντίστροφα [1]. Η εξέλιξη ενός θερμικού αποτυπώματος, μπορεί να παρακολουθηθεί με τη χρήση εξοπλισμού υπέρυθρης θερμογραφίας. Συχνά, ωστόσο, με βάση την πρωτογενή μορφή ενός θερμικού αποτυπώματος, δεν προκύπτουν πληροφορίες αξιοποιήσιμες από ένα διαγνωστικό σύστημα CM. Για τον λόγο αυτό απαιτείται συχνά επεξεργασία της αντίστοιχης θερμικής εικόνας, με τεχνικές επεξεργασίας όπως αυτές που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη Υποενότητα.

Σε συνάρτηση με μια σειρά παραγόντων, όπως το εκάστοτε πεδίο εφαρμογής μιας υπέρυθρης θερμογράφησης, οι συνθήκες μέτρησης, το επίπεδο φόρτισης και κρισιμότητας του εξοπλισμού, κ.α., επιλέγεται η χρήση μιας κλίμακας ταξινόμησης των θερμικών αποτυπωμάτων βλαβών. Στην κλίμακα αυτή καθορίζεται το εύρος του ΔT κάθε επιπέδου ταξινόμησης και



ορίζονται αντίστοιχες προτεραιότητες επιδιόρθωσής των βλαβών, στα πλαίσια ενός προγράμματος συντήρησης. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα ταξινόμησης βλαβών και προτεραιοτήτων σε υπέρυθρες θερμογραφίες ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, παρουσιάζεται στον Πίνακα 3 [1].

Πίνακας 3. Ταξινόμηση θερμικών αποτυπωμάτων βλαβών ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.

Ταξινόμηση	Επίπεδο ΔT	Σχόλιο – Προτεινόμενη δράση
ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ 0	$\Delta T \leq 5^\circ\text{C}$	Δεν απαιτείται διορθωτική επισκευή αυτή τη χρονική στιγμή.
ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ 1	$5^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 10^\circ\text{C}$	Στην επόμενη συντήρηση, απαιτείται διορθωτική επισκευή.
ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ 2	$10^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 15^\circ\text{C}$	Απαιτείται να προγραμματιστεί σύντομα διορθωτική επισκευή.
ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ 3	$15^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 50^\circ\text{C}$	Απαιτείται διορθωτική επισκευή, όσο πιο σύντομα γίνεται.
ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑ 4	$\Delta T \geq 50^\circ\text{C}$	Κίνδυνος ασφαλείας. Απαιτείται άμεση διορθωτική επισκευή.

Τέλος, μια πολύ καλή και συχνά αποδοτική πρακτική, σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διάγνωσης/πρόγνωσης βλαβών και CM, θεωρείται η οργάνωση “βιβλιοθήκης” (αρχείου) θερμικών αποτυπωμάτων του συνόλου του εξοπλισμού, με πληροφορίες για την χρονική περίοδο και τις συνθήκες κάθε υπέρυθρης ραδιομέτρησης, καθώς και για τις τυχόν παρατηρήσεις από την ανάλυση των θερμικών εικόνων, ώστε να παρακολουθείται η εξέλιξη της λειτουργίας ή των ενδεχόμενων βλαβών του εξοπλισμού [1]. Με αυτό τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα πρόληψης και πρόγνωσης αστοχιών που επηρεάζουν σημαντικά το κόστος λειτουργίας ενός συστήματος και, συνεπώς, τον χρόνο απόσβεσης της αντίστοιχης επένδυσης.

6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Όπως στην διαγνωστική Ιατρική η θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος αποτελεί δείκτη της κατάστασης της υγείας του ανθρώπου, έτσι και στην επιστήμη του Μηχανικού, το θερμοκρασιακό προφίλ της επιφάνειας ενός εξοπλισμού ή μιας κατασκευής παρέχει συχνά πληροφορίες για την αξιόπιστη διάγνωση ελαττωμάτων, βλαβών, φθοράς ή αστοχιών. Προς αυτήν την κατεύθυνση, με την μέτρηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπει κάθε υλικό αναλόγως της θερμοκρασίας του και την μετατροπή της σε θερμική εικόνα, η υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιείται – όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στη σχετική βιβλιογραφία – για να δει κανείς αυτό που με την ανθρώπινη όραση δεν φαίνεται (“to see the unseen”): το θερμικό αποτύπωμα μιας βλάβης.

Κλείνοντας το συνολικό θεωρητικό κομμάτι αυτής της Διδακτορικής Διατριβής, το Κεφάλαιο που ολοκληρώθηκε εισήγαγε στον αναγνώστη το βασικό θεωρητικό και πρακτικό



υπόβαθρο της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας. Συγκεκριμένα, καλύφθηκαν θέματα μεταφοράς θερμότητας και αλληλεπίδρασης της θερμικής ακτινοβολίας με την ύλη ενώ αποσαφηνίστηκαν σημεία σημαντικά για την σωστή προετοιμασία και κατανόηση μιας υπέρυθρης ραδιομέτρησης, όπως ο συντελεστής ικανότητας εκπομπής. Τέλος, ιδιαίτερη αναφορά έγινε σε θέματα εξοπλισμού, προσεγγίσεων, παραμέτρων και εφαρμογών υπέρυθρης ραδιομέτρησης, επεξεργασίας θερμικών εικόνων καθώς και ταξινόμησης θερμικών αποτυπωμάτων και βλαβών.

Η ολοκλήρωση της βιβλιογραφικής αναζήτησης και μελέτης τόσο στα θεωρητικά, όσο και στα πρακτικά θέματα υπέρυθρης θερμογραφίας που καλύφθηκαν από αυτό το Κεφάλαιο, αποτέλεσε την βάση για την συγγραφή¹ του εκπαιδευτικού υλικού και την υλοποίησή² του κύκλου (40 ωρών) σεμιναρίου "Θερμογραφία και εφαρμογές της στην επιστήμη του Μηχανικού" στα πλαίσια της δράσης του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας "e-Μηχανικοί: Εκπαίδευση Μηχανικών στις τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών", ΙΕΚΕΜ-ΤΕΕ κατά το διάστημα 14-23 Οκτωβρίου 2009, στην Αθήνα.

Τα Κεφάλαια 5 και 6 που απομένουν, ολοκληρώνουν τη παρούσα Διδακτορική Διατριβή, με την παρουσίαση του πειραματικού μέρους της και την ανάλυση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων διάγνωσης και πρόγνωσης. Συγκεκριμένα, το Κεφάλαιο 5 που ακολουθεί αφορά στο κομμάτι της *διάγνωσης* βλαβών Φ/Β πλαισίων με τη χρήση υπέρυθρων θερμογραφήσεων. Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα που αφορούν στο κομμάτι της *πρόγνωσης* βλαβών παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

¹ Συγγραφή εκπαιδευτικού υλικού σεμιναρίου: Π.Ν. Μπότσαρης (με τη συμβολή του Ι.Α. Τσανάκας)

² Υλοποίηση/εισήγηση παρουσιάσεων και σεμιναρίου: Ι.Α. Τσανάκας

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Π.Ν. Μπότσαρης και Ι.Α. Τσανάκας, "Θερμογραφία και εφαρμογές της στην επιστήμη του Μηχανικού", Εκπαιδευτικό υλικό σεμιναρίου, στα πλαίσια της δράσης του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας "e-Μηχανικοί: Εκπαίδευση Μηχανικών στις τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών", ΙΕΚΕΜ-ΤΕΕ, Αθήνα, Ελλάδα, 2009.
2. Ε. Βούλγαρη, "Μη-καταστροφικές Διαγνωστικές Μέθοδοι Εντοπισμού Σφαλμάτων σε Υποσταθμούς Μέσης και Υψηλής Τάσης", Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, Αθήνα, 2011.



3. J.A. Stratton, "Electromagnetic Theory", The IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory, John Wiley & Sons, New Jersey, U.S.A., 2007.
4. M. Vollmer and K.-P. Mollmann, "Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications", Chap. 3, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 2010.
5. Κατάρτιση Ενεργειακών Επιθεωρητών, Θεματική Ενότητα: ΔΚ2 "Θερμομονωτική Επάρκεια Κτηριακού Κελύφους", Εκπαιδευτικό Υλικό Σεμιναρίου, ΙΕΚΕΜ-ΤΕΕ, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2011.
6. H.A Cengel, "Heat Transfer: A Practical Approach", 2nd edition, Mcgraw-Hill, New York, U.S.A., 2002.
7. X.P.V. Maldague, "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing", 1st edition, Wiley-Interscience, New York, U.S.A., 2001.
8. Canada Research Chair in Multipolar Infrared Vision – MiViM, [<http://mivim.gel.ulaval.ca/index.php>], προσπελάστηκε: 8/2010.
9. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Non-Destructive in Situ Evaluation of a PV Module Performance Using Infrared Thermography", Proceedings of The 6th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies - CM and MFPT, Dublin, Republic of Ireland, 2009.
10. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "On the Detection of Hot Spots in Operating Photovoltaic Arrays through Thermal Image Analysis and a Simulation Model", Materials Evaluation, (in press – 2013).
11. P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "Infrared Thermography as an Estimator Technique of a Photovoltaic Module Performance via Operating Temperature Measurements", Proceeding of The 10th European Conference on NDT, Moscow, Russia, 2010.
12. J.A. Tsanakas, D. Chrysostomou, P.N. Botsaris and A. Gasteratos, "Fault Diagnosis of Photovoltaic Modules through Image Processing and Canny Edge Detection on Field Thermographic Measurements", ASME Journal of Solar Energy Engineering, (in press 2013).
13. C. Ibarra-Castanedo, D. Gonzalez, M. Klein, M. Pilla, S. Vallerand and X.P.V. Maldague, "Infrared image processing and data analysis", Infrared Physics and Technology, 46, 2004.
14. S. Vergura and O. Falcone, "Filtering and Processing IR Images of PV Modules", Proceedings of The International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'11), Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2011.
15. M. Kosikowski, Z. Suszynski and M. Bednarek, "Processing and Recognition of the Thermal Images Using Wavelet Transforms", Microelectronics Reliability, 51, 2011.



16. I. Abdel-Qader, S. Yohali, O. Abudayyeh and S. Yehia, "Segmentation of Thermal Images for Non-destructive Evaluation of Bridge Decks", NDT & Evaluation International, 41, 2008.
17. Y.-C. Chou and L. Yao, "Automatic Diagnosis System of Electrical Equipment Using Infrared Thermography", Proceedings of The International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPar'09), Malacca, Malaysia, 2009.
18. Y.A. Plotnikov and W.P. Winfree, "Advanced Image Processing for Defect Visualization in Infrared Thermography", Proceedings of Thermosense XX, SPIE 3361, Orlando, U.S.A., 1998.
19. L. Bai, Q. Chen, C. Lei and B. Zhang, "New Technique for Infrared Thermal Image Processing Combining Time Domain and Space Domain", Proceedings of Infrared Technology and Applications XXVI, SPIE 4130, San Diego, U.S.A., 2000.
20. A. Savelyev and R. Sugumaran, "Surface Temperature Mapping of the University of Northern Iowa Campus Using High Resolution Thermal Infrared Aerial Imagery", Sensors, 8, 2008.
21. N. Scales, C. Herry and M. Frize, "Automated Image Segmentation for Breast Analysis Using Infrared Images", Proceedings of The 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS, San Francisco, U.S.A., 2004.
22. M. Wiecek, R. Strakowski, T. Jakubowska and B. Wiecek, "Chosen Aspects of Thermal Image Processing – A New Software for Medical Applications", Proceedings of The 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT), Krakow, Poland, 2008.
23. B. Wiecek, "Review on Thermal Image Processing for Passive and Active Thermography", Proceedings of The 27th Annual Conference IEEE Engineering in Medicine and Biology, Shanghai, China, 2005.
24. G. Hardy, "Thermal Inspection", Chapter in ASM Handbook - Nondestructive Evaluation and Quality Control, vol. 17, 5th edition, ASM International, Ohio, U.S.A., 1997.



Κεφάλαιο 5

Διάγνωση Βλαβών σε Φωτοβολταϊκά Πλαίσια: Υλοποίηση και Αποτελέσματα

Περιεχόμενα

Σελίδα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	160
2. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 1.....	161
2.1 Πειραματική υλοποίηση.....	161
2.1.1 Υλικό και λογισμικό.....	161
2.1.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης.....	163
2.2 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	165
2.2.1 Παθητική προσέγγιση.....	165
2.2.2 Ενεργητική προσέγγιση.....	169
3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 2.....	172
3.1 Πειραματική υλοποίηση.....	172
3.1.1 Υλικό και λογισμικό.....	172
3.1.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης.....	175
3.1.3 Αντιστάθμιση παραμέτρων μέτρησης.....	177
3.2 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	179
3.2.1 Ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος.....	179
3.2.2 Στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων.....	181
3.2.3 Ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας.....	185
4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 3.....	187
4.1 Ανίχνευση ακμών με τον αλγόριθμο Canny.....	187
4.2 Πειραματική υλοποίηση.....	191
4.2.1 Υλικό και λογισμικό.....	191
4.2.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης.....	193
4.2.3 Αντιστάθμιση παραμέτρων μέτρησης.....	194
4.3 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	194



4.3.1 Ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος και γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας.	194
4.3.2 Στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων.....	199
4.3.3 Διάγνωση και χαρτογράφηση ακμών με τον αλγόριθμο Canny.....	201
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΩΝ	206
6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	210
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	211

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο έχουν συγκεντρωθεί και παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές μελέτες περιπτώσεων, με τα αντίστοιχα αποτελέσματά τους, οι οποίες εκπονήθηκαν στα πλαίσια της πειραματικής υλοποίησης της συγκεκριμένης Διδακτορικής Έρευνας. Κοινός στόχος των τριών πειραματικών μελετών αποτέλεσε η διερεύνηση της δυναμικής της υπέρυθρης θερμογραφίας, ως εποπτικής μεθόδου, σε επίπεδο *εντοπισμού* και *διάγνωσης* βλαβών σε Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου. Με βάση πάντα αυτήν την κοινή “αφετηρία”-στόχο, οι μελέτες διαφοροποιήθηκαν ως προς τον τρόπο υλοποίησης ή/και τα προς διάγνωση στοιχεία (Φ/Β πλαίσια ή συστοιχίες). Συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις που μελετήθηκαν και παρουσιάζονται σε κάθε Ενότητα, ξεχωριστά, είναι οι ακόλουθες:

- Εφαρμογή υπέρυθρων θερμογραφίσεων, τόσο παθητικής όσο και ενεργητικής προσέγγισης σε καινούργιο, μη εμπορικό (εργαστηριακά συναρμολογημένο) Φ/Β πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου, εγνωσμένης βλάβης και μειωμένης απόδοσης.
- Εφαρμογή υπέρυθρων θερμογραφίσεων πεδίου (παθητικής προσέγγισης) σε δύο διαφορετικές συστοιχίες εμπορικών Φ/Β πλαισίων, μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου αντίστοιχα, ηλικίας 10 ετών, αγνώστων (αρχικά) πληροφοριών περί ενδεχόμενων βλαβών.
- Εφαρμογή υπέρυθρων θερμογραφίσεων πεδίου (παθητικής προσέγγισης) στην συστοιχία Φ/Β πλαισίων μονοκρυσταλλικού πυριτίου της προηγούμενης περίπτωσης, καθώς και σε μια συστοιχία καινούργιων Φ/Β πλαισίων πολυκρυσταλλικού πυριτίου, εγνωσμένων βλαβών, τεσσάρων διαφορετικών τύπων.

Ως προς την ανάλυση των προσκτημένων θερμικών εικόνων κάθε περίπτωσης, οι τεχνικές επεξεργασίας και διάγνωσης που εφαρμόστηκαν περιελάμβαναν αναλύσεις περιοχών ενδιαφέροντος (σε κλίμακα κυψελών ή σειρών κυψελών) και γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας,

στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων και αλγορίθμους φιλτραρίσματος, κατωφλίου, κατάτμησης εικόνας και ανίχνευσης βλαβών, υπό μορφή ακμών.

2. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 1

Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης περίπτωσης ήταν η διερεύνηση και η συγκριτική αποτίμηση της διαγνωστικής ικανότητας δύο διαφορετικών προσεγγίσεων υπέρυθρης θερμογραφίας: i) της παθητικής, υπό μορφή ραδιομετρήσεων πεδίου και ii) της ενεργητικής, υπό μορφή βηματικής θερμικής διέγερσης. Αντικείμενο εφαρμογής των υπέρυθρων θερμογραφήσεων αποτέλεσε ένα μη εμπορικό Φ/Β πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου, εγνωσμένα μειωμένης απόδοσης. Οι προσκτηθείσες θερμικές εικόνες, από κάθε υπέρυθρη ραδιομέτρηση, υποβλήθηκαν σε ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος και γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας [1,2].

2.1 Πειραματική υλοποίηση

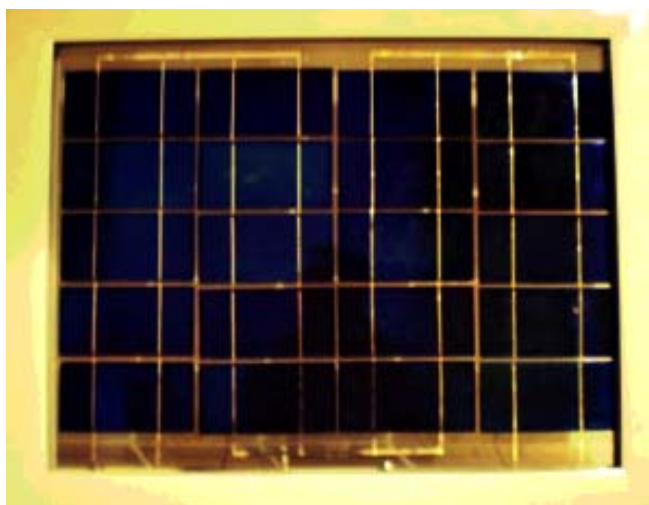
2.1.1 Υλικό και λογισμικό

Όλες οι υπέρυθρες ραδιομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση ενός φορητού θερμικού αναλυτή (θερμοκάμερας) Mikron™/Impac™, μοντέλο IVN 780-P (Σχήμα 5.1), 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 5.1. Ο φορητός θερμικός αναλυτής Mikron™/Impac™ IVN 780-P.

Στα πλαίσια της παθητικής προσέγγισης, η υπέρυθρη θερμογράφηση περιελάμβανε τρεις σειρές ραδιομετρήσεων σε ένα μη εμπορικό Φ/Β πλαίσιο (Σχήμα 5.2), χωρίς υπέρστρωμα (εμπρόσθιο κάλυμμα γυαλιού), το οποίο συναρμολογήθηκε στου χώρους του εργαστηρίου Μηχανολογικού Σχεδιασμού (Medilab), του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ. Υπό STC, το συγκεκριμένο Φ/Β πλαίσιο, το οποίο αποτελείται από 20 εν σειρά συνδεδεμένες ηλιακές κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου, εμφανίζει ιδανικά μέγιστη ισχύ εξόδου $P_{max} = 40 \text{ W}_p$, ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{SC} = 3.6 \text{ A}$ και τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{OC} = 11.1 \text{ V}$. Ωστόσο, η μέτρηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών κάθε κυψέλης του πλαισίου, “αποκάλυψε” μια περίπτωση αισθητά αυξημένης τιμής αντίστασης R_s σε ηλιακή κυψέλη, με επακόλουθη μείωση της τιμής του I_{SC} . Η τελική υποβάθμιση της ισχύος εξόδου (power degradation) του Φ/Β πλαισίου, λόγω της ύπαρξης της “προβληματικής” κυψέλης, υπολογίστηκε προσεγγιστικά στο 5%. Ως πιθανότερη δε αιτία της αυξημένης τιμής R_s στην συγκεκριμένη κυψέλη, θεωρήθηκε η ύπαρξη μικρής ρωγμής, παράλληλης προς τις μεταλλικές επαφές της κυψέλης, η οποία πιθανότατα δημιουργήθηκε στο στάδιο της συναρμολόγησης του πλαισίου.



Σχήμα 5.2. Το μη εμπορικό Φ/Β πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Για την υλοποίηση της ενεργητικής προσέγγισης, χρησιμοποιήθηκε ρυθμιζόμενο τροφοδοτικό συνεχούς (DC) ισχύος, τύπου AFX 9660SB (Σχήμα 5.3), το οποίο παρέιχε την απαραίτητη βηματική θερμική διέγερση του Φ/Β πλαισίου, μέσω ορθής πόλωσης του. Το AFX 9660SB παρέχει ρυθμιζόμενη τάση εξόδου στο εύρος 0-30 V και ρυθμιζόμενο ρεύμα εξόδου στο εύρος 0-3 A, με ακρίβεια $\pm 1\%$ και $\pm 2\%$ αντίστοιχα.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των θερμικών εικόνων κάθε υπέρυθρης ραδιομέτρησης, είναι το MikroSpec®, έκδοση 4.0 PRO, της εταιρίας

Mikron™/Impac™. Η δε ανάλυση περιελάμβανε την χρήση δύο εργαλείων του συγκεκριμένου λογισμικού, την ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος και την ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας. Διευκρινίζεται ότι, για τον σκοπό αυτό, κάθε ηλιακή κυψέλη και κάθε σειρά (string) ηλιακών κυψελών του Φ/Β πλαισίου θεωρήθηκαν ως πολυγωνικές και γραμμικές ROI, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3. Το ρυθμιζόμενο DC τροφοδοτικό ισχύος AFX 9660SB.

2.1.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης

Κατόπιν πολυάριθμων (αρχικών) σειρών-δοκιμών υπέρυθρης θερμογραφίας, η τελική υπέρυθρη θερμογράφιση πεδίου (παθητική προσέγγιση) του Φ/Β πλαισίου διενεργήθηκε στο δώμα (οροφή) ιδιωτικής κατοικίας στην Ξάνθη (συντεταγμένες: 41°13' N, 24°88' E, μέσο υψόμετρο: 40 m), σε τρεις ενδεικτικές ημερήσιες σειρές (σετ) μετρήσεων, τις ημέρες 26^η, 27^η και 28^η Αυγούστου 2009. Κάθε σετ μετρήσεων περιελάμβανε τρεις επιμέρους στιγμιαίες μετρήσεις, σε συγκεκριμένες ώρες μέσα στην ημέρα: 06:00 (μεταβατικές συνθήκες ηλιοφάνειας – ανατολή ηλίου), 12:00 (σταθερές συνθήκες ηλιοφάνειας) και 20:00 (μεταβατικές συνθήκες ηλιοφάνειας – δύση ηλίου). Για κάθε υπέρυθρη ραδιομέτρηση, καταγράφηκαν από τοπικό μετεωρολογικό σταθμό, συγκεκριμένα δεδομένα περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα T_a , η σχετική υγρασία H_r , η ταχύτητα ανέμου V_f και η ένταση G_T της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του πλαισίου (Πίνακας 5.1). Οι συγκεκριμένες παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν τόσο στην αρχική ρύθμιση της θερμοκάμερας για την αντιστάθμιση της ατμόσφαιρας, όσο και στον υπολογισμό της αναμενόμενης θερμικής απόκρισης της επιφάνειας των ηλιακών κυψελών, βάσει της Σχέσης 2.40, του 2^{ου} Κεφαλαίου.

Το Φ/Β πλαίσιο επιλέχθηκε να θερμογραφηθεί υπό συνθήκες βραχυκύκλωσης και καθαρού (χωρίς νέφωση) ουρανού, ώστε να επιτυγχάνεται η υψηλότερη δυνατή θερμική φόρτιση

και, συνεπώς, υψηλότερη τιμή ΔT σε ενδεχόμενα “προβληματικά” σημεία του πίνακα ηλιακών κυψελών, ενώ παράλληλα αποφεύγεται ο κίνδυνος ανεπιθύμητης αντανάκλασης της θερμικής ακτινοβολίας από τα νέφη στην μετρούμενη επιφάνεια του πλαισίου. Η κλίση του πλαισίου, ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ορίστηκε σταθερή υπό γωνία $\theta \approx 40^\circ$, με νότιο προσανατολισμό και σε σταθερή απόσταση $d \approx 1.5$ m ως προς το οπτικό σύστημα της θερμοκάμερας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η προαναφερθείσα γωνία κλίσης θ δεν αντιστοιχεί στην βέλτιστη κλίση θ_{opt} , για την οποία, στην συγκεκριμένη χρονική περίοδο μετρήσεων, ισχύει $\theta_{opt} = 30^\circ\text{-}32^\circ$ (για την οποία παρατηρείται η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική απόδοση του Φ/Β πλαισίου). Βέβαια, από την στιγμή που στόχος της μελέτης είναι η διάγνωση ενδεχόμενων “ανωμαλιών” στο θερμοκρασιακό προφίλ του φ/β πλαισίου, η συγκεκριμένη επιλογή της γωνίας κλίσης θ δεν επηρεάζει το ποιοτικό αποτέλεσμα της συνολικής πειραματικής διαδικασίας.

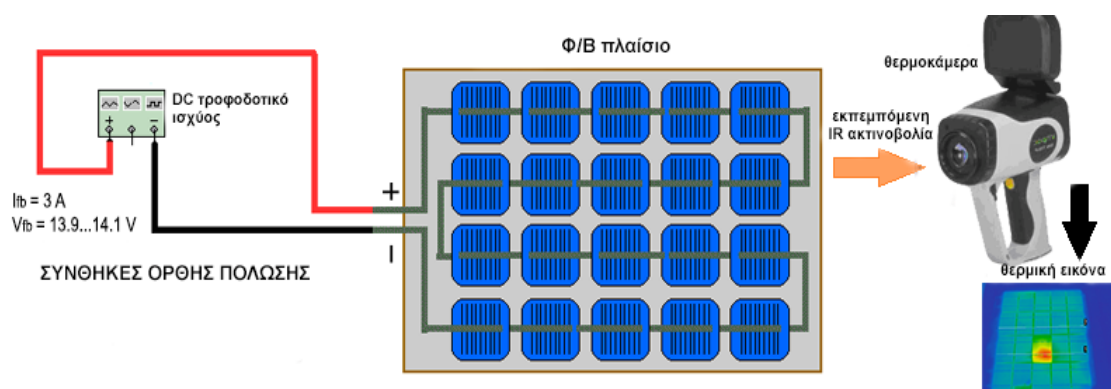
Πίνακας 5.1. Περιβαλλοντικές συνθήκες των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων της μελέτης.

Ημερομηνία	26 ^η Αυγούστου			27 ^η Αυγούστου			29 ^η Αυγούστου		
Ώρα μέτρησης	06:00	12:00	20:00	06:00	12:00	20:00	06:00	12:00	20:00
Θερμοκρασία αέρα (°C)	16.5	26	23.5	17.5	27	24	18	25	23.5
Σχετική υγρασία (%)	65	30	60	62	35	55	70	35	60
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	0.72	4.58	2.16	2.88	2.78	2.52	0.72	3.89	1.8
G_T (W/m ²)	<15	436	<15	<15	455	<15	<15	426	<15

Κατά τις μεσημβρινές ώρες, υπό συνθήκες μηδενικής νέφωσης, και για τα κλιματικά και τοπολογικά δεδομένα της μελέτης, ένα συμβατικό πυρανόμετρο αναμένεται να δίνει τιμές έντασης G_T ηλιακής ακτινοβολίας από 800 έως 1000 W/m². Ωστόσο, η αναπόφευκτη σκίαση όμορων κτιρίων, περιορίζει σημαντικά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του Φ/Β πλαισίου, όπως φαίνεται και στις τιμές της G_T του Πίνακα 5.1, χωρίς ωστόσο να επηρεάζεται ουσιαστικά και εδώ το ποιοτικό αποτέλεσμα των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων. Βέβαια, για ακόμη μεγαλύτερες τιμές G_T , τα αποτελέσματα της διεξαχθείσας σειράς υπέρυθρων θερμογραφίσεων θα ήταν ποιοτικώς ενδεικτικότερα αφού το υψηλότερο αναπτυσσόμενο θερμικό πεδίο στο επίπεδο του πλαισίου, θα ήταν ευνοϊκότερο στην ανάδειξη τέτοιων “προβληματικών” περιοχών υπό την μορφή θερμοκρασιακών διαφορών.

Όπως προαναφέρθηκε, στα πλαίσια της πειραματικής υλοποίησης της ενεργητικής προσέγγισης (Σχήμα 5.4), οι ακροδέκτες του κυκλώματος του πίνακα ηλιακών κυψελών συνδέθηκαν σε συνθήκες ορθής πόλωσης με την έξοδο DC τροφοδοτικού ισχύος AFX 9660SB, το οποίο παρείχε την απαραίτητη βηματική θερμική διέγερση (step-heating) στον Φ/Β πλαίσιο. Κατά την ορθή πόλωση, το AFX 9660SB παρείχε, σταθερά, ρεύμα εξόδου $I_{pb} = 3$ A και τάση

εξόδου $V_{fb} 14 \pm 0.1$ V, για συνολική διάρκεια $t = 20$ min. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι η συνολική διάρκεια t κάθε πειράματος υπέρυθρης ραδιομέτρησης ορίστηκε ως η ελάχιστη διάρκεια θερμικής διέγερσης, για την πρόσκτηση ικανοποιητικά αντιπροσωπευτικού δείγματος θερμικής απόκρισης του Φ/Β πλαισίου. Εξάλλου, παρατηρήθηκε ότι με την παρέλευση συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος συνθηκών θερμικής διέγερσης, η θερμική απόκριση του πλαισίου μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, λόγω της πεπερασμένης θερμοχωρητικότητάς του. Το σύνολο των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων αυτής της προσέγγισης πραγματοποιήθηκε σε κλειστό χώρο (εργαστήριο Μηχανολογικού Σχεδιασμού) και υπό συνθήκες πλήρους σκότους, για την αποφυγή πιθανών αντανάκλασεων και φαινομένων Narcissus στην επιφάνεια του πλαισίου. Η δε απόσταση μεταξύ της θερμοκάμερας και του θερμικά διεγερόμενου Φ/Β πλαισίου ορίστηκε σταθερή, ίση με $d \approx 1$ m. Για την εξασφάλιση της επαναληψιμότητας της συγκεκριμένης προσέγγισης, η συνολική διαδικασία υλοποίησης (διάρκειας $t = 20$ min) επαναλήφθηκε συνολικά τρεις φορές για κάθε πείραμα.



Σχήμα 5.4. Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης ενεργητικής προσέγγισης της μελέτης.

2.2 Αποτελέσματα και συζήτηση

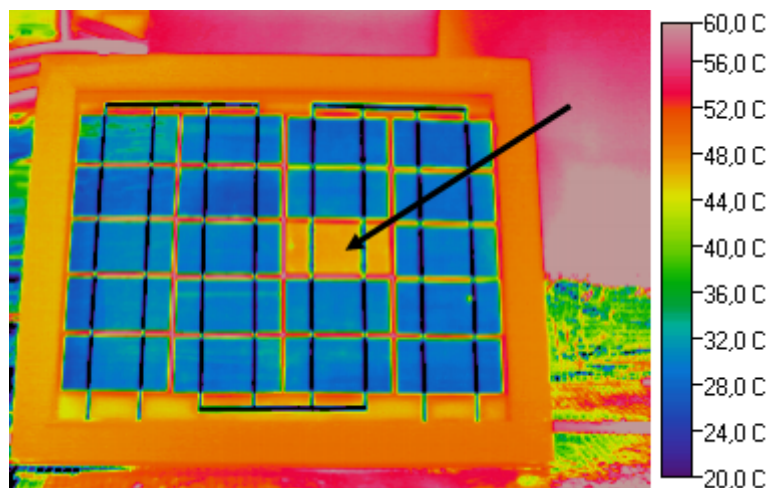
2.2.1 Παθητική προσέγγιση

Η ανάλυση των θερμικών εικόνων που προσκτήθηκαν κατά τη διάρκεια των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων στο πεδίο, επέτρεψε την εξαγωγή απλής και ταχείας συσχέτισης μεταξύ των αναμενόμενων (θεωρητικών) και των μετρούμενων (πραγματικών) θερμοκρασιών λειτουργίας κάθε κυψέλης, T_c και $T_{c,m}$ αντίστοιχα. Ανατρέχοντας στην ανάλυση της θερμοδυναμικής μοντελοποίησης ενός Φ/Β πλαισίου, η οποία παρουσιάστηκε στην Υποενότητα 3.2 του Κεφαλαίου 2, υπενθυμίζεται ότι η θεωρητική θερμοκρασία T_c της ηλιακής κυψέλης μπορεί να υπολογιστεί από την ημι-εμπειρική Σχέση 5.1 [3]. Πρακτικά, σύμφωνα και με όσα ειπώθηκαν

στην Υποενότητα 4.1 του Κεφαλαίου 4, οποιαδήποτε απόκλιση της $T_{c,m}$ από την T_c κατά $\Delta T \geq 5$ °C, αναμένεται να επιφέρει εμφανή “ανωμαλία” στο θερμοκρασιακό προφίλ του αντίστοιχου Φ/Β πλαισίου, υποδεικνύοντας μια ενδεχόμενη βλάβη θερμής κηλίδας.

$$T_c = T_a + \left(\frac{0.32}{8.91 + 2 \cdot V_f} \right) \cdot G_T \quad (5.1)$$

Το Σχήμα 5.5 παρουσιάζει μια ενδεικτική θερμική εικόνα του Φ/Β πλαισίου για την μέτρηση της 26^{ης} Αυγούστου, στις 12:00 (συνθήκες σταθερής ηλιοφάνειας). Κατά την ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος, κάθε ηλιακή κυψέλη αντιστοιχίστηκε σε ROI ορθογωνικού (ή πολυγωνικού) τύπου. Εφαρμόζοντας την Σχέση 5.1, για τις αντίστοιχες τιμές των περιβαλλοντικών παραμέτρων του Πίνακα 5.1 ($T_a = 26$ °C, $V_f = 4.58$ m/s και $G_T = 436$ W/m²), προκύπτει ότι η αναμενόμενη (θεωρητική) τιμή θερμοκρασίας λειτουργίας κυψελών, για εκείνη την χρονική στιγμή, είναι $T_c = 33.8$ °C.

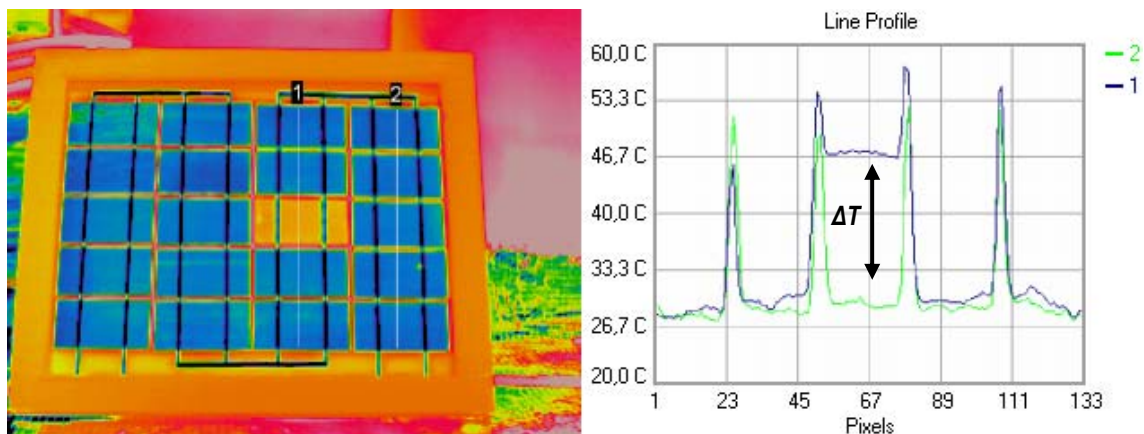


Σχήμα 5.5. Ενδεικτική θερμική εικόνα του Φ/Β πλαισίου για την υπέρυθρη θερμογράφηση της 26^{ης} Αυγούστου, στις 12:00.

Πράγματι, από την ανάλυση ROI της θερμικής εικόνας του Σχήματος 5.5, για συντελεστή ικανότητας εκπομπής $\varepsilon = 0.65$ (για το κρυσταλλικό πυρίτιο), προέκυψε ότι οι “υγιείς” ηλιακές κυψέλες του Φ/Β πλαισίου (κυανή-γαλάζια απόχρωση) εμφανίζουν μετρούμενη θερμοκρασία $T_{c,m}$ λειτουργίας που κυμαίνεται από 30 έως 32 °C, αρκετά κοντά (απόκλιση 5-8%) στην θεωρητική. Η όποια απόκλιση μεταξύ θεωρητικής και μετρούμενης θερμοκρασίας “υγιών” κυψελών μπορεί εδώ να θεωρηθεί φυσιολογική, λόγω του ημι-εμπειρικού υπολογισμού της T_c και της αβεβαιότητας του emissivity η οποία, πρακτικά, ενυπάρχει σε μια υπέρυθρη

ραδιομέτρηση, για συγκεκριμένα μήκη κύματος. Ωστόσο, στην ίδια θερμική εικόνα, εντοπίζεται καθαρά μια περιοχή στον πίνακα ηλιακών κυψελών, στην οποία το θερμοκρασιακό προφίλ παύει να θεωρείται φυσιολογικό, εμφανίζοντας μια πορτοκαλί-κόκκινη απόχρωση. Η συγκεκριμένη περιοχή, που υποδεικνύεται με το μαύρο βέλος, αντιστοιχεί ουσιαστικά στην “προβληματική” ηλιακή κυψέλη του πλαισίου, η οποία – όπως προαναφέρθηκε – εμφανίζει τιμή R_s υψηλότερη του φυσιολογικού, πιθανότατα λόγω ρωγμής. Η βλάβη αυτή, λοιπόν, οδηγεί σε αισθητή μείωση του I_{SC} της κυψέλης, η οποία με τη σειρά της προκαλεί την εμφάνιση του φαινομένου της θερμής κηλίδας, σύμφωνα με τον μηχανισμό που περιγράφηκε αναλυτικά στην Υποενότητα 4.1 του Κεφαλαίου 3. Όπως προέκυψε από την ανάλυση ROI, λόγω της επιρροής της θερμής κηλίδας η συγκεκριμένη ηλιακή κυψέλη εμφανίζει μετρούμενη θερμοκρασία λειτουργίας που αντιστοιχεί σε ένα εύρος από 45 έως 49 °C, με μέση τιμή $T_{c,m} = 47.1$ °C. Η καταγραφείσα θερμή κηλίδα σχετίζεται, λοιπόν, με ένα $\Delta T > 15$ °C και, φυσικά, οδηγεί σε περαιτέρω σημαντική υποβάθμιση της τελικής απόδοσης του Φ/B πλαισίου.

Η ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας (LPA) παράγει γραφήματα, τα οποία παρουσιάζουν την διακύμανση της τιμής της θερμοκρασίας (άξονας Y) κατά μήκος κάθε γραμμικής ROI, σε κλίμακα μήκους ή εικονοστοιχείων (άξονας X). Ενδεικτικά, στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται, αριστερά, οι γραμμικές ROI 1 και 2, και, δεξιά, τα παραχθέντα γραφήματα από την LPA.

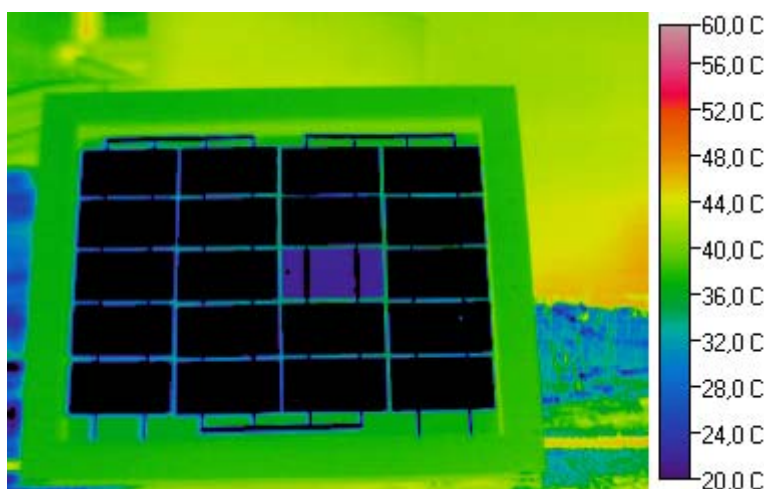


Σχήμα 5.6. Ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας για την υπέρυθρη θερμογράφηση της 26ης Αυγούστου, στις 12:00.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6, η ROI 1 εκτείνεται γραμμικά, κατά μήκος μιας “προβληματικής” σειράς 5 κυψελών (εφόσον συμπεριλαμβάνει την θερμή κηλίδα), ενώ η ROI 2 εκτείνεται γραμμικά κατά μήκος της επόμενης αντίστοιχης, “υγιούς” σειράς κυψελών. Οι καμπύλες θερμοκρασίας 1 και 2, που προκύπτουν στο γράφημα της LPA, ακολουθούν μια συγκεκριμένη “διαδρομή”, σε αντιστοιχία με τις γραμμικές ROI 1 και 2 και κατά μήκος του άξονα

X (pixels). Όπως είναι αναμενόμενο, εφόσον οι ROI αφορούν σε κυψέλες του ίδιου Φ/Β πλαισίου, με ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή, οι δύο καμπύλες συμπίπτουν σχεδόν τέλεια. Ωστόσο, στο διάστημα μεταξύ των εικονοστοιχείων 55 και 75, το οποίο αντιστοιχεί στην “προβληματική” κυψέλη της ROI 1, οι δύο καμπύλες εμφανίζουν ένα σημαντικό ΔT , επιβεβαιώνοντας τις παρατηρήσεις που προέκυψαν από την ανάλυση ROI.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τέσσερις αιχμές που παρατηρούνται στις καμπύλες της LPA, όπως αυτή περί του 25^{ου} εικονοστοιχείου αντιστοιχούν στα σημεία μεταξύ των κυψελών, όπου συναντάται το οπίσθιο στρώμα του Φ/Β πλαισίου, το οποίο αποτελείται από χλωριούχο πολυβινύλιο (polyvinyl chloride, PVC) συντελεστή $\varepsilon = 0.92$. Ακριβώς λόγω του υψηλότερου συντελεστή ικανότητας εκπομπής του, το οπίσθιο στρώμα εκπέμπει μεγαλύτερο ποσό υπέρυθρης ακτινοβολίας, η οποία και τελικά ανιχνεύεται από την θερμοκάμερα. Αντίθετα, οι περιοχές μέσα σε κάθε ηλιακή κυψέλη, που αντιστοιχούν στις λείες, μεταλλικές τους συνδέσεις, χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλό συντελεστή ε , με συνέπεια να ακτινοβολούν πολύ λιγότερο και, φυσικά, να απεικονίζονται ως περιοχές ψυχρότερες από αυτές των κυψελών ή του PVC. Βέβαια, για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας του PVC και των μεταλλικών συνδέσεων, απαιτείται ξεχωριστή ανάλυση ROI, με αντίστοιχη ρύθμιση του συντελεστή ε στην θερμική εικόνα, ωστόσο η συγκεκριμένη ανάλυση δεν αφορά την παρούσα μελέτη.



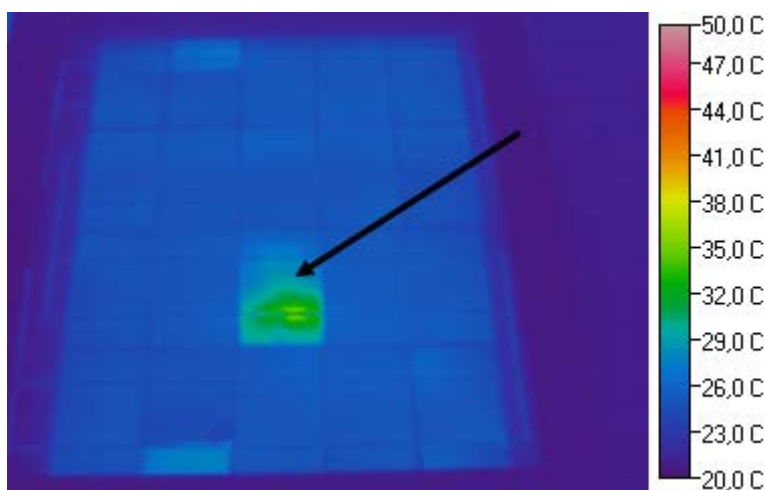
Σχήμα 5.7. Ενδεικτική θερμική εικόνα του Φ/Β πλαισίου για την υπέρυθρη θερμογράφηση της 26^{ης} Αυγούστου, στις 06:00.

Κλείνοντας την Υποενότητα της παθητικής προσέγγισης, διευκρινίζεται ότι οι αναλύσεις ROI και LPA των μεσημβρινών υπέρυθρων θερμογραφήσεων, τόσο της 27^{ης}, όσο και της 29^{ης} Αυγούστου, παρέιχαν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα διάγνωσης της θερμής κηλίδας στο Φ/Β πλαίσιο. Κατά συνέπεια, και για λόγους οικονομίας χώρου, η παρουσίαση των αντίστοιχων θερμικών εικόνων παραλήφθηκε. Τέλος, όσον αφορά στις υπέρυθρες ραδιομετρήσεις υπό μεταβατικές συνθήκες ηλιοφάνειας (ανατολή και δύση ηλίου), αξίζει να σημειωθεί ότι στόχος

ήταν η διερεύνηση της θερμικής απόκρισης του Φ/Β πλαισίου και, συνεπώς, μιας ενδεχόμενης “προβληματικής” περιοχής αυτού, υπό συνθήκες μηδαμινής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι θερμικές εικόνες που προσκλήθηκαν υπό αυτές τις συνθήκες υπέδειξαν μεν, ποιοτικά επιτυχώς, την θερμή κηλίδα, ωστόσο δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη για την ποσοτική διάγνωση τέτοιων βλαβών. Κι αυτό γιατί ουσιαστικά δεν υφίσταται ροή ηλεκτρικού φορτίου στις ηλιακές κυψέλες, παρά μόνο η παραμένουσα, αποθηκευμένη θερμότητα από την λειτουργία του Φ/Β πλαισίου, η οποία και σχετίζεται με ένα μετρήσιμο αλλά ανακριβές ΔT στην περιοχή της “προβληματικής” κυψέλης, όπως ενδεικτικά φαίνεται και στην θερμική εικόνα του Σχήματος 5.7.

