

Ανάπτυξη αποδοτικών ΦΒ υλικών και διατάξεων τρίτης γενιάς για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας του παραγωγικού τομέα στην πράσινη ενέργεια

ΠΣΚΕ «ΤΑΕΔΡ 0537347»

Παραδοτέο 4.4.

Αξιολόγηση λειτουργίας των Φ/Β με την εφαρμογή ISOS και IEC πρωτοκόλλων σε ελεγχόμενες εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες



Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	5
2. Μετρήσεις εσωτερικού χώρου με πρωτόκολλο ISOS D-1	6
2.1 Γήρανση ενθυλακωμένων ηλιακών μονάδων σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας T=85°C	9
2.2 Γήρανση ενθυλακωμένων ηλιακών μονάδων σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας T=-25°C ..	10
2.3 Κυκλική θερμική κόπωση των ενθυλακωμένων ηλιακών μονάδων	12
2.3 Κόπωση των ενθυλακωμένων ηλιακών μονάδων υπό συνεχή ακτινοβολία φωτός	14
3. Μεθοδολογία Πειραμάτων σε Εξωτερικές Συνθήκες.....	15
3.1 Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός I-V	15
3.2 Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS).....	16
3.3 Απεικόνιση Laser Beam Induced Current (LBIC)	16
3.4 Μετρήσεις Εξωτερικής Κβαντικής Απόδοσης (EQE).....	17
3.5 Θερμική Απεικόνιση	17
3.6 Θερμική Απεικόνιση	17
4. Αποτελέσματα ηλεκτρικού Χαρακτηρισμού Φ/Β διατάξεων σε εξωτερικές συνθήκες.....	17
4.1 Αρχικές Τιμές Φ/Β διατάξεων περοβσκίτη	18
5. Μελέτη Γήρανσης/Σταθερότητας Ηλεκτρικών Χαρακτηριστικών των Φ/Β διατάξεων περοβσκίτη με εξωτερικές μετρήσεις	20
6. Διερεύνηση Αιτίων Μείωσης Ηλεκτρικών Χαρακτηριστικών των Φ/Β διατάξεων σε Διάρκεια 8 - εβδομάδων	23
6.1 Πειράματα Εξωτερικής Κβαντικής Απόδοσης	24
6.2 Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης.....	25
6.3 Φωτογραφική Απεικόνιση των Φ/Β γιατάξεων.....	27
6.4 Θερμική Απεικόνιση των Φ/Β διατάξεων περοβσκίτη	29
5.5 Χαρτογράφηση Απόκρισης Ρεύματος Φ/Β διατάξεων περοβσκίτη (LBIC Imaging).....	31
7. Μετρήσεις σε Εξωτερικές συνθήκες Φ/Β πλαισίων 3 ^{ης} γενιάς μεγάλης κλίμακας.....	33
7.1 Μετρήσεις Φ/Β πλαισίων περοβσκίτη	33
7.2 Μετρήσεις Οργανικών Φ/Β πλαισίων	34
8. Συμπεράσματα.....	39
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	41

Πίνακας Εικόνων

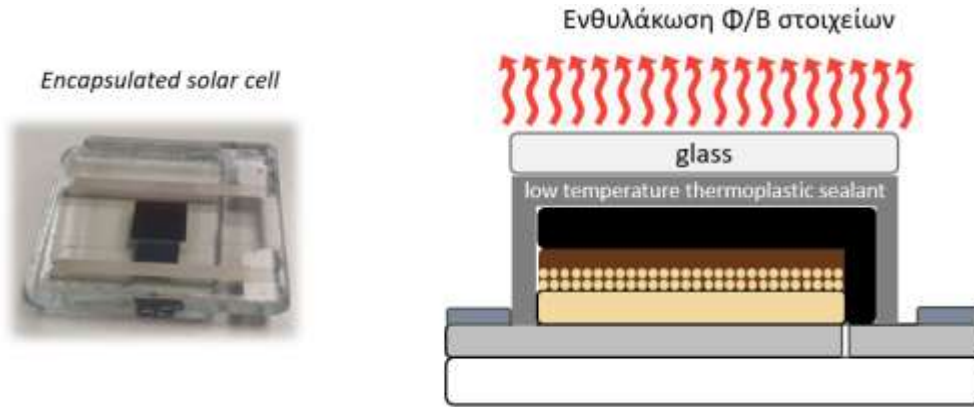
Εικόνα 1 Φωτογραφία από ένα ενθυλακωμένο περοβσκιτικό ηλιακό στοιχείο και σχηματική αναπαράσταση της δομής του.	7
Εικόνα 2 Πίνακας με Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ενθυλακωμένων και μη ηλιακών στοιχείων που κατασκευάστηκαν με τη χρήση της τεχνικής inkjet printing.	7
Εικόνα 3. Διακύμανση των κύριων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενθυλακωμένων και μη περοβσκιτικών ηλιακών στοιχείων υπο της συνθήκης που ορίζει το πρότυπο ISOS-D-1.	7
Εικόνα 4. Φωτογραφία από ενθυλακωμένες περοβσκιτικές ηλιακές μονάδες που αξιολογήθηκαν σε πειράματα επιταχυνόμενης γήρανσης.	8
Εικόνα 5. Πίνακας με Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ενθυλακωμένων και μη ηλιακών μονάδων που κατασκευάστηκαν με τη χρήση της τεχνικής inkjet printing και ηλεκτροδίου άνθρακα χαμηλής θερμοκρασίας κατεργασίας 9	9
Εικόνα 6. Ισοθερμική γήρανση των ηλιακών μονάδων σε θερμοκρασία T=85°C.	9
Εικόνα 7. Ισοθερμική γήρανση των ηλιακών μονάδων σε θερμοκρασία T=-25°C.	11
Εικόνα 8. Κυκλική θερμική κόπωση από RT σε T=65°C των ηλιακών μονάδων.	13
Εικόνα 9. Καταπόνηση των ενθυλακωμένων ηλιακών μονάδων υπό παρατεταμένη έκθεση (αριστερά) σε φως LED και συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου, (δεξιά) σε πλήρες ηλιακό φως και 65°C.	14
Εικόνα 10 Οι αρχικές καμπύλες I-V και P-V για τις 2 Φ/Β διατάξεις μετά την εγκατάστασής τους στο ΦΒ πάρκο του ΕΛΜΕΠΑ.	18
Εικόνα 11 Πίνακας με τις μέγιστες τιμές των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των 2 Φ/Β στοιχείων που καταγράφηκαν την πρώτη ημέρα έκθεσης σε εξωτερικές συνθήκες 19	19
Εικόνα 12 Μεταβολές κατά την διάρκεια της ημέρας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β #1 (πάνω σειρά) και Φ/Β #2 (κάτω σειρά).	20
Εικόνα 13 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά 2 Φ/Β από περοβσκίτη, κανονικοποιημένες στα 1000 W/m ² , κατά την διάρκεια έκθεσης τους σε πραγματικές συνθήκες στις εγκαταστάσεις του ΕΛΜΕΠΑ.	21
Εικόνα 14 Κανονικοποιημένα αποτελέσματα των μετρήσεων εξωτερικής κβαντικής απόδοσης σε 3 διαφορετικές χρονικές περιόδους. Με μαύρο την πρώτη μέρα μέτρησης, με κόκκινο σε διάστημα 6 εβδομάδων έκθεσης και με μπλε μετά από διάστημα 8 εβδομάδων έκθεσης. Το αριστερά γράφημα αφορά το Φ/Β #1 και το δεξιά το Φ/Β #2 24	24
Εικόνα 15 Κανονικοποιημένα αποτελέσματα των μετρήσεων Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης σε 3 διαφορετικές χρονικές περιόδους για τις δύο Φ/Β διατάξεις (Φ/Β #1, Φ/Β #2) 25	25
Εικόνα 16 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού περοβσκίτη..... 26	26
Εικόνα 17 Φωτογραφική παρακολούθηση/επιτήρηση των Φ/Β περοβσκίτη (αριστερά #1, δεξιά #2) σε 3 χρονικές στιγμές 28	28
Εικόνα 18 Θερμική απεικόνιση, μέσω υπέρυθρης φωτογραφικής απεικόνισης, η μεταβολή που παρουσιάστηκε ως προς την ομοιόμορφη θερμική κατανομή στην επιφάνεια των Φ/Β διατάξεων. Είναι εμφανές ότι την πρώτη ημέρα έκθεσης τους(αριστερά) και οι 2 διατάξεις παρουσίαζαν ομοιόμορφη κατανομή θερμότητας ενώ μετά από 8 εβδομάδες (δεξιά) εμφανίζεται σχετική θερμομορφία ,ιδιαίτερα στο Φ/Β #2 (δεξιά).	30
Εικόνα 19. Απεικονίσεις LBIC των Φ/Β #1 (αριστερά) και Φ/Β #2 (δεξιά) μετά από 8 εβδομάδες έκθεσης σε εξωτερικές συνθήκες. Παρατηρείται έντονη χωρική ανομοιογένεια και περιοχές μειωμένης συλλογής φωτορεύματος, με πιο εκτεταμένη υποβάθμιση στο Φ/Β #2.	31

εμπέδησης, όπως αύξηση της αντίστασης μεταφοράς φορτίου και της φαινόμενης χωρητικότητας, υποδεικνύοντας ενισχυμένους μηχανισμούς επανασύνδεσης και υποβάθμιση διεπιφανειών. Οι χωρικά επιλυμένες και θερμικές μετρήσεις επιβεβαιώνουν ότι η υποβάθμιση εξελίσσεται ανομοιόμορφα στην επιφάνεια των διατάξεων, ενώ ο οπτικός έλεγχος δεν ανέδειξε καταστροφικά φαινόμενα αστοχίας των υλικών επικάλυψης.

Συνολικά, η μελέτη αποδεικνύει ότι τα φωτοβολταϊκά περοβσκήτη παρουσιάζουν πλέον βελτιωμένη λειτουργική αντοχή σε εξωτερικές συνθήκες και ότι οι μηχανισμοί υποβάθμισης μπορούν να ανιχνευθούν και να ερμηνευθούν έγκαιρα μέσω συνδυασμένων πειραματικών τεχνικών. Τα ευρήματα ενισχύουν τη σκοπιμότητα της τεχνολογίας και υποδεικνύουν ότι η μετάβασή της προς εφαρμογές πραγματικών συνθηκών και μελλοντική εμπορική αξιοποίηση αποτελεί έναν ρεαλιστικό και εφικτό στόχο.

2. Μετρήσεις εσωτερικού χώρου με πρωτόκολλο ISOS D-1

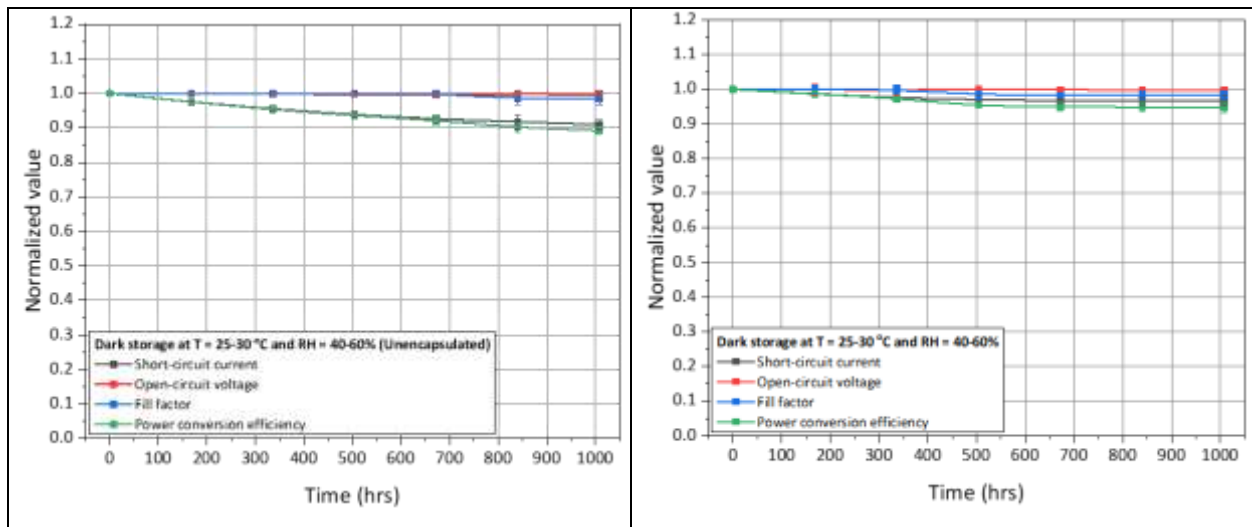
Ακολουθούν τα αποτελέσματα αξιολόγησης της σταθερότητας των ηλιακών στοιχείων βάσει του πρωτοκόλλου ISOS-D-1, το οποίο αφορά τη γήρανση των διατάξεων υπό συνθήκες αποθήκευσης σε σκοτεινό περιβάλλον. Στην **Εικόνα 1** παρουσιάζεται μια φωτογραφία ενός ενθυλακωμένου ηλιακού στοιχείου, καθώς και η δομή του. Στον **Πίνακα της εικόνας 2** παρουσιάζονται τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ηλιακών στοιχείων πριν και μετά την ενθυλάκωσή τους, ενώ η σταθερότητα των ηλιακών στοιχείων (ενθυλακωμένων και μη) σε συνθήκες που ορίζει το πρωτόκολλο ISOS-D-1 παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3**. Όπως διαπιστώνεται, τα ηλιακά στοιχεία διατηρούν υψηλή απόδοση ενεργειακής μετατροπής της τάξεως του 15% μετά την ενθυλάκωσή τους, με την υποβάθμιση της απόδοσής τους λόγω της διαδικασίας να κυμαίνεται στο 4%. Από την άλλη πλευρά, τα μη ενθυλακωμένα ηλιακά στοιχεία διατηρούν πάνω από 90% της αρχικής τους απόδοσης ύστερα από γήρανση 1000 ωρών όπως ορίζει το πρωτόκολλο ISOS-D-1, ενώ για τις αντίστοιχες ενθυλακωμένες διατάξεις η αντίστοιχη τιμή κυμαίνεται στο 95%.