2.2.2 Ενεργητική προσέγγιση

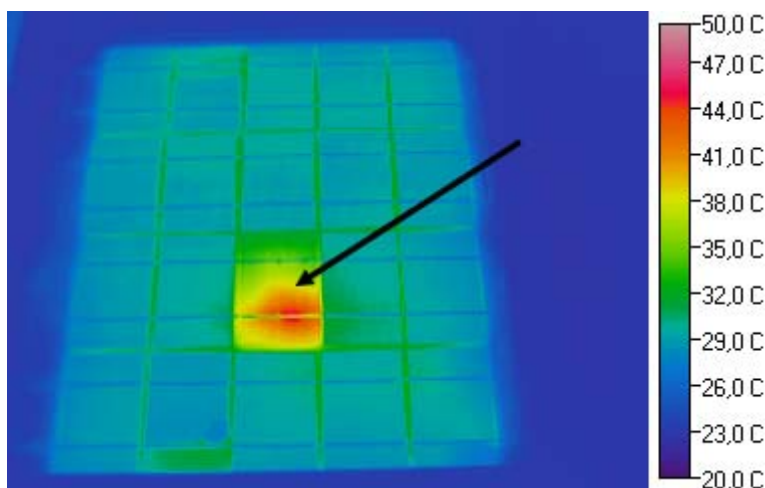
Αν και η υλοποίηση ενεργητικής προσέγγισης αποτελεί συχνά σύνθετη διαδικασία, περιλαμβάνοντας πολύπλοκες ή/και υψηλού κόστους διατάξεις, για την περίπτωση των Φ/Β πλαισίων αποτελεί ενδιαφέρουσα λύση, καθώς προσφέρει την δυνατότητα υπέρυθρων ραδιομετρήσεων σε κλειστό χώρο και, συνεπώς, απαλλαγμένων σε μεγάλο βαθμό από την επίδραση της ατμόσφαιρας και την εξάρτηση από την ηλιακή ακτινοβολία. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην μελέτη που εξετάζεται, η τεχνική ενεργητικής προσέγγισης που εφαρμόστηκε είναι η βηματική θερμική διέγερση, σύμφωνα με την απλή διάταξη του Σχήματος 5.4. Προς αποφυγή πιθανής σύγχυσης, διευκρινίζεται ότι το Φ/Β πλαίσιο θερμογραφείται στραμμένο κατά -90° σε σχέση με την προηγούμενη προσέγγιση.



Σχήμα 5.8. Θερμική εικόνα του Φ/Β πλαισίου κατόπιν βηματικής θερμικής διέγερσής του (2 min).

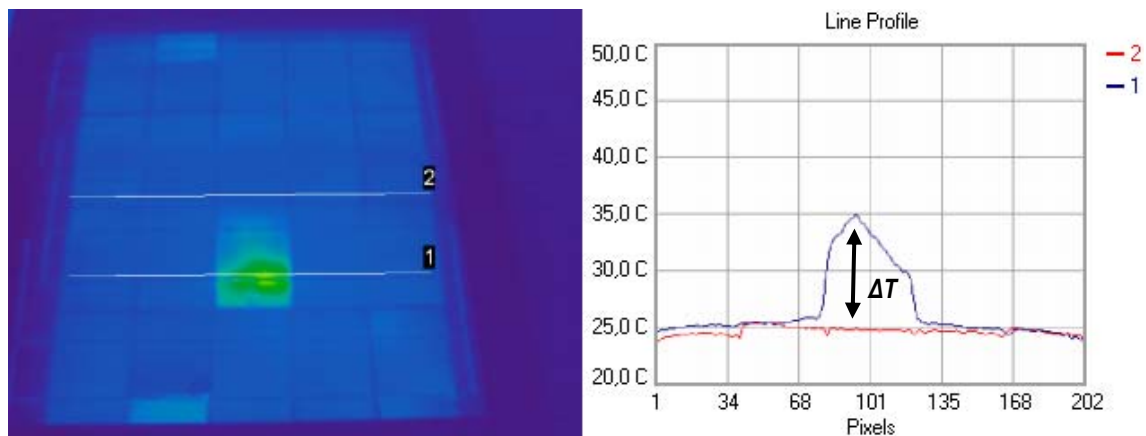
Στο Σχήμα 5.8, λοιπόν, παρουσιάζεται η θερμική εικόνα του Φ/Β πλαισίου, κατά την συμπλήρωση 2 λεπτών επίδρασης της θερμικής διέγερσης, υπό συνθήκες φόρτισης ορθής πόλωσης. Η ηλιακή κυψέλη που υποδεικνύεται από το μαύρο βέλος, είναι η ίδια “προβληματική” κυψέλη που διαγνώστηκε κατά την παθητική προσέγγιση. Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει,

ήδη από τα πρώτα αυτά λεπτά θερμικής διέγερσης του πλαισίου, εκδηλώνεται μια εμφανής “ανωμαλία” στη συγκεκριμένη περιοχή του θερμοκρασιακού προφίλ του πλαισίου. Όπως προκύπτει από την σχετική ανάλυση ROI, αυτή η πρώιμη ένδειξη ενδεχόμενης βλάβης αντιστοιχεί σε μία τιμή ΔT της τάξεως των 10 °C. Φυσικά, στην συγκεκριμένη προσέγγιση δεν επιχειρείται συσχέτιση των θερμοκρασιών “υγιών” και “προβληματικών” κυψελών με κάποια αντίστοιχη θεωρητική, καθώς δεν υφίσταται η επίδραση των συνθηκών πεδίου.

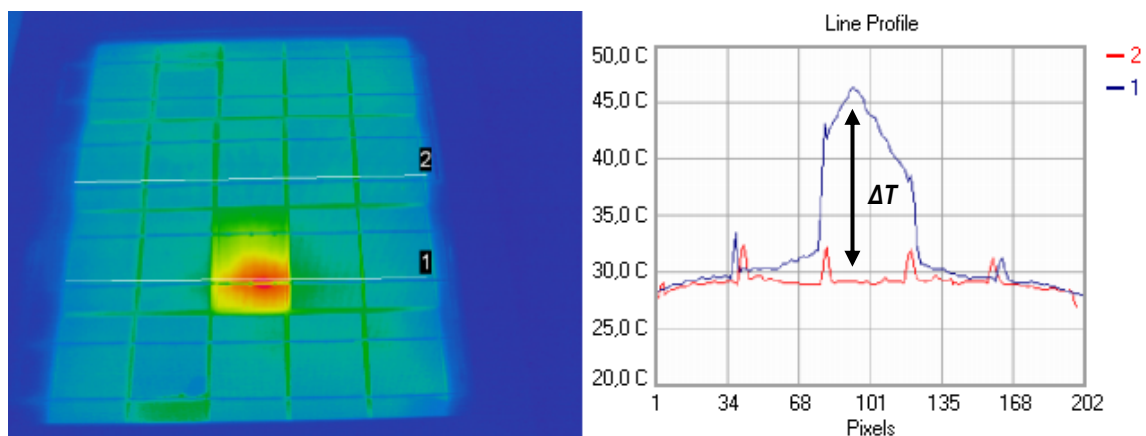


Σχήμα 5.9. Θερμική εικόνα του Φ/Β πλαισίου κατόπιν ολοκλήρωσης της βηματικής θερμικής διέγερσής του (20 min).

Καθώς η θερμική διέγερση του Φ/Β πλαισίου συνεχίζεται μέχρι το πέρας του κάθε πειράματος, παρατηρείται αντίστοιχη συνέχιση της αύξησης της τιμής του ΔT , με συνέπεια η ένδειξη της υπό διάγνωση βλάβης να γίνεται εντονότερη και καθαρότερη. Την στιγμή ολοκλήρωσης της πειραματικής διαδικασίας, με την συμπλήρωση 20 λεπτών διάρκειας θερμικής διέγερσης, η ανάλυση ROI της τελευταίας θερμικής εικόνας (Σχήμα 5.9) δίνει τιμή $\Delta T \approx 17$ °C. Παρατηρείται δε, μια σημαντικά μεγαλύτερη έκταση “ανώμαλου” θερμοκρασιακού προφίλ, σε σύγκριση με την αντίστοιχη του Σχήματος 5.8, όπως αυτή υποδεικνύεται από το μαύρο βέλος. Μάλιστα, με μια προσεκτικότερη παρατήρηση των δύο θερμικών εικόνων των Σχημάτων 5.8 και 5.9, διαφαίνεται ότι με την συγκεκριμένη προσέγγιση παρέχεται σαφής πληροφορία για την ακριβή θέση της βλάβης (ρωγμής) στην “προβληματική” ηλιακή κυψέλη. Είναι, με άλλα λόγια, λογικό να αναμένεται ότι η παροχή θερμικής διέγερσης, με αγωγή, στο Φ/Β πλαίσιο, μέσω της εφαρμογής συνθηκών ορθής πόλωσης, οδηγεί σε μια σημαντική τοπική εναπόθεση θερμότητας, αρχικά (και σε μεγαλύτερο βαθμό) γύρω από την ρωγμή και στη συνέχεια περιφερειακά αυτής, σε όλη την επιφάνεια της ηλιακής κυψέλης. Έτσι, θα μπορούσε κατά κάποιο τρόπο να ειπωθεί, ότι με την συγκεκριμένη προσέγγιση “προσομοιώνεται” ο μηχανισμός αύξησης της θερμοκρασίας μιας “προβληματικής” κυψέλης και αντίστοιχης εμφάνισης μιας θερμής κηλίδας.



Σχήμα 5.10. Ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας για τη θερμική εικόνα του Φ/Β πλαισίου, κατόπιν βηματικής θερμικής διέγερσής του (2 min).



Σχήμα 5.11. Ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας για τη θερμική εικόνα του Φ/Β πλαισίου, κατόπιν ολοκλήρωσης της βηματικής θερμικής διέγερσής του (20 min).

Η ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας, η οποία εφαρμόστηκε και σε αυτή την προσέγγιση, επιβεβαιώνει με γραφικό τρόπο τις παραπάνω παρατηρήσεις. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.10, αριστερά, παρουσιάζονται δύο γραμμικές ROI 1 και 2, μιας “προβληματικής” (λόγω της θερμής κηλίδας) και μιας “υγιούς”, αντίστοιχα, σειράς 5 κυψελών, με βάση την θερμική εικόνα του Σχήματος 5.8. Στο ίδιο Σχήμα, δεξιά, δίνονται τα παραχθέντα γραφήματα από την εφαρμογή της LPA. Όπως είναι φυσικό, κατά μήκος σειρών “υγιών” κυψελών του ίδιου Φ/Β πλαισίου, οι δύο καμπύλες εμφανίζονται σχεδόν σταθερές στο επίπεδο των 25 °C, συμπίπτοντας σχεδόν τέλεια. Ωστόσο, περί του 80^{ου} εικονοστοιχείου του άξονα X, η καμπύλη της ROI 1, παύει να είναι σταθερή και, στο διάστημα μεταξύ των εικονοστοιχείων 80 και 120, εμφανίζει αύξηση κατά μια τιμή $\Delta T \approx 10$ °C, επιβεβαιώνοντας την ανάλυση ROI. Η συγκεκριμένη περιοχή των εικονοστοιχείων, αντιστοιχεί φυσικά στην “προβληματική” κυψέλη της ROI 1. Παρατηρείται επίσης ότι μετά το 120^ο εικονοστοιχείο, η καμπύλη της ROI 1 “επανέρχεται”

στο κανονικό θερμοκρασιακό επίπεδο, όπου και παραμένει σταθερή, σε αντιστοιχία με την καμπύλη της ROI 2, μέχρι το πέρας της σειράς των υπόλοιπων δύο κυψελών. Η αιχμή που εμφανίζεται στο γράφημα της LPA του Σχήματος 5.10, λόγω αύξησης του επιπέδου της καμπύλης ROI 1, γίνεται ακόμη πιο έντονη για την περίπτωση της θερμικής εικόνας του Σχήματος 5.9, λόγω ακριβώς της μεγαλύτερης διάρκειας θερμικής διέγερσης του Φ/Β πλαισίου και, συνεπώς, της “προβληματικής” κυψέλης. Έτσι, στην LPA του Σχήματος 5.11, με το πέρας 20 λεπτών θερμικής διέγερσης του πλαισίου, οι καμπύλες των ROI 1 και ROI 2 εμφανίζονται να ακολουθούν μια σχεδόν όμοια και σταθερή “διαδρομή” στο επίπεδο των 29 °C, μέχρι την εμφάνιση της αιχμής της καμπύλης ROI 1, μεταξύ 80^{ου} και 120^{ου} εικονοστοιχείου, όταν και η μέγιστη τιμή του ΔT ανέρχεται στους 17 °C (για $T_{c,m} = 46$ °C).

Συμπερασματικά, από την σύγκριση των δύο προσεγγίσεων για την συγκεκριμένη μελέτη, μπορεί να ειπωθεί ότι η υπέρυθρη θερμογράφηση με την βοήθεια της τεχνικής της βηματικής θερμικής διέγερσης, επιβεβαιώνει πλήρως την αντίστοιχη μέτρηση πεδίου (παθητική προσέγγιση), παρέχοντας ωστόσο σημαντικά ταχύτερη και λεπτομερέστερη διάγνωση της πηγής και της ακριβούς θέσης της βλάβης (ρωγμής εν προκειμένω) στο Φ/Β πλαίσιο. Αναλυτικότερα και εκτενέστερα συμπεράσματα θα παρατεθούν, συνολικά για τις τρεις υπό παρουσίαση διαγνωστικές μελέτες, στην Ενότητα 5 του παρόντος Κεφαλαίου.

3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 2

Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης περίπτωσης ήταν η εφαρμογή της παθητικής προσέγγισης υπέρυθρης θερμογράφησης, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη μελέτη (Ενότητα 2), σε εμπορικά, πλέον, Φ/Β πλαίσια, καθώς και η διερεύνηση της διαγνωστικής ικανότητας της μεθόδου, με την χρήση ανάλυσης ROI, LPA και στατιστικής ανάλυσης ιστογραμμάτων. Αντικείμενο εφαρμογής των υπέρυθρων θερμογραφήσεων αποτέλεσαν δύο διαφορετικές συστοιχίες εμπορικών Φ/Β πλαισίων, μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου αντίστοιχα, ηλικίας 10 ετών, αγνώστων (αρχικά) πληροφοριών περί βλαβών [4].

3.1 Πειραματική υλοποίηση

3.1.1 Υλικό και λογισμικό

Οι υπέρυθρες θερμογραφήσεις πεδίου περιελάμβαναν πειράματα τριών σειρών ραδιομετρήσεων έκαστο, σε δύο συστοιχίες εμπορικών Φ/Β πλαισίων μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου, οι οποίες – για τις ανάγκες της μελέτης – ορίστηκαν ως PV-1 και PV-2 αντίστοιχα. Τόσο η PV-1, όσο και η PV-2 είναι εγκατεστημένες, σε λειτουργία υπό φορτίο,

στην επίπεδη οροφή του κτιρίου εργαστηρίων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ. Την χρονική περίοδο των μετρήσεων, η ηλικία των συγκεκριμένων Φ/Β συστοιχιών στο πεδίο ήταν περίπου 10 χρόνια.

Η συστοιχία PV-1 περιλαμβάνει συνολικά 4 Φ/Β πλαίσια, της εταιρίας Siemens™, τύπου SP75, το καθένα από τα οποία αποτελείται από 36 ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Σχήμα 5.12). Σύμφωνα με τις κατασκευαστικές προδιαγραφές, σε STC, κάθε Φ/Β πλαίσιο SP75 (Παράρτημα Α) εμφανίζει μέγιστη ισχύ εξόδου $P_{\max} = 75 \text{ W}_P$ (για την οποία $I_{\max} = 4.4 \text{ A}$ και $V_{\max} = 17.1$), ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{SC} = 4.8 \text{ A}$ και τάση ανοιχτούκλεισσης $V_{OC} = 21.7 \text{ V}$. Από την άλλη πλευρά, η συστοιχία PV-2 περιλαμβάνει συνολικά 4 Φ/Β πλαίσια, της εταιρίας Naps Systems™, τύπου NP100G24 (Παράρτημα Α), το καθένα από τα οποία αποτελείται από 60 ηλιακές κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Σχήμα 5.13). Κάθε Φ/Β πλαίσιο NP100G24 χαρακτηρίζεται από μέγιστη ισχύ εξόδου $P_{\max} = 100 \text{ W}_P$ (για την οποία $I_{\max} = 3 \text{ A}$ και $V_{\max} = 33.3$), ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{SC} = 3.35 \text{ A}$ και τάση ανοιχτούκλεισσης $V_{OC} = 43.1 \text{ V}$.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, πριν την διεξαγωγή των υπέρυθρων θερμογραφίσεων της συγκεκριμένης μελέτης, πραγματοποιήθηκαν συμβατικές ηλεκτρικές μετρήσεις των παραμέτρων I_{SC} και V_{OC} , για κάθε Φ/Β πλαίσιο των δύο συστοιχιών, υπό προσεγγιστικές συνθήκες STC στο πεδίο. Από τις μετρήσεις, διαπιστώθηκε συνολική μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης των PV-1 και PV-2, κατά περίπου 9.5% και 7% αντίστοιχα, πιθανότατα λόγω φυσιολογικής φθοράς τους στο πεδίο, χωρίς ωστόσο να βρεθούν οπτικές ενδείξεις (όπως στην προηγούμενη μελέτη) για τα αίτια αυτής της μείωσης.



Σχήμα 5.12. Η Φ/Β συστοιχία PV-1.



Σχήμα 5.13. Η Φ/Β συστοιχία PV-2.

Η ένταση G_T της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο των πλαισίων μετρήθηκε με την χρήση ενός φορητού πυρανόμετρου (solarimeter) τύπου SL 200, της εταιρίας KIMO™ (Σχήμα 5.14), σε αντίθεση με την 1^η μελέτη περίπτωσης, όπου οι τιμές της G_T δόθηκαν από τα δεδομένα τοπικού μετεωρολογικού σταθμού. Το πυρανόμετρο SL 200 χαρακτηρίζεται από εύρος μετρούμενης έντασης 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, πραγματοποιούνταν με την τοποθέτηση του αισθητηρίου του οργάνου σε επίπεδο παράλληλο με το επίπεδο του πλαισίου.



Σχήμα 5.14. Το πυρανόμετρο KIMO™ SL 200.

Όλες οι υπέρυθρες ραδιομετρήσεις των προαναφερθέντων Φ/Β συστοιχιών, πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του φορητού θερμικού αναλυτή Mikron™/Impac™, μοντέλο IVN 780-P (Σχήμα 5.1), που χρησιμοποιήθηκε και στην 1^η μελέτη περίπτωσης. Τα δε τεχνικά χαρακτηριστικά του IVN 780-P παρουσιάζονται στην Υποενότητα 2.1.1.

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή της Ενότητας, η επεξεργασία των θερμικών εικόνων που προσκτήθηκαν από την θερμοκάμερα, περιελάμβανε την εφαρμογή ανάλυσης ROI, LPA και στατιστικής ανάλυσης ιστογραμμάτων. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά MikroSpec® 4.0 PRO της εταιρίας Mikron™/Impac™ και Matlab® R2009a της εταιρίας Mathworks™. Όπως και στην περίπτωση της προηγούμενης μελέτης, κάθε ηλιακή κυψέλη και κάθε σειρά (string) ηλιακών κυψελών των Φ/Β πλαισίων θεωρήθηκαν ως πολυγωνικές και γραμμικές ROI, αντίστοιχα. Αν και η θερμοκάμερα έχει, φυσικά, την δυνατότητα εξαγωγής πρωτογενών θερμικών εικόνων (raw thermal images) σε πολυάριθμες κλίμακες ψευδοχρώματος, παραδείγματα των οποίων παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη μελέτη, για την συγκεκριμένη διαδικασία ανάλυσης προτιμήθηκε η επιλογή της κλίμακας του γκρι (gray scale option). Κι αυτό γιατί η αναπαραγωγή σημάτων πολυδιάστατων δεδομένων (θερμικών εικόνων) σε κλίμακα του γκρι [5]: i) απαιτεί πολύ μικρότερο υπολογιστικό χρόνο, σε σύγκριση με την αντίστοιχη σε πολυχρωματική κλίμακα (π.χ. rainbow scale) και, κυρίως, ii) προκαλεί μικρότερη “σύγχυση” κατά την επεξεργασία και ερμηνεία των θερμικών εικόνων, καθώς το επίπεδο θερμοκρασίας αντιστοιχίζεται απλά σε επίπεδο φωτεινότητας και όχι σε διαφορετικό χρωματικό συνδυασμό.

3.1.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης

Οι υπέρυθρες θερμογράφσεις πεδίου, διενεργήθηκαν στο σημείο εγκατάστασης και λειτουργίας των Φ/Β συστοιχιών (Σχήμα 5.15), στην οροφή του κτιρίου εργαστηρίων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ, στην Ξάνθη (συντεταγμένες εγκατάστασης: 41°142' N, 24°89' E, μέσο υψόμετρο: 40 m), σε πολυάριθμα ημερήσια σετ μετρήσεων, εκ των οποίων τρία ενδεικτικά σετ παρουσιάζονται σε αυτήν την Υποενότητα και αφορούν στις ημέρες 11^η, 12^η και 13^η Ιουλίου 2010. Κάθε σετ μετρήσεων περιελάμβανε τρεις επιμέρους στιγμιαίες μετρήσεις, σε συγκεκριμένες ώρες κάθε ημέρας: 06:00 (μεταβατικές συνθήκες ηλιοφάνειας – ανατολή ηλίου), 13:00 (σταθερές συνθήκες ηλιοφάνειας) και 20:00 (μεταβατικές συνθήκες ηλιοφάνειας – δύση ηλίου).

Όπως και στην 1^η μελέτη περίπτωσης, για κάθε υπέρυθρη ραδιομέτρηση, 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 μετρήθηκαν, όπως προαναφέρθηκε, με την χρήση πυρανόμετρου. Οι συγκεκριμένες παράμετροι, οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 5.2, χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτήν την μελέτη, τόσο στην αρχική

ρύθμιση της θερμοκάμερας για την αντιστάθμιση της ατμόσφαιρας, όσο και στον υπολογισμό της αναμενόμενης θερμικής απόκρισης της επιφάνειας των ηλιακών κυψελών.



Σχήμα 5.15. Ενδεικτικό παράδειγμα μιας διαδικασίας υπέρυθρης ραδιομέτρησης, για τα Φ/Β πλαίσια της συστοιχίας PV-1.

Πίνακας 5.2. Περιβαλλοντικές συνθήκες των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων της μελέτης.

Ημερομηνία	11 ^η Ιουλίου			12 ^η Ιουλίου			13 ^η Ιουλίου		
Ώρα μέτρησης	06:00	13:00	20:00	06:00	13:00	20:00	06:00	13:00	20:00
Θερμοκρασία αέρα (°C)	18	30.5	26	18.5	31.5	27	18	32.5	28
Σχετική υγρασία (%)	70	40	45	75	55	45	75	30	40
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	1.4	5.6	0.9	2.2	6.2	2.4	1.1	4.3	0.7
G_T (W/m ²)	<15	881	48	<15	670	55	<15	890	42

Οι Φ/Β συστοιχίες θερμογραφήθηκαν υπό φορτίο και υπό κυμαινόμενες καιρικές συνθήκες, με επιδίωξη (όχι ωστόσο απαραίτητη προϋπόθεση) τη ύπαρξη καθαρού (χωρίς νέφωση) ουρανού. Στις περιπτώσεις μετρήσεων με αναπόφευκτη νέφωση (την 12^η Ιουλίου), λήφθηκε, τουλάχιστον, μέριμνα για την αποφυγή ανεπιθύμητων ανατακλάσεων στην μετρούμενη επιφάνεια του πλαισίου. Ο προσανατολισμός των Φ/Β συστοιχιών ήταν νότιος και η κλίση τους, ως προς το οριζόντιο επίπεδο, σε σταθερή προεπιλεγμένη γωνία $\theta \approx 32^\circ$, ίση με την μέση ετήσια βέλτιστη κλίση $\theta_{opt,annual}$, για την συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή εγκατάστασης. Η απόσταση μεταξύ κάθε μετρούμενου πλαισίου και του οπτικού συστήματος της θερμοκάμερας ορίστηκε σταθερή, σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, και ίση περίπου με $d \approx 2$ m. Θα πρέπει

να σημειωθεί ότι, η προαναφερθείσα γωνία κλίσης θ δεν αντιστοιχεί στην βέλτιστη κλίση θ_{opt} , η οποία, για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο μετρήσεων, κυμαίνεται μεταξύ 12° - 22° . Ωστόσο, όπως και για την 1^η μελέτη περίπτωσης, η προεπιλεγμένη γωνία κλίσης θ δεν επηρεάζει το ποιοτικό αποτέλεσμα της συνολικής πειραματικής διαδικασίας.

3.1.3 Αντιστάθμιση παραμέτρων μέτρησης

Κατά κανόνα, η ακρίβεια μιας υπέρυθρης ραδιομέτρησης πεδίου καθορίζεται άμεσα από συγκεκριμένες παραμέτρους που σχετίζονται με τις περιβαλλοντικές (ατμοσφαιρικές) συνθήκες, τις οπτικές ιδιότητες του υλικού του υπό μέτρηση στόχου και την πιθανή παρουσία όμορων αντικειμένων. Για την επίτευξη, λοιπόν, καλύτερης ακρίβειας, στα πλαίσια της σειράς μετρήσεων αυτής της μελέτης περίπτωσης, πραγματοποιήθηκε η αντιστάθμιση των παραπάνω παραμέτρων.

Έτσι, λοιπόν, οι τιμές της θερμοκρασίας αέρα, της υγρασίας, έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της ταχύτητας του αέρα, για κάθε χρονική στιγμή μέτρησης, χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι εισόδου (inputs) για την αρχική ρύθμιση της τιμής αντιστάθμισης ατμόσφαιρας (ambient compensation value, ACV) της θερμοκάμερας IVN 780-P. Για παράδειγμα, για τις ατμοσφαιρικές συνθήκες της 13^{ης} Ιουλίου, στις 13:00, η υπέρυθρη ραδιομέτρηση των Φ/Β συστοιχιών πραγματοποιήθηκε με την χρήση ενός συντελεστή αντιστάθμισης $ACV=0.98$, όπως αυτός υπολογίστηκε αλγοριθμικά από το ενσωματωμένο λογισμικό της θερμοκάμερας.

Με αντίστοιχη αλγοριθμική διαδικασία, η θερμοκάμερα υπολογίζει την απαραίτητη διόρθωση φόντου κάθε ραδιομέτρησης, έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η επίδραση όμορων αντικειμένων δεδομένης θερμοκρασίας στη τελική ανιχνευόμενη υπέρυθρη ακτινοβολία. Η συγκεκριμένη διόρθωση ονομάζεται αντιστάθμιση ανακλώμενης θερμοκρασίας (reflected temperature compensation, RTC). Όπως έχει εξηγηθεί και στην Υποενότητα 4.3 του 4^{ου} Κεφαλαίου, η RTC χρησιμοποιείται για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας σε υπέρυθρες ραδιομετρήσεις στις οποίες, λόγω της ύπαρξης όμορων αντικειμένων στο φόντο, με σημαντικά υψηλή θερμοκρασία (ομοιόμορφα κατανομημένη), επιπλέον θερμική ενέργεια ανακλάται από το υλικό του στόχου. Γενικά, η ανακλώμενη αυτή θερμική ακτινοβολία επιφέρει μια φαινομενική μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας του στόχου, ανάλογη με: i) την 4^η δύναμη της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του πραγματικού στόχου και του όμορου αντικειμένου, το οποίο “δρα” ως εξωτερική πηγή θερμότητας, ii) την ανακλαστικότητα (ίση με $1-\varepsilon$) του στόχου και iii) τον συντελεστή ικανότητας εκπομπής της εξωτερικής πηγής θερμότητας [6]. Φυσικά, αυτή η φαινομενική μεταβολή της μετρούμενης θερμοκρασίας, δεν συνιστά αποτέλεσμα πραγματικής μεταβολής της επιφανειακής θερμοκρασίας του αντικειμένου και, πρακτικά, συμβαίνει μόνο όταν το υλικό του στόχου χαρακτηρίζεται από σημαντικά χαμηλό συντελεστή ικανότητας εκπομπής (λ.χ. σε λείες, μεταλλικές επιφάνειες). Για την παρούσα μελέτη, η επίδραση αυτού του

φαινομένου μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, καθώς το υλικό της εμπρόσθιας όψης των Φ/Β πλαισίων (ενισχυμένο γυαλί, tempered glass) είναι υψηλού συντελεστή ικανότητας εκπομπής ($\varepsilon=0.85$). Εξάλλου, δεν παρατηρήθηκε σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των Φ/Β πλαισίων-στόχων και των όποιων θερμότερων όμορων αντικειμένων. Παρ' όλα αυτά, για την ενίσχυση της ακρίβειας της μέτρησης, επιλέχθηκε να εφαρμοστεί και η αντιστάθμιση RTC, για την ενεργοποίηση της οποίας, ορίζεται μέσω ενσωματωμένου αλγορίθμου της θερμοκάμερας, μια τιμή-εισόδου $C = 43\text{ }^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχη της θερμοκρασίας φόντου [7]. Η συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας φόντου, υπολογίστηκε από την μέση τιμή θερμοκρασίας $T_{b,mean}$ όμορων, θερμών αντικειμένων (μεταλλικά αντικείμενα, ηλιακοί συλλέκτες, άλλα Φ/Β πλαίσια) στο σημείο διεξαγωγής των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων.

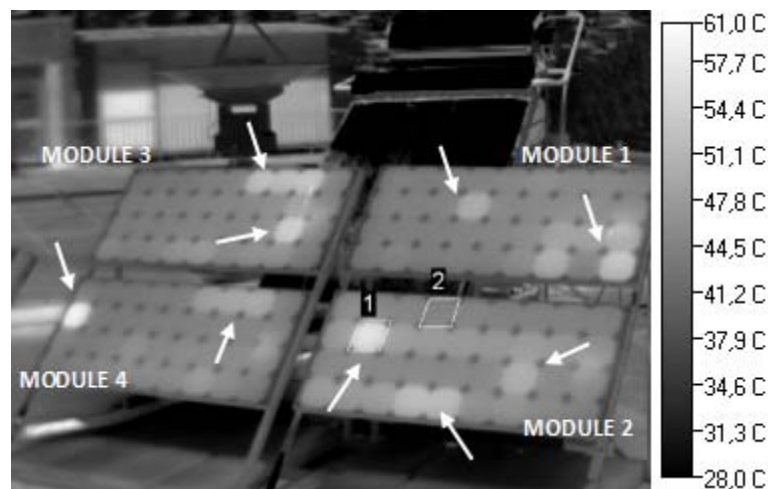
Τέλος, για την ακριβέστερη δυνατή ραδιομέτρηση, λήφθηκαν υπόψη και οι οπτικές ιδιότητες του γυαλιού (ως υλικό της μετρούμενης εμπρόσθιας επιφάνειας των Φ/Β πλαισίων). Σύμφωνα με τις οπτικές τους ιδιότητες, όλα τα αντικείμενα αντανακλούν, μεταφέρουν και απορροφούν/εκπέμπουν θερμική ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας. Ωστόσο, μόνο η εκπεμπόμενη θερμική ακτινοβολία είναι ενδεικτική της θερμοκρασίας ενός σώματος (Κεφάλαιο 4, Υποενότητα 2.3). Από την άλλη πλευρά, η θερμοκάμερα ανιχνεύει και μετρά το άθροισμα της εκπεμπόμενης (W_E), της ανακλώμενης (W_R) και της μεταφερόμενης (W_T) θερμικής ενέργειας που προέρχονται από την επιφάνεια του στόχου. Το άθροισμα $R = W_E + W_R + W_T$ καλείται *ακτινοβόληση* (radiosity ή exitance) [6]. Κατά συνέπεια, πριν από κάθε ραδιομέτρηση, η θερμοκάμερα πρέπει να ρυθμίζεται στην ακριβή τιμή του συντελεστή emissivity για κάθε υπό θερμογράφηση αντικείμενο, έτσι ώστε να “διαβάζει” μόνο την εκπεμπόμενη θερμική ενέργεια του στόχου και, συνεπώς, την πραγματική του θερμοκρασία. Φυσικά, αν ο συντελεστής ικανότητας εκπομπής της επιφάνειας του στόχου μεταβληθεί ή επιλεχθεί λανθασμένη τιμή στην ρύθμιση της θερμοκάμερας, τότε η “ανάγνωση” της φαινομενικής θερμοκρασίας του στόχου θα εμπεριέχει σφάλμα και, φυσικά, θα διαφέρει από την πραγματική του θερμοκρασία. Για κάθε υπέρυθρη ραδιομέτρηση της παρούσας μελέτης, η τιμή του ε για το ενισχυμένο γυαλί της εμπρόσθιας επιφάνειας των Φ/Β πλαισίων, ορίστηκε – όπως προαναφέρθηκε – ίση με 0.85. Η τιμή αυτή υπολογίστηκε και επαληθεύτηκε εμπειρικά, με την ισοστάθμιση της θερμογραφικής μέτρησης της επιφάνειας του ενισχυμένου γυαλιού με την – ανεξάρτητη του ε – αντίστοιχη ένδειξη ενός κοινού υδραργυρικού θερμομέτρου επαφής. Κλείνοντας τη συζήτηση περί των οπτικών ιδιοτήτων του στόχου, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, οι υπέρυθρες ραδιομετρήσεις γυάλινων επιφανειών οδηγούν συχνά σε προβλήματα ανεπιθύμητης κατοπτρικής ανάκλασης (specular reflection), οι οποία σχετίζεται με φαινόμενα αυτοανίχνευσης (self-detection), όπως το φαινόμενο Narcissus [8,9]. Παρά το ότι μια καθαρή κατοπτρική ανάκλαση αποτελεί, συνήθως, δείκτη υψηλής ανακλαστικότητας επιφάνειας, το χαρακτηριστικό της υψηλής κατοπτρικότητας δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την υψηλή ανακλαστικότητα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των υπό

θερμογράφηση Φ/Β πλαισίων, η ανακλαστικότητα του ενισχυμένου γυαλιού μπορεί να θεωρηθεί εξαιρετικά χαμηλή ($1-\varepsilon=0.15$), σε αντίθεση με την ιδιαίτερα υψηλή κατοπτρικότητά του.

3.2 Αποτελέσματα και συζήτηση

3.2.1 Ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος

Μια πρωτογενής διάγνωση της κατάστασης κάθε Φ/Β πλαισίου μπορεί να προκύψει με την ανάλυση ROI των θερμικών εικόνων που προσκτήθηκαν κατά τη διάρκεια των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων των PV-1 και PV-2. Από αυτήν, εξάγεται με άμεσο τρόπο μια αρκετά αξιόπιστη συσχέτιση μεταξύ των θεωρητικών (βάσει της Σχέσης 5.1) και των πραγματικών (βάσει των μετρήσεων) θερμοκρασιών λειτουργίας κάθε κυψέλης, T_c και $T_{c,m}$. Υπενθυμίζεται δε, ότι μια απόκλιση της $T_{c,m}$ από την T_c στην οποία $\Delta T \geq 5$ °C, μπορεί να θεωρηθεί ενδεικτική μιας ενδεχόμενης βλάβης θερμής κηλίδας. Προς αυτήν την κατεύθυνση, λοιπόν, με την εφαρμογή της ανάλυσης ποσοτικοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν τα απαραίτητα θερμοκρασιακά δεδομένα από κάθε ηλιακή κυψέλη υπό μορφή ορθογωνικών ή πολυγωνικών ROI.

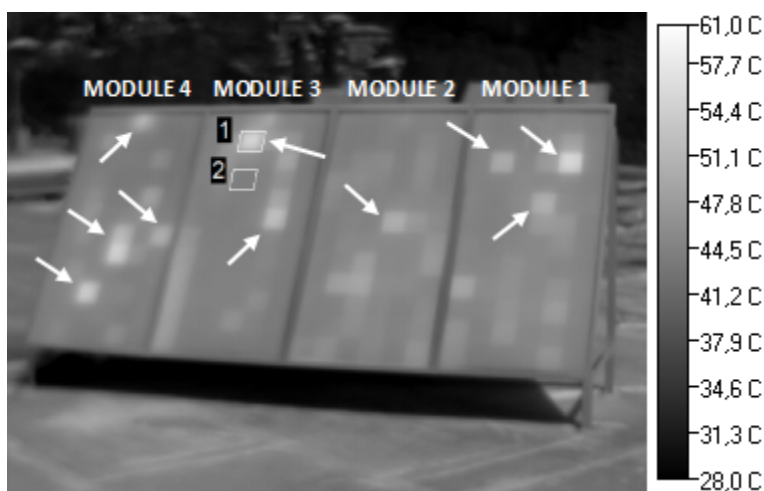


Σχήμα 5.16. Ενδεικτική θερμική εικόνα της Φ/Β συστοιχίας PV-1 για την υπέρυθρη θερμογράφηση της 11^{ης} Ιουλίου, στις 13:00.

Το Σχήμα 5.16 παρουσιάζει την θερμική εικόνα της Φ/Β συστοιχίας PV-1 την 11^η Ιουλίου, στις 13:00, υπό συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας. Ενδεικτικά, στην συγκεκριμένη θερμική εικόνα, η ανάλυση των κυψελών-ROI 1 και 2 του Φ/Β πλαισίου (module) 2, έδωσε μέσες τιμές μετρούμενης θερμοκρασίας κυψέλης $T_{c1,m} = 54.8$ °C και $T_{c2,m} = 44.9$ °C αντίστοιχα. Από την εφαρμογή της Σχέσης 5.1, για τις περιβαλλοντικές παραμέτρους της συγκεκριμένης χρονικής στιγμής μέτρησης (Πίνακας 5.2), προκύπτει ότι η θεωρητική τιμή θερμοκρασίας κυψέλης είναι

$T_c = 44.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Κατά συνέπεια, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κυψέλη 2 εμφανίζει φυσιολογική θερμοκρασία λειτουργίας, πολύ κοντά στην θεωρητική (απόκλιση 0.8%), σε αντίθεση με την κυψέλη 1, η οποία λειτουργεί ως θερμή κηλίδα, σε μια θερμοκρασία σημαντικά υψηλότερη της αναμενόμενης, κατά $\Delta T = 10.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ομοίως, βάσει της συνολικής ανάλυσης ROI, διαγνώστηκαν 14 περιπτώσεις θερμών κηλίδων ($\Delta T \geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), σε σύνολο 144 ηλιακών κυψελών της συστοιχίας PV-1. Οι περιπτώσεις αυτές σχετίζονται, φυσικά, με περιοχές “ανωμαλιών” στην θερμοκρασιακή κατανομή των πλαισίων, οι οποίες υποδεικνύονται στο Σχήμα 5.16 από τα λευκά βέλη.

Αντίστοιχη ανάλυση ROI εφαρμόστηκε και για τα θερμοκρασιακά δεδομένα της PV-2, της οποίας η θερμική εικόνα για την υπέρυθρη θερμογράφηση της 11^{ης} Ιουλίου, στις 13:00, δίνεται στο Σχήμα 5.17. Ενδεικτικά, εδώ η ανάλυση των κυψελών-ROI 1 και 2 του Φ/Β πλαισίου 3, έδωσε μέσες τιμές μετρούμενης θερμοκρασίας κυψέλης $T_{c1,m} = 52.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $T_{c2,m} = 43.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Δεδομένου του σύντομου “νεκρού χρόνου” μεταξύ των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων των δύο Φ/Β συστοιχιών, η μεταβολή των περιβαλλοντικών παραμέτρων (για την ίδια ημερομηνία και ώρα) θεωρήθηκε αμελητέα. Έτσι, και για την περίπτωση της μέτρησης της PV-2, η θεωρητική τιμή θερμοκρασίας κυψέλης λαμβάνεται ίση με $T_c = 44.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Προκύπτει λοιπόν, για την θερμική εικόνα του Σχήματος 5.17, ότι ενώ η κυψέλη 2 λειτουργεί σε φυσιολογική θερμοκρασία, κοντά στην θεωρητική ($\Delta T = 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, απόκλιση 1.3%), η κυψέλη 1 λειτουργεί ως θερμή κηλίδα, εμφανίζοντας θερμοκρασία υψηλότερη της αναμενόμενης, κατά $\Delta T = 7.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ομοίως και για την PV-2, βάσει της συνολικής ανάλυσης ROI, διαγνώστηκαν τουλάχιστον 15 περιπτώσεις θερμών κηλίδων, σε σύνολο 240 ηλιακών κυψελών. Οι περιπτώσεις αυτές, οι οποίες υποδεικνύονται στο Σχήμα 5.17 από τα λευκά βέλη, όπως και στην PV-1, σχετίζονται με ασυνήθιστα θερμοκρασιακά προφίλ και χρίζουν περαιτέρω διερεύνησης για τα πιθανά αίτια εμφάνισης της βλάβης θερμής κηλίδας (λ.χ. ρωγμή, αποκόλληση στρώματος EVA, κλπ).



Σχήμα 5.17. Ενδεικτική θερμική εικόνα της Φ/Β συστοιχίας PV-2 για την υπέρυθρη θερμογράφηση της 11^{ης} Ιουλίου, στις 13:00.

Οι υπόλοιπες υπέρυθρες ραδιομετρήσεις των επόμενων ημερών (12^η και 13^η Ιουλίου) παρείχαν θερμικές εικόνες παρόμοιων θερμοκρασιακών προφίλ, επιβεβαιώνοντας τις προαναφερθείσες παρατηρήσεις για την ύπαρξη συγκεκριμένων θερμών κηλίδων στις συστοιχίες PV-1 και PV-2. Κατά τα φαινόμενα, όπως προκύπτει από την προσεκτική παρατήρηση των θερμικών εικόνων, οι υπάρχουσες περιοχές θερμών κηλίδων επιφέρουν μια αισθητή αύξηση της θερμοκρασίας όμορων “υγιών” κυψελών, της ίδιας σειράς, υποβαθμίζοντας επιπλέον την τελική απόδοση της κάθε Φ/Β συστοιχίας. Θα πρέπει, τέλος, να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις σε σταθερή κατάσταση ηλιοφάνειας (στις 13:00) και απουσία νεφώσεων, παρείχαν περισσότερο αξιόπιστη και ακριβή διάγνωση, κάτι που παρατηρήθηκε και στην παθητική προσέγγιση της 1^{ης} μελέτη περίπτωσης.

3.2.2 Στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων

Η θερμική εικόνα μιας κατασκευής ή ενός εν λειτουργία εξοπλισμού μπορεί να “μεταφραστεί” με πολυάριθμους, συνήθως απλούς, τρόπους. Μάλιστα, σε αρκετές περιπτώσεις υπέρυθρων ραδιομετρήσεων, μια και μοναδική ποιοτική διάγνωση βλαβών με βάση την πρωτογενή μορφή της θερμικής εικόνας, είναι από μόνη της αρκετή. Ωστόσο, το επίπεδο εφαρμοσιμότητας και αποτελεσματικότητας μιας υπέρυθρης ραδιομέτρησης στα πλαίσια μιας μεθόδου διάγνωσης βλαβών, μπορεί να βελτιωθεί, εφόσον η μέθοδος συμπεριλαμβάνει την κατάλληλη, όχι απαραίτητα εξεζητημένη, τεχνική επεξεργασίας της θερμικής εικόνας. Στην προκείμενη μελέτη, ακόμη και ένα βασικό στάδιο επεξεργασίας, όπως η στατιστική ανάλυση ιστογράμματος, μπορεί να παρέχει την κατάλληλη μορφή θερμικού αποτυπώματος μιας βλάβης, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ταξινόμησή της, με κριτήριο την σοβαρότητα ή την έκτασή της.

Πρακτικά, ένα ιστόγραμμα εικόνας λειτουργεί ως μια γραφική αναπαράσταση της τονικής ή της χρωματικής κατανομής σε αυτήν. Από την στιγμή όμως, που μια τέτοια κατανομή στην περίπτωση μιας θερμικής εικόνας αντιστοιχεί σε διακριτές τιμές θερμοκρασίας, η στατιστική ανάλυση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών ενός θερμικού ιστογράμματος συνιστά ένα πρακτικό και συνάμα δυναμικό εργαλείο εντοπισμού και διάγνωσης “ανώμαλων” θερμοκρασιακών κατανομών και, συνεπώς, βλαβών ή αστοχιών. Μεταξύ άλλων, ο αριθμητικός μέσος, η διακύμανση, η τυπική απόκλιση και η κλίση αποτελούν, ίσως, τις πιο κοινές στατιστικές παραμέτρους χαρακτηρισμού μιας τονικής ή χρωματικής κατανομής. Διευκρινίζεται ότι η τονική κατανομή αναφέρεται σε εικόνες στην κλίμακα του γκρι (κατανομή του τόνου, δηλαδή της έντασης), ενώ η χρωματική κατανομή αναφέρεται σε εικόνες πολυχρωματικής κλίμακας (κατανομή χρωματικών συνδυασμών κόκκινου-πράσινου-μπλε (red-green-blue, RGB)). Στην παρούσα μελέτη, συνεπώς, εξετάζεται η τονική κατανομή των θερμικών εικόνων. Για κάθε

εικόνα γκρι κλίμακας, η κατανομή πιθανότητας $P(g)$ ιστογράμματος πρώτης τάξης δίνεται από μια συνάρτηση της μορφής της Σχέσης 5.2 [10]:

$$P(g) = \frac{L(g)}{M} \quad (5.2)$$

όπου $L(g)$ είναι το πλήθος των επιπέδων g του γκρι και M ο συνολικός αριθμός των εικονοστοιχείων στην εικόνα. Ενώ σε μια συμβατική εικόνα σε κλίμακα του γκρι, ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων επιπέδων $L(g)$ λαμβάνει τιμές από 0 έως 256, σε μια αντίστοιχη θερμική εικόνα το εύρος αυτό εκτείνεται από μια ελάχιστη έως μια μέγιστη θερμοκρασία. Καθώς, λοιπόν, η τονική κατανομή διαφοροποιείται σε αντιστοιχία με την θερμοκρασία, μια θερμική εικόνα μπορεί να ταξινομηθεί με κριτήριο την ένταση του γκρι τόνου της. Ως αριθμητικός μέσος $\bar{g}$, ορίζεται η μέση τιμή που παρέχει συγκεκριμένη πληροφορία σχετικά με την *ένταση της φωτεινότητας* μιας εικόνας και μπορεί, επομένως, να εκφραστεί με την Σχέση 5.3:

$$\bar{g} = \sum_{g=0}^{L-1} g \cdot P(g) \quad (5.3)$$

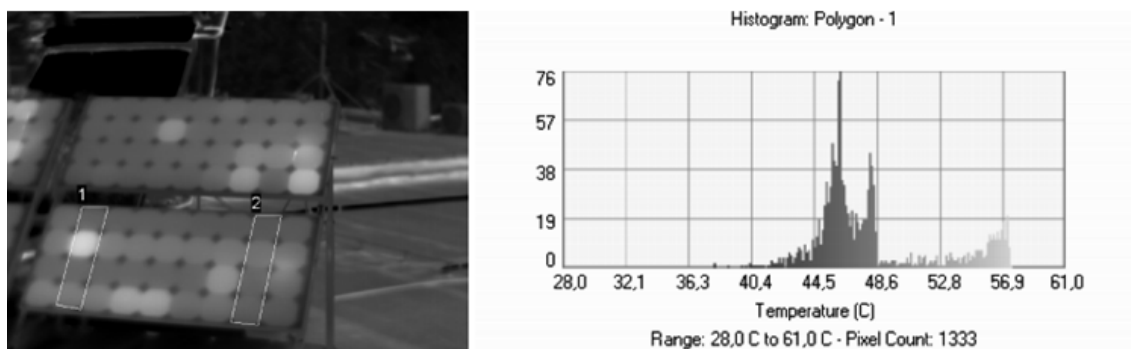
Για την ίδια κατανομή, η διακύμανση σ_g^2 αποτελεί μέτρο της διασποράς μιας σειράς σημείων δεδομένων γύρω από την τιμή του αριθμητικού τους μέσου, και δίνεται από την Σχέση 5.4.

$$\sigma_g^2 = \sum_{g=0}^{L-1} (g - \bar{g})^2 \cdot P(g) \quad (5.4)$$

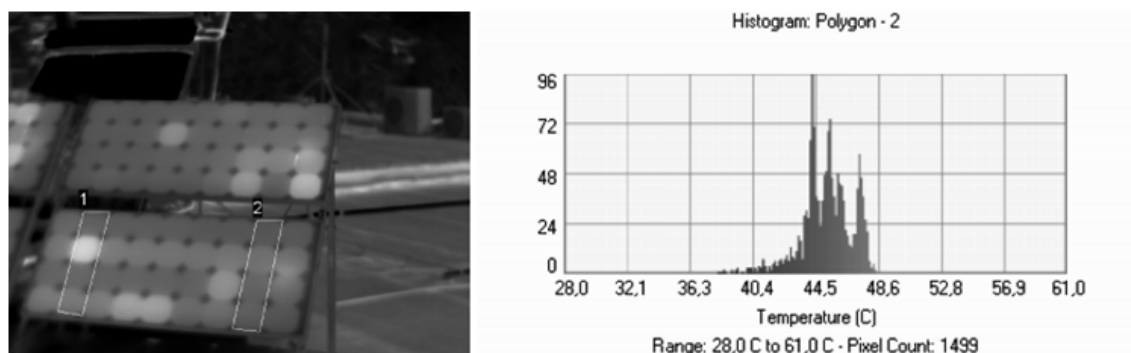
Η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης ορίζει την τυπική απόκλιση σ_g , η οποία εκφράζει πληροφορία σχετικά με την *αντίθεση* μιας εικόνας. Με άλλα λόγια, εκφράζει την “έκταση” της πληροφορίας της εικόνας. Έτσι, μια θερμική εικόνα υψηλής αντίθεσης εμφανίζει και μεγάλη θερμοκρασιακή κατανομή. Λόγω αυτής της ιδιότητάς της, η τυπική απόκλιση συνιστά δείκτη-κλειδί σε εφαρμογές διάγνωσης θερμικών εικόνων. Τέλος, η κλίση (skew) S μετρά την ασυμμετρία γύρω από τον αριθμητικό μέσο μιας κατανομής γκρι επιπέδων και ορίζεται από την Σχέση 5.5.

$$S = \frac{1}{\sigma_g^3} \sqrt{\sum_{g=0}^{L-1} (g - \bar{g})^3 \cdot P(g)} \quad (5.5)$$

Στην παρούσα μελέτη, η στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων εφαρμόστηκε στις προσκτηθείσες θερμικές εικόνες και, συγκεκριμένα, σε σειρές κυψέλων που ορίζονται ως πολυγωνικές ROI. Εστιάζοντας στο Φ/Β πλαίσιο 2 της συστοιχίας PV-1, δύο διαφορετικές κάθετες σειρές κυψέλων, ορίζονται ως πολυγωνικές ROI 1 και 2. Σύμφωνα με την ανάλυση ROI που προηγήθηκε, η ROI 1 “περιέχει” μια βλάβη υπό μορφή θερμής κηλίδας, ενώ η ROI 2 αποτελείται μόνο από “υγιείς” κυψέλες.



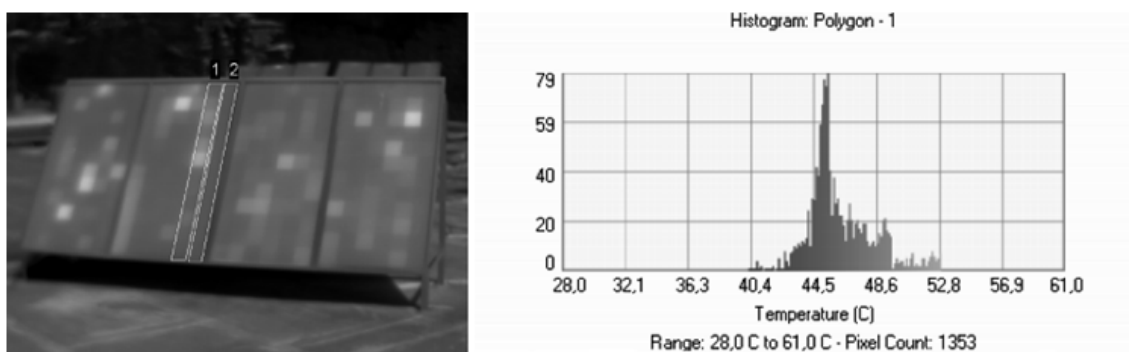
Σχήμα 5.18. Κατανομή ιστογράμματος της ROI 1 του Φ/Β πλαισίου 2, για την θερμική εικόνα της PV-1, την 11^η Ιουλίου, στις 13:00.



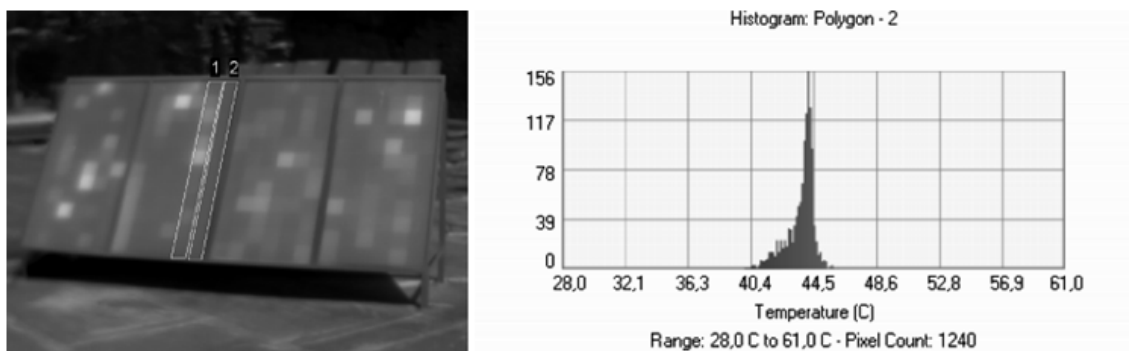
Σχήμα 5.19. Κατανομή ιστογράμματος της ROI 2 του Φ/Β πλαισίου 2, για την θερμική εικόνα της PV-1, την 11^η Ιουλίου, στις 13:00.

Στα Σχήματα 5.18 και 5.19 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα των ROI 1 και 2 αντίστοιχα, για την θερμική εικόνα της PV-1 την 11^η Ιουλίου, στις 13:00. Παρατηρείται ότι και στα δύο ιστογράμματα εμφανίζεται μια υψηλή κατανομή εικονοστοιχείων (άξονας Y) στο θερμοκρασιακό εύρος τιμών (άξονας X) μεταξύ 44.5 και 48.6 °C, το οποίο πρακτικά αντιστοιχεί στην αναμενόμενη (φυσιολογική) θερμοκρασία λειτουργίας των κυψέλων, για τις συνθήκες μέτρησης. Ωστόσο, η κατανομή του ιστογράμματος της ROI 1 χαρακτηρίζεται και από μία δεύτερη, μικρότερη αλλά υπολογίσιμη, κατανομή θερμοκρασιακής πληροφορίας, στο εύρος τιμών μεταξύ 53 και 57 °C. Για τον λόγο αυτό, η κατανομή του ιστογράμματος ROI 1 προσεγγίζει την μορφή μιας *δικόρυφης κατανομής* (bi-modal distribution), με υψηλότερη τιμή αριθμητικού

μέσου, διακύμανσης (ή τυπικής απόκλισης) και κλίσης, σε σύγκριση με την κατανομή του ROI 2 που μπορεί να θεωρηθεί *μονοκόρυφη* (single-modal distribution). Πράγματι, εφαρμόζοντας τις Σχέσεις 5.4 και 5.5, για τα θερμοκρασιακά δεδομένα των συνολικών εικονοστοιχείων κάθε ROI, προκύπτει ότι για την ROI 1 είναι $\sigma_{g1}^2 = 16.39$ °C και $S_1 = 1.057$ °C, ενώ για την ROI 2 είναι $\sigma_{g2}^2 = 2.064$ °C και $S_2 = -0.001$ °C. Επίσης, λόγω της παρουσίας της θερμής κηλίδας, η φωτεινότητα της ROI 1 είναι μεγαλύτερη της ROI 2, πράγμα που επιβεβαιώνεται από την μεγαλύτερη τιμή αριθμητικού μέσου της πρώτης. Πράγματι, εφαρμόζοντας την Σχέση 5.3 για τα συνολικά θερμοκρασιακά δεδομένα κάθε ROI, προκύπτει ότι $\bar{g}_1 = 48.5$ °C και $\bar{g}_2 = 45.4$ °C για τις ROI 1 και 2 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.20. Κατανομή ιστογράμματος της ROI 1 του Φ/Β πλαισίου 3, για την θερμική εικόνα της PV-2, την 11^η Ιουλίου, στις 13:00.



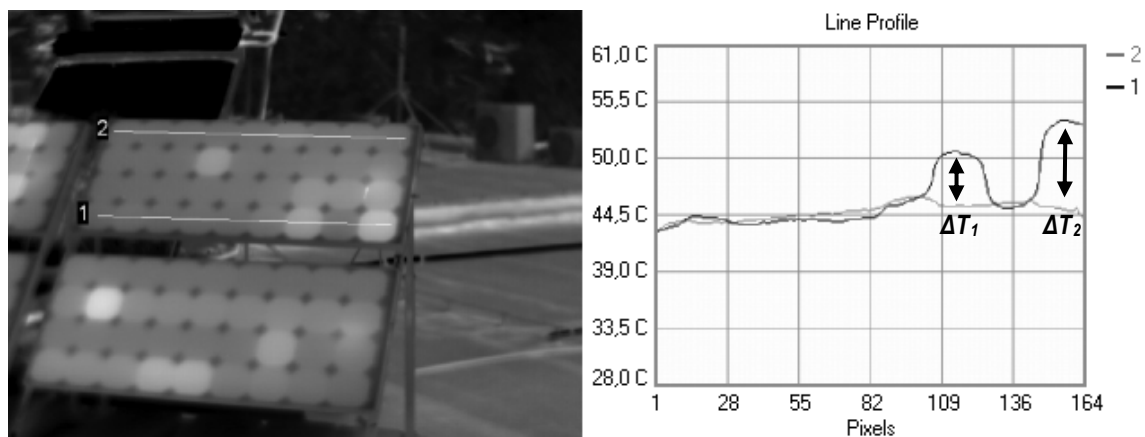
Σχήμα 5.21. Κατανομή ιστογράμματος της ROI 2 του Φ/Β πλαισίου 3, για την θερμική εικόνα της PV-2, την 11^η Ιουλίου, στις 13:00.

Στα Σχήματα 5.20 και 5.21 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα των ROI 1 και 2 αντίστοιχα, για την θερμική εικόνα της PV-2 την 11^η Ιουλίου, στις 13:00. Εστιάζοντας στο Φ/Β πλαίσιο 3 της συστοιχίας PV-2, δύο διαφορετικές κάθετες σειρές κυψελών, ορίζονται ως πολυγωνικές ROI 1 και 2. Όπως και στην περίπτωση της PV-1, στα δύο ιστογράμματα παρατηρείται μια κοινή υψηλή κατανομή εικονοστοιχείων στο θερμοκρασιακό εύρος τιμών

μεταξύ 42.5 και 46 °C, κοντά στην φυσιολογική θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών. Ωστόσο, η κατανομή του ιστογράμματος της ROI 1 χαρακτηρίζεται από επιμέρους, μικρές πλην όμως όχι αμελητέες, κατανομές θερμοκρασίας, στο εύρος τιμών μεταξύ 46 και 52.8 °C, ενδεικτικές φαινομένων “ήπιων” θερμών κηλίδων. Όπως φάνηκε και στην στατιστική ανάλυση της PV-1, η ύπαρξη θερμών κηλίδων “συνδέεται” με την αύξηση των τιμών συγκεκριμένων στατιστικών παραμέτρων, όπως ο αριθμητικός μέσος, η διακύμανση και η κλίση. Πράγματι, εφαρμόζοντας τις Σχέσεις 5.3, 5.4 και 5.5, για τα θερμοκρασιακά δεδομένα των ιστογραμμάτων των Σχημάτων 5.20 και 5.21, προκύπτει ότι για την ROI 1 είναι $\bar{g}_1 = 46.8$ °C, $\sigma_{g1}^2 = 4.705$ °C και $S_1 = 0.919$ °C, ενώ για την ROI 2 είναι $\bar{g}_2 = 43.6$ °C, $\sigma_{g2}^2 = 1.09$ °C και $S_2 = -0.875$ °C.

3.2.3 Ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας

Όπως εξηγήθηκε και στην 1^η μελέτη περίπτωσης, η LPA παράγει γραφήματα, τα οποία παρουσιάζουν την διακύμανση της τιμής της θερμοκρασίας κατά μήκος γραμμικών ROI, σε κλίμακα μήκους ή εικονοστοιχείων. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 5.22 παρουσιάζονται, αριστερά, οι γραμμικές ROI 1 και 2, και, δεξιά, τα παραχθέντα γραφήματα της LPA.

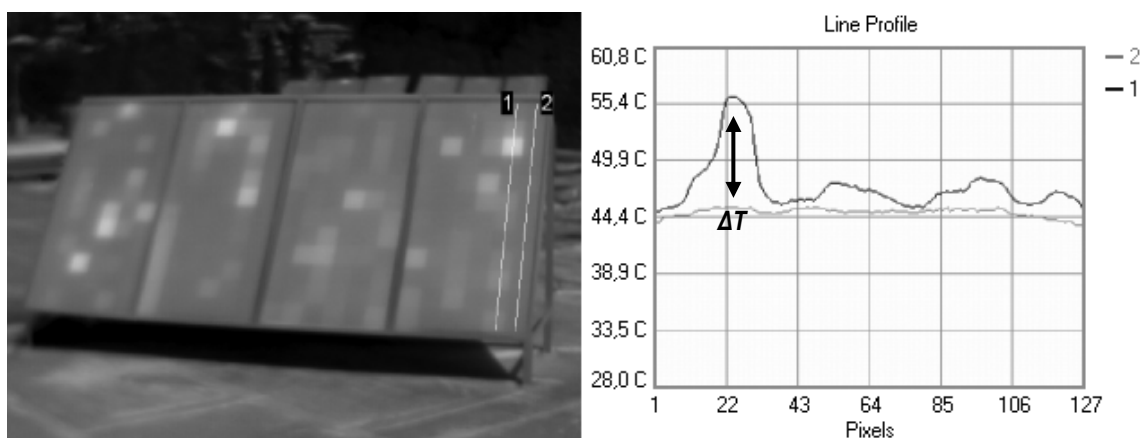


Σχήμα 5.22. Ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας στο Φ/Β πλαίσιο 1, της PV-1, για την θερμική εικόνα της 11^{ης} Ιουλίου, στις 13:00.

Ξεκινώντας από την Φ/Β συστοιχία PV-1, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.22, η ROI 1 εκτείνεται γραμμικά, κατά μήκος μιας “προβληματικής” σειράς 9 κυψελών (συμπεριλαμβανομένων δύο θερμών κηλίδων) στο Φ/Β πλαίσιο 1, ενώ η ROI 2 εκτείνεται γραμμικά κατά μήκος αντίστοιχης, “υγιούς” σειράς κυψελών στο ίδιο πλαίσιο. Όπως είναι αναμενόμενο, εφόσον οι ROI αφορούν σε κυψέλες του ίδιου Φ/Β πλαισίου, με ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή, οι δύο καμπύλες συμπίπτουν σχεδόν τέλεια, πλην των διαστημάτων όπου εντοπίζονται οι θερμές κηλίδες της ROI 1. Για την ακρίβεια, στο διάστημα μεταξύ των

εικονοστοιχείων 100 και 125, στο οποίο διαγιγνώσκεται η πρώτη θερμή κηλίδα της ROI 1, οι δύο καμπύλες εμφανίζουν μια θερμοκρασιακή απόκλιση κατά $\Delta T_1 = 6^\circ\text{C}$. Ομοίως, στο διάστημα μεταξύ των εικονοστοιχείων 142 και 164, στο οποίο εντοπίζεται επιτυχώς και η δεύτερη θερμή κηλίδα της ROI 1, οι δύο καμπύλες εμφανίζουν μια ακόμη μεγαλύτερη θερμοκρασιακή απόκλιση κατά $\Delta T_2 = 8.5^\circ\text{C}$.

Τέλος, όσον αφορά στην εφαρμογή της LPA στην συστοιχία PV-2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.23, η ROI 1 αντιστοιχεί σε μια “προβληματική” σειρά 10 κυψελών (μεταξύ των οποίων μια θερμή κηλίδα) στο Φ/Β πλαίσιο 1, ενώ η ROI 2 αντιστοιχεί σε μια “υγιή” σειρά κυψελών στο ίδιο πλαίσιο. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, παρατηρείται μερική μόνο σύμπτωση των δύο καμπυλών, καθώς καταγράφονται τοπικές μικρές διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των δύο σειρών του ίδιου Φ/Β πλαισίου, στα διαστήματα εικονοστοιχείων 46-74, 81-110 και 114-127, καθώς και μια σημαντική απόκλιση $\Delta T = 11^\circ\text{C}$, μεταξύ των εικονοστοιχείων 10 και 38, η οποία και αντιστοιχεί σε περίπτωση θερμής κηλίδας. Οι μικρότερες διαφορές που εμφανίζονται στα προαναφερθέντα διαστήματα δεν μπορούν να χαρακτηριστούν με ασφάλεια ως περιπτώσεις βλαβών, καθώς αντιστοιχούν σε μικρές αποκλίσεις ΔT της τάξεως των $2-3^\circ\text{C}$. Λογίζονται ωστόσο είτε ως “ύποπτες” περιπτώσεις, είτε ως αποτελέσματα της αναπόφευκτης εναπόθεσης θερμότητας – με διάχυση και αγωγή – από όμορες θερμές κηλίδες.



Σχήμα 5.23. Ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας στο Φ/Β πλαίσιο 1, της PV-2, για την θερμική εικόνα της 11ης Ιουλίου, στις 13:00.

Συνοψίζοντας, με την συνολική αυτή μελέτη επιβεβαιώθηκαν σε μεγάλο βαθμό η μειωμένη απόδοση και η “προβληματική” λειτουργία των Φ/Β συστοιχιών που εξετάστηκαν, από την διάγνωση πολυάριθμων θερμών κηλίδων σε συγκεκριμένες κυψέλες των Φ/Β πλαισίων. Η επιλογή της προσθήκης μιας επιπλέον (συγκριτικά με την προηγούμενη μελέτη) τεχνικής επεξεργασίας των προσκτηθέντων θερμικών εικόνων αποδείχθηκε επιτυχής: Η χρήση της στατιστικής ανάλυσης ιστογραμμάτων εμφανίζεται πολλά υποσχόμενη προς την κατεύθυνση της

συσχέτισης βλαβών και, συνεπώς, “ανωμαλιών” σε θερμοκρασιακά προφίλ με την μεταβολή απλών στατιστικών δεικτών, όπως ο αριθμητικός μέσος, η διακύμανση και η κλίση/ασυμμετρία. Η εργαστηριακή επιβεβαίωση αποτελεσμάτων αυτής της μελέτης, από βιομηχανία κατασκευής Φ/Β πλαισίων, καθώς και εκτενέστερα συμπεράσματα θα παρατεθούν, συνολικά για τις τρεις υπό παρουσίαση διαγνωστικές μελέτες, στην Ενότητα 5 του παρόντος Κεφαλαίου.

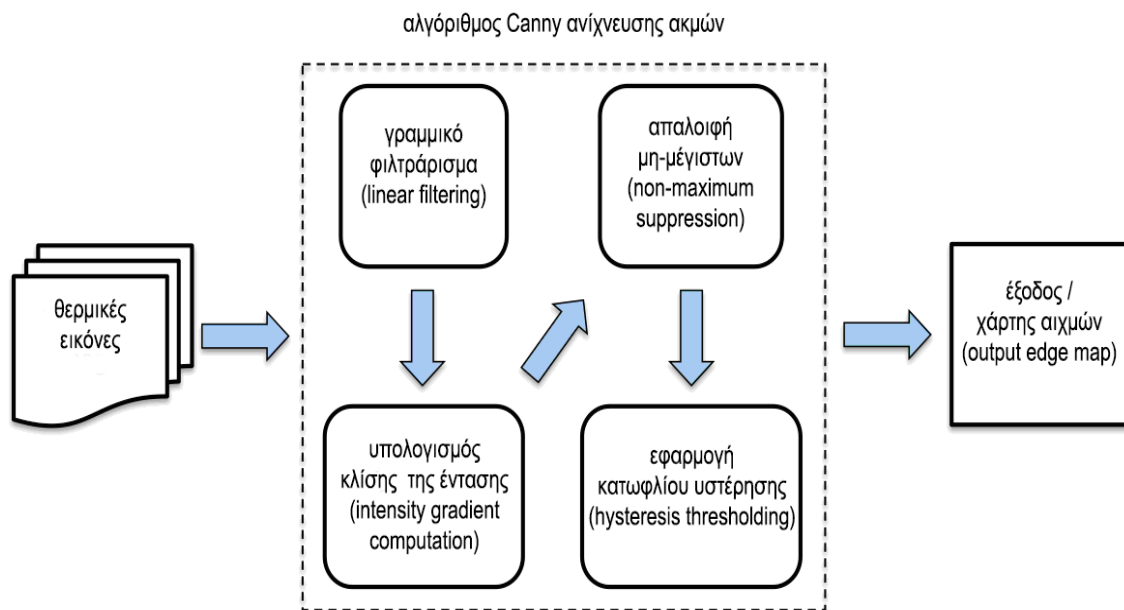
4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ 3

Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης περίπτωσης ήταν η διερεύνηση της διαγνωστικής ικανότητας του αλγόριθμου Canny, στην ανίχνευση βλαβών, υπό μορφή ακμών σε θερμικές εικόνες υπέρυθρων θερμογραφίσεων πεδίου [11]. Οι μετρήσεις πεδίου πραγματοποιήθηκαν (εκ νέου) στην συστοιχία των Φ/Β πλαισίων Siemens SP75, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη μελέτη (Ενότητα 3), καθώς και σε μία νέα συστοιχία Φ/Β πλαισίων πολυκρυσταλλικού πυριτίου, τα οποία φέρουν (γνωστές) βλάβες τεσσάρων διαφορετικών τύπων και, φυσικά εμφανίζουν μειωμένη απόδοση. Προ της κύριας διαγνωστικής τεχνικής της ανίχνευσης ακμών Canny, εφαρμόστηκε προεπεξεργασία των θερμικών εικόνων με τις τεχνικές κατάτμησης και κατωφλίου. Παράλληλα, εφαρμόστηκαν η ανάλυση ROI, η LPA και η στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες δύο μελέτες.

4.1 Ανίχνευση ακμών με τον αλγόριθμο Canny

Η ανίχνευση ακμών με τον αλγόριθμο Canny (Canny edge detection) θεωρείται ένα από τα πιο καθιερωμένα και αξιόπιστα εργαλεία επεξεργασίας εικόνων, με σκοπό τον εντοπισμό και την διάγνωση βλαβών εξοπλισμού ή κατασκευών, σε πολυάριθμα ερευνητικά πεδία, όπως η υπολογιστική όραση, η διαγνωστική ιατρική με την βοήθεια υπολογιστή, η υπέρυθρη θερμογραφία και η ψηφιακή ραδιογραφία [8,9,12-14]. Η βασική αρχή της ανίχνευσης ακμών στηρίζεται στην εξομοίωση της θέσης σημαντικών διακυμάνσεων των γκρι επιπέδων σε μια εικόνα και στην αναγνώριση των φυσικών και γεωμετρικών ιδιοτήτων αντικειμένων σε μια σκηνή. Οι διακυμάνσεις των γκρι επιπέδων συνήθως περιλαμβάνουν ασυνέχειες (βηματικές ακμές), τοπικά ακρότατα (γραμμικές ακμές) και συμβολές (διασταυρώσεις). Ειδικότερα στην θερμική απεικόνιση, τέτοιες διακυμάνσεις ενδέχεται να είναι ενδεικτικές συγκεκριμένων “ανωμαλιών” στο θερμοκρασιακό προφίλ του υπό εξέταση εξοπλισμού, όπως αποδείχθηκε με την ανάλυση ιστογραμμάτων στην 2^η μελέτη περίπτωσης. Οι σύγχρονοι, πολυβάθμιοι αλγόριθμοι-ανιχνευτές ακμών υλοποιούνται σε τρία βασικά στάδια επεξεργασίας: την εξομάλυνση, την διάκριση και την επισήμανση/ταξινόμηση.

Σύμφωνα με την μελέτη του Canny [15] διαμορφώθηκαν τρεις σημαντικές απαιτήσεις για την βέλτιστη ανίχνευση ακμών. Η πρώτη απαίτηση στοχεύει στην μείωση της απόκρισης του αλγορίθμου στον θόρυβο που ενυπάρχει σε μια εικόνα. Κάτι τέτοιο, μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή της βέλτιστης εξομάλυνσης, με την χρήση φίλτρων Gaussian συγκεκριμένων κριτηρίων. Η δεύτερη απαίτηση στοχεύει στην ακρίβεια του αλγορίθμου, δηλαδή στην ανίχνευση των ακμών στην ακριβή τους θέση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται *απαλοιφή μη-μέγιστων* (non-maximum suppression, NMS) και η οποία είναι αντίστοιχη της ανίχνευσης αιχμών. Η NMS λειτουργεί έτσι ώστε να διατηρεί μόνο τα σημεία της “κορυφογραμμής” των δεδομένων της ακμής, ενώ απαλείφει τα υπόλοιπα. Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε “λέπτυνση” των δεδομένων της ακμής, κατά την οποία η έξοδος (output) της NMS συνίσταται σε λεπτές γραμμές σημείων ακμής, στις ακριβείς ζητούμενες θέσεις. Τέλος, η τρίτη απαίτηση αφορά στην απόκριση της θέσης ενός σημείου ακμής στην μεταβολή της φωτεινότητας, καθώς μια έξοδος προγενέστερη της μεταβολής αυτής, ενδέχεται να επισημάνει (λανθασμένα) περισσότερα του ενός σημεία ακμών. Έχοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, στο Σχήμα 5.24 παρουσιάζονται τα κυριότερα βήματα υλοποίησης της ανίχνευσης ακμών σε θερμικές εικόνες με τον αλγόριθμο Canny.



Σχήμα 5.24. Βήματα υλοποίησης ανίχνευσης ακμών θερμικών εικόνων με τον αλγόριθμο Canny.

ο Βήμα 1: Γραμμικό φιλτράρισμα

Αναπόφευκτα, κάθε εικόνα που προσκτάται από μια κάμερα – και, φυσικά, μια θερμική εικόνα – εμπεριέχει μια ποσότητα θορύβου. Το πρώτο βήμα, λοιπόν, πριν την προσπάθεια εντοπισμού ακμών, είναι το φιλτράρισμα και η αφαίρεση κάθε ίχνους θορύβου στην αρχική,

πρωτογενή εικόνα. Ο πυρήνας B (kernel) ενός γραμμικού φιλτραρίσματος, υπό μορφή φίλτρου εξομάλυνσης Gaussian (ενδεικτικής τυπικής απόκλισης $\sigma_g = 1.4$) και η συνάρτηση του τελεστή συνέλιξης Gaussian G_σ , δίνονται από τις Σχέσεις 5.6 και 5.7 αντίστοιχα.

$$B = \frac{1}{159} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$G_\sigma = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_g^2}} \cdot \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_g^2}\right] \quad (5.7)$$

ο Βήμα 2: Υπολογισμός κλίσης της έντασης

Κατόπιν της εξομάλυνσης μιας εικόνας και απαλοιφής του θορύβου, το επόμενο βήμα συνίσταται στον καθορισμό της “ισχύος” (ένταση) της ακμής με τον υπολογισμό της δισδιάστατης (2-D) κλίσης της εικόνας. Ο τελεστής Sobel (Sobel operator) χρησιμοποιείται ακριβώς για την εκτέλεση υπολογισμών 2-D κλίσεων σε μια εικόνα και την, επακόλουθη, εύρεση του προσεγγιστικού απόλυτου μεγέθους κλίσης (ένταση ακμής) κάθε σημείου. Ο τελεστής Sobel χρησιμοποιεί ένα ζεύγος 3×3 μασκών συνέλιξης, για την προσέγγιση της τιμής της κλίσης στην κατεύθυνση $-x$ και $-y$ αντίστοιχα, με την εφαρμογή των ακόλουθων kernel (Σχέση 5.8).

$$Kernel_{gx} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$Kernel_{gy} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$

Το μέγεθος M (ή αλλιώς η ένταση της ακμής) της κλίσης προσεγγίζεται, τότε, από την συνάρτηση της Σχέσης 5.9.

$$M(x, y) = \sqrt{g_x^2(x, y) + g_y^2(x, y)} \quad (5.9)$$

Τυπικά, οι ακμές ήδη εντοπίζονται και υποδεικνύονται με την ολοκλήρωση αυτού του βήματος, ωστόσο είναι, ακόμα, ευρείας έκτασης και, συνεπώς, η θέση τους δεν μπορεί να χαρακτηριστεί με ακρίβεια. Για να γίνει κάτι τέτοιο δυνατό, πρέπει να γίνει υπολογισμός της κατεύθυνσης των ακμών, σύμφωνα με την Σχέση 5.10.

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{g_y(x, y)}{g_x(x, y)} \right] \quad (5.10)$$

ο Βήμα 3: Απαλοιφή μη-μέγιστων

Σκοπός αυτού του βήματος είναι η μετατροπή των “θολών” ακμών, στην εικόνα των μεγεθών της κλίσης, σε οξείες ακμές. Επομένως, διατηρούνται όλα τα τοπικά ακρότατα στην εικόνα της κλίσης, ενώ απαλείφεται οτιδήποτε άλλο. Με άλλα λόγια η NMS χρησιμοποιείται για την ανίχνευση κατά μήκος μιας ακμής, προς την κατεύθυνσή της, και την απαλοιφή οποιασδήποτε τιμής εικονοστοιχείου που δεν λογίζεται ως ακμή. Αυτό επιτυγχάνεται με την σύγκριση της έντασης κάθε εικονοστοιχείου με την ένταση της ακμής του αμέσως επόμενου. Έτσι, όσα εικονοστοιχεία δεν αποτελούν μέρος τοπικών ακρότατων, θέτονται ως 0 (μηδέν).

ο Βήμα 4: Εφαρμογή κατωφλίου υστέρησης

Τα εικονοστοιχεία των ακμών που παραμένουν μετά την εφαρμογή της NMS, εξακολουθούν να χαρακτηρίζονται – το κάθε ένα – από την ένταση τους (pixel-by-pixel strength). Αρκετά από αυτά, πιθανότατα αντιπροσωπεύουν πραγματικές ακμές στην εικόνα, ωστόσο ορισμένα εμφανίζονται λανθασμένα λόγω πιθανού παραμένουστος θορύβου ή χρωματικών διακυμάνσεων, π.χ. σε περιπτώσεις τραχιών επιφανειών. Ο απλούστερος τρόπος διάκρισης των πραγματικών εικονοστοιχείων ακμών, από τα λανθασμένα, είναι η εφαρμογή ενός κατώτατου ή ανώτατου κατωφλίου, έτσι ώστε στο τελικό αποτέλεσμα του αλγορίθμου να διατηρούνται μόνο οι εντονότερες ακμές. Για τον σκοπό αυτό, στον αλγόριθμο Canny χρησιμοποιείται το κατώφλι υστέρησης, όπου τα εικονοστοιχεία ακμών που υπερσχύουν ενός ανώτατου κατωφλίου επισημαίνονται ως “ισχυρά”, ενώ όσα είναι ασθενέστερα από ένα κατώτατο κατώφλι, επισημαίνονται ως “ασθενή”. Στην συνέχεια, τα ισχυρά εικονοστοιχεία ερμηνεύονται ως “βέβαιες ακμές” και συμπεριλαμβάνονται απ’ ευθείας στην τελική εικόνα ακμών. Αντίθετα, τα ασθενή εικονοστοιχεία συμπεριλαμβάνονται σε αυτήν μόνο όταν συνδέονται με γειτονικά ισχυρά εικονοστοιχεία. Με αυτόν τον τρόπο, ενδείξεις θορύβου και μικρών διακυμάνσεων σπάνια ερμηνεύονται ως ισχυρές ακμές. Έτσι, στο τελικό αποτέλεσμα, οι ισχυρές ακμές αντιστοιχούν μόνο σε πραγματικές ακμές της αρχικής εικόνας. Από την άλλη πλευρά, οι ασθενείς ακμές ενδέχεται να οφείλονται είτε i) σε πραγματικές ακμές ή ii) σε απλές διακυμάνσεις

θορύβου/χρώματος. Στο πρώτο ενδεχόμενο, οι ασθενείς ακμές συνήθως συνδέονται με γειτονικές ισχυρές ακμές και, τελικά, συμπεριλαμβάνονται (ορθώς) στην τελική εικόνα ακμών. Αντίθετα, στο δεύτερο ενδεχόμενο οι ακμές κατανέμονται συνήθως τυχαία και μεμονωμένα στην συνολική εικόνα και, κατά συνέπεια, μόνο ένα μικρό μέρος τους συνδέεται με ισχυρές ακμές, ενώ η πλειοψηφία απορρίπτεται.

4.2 Πειραματική υλοποίηση

4.2.1 Υλικό και λογισμικό

Οι υπέρυθρες θερμογραφίες πεδίου περιελάμβαναν τρεις σειρές ραδιομετρήσεων στην Φ/Β συστοιχία PV-1 που μελετήθηκε και στην 2^η περίπτωση μελέτης, καθώς και σε μια νέα συστοιχία εμπορικών Φ/Β πλαισίων πολυκρυσταλλικού πυριτίου η οποία – για τις ανάγκες της μελέτης – ορίστηκε ως PV-3. Τα Φ/Β πλαίσια της PV-3 αγοράστηκαν 3 μήνες πριν την διεξαγωγή των υπέρυθρων θερμογραφιών της συγκεκριμένης μελέτης και εγκαταστάθηκαν σε λειτουργία άνευ φορτίου (ανοιχτοκύκλωμα), στην επίπεδη οροφή του κτιρίου εργαστηρίων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ, πλησίον των PV-1 και PV-2.

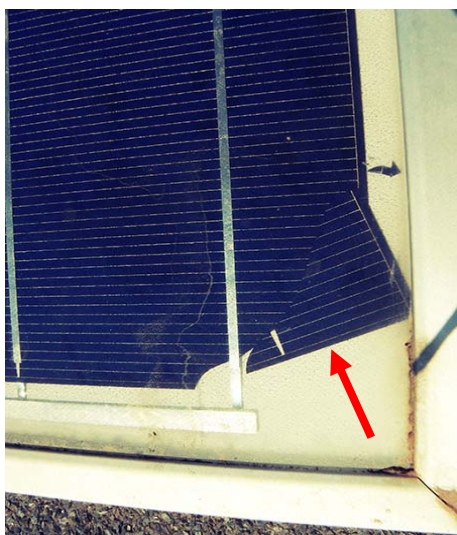


Σχήμα 5.25. Η Φ/Β συστοιχία PV-3.

Υπενθυμίζεται ότι, η συστοιχία PV-1 περιλαμβάνει 4 Φ/Β πλαίσια, της εταιρίας Siemens™, τύπου SP75, οι κατασκευαστικές προδιαγραφές των οποίων δόθηκαν στην Υποενότητα 3.1.1. Από την άλλη πλευρά, η νέα συστοιχία PV-3 περιλαμβάνει συνολικά 4 Φ/Β πλαίσια (Σχήμα 5.25) της εταιρίας ExelSolar™, τύπου ESP Series60-poly (Παράρτημα Α), το

καθένα από τα οποία αποτελείται από 60 ηλιακές κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Σύμφωνα με τις κατασκευαστικές του προδιαγραφές, κάθε Φ/Β πλαίσιο ESP Series60-poly εμφανίζει μέγιστη ισχύ εξόδου $P_{\max} = 240 \text{ W}_P$ (για την οποία $I_{\max} = 8.04 \text{ A}$ και $V_{\max} = 29.84 \text{ V}$), ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{SC} = 8.66 \text{ A}$ και τάση ανοιχτού κύκλωσης $V_{OC} = 37.3 \text{ V}$, μετρημένα σε STC.

Για τις ανάγκες της μελέτης η αγορά των Φ/Β πλαισίων της PV-3 πραγματοποιήθηκε κατόπιν ειδικής παραγγελίας, σύμφωνα με την οποία κάθε Φ/Β πλαίσιο φέρει τουλάχιστον μια γνωστή κατασκευαστική βλάβη, ώστε να μελετηθεί η ενδεχόμενη επίδρασή της στην θερμική συμπεριφορά του εκάστοτε πλαισίου. Οι τύποι γνωστών (τουλάχιστον) βλαβών που φέρουν τα συγκεκριμένα Φ/Β πλαίσια β' διαλογής, είναι: i) ρωγμές σε ηλιακές κυψέλες, ii) θραύση ηλιακής κυψέλης, iii) προβληματικό στρώμα ενθυλάκωσης, με αποτέλεσμα την δημιουργία φυσαλίδας (bubble) υγρασίας ή αέρα και iv) προβληματική ευθυγράμμιση (misalignment) των μεταλλικών συνδέσεων δύο σειρών (string) κυψελών με αποτέλεσμα την ύπαρξη σημείων επαφής. Ενδεικτικά, στα Σχήματα 5.26-α και 5.26-β δίνονται οι φωτογραφίες Φ/Β πλαισίων της PV-3 τα οποία εμφανίζουν θραύση κυψέλης και φυσαλίδα στο στρώμα EVA αντίστοιχα. Βάσει των μετρήσεων της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V (σε STC), που πραγματοποιήθηκαν από την κατασκευάστρια εταιρία, σε ειδικό προσομοιωτή QuickSun™ Solar Simulator, η μείωση της συνολικής απόδοσης των Φ/Β πλαισίων της PV-3, πριν την παράδοσή τους, ανερχόταν στο 9.8%. Υπενθυμίζεται δε ότι για τα Φ/Β πλαίσια της PV-1, και στα πλαίσια της προηγούμενης μελέτης, οι συμβατικές ηλεκτρικές μετρήσεις των παραμέτρων I_{SC} και V_{OC} (υπό προσεγγιστικές συνθήκες STC), είχαν υποδείξει μείωση της απόδοσής τους κατά 9.5%.



α



β

Σχήμα 5.26. Φ/Β πλαίσια της PV-3 με βλάβη: α. θραύσης κυψέλης και β. φυσαλίδας στο στρώμα ενθυλάκωσης (EVA).

Όπως και στην 2^η μελέτη περίπτωσης, η ένταση G_T της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο των πλαισίων μετρήθηκε με το φορητό πυρανόμετρο KIMO™ SL 200 (Σχήμα 5.14), του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά δίνονται στην Υποενότητα 3.3.1. Οι δε υπέρυθρες ραδιομετρήσεις της μελέτης, όπως και στις προηγούμενες μελέτες, πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του φορητού θερμικού αναλυτή Mikron™/Impac™ IVN 780-P (Σχήμα 5.1), του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά παρουσιάστηκαν στην Υποενότητα 2.1.1.

Η επεξεργασία των θερμικών εικόνων περιελάμβανε, κατά κύριο λόγο φυσικά, την υλοποίηση του αλγορίθμου ανίχνευσης ακμών Canny, συμπεριλαμβανομένων της κατάτμησης και της εφαρμογής κατωφλίου, και, δευτερευόντως, την εφαρμογή ανάλυσης ROI, LPA και στατιστικής ανάλυσης ιστογραμμάτων. Για τις ανάγκες αυτές, χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα τα λογισμικά Matlab® R2009a της εταιρίας Mathworks™ και MikroSpec® 4.0 PRO της εταιρίας Mikron™/Impac™. Στις αναλύσεις ROI, LPA και ιστογραμμάτων, κάθε ηλιακή κυψέλη και κάθε σειρά (string) ηλιακών κυψελών των Φ/Β πλαισίων θεωρήθηκαν ως πολυγωνικές και γραμμικές ROI, αντίστοιχα, ενώ για την επίτευξη ταχείας και αξιόπιστης ανάλυσης και επεξεργασίας, η μεταχείριση των θερμικών εικόνων προτιμήθηκε να γίνει στην κλίμακα του γκρι.

4.2.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης

Οι υπέρυθρες θερμογραφίες πεδίου, διενεργήθηκαν στο σημείο εγκατάστασης και λειτουργίας των Φ/Β συστοιχιών (Σχήμα 5.15), στην οροφή του κτιρίου εργαστηρίων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ, στην Ξάνθη (συντεταγμένες εγκατάστασης: 41°142' N, 24°89' E, μέσο υψόμετρο: 40 m), σε πολυάριθμα ημερήσια σετ μετρήσεων, εκ των οποίων τρία ενδεικτικά σετ παρουσιάζονται σε αυτήν την Υποενότητα και αφορούν στις ημέρες 8^η, 9^η και 10^η Αυγούστου 2011. Κάθε σετ μετρήσεων περιελάμβανε τρεις επιμέρους στιγμιαίες μετρήσεις, σε συγκεκριμένες ώρες κάθε ημέρας: 06:00 (μεταβατικές συνθήκες ηλιοφάνειας – ανατολή ηλίου), 13:00 (σταθερές συνθήκες ηλιοφάνειας) και 20:00 (μεταβατικές συνθήκες ηλιοφάνειας – δύση ηλίου).

Στον Πίνακα 5.3, δίνονται οι περιβαλλοντικές παράμετροι που, όπως και στις προηγούμενες μελέτες, χρησιμοποιήθηκαν τόσο στην αρχική ρύθμιση της θερμοκάμερας για την αντιστάθμιση της ατμόσφαιρας, όσο και στον υπολογισμό της αναμενόμενης θερμικής απόκρισης της επιφάνειας των ηλιακών κυψελών.

Σημειώνεται ότι οι υπέρυθρες θερμογραφίες πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας (απουσία νέφωσης), υπό φορτίο για την συστοιχία PV-1 και υπό βραχυκύκλωση για την PV-3, με μέριμνα πάντα για την αποφυγή ανεπιθύμητων αντανάκλασεων στην μετρούμενη επιφάνεια του πλαισίου. Ο προσανατολισμός των Φ/Β συστοιχιών ήταν νότιος, ενώ η (σταθερή) κλίση τους, ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ήταν για την PV-1 ίση με $\theta_1 = \theta_{opt, annual} \approx 32^\circ$, και για την PV-3 ίση με $\theta_2 = \theta_{opt} \approx 20^\circ$. Τονίζεται ωστόσο, όπως εξάλλου

έχει ήδη εξηγηθεί στις προηγούμενες μελέτες, ότι, η προεπιλεγμένη γωνία κλίσης θ δεν επηρεάζει το ποιοτικό αποτέλεσμα της συνολικής πειραματικής διαδικασίας διάγνωσης βλαβών. Τέλος, η απόσταση μεταξύ κάθε μετρούμενου πλαισίου και του οπτικού συστήματος της θερμοκάμερας ορίστηκε προσεγγιστικά σταθερή, σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, ίση με $d \approx 1.5$ m (για τις μετρήσεις της PV-3) και $d \approx 2$ m (για τις μετρήσεις της PV-1).

Πίνακας 5.3. Περιβαλλοντικές συνθήκες των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων της μελέτης.