Εικόνα 1 Φωτογραφία από ένα ενθυλακωμένο περοβσκιτικό ηλιακό στοιχείο και σχηματική αναπαράσταση της δομής του.

Solar cell	Τύπος	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (-)	PCE (%)
1	μη ενθυλακωμένα	24.3	1040	0.62	15.67
2	ενθυλακωμένα	23.8	1018	0.62	15.02

Εικόνα 2 Πίνακας με Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ενθυλακωμένων και μη ηλιακών στοιχείων που κατασκευάστηκαν με τη χρήση της τεχνικής inkjet printing.



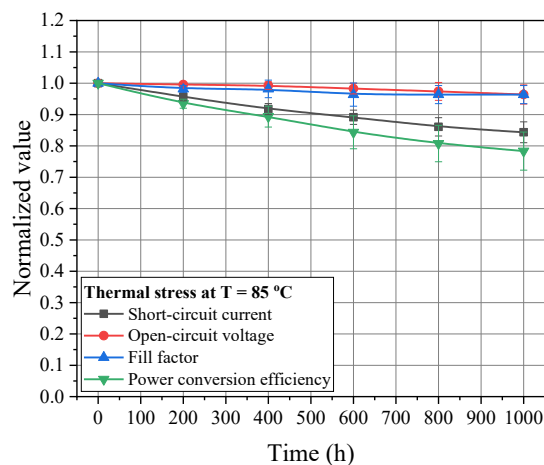
Εικόνα 3. Διακύμανση των κύριων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενθυλακωμένων και μη περοβσκιτικών ηλιακών στοιχείων υπο της συνθήκης που ορίζει το πρότυπο ISOS-D-1.

Ηλιακή μονάδα	Τύπος	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (-)	PCE (%)
1	μη ενθυλακωμένη	22.8	985	0.62	13.92
2	ενθυλακωμένη	22.2	962	0.60	12.81

Εικόνα 5. Πίνακας με Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ενθυλακωμένων και μη ηλιακών μονάδων που κατασκευάστηκαν με τη χρήση της τεχνικής inkjet printing και ηλεκτροδίου άνθρακα χαμηλής θερμοκρασίας κατεργασίας

2.1 Γήρανση ενθυλακωμένων ηλιακών μονάδων σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας T=85°C

Η λειτουργία των ηλιακών μονάδων υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας είναι ένας σημαντικός παράγοντας που μπορεί να μειώσει τη διάρκεια ζωής αυτών των συσκευών. Γενικά, η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών μπορεί εύκολα να φτάσει τους 50°C κατά την εφαρμογή τους σε θερμές κλιματικές συνθήκες. Έτσι, για να διαπιστωθεί η δυνατότητα εμπορευματοποίησής τους για εφαρμογές εξωτερικού χώρου, οι συσκευές θα πρέπει πρώτα να υποβληθούν σε δοκιμές ισοθερμικής καταπόνησης άνω των 50°C, σύμφωνα με τα πρότυπα που προβλέπονται για την υπό εξέταση φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Στην παρούσα μελέτη, οι ηλιακές μονάδες υποβλήθηκαν σε συνθήκες θερμικής καταπόνησης στους 85°C. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε με χρήση ενός εργαστηριακού φούρνου. Οι ηλιακές μονάδες εκτέθηκαν από τη θερμοκρασία δωματίου στους 85°C και αντίστροφα, με μέγιστο ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας 1°C/λεπτό. Η ελεγχόμενη αύξηση και μείωση της θερμοκρασίας απέτρεψε οποιαδήποτε υποβάθμιση των ηλιακών μονάδων λόγω θερμικού σοκ. Η συνολική διάρκεια του πειράματος και τα διαστήματα μέτρησης ορίστηκαν σε 1000 ώρες και 100 ώρες, αντίστοιχα.



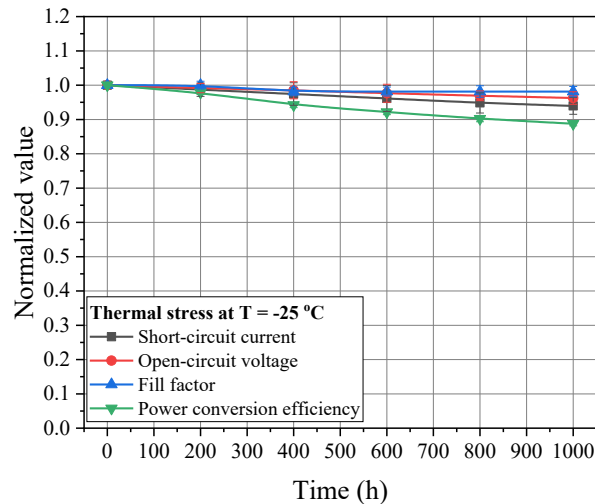
Εικόνα 6. Ισοθερμική γήρανση των ηλιακών μονάδων σε θερμοκρασία T=85°C.

Όπως παρατηρείται στην **Εικόνα 6**, οι ηλιακές μονάδες παρουσίασαν αξιοσημείωτη σταθερότητα υπό συνθήκες ισοθερμικής γήρανσης στους 85°C, διατηρώντας σχεδόν το 80% της αρχικής τους απόδοσης μετά από 1000 ώρες πειράματος. Ο κύριος λόγος για την υποβάθμιση της PCE τους ήταν η μείωση του J_{sc} , ενώ το FF και V_{oc} παρουσίασαν μικρότερη διακύμανση. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, οι υβριδικοί οργανικοί-ανόργανοι περοβσκίτες παρουσιάζουν αλλαγές στην κρυσταλλική τους δομή σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 50°C. Πιο συγκεκριμένα, το $CH_3NH_3PbI_3$ υφίσταται μετατροπή φάσης από τετραγωνική σε κυβική πάνω από 54°C. Δημοσιευμένες έρευνες αναφέρουν επίσης για αποσύνθεση του $CH_3NH_3PbI_3$ για υψηλότερες θερμοκρασίες (ειδικά για 85°C και υψηλότερες), ανεξάρτητα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (ξηρό περιβάλλον υπό αδρανείς συνθήκες και στο σκοτάδι με 50% σχετική υγρασία). Η συνεχής έκθεση του $CH_3NH_3PbI_3$ σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών είναι ικανή να ξεκινήσει την αποικοδόμηση του υλικού, καθώς η ενέργεια σχηματισμού του $CH_3NH_3PbI_3$ (0,11–0,14 eV) είναι κοντά στη μέση θερμική ενέργεια που εκτιμάται να δέχεται τους 85°C (0,093 eV). Σε υψηλές θερμοκρασίες, η θερμική αποσύνθεση του $CH_3NH_3PbI_3$ μπορεί να συμβεί όπως εξηγείται στις ακόλουθες αντιδράσεις: $CH_3NH_3PbI_3(s) \rightarrow HI(g) + CH_3NH_2(g) + PbI_2(s)$, $CH_3NH_3PbI_3(s) \rightarrow CH_3I(g) + NH_3(g) + PbI_2(s)$. Για να επιτευχθεί σταθερότητα στα PSCs σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, θα πρέπει να εφαρμοστεί ένας περοβσκίτης που να παρουσιάζει σταθερά χαρακτηριστικά για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, ανάλογα με την επικείμενη εφαρμογή. Αυτό είναι πολύ σημαντικό και για την επίτευξη υψηλής απόδοσης διατάξεων, αφού κατά την ενθυλάκωση των συσκευών αυτών απαιτούνται θερμοκρασίες συνήθως μεγαλύτερες από 100°C, διαδικασία που οδηγεί στην αποδόμηση των συμβατικών υβριδικών οργανικών-ανόργανων περοβσκιτών.

2.2 Γήρανση ενθυλακωμένων ηλιακών μονάδων σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας $T=-25^\circ C$

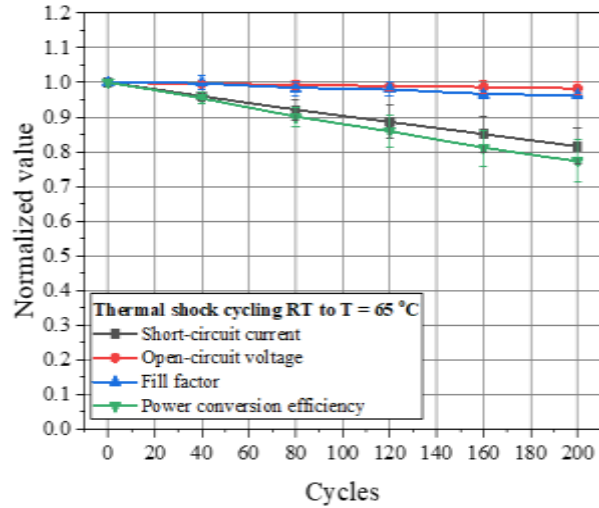
Η σταθερότητα των ηλιακών μονάδων σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών (κάτω από μηδέν βαθμούς Κελσίου) είναι επίσης κρίσιμη και θα πρέπει να αξιολογηθεί πριν από την ευρεία εμπορευματοποίηση αυτής της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Οι επίγειες εφαρμογές ψυχρού κλίματος, καθώς και εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως η αεροναυπηγική και η αεροδιαστημική, παρουσιάζουν αυξανόμενο ενδιαφέρον την τελευταία δεκαετία προς την κατεύθυνση της ενίσχυσης της παραγωγής ενέργειας με βιώσιμο τρόπο. Στην παρούσα ομάδα πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε ισοθερμική γήρανση των ηλιακών μονάδων σε θερμοκρασία $T=-25^\circ C$ με χρήση ενός καταψύκτη. Η συνολική διάρκεια του

πειράματος αφορούσε σε 1000 ώρες και οι μετρήσεις διεξάγονταν κάθε 100 ώρες. Οι ηλιακές μονάδες εκτέθηκαν από τη θερμοκρασία δωματίου στους -25°C και αντίστροφα, με μέγιστο ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας $1^{\circ}\text{C}/\text{λεπτό}$. Η ελεγχόμενη μείωση και αύξηση της θερμοκρασίας απέτρεψε οποιαδήποτε υποβάθμιση των ηλιακών μονάδων λόγω θερμικού σοκ, ενώ η πρόσθετη αεροστεγή σφράγιση των συσκευών σε πλαστικά σακουλάκια περιόρισε περαιτέρω την επίδραση της υγρασίας.



Εικόνα 7. Ισοθερμική γήρανση των ηλιακών μονάδων σε θερμοκρασία $T=-25^{\circ}\text{C}$.