Ημερομηνία	8 ^η Αυγούστου			9 ^η Αυγούστου			10 ^η Αυγούστου		
Ώρα μέτρησης	06:00	13:00	20:00	06:00	13:00	20:00	06:00	13:00	20:00
Θερμοκρασία αέρα (°C)	18	30	25.5	18.5	32	27	18.5	33	27.5
Σχετική υγρασία (%)	65	30	40	60	35	35	60	25	40
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	0.8	4.5	2.2	2.7	2.5	1.5	0.6	1.9	2.1
G_T (W/m ²)	<15	845	37	<15	930	59	<15	1001	60

4.2.3 Αντιστάθμιση παραμέτρων μέτρησης

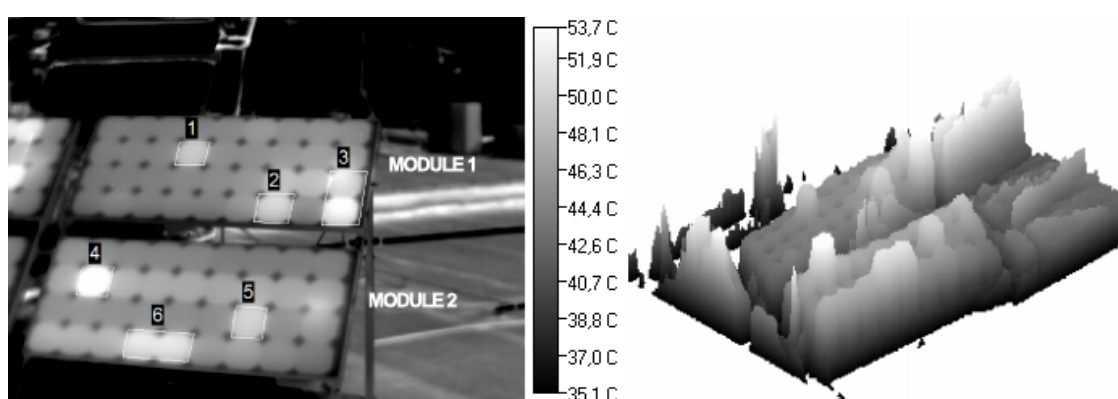
Όπως στην 2^η μελέτη περίπτωσης, για την επίτευξη καλύτερης ακρίβειας, στα πλαίσια της σειράς μετρήσεων και αυτής της μελέτης, πραγματοποιήθηκε η αντιστάθμιση των παραμέτρων της ατμόσφαιρας, του φόντου και των οπτικών ιδιοτήτων των πλαισίων-στόχων. Η συνολική διαδικασία που ακολουθήθηκε για αυτόν τον σκοπό, επαναλαμβάνει επακριβώς τα ίδια επιμέρους βήματα που περιγράφονται λεπτομερώς στην Υποενότητα 3.1.3. Οι τελικές τιμές των παραμέτρων αντιστάθμισης και ρύθμισης της θερμοκάμερας πριν από κάθε ραδιομέτρηση, έτσι όπως προέκυψαν για την περίπτωση της συγκεκριμένης μελέτης είναι: ACV=0.98, RTC value $C = 44$ °C, emissivity factor $\varepsilon = 0.85$.

4.3 Αποτελέσματα και συζήτηση

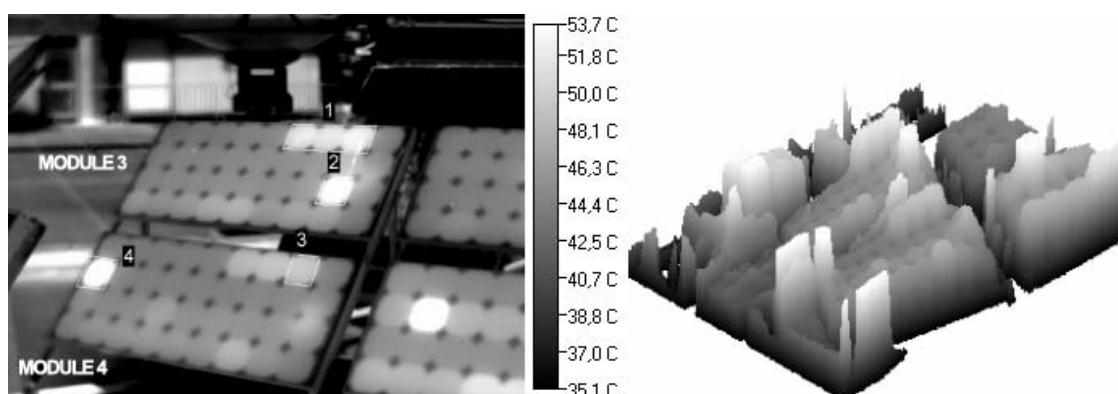
4.3.1 Ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος και γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας

Τα Σχήματα 5.27 και 5.28 παρουσιάζουν τις θερμικές εικόνες, και το αντίστοιχο τρισδιάστατο (3-D) θερμικό προφίλ, της Φ/Β συστοιχίας PV-1 την 8^η Αυγούστου, στις 13:00, υπό συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας. Μία ενδεικτική ανάλυση των κυψελών-ROI 3 του Φ/Β πλαισίου 1 (Σχήμα 5.27), έδωσε μέσες τιμές μετρούμενης θερμοκρασίας κυψελών $T_{c3,m} = 53.2$ °C, την ίδια στιγμή που μια γειτονική, φαινομενικά “υγιής” κυψέλη μετράται σε θερμοκρασία $T_{c,m} = 44.5$ °C. Από την εφαρμογή της Σχέσης 5.1, για τις περιβαλλοντικές παραμέτρους της συγκεκριμένης χρονικής στιγμής μέτρησης (Πίνακας 5.2), προκύπτει ότι η θεωρητική τιμή θερμοκρασίας

κυψέλης είναι $T_c = 45.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Κατά συνέπεια, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η “υγιής” κυψέλη εμφανίζει, πράγματι, φυσιολογική θερμοκρασία λειτουργίας, πολύ κοντά (απόκλιση 1.3%) στην θεωρητική, σε αντίθεση με τις κυψέλες της ROI 3, οι οποίες λειτουργούν ως θερμές κηλίδες, σε θερμοκρασία σημαντικά υψηλότερη της αναμενόμενης, κατά $\Delta T = 8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Σύμφωνα και με τα αποτελέσματα της 2^{ης} μελέτης περίπτωσης, στην PV-1 εντοπίζονται συνολικά 10 ROI, με 14 περιπτώσεις θερμών κηλίδων (όπου $\Delta T \geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), σε σύνολο 144 ηλιακών κυψελών. Οι περιπτώσεις αυτές σχετίζονται, φυσικά, με περιοχές “ανωμαλιών” στην θερμοκρασιακή κατανομή των Φ/Β πλαισίων, οι οποίες και επισημαίνονται στα Σχήματα 5.27 και 5.28 με αρίθμηση.



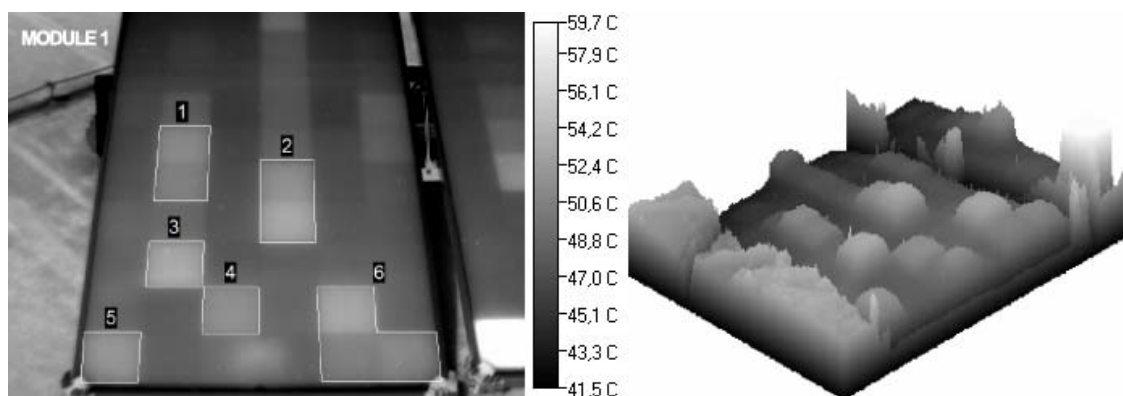
Σχήμα 5.27. Θερμική εικόνα της Φ/Β συστοιχίας PV-1 (πλαίσια 1-2) για την υπέρυθρη θερμογράφηση της 8^{ης} Αυγούστου, στις 13:00.



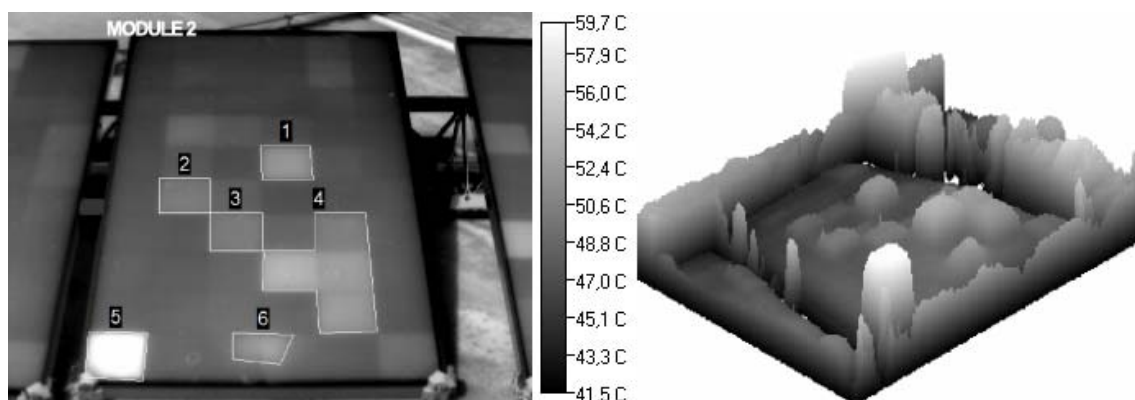
Σχήμα 5.28. Θερμική εικόνα της Φ/Β συστοιχίας PV-1 (πλαίσια 3-4) για την υπέρυθρη θερμογράφηση της 8^{ης} Αυγούστου, στις 13:00.

Αντίστοιχη ανάλυση ROI εφαρμόστηκε και για τα θερμοκρασιακά δεδομένα της PV-3. Για λόγους οικονομίας χώρου, και καθώς οι θερμικές εικόνες κάθε πλαισίου της PV-3 δίνουν παρεμφερή αποτελέσματα και παρατηρήσεις, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι θερμικές εικόνες (με τα 3-D θερμικά προφίλ) των Φ/Β πλαισίων 1 και 2 αυτής της συστοιχίας, για την μέτρηση της 8^{ης}

Αυγούστου στις 13:00 (Σχήματα 5.29 και 5.30 αντίστοιχα). Διευκρινίζεται δε ότι ως Φ/Β πλαίσιο 1 ορίστηκε το πλαίσιο που αποκτήθηκε με εκούσιες ρωγμές κυψελών, ενώ το Φ/Β πλαίσιο 2 (Σχήμα 5.30), φέρει την “προβληματική” ενθυλάκωση EVA, με την εμφάνιση φυσαλίδας αέρα/υγρασίας, στο κάτω αριστερό άκρο του, όπως αυτή παρουσιάστηκε και στο Σχήμα 5.26-β.



Σχήμα 5.29. Θερμική εικόνα της Φ/Β συστοιχίας PV-3 (πλαίσιο 1) για την υπέρυθρη θερμογράφηση της 8^{ης} Αυγούστου, στις 13:00.



Σχήμα 5.30. Θερμική εικόνα της Φ/Β συστοιχίας PV-3 (πλαίσιο 2) για την υπέρυθρη θερμογράφηση της 8^{ης} Αυγούστου, στις 13:00.

Ενδεικτικά, στην θερμική εικόνα του Σχήματος 5.30, η ανάλυση της ROI 5 που αντιστοιχεί στην φυσαλίδα του EVA, και της φαινομενικά “υγιούς” κυψέλης ακριβώς δίπλα σε αυτήν, έδωσε μέσες τιμές μετρούμενης θερμοκρασίας λειτουργίας $T_{c5,m} = 61.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και $T_{c,m} = 47.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Όπως εξάλλου εξηγήθηκε και στην αντίστοιχη ανάλυση της 2^{ης} μελέτης περίπτωσης, η μεταβολή των περιβαλλοντικών παραμέτρων (για την ίδια ημερομηνία και ώρα) θεωρείται αμελητέα. Έτσι, και για την περίπτωση της μέτρησης της PV-3, η θεωρητική τιμή θερμοκρασίας κυψέλης λαμβάνεται ίση με την αντίστοιχη στην PV-1, ήτοι $T_c = 45.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Προκύπτει λοιπόν, για την θερμική εικόνα του Σχήματος 5.30, ότι ενώ η φαινομενικά “υγιής”

κυψέλη λειτουργεί σε φυσιολογική θερμοκρασία, κοντά στην θεωρητική, η κυψέλη με την υπάρχουσα βλάβη φυσαλίδας λειτουργεί ως αρκετά “ισχυρή” θερμή κηλίδα, εμφανίζοντας θερμοκρασία σημαντικά υψηλότερη της αναμενόμενης, κατά $\Delta T = 16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ομοίως και για την PV-3, βάσει της συνολικής ανάλυσης ROI, διαγνώστηκαν τουλάχιστον 29 περιπτώσεις θερμών κηλίδων (σε σύνολο 240 ηλιακών κυψελών).

Αυτές οι θερμές κηλίδες δεν προκύπτουν αποκλειστικά και μόνο από τις δεδομένες βλάβες που έχουν αναφερθεί, αλλά πιθανότατα είναι αποτελέσματα της γενικής “προβληματικής” λειτουργίας των συγκεκριμένων πλαισίων, λόγω των βλαβών. Παρατηρήθηκε δε ότι οι περιπτώσεις των βλαβών φυσαλίδας και θραύσης σχετίζονται με τις εντονότερες ενδείξεις θερμών κηλίδων, με $\Delta T > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αντίθεση με τις γνωστές βλάβες στα Φ/Β πλαίσια της PV-3, οι εμφανιζόμενες θερμές κηλίδες στην PV-1 δεν καθίσταται δυνατόν να ταυτοποιηθούν ως προς την προέλευση-αιτία εμφάνισης τους, καθώς δεν υπάρχουν οπτικές ενδείξεις, με γυμνό μάτι, και δεν είναι γνωστό το ιστορικό εγκατάστασης και λειτουργίας τους τα τελευταία 10 χρόνια.

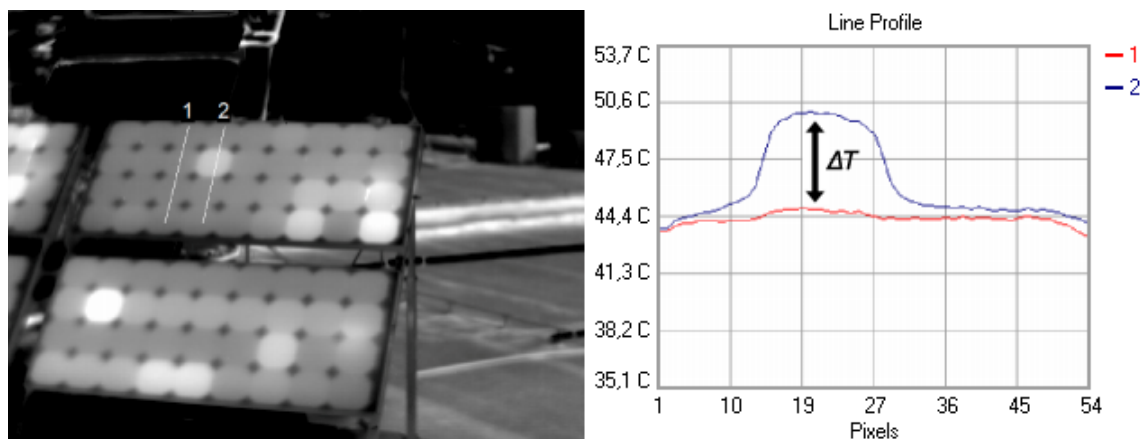
Οι υπόλοιπες υπέρυθρες ραδιομετρήσεις των επόμενων ημερών (9^η και 10^η Αυγούστου) παρείχαν θερμικές εικόνες παρόμοιων θερμοκρασιακών προφίλ, επιβεβαιώνοντας τις προαναφερθείσες παρατηρήσεις για την ύπαρξη συγκεκριμένων θερμών κηλίδων στις συστοιχίες PV-1 και PV-3. Θα πρέπει, τέλος, και για αυτήν την μελέτη να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις σε σταθερή κατάσταση ηλιοφάνειας (στις 13:00) και απουσία νεφώσεων, παρείχαν περισσότερο αξιόπιστη και ακριβή διάγνωση σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των μεταβατικών συνθηκών (ανατολή και δύση ηλίου).

Ιδιαίτερα χρήσιμο και “εύχρηστο” εργαλείο ανάλυσης της θέσης και της γραμμικής θερμικής απόκρισης των θερμών κηλίδων σε κάθε Φ/Β πλαίσιο, αποδεικνύεται η ανάλυση των γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας. Ξεκινώντας από τα Φ/Β πλαίσια της PV-1 (ενδεικτικά για το πλαίσιο 1), στο Σχήμα 5.31 παρουσιάζονται, αριστερά, οι γραμμικές ROI 1 και 2, και, δεξιά, τα παραχθέντα γραφήματα της LPA. Όπως φαίνεται, η ROI 1 εκτείνεται γραμμικά κατά μήκος μιας “υγιούς” κάθετης σειράς 4 κυψελών, ενώ η ROI 2 εκτείνεται γραμμικά, κατά μήκος μιας αντίστοιχης “προβληματικής” σειράς, η οποία συμπεριλαμβάνει μία θερμή κηλίδα. Όπως είναι αναμενόμενο, στα σημεία που αντιστοιχούν σε “υγιείς” κυψέλες και, συνεπώς, σε ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή, οι δύο καμπύλες της LPA συμπίπτουν σχεδόν τέλεια κοντά στο θερμοκρασιακό επίπεδο των $44\text{ }^{\circ}\text{C}$, σε αντίθεση με το διάστημα όπου εντοπίζεται η θερμή κηλίδα της ROI 2. Συγκεκριμένα, στο διάστημα μεταξύ των εικονοστοιχείων 13 και 30, στο οποίο διαγιγνώσκεται η θερμή κηλίδα, η καμπύλη της “προβληματικής” ROI 2, παρουσιάζει μη-ομαλή απόκριση, εμφανιζόμενη πλέον στο επίπεδο των $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ περίπου, με συνέπεια οι δύο καμπύλες να παρουσιάζουν μια θερμοκρασιακή απόκλιση κατά $\Delta T \approx 6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

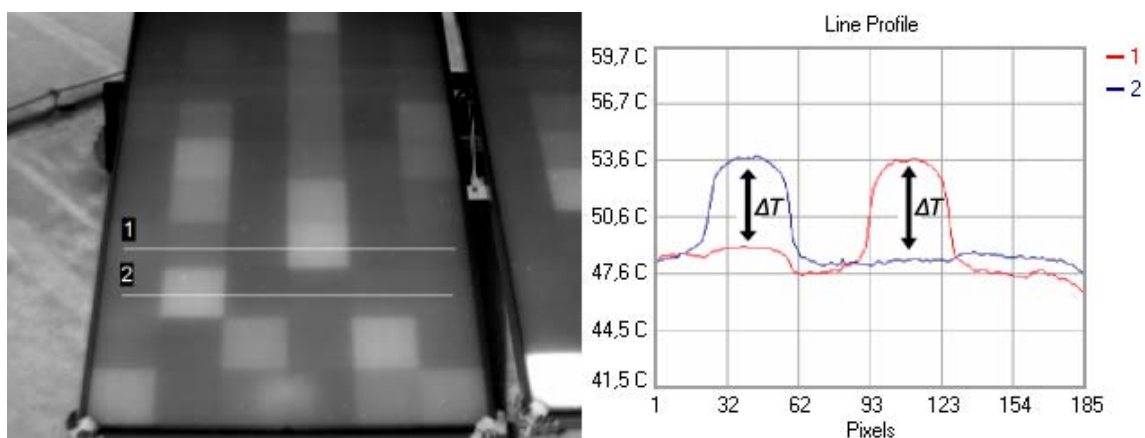
Όσον αφορά στην εφαρμογή της LPA στην συστοιχία PV-3 (ενδεικτικά για το πλαίσιο 1), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.32, επιλέχθηκε σε αυτήν την περίπτωση να γίνει σύγκριση των

θερμοκρασιακών προφίλ δύο γραμμικών ROI αντίστοιχων “προβληματικών” σειρών 6 κυψελών, οι οποίες όμως φέρουν θερμές κηλίδες σε διαφορετικές θέσεις. Έτσι λοιπόν, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, παρατηρείται μερική σύμπτωση των δύο καμπυλών, στις περιοχές “υγιών” κυψελών θερμοκρασιακού επιπέδου $\sim 48^\circ\text{C}$, αλλά και σημαντικές αποκλίσεις λόγω των θερμών κηλίδων, σε διαφορετικά διαστήματα εικονοστοιχείων. Για την ακρίβεια, η θερμή κηλίδα της ROI 1 αντιστοιχίζεται σε ένα $\Delta T = 5.6^\circ\text{C}$, μεταξύ των εικονοστοιχείων 89 και 127, ενώ η θερμή κηλίδα της ROI 2 εμφανίζεται ως ένα $\Delta T = 5.2^\circ\text{C}$ μεταξύ των εικονοστοιχείων 22 και 60.

Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι, η ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων της PV-3, σε σύγκριση με την αντίστοιχη για τα Φ/Β πλαίσια της PV-1, δικαιολογείται από το γεγονός ότι η PV-1 θερμογραφείται υπό συνθήκες κανονικού φορτίου, ενώ η PV-3 υπό συνθήκες βραχυκυκλώματος και, συνεπώς, εντονότερης θερμικής διέγερσης.



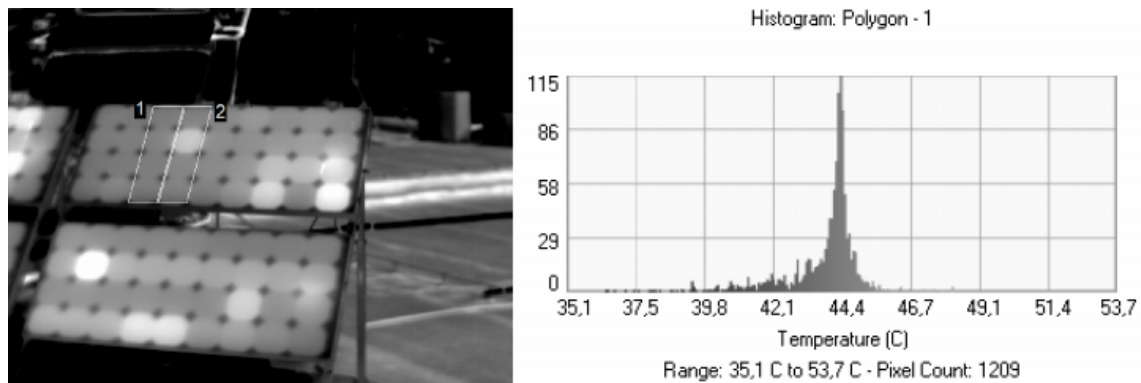
Σχήμα 5.31. Ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας στο Φ/Β πλαίσιο 1, της PV-1, για την θερμική εικόνα της 8ης Αυγούστου, στις 13:00.



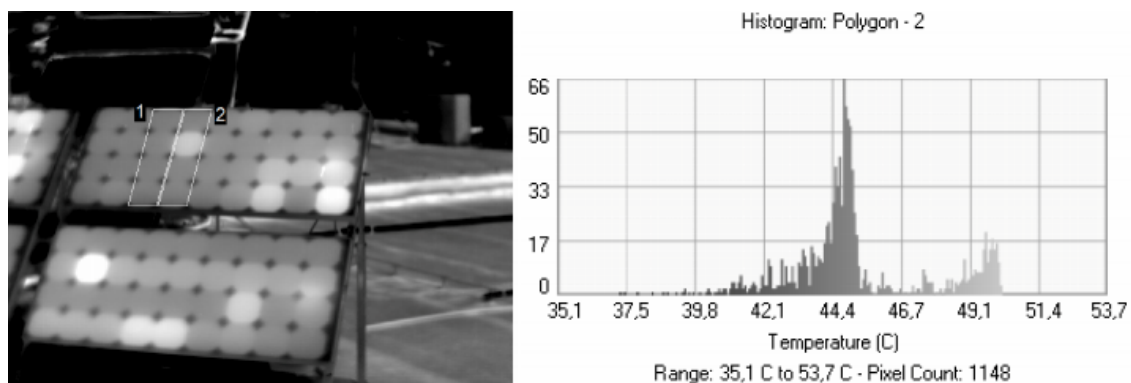
Σχήμα 5.32. Ανάλυση γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας στο Φ/Β πλαίσιο 1, της PV-3, για την θερμική εικόνα της 8ης Αυγούστου, στις 13:00.

4.3.2 Στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων

Όπως διαφάνηκε στην 2^η μελέτη περίπτωσης, η στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων αποτελεί χρήσιμη τεχνική συσχέτισης βλαβών και, συνεπώς, “ανωμαλιών” σε θερμοκρασιακά προφίλ με την μεταβολή απλών στατιστικών δεικτών.



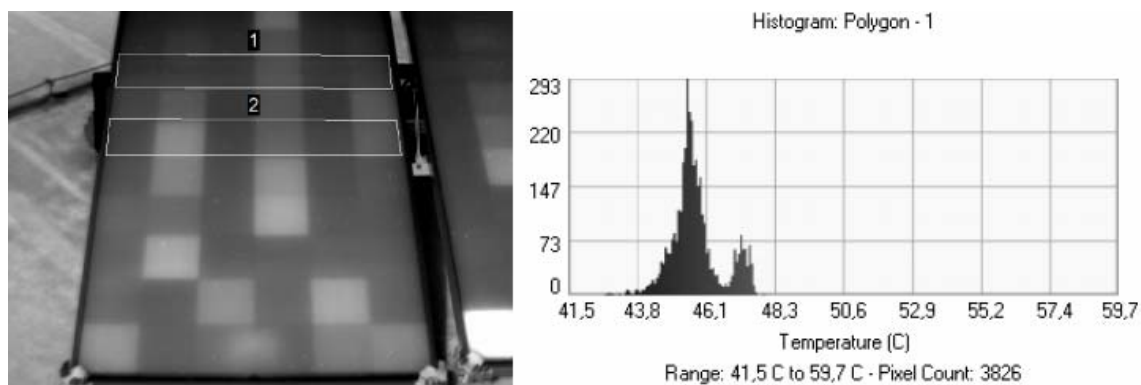
Σχήμα 5.33. Κατανομή ιστογράμματος της ROI 1 του Φ/Β πλαισίου 1, για την θερμική εικόνα της PV-1, την 8^η Αυγούστου, στις 13:00.



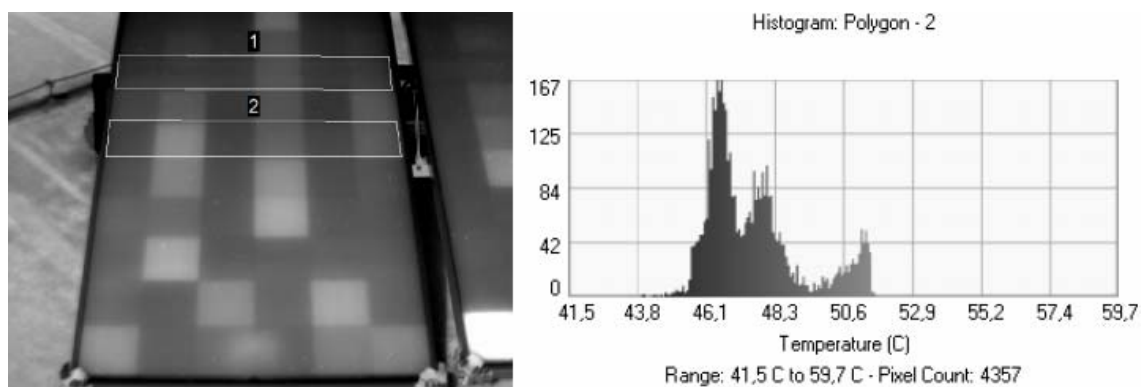
Σχήμα 5.34. Κατανομή ιστογράμματος της ROI 2 του Φ/Β πλαισίου 1, για την θερμική εικόνα της PV-1, την 8^η Αυγούστου, στις 13:00.

Στα Σχήματα 5.33 και 5.34 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα των πολυγώνων ROI 1 και 2 αντίστοιχα, για την θερμική εικόνα της PV-1 (πλαίσια 1 και 2) την 8^η Αυγούστου, στις 13:00. Παρατηρείται ότι και στα δύο ιστογράμματα εμφανίζεται μια υψηλή κατανομή εικονοστοιχείων (άξονας Y) στο θερμοκρασιακό εύρος τιμών (άξονας X) μεταξύ 42,5 και 45,5 °C, το οποίο πρακτικά αντιστοιχεί στην αναμενόμενη (φυσιολογική) θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών, για τις συνθήκες μέτρησης. Ωστόσο, η κατανομή του ιστογράμματος της ROI 2 χαρακτηρίζεται και από μία δεύτερη, μικρότερη αλλά σημαντική, κατανομή θερμοκρασιακής πληροφορίας, στο εύρος τιμών μεταξύ 47,5 και 50,5 °C. Για τον λόγο αυτό, η κατανομή του ιστογράμματος ROI 2

προσεγγίζει την μορφή μιας *δικόρυφης κατανομής* (bi-modal distribution), με υψηλότερη τιμή αριθμητικού μέσου, διακύμανσης (ή τυπικής απόκλισης) και κλίσης, σε σύγκριση με την κατανομή του ROI 1 που μπορεί να θεωρηθεί *μονοκόρυφη* (single-modal distribution). Πράγματι, εφαρμόζοντας τις Σχέσεις 5.4 και 5.5, για τα θερμοκρασιακά δεδομένα των συνολικών εικονοστοιχείων κάθε ROI, προκύπτει ότι για την ROI 1 είναι $\sigma_{g1}^2 = 1.11$ °C και $S_1 = -0.81$ °C, ενώ για την ROI 2 είναι $\sigma_{g2}^2 = 5.21$ °C και $S_2 = 0.68$ °C. Επίσης, λόγω της παρουσίας της θερμής κηλίδας στο πολύγωνο 2, η φωτεινότητα της αντίστοιχης ROI 2 είναι μεγαλύτερη της ROI 1, παρατήρηση που επιβεβαιώνεται από την μεγαλύτερη τιμή αριθμητικού μέσου της πρώτης. Πράγματι, εφαρμόζοντας την Σχέση 5.3 για τα συνολικά θερμοκρασιακά δεδομένα κάθε ROI, προκύπτει ότι $\bar{g}_1 = 43.9$ °C και $\bar{g}_2 = 45.4$ °C για τις ROI 1 και 2 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.35. Κατανομή ιστογράμματος της ROI 1 του Φ/Β πλαισίου 1, για την θερμική εικόνα της PV-3, την 8^η Αυγούστου, στις 13:00.



Σχήμα 5.36. Κατανομή ιστογράμματος της ROI 2 του Φ/Β πλαισίου 1, για την θερμική εικόνα της PV-3, την 8^η Αυγούστου, στις 13:00.

Από την άλλη πλευρά, στα Σχήματα 5.35 και 5.36 παρουσιάζονται τα ιστογράμματα των ROI 1 και 2 αντίστοιχα, για την θερμική εικόνα της PV-3 (πλαίσιο 1) την 8^η Αυγούστου, στις

13:00. Αντίστοιχα με την PV-1, οι δύο σειρές κυψελών, ορίζονται ως πολυγωνικές ROI 1 (μόνο “υγιών κυψελών”) και ROI 2 (συμπεριλαμβανομένης μιας “ήπιας” θερμής κηλίδας). Όπως και στην περίπτωση της PV-1, στα δύο ιστογράμματα παρατηρείται μια κοινή υψηλή κατανομή εικονοστοιχείων στο θερμοκρασιακό εύρος τιμών μεταξύ 44.5 και 46.5 °C, κοντά στην φυσιολογική θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών και μια, επίσης κοινή, μικρότερη κατανομή μεταξύ των τιμών 44.5 και 46.5 °C. Η δεύτερη αυτή κατανομή αντιστοιχεί σε ορισμένες περιοχές κυψελών που εμφανίζουν ελαφρώς υψηλότερη (πλην όμως φυσιολογική) θερμοκρασία, πιθανότατα λόγω γειτονικών θερμών κηλίδων. Ωστόσο, η κατανομή του ιστογράμματος της ROI 2 χαρακτηρίζεται και από μια τρίτη κατανομή θερμοκρασίας, στο εύρος τιμών μεταξύ 50.2 και 51.7 °C, ενδεικτικής της “ήπιας” θερμής κηλίδας αυτής της σειράς κυψελών. Εφαρμόζοντας τις Σχέσεις 5.3, 5.4 και 5.5, για τα θερμοκρασιακά δεδομένα των ιστογραμμάτων των Σχημάτων 5.35 και 5.36, προκύπτει ότι για την ROI 1 είναι $\bar{g}_1 = 45.8$ °C, $\sigma_{g1}^2 = 0.7$ °C και $S_1 = 0.29$ °C, ενώ για την ROI 2 είναι $\bar{g}_2 = 46.8$ °C, $\sigma_{g2}^2 = 2.59$ °C και $S_2 = 0.83$ °C.

Γίνεται κάτι παραπάνω από αντιληπτό, και από την εφαρμογή αυτής της μελέτης, ότι η ύπαρξη θερμών κηλίδων “συνδέεται” συχνά με την αύξηση των τιμών συγκεκριμένων στατιστικών παραμέτρων, γεγονός που αναδεικνύει σε μεγάλο βαθμό την πρακτικότητα αλλά και την ουσιαστική διαγνωστική χρησιμότητα αυτής της τεχνικής ανάλυσης θερμικών εικόνων.

4.3.3 Διάγνωση και χαρτογράφηση ακμών με τον αλγόριθμο Canny

Βάσει των έως τώρα αποτελεσμάτων και παρατηρήσεων, ακόμα και η βασική επεξεργασία θερμικών εικόνων, με την εφαρμογή ανάλυσης ROI, LPA ή στατιστικής ανάλυσης ιστογραμμάτων, μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το θερμικό αποτύπωμα και την ακριβή θέση βλαβών, όπως οι θερμές κηλίδες, σε ελαττωματικά Φ/Β πλαίσια. Σε αυτήν την Υποενότητα, αποτιμάται η δυναμική μιας προσέγγισης διάγνωσης βλαβών, σε πρωτογενείς θερμικές εικόνες, με την αξιοποίηση του αλγορίθμου ανίχνευσης ακμών Canny. Όπως εξηγήθηκε στην Υποενότητα 4.1, η ανίχνευση ακμών χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης σημαντικών διακυμάνσεων των γκρι επιπέδων σε μια εικόνα και την αναγνώριση των φυσικών και γεωμετρικών ιδιοτήτων αντικειμένων σε μια σκηνή. Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, οι υπάρχουσες θερμές κηλίδες των Φ/Β πλαισίων επιφέρουν ασυνήθιστες τοπικές αυξήσεις στην θερμοκρασία λειτουργίας των ηλιακών κυψελών, με επακόλουθη εμφάνιση διακυμάνσεων και ασυνεχειών των επιπέδων του γκρι στις αντίστοιχες θερμικές εικόνες. Κατά συνέπεια, μια προσέγγιση ανίχνευσης ακμών με βάση τον αλγόριθμο Canny, προβάλλει ως πιθανώς αποτελεσματικό εργαλείο διάγνωσης βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, υπό μορφή ακμών θερμών κηλίδων. Η πρωτότυπη μορφή [11] των βημάτων-εντολών που εφαρμόστηκαν, με την βοήθεια

του λογισμικού Mathworks™ Matlab® R2009a, για την ανάπτυξη του αλγορίθμου ανίχνευσης ακμών σε αυτήν την μελέτη, δίνεται στο Σχήμα 5.37.

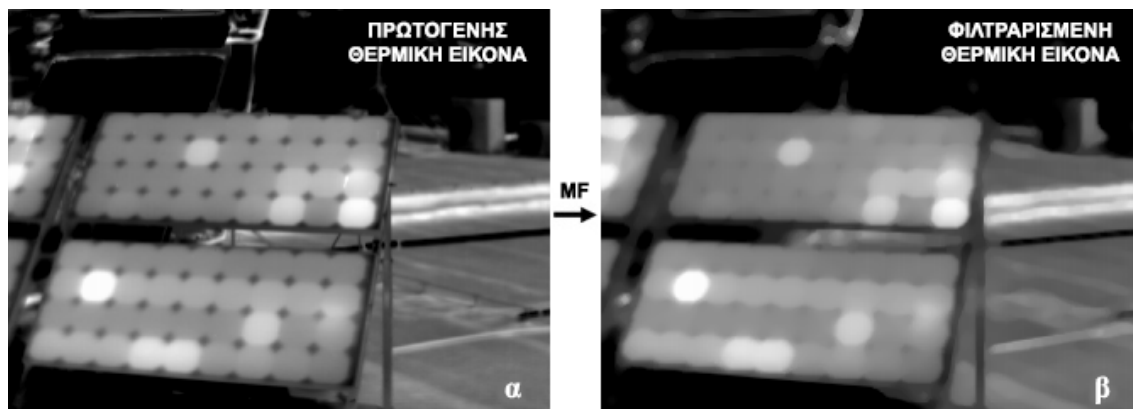
STEP	COMMAND
1	Read the thermal image I ;
2	Smoothing I using convolution by a 1D Gaussian mask;
3	Create a 1D mask for the first derivative of the Gaussian in the x and y directions;
4	Convolve I with G along the rows to obtain I_x , and down the columns to obtain I_y ;
5	Convolve I_x with G_x to have g_x , and I_y with G_y to have g_y ;
6	Find the magnitude M and the angle θ of the result at each pixel (x, y) ;
7	Preserve all local maxima in the gradient image and mark them as edges;
8	Apply hysteresis thresholding; Edge pixels stronger than the high threshold are marked as strong, edge pixels weaker than the low threshold are suppressed and edge pixels between the two thresholds are marked as weak;
9	Final edges are determined by suppressing all edges that are not connected to a very strong edge;

Σχήμα 5.37. Βήματα-εντολές του αλγορίθμου ανίχνευσης ακμών Canny της μελέτης.

Η προτεινόμενη προσέγγιση αυτής της μελέτης υλοποιήθηκε συμπεριλαμβάνοντας ένα επιπλέον στάδιο προ-επεξεργασίας των θερμικών εικόνων. Πριν λοιπόν από την ανάγνωση της, κάθε θερμική εικόνα I υποβλήθηκε σε διαδικασία περικοπής (cropping) και κατωφλιοποίησης (thresholding), για την αφαίρεση ανεπιθύμητων διακυμάνσεων και περιοχών άνευ ενδιαφέροντος, όπως παρακείμενα αντικείμενα φόντου, στο σημείο εγκατάστασης κάθε Φ/Β συστοιχίας. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις Φ/Β πλαισίων, στα οποία η χωροθέτηση των – κυκλικών συνήθως – ηλιακών κυψελών δημιουργεί κενές περιοχές, παρατηρούνται ορισμένες ανεπιθύμητες διακυμάνσεις εντός των περιοχών ενδιαφέροντος στον πίνακα κυψελών, οι οποίες φυσικά ενδέχεται να επιφέρουν λανθασμένη ανίχνευση ακμών. Στην παρούσα μελέτη, τέτοιες διακυμάνσεις εμφανίζονται με την μορφή σκοτεινών κηλίδων, μεταξύ των μονοκρυσταλλικών κυκλικών κυψελών, στα Φ/Β πλαίσια της PV-1. Προφανώς, αυτές οι ανεπιθύμητες περιοχές είναι αδύνατο να υποβληθούν σε περικοπή. Μια πιθανή λύση σε αυτό το πρόβλημα, μπορεί να δοθεί κατά την προεπεξεργασία της θερμικής εικόνας, με την εφαρμογή ενός φίλτρου Gaussian ή Median.

Το Σχήμα 5.38-α παρουσιάζει μια πρωτογενή θερμική εικόνα της PV-1, με τις ανεπιθύμητες σκοτεινές κηλίδες στο εσωτερικό του πίνακα ηλιακών κυψελών των Φ/Β πλαισίων 1 και 2. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής ενός 5×5 φίλτρου Median (Median filtering, MF) σε αυτήν την εικόνα, φαίνεται στο Σχήμα 5.38-β, όπου οι έντονες διακυμάνσεις των επιπέδων του γκρι,

λόγω των σκοτεινών κηλίδων, έχουν εξομαλυνθεί και, σχεδόν, απαλειφθεί. Βέβαια, κατόπιν πολυάριθμων δοκιμών του αλγορίθμου, παρατηρήθηκε ότι τόσο η εφαρμογή του κατωφλίου υστέρησης, όσο και η προεπεξεργασία της εικόνας με απλή κατωφλιοποίηση, εμφανίζουν την ικανότητα είτε απαλοιφής της πλειοψηφίας τέτοιων ανεπιθύμητων διακυμάνσεων, είτε περιορισμού του περιγράμματός τους (<10 εικονοστοιχεία), το οποίο στη συνέχεια απαλοφείται. Κατά συνέπεια, στα πλαίσια αυτής της μελέτης εφαρμογής ανίχνευσης ακμών, η προσθήκη ενός σταδίου προεπεξεργασίας των θερμικών εικόνων με MF δεν θεωρήθηκε απαραίτητη.

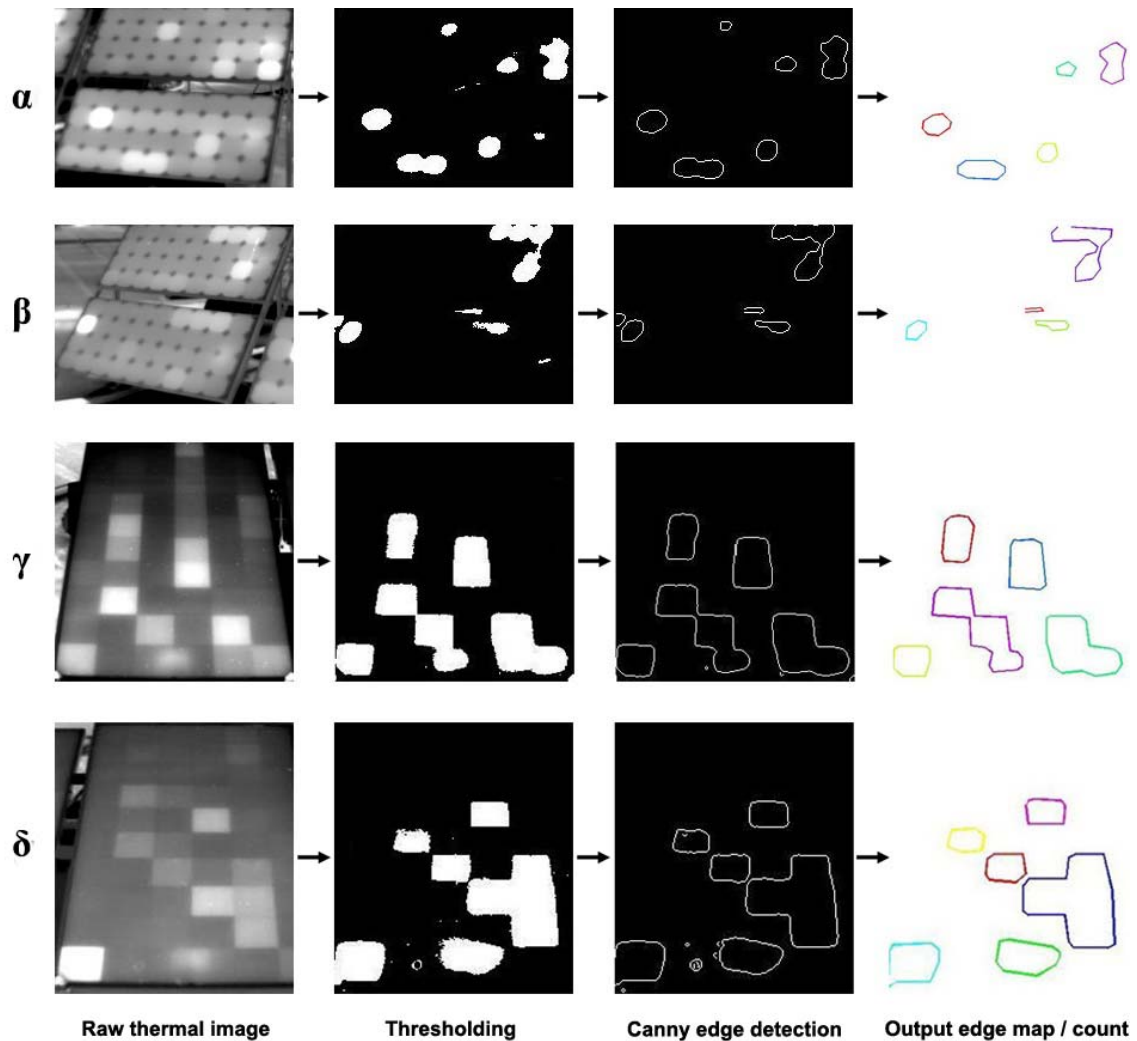


Σχήμα 5.38. Αποτέλεσμα (α) της εφαρμογής φίλτρου Median σε πρωτογενή θερμική εικόνα (β) με ανεπιθύμητες σκοτεινές κηλίδες σε περιοχές ενδιαφέροντος.