Όπως παρατηρείται στην **Εικόνα 7** οι ηλιακές μονάδες παρουσίασαν αξιοσημείωτη σταθερότητα υπό συνθήκες ισοθερμικής γήρανσης στους -25°C , διατηρώντας σχεδόν το 90% της αρχικής τους απόδοσης μετά από 1000 ώρες πειράματος. Ο κύριος λόγος για την υποβάθμιση της PCE τους ήταν η μείωση όλων των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους, συμπεριλαμβανομένου των J_{sc} , V_{oc} και FF. Αν και οι μηχανισμοί υποβάθμισης για φωτοβολταϊκά υπό ισοθερμική γήρανση σε χαμηλές θερμοκρασίες έχουν διερευνηθεί για άλλες τεχνολογίες, οι μελέτες που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί για τα περοβσκιτικά φωτοβολταϊκά είναι πολύ λίγες. Όπως είναι γνωστό, τα περοβσκιτικά φωτοβολταϊκά εμφανίζουν σχετικά χαμηλή θερμική σταθερότητα που επηρεάζεται από το είδος των οργανικών υλικών εκτός από τα εγγενή χαρακτηριστικά του περοβσκίτη, σε αντίθεση με τα ανόργανα ηλιακά κύτταρα ημιαγωγών (Si, GaAs, CdTe, κ.λπ.) που είναι θερμικά εξαιρετικά σταθερά. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες μελέτες, η θερμοκρασία όχι μόνο επηρεάζει τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των υβριδικών οργανικών-ανόργανων περοβσκιτών, αλλά επίσης επηρεάζει το διαχωρισμό, την επανασύνδεση και τη μεταφορά των φορτίων στις συσκευές αυτές. Μεταξύ των πιθανών παραγόντων που προκαλούν τη μείωση της PCE των περοβσκιτικών φωτοβολταϊκών σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι οι δομικές μεταπτώσεις της



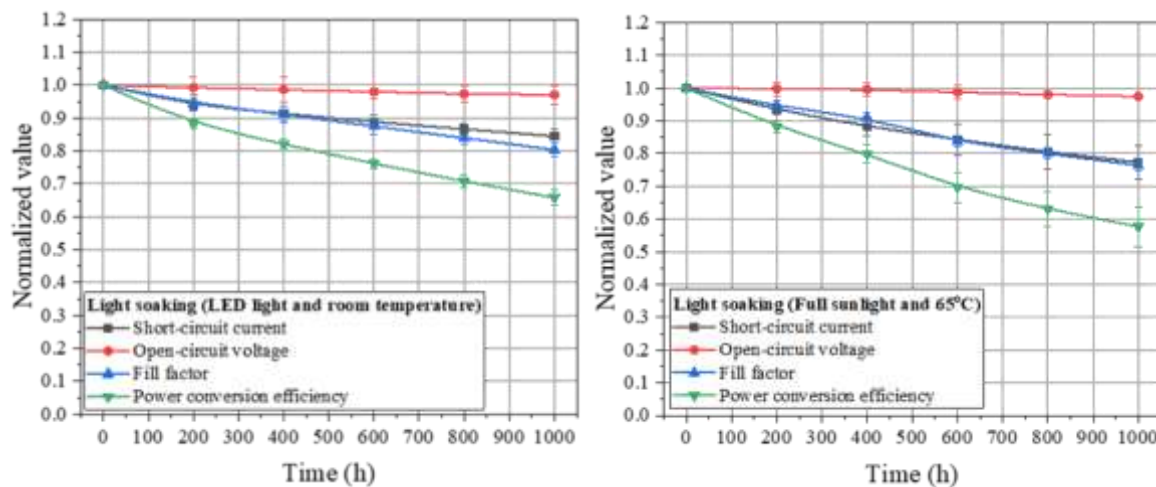
Εικόνα 8. Κυκλική θερμική κόπωση από RT σε T=65°C των ηλιακών μονάδων.

Όπως παρατηρείται στην **Εικόνα 8**, οι ηλιακές μονάδες παρουσίασαν σημαντική υποβάθμιση της απόδοσής τους σε συνθήκες κυκλικής θερμικής καταπόνησης με απότομες θερμοκρασιακές αλλαγές, με τις συσκευές να διατηρούν το 75% της αρχικής τους απόδοσης μετά από 200 θερμικούς κύκλους. Ο κύριος λόγος για την υποβάθμιση της PCE των συσκευών ήταν η σημαντική μείωση του J_{sc} , ενώ το V_{oc} και ο FF παρουσίασαν πολύ μικρότερη διακύμανση στις τιμές τους, αντίστοιχα. Η υποβάθμιση των φωτοβολταϊκών κάτω από απότομες θερμοκρασιακές αλλαγές αναφέρεται ότι είναι πιο σοβαρή σε σύγκριση με την καταπόνησή τους υπό σταθερές ακραίες θερμοκρασίες. Ο κύριος λόγος για αυτό το είδος της υποβάθμισης θεωρείται οι αστοχίες αποκόλλησης της μονολιθικής αρχιτεκτονικής των συσκευών, που προκύπτουν από την αναντιστοιχία στους συντελεστές θερμικής διαστολής των διαφορετικών στρωμάτων. Ο βαθμός της υποβάθμισης συσχετίζεται με τον τύπο της ενθυλάκωσης της συσκευής, όπου το στεγανοποιητικό υλικό μπορεί να αυξήσει τη μηχανική σταθερότητα του συστήματος κατά τη διάρκεια της θερμικής καταπόνησης. Από την άλλη πλευρά, η αποικοδόμηση των δομών περοβσκίτη ανιχνεύεται συνήθως μετά από κυκλική θερμική καταπόνηση, υπό μορφή αποσύνθεσης του περοβσκίτη και αλλαγών κρυσταλλικής φάσης. Το αποτέλεσμα του τελευταίου είδους υποβάθμισης παρατηρείται συνήθως ακόμη και οπτικά, από την αλλαγή του χρώματος του υλικού περοβσκίτη από σκούρο καφέ σε κίτρινο, συνοδευόμενη από την επακόλουθη μείωση του J_{sc} των φωτοβολταϊκών, κάτι που παρατηρήθηκε επίσης έντονα στην παρούσα ομάδα πειραμάτων. Επιπλέον, κάτω από αυτό το είδος

θερμικής καταπόνησης μπορεί να λάβει χώρα μια αύξηση στο μέγεθος των κρυστάλλων του περοβσκίτη, οδηγώντας στην ανάπτυξη ατελειών στα όρια των κρυστάλλων.

2.3 Κόπωση των ενθυλακωμένων ηλιακών μονάδων υπό συνεχή ακτινοβολή φωτός

Μία από τις βασικές προκλήσεις που έχουν εμποδίσει την εμπορευματοποίηση των περοβσκιτικών φωτοβολταϊκών είναι η υποβάθμιση των συσκευών υπό συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες περιλαμβάνουν υψηλή και παρατεταμένη καταπόνηση από το φως και αυξημένη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Διερευνώντας τους μηχανισμούς πίσω από την υποβάθμιση που προκαλείται από το φως, οι ερευνητές αναπτύσσουν στρατηγικές για τον μετριασμό των ασταθειών των συσκευών, προωθώντας τελικά την ανάπτυξη και εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας. Στην παρούσα περίπτωση, οι ηλιακές μονάδες καταπονήθηκαν υπό παρατεταμένη έκθεση σε φως LED σε θερμοκρασία δωματίου ή υπό πλήρες ηλιακό φως στους 65°C. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους προσομοιωτές και συσκευές ηλιακού φωτός, ενώ η συνολική διάρκεια του πειράματος και τα διαστήματα μέτρησης ορίστηκαν στις 1000 ώρες και 100 ώρες, αντίστοιχα.



Εικόνα 9. Καταπόνηση των ενθυλακωμένων ηλιακών μονάδων υπό παρατεταμένη έκθεση (αριστερά) σε φως LED και συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου, (δεξιά) σε πλήρες ηλιακό φως και 65°C.

Όπως παρατηρείται στην **Εικόνα 9** οι ηλιακές μονάδες διατήρησαν σχεδόν το 65% της αρχικής τους απόδοσης μετά από 1000 ώρες γήρανσης υπό συνθήκες φωτισμού LED και θερμοκρασίας δωματίου. Ο κύριος λόγος πίσω από αυτή τη μείωση της PCE ήταν η μείωση του FF και του J_{sc} , ενώ το V_{oc} παρουσίασε πολύ χαμηλότερη διακύμανση. Η καταπόνηση των φωτοβολταϊκών περοβσκίτη υπό συνθήκες συνεχούς

ακτινοβολήσης φωτός προάγει τη μετανάστευση ιόντων και ελαττωμάτων, καθώς και την ανάπτυξη ηλεκτρονικών φραγμών διεπαφής, τα οποία είναι βασικοί παράγοντες που συμβάλλουν στην αύξηση της συνολικής παρασιτικής αντίστασης σε σειρά και στη μείωση της απόδοσης συλλογής φορτίου. Επιπλέον, η μετανάστευση ιόντων στα υλικά περοβσκίτη μεταβάλλει τις ηλεκτρονικές τους ιδιότητες, επηρεάζοντας την απόδοση παραγωγής φωτο-ρεύματος και τον ρυθμό επανασύνδεσης φορτίων στις συσκευές. Από την άλλη πλευρά, η αυξημένη θερμοκρασία κατά τη λειτουργία των συσκευών είναι ένας επιπλέον λόγος για την αύξηση της υποβάθμισης των υλικών, ενώ η έκθεση των περοβσκιτών σε υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει την αποσύνθεσή τους στις διεπαφές με τα υλικά μεταφοράς φορτίων, ειδικά για τα υλικά μεταφοράς φορτίων που επιδεικνύουν υψηλή φωτο-καταλυτική δράση. Τα προαναφερόμενα μπορούν να επαληθεύσουν τον αυξημένο ρυθμό υποβάθμισης της απόδοσης των ηλιακών μονάδων που καταπονήθηκαν υπό πλήρη ηλιακή ακτινοβολία και στους 65°C. Σε αυτήν την περίπτωση, η μεταβολή των παραμέτρων των φωτοβολταϊκών ήταν παρόμοια με τις δοκιμές καταπόνησης υπό συνθήκες φωτισμού LED και θερμοκρασίας δωματίου, αλλά πιο έντονη, με τις ηλιακές μονάδες να επιδεικνύουν μείωση 45% στην PCE τους μετά από 1000 ώρες γήρανσης.

3. Μεθοδολογία Πειραμάτων σε Εξωτερικές Συνθήκες

Η πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον ολοκληρωμένο ηλεκτρικό, οπτικό και θερμικό χαρακτηρισμό των διατάξεων, καθώς και την αξιολόγηση της εξέλιξης της συμπεριφοράς τους κατά την έκθεσή τους σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διακριτές χρονικές περιόδους: α) αμέσως μετά την παραλαβή των Φ/Β διατάξεων και μετά την κατάσταση burn-in, β) μετά από έξι (6) εβδομάδες και γ) μετά από οκτώ (8) εβδομάδες έκθεσης σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες ενώ μετά από τις παραπάνω χρονικές στιγμές πραγματοποιήθηκαν πειράματα οπτικών μετρήσεων στο εργαστήριο.

3.1 Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός I-V

Για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις με ηλεκτρονικό φορτίο. Χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό σύστημα PV-BLOCKS®, με τις ακόλουθες ρυθμίσεις λειτουργίας:

- Κατεύθυνση σάρωσης: Ανάστροφη (Scan Direction: Reverse)

- Σημεία σάρωσης (Scan Points) : 100
- Χρονικό διάστημα μέτρησης (Settle Time) : 0.05 s
- Κατάσταση μεταξύ των μετρήσεων (State Between Measurements) : MPPT (Perturb & Observe)

Αφού οι διατάξεις τοποθετήθηκαν στις ειδικές βάσεις τους στο φωτοβολταϊκό πάρκο του εργαστηρίου της ερευνητικής ομάδας ΚΕΤΥΦ του ΕΛΜΕΠΑ, πραγματοποιήθηκε ηλεκτρικός χαρακτηρισμός μέσω της καταγραφής καμπυλών Ρεύματος–Τάσης (I–V). Οι μετρήσεις εκτελούνταν ανά χρονικό διάστημα ενός λεπτού. Στο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων, οι διατάξεις λειτουργούσαν στο σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point – MPP) μέσω του τροποποιημένου αλγορίθμου MPPT που παρουσιάστηκε στο Π4.2 (Perturb and Observe), εξασφαλίζοντας ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας και συνάδοντας με τα εδραιωμένα πρότυπα και πρωτόκολλα μετρήσεων για φωτοβολταϊκά περοβσκήτη.

3.2 Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS)

Για τις μετρήσεις Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (Electrochemical Impedance Spectroscopy – EIS) χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτής παραμέτρων Keithley 4200A-SCS, με τις ακόλουθες ρυθμίσεις:

- Τάση πόλωσης (V_{bias}):10 V
- Πλάτος εναλλασσόμενης τάσης (V_{amp}):10 mV (peak-to-peak)
- Εύρος λογαριθμικής σάρωσης συχνότητας: 1 kHz – 1 MHz

Οι μετρήσεις EIS επιτρέπουν τη διερεύνηση των μηχανισμών μεταφοράς φορτίου και των απωλειών στο εσωτερικό των διατάξεων, καθώς και την παρακολούθηση της εξέλιξης παραμέτρων όπως οι αντιστάσεις και οι χωρητικότητες, σε συνάρτηση με τον χρόνο έκθεσης των δειγμάτων.

3.3 Απεικόνιση Laser Beam Induced Current (LBIC)

Η απεικόνιση Laser Beam Induced Current (LBIC) πραγματοποιήθηκε με χρήση λέιζερ μήκους κύματος 405 nm. Η τεχνική LBIC επιτρέπει την αξιολόγηση της ηλεκτρικής απόκρισης των φωτοβολταϊκών διατάξεων μέσω της καταγραφής του επαγόμενου φωτορεύματος κατά τη σάρωση της επιφάνειας του Φ/Β.

Μέσω της μεθόδου αυτής αναμένεται να εντοπιστούν χωρικές ανομοιογένειες, περιοχές μειωμένης συλλογής φορέων και η ανάπτυξη τοπικών ελαττωμάτων ή υποβαθμίσεων, προσφέροντας κρίσιμες πληροφορίες για τη μακροχρόνια αξιοπιστία των δειγμάτων.