Το Σχήμα 5.39 παρουσιάζει τις προκύπτουσες εικόνες για κάθε ένα από τα τέσσερα βήματα υλοποίησης της παρούσας διαγνωστικής προσέγγισης, η οποία εφαρμόστηκε στις θερμικές εικόνες της 8ης Αυγούστου, στις 13:00, όλων των Φ/Β πλαισίων της συστοιχίας PV-1 και των πλαισίων 1 και 2 της συστοιχίας PV-3.

Στην πρώτη στήλη του Σχήματος 5.39 απεικονίζονται οι πρωτογενείς θερμικές εικόνες κάθε ραδιομέτρησης. Στο στάδιο αυτό, οι θερμικές εικόνες υποβλήθηκαν σε διαδικασία περικοπής, έτσι ώστε να διαχωριστούν οι περιοχές ενδιαφέροντος σε κάθε Φ/Β πλαίσιο, από οποιαδήποτε γειτονικά, μη σχετικά αντικείμενα του φόντου (λ.χ. το δάπεδο της οροφής εγκατάστασης, τοίχια ή ο ουρανός). Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, η εφαρμογή επιπλέον φίλτρων Median ή Gaussian, δεν κρίθηκε απαραίτητη, καθώς οι πρωτογενείς θερμικές εικόνες εμφανίζουν χαμηλά επίπεδα θορύβου και οι όποιες ανεπιθύμητες διακυμάνσεις (π.χ. λόγω σκοτεινών κηλίδων) περιορίζονται επαρκώς με την εφαρμογή κατωφλιοποίησης σε επόμενα βήματα του αλγορίθμου. Η τεχνική της κατωφλιοποίησης αποτελεί δημοφιλές εργαλείο επεξεργασίας εικόνων και σημαντικό στοιχείο σε εφαρμογές ρομποτικής και υπολογιστικής όρασης που απαιτούν διαχωρισμό συγκεκριμένων αντικειμένων από το φόντο μιας εικόνας [16]. Με την εφαρμογή της κατωφλιοποίησης, μια εικόνα σε κλίμακα του γκρι μετατρέπεται σε δυαδική εικόνα (μαύρου-λευκού). Αυτό γίνεται, σε πρώτο στάδιο, με την επιλογή ενός κατωφλίου L_{th} γκρι επιπέδου στην

αρχική εικόνα και, στη συνέχεια, με την μετατροπή κάθε εικονοστοιχείου σε μαύρο ή λευκό χρώμα, ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης του γκρι επιπέδου του g , με το επίπεδο του κατωφλίου L_{th} . Έτσι, στην απλή κατωφλιοποίηση, ένα εικονοστοιχείο μετατρέπεται σε λευκό όταν $g > L_{th}$ και σε μαύρο όταν $g \leq L_{th}$.



Σχήμα 5.39. Αποτελέσματα της ανίχνευσης και χαρτογράφησης ακμών με την εφαρμογή του αλγορίθμου Canny: **α.** στα Φ/Β πλαίσια 1 και 2 της PV-1, **β.** στα Φ/Β πλαίσια 3 και 4 της PV-1, **γ.** στο Φ/Β πλαίσιο 1 της PV-3 και **δ.** στο Φ/Β πλαίσιο 2 της PV-3, για τις θερμικές εικόνες της 8ης Αυγούστου, στις 13:00.

Στην προσέγγιση αυτής της μελέτης, πριν την εφαρμογή της ανίχνευσης ακμών, η αρχική κατάτμηση (segmentation) των θερμικών εικόνων πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της κατωφλιοποίησης, η οποία επιλέχθηκε κυρίως για λόγους αξιοπιστίας και απλότητας υλοποίησής της [17]. Η δεύτερη στήλη του Σχήματος 5.39, παρουσιάζει τις εικόνες-εξόδους

(output images) της εφαρμογής της διαδικασίας απλής κατωφλιοποίησης, σε περιβάλλον Matlab® R2009a, για κατώφλι $L_{th} = 160$. Η επιλογή του συγκεκριμένου επιπέδου κατωφλίου έγινε, κατόπιν πολυάριθμων δοκιμών, με γνώμονα την βέλτιστη δυνατή επίτευξη απαλοιφή των ανεπιθύμητων περιοχών (εκτός Φ/Β πλαισίων) των θερμικών εικόνων, αποφεύγοντας παράλληλα την αποκοπή περιοχών ενδιαφέροντος. Οι προκύπτουσες εικόνες αυτού του βήματος, παρέχουν ένα πολύτιμο σύνολο πληροφορίας δυαδικής μορφής, “καθαρής” από πιθανές εσφαλμένες διακυμάνσεις επιπέδων του γκρι. Αυτή η πληροφορία, υπό μορφή ROI θερμών κηλίδων, αποτελεί την είσοδο των επόμενων βημάτων, που είναι η ανίχνευση και η χαρτογράφηση των ακμών.

Η τρίτη στήλη του Σχήματος 5.39 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου Canny στην ανίχνευση ακμών των εικόνων της δεύτερης στήλης. Για την θερμική εικόνα των Φ/Β πλαισίων 1 και 2 της συστοιχίας PV-1, ο αλγόριθμος, για παράμετρο εξομάλυνσης $\sigma=1$ και κατώφλια υστέρησης 0.8 (κατώτατο) και 0.9 (ανώτατο), εντόπισε συνολικά 6 ακμές-περιοχές βλαβών. Στη συνέχεια, στην τελευταία στήλη, η έξοδος της συνολικής προσέγγισης, δίνει την εικόνα ακμών, όπου κάθε διαγνωσμένη ακμή υποδεικνύεται με διαφορετικό (τυχαίο) χρώμα, συνθέτοντας έναν λεγόμενο χάρτη ακμών. Κάθε ευθύγραμμο τμήμα ή περίγραμμα αυτού του χάρτη, καταχωρείται στη συνέχεια σε μια μεταβλητή, λεγόμενη “seglist”. Παρατηρείται ότι στον τελικό χάρτη ακμών, μια ακμή που είχε εντοπιστεί στο προηγούμενο στάδιο (τρίτη στήλη) απαλείφθηκε λόγω του περιορισμένου μήκους περιγράμματός της (contour length). Στην τελική υλοποίηση της συνολικής προσέγγισης, προστέθηκε ένα επιπλέον, απλό βήμα καταμέτρησης, το οποίο υπολογίζει το τελικό μέγεθος των καταχωρήσεων της seglist και, συνεπώς, το πλήθος των διαγνωσμένων περιοχών βλαβών σε κάθε θερμική εικόνα, σύμφωνα με τον χάρτη ακμών. Βέβαια, σε αυτήν την περίπτωση, και σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες, μια περιοχή βλάβης χαρακτηρίζεται ακριβέστερα ως *σχηματισμός θερμής κηλίδας*, ο οποίος μπορεί να συμπεριλαμβάνει είτε μια “προβληματική” κυψέλη, είτε ένα σύνολο “προβληματικών” κυψελών. Με βάση, λοιπόν, το χάρτη ακμών και την τιμή εξόδου της seglist, ο αλγόριθμος της προσέγγισης διέγνωσε συνολικά 5 σχηματισμούς θερμών κηλίδων, οι οποίοι αντιστοιχούν στις 7 από τις συνολικά 8 “προβληματικές” κυψέλες στα Φ/Β πλαίσια 1 και 2 της PV-1. Με άλλα λόγια, ο αλγόριθμος σε αυτήν την περίπτωση θερμικής εικόνας “απέτυχε” να αναγνωρίσει 1 “προβληματική” κυψέλη, της οποίας η ακμή – όπως προαναφέρθηκε – απαλείφθηκε λανθασμένα στο τελευταίο στάδιο της χαρτογράφησης, λόγω του περιορισμένου της περιγράμματος.

Για την θερμική εικόνα των Φ/Β πλαισίων 3 και 4 της PV-1, ο αλγόριθμος, για παράμετρο εξομάλυνσης $\sigma=1$ και κατώφλια υστέρησης 0.7 (κατώτατο) και 0.8 (ανώτατο), εντόπισε συνολικά 5 ακμές-περιοχές βλαβών. Ομοίως με την προηγούμενη θερμική εικόνα, 1 ακμή απαλείφθηκε λόγω του μικρού της περιγράμματος, με συνέπεια στον τελικό χάρτη ακμών και στην αντίστοιχη τιμή εξόδου της seglist να διαγνωσθούν τελικά 4 σχηματισμοί θερμών κηλίδων, οι οποίοι επιβεβαίωσαν και τις 6 συνολικά “προβληματικές κυψέλες” των

συγκεκριμένων πλαισίων. Στην περίπτωση αυτή, λοιπόν, η απαλοιφή της μιας ακμής έγινε ορθά, καθώς η συγκεκριμένη ακμή αντιστοιχούσε σε ένα αντικείμενο του φόντου, εκτός ROI, αριστερά από το Φ/Β πλαίσιο 4. Από την άλλη πλευρά όμως, η μικρότερη ακμή στον τελικό χάρτη ακμών, αποτελεί λανθασμένη ένδειξη-ανίχνευση, καθώς, όπως μπορεί κανείς να προσέξει, δεν αντιστοιχεί σε θερμή κηλίδα, αλλά απλά σε μια έντονη διακύμανση επιπέδων του γκρι στην αρχική θερμική εικόνα, μεταξύ των δύο πλαισίων.

Τέλος, όσον αφορά στις θερμικές εικόνες των δύο πλαισίων της PV-3, ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε με παράμετρο εξομάλυνσης $\sigma=1$ και κατώφλια υστέρησης 0.1 (κατώτατο) και 0.2 (ανώτατο), εντοπίζοντας συνολικά 7 και 10 ακμές στα Φ/Β πλαίσια 1 και 2 αντίστοιχα. Λόγω του περιορισμένου μήκους περιγράμματος, 2 ακμές του Φ/Β πλαισίου 1 και 4 ακμές στο Φ/Β πλαίσιο 2 απορρίφθηκαν από την τελική έξοδο του χάρτη ακμών. Σύμφωνα με την αρίθμηση των seglist κάθε περίπτωσης, η τελική διάγνωση υπέδειξε συνολικά 11 σχηματισμούς θερμών κηλίδων, οι οποίοι επιβεβαίωσαν και τις 20 “προβληματικές” κυψέλες των Φ/Β πλαισίων 1 και 2 της PV-3. Αντίστοιχη διάγνωση με βάση την συγκεκριμένη προσέγγιση, εφαρμόστηκε και για τα θερμοκρασιακά δεδομένα των Φ/Β πλαισίων 3 και 4 της PV-3, για τα οποία ο αλγόριθμος Canny διέγνωσε 7 σε σύνολο 9 θερμών κηλίδων.

Συμπερασματικά, η προσέγγιση ανίχνευσης ακμών με τον αλγόριθμο Canny, η οποία διερευνήθηκε και εφαρμόστηκε σε αυτήν την τρίτη, και τελευταία, μελέτη διάγνωσης βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, εμφανίζεται πολλά υποσχόμενη, επιβεβαιώνοντας σε μεγάλο βαθμό, τόσο την δεδομένα μειωμένη απόδοση των PV-1 και PV-3, όσο και τα αποτελέσματα των βασικών μεθόδων ανάλυσης (ROI, LPA και στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων). Με βάση την ιδέα της εξομάλυνσης των “ανώμαλων” θερμοκρασιακών προφίλ βλαβών με αιχμές (διακυμάνσεις) των επιπέδων του γκρι στις θερμικές εικόνες, ο αλγόριθμος Canny πέτυχε να αναγνωρίσει τις “προβληματικές” περιοχές 40 εκ των συνολικών 43 θερμών κηλίδων, σε όλα τα Φ/Β πλαίσια της μελέτης. Η δε χρήση της στατιστικής ανάλυσης ιστογραμμάτων θερμικών εικόνων αποδείχθηκε και πάλι ενδιαφέρον εργαλείο συσχέτισης των βλαβών με την μεταβολή απλών στατιστικών δεικτών. Εκτενέστερα συμπεράσματα θα παρατεθούν, συνολικά για τις τρεις υπό παρουσίαση διαγνωστικές μελέτες, στην Ενότητα 5 που ακολουθεί.

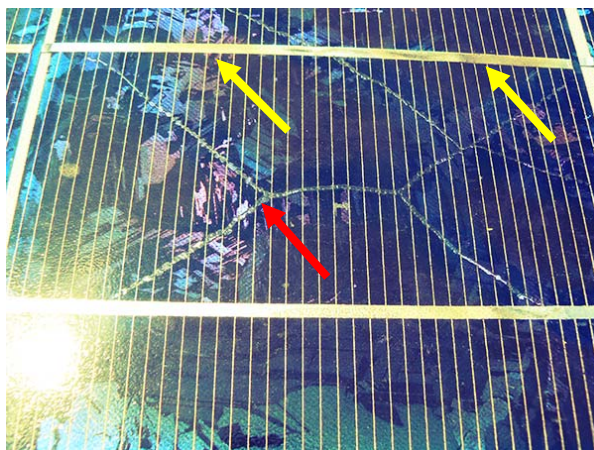
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΩΝ

Ξεκινώντας από την 1^η μελέτη περίπτωσης, η συγκριτική διερεύνηση της διαγνωστικής ικανότητας της παθητικής και της ενεργητικής θερμογραφίας προσέφερε τα πρώτα ενδιαφέροντα συμπεράσματα αυτού του Κεφαλαίου. Αρχικά, η καταγραφή των θερμοκρασιών φυσιολογικής λειτουργίας των “υγιών” κυψελών του Φ/Β πλαισίου, επιβεβαίωσε την ημι-εμπειρική Σχέση 5.1. Η συγκεκριμένη σχέση χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά σε περαιτέρω αναλύσεις και των τριών

μελετών, στον καθορισμό της έννοιας του ασυνήθιστου θερμοκρασιακού προφίλ, με κριτήριο την τιμή της απόκλισης ΔT . Έτσι, λοιπόν, οι υπέρυθρες ραδιομετρήσεις πεδίου υπέδειξαν επιτυχώς, υπό μορφή $\Delta T > 5^\circ\text{C}$, την δεδομένη βλάβη (ρωγμή) μιας κυψέλης του Φ/Β πλαισίου που εξετάστηκε. Εξάλλου, με γνώμονα πάντα την έννοια του ΔT , οι πρώτες δοκιμές εφαρμογής βασικών εργαλείων ανάλυσης θερμικών εικόνων, όπως η ανάλυση ROI και η LPA, υπέδειξαν με επιτυχία εναλλακτικούς τρόπους ερμηνείας και αξιοποίησης των παρατηρήσεων των θερμικών εικόνων. Βάσει της εφαρμογής αυτών των εργαλείων και των αποτελεσμάτων της μελέτης, η ενεργητική υπέρυθρη θερμογράφηση με την αξιοποίηση της βηματικής θερμικής διέγερσης (SHT), επιβεβαίωσε πλήρως τις αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου, παρέχοντας ωστόσο σημαντικά ταχύτερη και λεπτομερέστερη διάγνωση της πηγής και της ακριβούς θέσης της βλάβης στο Φ/Β πλαίσιο. Μάλιστα, καθώς η ενεργητική θερμογράφηση πραγματοποιείται εργαστηριακά, σε κλειστό σκοτεινό χώρο, προσφέρει το σημαντικό πλεονέκτημα της αποφυγής ανεπιθύμητων αντανακλάσεων και της “απεξάρτησης” από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Βέβαια, η συγκεκριμένη τεχνική SHT, περιορίζεται μόνο στην εκτός πεδίου και εκτός λειτουργίας (off line) διάγνωση μεμονωμένων Φ/Β πλαισίων μικρής ισχύος, τα οποία μπορούν να πολωθούν ορθά και να διεγερθούν θερμικά από συμβατικά τροφοδοτικά ισχύος. Λόγω αυτών των περιορισμών, η διάγνωση βλαβών στις Φ/Β συστοιχίες των επόμενων μελετών, πραγματοποιήθηκε με την υλοποίηση υπέρυθρων θερμογραφήσεων πεδίου.

Στόχοι της 2^{ης} και της 3^{ης} μελέτης, λοιπόν, ήταν η υπέρυθρη θερμογράφηση των συστοιχιών PV-1, PV-2 και PV-3 στο πεδίο, καθώς και η διερεύνηση της διαγνωστικής ικανότητας της μεθόδου, με την κατάλληλη επεξεργασία και ανάλυση των θερμικών εικόνων. Συγκεκριμένα, στην 2^η μελέτη επιβεβαιώθηκαν σε μεγάλο βαθμό η μειωμένη απόδοση και η “προβληματική” λειτουργία των PV-1 και PV-2, από την διάγνωση πολυάριθμων θερμών κηλίδων σε συγκεκριμένες κυψέλες των Φ/Β πλαισίων. Τόσο η ανάλυση ROI, όσο και η LPA αποδείχθηκαν πολύτιμα εργαλεία προσδιορισμού της σοβαρότητας και της θέσης κάθε θερμής κηλίδας. Η δε χρήση της στατιστικής ανάλυσης ιστογραμμάτων, βάσει των αποτελεσμάτων της μελέτης, εμφανίζεται πολλά υποσχόμενη προς την κατεύθυνση της συσχέτισης βλαβών και, συνεπώς, “ανωμαλιών” σε θερμοκρασιακά προφίλ με την μεταβολή βασικών στατιστικών δεικτών, όπως ο αριθμητικός μέσος, η διακύμανση και η κλίση/ασυμμετρία. Από την άλλη πλευρά, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση ως προς τον προσδιορισμό της ακριβούς αιτίας των διαγιγνώσκόμενων βλαβών (λ.χ. ρωγμές, αποκολλήσεις EVA, κακή επαφή των μεταλλικών συνδέσεων, κλπ), κάτι που με μια απλή οπτική παρατήρηση, σε συνδυασμό με την υπέρυθρη θερμογραφία, δεν είναι πάντα εφικτό. Μάλιστα, για την περίπτωση των Φ/Β πλαισίων της PV-1, ο οπτικός έλεγχος των “προβληματικών” περιοχών που διαγνώστηκαν από τις υπέρυθρες θερμογραφήσεις, δεν υπέδειξε καμία μορφολογική αλλοίωση ή άλλη πιθανή αιτία εμφάνισης των θερμών κηλίδων. Αντίθετα, στην περίπτωση της PV-2, οι περισσότερες θερμές κηλίδες συσχετίστηκαν αντίστοιχες ορατές περιοχές των Φ/Β πλαισίων όπου παρατηρούνται

εκτεταμένες ρωγμές ή αποκολλήσεις και αποχρωματισμοί του στρώματος EVA (Σχήμα 5.40). Προς την κατεύθυνση του προσδιορισμού της ακριβούς θέσης και αιτίας εμφάνισης των θερμών κηλίδων, σημαντικές λύσεις μπορούν να προσφερθούν από την εφαρμογή μετρήσεων ενεργητικής θερμογραφίας ή εμποπτικών μεθόδων μικροσκοπίας, οι οποίες ωστόσο προϋποθέτουν την αφαίρεση των πλαισίων από την εγκατάσταση και, φυσικά, δεν ενδείκνυνται για εφαρμογές ευρείας κλίμακας (εκτεταμένες Φ/Β συστοιχίες και Φ/Β πάρκα).



Σχήμα 5.40. Ενδείξεις ρωγμών ή αποκολλήσεων (κόκκινο βέλος) και αποχρωματισμού (κίτρινα βέλη) του στρώματος EVA, σε Φ/Β πλαίσιο της PV-2 με διαγνωσμένη βλάβη.

Τέλος, στην 3^η μελέτη περίπτωσης, και με βάση την ιδέα της εξομοίωσης των “ανώμαλων” θερμοκρασιακών προφίλ βλαβών με αιχμές (διακυμάνσεις) των επιπέδων του γκρι στις θερμικές εικόνες, ο αλγόριθμος Canhy που εφαρμόστηκε, διάγνωσε τις “προβληματικές” περιοχές 40 εκ των συνολικών 43 θερμών κηλίδων, σε όλα τα Φ/Β πλαίσια της μελέτης, αντιστοιχώντας σε ένα ποσοστό επιτυχίας διάγνωσης κοντά στο 93%. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ανίχνευσης ακμών με τον αλγόριθμο Canhy, εμφανίζεται λοιπόν πολλά υποσχόμενη, επιβεβαιώνοντας σε αυτήν την μελέτη, τόσο την δεδομένα μειωμένη απόδοση των PV-1 και PV-3, όσο και τα αποτελέσματα των βασικών μεθόδων ανάλυσης (ROI, LPA και στατιστική ανάλυση ιστογραμμάτων). Ο σημαντικότερος, ίσως, περιορισμός της συγκεκριμένης προσέγγισης, έχει να κάνει με τις συνθήκες πρόσκτησης των πρωτογενών θερμικών εικόνων. Συγκεκριμένα, όπως φάνηκε εξάλλου και από περιπτώσεις λανθασμένων διαγνώσεων κατά την χαρτογράφηση των ακμών, τα αντικείμενα που ενδεχομένως συμπεριλαμβάνονται στο φόντο μιας θερμικής εικόνας και χαρακτηρίζονται από έντονες διακυμάνσεις επιπέδων του γκρι, συχνά αναγνωρίζονται (λανθασμένα) ως ακμές. Έτσι, λοιπόν, για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση αυτού του αλγορίθμου θα πρέπει κάθε θερμική εικόνα να συμπεριλαμβάνει αποκλειστικά τις περιοχές ενδιαφέροντος ή, στην χειρότερη, το φόντο της να βρίσκεται σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία, ώστε να “απαλείφεται” κατά την διαδικασία του thresholding. Τέλος, θα πρέπει να



σημειωθεί ότι, όπως και για την περίπτωση της PV-1 (2^η μελέτη), ο οπτικός έλεγχος των “προβληματικών” περιοχών της PV-3, που διαγνώστηκαν από τις υπέρυθρες θερμογραφίες, δεν υπέδειξε καμία μορφολογική αλλοίωση ή πιθανή αιτία εμφάνισής τους, πλην φυσικά των εγνωσμένων βλαβών που συνόδευαν τα συγκεκριμένα πλαίσια κατά την αγορά τους.

Ανεξαρτήτως Φ/Β πλαισίων, ο κύριος περιορισμός της υπέρυθρης θερμογραφίας πεδίου σχετίζεται με την αδυναμία ταξινόμησης των διαγιγνώσκόμενων βλαβών με κριτήριο την αιτία (πηγή) εμφάνισής τους. Όπως γίνεται αντιληπτό, η πλειοψηφία των βλαβών που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3, συνδέεται με την εμφάνιση “ανώμαλων” θερμοκρασιακών προφίλ, για τα οποία η μόνη ταξινόμηση που είναι δυνατό να εφαρμοστεί, είναι με κριτήριο το επίπεδο του προκύπτοντος ΔT . Στους περιορισμούς της μεθόδου, σημειώνονται επίσης η αναπόφευκτη εξάρτηση των μετρήσεων από τις περιβαλλοντικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες, καθώς και από τις συνθήκες του φόντου κάθε μέτρησης, η ενυπάρχουσα αβεβαιότητα της πραγματικής τιμής του συντελεστή ικανότητας εκπομπής και η παρουσία του γυαλιού στο εμπρόσθιο στρώμα των Φ/Β πλαισίων η οποία συχνά οδηγεί στην λήψη θερμογραφίσεων υπό γωνία (για την αποφυγή του φαινομένου Narcissus), με συνακόλουθες απώλειες ακρίβειας μέτρησης.

Τέλος, στο σημείο αυτό θα ήταν παράλειψη να μην γίνει αναφορά στα εξαιρετικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα μετρήσεων της χαρακτηριστικής I-V και της ηλεκτρικής απόδοσης δύο Φ/Β πλαισίων της PV-1, που πραγματοποιήθηκαν (μετά την ολοκλήρωση της 2^{ης} μελέτης) σε ειδικό προσομοιωτή QuickSun™ Solar Simulator, στις εγκαταστάσεις της εταιρίας κατασκευής Φ/Β πλαισίων ExelSolar™/ExelGroup™ A.E., με την οποία συνεργάστηκε στενά η ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Μηχανολογικού Σχεδιασμού του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ (βλ. επίσης Υποενότητα 3.3, Κεφάλαιο 2). Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις επαλήθευσαν την μειωμένη απόδοση (ισχύ εξόδου) των πλαισίων λόγω των πολυάριθμων θερμών κηλίδων που διαγνώστηκαν τόσο στην 2^η, όσο και στην 3^η μελέτη αυτού του Κεφαλαίου. Στο Παράρτημα Β (Σχήματα B1 και B2) δίνονται οι αναφορές (reports) των αποτελεσμάτων των εν λόγω μετρήσεων I-V για τα Φ/Β πλαίσια 1 και 2 της PV-1 αντίστοιχα, για τα οποία υπενθυμίζεται ότι κατά την 2^η και 3^η μελέτη διαγνώστηκαν συνολικά 8 θερμές κηλίδες (4 έκαστο). Σε STC συνθήκες, λοιπόν, η μέγιστη ισχύς εξόδου (στις αναφορές της ExelSolar™ συμβολίζεται ως P_{mp}) των πλαισίων 1 και 2 υπολογίστηκε ίση με 64.88 W και 64.07 W αντίστοιχα (συνολική υποβάθμιση κατά 13.5% και 14.5% αντίστοιχα). Η όποια απόκλιση μεταξύ αυτών των τιμών υποβάθμισης της απόδοσης και των τιμών που υπολογίστηκαν με βάση τις συμβατικές ηλεκτρικές μετρήσεις στο πεδίο (εκτίμηση υποβάθμισης κατά 9.5%) και την εφαρμογή του ηλεκτρικού μοντέλου προσομοίωσης της Υποενότητας 3.3 του Κεφαλαίου 2 (εκτίμηση υποβάθμισης κατά 10%), μπορεί να δικαιολογηθεί, λαμβάνοντας υπόψη: i) την ημι-εμπειρική φύση συγκεκριμένων τύπων υπολογισμού της υποβάθμισης της απόδοσης βάσει συμβατικών ηλεκτρικών μετρήσεων των I_{sc} και V_{oc} στο πεδίο, ii) την δεδομένα περιορισμένη ακρίβεια του ισοδύναμου ηλεκτρικού μοντέλου προσομοίωσης και iii) τις παραδοχές (αρχικές

συνθήκες) εφαρμογής των μετρήσεων I-V του προσομοιωτή QuickSun™ Solar Simulator για τον συγκεκριμένο τύπο Φ/Β πλαισίων.

6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τρεις διαφορετικές μελέτες περιπτώσεων, με τα αντίστοιχα αποτελέσματά τους, οι οποίες εκπονήθηκαν στα πλαίσια της πειραματικής υλοποίησης της συγκεκριμένης Διδακτορικής Έρευνας. Στις μελέτες αυτές που παρουσιάστηκαν αντίστοιχα στις Ενότητες 2, 3 και 4, διερευνήθηκε η δυναμική προσεγγίσεων υπέρυθρης θερμογραφίας πεδίου και SHT, σε επίπεδο *εντοπισμού* και *διάγνωσης* βλαβών, σε Φ/Β πλαίσια τόσο μονοκρυσταλλικού όσο και πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Τα δε ενθαρρυντικά αποτελέσματα των μελετών, με τα πλεονεκτήματα αλλά και τους περιορισμούς της μεθόδου συζητήθηκαν στην Ενότητα 5 αυτού το Κεφαλαίου. Η ολοκλήρωση και τα αποτελέσματα των μελετών αυτού του Κεφαλαίου, αποτέλεσαν την βάση για την συγγραφή και, τελικώς, δημοσίευση (τόσο σε διεθνή Επιστημονικά Περιοδικά, όσο και σε διεθνή Επιστημονικά Συνέδρια) των ακόλουθων εργασιών (κατά χρονολογική σειρά) [1,2,4,7,11,18,19]:

- ✓ J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Non-Destructive in Situ Evaluation of a PV Module Performance Using Infrared Thermography", Proceeding of The 6th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies - CM and MFPT, Dublin, Republic of Ireland, 2009.
- ✓ P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "Infrared Thermography as an Estimator Technique of a Photovoltaic Module Performance via Operating Temperature Measurements", Proceeding of The 10th European Conference on NDT, Moscow, Russia, 2010.
- ✓ J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Quantifying the Impact of Hot Spots on the Performance of Photovoltaic Modules by Infrared Thermography and a Simulation Model", Proceeding of The 2nd International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium - ELCAS2, Nisyros, Greece, 2011.
- ✓ 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, 021012, 2011.
- ✓ 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.

- ✓ J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "On the Detection of Hot Spots in Operating Photovoltaic Arrays through Thermal Image Analysis and a Simulation Model", Materials Evaluation, (in press – 2013).
- ✓ J.A. Tsanakas, D. Chrysostomou, P.N. Botsaris and A. Gasteratos, "Fault Diagnosis of Photovoltaic Modules through Image Processing and Canny Edge Detection on Field Thermographic Measurements", Journal of Solar Energy Engineering, (in press 2013).

Στο επόμενο, και τελευταίο, Κεφάλαιο αυτής της Διδακτορικής Διατριβής, παρουσιάζονται η διαδικασία υλοποίησης και τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης, προς την κατεύθυνση της *πρόγνωσης* της εξέλιξης 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.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "Infrared Thermography as an Estimator Technique of a Photovoltaic Module Performance via Operating Temperature Measurements", Proceeding of The 10th European Conference on NDT, Moscow, Russia, 2010.
2. 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, 021012, 2011.
3. E. Skoplaki and J.A. Palyvos, "On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A review of Efficiency/Power Correlations", Solar Energy, 83, 2009.
4. 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.
5. D. Borland and R.M. Taylor, "Rainbow Color Map (Still) Considered Harmful" IEEE Computer Graphics and Applications, 27(2), 2007.
6. P. Zayicek, "Infrared Thermography Guide", Revision 3, Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, U.S.A., 2002.



7. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "On the Detection of Hot Spots in Operating Photovoltaic Arrays through Thermal Image Analysis and a Simulation Model", Materials Evaluation, (in press – 2013).
8. X.P.V. Maldague, "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing", 1st edition, Wiley-Interscience, New York, U.S.A., 2001.
9. M. Vollmer and K.-P. Mollmann, "Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications", Chap. 3, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 2010.
10. A.M. Younus, A. Widodo and B.S. Yang, "Image Histogram Features Based Thermal Image Retrieval to Pattern Recognition of Machine Condition", Proceedings of The 4th World Congress on Engineering Asset Management, Athens, Greece, 2009.
11. J.A. Tsanakas, D. Chrysostomou, P.N. Botsaris and A. Gasteratos, "Fault Diagnosis of Photovoltaic Modules through Image Processing and Canny Edge Detection on Field Thermographic Measurements", ASME Journal of Solar Energy Engineering, (in press 2013).
12. S. Vergura and O. Falcone, "Filtering and Processing IR Images of PV Modules", Proceedings of The International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11), Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2011.
13. N. Scales, C. Herry and M. Frize, "Automated Image Segmentation for Breast Analysis Using Infrared Images", Proceedings of The 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS, San Francisco, U.S.A., 2004.
14. X. Wang, B.S. Wong, C. Tan and C.G. Tui, "Automated Crack Detection for Digital Radiography Aircraft Wing Inspection", Research in Nondestructive Evaluation, 22, 2011.
15. J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-8(6), 1986.
16. R.C. Gonzalez and R.E. Woods, "Digital Image Processing", Chap. 10, Prentice-Hall Inc., New Jersey, U.S.A., 2002.
17. R. Heriansyah, and S.A.R. Abu-Bakar, "Defect Detection in Thermal Image for Nondestructive Evaluation of Petrochemical Equipments", NDT & Evaluation International, 42(8), 2009.
18. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Non-Destructive in Situ Evaluation of a PV Module Performance Using Infrared Thermography", Proceeding of The 6th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies - CM and MFPT, Dublin, Republic of Ireland, 2009.
19. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Quantifying the Impact of Hot Spots on the Performance of Photovoltaic Modules by Infrared Thermography and a Simulation Model", Proceedings of The 2nd International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium - ELCAS2, Nisyros, Greece, 2011.



Κεφάλαιο 6

Πρόγνωση Βλαβών σε Φωτοβολταϊκά Πλαίσια: Υλοποίηση και Αποτελέσματα

Περιεχόμενα

Σελίδα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	213
2. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ: ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ.....	214
3. ΤΕΧΝΗΤΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗ ΓΗΡΑΝΣΗ – ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC 61215.....	216
4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ.....	225
4.1 Πειραματική υλοποίηση.....	226
4.1.1 Υλικό και λογισμικό.....	226
4.1.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης.....	230
4.1.3 Θερμικοί κύκλοι επιταχυνόμενης γήρανσης.....	232
4.2 Αποτελέσματα και συζήτηση.....	233
4.2.1 Εξέλιξη θερμικού αποτυπώματος βλαβών.....	233
4.2.2 Εξέλιξη ηλεκτρικής απόδοσης.....	237
4.2.3 Οπτικές παρατηρήσεις.....	243
5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	245
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	246

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται το θεωρητικό υπόβαθρο, η διαδικασία υλοποίησης και τα αποτελέσματα πειραματικής μελέτης, 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. Στο θεωρητικό μέρος αυτής της μελέτης παρουσιάζονται θέματα αξιοπιστίας και πρόγνωσης βλαβών Φ/Β πλαισίων, καθώς και ο ρόλος των δοκιμών τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης τόσο σε κατασκευαστικό επίπεδο, όσο και στο πεδίο. 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 – αντιστοιχών με αυτά που μελετήθηκαν στο Κεφάλαιο 5 – 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 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), με στόχο την επίτευξη μιας προσεγγιστικής προσομοίωσης μεγάλου μέρους της διάρκειας ζωής ενός Φ/Β πλαισίου στο πεδίο.

2. ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ: ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ

Η υψηλή, μακροπρόθεσμη αξιοπιστία και η δυνατότητα ακριβούς πρόγνωσης της εξέλιξης της κατάστασης, και συνεπώς της απόδοσης, ενός Φ/Β πλαισίου στη διάρκεια ζωής του, αποτελούν προκλήσεις μείζονος τεχνικής και οικονομικής σημασίας για την ανάπτυξη της βιομηχανίας και της επιστημονικής έρευνας των Φ/Β συστημάτων [1,2]. Στην βάση αυτή, λοιπόν, η ανάγκη για πιστοποιημένα, μηδενικών ελαττωμάτων κατασκευή (zero-defect manufacturing) και καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών υποβάθμισης της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων, προβάλλει ως εκ των ουκ άνευ [3]. Σήμερα, η αξιοπιστία της συντριπτικής πλειοψηφίας των κατασκευαζόμενων Φ/Β πλαισίων πιστοποιείται βάσει καθορισμένων διεθνών οδηγιών (“προτύπων”), όπως οι IEC 61215 και IEC 61646, με τις οποίες προσδιορίζονται ο σχεδιασμός, τα υλικά κατασκευής και τα ελαττώματα τα οποία είναι πιθανότερα να οδηγήσουν σε περιπτώσεις πρώιμων απωλειών (infant mortality, βλ. Κεφάλαιο 1) [4]. Επιπλέον, οι ελαττωματικές κυψέλες συνήθως εντοπίζονται και απορρίπτονται στα πρώιμα στάδια της διαδικασίας συναρμολόγησης ενός πλαισίου, με την χρήση εποπτικών μεθόδων όπως η υπερηχογραφία [5], η ενεργητική θερμογραφία [6-9] ή οι απεικονίσεις ηλεκτροφωταύγειας [10,11]. Ωστόσο, 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

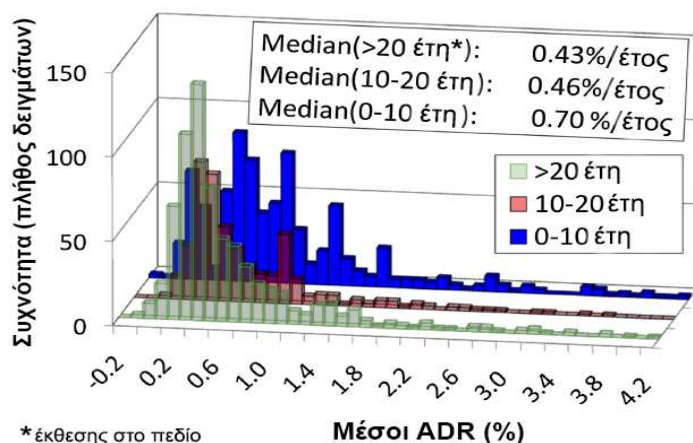
Φ/Β πλαισίου. Η καλύτερη δυνατή κατανόηση και πρόγνωση αυτών των μηχανισμών, έχει ξεχωριστή σημασία, καθώς – υπό διαφορετικές οπτικές γωνίες – μπορεί να προσφέρει:

- 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.

Βέβαια, ο ακριβής προσδιορισμός του μηχανισμού εξέλιξης κάθε τύπου βλάβης στο πεδίο, αποτελεί μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία, καθώς εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων όπως τα επίπεδα της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην γεωγραφική περιοχή εγκατάστασης, η τεχνολογία κατασκευής και η ισχύς εξόδου του Φ/Β πλαισίου, καθώς και η παρουσία πιθανών “φθοροποιών” ή/και διαβρωτικών παραγόντων, όπως η σκόνη, η αλατονέφωση και η υγρασία. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη προσέγγιση μελετών αξιοπιστίας και μοντελοποίησης των μηχανισμών φθοράς παρουσιάζεται από τους A. Pregelj et al. [12], σύμφωνα με την οποία το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των αστοχιών σε ένα Φ/Β πλαίσιο, περιγράφεται στατιστικά από μια εκθετική, λογαριθμική ή Weibull κατανομή. Ένα άλλο παράδειγμα μοντέλου αξιοπιστίας Φ/Β πλαισίων, παρουσιάζεται στην μελέτη των M. Vazquez et al. [13], όπου κάθε πρόγνωση διαμορφώνεται βιβλιογραφικά από μια θεωρητική βάση διαφορετικών μελετών φθοράς (υποβάθμισης). Προς την ίδια κατεύθυνση, οι D.C. Jordan et al. [14], κατόπιν εφαρμογής στατιστικής κατανομής Median σε συνολικά 2000 – βιβλιογραφικά καταγεγραμμένες – περιπτώσεις είτε μεμονωμένων Φ/Β πλαισίων, είτε Φ/Β πάρκων, εκθειμένων σε συνθήκες πεδίου, οι μέσοι ετήσιοι ρυθμοί υποβάθμισης της απόδοσης (annual degradation rates, ADR) που προέκυψαν, συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο πεδίο, παρουσιάζονται στο γράφημα του Σχήματος 6.1.

“Μεταφράζοντας” το Σχήμα 6.1, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ο μέσος ADR, είναι σημαντικά υψηλότερος κατά τα πρώτα έτη (<10) έκθεσης ενός Φ/Β πλαισίου σε συνθήκες πεδίου και μειώνεται σταδιακά έως το πέρας του χρόνου ζωής του. Ο συγκεκριμένος “μηχανισμός” υποβάθμισης της απόδοσης είναι, φυσικά, αντίστοιχης συμπεριφοράς με αυτήν των βαθμιαίων βλαβών (Κεφάλαιο 1, Ενότητα 5, βλ. Σχήμα 1.12). Γίνεται κατανοητό ότι, στον υψηλότερο μέσο ADR κατά τα πρώτα έτη έκθεσης στο πεδίο, συμβάλλουν και οι συχνά εμφανιζόμενες περιπτώσεις πρώιμων “απωλειών” σε μέρη του πλαισίου (Κεφάλαιο 1, Υποενότητα 2.1) λόγω βλαβών, όπως η θραύση ή οι ρωγμές κυψελών, η αλλοίωση του

στρώματος EVA και η συνακόλουθη εμφάνιση θερμών κηλίδων. Λόγω της συχνά στοχαστικής φύσης των αιτιών-μηχανισμών αυτών των βλαβών, η εμφάνισή τους είναι πρακτικά αδύνατο να προγνωσθεί. Κατά συνέπεια, και σε αντίθεση με την στατιστική προσέγγιση πρόγνωσης μιας σταθερής, φυσιολογικής φθοράς (υποβάθμισης) του Φ/Β πλαισίου, στην διάρκεια ζωής του (Σχήμα 6.1), η εξέλιξη των παραπάνω βλαβών συναρτější του χρόνου και η επίδρασή τους στον μέσο ADR δεν είναι εύκολο να αποτιμηθούν με ακρίβεια, ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς ότι ορισμένοι τύποι βλαβών εξελίσσονται, υπό συνθήκες πεδίου, σε βάθος χρόνων [15]. Εξαιτίας, εξάλλου, αυτών ακριβώς των αδυναμιών πρόγνωσης συγκεκριμένων τύπων βλαβών εξοπλισμού, το στάδιο της πρόγνωσης παραμένει η “Αχίλλειος πτέρνα” των συστημάτων CM, διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών [16].



Σχήμα 6.1. Μέσοι ADR Φ/Β πλαισίων, συναρτήσει του χρόνου έκθεσής τους στο πεδίο [14].

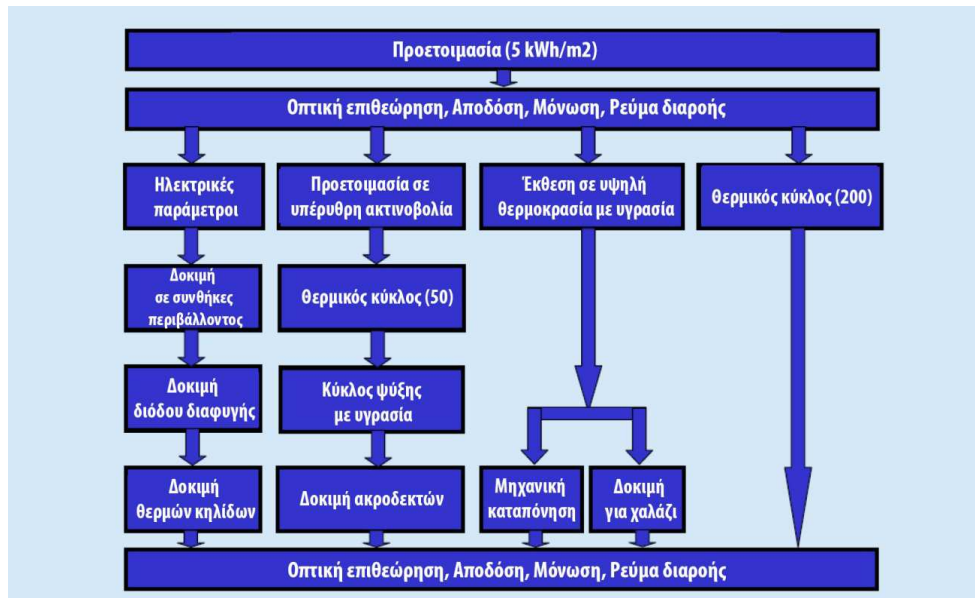
3. ΤΕΧΝΗΤΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗ ΓΗΡΑΝΣΗ – ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC 61215

Με βάση τις τρέχουσες τάσεις έρευνας, η μελέτη των μηχανισμών εξέλιξης των διαφόρων τύπων βλαβών Φ/Β πλαισίων βασίζεται κυρίως στην αναπαραγωγή, προσομοίωση και ποσοτικοποίησή τους, με την εφαρμογή συγκεκριμένων δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης (accelerated ageing testing, AAT) [17-23]. Στην συντριπτική τους πλειοψηφία, οι εφαρμοζόμενες AAT περιλαμβάνουν σειρά συγκεκριμένων, καλά ορισμένων, επιταχυνόμενων καταπονήσεων, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί με βάση υπάρχοντα διεθνή πρότυπα πιστοποίησης, κυριότερα εκ των οποίων είναι τα 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 6.1 Δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης για την μελέτη βλαβών Φ/Β πλαισίων [4].

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

Στον Πίνακα 6.1 παρατίθενται συνοπτικά οι κυριότερες ΑΑΤ που αναπτύχθηκαν και εφαρμόζονται στην δοκιμή και μελέτη βλαβών κρυσταλλικού πυριτίου [4]. 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.

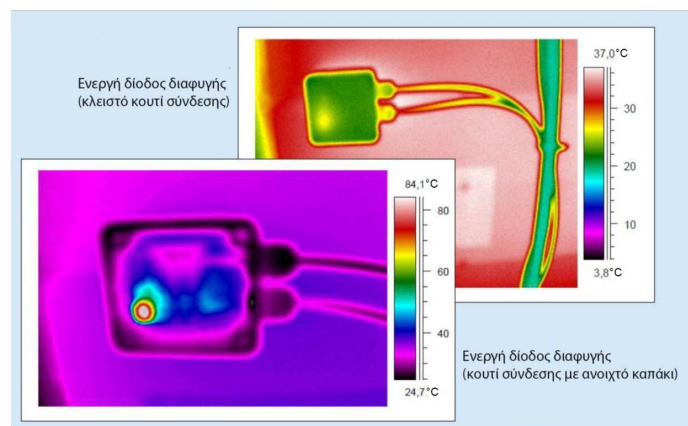


Σχήμα 6.2. Δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης κατά το πρότυπο IEC 61215 [24].

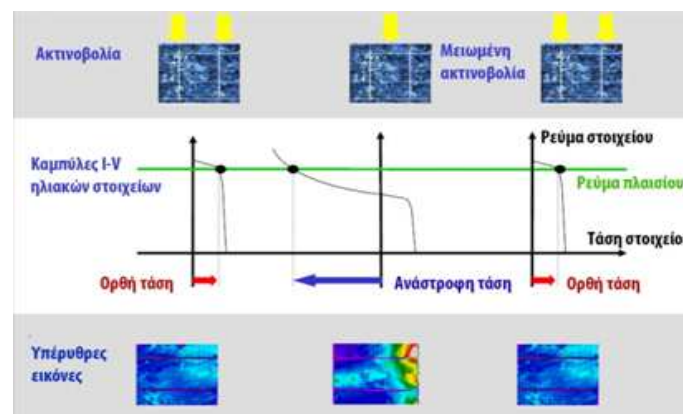
Οι δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης που περιλαμβάνονται στο πρότυπο IEC 61215, δίνονται στο Σχήμα 6.2, με σειρά εφαρμογής, και περιλαμβάνουν τις εξής διαδικασίες [25,26]:

- Προετοιμασία (preconditioning) Φ/Β πλαισίου σε ακτινοβολία $5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$.
- Έλεγχο των ηλεκτρικών παραμέτρων του πλαισίου και έκθεση τους σε συνθήκες περιβάλλοντος.
- Θερμική δοκιμή της διόδου διαφυγής 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% ($1.25 \times I_{SC}$).
- Δοκιμή θερμών κελιών όπου οι 3 κυψέλες (στοιχεία) με τη χαμηλότερη R_{sh} εκτίθενται 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 $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.
- Προετοιμασία του πλαισίου 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.