3.4 Μετρήσεις Εξωτερικής Κβαντικής Απόδοσης (EQE)

Οι μετρήσεις Εξωτερικής Κβαντικής Απόδοσης (External Quantum Efficiency – EQE) πραγματοποιήθηκαν με το σύστημα Enlitech QE-T, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Φασματικό εύρος: 300 nm – 900 nm
- Ενεργός περιοχή φωτισμού: $1 \times 1 \text{ mm}^2$

Η τεχνική EQE επιτρέπει τη φασματικά επιλυμένη αξιολόγηση της ικανότητας των φωτοβολταϊκών στοιχείων περοβσκίτη να μετατρέπουν τα προσπίπτοντα φωτόνια σε συλλεγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της φασματικής απόκρισης των δειγμάτων και την ανίχνευση πιθανών μεταβολών που σχετίζονται με υποβάθμιση ενεργών στρωμάτων ή αυξημένες απώλειες συλλογής φορέων.

3.5 Θερμική Απεικόνιση

Η θερμική απεικόνιση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση υπέρυθρης κάμερας FLIR C5. Η υπέρυθρη θερμογραφία επιτρέπει τη χωρικά επιλυμένη καταγραφή της θερμοκρασιακής κατανομής στην επιφάνεια των διατάξεων κατά τη λειτουργία τους. Μέσω της τεχνικής αυτής αναμένεται να εντοπιστούν θερμά σημεία (hot-spots), ανομοιογένειες στη θερμική συμπεριφορά και περιοχές αυξημένων απωλειών, οι οποίες σχετίζονται με ηλεκτρικές ή κατασκευαστικές αστοχίες.

3.6 Θερμική Απεικόνιση

Παράλληλα με τις ηλεκτρικές και θερμικές μετρήσεις, πραγματοποιήθηκε φωτογραφική απεικόνιση των δειγμάτων με οπτική κάμερα, στις ίδιες τρεις χρονικές περιόδους. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε για την παρακολούθηση μακροσκοπικών αλλοιώσεων, όπως αποχρωματισμός, μεταβολές στην επιφάνεια και οπτικά σημάδια γήρανσης των δειγμάτων. Η σύγκριση των φωτογραφιών σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης επιτρέπει τη συσχέτιση των οπτικών μεταβολών με τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών, φασματικών και θερμικών μετρήσεων.

4. Αποτελέσματα ηλεκτρικού Χαρακτηρισμού Φ/Β διατάξεων σε εξωτερικές συνθήκες

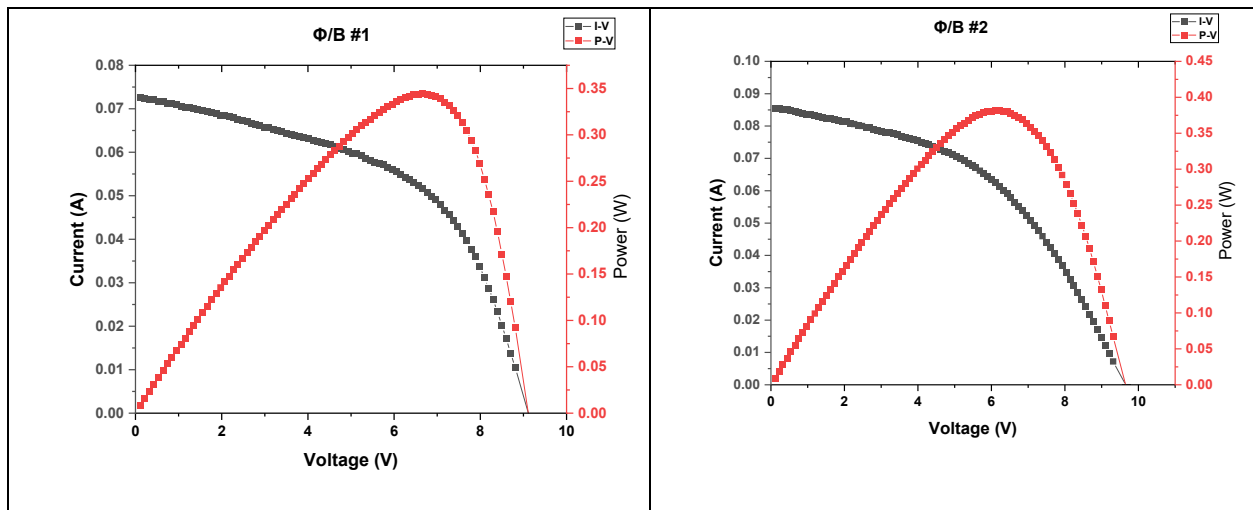
Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ηλεκτρικού χαρακτηρισμού των φωτοβολταϊκών διατάξεων που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Ο ηλεκτρικός

χαρακτηρισμός αποτελεί την πλέον ευρέως διαδεδομένη και θεμελιώδη τεχνική για τη μελέτη της λειτουργικής συμπεριφοράς φωτοβολταϊκών διατάξεων, καθώς μέσω αυτού εξάγονται όλες οι βασικές ηλεκτρικές παράμετροι που καθορίζουν την απόδοσή τους. Μέσω της καταγραφής των καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) είναι δυνατός ο προσδιορισμός κρίσιμων μεγεθών, όπως η τάση ανοιχτοκύκλωσης, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, ο παράγοντας πλήρωσης και η μέγιστη παραγόμενη ισχύς. Η παρακολούθηση της εξέλιξης των παραμέτρων αυτών στον χρόνο επιτρέπει την αξιολόγηση της σταθερότητας των φωτοβολταϊκών διατάξεων, την εκτίμηση της ημερήσιας ενεργειακής τους απόδοσης και τον εντοπισμό φαινομένων υποβάθμισης υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Στο πλαίσιο αυτό, ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός αποτελεί τη βασική αναφορά για τη μελέτη της γήρανσης των διατάξεων και τη σύγκριση της απόδοσής τους στον χρόνο, ενώ τα αποτελέσματά του χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς για την ερμηνεία των συμπληρωματικών πειραματικών τεχνικών που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια..

4.1 Αρχικές Τιμές Φ/Β διατάξεων περοβσκίτη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αρχικές τιμές των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των 2 διατάξεων περοβσκίτη την ημέρα που παραλήφθηκαν και τοποθετήθηκαν στις βάσεις του Φ/Β πάρκου στον εξωτερικό χώρο του εργαστηρίου της ερευνητικής ομάδας ΚΕΤΥΦ του ΕΛΜΕΠΑ μετά από την αρχική κατάσταση burn-in.



Εικόνα 10 Οι αρχικές καμπύλες I-V και P-V για τις 2 Φ/Β διατάξεις μετά την εγκατάστασής τους στο ΦΒ πάρκο του ΕΛΜΕΠΑ

Όνομα Φ/B	Voc	Isc	Vmax	Imax	Pmax	FF	PCE	Ακτινοβολία	Θερμοκρασία
#	(V)	(A)	(V)	(A)	(W)	(%)	(%)	(W/m ²)	(°Celsius)
Φ/B 1	9.16	0.073	6.66	0.052	0.34	51.74	8.21	884	30.16
Φ/B 2	9.70	0.086	6.22	0.061	0.38	46.00	8.80	913	61.05

Εικόνα 11 Πίνακας με τις μέγιστες τιμές των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των 2 Φ/B στοιχείων που καταγράφηκαν την πρώτη ημέρα έκθεσης σε εξωτερικές συνθήκες

Στην Εικόνα 10 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες Ρεύματος–Τάσης (I–V) και Ισχύος–Τάσης (P–V) για τις υπό μελέτη φωτοβολταϊκές διατάξεις περοβσκήτη. Στον πίνακα της εικόνας 11 παρατίθενται οι μέγιστες τιμές των βασικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών για κάθε Φ/B διάταξη, όπως αυτές προέκυψαν από τις αρχικές μετρήσεις της πρώτης ημέρας έκθεσης. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων είναι εμφανές ότι το Φ/B #1 παρουσιάζει χαμηλότερη τάση ανοικτού κυκλώματος (Voc) καθώς και χαμηλότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης (Isc) σε σχέση με το Φ/B #2. Η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται στις διαφορετικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και των περιβαλλοντικών παραμέτρων που επικρατούσαν τη χρονική στιγμή πραγματοποίησης της κάθε μέτρησης, δεδομένου ότι οι μετρήσεις εκτελούνταν σε πραγματικές συνθήκες πεδίου.

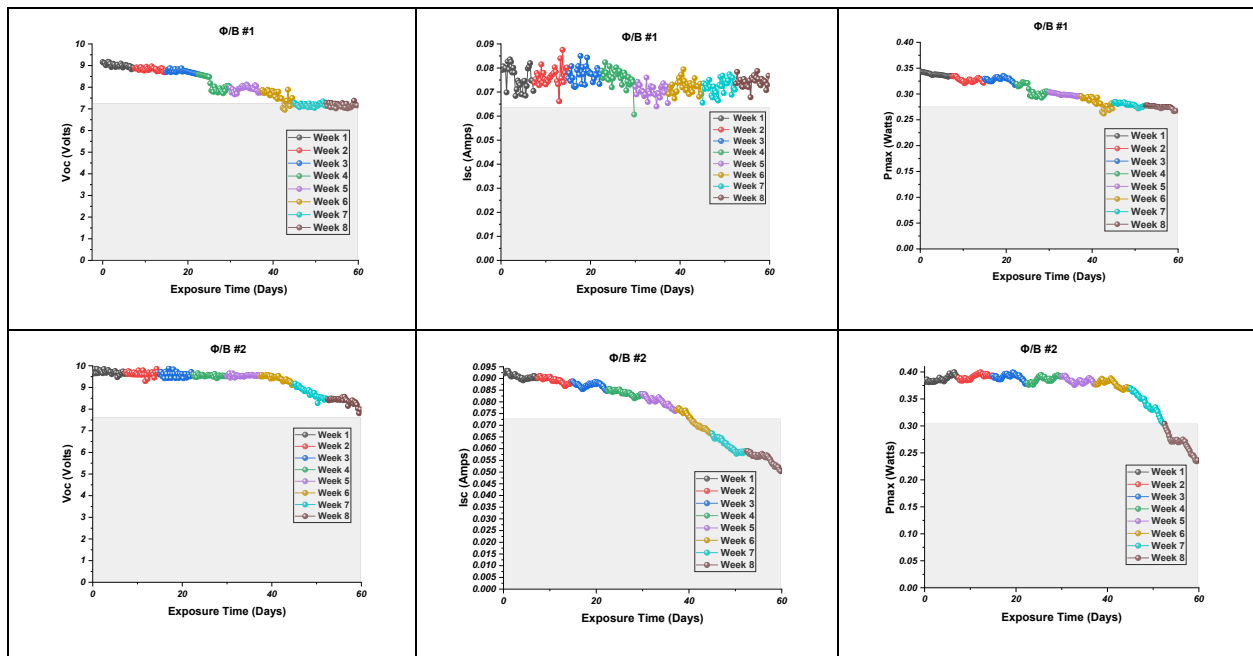
Παρά τις χαμηλότερες τιμές Voc και Isc, από την Εικόνα 1 αλλά και από τα δεδομένα του Πίνακα προκύπτει ότι το **Φ/B #1** εμφανίζει υψηλότερη τιμή του παράγοντα πλήρωσης (**Fill Factor – FF**). Η αυξημένη τιμή του FF υποδηλώνει βελτιωμένη ποιότητα της I–V καμπύλης, μικρότερες εσωτερικές απώλειες και ευνοϊκότερη σχέση μεταξύ των εσωτερικών αντιστάσεων του Φ/B.

Συνεπώς, αν και οι δύο Φ/B διατάξεις χαρακτηρίζονται από διαφορετικά επίπεδα τάσης και ρεύματος λόγω εξωτερικών συνθηκών μέτρησης, ο παράγοντας πλήρωσης αναδεικνύεται ως κρίσιμος δείκτης της εσωτερικής ηλεκτρικής ποιότητας, προσδίδοντας στο Φ/B #1 συγκριτικό πλεονέκτημα ως προς τη μορφή και τη σταθερότητα της ηλεκτρικής του απόκρισης.

Οι αρχικές καμπύλες I–V και P–V χρησιμοποιήθηκαν ως τιμές αναφοράς για την αξιολόγηση της γήρανσης των διατάξεων, επιτρέποντας τη συστηματική ανάλυση της υποβάθμισης και τον ποσοτικό προσδιορισμό του δείκτη TS₈₀ στα επόμενα κεφάλαια.