- Έκθεση σε σταθερές τιμές υψηλής θερμοκρασίας +85 °C και υψηλής σχετικής υγρασίας 85% για χρονικό διάστημα 1000 ωρών.
- Δοκιμή αντοχής 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.
- 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.
- Εφαρμογή 200 θερμικών κύκλων από -40 °C έως +85 °C.
- Δοκιμή ρεύματος διαρροής, στην τάση λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 6.3. Θερμική δοκιμή διόδου διαφυγής [24].



Σχήμα 6.4. Δοκιμή θερμών κελιών [24].

Αναλυτικότερα:

- Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα μίας θερμικής δοκιμής της διόδου διαφυγής, με τη χρήση υπέρυθρης θερμογραφίας. Λόγω μη σωστής μόνωσης

του κουτιού διακλάδωσης, το οποίο περιλαμβάνει τη δίοδο διαφυγής του πλαισίου, εντοπίστηκε αυξημένη θερμοκρασία διόδου, πιθανώς λόγω διάβρωσης, ως επακόλουθο της εισχώρησης υγρασίας στο κουτί.

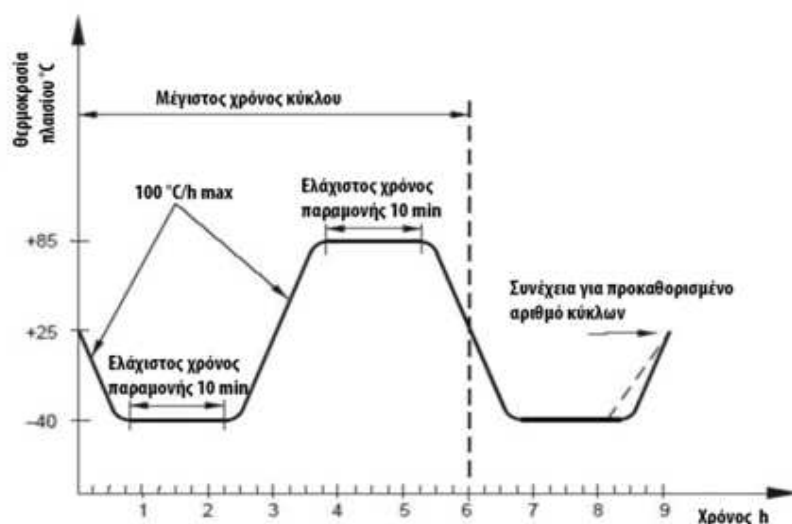
- Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται μια δοκιμή θερμών κηλίδων, στην οποία η κυψέλη που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία μειωμένης έντασης, εμφανίζει θερμή κηλίδα.
- Στο Σχήμα 6.5 απεικονίζεται ειδικός θερμοθάλαμος δοκιμών στον οποίο τοποθετείται κάθε πλαίσιο, ώστε να υποβληθεί στις απαραίτητες κλιματικές δοκιμές (θερμικοί κύκλοι, κύκλοι ψύξης, υγρασία).



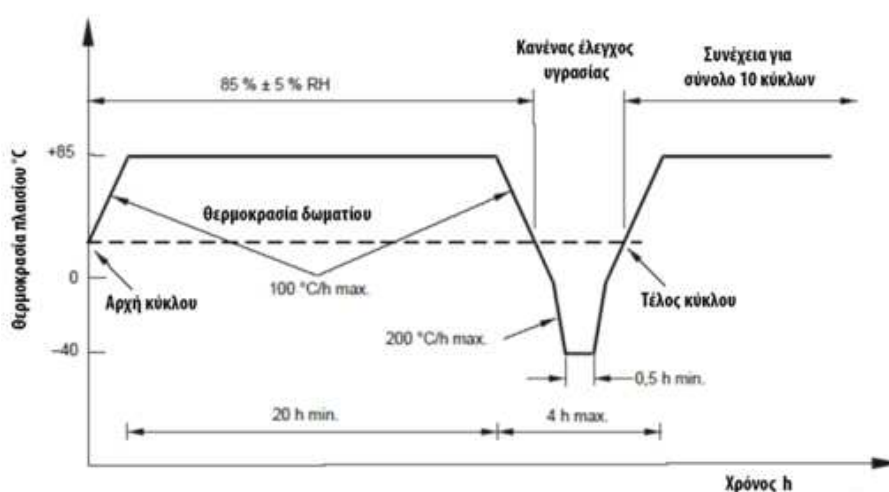
Σχήμα 6.5. Ένας τυπικός θερμοθάλαμος κλιματικών δοκιμών [24].

- Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζεται η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, για τον θερμικό κύκλο στον οποίο υποβάλλεται κάθε πλαίσιο. 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. Στη συνέχεια, το πλαίσιο θερμαίνεται σταδιακά μέχρι την θερμοκρασία των +85 °C, στην οποία, και πάλι, παραμένει το λιγότερο για 10 λεπτά. Κατόπιν, το πλαίσιο επαναψύχεται σταδιακά μέχρι την θερμοκρασία των -40 °C (ενδιάμεσα, μόλις η μειούμενη θερμοκρασία φτάσει στους +25 °C, ολοκληρώνεται ένας θερμικός κύκλος) 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.
- Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου, για τον κύκλο ψύξης στον οποίο υποβάλλεται κάθε πλαίσιο. Κάθε θερμικός κύκλος εκκινεί 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. Στην συνέχεια, το πλαίσιο ψύχεται σταδιακά μέχρι την θερμοκρασία των 0 °C, με μέγιστο ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας, της τάξεως των 100 °C/ώρα. Ακολούθως,

το πλαίσιο ψύχεται σταδιακά μέχρι την θερμοκρασία των $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, με ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας, της τάξεως των $200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ώρα}$, 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 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ και μέχρι την θερμοκρασία των $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, με μέγιστους ρυθμούς μεταβολής της θερμοκρασίας της τάξεως των $200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ώρα}$ και των $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ώρα}$ 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.

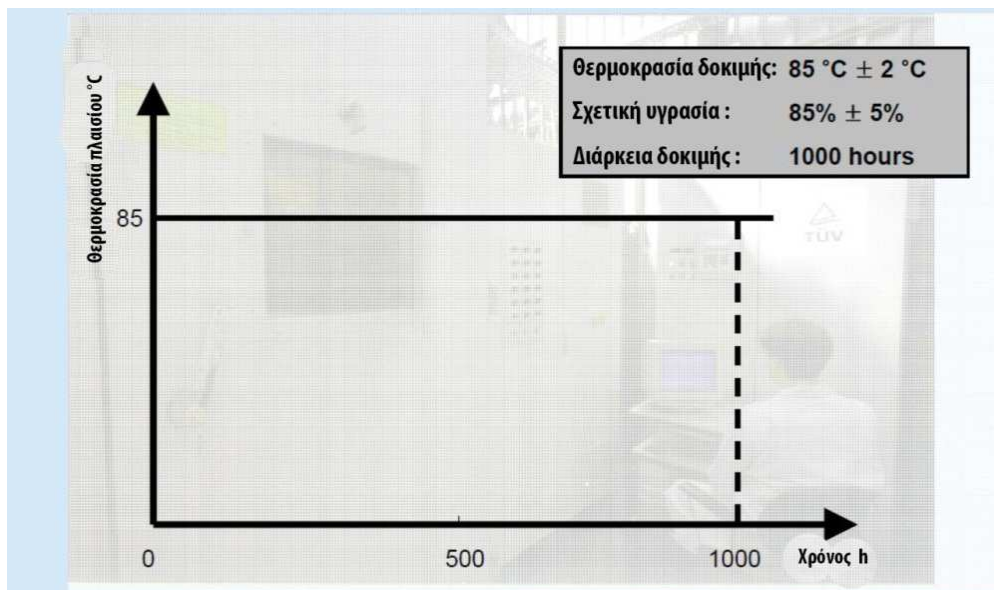


Σχήμα 6.6. Ο θερμικός κύκλος [24].

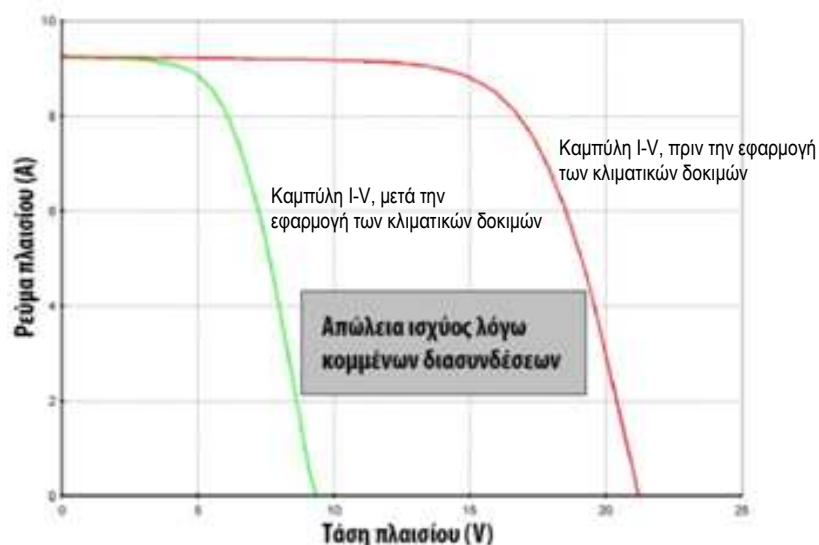


Σχήμα 6.7. Ο κύκλος ψύξης με υγρασία [24].

- Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η σταθερή καμπύλη δοκιμής του πλαισίου σε περιβάλλον αυξημένης θερμοκρασίας και υγρασίας, σύμφωνα με την οποία το πλαίσιο παραμένει, όπως προαναφέρθηκε, σε σταθερή θερμοκρασία 85 °C και σταθερή σχετική υγρασία 85%, για χρονικό διάστημα 1000 ωρών.
- Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζεται η μετρούμενη I-V Φ/Β πλαισίου πριν και μετά την εφαρμογή κλιματικών δοκιμών σε αυτό. Οι συγκεκριμένες δοκιμές επιταχυνόμενης γήρανσης προκάλεσαν τελικά αποκοπή ορισμένων διασυνδέσεων κυψελών, με συνέπεια την ραγδαία απώλεια ισχύος του πλαισίου (“αποτυχία/fail”).

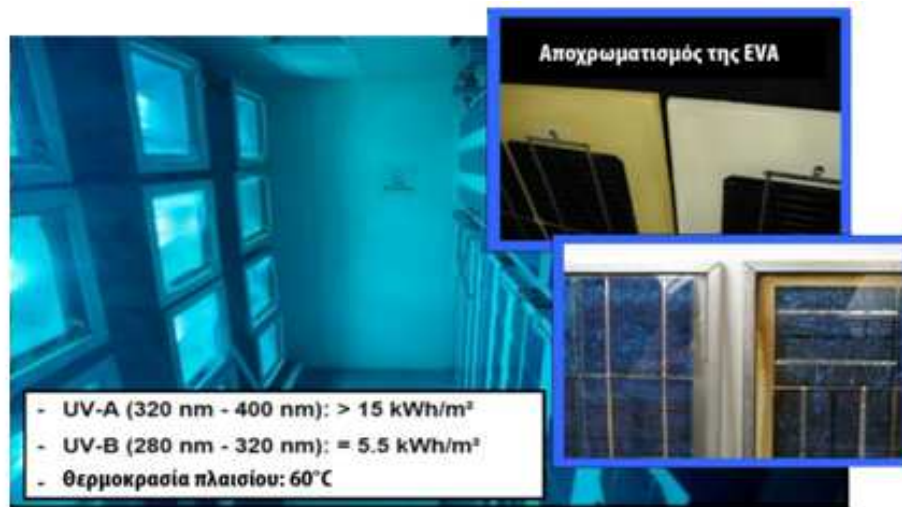


Σχήμα 6.8. Δοκιμή έκθεσης σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας [24].



Σχήμα 6.9. Μετρούμενη απώλεια ισχύος σε Φ/Β πλαίσιο, λόγω κομμένων διασυνδέσεων κυψελών μετά την εφαρμογή κλιματικών δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης. [24].

- Το Σχήμα 6.10 παρουσιάζει την διαδικασία προετοιμασίας Φ/Β πλαισίων σε υπεριώδη ακτινοβολία, στην οποία τα πλαίσια εκτίθενται και σε ακτινοβολίες UV-A και UV-B. Στο ίδιο Σχήμα, διακρίνεται επίσης ο αποχρωματισμός της μεμβράνης ενθυλάκωσης EVA σε ορισμένα πλαίσια, τα οποία φυσικά “απέτυχαν” στην συγκεκριμένη δοκιμή.
- Στο Σχήμα 6.11 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.

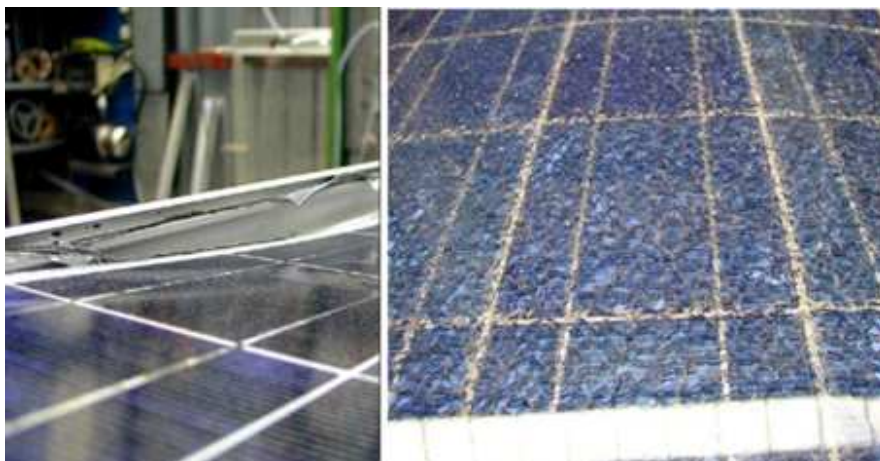


Σχήμα 6.10. Προετοιμασία (preconditioning) έκθεσης Φ/Β πλαισίου σε υπεριώδη ακτινοβολία UV-A και UV-B [24].



Σχήμα 6.11. Διάταξη και διαδικασία δοκιμής μηχανικής καταπόνησης [24].

- Τέλος, στο Σχήμα 6.12 απεικονίζεται η θραύση του υπερστρώματος του γυαλιού, στο εμπρόσθιο τμήμα πλαισίου, το οποίο “απέτυχε” στην δοκιμή μηχανικής καταπόνησης.



Σχήμα 6.12. Αποτυχία πλαισίου, λόγω θραύσης του υπερστρώματος του γυαλιού, κατά τη δοκιμή μηχανικής καταπόνησης [24].

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61215, τίθενται συγκεκριμένα κριτήρια έγκρισης και πιστοποίησης ενός Φ/Β πλαισίου (αποτέλεσμα: “επιτυχία”/pass), τα οποία έχουν ως εξής [26]:

- Το ποσοστό μείωσης της ισχύος εξόδου του Φ/Β πλαισίου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 8%, μετά το πέρας όλων των δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης.
- Δεν πρέπει να επέλθει κανένα ανοιχτοκύκλωμα 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 σκοπός της εφαρμογής των ΑΑΤ δεν είναι η μελέτη των μηχανισμών φθοράς και βλαβών των Φ/Β πλαισίων, αλλά η πιστοποίηση του προϊόντος, το πρότυπο IEC 61215 προβλέπει συγκεκριμένη διαδικασία η οποία ακολουθείται όταν ένα πλαίσιο αποτύχει στις καταπονήσεις και τις δοκιμές που περιγράφηκαν. Αυτή έχει ως εξής [24,26]:

- ο Εάν το δείγμα-πλαίσιο αποτύχει σε μία μεμονωμένη δοκιμή, τότε:
 - Το δείγμα αποστέλλεται πίσω 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.

ο Εάν το δείγμα αποτύχει σε πολλαπλές δοκιμές, τότε απορρίπτεται απ' ευθείας.

Από τις συνολικές δοκιμές του προτύπου IEC 61215 που παρουσιάστηκε, οι ευρύτερα εφαρμοζόμενες, σε μελέτες AAT και εξέλιξης/διάδοσης βλαβών Φ/Β πλαισίων, είναι οι κλιματικές δοκιμές και οι δοκιμές μηχανικών καταπονήσεων, με τις πρώτες να καλύπτουν το μεγαλύτερο φάσμα ενδεχόμενων βλαβών [4]. Σε αυτές περιλαμβάνονται βλάβες τόσο στον πίνακα ηλιακών κυψελών (όπως ρωγμές ή θραύσεις κυψελών και αποκοπή μεταλλικών συνδέσεων), όσο και στο στρώμα ενθυλάκωσης EVA (όπως αποκολλήσεις, αποχρωματισμοί και εγκλωβισμός φυσαλίδων υγρασίας και αέρα), οι οποίες – όπως έχει ήδη εξηγηθεί - συχνά οδηγούν στην εμφάνιση “ανώμαλων” θερμοκρασιακών προφίλ ή ακόμα και θερμών κηλίδων. Έτσι λοιπόν, για την προγνωστική μελέτη AAT του παρόντος Κεφαλαίου, και βάσει του άμεσα διαθέσιμου εργαστηριακού εξοπλισμού, τα υπό εξέταση Φ/Β πλαίσια υποβλήθηκαν σε συγκεκριμένη κλιματική δοκιμή, η διαδικασία της οποίας παρουσιάζεται σε Υποενότητα που ακολουθεί.

4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΟΜΕΝΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ

Στις τρεις μελέτες περίπτωσης που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5, αποδείχθηκε η πολλά υποσχόμενη δυναμική της υπέρυθρης θερμογραφίας στην διάγνωση βλαβών και, γενικά, της κατάστασης και της απόδοσης Φ/Β πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου. Τα ιδιαίτερα δε ενθαρρυντικά αποτελέσματα των διαγνωστικών αυτών μελετών παρείχαν χρήσιμες πληροφορίες για την αξιολόγηση της θέσης, της έκτασης, καθώς και του θερμικού/ενεργειακού αντίκτυπου κάθε βλάβης στο Φ/Β πλαίσιο. Συνήθως, ωστόσο, ο διαγνωστικός έλεγχος είναι στιγμιαίος χαρακτήρα, παρέχει ελάχιστες πληροφορίες σχετικά με την μελλοντική εξέλιξη μιας βλάβης και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται για βραχυπρόθεσμες αξιολογήσεις. Όμως, εύλογα προκύπτει η ανάγκη:

- Κατανόησης του μηχανισμού διάδοσης κάθε βλάβης
- Πρόγνωσης της πιθανής εξέλιξης κάθε υπάρχουσας βλάβης

- Πρόγνωσης της πιθανής εμφάνισης νέων βλαβών
- Ποιοτικής και ποσοτικής πρόγνωσης/αξιολόγησης της επίδρασης κάθε βλάβης στην θερμική συμπεριφορά και, εν τέλει, στην απόδοση του Φ/Β πλαισίου.

Βέβαια, γίνεται αντιληπτό ότι η παρακολούθηση της κατάστασης και της εξέλιξης κάθε βλάβης, είναι πρακτικά ανέφικτη στα επίπεδα τυπικής διάρκειας ζωής ενός Φ/Β πλαισίου. Με άλλα λόγια, δεν μπορεί να θεωρηθεί αποδοτική η αναμονή 20 ή και 25 ετών ώστε να αποτιμηθεί η απόδοση και η κατάσταση ενός Φ/Β στο οποίο διαγιγνώσκεται βλάβη αυτήν την στιγμή [4]. Για τον λόγο αυτό, προς την κατεύθυνση της πρόγνωσης πλέον, η εφαρμογή μιας διαδικασίας τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης του Φ/Β πλαισίου, προβάλλει ως μια πιθανή λύση. Στόχος, λοιπόν της συγκεκριμένης μελέτης περίπτωσης ήταν η αποτίμηση της εξέλιξης της κατάστασης και των βλαβών 3 Φ/Β πλαισίων μονοκρυσταλλικού πυριτίου, μικρής ισχύος, στα οποία εφαρμόστηκε επιταχυνόμενη γήρανση θερμικών κύκλων σε ειδικό θερμοθάλαμο, ούτως ώστε να προσομοιωθούν προσεγγιστικά μέρος του πραγματικού χρόνου ζωής και η αντίστοιχη γήρανσή τους 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 [27].

4.1 Πειραματική υλοποίηση

4.1.1 Υλικό και λογισμικό

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 εταιρίας Siemens™, τύπου SM6 (Παράρτημα Α), αποτελούμενο από 33 ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Σχήμα 6.13). Σύμφωνα με τις κατασκευαστικές προδιαγραφές, σε STC, το πλαίσιο SM6 εμφανίζει μέγιστη ισχύ εξόδου $P_{\max} = 6 \text{ W}_P$ (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 ανοιχτοκύκλωσης $V_{OC} = 19.5 \text{ V}$. Τα PV-2 και PV-3 είναι δύο όμοια Φ/Β πλαίσια της εταιρίας ETSolar™, τύπου ET-M53605 (Παράρτημα Β), το καθένα από τα οποία αποτελείται από 36 ηλιακές κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Σχήμα 6.14). Κάθε Φ/Β πλαίσιο ET-M53605 χαρακτηρίζεται, σε STC, από μέγιστη ισχύ εξόδου $P_{\max} = 5 \text{ W}_P$

(για την οποία $I_{\max} = 0.285 \text{ A}$ και $V_{\max} = 17.82$), ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{SC} = 0.315 \text{ A}$ και τάση ανοιχτού κύκλου $V_{OC} = 21.96 \text{ V}$.

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 να 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. Οι παρατηρήσεις της αρχικής αυτής μέτρησης, καθώς και των υπόλοιπων αποτελεσμάτων, θα παρουσιαστούν στην Υποενότητα 4.2.



Σχήμα 6.13. Το Φ/Β πλαίσιο τύπου Siemens™ SM6 (PV-1).



Σχήμα 6.14. Το Φ/Β πλαίσιο τύπου ETSolar™ 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 πλαισίων 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 Mikron™/Impac™, μοντέλο IVN 780-P, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στις διαγνωστικές μελέτες που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Η θερμοκάμερα IVN 780-P και τα τεχνικά της χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5, Σχήμα 5.1 και Υποενότητα 2.1.1 αντίστοιχα. Προς επαλήθευση των μετρήσεων της IVN 780-P, πραγματοποιήθηκαν συγκεκριμένες – επικουρικής φύσεως – μετρήσεις υπέρυθρης θερμογραφίας με την χρήση μιας δεύτερης θερμοκάμερας, της εταιρίας FLIR™, μοντέλο B200 (Σχήμα 6.15). 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 6.15. Ο φορητός θερμικός αναλυτής FLIR™ B200.

Η ανάλυση των θερμικών εικόνων που προσκλήθηκαν 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™. Όπως και στις διαγνωστικές μελέτες του προηγούμενου Κεφαλαίου, κάθε ηλιακή κυψέλη και κάθε σειρά (string) ηλιακών κυψελών των Φ/Β πλαισίων θεωρήθηκαν ως πολυγωνικές και γραμμικές ROI, αντίστοιχα.

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 (Σχήμα 6.16). Το συγκεκριμένο όργανο χαρακτηρίζεται από βασική ακρίβεια μέτρησης της τάξεως του 0.1%, εύρος μετρούμενων τιμών DC ρεύματος 2 mA ~ 10 A DC και εύρος μετρούμενων τιμών DC τάσεων 200 mV ~ 1000 V.



6.16. Το πολύμετρο Range™ RE69 41/2 DMM.

Για τον εμπειρικό υπολογισμό των αναμενόμενων θερμοκρασιών των κυψελών στο πεδίο, 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, τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5, Υποενότητα 3.3.1.

Τέλος, οι θερμικοί κύκλοι επιταχυνόμενης γήρανσης των Φ/Β πλαισίων, σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν σε ημιβιομηχανικό θερμοθάλαμο ελέγχου κλιματικών δοκιμών της εταιρίας Angelantoni Industrie™, τύπος GTS600, στην Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ και σε συνεργασία με την ερευνητική ομάδα του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών. Ο θερμοθάλαμος GTS600 (Σχήμα 6.17) έχει δυνατότητα ελεγχόμενης θερμοκρασίας δοκιμών εύρους από -20 έως +80 °C, με ακρίβεια ± 1 °C σε σταθερές συνθήκες, δυνατότητα ελέγχου σχετικής υγρασίας εύρους 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 μελέτης. 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 Idustrie™, σε ηλεκτρονικό υπολογιστή διασυνδεδεμένο με την μονάδα ελέγχου του θερμοθαλάμου.



Σχήμα 6.17. Ο ημιβιομηχανικός θερμοθάλαμος ελέγχου κλιματικών δοκιμών, τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης, Angelantoni™ GTS600.

4.1.2 Πειραματική διάταξη και συνθήκες μέτρησης

Τόσο οι υπέρυθρες θερμογραφίες πεδίου, όσο και οι μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών των Φ/Β πλαισίων, διενεργήθηκαν σε δύο χώρους:

- Στην οροφή του κτιρίου εργαστηρίων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ, στην Ξάνθη (συντεταγμένες εγκατάστασης: 41°142' N, 24°89' E, μέσο υψόμετρο: 40 m), στα δύο από τα τρία στάδια της μελέτης: πριν και μετά την εφαρμογή της τεχνητής γήρανσης.
- Στην οροφή κτιρίου του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, στην Αθήνα (συντεταγμένες εγκατάστασης: 37°976' N, 23°78' E, μέσο υψόμετρο: 100 m), στο ενδιάμεσο στάδιο της μελέτης: στο μέσο του συνολικού χρόνου εφαρμογής της τεχνητής γήρανσης.

Διευκρινίζεται ότι, πλην του χρονικού διαστήματος διεξαγωγής των μετρήσεων, τα Φ/Β πλαίσια παρέμεναν εκτός πεδίου, σε κλειστό εργαστηριακό χώρο, έτσι ώστε η θερμοκρασία T_c

των ηλιακών κυψελών να προσεγγίζει την τυπική τιμή θερμοκρασίας δωματίου (~25 °C). Οι ηλεκτρικές μετρήσεις διενεργούνταν σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας (απουσία νέφωσης), κατά τις πρώτες στιγμές (για χρόνο $t < 5 \text{ min}$) έκθεσης των Φ/Β πλαισίων στο πεδίο και πριν επέλθει σημαντική αύξηση της T_c λόγω της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας ($G_T \approx 1000 \text{ W/m}^2$) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Με αυτόν τον τρόπο, οι συνθήκες μέτρησης του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις συνθήκες STC. Βέβαια, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στην Υποενότητα 4.2.2, οι όποιες αναπόφευκτες αποκλίσεις από τις STC, αντισταθμίστηκαν με την αναγωγή των κατασκευαστικών τιμών I_{SC} και V_{OC} κάθε πλαισίου στις αντίστοιχες πραγματικές τιμές βάσει των συνθηκών της εκάστοτε μέτρησης.

Οι υπέρυθρες θερμογραφίες έπτοναν χρονικά των ηλεκτρικών μετρήσεων και πραγματοποιήθηκαν, υπό συνθήκες βραχυκύκλωσης για κάθε πλαίσιο, και για χρόνο έκθεσης στο πεδίο $t > 15 \text{ min}$, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η κατάλληλη θερμική διέγερση των πλαισίων και η εμφάνιση ενδεχόμενων ΔT σε σημεία βλαβών. Ο προσανατολισμός των Φ/Β πλαισίων ήταν νότιος, ενώ η (σταθερή) κλίση τους, ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ήταν ίση με $\theta_1 = \theta_{opt,annual} \approx 32^\circ$. Τέλος, η απόσταση μεταξύ κάθε μετρούμενου πλαισίου και της θερμοκάμερας ορίστηκε σταθερή, σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, και ίση με $d \approx 0.5 \text{ m}$.

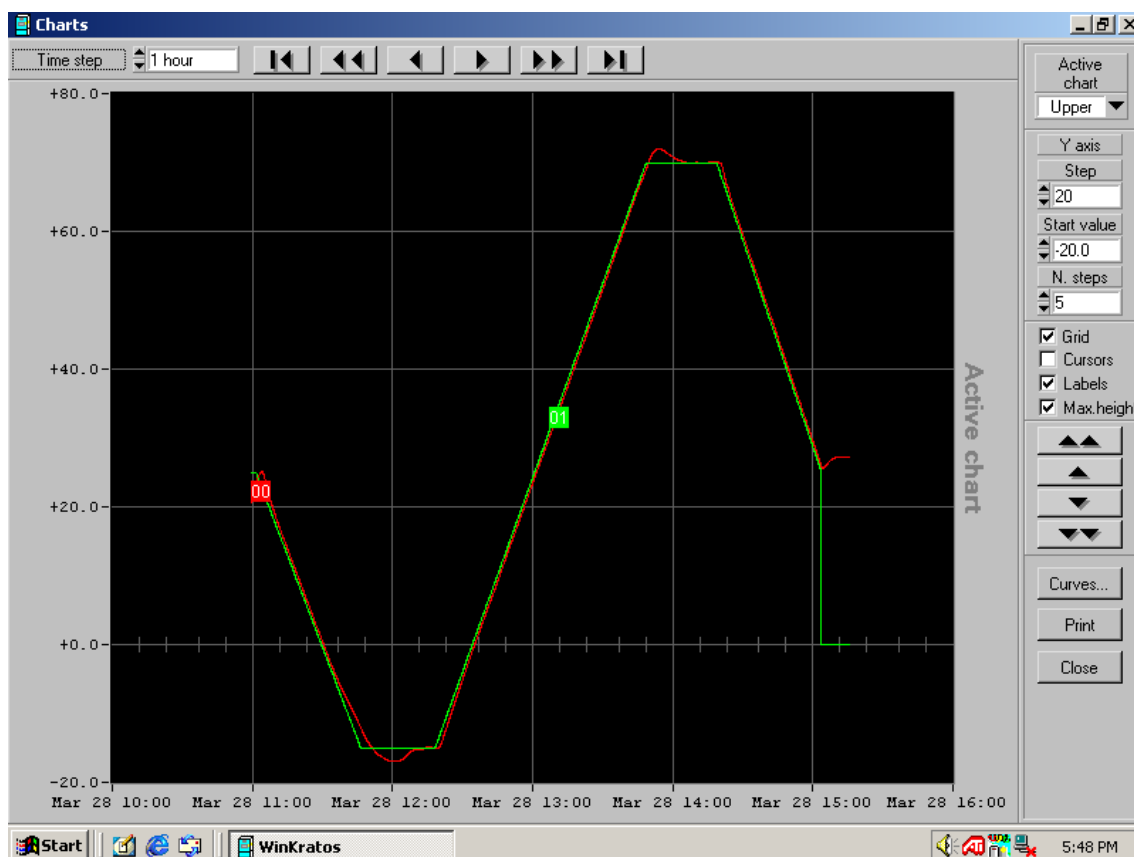
Στον Πίνακα 6.2, λοιπόν, δίνονται οι περιβαλλοντικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την αρχική ρύθμιση της θερμοκάμερας (αντιστάθμιση της ατμόσφαιρας), τον υπολογισμό της αναμενόμενης θερμικής απόκρισης της επιφάνειας των ηλιακών κυψελών και την αναγωγή των κατασκευαστικών τιμών I_{SC} και V_{OC} 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. Όπως θα εξηγηθεί στην επόμενη Υποενότητα, 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 6.2. 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

4.1.3 Θερμικοί κύκλοι επιταχυνόμενης γήρανσης

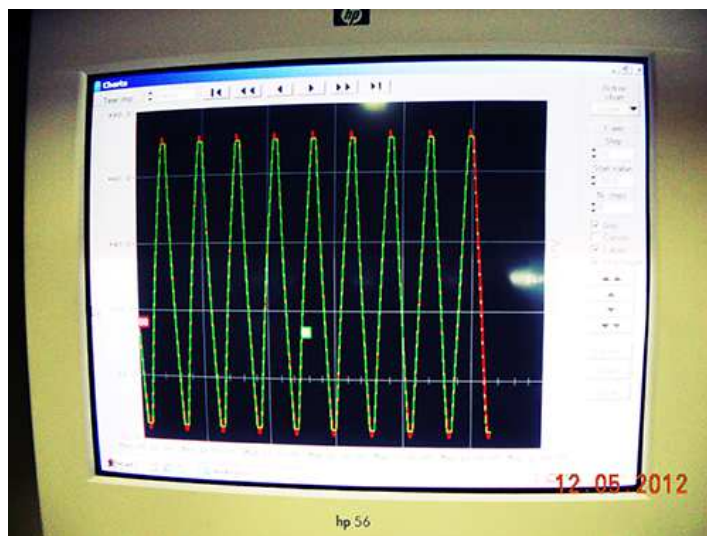
Στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζεται η καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας (άξονας Y) συναρτήσει του χρόνου (άξονας X), για τον θερμικό κύκλο που σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε στα πλαίσια της επιταχυνόμενης γήρανσης των Φ/Β πλαισίων αυτής της μελέτης. Ο συγκεκριμένος θερμικός κύκλος σχεδιάστηκε στα πρότυπα του αντίστοιχου προτεινόμενου θερμικού κύκλου της IEC 61215, λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη το περιορισμένο εύρος θερμοκρασιών ελέγχου του θερμοθαλάμου GTS600.



Σχήμα 6.18. Ο θερμικός κύκλος που εφαρμόστηκε κατά την διαδικασία τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης της μελέτης.

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 6.18, 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 $48\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ώρα}$, μέχρι την θερμοκρασία των $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, στην οποία, και πάλι, παραμένουν για 30 λεπτά. Τέλος, τα πλαίσια επαναψύχονται σταδιακά μέχρι την θερμοκρασία των $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ, ενδιάμεσα, μόλις η μειούμενη θερμοκρασία φτάσει στους $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 6.19 δίνεται ενδεικτικά το απόσπασμα μιας ακολουθίας 9 θερμικών κύκλων.



Σχήμα 6.19. Ακολουθία 9 θερμικών κύκλων της τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης της μελέτης.

4.2 Αποτελέσματα και συζήτηση

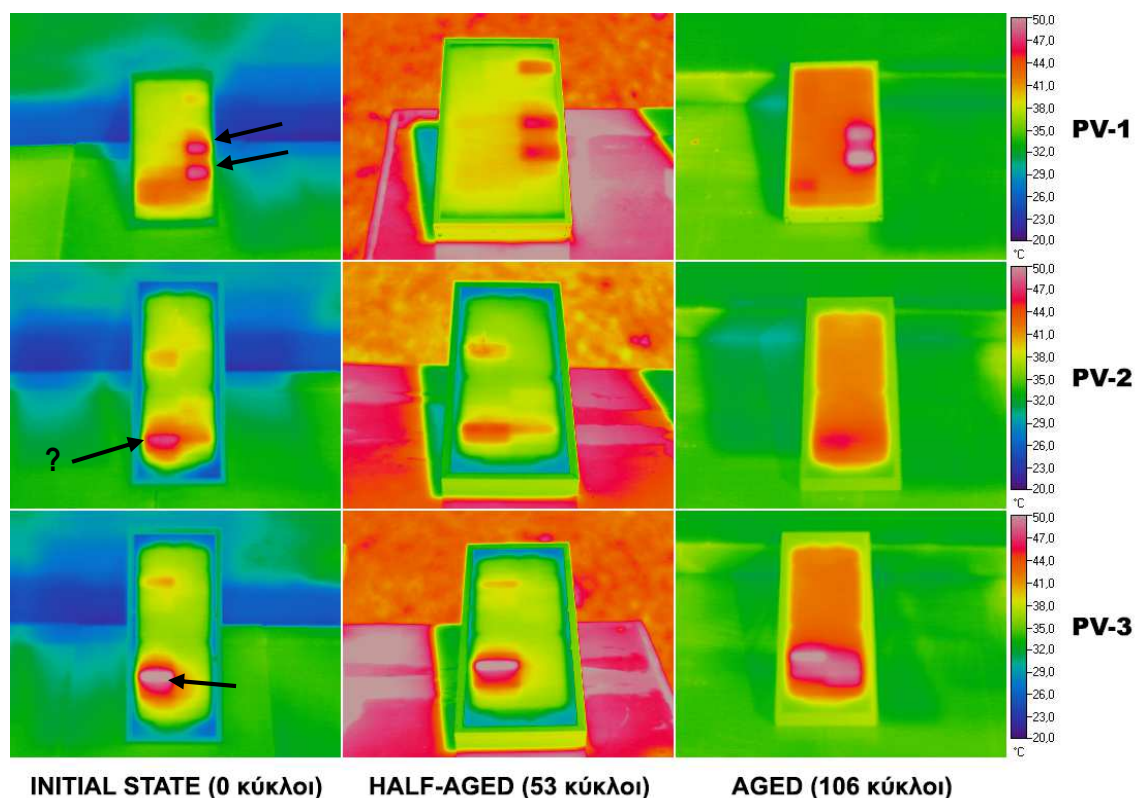
4.2.1 Εξέλιξη θερμικού αποτυπώματος βλαβών

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των διαγνωστικών μελετών του Κεφαλαίου 5, 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. Στο Σχήμα 6.20, λοιπόν, δίνονται οι προσκτηθείσες θερμικές εικόνες των PV-1, PV-2 και PV-3 (1^η, 2^η και 3^η γραμμή αντίστοιχα), πριν την εφαρμογή της τεχνητής γήρανσης, στο μέσο και μετά το πέρας αυτής (1^η, 2^η και 3^η στήλη αντίστοιχα), οι οποίες αναλύθηκαν ώστε να απαντηθούν ερωτήματα ως προς: i) την θεωρητική και πραγματική θερμοκρασία λειτουργίας των

Φ/Β πλαισίων, ii) την διακύμανση του ΔT στις “προβληματικές” περιοχές, iii) τον τρόπο και την κατεύθυνση πιθανής μετάδοσης των θερμών κηλίδων και iv) την ενδεχόμενη εμφάνιση νέων “προβληματικών” περιοχών και θερμών κηλίδων.

$$T_c = T_a + \left(\frac{0.32}{8.91 + 2 \cdot V_f} \right) \cdot G_T \quad (6.1)$$

Ξεκινώντας την ανάλυση από το Φ/Β πλαίσιο PV-1 (Σχήμα 6.20, 1^η γραμμή), στην αρχική του κατάσταση (προ τεχνητής γήρανσης), η προσοχή εστιάζεται στην ύπαρξη δύο “ύποπτων” ROI-κυψελών ασυνήθιστου θερμοκρασιακού προφίλ, στην δεξιά πλευρά του πλαισίου. Σύμφωνα με την θερμοδυναμική μοντελοποίηση του Φ/Β πλαισίου (Κεφάλαιο 2, Υποενότητα 3.2), υπενθυμίζεται ότι η θεωρητική θερμοκρασία T_c της ηλιακής κυψέλης μπορεί να υπολογιστεί από την ημι-εμπειρική Σχέση 6.1 [28]. Επίσης, σύμφωνα και με όσα ειπώθηκαν στην Υποενότητα 4.1 του Κεφαλαίου 4, οποιαδήποτε απόκλιση της μετρούμενης θερμοκρασίας κυψελών $T_{c,m}$ από την T_c κατά $\Delta T \geq 5^\circ\text{C}$, είναι ενδεικτική μιας ενδεχόμενης βλάβης.



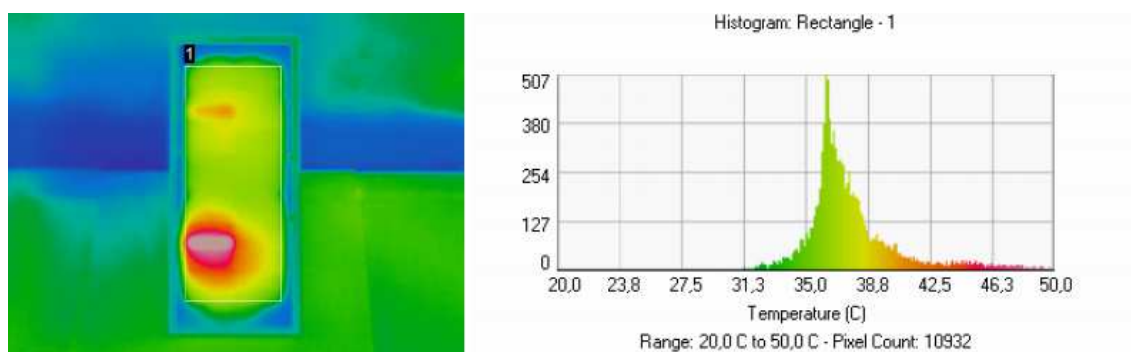
Σχήμα 6.20. Η εξέλιξη του θερμοκρασιακού προφίλ των Φ/Β πλαισίων PV-1, PV-2 και PV-3, πριν την έναρξη, στο μέσο και μετά το πέρας της επιταχυνόμενης γήρανσης θερμικών κύκλων.

Από την εφαρμογή της Σχέσης 6.1, για τις περιβαλλοντικές παραμέτρους της συγκεκριμένης χρονικής στιγμής μέτρησης (Πίνακας 6.2), προκύπτει ότι η θεωρητική τιμή θερμοκρασίας κυψέλης είναι $T_c = 38.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Πράγματι, η ανάλυση ROI του PV-1 έδωσε τιμή μετρούμενης (πραγματικής) θερμοκρασίας λειτουργίας των περισσότερων “υγιών” κυψέλων $T_{c,m1} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$, πολύ κοντά (1.8% απόκλιση) στην τιμή της T_c . Την ίδια στιγμή, η θερμοκρασία λειτουργίας των δύο “προβληματικών” περιοχών-κυψέλων μετρήθηκε $T_{c,m2} = 47.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, αντιστοιχώντας σε μια σημαντική τιμή $\Delta T = 8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, βάσει της οποίας διαγιγνώσκονται στο πλαίσιο PV-1 δύο, συνολικά, θερμές κηλίδες. Αυτές οι θερμές κηλίδες, μάλιστα, φαίνεται να επηρεάζουν την θερμική συμπεριφορά γειτονικών “υγιών” κυψέλων, αυξάνοντας την θερμοκρασία κανονικής τους λειτουργίας κατά 2 με 3 $^{\circ}\text{C}$. Φυσικά, οι συγκεκριμένες θερμές κηλίδες εξακολούθησαν να υφίστανται και να είναι εμφανείς, στην πορεία εφαρμογής των θερμικών κύκλων της μελέτης (Σχήμα 6.20, 1^η γραμμή, 2^η και 3^η στήλη), χωρίς ωστόσο να αντανakλούν σε σημαντική διακύμανση ή διαφοροποίηση του ΔT , λόγω της επίδρασης της συσσωρευόμενης γήρανσης του πλαισίου. Συγκεκριμένα, μετά την εφαρμογή 53 θερμικών κύκλων, με την αντίστοιχη ανάλυση ROI, στις “υγιείς” κυψέλες του PV-1 μετρήθηκε θερμοκρασία λειτουργίας $T_{c,m1} = 38.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, πολύ κοντά (0.5% απόκλιση) στην αναμενόμενη τιμή T_c , η οποία για τις περιβαλλοντικές συνθήκες της μέτρησης υπολογίστηκε ίση με $38.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Αντίθετα, για τις δύο θερμές κηλίδες μετρήθηκε η τιμή $T_{c,m2} = 45.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, αντιστοιχώντας σε μια τιμή $\Delta T = 7.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τέλος, μετά το πέρας των 106 θερμικών κύκλων γήρανσης, από την ανάλυση ROI καταγράφηκαν οι τιμές $T_{c,m1} = 41.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $T_{c,m2} = 49\text{ }^{\circ}\text{C}$. Έτσι, από την αναμενόμενη τιμή $T_c = 42.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ αυτής της μέτρησης, υπολογίστηκε μια απόκλιση 2.3% για τις “υγιείς” κυψέλες και μια τιμή $\Delta T = 6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ για τις θερμές κηλίδες.

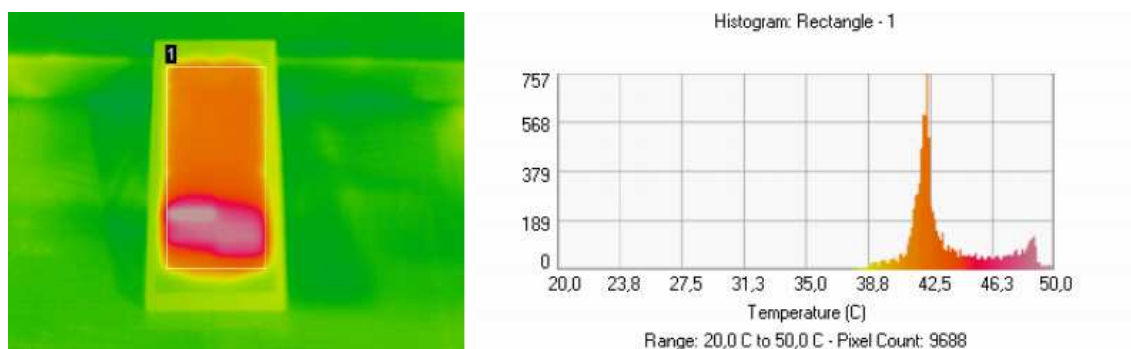
Συνεχίζοντας με αντίστοιχο τρόπο, στην ανάλυση του Φ/Β πλαισίου PV-2 (Σχήμα 6.20, 2^η γραμμή), από την αρχική του κατάσταση (προ τεχνητής γήρανσης), η προσοχή εστιάστηκε στην ύπαρξη μιας “ύποπτης” περιοχής ασυνήθιστου θερμοκρασιακού προφίλ, στην κάτω αριστερή πλευρά του πλαισίου. Για την συγκεκριμένη περιοχή, υπολογίστηκαν οι τιμές $\Delta T = 7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $\Delta T = 3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, βάσει της ανάλυσης ROI στα τρία στάδια της γήρανσης του PV-2 (πριν την έναρξη, στο μέσο και μετά το πέρας αυτής, αντίστοιχα), οι οποίες δεν συνιστούν ξεκάθαρη ένδειξη θερμής κηλίδας. Αν και, πιθανότατα, η εμφάνιση του ΔT στην περιοχή αυτή σχετίζεται με την ύπαρξη του κουτιού διακλάδωσης στην ακριβώς οπίσθια πλευρά του PV-2, περαιτέρω διερεύνηση για την ύπαρξη πιθανής βλάβης έγινε κατά την ανάλυση και της ηλεκτρικής απόδοσης κάθε πλαισίου, στην Υποενότητα 4.2.2 που ακολουθεί.