απώλειες στη συλλογή των φωτοπαραγόμενων φορέων. Η μείωση αυτή γίνεται πιο έντονη στις μεταγενέστερες εβδομάδες έκθεσης, υποδηλώνοντας σωρευτική επίδραση των μηχανισμών γήρανσης. Η συνδυαστική επίδραση της μείωσης τόσο της V_{oc} όσο και του I_{sc} οδηγεί σε εμφανή πτώση της P_{max} , η οποία αποτελεί τον πλέον άμεσο δείκτη υποβάθμισης της απόδοσης του Φ/Β. Παράλληλα, παρατηρείται διασπορά των τιμών εντός της ημέρας, η οποία σχετίζεται με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, χωρίς ωστόσο να αναιρεί τη σαφή χρονική τάση υποβάθμισης από εβδομάδα σε εβδομάδα έκθεσης σε εξωτερικές συνθήκες.

Το Φ/Β #2 παρουσιάζει αντίστοιχη αλλά πιο έντονη υποβάθμιση των ηλεκτρικών του χαρακτηριστικών. Η μείωση του V_{oc} με τον χρόνο είναι πιο εμφανής σε σύγκριση με το Φ/Β #1, γεγονός που υποδηλώνει ισχυρότερη επιδείνωση των μηχανισμών μεταφοράς φορτίου και αυξημένες απώλειες επανασύνδεσης. Το I_{sc} εμφανίζει επίσης σημαντική πτώση με την πάροδο των εβδομάδων, γεγονός που υποδηλώνει εκτεταμένες απώλειες στη συλλογή φορέων, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των μετρήσεων EQE και LBIC, όπου καταγράφηκε μεγαλύτερη φασματική και χωρική υποβάθμιση για το συγκεκριμένο Φ/Β. Η πτώση της P_{max} στο Φ/Β #2 είναι εντονότερη και ταχύτερη, υποδεικνύοντας ότι η συγκεκριμένο Φ/Β διάταξη από περοβσκίτη παρουσιάζει χαμηλότερη αντοχή στις εξωτερικές συνθήκες και ενισχυμένους μηχανισμούς γήρανσης σε σχέση με το Φ/Β #1.



Εικόνα 13 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά 2 Φ/Β από περοβσκίτη, κανονικοποιημένες στα 1000 W/m^2 , κατά την διάρκεια έκθεσης τους σε πραγματικές συνθήκες στις εγκαταστάσεις του ΕΛΜΕΠΑ.

Στην εικόνα 13 απεικονίζεται αριστερά η τάση ανοιχτού κυκλώματος στην μέση το ρεύμα βραχυκύκλωσης και δεξιά η μέγιστη ισχύς. Οι τιμές αφορούν τις μέγιστες ημερήσιες τιμές ανά μέρα για διάστημα 8 εβδομάδων έκθεσης (~1350 ώρες). Παράλληλα παρουσιάζεται η εξέλιξη των βασικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των δύο φωτοβολταϊκών διατάξεων (Φ/Β #1 και Φ/Β #2). Οι τιμές είναι κανονικοποιημένες στα 1000 W/m², ενώ με γκρι χρώμα απεικονίζεται το κατώφλι TS₈₀, το οποίο υποδηλώνει μείωση της εκάστοτε παραμέτρου κατά 20% σε σχέση με την αρχική της τιμή μετά από την αρχική απώλεια του burn-in.

Για το Φ/Β #1 παρατηρείται σχετικά ήπια και σταδιακή υποβάθμιση όλων των ηλεκτρικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια των περίπου 240 ημερών έκθεσης. Η τάση ανοικτού κυκλώματος (Voc) εμφανίζει μικρή πτωτική τάση, χωρίς ωστόσο να προσεγγίζει το όριο TS₈₀ εντός του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος, γεγονός που υποδηλώνει καλή σταθερότητα του ενεργειακού χάσματος και περιορισμένες απώλειες λόγω επανασύνδεσης. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης (Isc) παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά και ελαφρώς εντονότερη μείωση σε σχέση με τη Voc, ωστόσο παραμένει άνω του ορίου TS₈₀ καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Η συμπεριφορά αυτή υποδεικνύει ήπιες απώλειες στη συλλογή φορέων. Αντίθετα, η μέγιστη ισχύς (Pmax) εμφανίζει τη μεγαλύτερη μείωση, καθώς επηρεάζεται συνδυαστικά από τις μεταβολές τόσο της τάσης όσο και του ρεύματος. Από το διάγραμμα εκτιμάται ότι το TS₈₀ για την Pmax προσεγγίζεται προς το τέλος της περιόδου έκθεσης, περίπου στις 1350 ώρες (≈8 εβδομάδες).

Το Φ/Β #2 παρουσιάζει μια σαφώς εντονότερη και ταχύτερη υποβάθμιση σε σύγκριση με το Φ/Β #1. Η Voc διατηρείται σε υψηλά επίπεδα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ωστόσο μετά τις ~1000 ώρες λειτουργίας παρατηρείται πιο απότομη πτώση, χωρίς όμως να φθάνει το όριο TS₈₀ εντός των 8 εβδομάδων. Αντιθέτως, το Isc παρουσιάζει έντονη και σχεδόν μονοτονική μείωση μετά τις πρώτες εβδομάδες έκθεσης. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι το TS₈₀ για το Isc επιτυγχάνεται περίπου στις 40–45 ημέρες (≈5–6 εβδομάδες), γεγονός που υποδηλώνει σημαντικές απώλειες στη συλλογή φορτίου και αυξημένες εσωτερικές απώλειες. Η μέγιστη ισχύς (Pmax) εμφανίζει την πιο δραματική υποβάθμιση, με το TS₈₀ να επιτυγχάνεται περίπου στις 42-47 ημέρες (≈5,5–6 εβδομάδες). Η απότομη πτώση της Pmax στις τελευταίες εβδομάδες έκθεσης υποδεικνύει επιταχυνόμενη γήρανση του Φ/Β και ενδεχόμενη ενεργοποίηση μηχανισμών υποβάθμισης που επηρεάζουν πολλαπλές ηλεκτρικές παραμέτρους ταυτόχρονα.

Από την ανάλυση του δείκτη TS_{80} καταδεικνύει με σαφήνεια ότι το Φ/Β #1 παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στη υποβάθμιση ως προς τον χρόνο έκθεσης σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, με το όριο TS_{80} να προσεγγίζεται μόνο για την P_{max} και σε μεταγενέστερο χρονικό σημείο. Αντίθετα, το Φ/Β #2 εμφανίζει υποβάθμιση νωρίτερα στο επίπεδο του TS_{80} , κυρίως στο I_{sc} και στην P_{max} , γεγονός που υποδηλώνει ταχύτερη απώλεια λειτουργικής απόδοσης.

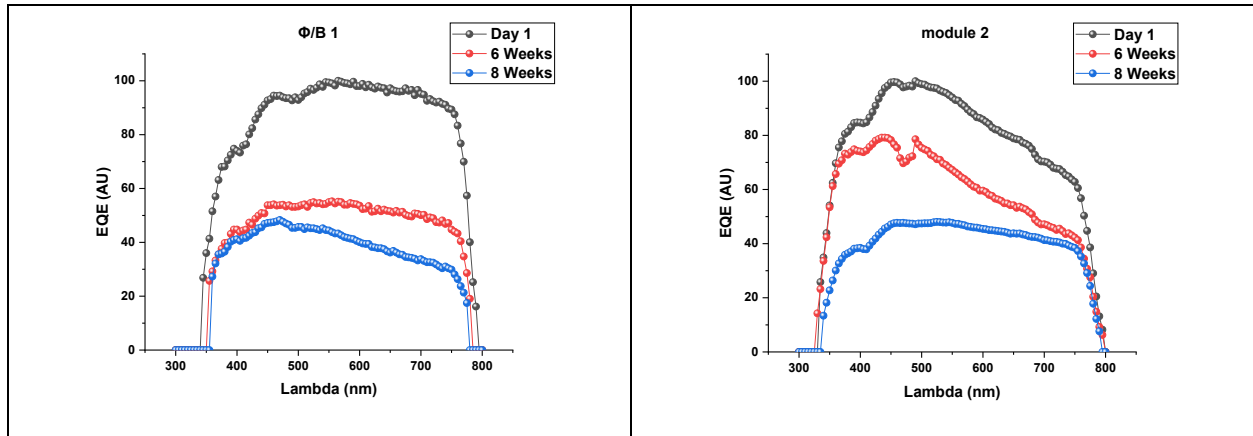
Συνολικά, ο δείκτης TS_{80} αναδεικνύεται ως ιδιαίτερα χρήσιμος ποσοτικός δείκτης σύγκρισης της αξιοπιστίας των δύο Φ/Β, επιβεβαιώνοντας ότι η υποβάθμιση επηρεάζει πρωτίστως τη συλλογή και μεταφορά φορέων και αποτυπώνεται εντονότερα στη μέγιστη ισχύ εξόδου.

6. Διερεύνηση Αιτίων Μείωσης Ηλεκτρικών Χαρακτηριστικών των Φ/Β διατάξεων σε Διάρκεια 8 - εβδομάδων

Προκειμένου να διερευνηθούν τα αίτια της μείωσης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των Φ/Β διατάξεων, όπως αυτά προέκυψαν από τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό, πραγματοποιήθηκαν συμπληρωματικές μετρήσεις με στόχο την αιτιολόγηση και τη διάγνωση των μηχανισμών που οδήγησαν στις παρατηρούμενες μειώσεις.

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τον εξοπλισμό και τις παραμέτρους που περιγράφονται αναλυτικά στην ενότητα της μεθοδολογίας.

6.1 Πειράματα Εξωτερικής Κβαντικής Απόδοσης



Εικόνα 14 Κανονικοποιημένα αποτελέσματα των μετρήσεων εξωτερικής κβαντικής απόδοσης σε 3 διαφορετικές χρονικές περιόδους. Με μαύρο την πρώτη μέρα μέτρησης, με κόκκινο σε διάστημα 6 εβδομάδων έκθεσης και με μπλε μετά από διάστημα 8 εβδομάδων έκθεσης. Το αριστερά γράφημα αφορά το Φ/Β #1 και το δεξιά το Φ/Β #2

Στα γραφήματα της εικόνας 14. Παρουσιάζονται κανονικοποιημένα τα φάσματα Εξωτερικής Κβαντικής Απόδοσης (EQE) για τα Φ/Β #1 και Φ/Β #2 αντίστοιχα, όπως μετρήθηκαν στις τρεις χρονικές περιόδους χαρακτηρισμού: αρχική κατάσταση (Day 1), μετά από έξι (6) εβδομάδες και μετά από οκτώ (8) εβδομάδες έκθεσης σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για το Φ/Β 1 παρατηρείται σαφής μείωση της EQE σε όλο σχεδόν το φασματικό εύρος με την πάροδο του χρόνου. Σε σύγκριση με την αρχική μέτρηση, το φάσμα των 6 εβδομάδων εμφανίζει σημαντική πτώση της EQE, ενώ η μείωση γίνεται ακόμη πιο έντονη μετά από 8 εβδομάδες έκθεσης.

Η υποβάθμιση είναι πιο εμφανής στο εύρος μεσαίων και μεγάλων μηκών κύματος ($\approx 500\text{--}800\text{ nm}$), περιοχή η οποία σχετίζεται κυρίως με τη συλλογή φορέων που παράγονται βαθύτερα στο ενεργό στρώμα. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει αύξηση των απωλειών συλλογής φορέων και ενίσχυση μηχανισμών επανασύνδεσης, πιθανώς λόγω αλλοίωσης των διεπαφών ή υποβάθμισης των ενεργών στρωμάτων. Παράλληλα, η πτώση της EQE στα μικρότερα μήκη κύματος υποδηλώνει πρόσθετες απώλειες στην περιοχή εισόδου του φωτός, οι οποίες μπορεί να σχετίζονται με αλλαγές στην επιφάνεια ή στην οπτική απορρόφηση του δειγματος.

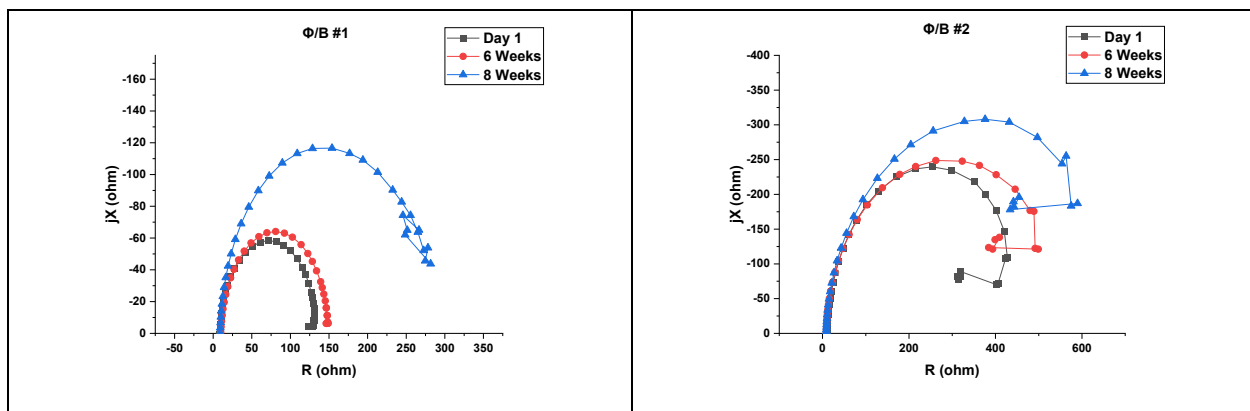
Αντίστοιχη αλλά πιο έντονη συμπεριφορά υποβάθμισης παρατηρείται στο Φ/Β #2. Παρότι το αρχικό φάσμα EQE εμφανίζει υψηλή απόδοση συγκρίσιμη με αυτή του Φ/Β #1, μετά από 6 και 8 εβδομάδες

καταγράφεται σημαντική μείωση της EQE σε όλο το φασματικό εύρος. Ιδιαίτερα έντονη είναι η υποβάθμιση στο εύρος 400–700 nm, όπου παρατηρείται τόσο μείωση της μέγιστης τιμής EQE όσο και αλλοίωση της φασματικής μορφής. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει πιο εκτεταμένες απώλειες συλλογής φορέων και μεγαλύτερη επίδραση φαινομένων γήρανσης, σε σύγκριση με το Φ/Β #1.

Η ισχυρότερη πτώση της EQE στο Φ/Β #2 συμφωνεί με τα αποτελέσματα της EIS, όπου παρατηρήθηκε εντονότερη αύξηση της αντίστασης μεταφοράς φορτίου, υποδεικνύοντας ότι οι μηχανισμοί υποβάθμισης επηρεάζουν τόσο τη φασματική απόκριση όσο και την ηλεκτρική συμπεριφορά της διάταξης. Η μείωση της EQE με την πάροδο του χρόνου συνδέεται άμεσα με την παρατηρούμενη πτώση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (P_{max}) από τις μετρήσεις I–V, καθώς η EQE αποτελεί άμεσο δείκτη της ικανότητας συλλογής των φορέων. Παράλληλα, τα αποτελέσματα LBIC επιβεβαιώνουν την εμφάνιση χωρικών ανομοιογενειών, ενώ η θερμική απεικόνιση καταδεικνύει περιοχές αυξημένων απωλειών, οι οποίες συμβάλλουν στη συνολική μείωση της φασματικής απόκρισης.

Συνολικά, οι μετρήσεις EQE καταδεικνύουν σαφή χρονική υποβάθμιση της φασματικής απόκρισης και στις δύο Φ/Β διατάξεις περοβδκίτη, με το Φ/Β #2 να εμφανίζει εντονότερες μεταβολές και χαμηλότερη αντοχή στις εξωτερικές συνθήκες. Η μείωση της EQE σε όλο το φασματικό εύρος υποδηλώνει αύξηση των απωλειών συλλογής φορέων και επιδείνωση των διεπιφανειακών ιδιοτήτων των διατάξεων, επιβεβαιώνοντας τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις EIS, I–V, LBIC και θερμικής απεικόνισης.

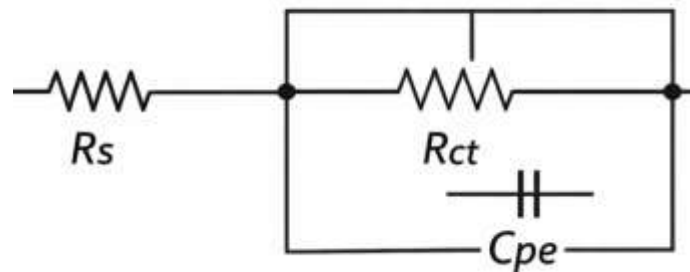
6.2 Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης



Εικόνα 15 Κανονικοποιημένα αποτελέσματα των μετρήσεων Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης σε 3 διαφορετικές χρονικές περιόδους για τις δύο Φ/Β διατάξεις (Φ/Β #1, Φ/Β #2)

Στα Σχήματα της εικόνας 15 παρουσιάζονται τα διαγράμματα Nyquist ($-jX$ έναντι R) για τα Φ/Β #1 και Φ/Β #2 αντίστοιχα, όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS) στις τρεις χρονικές περιόδους χαρακτηρισμού: αρχική κατάσταση (Day 1), μετά από έξι (6) εβδομάδες και μετά από οκτώ (8) εβδομάδες έκθεσης σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Και στις δύο διατάξεις παρατηρείται η χαρακτηριστική ημικυκλική μορφή των διαγραμμάτων, η οποία υποδηλώνει ότι η συνολική εμπέδηση κυριαρχείται από διεργασίες μεταφοράς φορτίου και χωρητικά φαινόμενα στις διεπιφάνειες της διάταξης.



Εικόνα 16 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού περοβσκήτη

Η μορφή των διαγραμμάτων μπορεί να περιγραφεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, σαν αυτό της εικόνας 7 που αποτελείται από:

- μία ωμική αντίσταση σειράς (R_s), η οποία σχετίζεται με τις επαφές, τα ηλεκτρόδια και τις αγώγιμες διαδρομές, και
- έναν κλάδο αντίστασης μεταφοράς φορτίου (R_{ct}) σε παράλληλη σύνδεση με ένα χωρητικό στοιχείο μη ιδανικής συμπεριφοράς (CPE), το οποίο αποτυπώνει φαινόμενα διεπιφανειακής φόρτισης και κατανομής χρόνων χαλάρωσης.

Η αύξηση της διαμέτρου του ημικυκλίου στα διαγράμματα Nyquist συνδέεται άμεσα με αύξηση της R_{ct} ενώ η μεταβολή του σχήματος και της συμμετρίας του υποδηλώνει αλλαγές στη χωρητική συμπεριφορά και στην ομοιογένεια των διεπιφανειών.

Για το Φ/Β #1 παρατηρείται σταδιακή μετατόπιση των καμπυλών προς υψηλότερες τιμές πραγματικής αντίστασης με την πάροδο του χρόνου. Η διάμετρος του ημικυκλίου αυξάνεται αισθητά από την αρχική μέτρηση προς τις μετρήσεις των 6 και 8 εβδομάδων, γεγονός που υποδηλώνει αύξηση της αντίστασης μεταφοράς φορτίου.

Η συμπεριφορά αυτή είναι ενδεικτική φαινομένων υποβάθμισης, όπως η μείωση των διεπιφανειακών επαφών, η αύξηση των ωμικών απωλειών ή η ενίσχυση μηχανισμών επανασύνδεσης φορέων.

Παράλληλα, η ήπια μεταβολή της καμπυλότητας του ημικυκλίου υποδηλώνει αλλαγές στη χωρητική απόκριση, πιθανώς λόγω αλλοίωσης των ενεργών στρωμάτων .

Στο Φ/Β #2 οι μεταβολές είναι εντονότερες. Τα διαγράμματα των 6 και 8 εβδομάδων εμφανίζουν σημαντική αύξηση τόσο της διαμέτρου του ημικυκλίου όσο και του μέγιστου της φανταστικής συνιστώσας ($-jX$), σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση. Η έντονη μετατόπιση προς υψηλότερες τιμές R υποδηλώνει αυξημένη ηλεκτρική εμπέδηση και ισχυρότερη υποβάθμιση των διεργασιών μεταφοράς φορτίου.

Επιπλέον, η παραμόρφωση και η ασυμμετρία του ημικυκλίου στα μεταγενέστερα στάδια υποδηλώνουν την ταυτόχρονη συνεισφορά πολλαπλών μηχανισμών, όπως διαφορετικές διεπιφάνειες ή αυξημένη κατανομή χρόνων χαλάρωσης (relaxation time), γεγονός που υποδεικνύει πιο σύνθετη και ανομοιογενή συμπεριφορά μετά από παρατεταμένη έκθεση σε εξωτερικές συνθήκες.

Η παρατηρούμενη αύξηση της εμπέδησης και ιδιαίτερα της R_{ct} βρίσκεται σε άμεση συσχέτιση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων I-V, όπου παρατηρείται μείωση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (P_{max}) και μείωση των ηλεκτρικών παραμέτρων. Παράλληλα, τα αποτελέσματα LBIC επιβεβαιώνουν την εμφάνιση χωρικών ανομοιογενειών και περιοχών μειωμένης συλλογής φορέων, οι οποίες συνεισφέρουν στην αύξηση της αντίστασης μεταφοράς φορτίου.

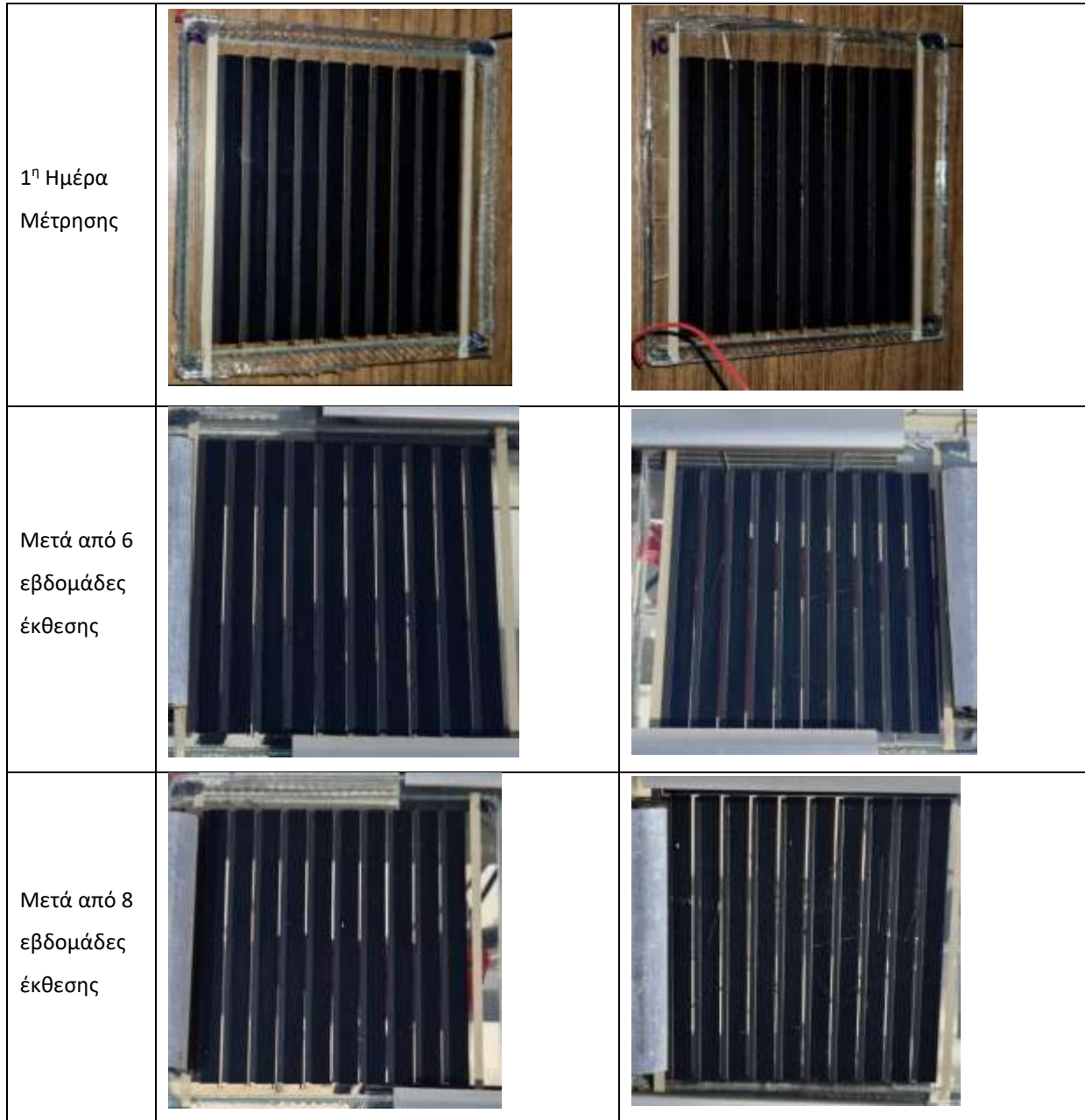
Συνολικά, η φασματοσκοπία ηλεκτροχημικής εμπέδησης καταδεικνύει σαφή χρονική εξέλιξη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς και στις δύο διατάξεις, με αύξηση της συνολικής εμπέδησης και μείωση των διεπιφανειακών διεργασιών. Το Φ/Β #2 εμφανίζει εντονότερη υποβάθμιση σε σύγκριση με το Φ/Β #1, γεγονός που υποδηλώνει διαφοροποιημένη αντοχή στους μηχανισμούς γήρανσης.

Τα αποτελέσματα της EIS αποτελούν ισχυρή ένδειξη ότι η παρατηρούμενη πτώση απόδοσης των δειγμάτων συνδέεται άμεσα με αυξημένες αντιστάσεις και αλλοίωση των μηχανισμών μεταφοράς φορτίου, επιβεβαιώνοντας τη συμπληρωματική αξία της τεχνικής σε συνδυασμό με τις μετρήσεις I-V, LBIC, EQE και θερμικής απεικόνισης.