Τέλος, κατά την ανάλυση ROI του Φ/Β πλαισίου PV-3 (Σχήμα 6.20, 3^η γραμμή), η προσοχή εστιάστηκε στο ασυνήθιστο θερμοκρασιακό προφίλ μιας φαινομενικά “προβληματικής” κυψέλης, κοντά στο μέσο της αριστερής πλευρά του πλαισίου, όπως αυτή η υποδεικνύεται από

το μαύρο βέλος. Για την συγκεκριμένη ROI-κυψέλη, και για τα τρία αντίστοιχα στάδια γήρανσης, υπολογίστηκαν σημαντικά υψηλές τιμές $\Delta T = 21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $\Delta T = 8.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, βάσει των οποίων διαγνώστηκε σοβαρή ένδειξη θερμής κηλίδας. Μάλιστα, σε αντίθεση με την περίπτωση των θερμών κηλίδων του PV-1, η θερμή κηλίδα στο Φ/Β πλαίσιο PV-3 εμφανίζεται να μεταδίδεται σε γειτονικές κυψέλες, αυξάνοντας την έκταση της συνολικής προβληματικής περιοχής του πλαισίου και, συνακόλουθα, μειώνοντας περαιτέρω την ηλεκτρική απόδοσή του. Παρατηρώντας και συγκρίνοντας προσεκτικά το θερμικό αποτύπωμα της θερμής κηλίδας στο PV-3, πριν και μετά την εφαρμογή της τεχνητής γήρανσης, προκύπτει ότι με την ολοκλήρωση των 106 θερμικών κύκλων, η “προβληματική” περιοχή του πλαισίου (όπου $\Delta T \geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) καλύπτει, πλέον, επιφάνεια 4 ηλιακών κυψελών. Η συγκεκριμένη διαφοροποίηση του θερμικού αποτυπώματος αποτυπώνεται εμφανώς και κατά την σύγκριση των αντίστοιχων ιστογραμμάτων του θερμοκρασιακού προφίλ του PV-3. Ενώ, λοιπόν, το ιστόγραμμα του θερμοκρασιακού προφίλ του PV-3, πριν την γήρανση εμφανίζει μονόκορυφη κατανομή κυρίως γύρω από το διάστημα τιμών θερμοκρασίας από 35 έως 40 $^{\circ}\text{C}$ (Σχήμα 6.21), το αντίστοιχο ιστόγραμμα, μετά την επίδραση των 106 θερμικών κύκλων παρουσιάζει δικόρυφη κατανομή στα διαστήματα από 39 έως 43 $^{\circ}\text{C}$ και από 47 έως 49 $^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 6.21. Ανάλυση ιστογράμματος για το θερμοκρασιακό προφίλ του PV-3 πριν την εφαρμογή των θερμικών κύκλων επιταχυνόμενης γήρανσης της μελέτης.



Σχήμα 6.22. 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, όπως θα παρουσιαστεί εξάλλου στην επόμενη Υποενότητα. 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.

4.2.2 Εξέλιξη ηλεκτρικής απόδοσης

Όπως εξηγήθηκε στην ανάλυση της προσομοίωσης για το ηλεκτρικό μοντέλο ενός Φ/Β πλαισίου, στην Υποενότητα 3.3 του 2^{ου} Κεφαλαίου, η ύπαρξη ενός ή περισσότερων βλαβών θερμών κηλίδων περιορίζει σημαντικά την ηλεκτρική ισχύ εξόδου και, συνεπώς, την ηλεκτρική απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου. Άμεση αιτία αυτής της υποβάθμισης της απόδοσης, συνιστά η λειτουργία των “προβληματικών” κυψελών σε συνθήκες ανάστροφης πόλωσης (Κεφάλαιο 3, Υποενότητα 3.1), ενώ έμμεσες αιτίες της περαιτέρω υποβάθμισης αποτελούν η συσσωρευόμενη φθορά (γήρανση) και η αύξηση της θερμοκρασίας τόσο της “προβληματικής” περιοχής, όσο και, συνολικά, του πλαισίου, οι οποίες με την σειρά τους περιορίζουν την ηλεκτρική τάση εξόδου.

Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι με την μέτρηση των κύριων ηλεκτρικών παραμέτρων εξόδου των PV-1, PV-2 και PV-3 στο πεδίο, καθίσταται δυνατή η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της γήρανσης και των θερμών κηλίδων στην ηλεκτρική απόδοση κάθε πλαισίου, βοηθώντας παράλληλα στην επαλήθευση και στην ερμηνεία των διαγνωσμένων θερμικών αποτυπωμάτων τους, στην εξέλιξη της γήρανσης.

Στην παρούσα μελέτη, ο προσδιορισμός της εξέλιξης ηλεκτρικής απόδοσης n (%) και της υποβάθμισής της Δn (%), για κάθε Φ/Β πλαίσιο και σε κάθε στάδιο εφαρμογής των θερμικών κύκλων γήρανσης επιταχυνόμενης γήρανσης πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τα εξής βήματα:

1. Καταγραφή των κατασκευαστικών και ηλεκτρικών παραμέτρων (σε STC) των πλαισίων.
2. Υπολογισμός της ηλεκτρικής απόδοσης n (σε STC) κάθε πλαισίου.
3. Αναγωγή των I_{SC} και V_{SC} του βήματος 1, για τις περιβαλλοντικές συνθήκες κάθε μέτρησης (Πίνακας 6.2), και υπολογισμός των αντίστοιχων θεωρητικών (αναμενόμενων) τιμών τους, σε κάθε στάδιο γήρανσης και για κάθε πλαίσιο.
4. Βάσει της τιμής της V_{SC} του βήματος 3, υπολογισμός του αντίστοιχου αναμενόμενου συντελεστή 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, υπολογισμός της αναμενόμενης μέγιστης τιμής ηλεκτρικής ισχύος εξόδου P_{max} και της αναμενόμενης n , σε κάθε στάδιο γήρανσης και για κάθε πλαίσιο.
6. Ηλεκτρική μέτρηση πεδίου (με την χρήση του πολυμέτρου RE69) των πραγματικών τιμών 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, υπολογισμός του αντίστοιχου πραγματικού συντελεστή 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, υπολογισμός της πραγματικής μέγιστης τιμής ηλεκτρικής ισχύος εξόδου P_{max} και της πραγματικής n , σε κάθε στάδιο γήρανσης και για κάθε πλαίσιο.
9. Προσδιορισμός της υποβάθμισης Δn της απόδοσης κάθε πλαισίου, 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.

Αναλυτικότερα, ξεκινώντας από το 1^ο βήμα, βάσει των κατασκευαστικών προδιαγραφών και των ηλεκτρικών παραμέτρων (σε STC), για κάθε πλαίσιο συλλέχθηκαν και καταγράφηκαν οι τιμές της 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} , ενώ μετρήθηκε και προσδιορίστηκε το εμβαδόν της ωφέλιμης (καθαρής) επιφάνειας A (m²) των ηλιακών κυψελών. Διευκρινίζεται ότι ο δείκτης “0” προσδιορίζει κάθε παράμετρο, η οποία έχει δοθεί σε STC. Έχοντας καταγράψει τις προαναφερθείσες παραμέτρους, στο 2^ο βήμα η ηλεκτρική απόδοση n_0 κάθε πλαισίου υπολογίστηκε από την Σχέση 6.2 [29].

$$n_0 = \frac{P_{max-0}}{A \cdot G_{T-0}} = \frac{V_{max-0} \cdot I_{max-0}}{A \cdot G_{T-0}} = \frac{V_{OC-0} \cdot I_{SC-0} \cdot FF_0}{A \cdot 1000} \quad (6.2)$$

Συνεχίζοντας στο 3^ο βήμα, οι θεωρητικές (αναμενόμενες) 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 6.3 και 6.4 αντίστοιχα [29]. Για τους υπολογισμούς κάθε μέτρησης, οι τιμές της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας G_T (W/m²) και της θερμοκρασίας κυψέλης T_c (°C), δόθηκαν από τον Πίνακα 6.2 (2^η και 6^η γραμμή).

$$I_{SC} = \frac{G_T}{G_{T-0}} \cdot I_{SC-0} = \frac{G_T}{1000} \cdot I_{SC-0} \quad (6.3)$$

$$V_{OC} = V_{OC-0} + c \cdot (T_c - T_{c-0}) = V_{OC-0} + c \cdot (T_c - 25) \quad (6.4)$$

Από την V_{OC} (Σχέση 6.4), στο 4^ο βήμα ο αναμενόμενος συντελεστής FF , ανηγμένος στις περιβαλλοντικές συνθήκες κάθε μέτρησης μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας την ημ εμπειρική Σχέση 6.5 [30].

$$FF = \frac{V_{OC} - \ln(V_{OC} + 0.72)}{V_{OC} + 1} \quad (6.5)$$

Συνεχίζοντας στο 5^ο βήμα και συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των Σχέσεων 6.3, 6.4 και 6.5, η ανηγμένη αναμενόμενη ηλεκτρική ισχύς εξόδου P_{max} υπολογίζεται από την Σχέση 6.6 [29].

$$P_{max} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (6.6)$$

Στο ίδιο βήμα, τέλος, βάσει της P_{max} , η ανηγμένη, αναμενόμενη ηλεκτρική απόδοση n κάθε πλαισίου υπολογίζεται από την Σχέση 6.7 [29], ολοκληρώνοντας την σειρά υπολογισμών των αναμενόμενων τιμών ηλεκτρικών παραμέτρων κάθε πλαισίου, ανηγμένων στις περιβαλλοντικές συνθήκες κάθε μέτρησης.

$$n = \frac{P_{max}}{A \cdot G_T} \quad (6.7)$$

Χρησιμοποιώντας, τώρα, τις μετρούμενες πραγματικές τιμές των I_{SC} και V_{OC} (6^ο βήμα), η διαδικασία υπολογισμού των FF , P_{max} και n (βήματα 7 και 8), 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 την εφαρμογή των Σχέσεων 6.5, 6.6 και 6.7. Με αυτόν τον τρόπο, στο 9^ο και τελευταίο βήμα, υπολογίστηκε, τελικά, η ζητούμενη ποσοστιαία υποβάθμιση Δn της απόδοσης κάθε πλαισίου, για κάθε στάδιο γήρανσης, από την σύγκριση των τιμών της αναμενόμενης και της πραγματικής τιμής n , όπως αυτές προέκυψαν από την εφαρμογή της Σχέσης 6.7. 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



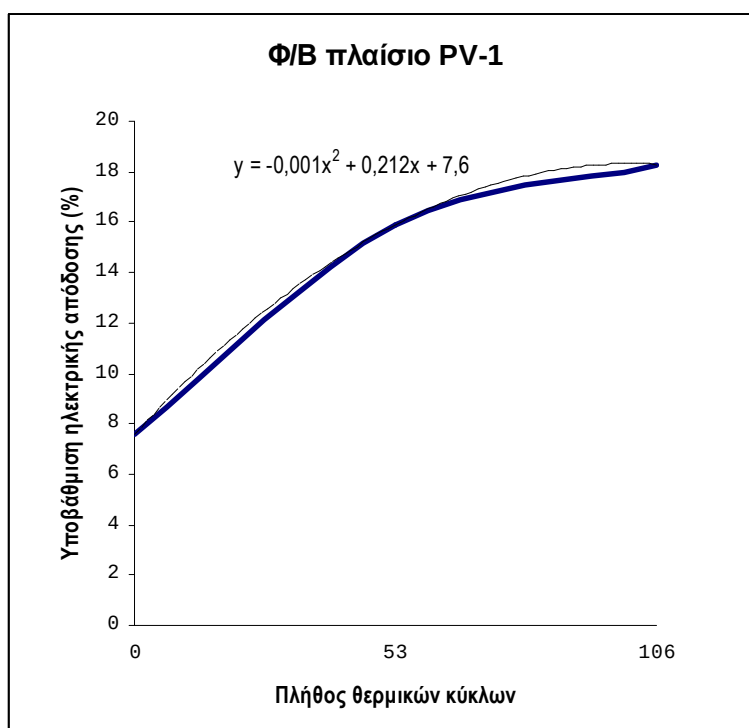
κύκλοι) και μετά το πέρας (106 θερμικοί κύκλοι) της επιταχυνόμενης γήρανσης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3. Κατασκευαστικές (@ STC) και θεωρητικές (αναμενόμενες) τιμές κύριων 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.

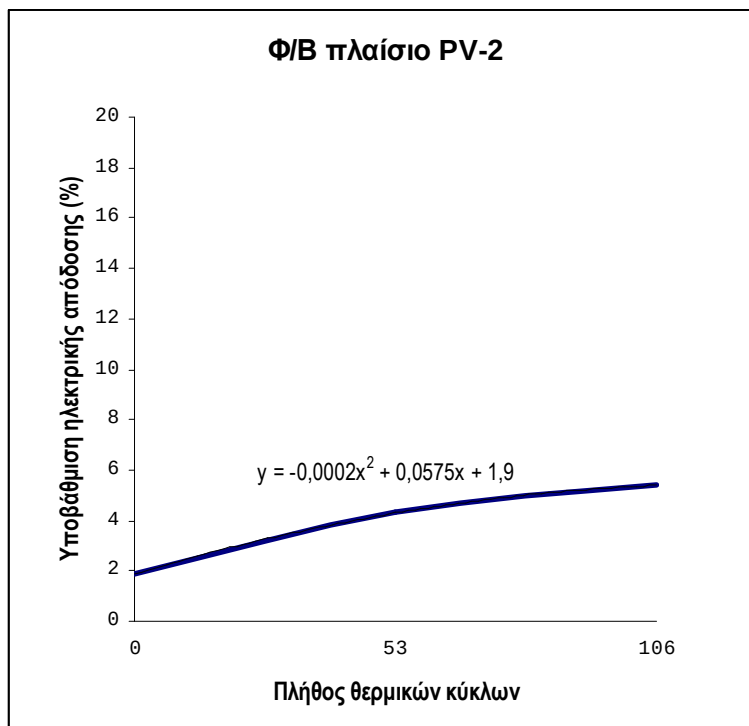
	Παράμετρος	Τιμή @ STC	Θεωρητικές (αναμενόμενες) τιμές			Μετρούμενες (πραγματικές) τιμές		
			0	53	106	0	53	106
PV-1	P_{max} (W)	6.00	5.657	5.545	5.766	5.228	4.664	4.713
	I_{max} (A)	0.39						
	I_{sc} (A)	0.42	0.401	0.397	0.411	0.374	0.342	0.350
	V_{max} (V)	15.00						
	V_{oc} (V)	19.50	19.346	19.192	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 (m ²)	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 (m ²)	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 (m ²)	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 6.3, 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 6.23, 6.24 και 6.25 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:

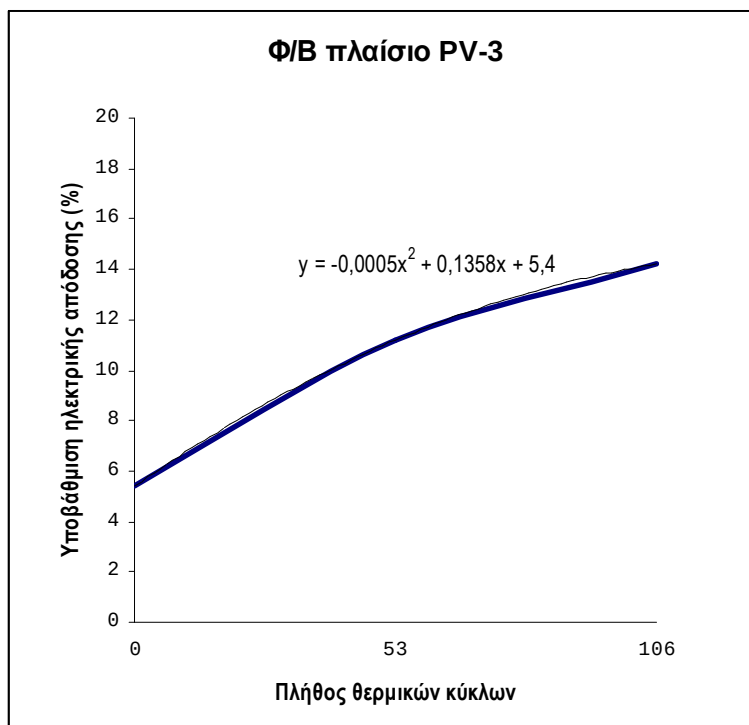
- Κατά το διάστημα μεταξύ 0 και 53 θερμικών κύκλων, ο ρυθμός υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης είναι σημαντικά μεγαλύτερος (κατά 4 φορές για το PV-1, κατά 2.5 φορές για τα PV-2 και PV-3) από τον αντίστοιχο για το διάστημα μεταξύ 53 και 106.
- Η υποβάθμιση της ηλεκτρικής απόδοσης μετά την ολοκλήρωση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



Σχήμα 6.23. Εξέλιξη της ποσοστιαίας υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης του PV-1 από τους 0 (πριν την γήρανση) έως τους 106 (μετά την γήρανση) θερμικούς κύκλους.



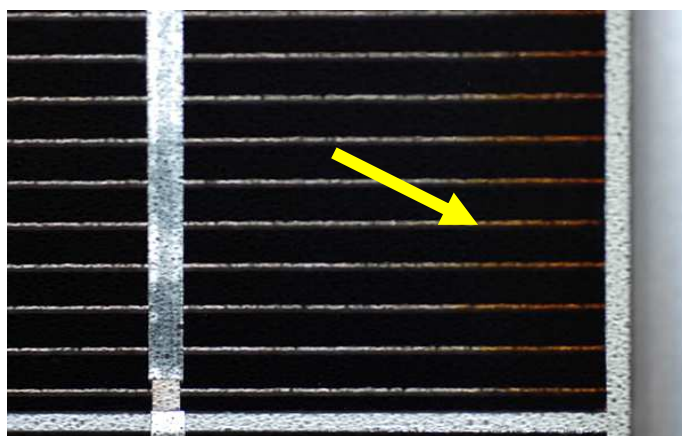
Σχήμα 6.24. Εξέλιξη της ποσοστιαίας υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης του PV-2 από τους 0 (πριν την γήρανση) έως τους 106 (μετά την γήρανση) θερμικούς κύκλους.



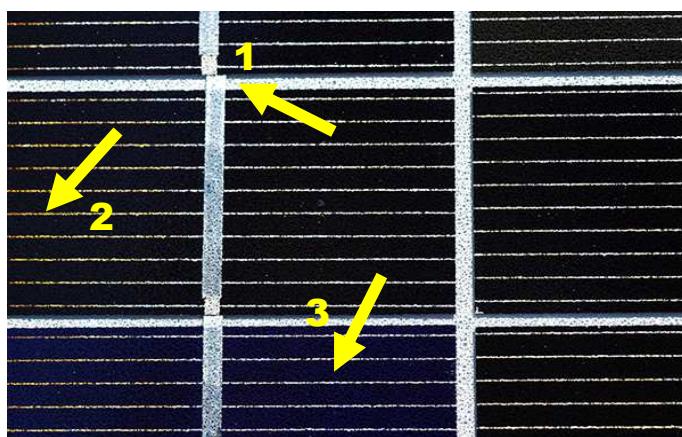
Σχήμα 6.25. Εξέλιξη της ποσοστιαίας υποβάθμισης της ηλεκτρικής απόδοσης του PV-3 από τους 0 (πριν την γήρανση) έως τους 106 (μετά την γήρανση) θερμικούς κύκλους.

4.2.3 Οπτικές παρατηρήσεις

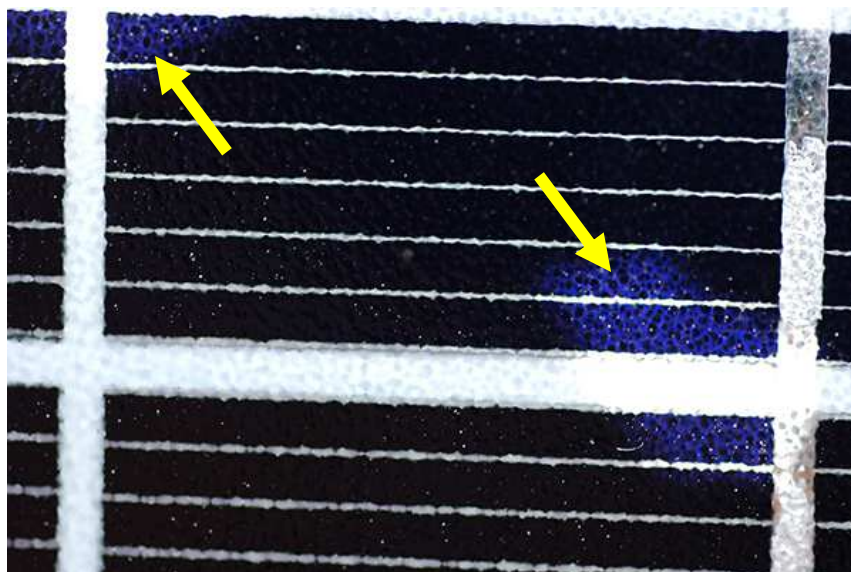
Παράλληλα με την εξέλιξη του θερμοκρασιακού προφίλ και της ηλεκτρικής απόδοσης των PV-1, PV-2 και PV-3, στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν και οι πιθανές επιπτώσεις των θερμικών κύκλων επιταχυνόμενης γήρανσης στα μορφολογικά χαρακτηριστικά κάθε Φ/Β πλαισίου της μελέτης. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν λήψεις οπτικής μικροσκοπίας, στην Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ και σε συνεργασία με την ερευνητική ομάδα του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, με την προσαρμογή και χρήση ειδικού φωτογραφικού φακού Nikkor™ AF Micro 60 mm στην εμπρόσθια επιφάνεια κάθε πλαισίου (Σχήματα 6.26 – 6.28).



Σχήμα 6.26. Εικόνα οπτικής μικροσκοπίας στο PV-1, σε τμήμα κυψέλης με θερμή κηλίδα, όπου παρατηρείται εκτεταμένος αποχρωματισμός του στρώματος ενθυλάκωσης EVA (καφέ χρώμα).



Σχήμα 6.27. Εικόνα οπτικής μικροσκοπίας στο PV-1, σε τμήματα κυψέλων με πιθανότητα μελλοντικής εμφάνισης θερμής κηλίδας, όπου παρατηρούνται “χαλάρωση” της μεταλλικής διασύνδεσης (1) και αποχρωματισμός (2) και αλλοίωση (3) του στρώματος ενθυλάκωσης EVA (καφέ και κυανό χρώμα αντίστοιχα).



Σχήμα 6.28. Εικόνα οπτικής μικροσκοπίας στο PV-3, σε τμήμα κυψέλης με θερμή κηλίδα, όπου παρατηρείται εκτεταμένη αλλοίωση του στρώματος ενθυλάκωσης EVA (κυανό χρώμα).

Εστιάζοντας σε ενδεικτικές εικόνες μικροσκοπίας “προβληματικών” περιοχών που εντοπίστηκαν και διαγνώστηκαν στα PV-1 και PV-3, με την υπέρυθρη θερμογράφησή τους, μπορούν να γίνουν οι εξής, ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις:

- Στο PV-1, σε τμήμα της μίας εκ των δύο κυψελών στις οποίες διαγνώσθηκε “ανώμαλο” θερμοκρασιακό προφίλ, στην εικόνα οπτικής μικροσκοπίας μετά την ολοκλήρωση των 103 θερμικών κύκλων, εμφανίζεται εκτεταμένος αποχρωματισμός του στρώματος ενθυλάκωσης EVA (καφέ χρώμα).
- Στο PV-1, σε τμήματα κυψέλων με πιθανότητα μελλοντικής εμφάνισης θερμής κηλίδας (στο κάτω αριστερό μέρος του πλαισίου), μετά την ολοκλήρωση των 103 θερμικών κύκλων παρατηρούνται σημεία “χαλαρής” μεταλλικής διασύνδεσης καθώς και αποχρωματισμού και μορφολογικής αλλοίωσης του στρώματος ενθυλάκωσης EVA (καφέ και κυανό χρώμα αντίστοιχα).
- Στο PV-3, σε τμήμα της κυψέλης στην οποία διαγνώσθηκε “ανώμαλο” θερμοκρασιακό προφίλ, στην εικόνα οπτικής μικροσκοπίας μετά την ολοκλήρωση των 103 θερμικών κύκλων, εμφανίζεται εκτεταμένη αλλοίωση των πόρων του στρώματος ενθυλάκωσης EVA (κυανό χρώμα).

Φυσικά, οι συγκεκριμένες μορφολογικές αλλοιώσεις, κυρίως – όπως αποδεικνύεται – του στρώματος EVA, σχετίζονται άμεσα τόσο με σημαντική υποβάθμιση της ηλεκτρικής απόδοσης των PV-1 και PV-3, όπως αυτή μετρήθηκε και υπολογίστηκε στην προηγούμενη Υποενότητα, όσο και με την εμφάνιση ασυνήθιστα υψηλών τιμών $\Delta T \geq 5^\circ\text{C}$ στις αντίστοιχες

θερμικές εικόνες. Συνιστούν δε αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης των υπάρχοντων θερμών κηλίδων και των θερμικών κύκλων επιταχυνόμενης γήρανσης στα συγκεκριμένα υλικά των στρωμάτων του πλαισίου σε συνδυασμό με την ύπαρξη

5. ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν το θεωρητικό υπόβαθρο, η διαδικασία υλοποίησης και τα αποτελέσματα πειραματικής μελέτης εφαρμογής 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. Βάσει των αποτελεσμάτων και της συνολικής έρευνας της προγνωστικής μελέτης που παρουσιάστηκε σε αυτό το Κεφάλαιο μπορούν να συνοψιστούν τα ακόλουθα:

- 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% (Ενότητα 2, Σχήμα 6.1) 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 αντιστοίχησης 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. [31].

Η μελέτη αυτού του Κεφαλαίου, αποτέλεσε την βάση για την συγγραφή και, τελικώς, την δημοσίευση σε διεθνές Επιστημονικό Περιοδικό, της ακόλουθης εργασίας [27]:

- J.A. Tsanakas, M. Karoglou, E.T. Delegou, P.N. Botsaris, A. Bakolas and A. Moropoulou, "Assessment of the Performance and Defect Investigation of PV Modules after Accelerated Ageing Tests", Renewable Energy and Power Quality Journal, 11, 2013.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. D. Polverini, M. Field, E. Dunlop and W. Zaiman, "Polycrystalline Silicon PV Modules Performance and Degradation Over 20 Years", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, DOI: 10.1002/pip.2197, 2012.
2. P. Sanchez-Friera, M. Piliouge, J. Pelaez, J. Carretero and M.S. de Cardona, "Analysis of Degradation Mechanisms of Crystalline Silicon PV Modules after 12 Years of Operation in Southern Europe", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 19, 2011.
3. 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, Vol. 133, 021012, 2011.
4. J. Wohlgemuth, "IEC-61215: What it is and isn't", NREL PV Module Reliability Workshop, Golden, Colorado, U.S.A., 2012.
5. W. Dallas, O. Polupan and S. Ostapenko, "Resonance Ultrasonic Vibrations for Crack Detection in Photovoltaic Silicon Wafers", Measurement Science and Technology, 18, 2007.

6. A. Krenzinger and A.C. de Andrade, "Accurate Outdoor Glass Thermographic Thermometry Applied to Solar Energy Devices", *Solar Energy*, 81, 2007.
7. O. Breitenstein, J.P. Rakotoniaina, M. Kaes, S. Seren, T. Pernau, G. Hahn, W. Warta and J. Isenberg, "Lock-in Thermography - A Universal Tool for Local Analysis of Solar Cells", *Proceedings of The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC)*, Barcelona, Spain, 2005.
8. N.J.C.M. Van der Borg and A.R. Burgers, "Thermography: Quality Control for Module Manufacturing", *Proceedings of The 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, 2003.
9. R. Gupta and O. Breitenstein, "Unsteady-state Lock-in Thermography - Application to Shunts in Solar Cells", *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 4(1), 2007.
10. M. Kasemann, M.C. Schubert, M. The, M. Kober, M. Hermle and W. Warta, "Comparison of Luminescence Imaging and Illuminated Lock-in Thermography on Silicon Solar Cells", *Applied Physics Letters*, 89, 224102, 2006.
11. T. Fuyuky, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahaschi and Y. Uraoka, "Photographic Surveying of Minority Carrier Diffusion Length in Polycrystalline Silicon Solar Cells by Electroluminescence", *Applied Physics Letters*, 86, 262108, 2005.
12. A. Pregelj, M. Begovic, R. Ajeet, A. Rohatgi and A. Ristow, "Estimation of PV System Reliability Parameters", *Proceedings of The 17th European PV Solar Energy Conference*, Munich, Germany, 2001.
13. M. Vazquez and I. Rey-Stolle, "Photovoltaic Module Reliability Model Based on Field Degradation Studies", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16, 2008.
14. D.C. Jordan and S.R. Kurtz, "Photovoltaic Degradation Rates - an Analytical Review", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, DOI: 10.1002/pip.1182, 2011.
15. O.S. Sastry, S. Saurabh, S.K. Shil, P.C. Pant, R. Kumar, A. Kumar and B. Bandopadhyay, "Performance Analysis of Field Exposed Single Crystalline Silicon Modules", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94, 2010.
16. G. Vachtsevanos, F.L. Lewis, M. Roemer, A. Hess and B. Wu, "Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems", *John Wiley & Sons*, U.S.A., 2006.
17. K.R. McIntosh, N.E. Powell, A.W. Norris, J.N. Cotsell and B.M. Ketola, "The Effect of Damp-Heat and UV Aging Tests on the Optical Properties of Silicone and EVA Encapsulants", *Progress Photovoltaics: Research and Applications*, 19, 2011.
18. P. Hacke, K. Terwilliger, S. Glick, D. Trudell, N. Bosco, S. Johnston and S. Kurtz, "Test-to-Failure of Crystalline Silicon Modules", *Proceedings of The 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Honolulu (Hawaii), U.S.A., 2010.
19. P. Hacke, M. Kempe, K. Terwilliger, S. Glick, N. Call, S. Johnston and S. Kurtz, "Characterization of Multicrystalline Silicon Modules with System Bias Voltage Applied in

- Damp Heat", Proceedings of The 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 2010.
20. J.K. Mathew, J. Kuitche and G. TamizhMani, "Test-to-Failure of PV Modules: Hotspot Testing", Proceedings of The 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu (Hawaii), U.S.A., 2010.
 21. J.H. Wohlgemuth and S. Kurtz, "Using Accelerated Testing to Predict Module Reliability", Proceedings of The 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Seattle, U.S.A., 2011.
 22. S. Kumar and G. Kumar, "Analysis of Effect of Thermal Cycling Test on Photovoltaic Module Using EL Technique", International Journal of Advances in Engineering Research, 3(5), 2012.
 23. C.E. Packard, "The Challenge to Move from 'One Size Fits All' to PV Modules the Customer Needs", Proceedings of The 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), Hamburg, Germany, 2011.
 24. TÜV Rheinland, "Type Approval Qualification of Photovoltaic Modules Procedures and Test experiences", TÜV Rheinland Korea Ltd.
 25. J.H. Wohlgemuth and S. Kurtz, "Reliability Testing Beyond Qualification as a Key Component in Photovoltaic's Progress Toward Grid Parity", National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, 2011.
 26. International Standard IEC 61215, "Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualification and Type Approval", Edition 2.0, 2005-04, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
 27. J.A. Tsanakas, M. Karoglou, E.T. Delegou, P.N. Botsaris, A. Bakolas and A. Moropoulou, "Assessment of the Performance and Defect Investigation of PV Modules after Accelerated Ageing Tests", Proceedings of The International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Bilbao, Spain, 2013.
 28. E. Skoplaki and J.A. Palyvos, "On the Temperature Dependence of Photovoltaic Module Electrical Performance: A review of Efficiency/Power Correlations", Solar Energy, 83(5), 2009.
 29. A. Luque and S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", Wiley-Interscience, Chichester, United Kingdom, 2003.
 30. M.A. Green, "Solar Cell Fill Factors: General Graph and Empirical Expressions", Solid-State Electronics, 24, 1981.
 31. McNeil Technologies, "Accelerated Aging Testing and Reliability in Photovoltaics - Workshop II Summary Report April 1st and 2nd 2008", U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Solar Energy Technologies Program, 2008.

Συμπεράσματα - Προτάσεις

Ι. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής ήταν η ποιοτική και ποσοτική αποτίμηση του δυναμικού αξιοποίησης της υπέρυθρης θερμογραφίας, ως εποπτικής μεθόδου, στην διάγνωση και πρόγνωση βλαβών σε μηχανολογικές κατασκευές, με βασική στόχευση και αντικείμενο εφαρμογής τα Φ/Β πλαίσια. Η επιλογή της συγκεκριμένης εποπτικής μεθόδου CM, με την διάγνωση/πρόγνωση βλαβών σε Φ/Β πλαίσια ως αντικείμενο μελέτης και εφαρμογής, οριοθετήθηκαν κατά την έναρξη της Διδακτορικής Έρευνας, κατόπιν εκτεταμένης βιβλιογραφικής αναζήτησης, της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στο 1^ο Κεφάλαιο.

Για την πληρέστερη δυνατή υλοποίηση του παραπάνω σκοπού, η Διδακτορική Έρευνα στηρίχτηκε στην εκτεταμένη πειραματική διερεύνηση, ανάλυση και αξιολόγηση υπέρυθρων θερμογραφίσεων Φ/Β πλαισίων, αρχικά σε επίπεδο διάγνωσης και στην συνέχεια σε επίπεδο πρόγνωσης.

Σε επίπεδο εντοπισμού και *διάγνωσης* βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, η δυναμική της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας αποτιμήθηκε εκτενώς, με την εκπόνηση τριών πειραματικών μελετών περιπτώσεων, διαφοροποιημένων ως προς τον τρόπο υλοποίησης, τα προς διάγνωση στοιχεία (Φ/Β πλαίσια ή συστοιχίες) και την προσέγγιση εξαγωγής της κάθε διάγνωσης. Με βάση τα αποτελέσματα αυτών των μελετών, όπως αυτά παρατέθηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5, μπορεί να συνοψιστεί ότι η υπέρυθρη θερμογραφία, τόσο ως παθητική προσέγγιση (μετρήσεις πεδίου), όσο και ως ενεργητική προσέγγιση (εξωτερική θερμική διέγερση σε εργαστηριακές μετρήσεις), συνιστά εξαιρετικά υποσχόμενη μέθοδο διάγνωσης βλαβών σε Φ/Β πλαίσια c-Si. Συγκεκριμένα, η μέθοδος αποδείχθηκε ότι μπορεί να ανιχνεύσει και να αποδώσει γρήγορα, αξιόπιστα και με σημαντική ευαισθησία, το θερμικό αποτύπωμα βλαβών, υπό μορφή θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και “ανωμαλιών” σε επίπεδο ηλιακής κυψέλης (θερμές κηλίδες). Μάλιστα, στην πλειοψηφία των εφαρμογών, η διάγνωση επιτυγχάνεται βάσει θερμικών εικόνων, με την χρήση απλών τεχνικών επεξεργασίας και – το σημαντικότερο – δίχως την προϋπόθεση διακοπής λειτουργίας ή αφαίρεσης των υπό έλεγχο Φ/Β πλαισίων και συστοιχιών (on-line diagnosis/monitoring), με τα συνεπαγόμενα οικονομικά, τεχνικά και παραγωγικά οφέλη αυτής της δυνατότητας. Στα ειδικότερα, τώρα, συμπεράσματα των διαγνωστικών μελετών, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Στο σύνολο και των τριών μελετών, οι μετρούμενες θερμοκρασίες λειτουργίας κυμάνθηκαν πολύ κοντά (συνήθως με απόκλιση <3%) στις αναμενόμενες (βάσει των περιβαλλοντικών συνθηκών κάθε μέτρησης) τιμές, επισημαίνοντας έτσι την αξιοπιστία των υπέρυθρων ραδιομετρήσεων και επαληθεύοντας την ανάλυση του θερμοδυναμικού μοντέλου του Φ/Β πλαισίου και την ημι-εμπειρική Σχέση 2.4 (Κεφάλαιο 2, Υποενότητα 3.2).
- Στην 1^η μελέτη, οι υπέρυθρες ραδιομετρήσεις πεδίου (παθητική θερμογράφηση) υπέδειξαν επιτυχώς, υπό μορφή $\Delta T > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, την δεδομένη βλάβη (ρωγμή) μιας κυψέλης του Φ/Β πλαισίου. Επιπλέον, η ενεργητική υπέρυθρη θερμογράφηση με την αξιοποίηση της βηματικής θερμικής διέγερσης (SHT), επιβεβαίωσε πλήρως τις αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου, παρέχοντας ωστόσο σημαντικά ταχύτερη και λεπτομερέστερη διάγνωση της πηγής και της ακριβούς θέσης της βλάβης στο Φ/Β πλαίσιο.
- Στην 2^η μελέτη, επιβεβαιώθηκαν σε μεγάλο βαθμό η μειωμένη απόδοση και η “προβληματική” λειτουργία των δύο Φ/Β συστοιχιών (PV-1 και PV-2) που εξετάστηκαν, από την διάγνωση πολυάριθμων θερμών κηλίδων, υπό μορφή “ανώμαλων” θερμοκρασιακών προφίλ σε συγκεκριμένες ηλιακές κυψέλες.
- Στην 3^η μελέτη, με βάση την ιδέα της εξομίωσης των “ανώμαλων” θερμοκρασιακών προφίλ βλαβών με αιχμές (διακυμάνσεις) των επιπέδων του γκρι στις θερμικές εικόνες, ο αλγόριθμος Canhy που εφαρμόστηκε, αποδείχθηκε αξιόπιστος και εξαιρετικά υποσχόμενος, διαγιγνώσκοντας τις “προβληματικές” περιοχές 40 εκ των συνολικών 43 θερμών κηλίδων, σε όλα τα Φ/Β πλαίσια της μελέτης, αντιστοιχώντας σε ένα ποσοστό επιτυχίας διάγνωσης κοντά στο 93%.
- Εργαλεία όπως η ανάλυση περιοχών ενδιαφέροντος (ROI) και γραμμικών προφίλ θερμοκρασίας (LPA) αποδείχθηκε – και στις τρεις μελέτες – ότι μπορούν να ενισχύσουν τις δυνατότητες της υπέρυθρης θερμογραφίας ως προς τον προσδιορισμό της σοβαρότητας και της θέσης κάθε θερμής κηλίδας. Η δε χρήση ενός επιπλέον εργαλείου, της στατιστικής ανάλυσης ιστογραμμάτων, βάσει των αποτελεσμάτων των μελετών 2 και 3, εμφανίζεται πολλά υποσχόμενη προς την κατεύθυνση της συσχέτισης βλαβών και, συνεπώς, “ανωμαλιών” σε θερμοκρασιακά προφίλ, με την μεταβολή βασικών στατιστικών δεικτών, όπως ο αριθμητικός μέσος, η διακύμανση και η κλίση/ασυμμετρία.
- Ιδιαίτερα ενθαρρυντικά εμφανίζονται επίσης τα αποτελέσματα της συσχέτισης των μετρήσεων υπέρυθρης θερμογραφίας και των διαγιγνώσκόμενων βλαβών, με την προσομοιωμένη απόκριση του ηλεκτρικού ισοδύναμου μοντέλου αλλά και με συγκεκριμένες πραγματικές ηλεκτρικές μετρήσεις στο πεδίο και σε STC (μετρήσεις I-V της ExelSolar™, βλ. επίσης παράρτημα Β).
- Ο σημαντικότερος ίσως περιορισμός της υπέρυθρης θερμογραφίας, ως προς την διάγνωση βλαβών Φ/Β πλαισίων, προκύπτει από το γεγονός ότι απαιτείται περαιτέρω

διερεύνηση ως προς τον προσδιορισμό της ακριβούς αιτίας των διαγιγνωσκόμενων βλαβών (λ.χ. ρωγμές, αποκολλήσεις EVA, κακή επαφή των μεταλλικών συνδέσεων, κλπ), κάτι που με μια απλή οπτική παρατήρηση, σε συνδυασμό με την υπέρυθρη θερμογραφία, δεν είναι πάντα εφικτό. Με άλλα λόγια λοιπόν, μπορεί να ειπωθεί ότι οι ρεαλιστικές διαγνωστικές δυνατότητες της υπέρυθρης θερμογραφίας πεδίου – σε αντίθεση με αυτές της ενεργητικής θερμογραφίας (1^η μελέτη) περιορίζονται στον εντοπισμό και την ταξινόμηση των βλαβών βάσει της σοβαρότητάς και της έκτασής τους (με κριτήριο πάντα το επίπεδο του ΔT) και όχι βάσει του τύπου και της προέλευσης κάθε βλάβης.

- Ένα διαφαινόμενος, επιπλέον περιορισμός της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας, ως προς την “συνεργασία” της με την διαγνωστική προσέγγιση του αλγορίθμου Canny, έχει να κάνει με τις συνθήκες πρόσκτησης των πρωτογενών θερμικών εικόνων, καθώς παρατηρήθηκε ότι τα αντικείμενα που ενδεχομένως συμπεριλαμβάνονται στο φόντο μιας θερμικής εικόνας και χαρακτηρίζονται από έντονες διακυμάνσεις επιπέδων του γκρι, συχνά αναγνωρίζονται (λανθασμένα) ως ακμές, οδηγώντας σε εσφαλμένη διάγνωση (“false alarms”).
- Στους περιορισμούς της υπέρυθρης θερμογραφίας σημειώνονται, τέλος, η αναπόφευκτη εξάρτηση των μετρήσεων πεδίου από τις περιβαλλοντικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες, καθώς και από τις συνθήκες του φόντου κάθε μέτρησης, η ενυπάρχουσα αβεβαιότητα της πραγματικής τιμής του συντελεστή ικανότητας εκπομπής και η παρουσία του γυαλιού στο εμπρόσθιο στρώμα των Φ/Β πλαισίων η οποία συχνά οδηγεί στην λήψη θερμογραφίσεων υπό γωνία (για την αποφυγή του φαινομένου Narcissus), με συνακόλουθες απώλειες ακρίβειας μέτρησης.

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 6, 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 off-line και 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.

II. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Συμπερασματικά, από το σύνολο τόσο των διαγνωστικών όσο και των προγνωστικών μελετών, και εν τέλει από την ολοκλήρωση αυτής της Διδακτορικής Διατριβής, θα μπορούσε να ειπωθεί ο πρωταρχικός σκοπός της ποιοτικής και ποσοτικής αποτίμησης των δυνατοτήτων της υπέρυθρης θερμογραφίας, στην διάγνωση και πρόγνωση βλαβών επιτεύχθηκε, οδηγώντας στα προαναφερθέντα συμπεράσματα.

Σε ερευνητικό επίπεδο, τα συμπεράσματα αυτά και η εμπειρία που αποκομίστηκε, μπορούν να αποτελέσουν ουσιαστικά οφέλη και σημαντική θεωρητική και πρακτική/πειραματική βάση περαιτέρω έρευνας, προς την κατεύθυνση της διάγνωσης και της πρόγνωσης βλαβών καθώς και, γενικότερα της βελτιστοποίησης της αξιοπιστίας των Φ/Β πλαισίων. Απώτερη στόχευση αυτού του πεδίου έρευνας, είναι η αναγωγή αυτού του σημαντικού ερευνητικού οφέλους, σε κατασκευαστικό/επενδυτικό, ενεργειακό, οικονομικό και – εν τέλει – κοινωνικό όφελος, μέσα από τους εξής επιμέρους στόχους:

- 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 και βέλτιστη ενεργειακή απόδοση, 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.