6.3 Φωτογραφική Απεικόνιση των Φ/Β γιατάξεων

Μία επιπλέον διαδεδομένη τεχνική που προτείνεται για την επιτήρηση και αξιολόγηση της μελέτης γήρανσης φωτοβολταϊκών διατάξεων περοβσκίτη είναι ο οπτικός έλεγχος μέσω περιοδικής φωτογραφικής απεικόνισης. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε για την παρακολούθηση μακροσκοπικών αλλοιώσεων των δειγμάτων, όπως αποχρωματισμοί, μεταβολές της επιφανειακής μορφολογίας και γενικότερα οπτικά σημάδια γήρανσης.

Η σύγκριση των φωτογραφιών που λήφθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης επέτρεψε τη συσχέτιση των οπτικών μεταβολών με τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών, φασματικών και θερμικών μετρήσεων για τα δύο διατάξεων. Με τον τρόπο αυτό, η φωτογραφική απεικόνιση λειτούργησε συμπληρωματικά στις υπόλοιπες τεχνικές χαρακτηρισμού, παρέχοντας άμεσες ενδείξεις για την εξέλιξη της φυσικής κατάστασης των Φ/Β.



Εικόνα 17 Φωτογραφική παρακολούθηση/επιτήρηση των Φ/Β περοβσκίτη (αριστερά #1, δεξιά #2) σε 3 χρονικές στιγμές

Από τη σύγκριση της φωτογραφικής απεικόνισης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 17, προκύπτει ότι και οι δύο διατάξεις δεν εμφάνισαν αισθητό αποχρωματισμό, όπως το χαρακτηριστικό κιτρίνισμα των κελιών, το οποίο συνδέεται με την είσοδο υγρασίας μέσω των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για το εγκιβωτισμό σε γυάλινα υποστρώματα των διατάξεων Φ και θεωρείται ιδιαίτερα επιβαρυντικό και συχνά καταστροφικό για φωτοβολταϊκές διατάξεις περοβοκίτη. Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει ικανοποιητική προστασία των δειγμάτων από υγρασία κατά τη διάρκεια της έκθεσής τους.

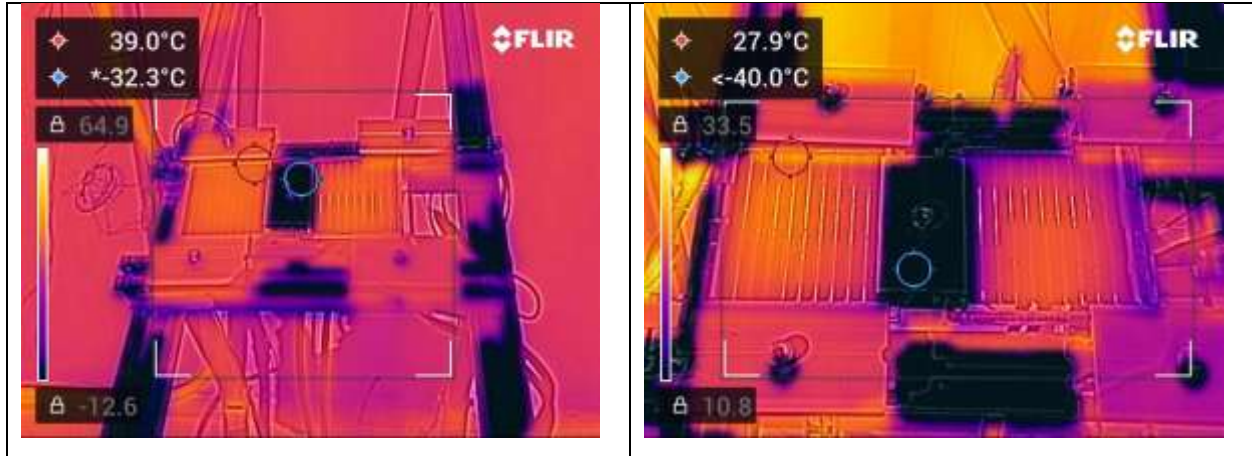
Το Φ/Β #1 παρουσιάζει ελάχιστες παρατηρήσιμες οπτικές μεταβολές καθ' όλη τη διάρκεια της έκθεσής του σε πραγματικές εξωτερικές συνθήκες, γεγονός που υποδηλώνει καλή μηχανική και δομική σταθερότητα των υλικών εγκιβωτισμού.

Αντίθετα, το Φ/Β #2 άρχισε να εμφανίζει σε επιμέρους κελιά ορατές επιφανειακές αλλοιώσεις υπό τη μορφή λεπτών «χαρακιών» ήδη από την 6η εβδομάδα έκθεσης. Οι αλλοιώσεις αυτές επιδεινώθηκαν με την πάροδο του χρόνου και έγιναν πιο έντονες και εκτεταμένες στην 8η εβδομάδα, γεγονός που υποδηλώνει εξελισσόμενη μηχανική ή δομική καταπόνηση της επιφάνειας. Τα οπτικά αυτά ευρήματα βρίσκονται σε συμφωνία με τις παρατηρούμενες μειώσεις των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του Φ/Β #2, ενισχύοντας την υπόθεση ότι οι επιφανειακές αλλοιώσεις συνέβαλλαν στη λειτουργική του υποβάθμιση.

6.4 Θερμική Απεικόνιση των Φ/Β διατάξεων περοβοκίτη

Μία ακόμη τεχνική παρακολούθησης που χρησιμοποιήθηκε είναι η θερμική απεικόνιση μέσω υπέρυθρης φωτογραφικής κάμερας, η οποία τα τελευταία χρόνια έχει καθιερωθεί ως αποτελεσματικό εργαλείο για τον εντοπισμό αιτιών υποβάθμισης και κακής λειτουργίας φωτοβολταϊκών διατάξεων. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τη μη επεμβατική αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς των δειγμάτων κατά τη λειτουργία τους.

Μέσω της θερμικής απεικόνισης είναι δυνατός ο εντοπισμός φαινομένων όπως η εμφάνιση θερμών σημείων (hot spots), τα οποία μπορεί να προκύπτουν από τοπική συσσώρευση φορέων, αυξημένες ωμικές απώλειες ή μηχανισμούς επανασύνδεσης. Επιπλέον, η τεχνική επιτρέπει την ανίχνευση ανομοιόμορφης θερμικής κατανομής στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών διατάξεων, η οποία συχνά σχετίζεται με ηλεκτρικές αστοχίες, αυξημένες εσωτερικές αντιστάσεις ή δομικές αλλοιώσεις των υλικών. Η θερμική απεικόνιση, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών και φασματικών μετρήσεων, συμβάλλει στην πληρέστερη κατανόηση των μηχανισμών υποβάθμισης, παρέχοντας χωρικά επιλυμένες πληροφορίες για περιοχές αυξημένης θερμικής καταπόνησης που ενδέχεται να επηρεάζουν τη συνολική απόδοση των φωτοβολταϊκών διατάξεων.



Εικόνα 18 Θερμική απεικόνιση, μέσω υπέρυθρης φωτογραφικής απεικόνισης, η μεταβολή που παρουσιάστηκε ως προς την ομοιόμορφη θερμική κατανομή στην επιφάνεια των Φ/Β διατάξεων. Είναι εμφανές ότι την πρώτη ημέρα έκθεσης τους(αριστερά) και οι 2 διατάξεις παρουσίαζαν ομοιόμορφη κατατομή θερμότητας ενώ μετά από 8 εβδομάδες (δεξιά) εμφανίζεται σχετική θερμική ανομοιομορφία ,ιδιαίτερα στο Φ/Β #2 (δεξιά).

Στην Εικόνα 18 παρουσιάζονται οι θερμικές απεικονίσεις των δύο φωτοβολταϊκών διατάξεων της παρούσας μελέτης, όπως καταγράφηκαν με υπέρυθρη κάμερα κατά τη διάρκεια της έκθεσής τους σε πραγματικές εξωτερικές συνθήκες. Σε κάθε θερμική απεικόνιση, το Φ/Β #1 απεικονίζεται αριστερά, ενώ το Φ/Β #2 δεξιά, επιτρέποντας την άμεση συγκριτική αξιολόγηση της θερμικής τους συμπεριφοράς.

Στην πρώτη θερμική εικόνα, παρατηρείται ότι και οι δύο Φ/Β διατάξεις παρουσιάζουν ομοιόμορφη θερμική κατανομή στην επιφάνειά τους, χωρίς την εμφάνιση τοπικών θερμών σημείων. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει σωστή ηλεκτρική λειτουργία και περιορισμένες εσωτερικές απώλειες, γεγονός που συνάδει με τα αποτελέσματα του αρχικού ηλεκτρικού χαρακτηρισμού.

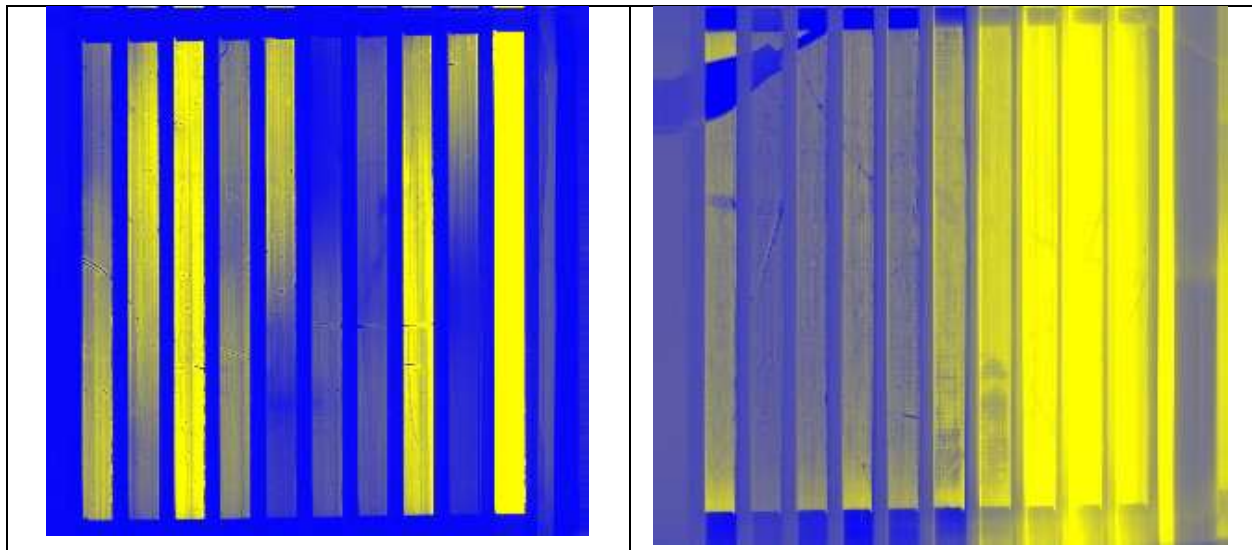
Στη δεύτερη θερμική εικόνα παρατηρούνται διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο διατάξεων. Το Φ/Β #2 εμφανίζει έντονα ανομοιογενή θερμική κατανομή, με τις άκρες της διάταξης να παρουσιάζουν χαμηλότερες θερμικές αποχρώσεις σε σχέση με το κεντρικό τμήμα. Η συμπεριφορά αυτή ενδέχεται να σχετίζεται με μη ομοιόμορφη ροή ρεύματος, αυξημένες τοπικές απώλειες ή διαφοροποιήσεις στη λειτουργική κατάσταση επιμέρους κελιών, και αποτελεί ένδειξη εξελισσόμενης υποβάθμισης.

Αντίθετα, στο Φ/Β #1 παρατηρείται σχετικά ήπια θερμική ανομοιογένεια, με την άνω πλευρά της διάταξης να εμφανίζεται ελαφρώς θερμότερη σε σύγκριση με την υπόλοιπη επιφάνειά του. Η συγκεκριμένη θερμική διαβάθμιση είναι περιορισμένη και δεν συνοδεύεται από έντονα τοπικά θερμά

σημεία, γεγονός που υποδηλώνει ότι το Φ/Β #1 διατηρεί σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργική του ομοιομορφία, παρά την ύπαρξη ήπιων φαινομένων ανομοιομόρφης θερμικής κατανομής.

Συνολικά, η θερμική απεικόνιση αναδεικνύει σαφή διαφοροποίηση στη συμπεριφορά των δύο Φ/Β με την πάροδο του χρόνου. Καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων στον εξωτερικό χώρο των εγκαταστάσεων του ΕΛΜΕΠΑ οι Φ/Β διατάξεις 10cmx10cm μετρήθηκαν σε ασύμμετρους θερμοκρασιακούς κύκλους μεταξύ 15-50 βαθμών κελσίου ενώ και η σχετική υγρασία ήταν πολύ υψηλή (40-90%) δεδομένου της χειμερινής περιόδου των μετρήσεων. Παρόλα αυτά το Φ/Β #1 παρουσιάζει πιο σταθερή και ελεγχόμενη θερμική συμπεριφορά, ενώ το Φ/Β #2 εμφανίζει εντονότερη ανομοιογένεια, στοιχείο που βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών και οπτικών μετρήσεων και υποστηρίζει την παρατηρούμενη ταχύτερη υποβάθμισή του.