Για την ταχύτερη και καλύτερη δυνατή εκπλήρωση αυτών των στόχων, και με βάση τα συμπεράσματα που αποκομίστηκαν από τις μελέτες αυτής της Διδακτορικής Διατριβής, πρέπει να δοθεί έμφαση σε ορισμένες προτάσεις μελλοντικής έρευνας, όπως:

- Αποτίμηση διαγνωστικών μελετών σε επίπεδο Φ/Β πάρκου, με τον σχεδιασμό και την υλοποίηση υπέρυθρων θερμογραφίσεων ευρείας κλίμακας (αεροθερμογραφία, aerial thermography, wide area measurements - WAMs).
- Σύγκριση της υπέρυθρης θερμογραφίας, με άλλες εξίσου προηγμένες εποπτικές μεθόδους παρακολούθησης, όπως η ραδιογραφία και η ηλεκτροφωταύγεια (πάντως ως προς την διάγνωση και πρόγνωση βλαβών σε Φ/Β συστήματα).
- Ανάπτυξη ακριβέστερου, αναλυτικότερου και, συνεπώς, ρεαλιστικότερου ηλεκτρικού-θερμοδυναμικού μοντέλου προσομοίωσης, στην φιλοσοφία των μοντέλων που παρουσιάστηκαν στην Υποενότητα 3.3 του Κεφαλαίου 2 και συσχέτιση των εξόδων (outputs) απόκρισής του με διαγιγνώσκόμενες βλάβες από πραγματικές υπέρυθρες ραδιομετρήσεις πεδίου.
- Σχεδιασμός, και εφαρμογή νέων, καινοτόμων (ή συνδυασμού των υπαρχόντων) δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης Φ/Β πλαισίων, στην κατεύθυνση της πρόγνωσης βλαβών.
- Προς την κατεύθυνση δε του προσδιορισμού της ακριβούς θέσης και αιτίας εμφάνισης των θερμών κηλίδων, σημαντικές λύσεις μπορούν να προσφερθούν από την εφαρμογή μετρήσεων ενεργητικής θερμογραφίας (συνήθως lock-in θερμογραφία) ή εποπτικών μεθόδων μικροσκοπίας, οι οποίες ωστόσο προϋποθέτουν την αφαίρεση των πλαισίων από την εγκατάσταση και, φυσικά, δεν ενδείκνυνται για εφαρμογές ευρείας κλίμακας (εκτεταμένες Φ/Β συστοιχίες και Φ/Β πάρκα).
- Τέλος, εφαρμογή της αποκτηθείσας εμπειρίας στην υλοποίηση μελετών διάγνωσης, πρόγνωσης και μετάδοσης βλαβών με χρήση πρότυπων τεχνικών χαρακτηρισμού (υπέρυθρη θερμογραφία, ηλεκτροφωταύγεια, οπτική μικροσκοπία, μετρήσεις I-V σε STC) και συνδυασμού δοκιμών επιταχυνόμενης γήρανσης, σε νέες, καινοτόμες (και συνεπώς μη δοκιμασμένες) τεχνολογίες ενθυλάκωσης Φ/Β πλαισίων και ηλιακών κυψελών (ελαφριά, λεπτά, εύκαμπτα ή ημιεύκαμπτα Φ/Β πλαίσια και Φ/Β πλαίσια ενσωματωμένα σε κτίρια (lightweight PV modules, flexible/semi-flexible PV modules, building-integrated PV modules - BIPV).

Προς την τελευταία στόχευση, συνίσταται και η φυσική συνέχεια αυτής της Διατριβής, σε επίπεδο πλέον Μεταδιδακτορικής Έρευνας, η οποία και θα εκπονηθεί στο Ινστιτούτο Μικρομηχανικής του Ομοσπονδιακού Πολυτεχνείου της Λωζάννης (PV-LAB, Institut de Microtechnique (IMT), Sciences et Techniques de l'Ingénieur (STI), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Neuchâtel, Switzerland), με προγραμματισμένη ημερομηνία έναρξης τον Σεπτέμβριο του 2013 (Παράρτημα Γ).

Δημοσιεύσεις

Επιμέρους Κεφάλαια, Ενότητες ή Υποενότητες της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, υπό μορφή βιβλιογραφικών αναζητήσεων, θεωρητικών και πειραματικών μελετών και διαγνωστικών ή προγνωστικών μελετών περιπτώσεων, αποτέλεσαν την βάση για την συγγραφή και την δημοσίευση επιστημονικών εργασιών, κατά κύριο λόγο στα στενά πλαίσια της συνολικής Διδακτορικής Έρευνας, αλλά και στα ευρύτερα ερευνητικά πεδία της διαγνωστικής και της προγνωστικής βλαβών και της συντήρησης. Σε αυτήν Ενότητα, συνοψίζονται και παρουσιάζονται οι συγκεκριμένες δημοσιεύσεις, ταξινομημένες χρονολογικά και ανά κατηγορία μέσου δημοσίευσης.

Ι. ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

1. 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, 021012, 2011.
2. 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.
3. J.A. Tsanakas, P.N. Botsaris, I.G. Amiridis, G.A. Galeridis, "Evaluation of Sensor-Based Condition Monitoring Methods as In-Process Tool Wear and Breakage Indices – Case Study: Drilling", Diagnostyka, 2(62), 2012.
4. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "On the Detection of Hot Spots in Operating Photovoltaic Arrays through Thermal Image Analysis and a Simulation Model", Materials Evaluation, (in press – 2013).
5. J.A. Tsanakas, D. Chrysostomou, P.N. Botsaris and A. Gasteratos, "Fault Diagnosis of Photovoltaic Modules through Image Processing and Canny Edge Detection on Field Thermographic Measurements", Journal of Solar Energy Engineering, (accepted under revision – 2013).
6. J.A. Tsanakas, M. Karoglou, E.T. Delegou, P.N. Botsaris, A. Bakolas, A. Moropoulou, "Assessment of the Performance and Defect Investigation of PV Modules after Accelerated Ageing Tests", Renewable Energy and Power Quality Journal, 11, 2013.

II. ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

1. P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "State-of-the-art in Methods Applied to Tool Condition Monitoring (TCM) in Unmanned Machining Operations: A Review", 21st International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Prague, Czech Republic, 2008.
2. P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "A Preliminary Study for the Efficiency of the Wear Debris Analysis and Thermography as Independent or Integrated Fault Diagnosis Methods in Tool Wear Monitoring", The 5th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, Edinburgh, Scotland (United Kingdom), 2008.
3. P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "Mechanical and Thermal Signatures as Indirect Tool Wear Monitoring Indices - Case study: Drilling", 22nd International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, San Sebastian, Spain, 2009.
4. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Non-Destructive in Situ Evaluation of a PV Module Performance Using Infrared Thermography", The 6th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies, Dublin, Republic of Ireland, 2009.
5. P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "Infrared Thermography as an Estimator Technique of a Photovoltaic Module Performance via Operating Temperature Measurements", The 10th European Conference on NDT, Moscow, Russia, 2010.
6. P.N. Botsaris, J.A. Tsanakas and M. Vogiatzi, "Tool Wear Monitoring by Design of Experiments (DOE) for Drilling", 24th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Stavanger, Norway 2011.
7. J.A. Tsanakas and P.N. Botsaris, "Quantifying the Impact of Hot Spots on the Performance of Photovoltaic Modules by Infrared Thermography and a Simulation Model", 2nd International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium - ELCAS2, Nisyros, Greece, 2011.
8. J.A. Tsanakas, M. Karoglou, E.T. Delegou, P.N. Botsaris, A. Bakolas, A. Moropoulou, "Assessment of the Performance and Defect Investigation of PV Modules after Accelerated Ageing Tests", International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Bilbao, Spain, 2013.

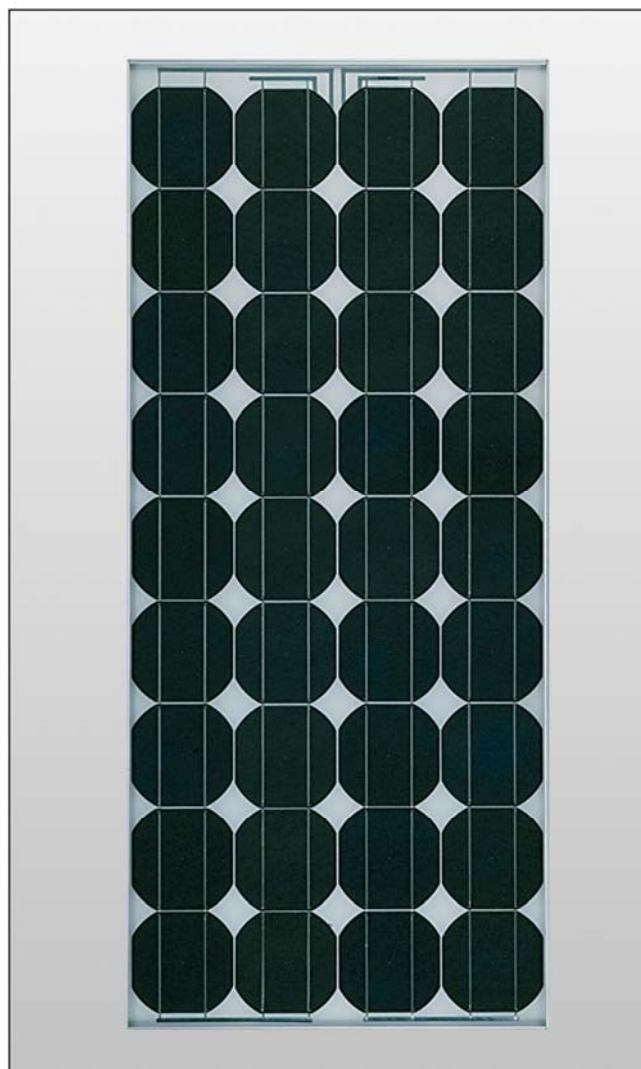
III. ΛΟΙΠΕΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

1. Π.Ν. Μπότσαρης, Ι.Α. Τσανάκας, "Μηχανικά και θερμικά σήματα ως δείκτες έμμεσης διάγνωσης φθοράς σε κοπτικά εργαλεία – περίπτωση διάτρησης", Τεχνικό Δελτίο ΤΕΕ, Παράρτημα Ανατ. Μακεδονίας, Τεύχος 53, σελ. 41-45, 2010.
2. Π.Ν. Μπότσαρης, Ι.Α. Τσανάκας, "Θερμογραφία και Εφαρμογές της στην Επιστήμη του Μηχανικού", Εκπαιδευτικό Υλικό Επιδοτούμενου Σεμιναρίου Κατάρτισης Μηχανικών, στα Πλαίσια της Δράσης *e-Μηχανικοί: Εκπαίδευση Μηχανικών στις Τεχνολογίες Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών*, ΙΕΚΕΜ-ΤΕΕ, Αθήνα, 2010.
3. P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "Infrared Thermography as an Estimator Technique of a Photovoltaic Module Performance via Operating Temperature Measurements", e-Journal of NDT, ISSN 1435-4934, 2010.
4. P.N. Botsaris and J.A. Tsanakas, "An Indicative Risk Based Inspection (RBI) Preventive Maintenance Program for Heat Exchangers in a Chemical Industry", ICASTOR Journal of Engineering, 4(1), 2011.
5. P.N. Botsaris, K. Angelakoglou, G. Gaidajis and J.A. Tsanakas, "Life Cycle Costs and Environmental Life Cycle Analysis of Solar Water Heaters in Greece", 24th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Stavanger, Norway, 2011.
6. G. Gaidajis, P.N. Botsaris, K. Angelakoglou, J.A. Tsanakas, "Sustainable Energy Action Plan for the Municipality of Kavala", Final Technical Report, Kavala, Greece, 2012.
7. G. Gaidajis, P.N. Botsaris, K. Angelakoglou, J.A. Tsanakas, "Carbon Footprint Estimation for the Municipality of Kavala", Final Technical Report, Kavala, Greece, 2012.

Παράρτημα Α

SIEMENS

Solar module SP75



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 25-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 multistage 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. The cell's optical properties are optimized 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: **SP75**
Rated power: **75 Watts**
Limited Warranty: **25 Years**

Certifications and Qualifications

- UL-Listing 1703
- TÜV safety class II
- JPL Specification No. 5101-161
- IEC 61215
- CE mark
- FM Certification

Σχήμα ΠΑ1. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών Φ/Β πλαισίων Siemens™ SP75 (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.
- Torsion and corrosion resistant anodized aluminum module frame ensures dependable performance, even through harsh weather conditions and in marine environments.
- Built-in bypass diodes (12V configuration) help system performance during partial shadowing.

High quality

- Every module is subject to final factory review, inspection and testing to assure compliance with electrical, mechanical and visual criteria.
- 36 PowerMax® single-crystalline solar cells deliver excellent performance even in reduced-light or poor weather conditions.
- Cell surfaces are treated with the Texture Optimized Pyramidal Surface (TOPS™) process to generate more energy from available light.
- Fault tolerant multi-redundant contacts on front and back of each cell provide superior reliability.
- 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 ≤ 1 ohm for all metallic surfaces.
- Manufactured to exacting Siemens quality standards.

Easy installation

- ProCharger™-CR junction box accepts conduit, cable or wire and is designed for easy field wiring.
- Lightweight aluminum frame and pre-drilled mounting holes for easy installation.
- Factory configured for 12V operation and may be reconfigured in the field for 6V operation.
- Modules may be wired together in series or parallel to attain required power levels.

Performance warranty

- 25 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 SP75

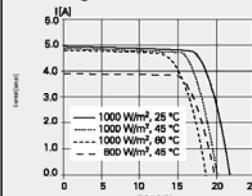
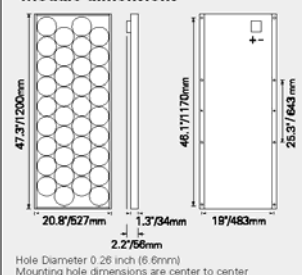
Electrical parameters		12 V/6 V
Maximum power rating P_{max}	[Wp] ¹⁾	75
Rated current I_{MPP}	[A]	4.4/8.8
Rated voltage V_{MPP}	[V]	17.0/8.5
Short circuit current I_{SC}	[A]	4.8/9.6
Open circuit voltage V_{OC}	[V]	21.7/10.9
Thermal parameters		
NOCT ²⁾	[°C]	45 $\pm$ 2
Temp. coefficient: short-circuit current		2.06 mA / °C
Temp. coefficient: open-circuit voltage		-0.77 V / °C
Qualification test parameters ⁴⁾		
Temperature cycling range	[°C]	-40 to +85
Humidity freeze, Damp heat	[%RH]	85
Maximum system voltage	[V]	600 V per UL (1000 V per ISPR)
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]	16.7 [7.6]

1) Wp (Watt peak) = Peak power
(Minimum Wp = 70 Watts)

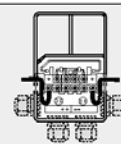
Air Mass AM = 1.5
Irradiance E = 1000 W/m²
Cell temperature T_C = 25 °C

2) Normal Operating Cell Temperature at:
Irradiance E = 800 W/m²
Ambient temperature T_A = 20 °C
Wind Speed V_W = 1 m/s

3) Diagonal lifting of module plane
4) Per IEC 61215 test requirements
5) 12 volt configuration

Voltage-current characteristic**Module dimensions****ProCharger™-CR
Junction-box**

Maximum cable
diameter: 4mm²
Type of protection: IP44

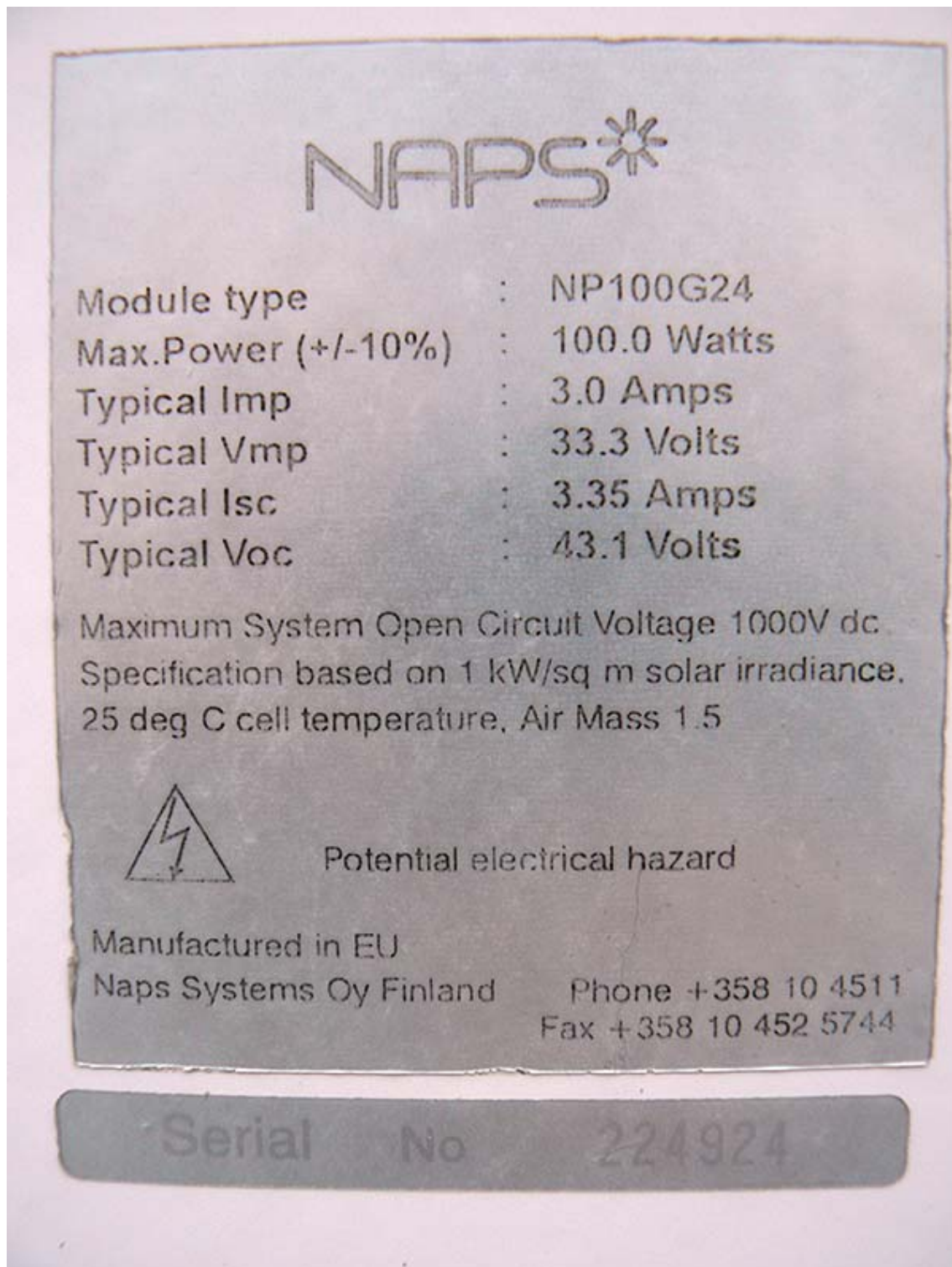


Your address for photovoltaics from Siemens Solar



© Siemens Solar 1998 Status 11/98 - Subject to modification.

Σχήμα ΠΑ2. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών Φ/Β πλαισίων Siemens™ SP75 (σελίδα 2).



Σχήμα ΠΑ3. Ετικέτα τεχνικών χαρακτηριστικών Φ/Β πλαισίων Naps Systems™ NP100G24.



Σκάνάρε με το κινητό
& επισκευθείτε το site

ESP series60 Poly

απλά, ελληνικά με ασφάλεια και σιγουριά

Ποιοτικά, αποδοτικά και αξιόπιστα φωτοβολταϊκά πλαίσια:

- Σχεδιασμός πλαισίου με χρήση πολυκρυσταλλικών κυψελών 2 ή 3 αγωγών (bus-bar)
- Αυξημένη αντοχή σε φορτία ανέμου (2400 Pascal) και χιονιού (5400 Pascal)
- Ειδικό γυαλί, για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, με χαμηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο και υψηλούς συντελεστές διαπερατότητας της ακτινοβολίας για μεγαλύτερη απόδοση
- Υψηλές αποδόσεις ακόμα και σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας και συννεφιάς
- Εύρος ονομαστικής ισχύος, ανά 5W, από 200-240 Wp
- Προφίλ ανοδωμένου αλουμινίου, για μεγαλύτερη αντοχή στο χρόνο
- 26 χρόνια εγγύηση απόδοσης
- Πιστοποίηση προϊόντος σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEC 61730 και IEC 61215 από την TÜV RHEINLAND
- Αυστηροί έλεγχοι ποιότητας με βάση το ISO 9001:2008

Παραγωγικές διαδικασίες που εξασφαλίζουν ποιοτικά προϊόντα:

- Σε ένα από τα πιο σύγχρονα βιοκλιματικά εργοστάσια στον κόσμο
- Με την αξιοποίηση σύγχρονου, αυτοματοποιημένου και αξιόπιστου εξοπλισμού
- Με πρώτες ύλες από επιλεγμένους, μέσω αυστηρών διαδικασιών, προμηθευτές
- Με την υποστήριξη ενός εξειγμένου και πλήρως ενσωματωμένου στην παραγωγική διαδικασία, συστήματος ελέγχου ποιότητας και πρόληψης αστοχιών

Από τις υψηλότερες εγγυήσεις στην αγορά:

Εγγύηση απόδοσης:
12 έτη για το 90% της ονομαστικής ισχύος
26 έτη για το 80% της ονομαστικής ισχύος

Εγγύηση προϊόντος:
12 έτη

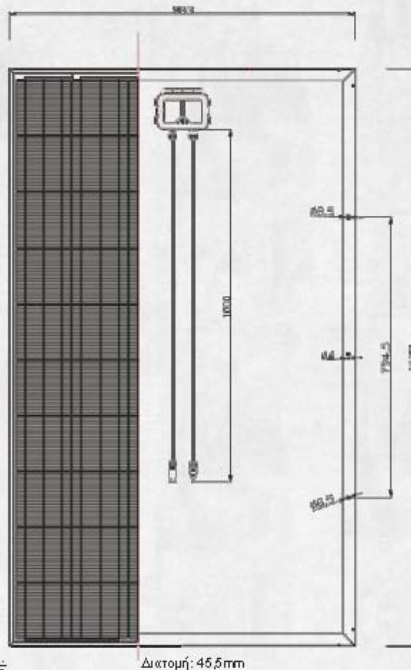
Πιστοποιήσεις

Σχήμα ΠΑ4. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών Φ/Β πλαισίων ExelSolar™ ESP Series60-poly (σελίδα 1).



ESP series60 Poly

Τεχνικές προδιαγραφές



Διάμετρο: 45,5mm

Η ExelGroup διατηρεί το δικαίωμα αλλαγής των τεχνικών προδιαγραφών χωρίς προηγούμενη ενημέρωση.

Θερμοκρασιακοί συντελεστές

Θερμ. συντελ. V_{oc} -0.34 (%/°C)

Θερμ. συντελ. I_{sc} 0.06 (%/°C)

Θερμ. συντελ. P_{mp} -0.43 (%/°C)

$NOCT$ 45°C

Σφραγίδα Εξουσιοδοτημένου Συνεργάτη

Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά

Ονομαστική ισχύς (Wp)(Watt)	215	220	225	230	235	240	245	250	255
Τάση ανοκτού κυκλώματος (V _{oc})(V)	36,22	36,41	36,62	36,95	37,06	37,30	37,51	37,73	37,94
Ρεύμα Εργαζομένου (I _{sc})(A)	8,14	8,26	8,36	8,46	8,56	8,66	8,78	8,89	9,00
Ελάχιστη Τάση λειτουργίας (V _{mp})(V)	28,97	29,13	29,17	29,56	29,65	29,84	29,99	30,15	30,32
Ελάχιστο Ρεύμα λειτουργίας (I _{mp})(A)	7,42	7,55	7,72	7,78	7,93	8,04	8,18	8,31	8,44
Μέγιστη Ισχύς υπό πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC) (P _{max})(Watt)	215	220	225	230	235	240	245	250	255
Απόδοση %	13,34	13,65	13,97	14,28	14,59	14,90	15,21	15,52	15,83

Πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC): Ένταση ακτινοβολίας 1000 W/m², θερμοκρασία πλαισίου 25°C, AM=1.5, «νοχές» μετρήσει ±3%

Μέγιστη ισχύς (Wp)(Watt)	156	159	163	166	170	174	177	181	185
Τάση ανοκτού κυκλώματος (V _{oc})(V)	33,30	33,48	33,68	33,98	34,08	34,30	34,52	34,73	34,95
Ρεύμα Εργαζομένου (I _{sc})(A)	6,53	6,62	6,71	6,79	6,87	6,95	7,03	7,11	7,19
Ελάχιστη Τάση λειτουργίας (V _{mp})(V)	26,35	26,49	26,53	26,89	26,97	27,14	27,31	27,48	27,66
Ελάχιστο Ρεύμα λειτουργίας (I _{mp})(A)	5,91	6,01	6,14	6,19	6,31	6,40	6,49	6,59	6,68

Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης (NOCT): Ένταση ακτινοβολίας 800 W/m², θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C, ταχύτητα ανέμου 1m/s

Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Φωτοβολταϊκή κυψέλη	Πολυκρυσταλλική, δύο ή τριών αγωγών 156x156mm (6 ίντσες)
Αρ. κυψελών	60 (6x10)
Διαστάσεις	1639 x 983 x 45.5 mm
Βάρος	18 κιλά
Εμπρόσθιο γυαλί	Γυαλί (3.2mm) σκληρυμένο (tempered), χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο, υψηλής διαπερατότητας
Περιμετρικό Πλαίσιο	Ανοδειωμένο Αλουμίνιο
Κουτί σύνδεσης	Με 3 διόδους παράκαμψης, Βαθμός προστασίας IP65
Καλώδια σύνδεσης	2x4 mm ² συμμετρικά μήκη 1000mm, βύσματα MC4

Πιστοποιημένα Όρια Λειτουργίας

Θερμοκρασία	-40 °C έως +85 °C
Μέγιστη Φόρτιση	2400 Pascal Φορτίο Ανέμου 5400 Pascal Φορτίο Χιονιού

Μέγιστη Τάση Συστήματος 1000V

www.exelgroup.gr

Κλάδος: ΒΙ.Π.Ε. Σκουροχαρίου- Ο.Τ. 20, Δρόμος 12, 61100 Κιλκίς, Τ: 23410 72206, F: 23410 71526 E: solar@exelgroup.gr
Θεσσαλονίκη: 18ο χλμ. Θεσσαλονίκης - Αλ. Αθωνισίου, Τ.Θ. 47, 570 08 Θεσσαλονίκη, Τ: 2310 722 536, F: 2310 710 051 E: info@exelgroup.gr
Γραφείο Αθηνών: Λ. Ποσειδάωνος 4, 11527 Αθήνα, Τ: 210 6410860, F: 210 6410404 E: menh@exelgroup.gr

v03.11

Σχήμα ΠΑ5. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών Φ/Β πλαισίων ExelSolar™ ESP Series60-poly (σελίδα 2).

SIEMENS

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 810
- JPL Specification No. 5101-161
- CE mark
- FM Certification

Σχήμα ΠΑ6. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών Φ/Β πλαισίων 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.
- Torsion 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.
- 33 PowerMax® single-crystalline solar cells deliver excellent performance even in reduced light or poor weather conditions.
- Cell surfaces are treated with the Texture 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 ⁴⁾	
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]

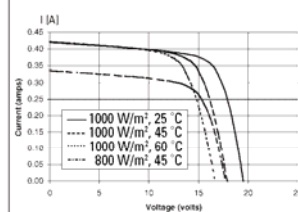
¹⁾ W_p (Watt peak) = Peak power
(Minimum W_p = 5 Watts)
Air Mass AM = 1.5
Irradiance E = 1000 W/m²
Cell temperature T_c = 25 °C

²⁾ Normal Operating Cell Temperature at:
Irradiance E = 800 W/m²
Ambient temperature T_u = 20 °C
Wind speed V_w = 1 m/s

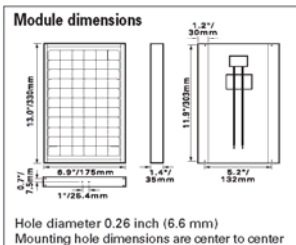
³⁾ Diagonal lifting of module plane

⁴⁾ Per EIC 1215 test requirements

⁵⁾ 12 Volt configuration

Voltage-current characteristic⁵⁾

Your address for photovoltaics from Siemens Solar



Status 3/98 - Subject to modification.

Siemens Solar Industries
P.O. Box 6032
Camarillo, CA 93011, U.S.A.
Tel: 805-482-6800
Fax: 805-388-6395
Web site: www.siemenssolar.com
E-mail: sunpower@solarpv.com

Printed in U.S.A.

Siemens Showa Solar Pte. Ltd.
Blk. 164 Kallang Way
#05-14/15 Kolam Ayer Industrial Park
Singapore 349248
Tel: 65-842-3886
Fax: 65-842-3887



Order No. 019820, Rev. C

Σχήμα ΠΑ7. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών Φ/Β πλαισίων Siemens™ SM6 (σελίδα 2).



Photovoltaics is our passion

ET Module

ET-M53605 5Wp

EFFICIENCY

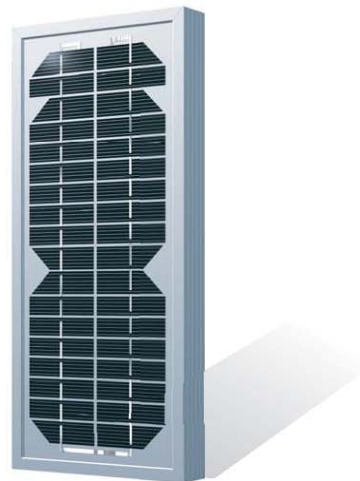
- Low voltage-temperature coefficient ensures high-temperature operation
- Exceptional low-light performance combined with high sensitivity to light enables excellent energy delivery

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 +/-3%
- 25-year limited warranty on power output, 5-year limited warranty on materials and workmanship



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

Σχήμα ΠΑ8. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών Φ/Β πλαισίων ETSolar™ ET-M53605 (σελίδα 1).

**ET Module**

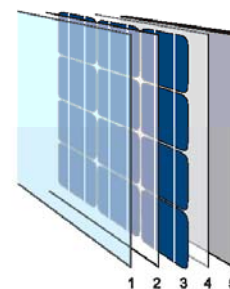
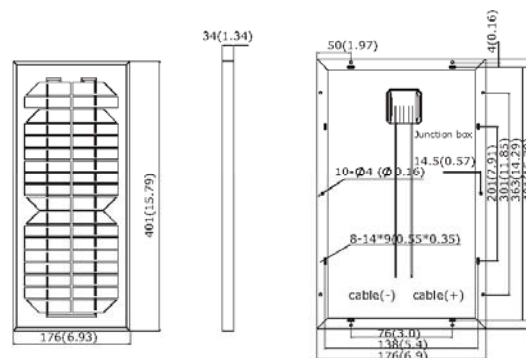
ET-M53605

SPECIFICATIONS

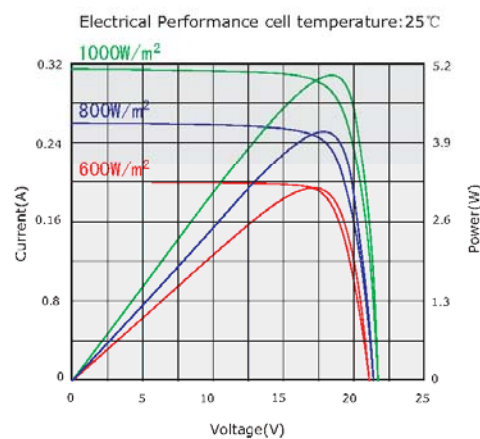
Model type	ET-M53605
Peak power(Pmax)	5W
Weight	1.2kg (2.6lbs)
Dimensions	401×176×34mm 15.8×6.9×1.3inch
Maximum power voltage (Vmp)	17.82V
Maximum power current (Imp)	0.285A
Open circuit voltage (Voc)	21.96V
Short circuit current (Isc)	0.315A
Maximum system voltage	DC 1000V
Temp. Coeff. of Isc (TK Isc)	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 (STCs): 1000 W/m² solar irradiance, 1.5 Air Mass, and cell temperature of 25°C.

PHYSICAL CHARACTERISTICS Unit:mm(inch)



- 1 Tempered glass
- 2 EVA
- 3 Cells
- 4 EVA
- 5 Multi-layer back sheet

**ET Solar**Available from: www.solar-wind.co.uk

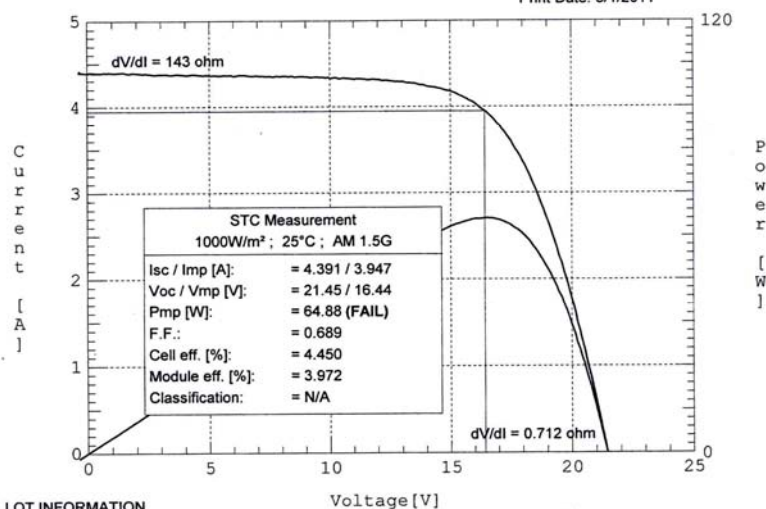
Σχήμα ΠΑ9. Φύλλο τεχνικών χαρακτηριστικών Φ/Β πλαισίων ETSolar™ ET-M53605 (σελίδα 2).



Παράρτημα Β

1st MODULEFile: Unnamed
Module: 1QuickSun Solar Simulator
Version 7.1.9

Print Date: 3/1/2011



LOT INFORMATION

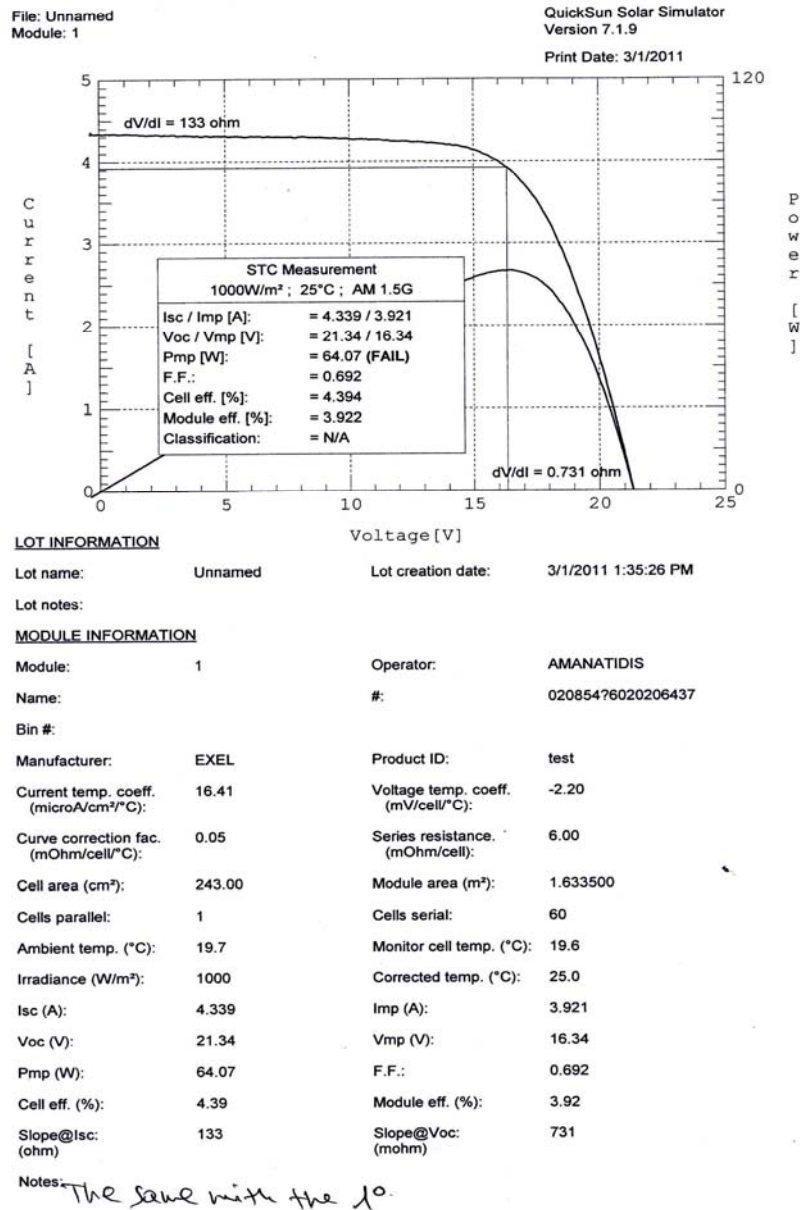
Lot name: Unnamed Lot creation date: 3/1/2011 1:35:26 PM
Lot notes:

MODULE INFORMATION

Module:	1	Operator:	AMANATIDIS
Name:		#:	02085476020206455
Bin #:			
Manufacturer:	EXEL	Product ID:	test
Current temp. coeff. (microA/cm ² /°C):	16.41	Voltage temp. coeff. (mV/cell/°C):	-2.20
Curve correction fac. (mOhm/cell/°C):	0.05	Series resistance. (mOhm/cell):	6.00
Cell area (cm ²):	243.00	Module area (m ²):	1.633500
Cells parallel:	1	Cells serial:	60
Ambient temp. (°C):	19.8	Monitor cell temp. (°C):	19.6
Irradiance (W/m ²):	1000	Corrected temp. (°C):	25.0
Isc (A):	4.391	Imp (A):	3.947
Voc (V):	21.45	Vmp (V):	16.44
Pmp (W):	64.88	F.F.:	0.689
Cell eff. (%):	4.45	Module eff. (%):	3.97
Slope@Isc: (ohm)	143	Slope@Voc: (mohm)	712

Notes: MAX Power: 75 Watt

Σχήμα ΠΒ.1. Φύλλο αναφοράς αποτελεσμάτων πρότυπων μετρήσεων καμπύλης I-V από την Exelgroup™/ExelSolar™ A.E., για το Φ/Β πλαίσιο 1 της συστοιχίας PV-1 (βλ. Κεφάλαιο 5).

2^ο MODULE

Σχήμα ΠΒ.2. Φύλλο αναφοράς αποτελεσμάτων πρότυπων μετρήσεων καμπύλης I-V από την Exelgroup™/ExelSolar™ A.E., για το Φ/Β πλαίσιο 2 της συστοιχίας PV-1 (βλ. Κεφάλαιο 5).



Παράρτημα Γ

IMT - INSTITUT DE MICROTECHNIQUE - NEUCHÂTEL



EPFL STI IMT-NE PV-LAB

Seminar

Monday 15th October 2012
MT 1 11.00

Rue A.-L. Breguet 2, CH-2000 Neuchâtel

Condition Monitoring in c-Si PV Modules through Thermal Imaging

John A. Tsanakas

Electrical and Computer Engineer, PhD Candidate
Democritus University of ThraceDepartment of Production Engineering and Management School of Engineering Central University Campus
Xanthi, Greece

ABSTRACT

Today, conventional condition monitoring of installed, operating PV modules, is mainly based on electrical measurements and performance evaluation. However, such practices exhibit restricted fault-detection ability. Thus, there is a challenging need for a direct monitoring method, able to diagnose defects and their physical location within PV modules, both during the assembling stage and under real field conditions. This presentation comprises the main points of a doctoral research – conducted in Democritus University of Thrace, Greece – which proposes the use of thermal imaging as a condition monitoring tool for PV modules. The implementation of the specific research was based on the following objectives:

- Detection/diagnosis of defective modules through both passive (field) and active (indoor) infrared (IR) thermography.
- Correlation to conventional I-V measurements.
- Prospects of accelerated ageing of modules, for prognostic purposes.

The experimental part of this research included numerous field IR measurements of installed, operating c-Si photovoltaic modules and arrays, with either known or unknown defects, under certain environmental conditions. Specific defective modules and cells were also measured by means of active thermography. In this case, a DC power supply was employed for the thermal stimulation of each inspected module, under forward bias and dark room conditions. For the extraction of the meaningful information, the obtained raw thermal images from both passive and active measurements have, then, undergone basic thermal image processing, such as regions of interest (ROI), histogram and line profile analysis, as well as filtering, thresholding and edge detection. In correlation to conventional I-V measurements of the inspected modules and arrays, the results from the fault diagnosis based on the thermal images were considered very promising. Furthermore, during the last stage of this research, the prognostic potential of thermal imaging in PV modules has been assessed by applying accelerated ageing tests to already diagnosed defects. The main goal, here, was to investigate the evolution of a known, located defect through the lifetime of a module. New thermal images and I-V measurements of the aged defective modules revealed valuable information with regard to the effect of certain defects on a module's efficiency and its wear mechanisms.

With the impetus of these research results, further investigation upon the prognostic potential of accelerated ageing tests of PV modules and the prospects of a large-scale diagnostic tool (i.e. aerial thermography for extended PV plants) are among the future interests for a possible postdoctoral research.

<http://imt.epfl.ch/>

Σχήμα ΠΓ1. Παρουσίαση σύνοψης της Διδακτορικής Διατριβής στο PV-LAB (EPFL).



IMT - INSTITUT DE MICROTECHNIQUE - NEUCHÂTEL

PVLAB
Photovoltaics and thin film electronics laboratory

Dr. Laure-Emmanuelle Perret-Aebi, Group Leader

Adresse postale :

EPFL | STI | IMT-NE | PVLAB
Rue A.-L. Breguet 2
CH – 2000 Neuchâtel
Tel. +4132 718 33 56
Fax +4132 718 32 01

laure-emmanuelle.perret@epfl.ch



SWISS CONFEDERATION
Federal Department of Home Affairs FDHA
State Secretariat for Education and Research SER

Neuchâtel, the 25th of October 2012

Concern: Letter of Intent to host Mr. Ioannis A. Tsanakas as a Postdoctoral student

With this letter I express my strong interest to collaborate with Mr. Ioannis A. Tsanakas in the framework of a postdoctoral research financed by the Swiss Confederation within its program for scholarships for foreign students. Mr. Tsanakas and I have the occasion to discuss together, during his recent visit in our Laboratory, of a common research project he could handle in my group taking into account his competences and our research interests.

Our institute, the PVLab of EPFL headed by Prof. Christophe Ballif, is a leading technology centre based in Neuchâtel Switzerland, which develops different types of crystalline silicon and thin-film silicon based photovoltaic modules, from the complete development of high-efficiency small area record cells and high efficiency mini-modules to the encapsulation and reliability testing of large-area modules.

This collaboration with Mr. Tsanakas could lead to very innovative results in the Photovoltaic field and more especially on module reliability which is one of the most important factors that could lead to a decrease of the total cost of PV electricity production. We already have strong collaboration with the University of Patras and would appreciate to be able to even reinforced our collaboration with Greece, through this postdoctoral research. The work proposed by Mr. Tsanakas is for us very important in the successful development of innovative solar material and systems and is of utmost important to develop the knowledge and know how needed to bring PV energy at its best.

Mr. Tsanakas will be host in our Institute, if the proposal accepted, and we attest here that he will have access to the entire infrastructure necessary to fulfill the tasks of his proposal.

I hope this letter is sufficient to express our interest in fruitful research collaboration with Mr. Tsanakas. If you need any further information please do not hesitate to contact me.

Sincerely,

Dr. Laure-Emmanuelle Perret- Aebi
(group leader of the Module Design group of the PVLab)

Σχήμα ΠΓ2. Γράμμα αποδοχής επίβλεψης για την εκπόνηση Μεταδιδακτορικής Έρευνας στο PV-LAB (EPFL).



Σκοπός αυτής της Διδακτορικής Διατριβής είναι η ποιοτική και ποσοτική αποτίμηση του δυναμικού αξιοποίησης της υπέρυθρης θερμογραφίας, ως εποπτικής μεθόδου, στην διάγνωση και πρόγνωση βλαβών σε μηχανολογικές κατασκευές, με βασική στόχευση και αντικείμενο εφαρμογής τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πλαίσια. Σε επίπεδο εντοπισμού και διάγνωσης βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, η δυναμική της μεθόδου της υπέρυθρης θερμογραφίας αποτιμήθηκε με την εκπόνηση τριών πειραματικών μελετών περιπτώσεων, διαφοροποιημένων ως προς: i) την προσέγγιση της υπέρυθρης ραδιομέτρησης, ii) τα προς διάγνωση στοιχεία και iii) την τεχνική ανάλυσης των θερμικών αποτυπωμάτων και εξαγωγής της κάθε διάγνωσης. Σε επίπεδο πρόγνωσης της μετάδοσης και της επίδρασης βλαβών στην διάρκεια ζωής των Φ/Β πλαισίων, καθώς και στην αξιοπιστία και τελική απόδοσή τους, 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 τεχνητής επιταχυνόμενης γήρανσης σε Φ/Β πλαίσια. Τα συνολικά αποτελέσματα των μελετών, έδειξαν ότι η υπέρυθρη θερμογραφία, συνιστά εξαιρετικά υποσχόμενη μέθοδο διάγνωσης βλαβών σε Φ/Β πλαίσια, ικανή να ανιχνεύσει και να αποδώσει γρήγορα και αξιόπιστα, το θερμικό αποτύπωμα βλαβών, υπό μορφή θερμοκρασιακών διακυμάνσεων και “ανωμαλιών” σε κλίμακα ηλιακής κυψέλης. Μάλιστα, στην πλειοψηφία των εφαρμογών, η διάγνωση επιτεύχθηκε με την χρήση απλών τεχνικών επεξεργασίας θερμικών εικόνων, δίχως την προϋπόθεση διακοπής λειτουργίας των υπό έλεγχο Φ/Β πλαισίων. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος εμφάνισε αδυναμία αξιόπιστης πρόγνωσης της εξέλιξης των βλαβών στον χρόνο και ταξινόμησής τους ως προς τον τύπο και την προέλευσή τους, περιοριζόμενη στην ταξινόμησή τους ως προς την θέση, την σοβαρότητα ή/και την έκτασή τους. Απώτερη στόχευση του πεδίου έρευνας αυτής της Διατριβής, είναι η αναγωγή του ερευνητικού οφέλους της, σε κατασκευαστικό, ενεργειακό, οικονομικό/επενδυτικό και – εν τέλει – κοινωνικό όφελος, μέσα από: i) την βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης των Φ/Β πλαισίων, ii) την μείωση του κόστους κύκλου ζωής τους, iii) τον σχεδιασμό καταλληλότερων στρατηγικών συντήρησης τους και, iv) τον περιορισμό του κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ένα Φ/Β σύστημα.



ref•ΔΔ012013•