5.5 Χαρτογράφηση Απόκρισης Ρεύματος Φ/Β διατάξεων περοβσκίτη (LBIC Imaging)



Εικόνα 19. Απεικονίσεις LBIC των Φ/Β #1 (αριστερά) και Φ/Β #2 (δεξιά) μετά από 8 εβδομάδες έκθεσης σε εξωτερικές συνθήκες. Παρατηρείται έντονη χωρική ανομοιογένεια και περιοχές μειωμένης συλλογής φωτορεύματος, με πιο εκτεταμένη υποβάθμιση στο Φ/Β #2.

Στην εικόνα 19 παρουσιάζονται οι απεικονίσεις Laser Beam Induced Current (LBIC) για τα Φ/Β #1 (αριστερά) και Φ/Β #2 (δεξιά), μετά από οκτώ (8) εβδομάδες έκθεσης σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι απεικονίσεις LBIC αποτυπώνουν τη χωρική κατανομή του επαγόμενου φωτορεύματος στην

επιφάνεια των διατάξεων, παρέχοντας πληροφορίες για την τοπική ηλεκτρική απόκριση καθώς και την ομοιογένεια της συλλογής φορέων.

Και στις δύο φ/β διατάξεις παρατηρείται έντονη χωρική ανομοιογένεια στην απόκριση, με την εμφάνιση περιοχών μειωμένου σήματος LBIC σε συγκεκριμένα κελιά. Οι περιοχές αυτές υποδηλώνουν τοπική υποβάθμιση της ικανότητας συλλογής των φωτοπαραγόμενων φορέων, η οποία μπορεί να αποδοθεί σε αυξημένες απώλειες επανασύνδεσης, ή επιδείνωση των διεπιφανειακών επαφών.

Στο Φ/Β #1, η υποβάθμιση εμφανίζεται κυρίως σε επιμέρους κελιά, υποδεικνύοντας μη ομοιόμορφη εξέλιξη των μηχανισμών γήρανσης. Η τοπική φύση των περιοχών μειωμένης απόκρισης υποδηλώνει ότι η υποβάθμιση ξεκινά σε συγκεκριμένες ζώνες (cell cracks ,pinholes), οι οποίες λειτουργούν ως εστίες αυξημένων απωλειών.

Αντίθετα, στο Φ/Β #2 παρατηρείται πιο εκτεταμένη και συνεχής περιοχή μειωμένου LBIC σήματος, γεγονός που υποδηλώνει πιο γενικευμένη υποβάθμιση της διάταξης. Η συμπεριφορά αυτή συμφωνεί με τα αποτελέσματα των μετρήσεων EIS και EQE, όπου το Φ/Β #2 παρουσίασε εντονότερη αύξηση της αντίστασης μεταφοράς φορτίου και μεγαλύτερη αλλοίωση της φασματικής απόκρισης.

Η ύπαρξη περιοχών χαμηλού σήματος LBIC συνδέεται άμεσα με την αύξηση της εμπέδησης που καταγράφηκε μέσω της EIS, καθώς οι τοπικές αυτές αστοχίες συνήθως συμβάλλουν στη συνολική αύξηση της αντίστασης μεταφοράς φορτίου. Παράλληλα, οι χωρικές ανομοιογένειες που αποκαλύπτονται από την LBIC εξηγούν τη μείωση της κανονικοποιημένης EQE και την αλλοίωση της φασματικής της μορφής, καθώς οι υποβαθμισμένες περιοχές παρουσιάζουν μειωμένη συμβολή στη συνολική παραγωγή φωτορεύματος.

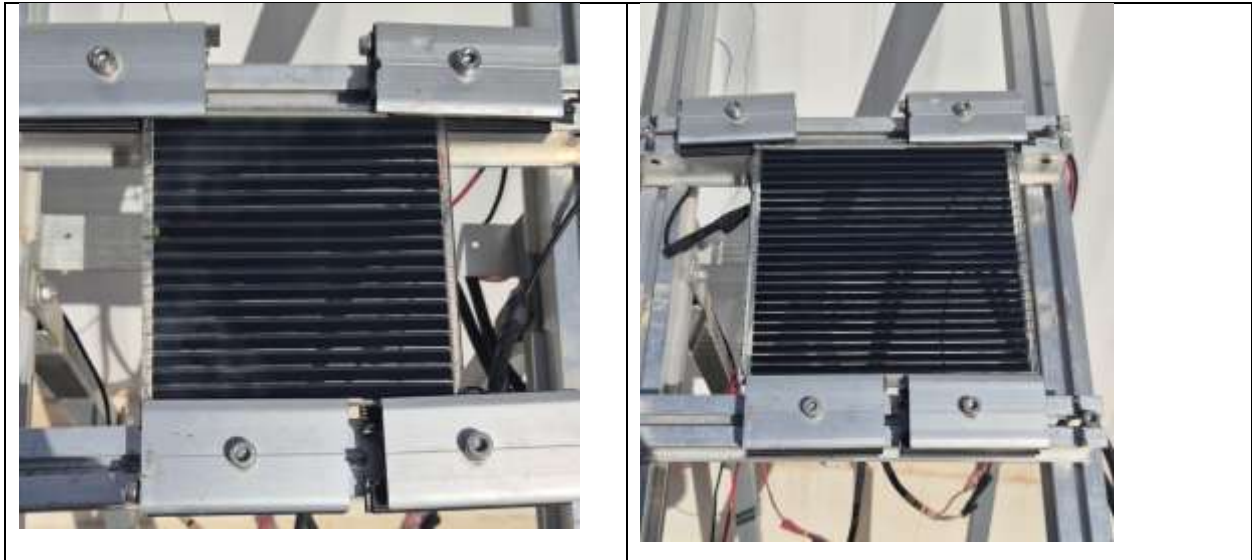
Συνολικά, οι απεικονίσεις LBIC επιβεβαιώνουν ότι η υποβάθμιση των δειγμάτων δεν είναι ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια, αλλά εκδηλώνεται αρχικά σε τοπικές περιοχές, οι οποίες με την πάροδο του χρόνου επεκτείνονται και επηρεάζουν τη συνολική ηλεκτρική και φασματική συμπεριφορά των διατάξεων. Η τεχνική LBIC αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς γεφυρώνει τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις των μετρήσεων EIS και EQE με τη χωρική κατανομή των μηχανισμών υποβάθμισης.

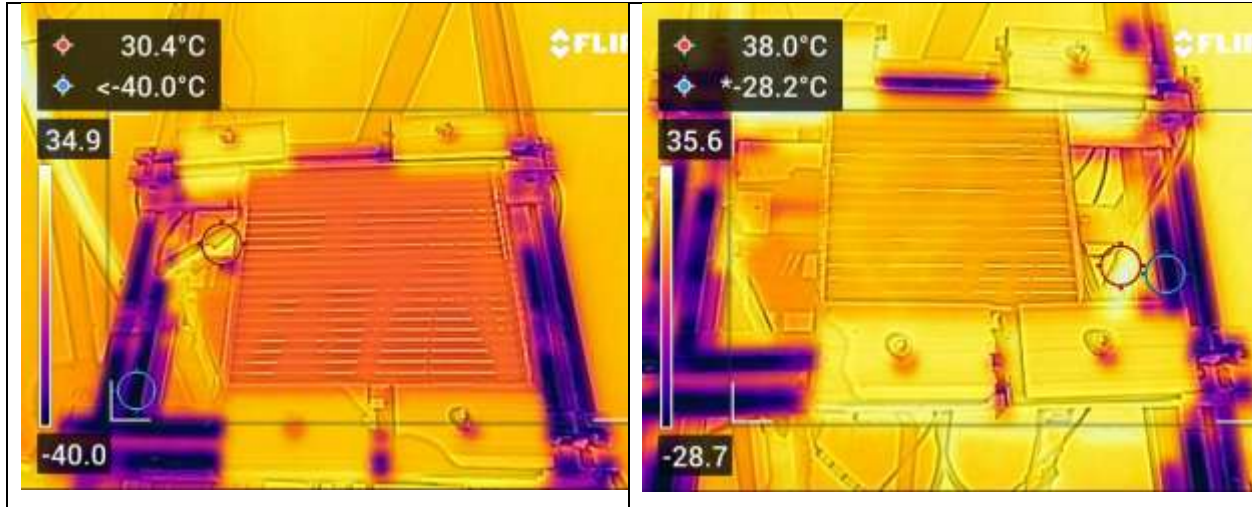
7. Μετρήσεις σε Εξωτερικές συνθήκες Φ/Β πλαισίων 3^{ης} γενιάς μεγάλης κλίμακας

7.1 Μετρήσεις Φ/Β πλαισίων περοβσκίτη

Το ΕΛΜΕΠΑ στο τελευταίο δίμηνο του προγράμματος παρέλαβε από τους συνεργάτες στο πρόγραμμα 3GP-4INDUSTRY 2 Φ/Β πλαίσια περοβσκίτη (επιφάνεια μεγαλύτερη από 150 cm²) με διαστάσεις 16 cm x 16 cm και 22cm x 22cm όπου περιλαμβάνονται από 18 και 24 Φ/Β κελιά αντίστοιχα συνδεδεμένα σε σειρά.

Τα Φ/Β πλαίσια εγκαταστάθηκαν στις εγκαταστάσεις του Φ/Β πάρκου, δίπλα στις Φ/Β διατάξεις που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια για άμεση σύγκριση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών. Οι αρχικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα Φ/Β πλαίσια χρησιμοποιώντας μια εμπορική θερμική κάμερα εντόπισαν και επιβεβαίωσαν την σωστή κατασκευαστική κατάσταση των νέων πλαισίων, ενώ η θερμοκρασία που ανέπτυξαν τα πλαίσια ήταν παρόμοια με τις θερμοκρασίες του μετρήθηκαν από τον μετεωρολογικού σταθμό του πάρκου.





Εικόνα 20. Εικόνες από τα Φ/Β πλαίσια περοβοκίτη 16cm x 16cm και 22 cm x 22 cm

Οι πρώτες προκαταρκτικές μετρήσεις των πλαισίων περοβοκίτη δείχνουν ότι πριν από το φαινόμενο burn-in η ενεργειακή απόδοση ειδικά σε ανάστροφη σάρωση είναι μεγαλύτερη από 10% ενώ περαιτέρω μελέτη για την εξέλιξη του φαινομένου της υστέρησης μεταξύ ορθής και ανάστροφης σάρωσης θα γίνουν και σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες σε διάστημα ενός έτους για να εξαχθεί η ενεργειακή απόδοση και ο δείκτης hysteresis index που περιγράφεται στο παραδοτέο Π4.2.

Πλαίσιο	Active area (cm ²)	Scan direction	J _{SC, stripe} (mA/cm ²)	V _{OC, stripe} (mV)	FF (-)	PCE (%)	Mean PCE (%)	Hysteresis (%)
Φ/Β 16cm x16cm	7.548 (stripe)	Reverse	20.6	942	0.56	10.87	9.81	20
	135.86 (total)	Forward	21.6	942	0.43	8.75		

Εικόνα 21. Αρχικές μετρήσεις Φ/Β πλαισίου περοβοκίτη διαστάσεων 16cm x 16cm

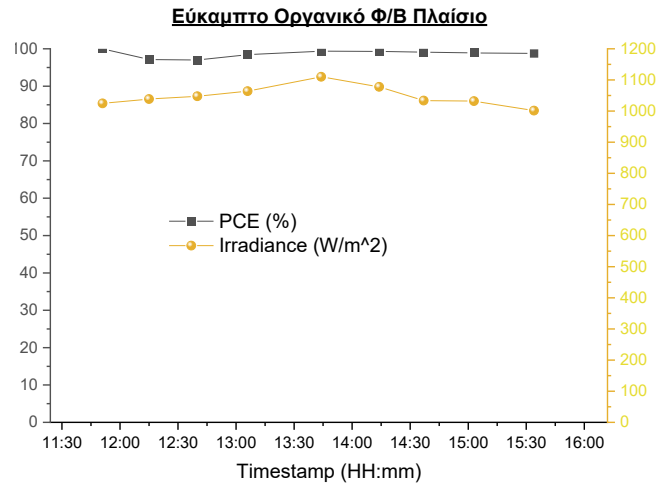
7.2 Μετρήσεις Οργανικών Φ/Β πλαισίων

Στα πλαίσια του έργου οι συνεργάτες από το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης παρήγαγαν εύκαμπτα ημιδιαφανή οργανικά Φ/Β πλαίσια μεγάλων διαστάσεων, τα οποία περιλάμβαναν 16 κελιά

συνδεδεμένα σε σειρά τα οποία εγκαταστάθηκαν στις εγκαταστάσεις του ΕΛΜΕΠΑ για μελέτη της εύρεσης της μέγιστης ενεργειακής απολαβής με χρήση ιχνηλάτη ήλιου 2 - αξόνων και διαφορετικών αλγόριθμων εύρεσης MPP.

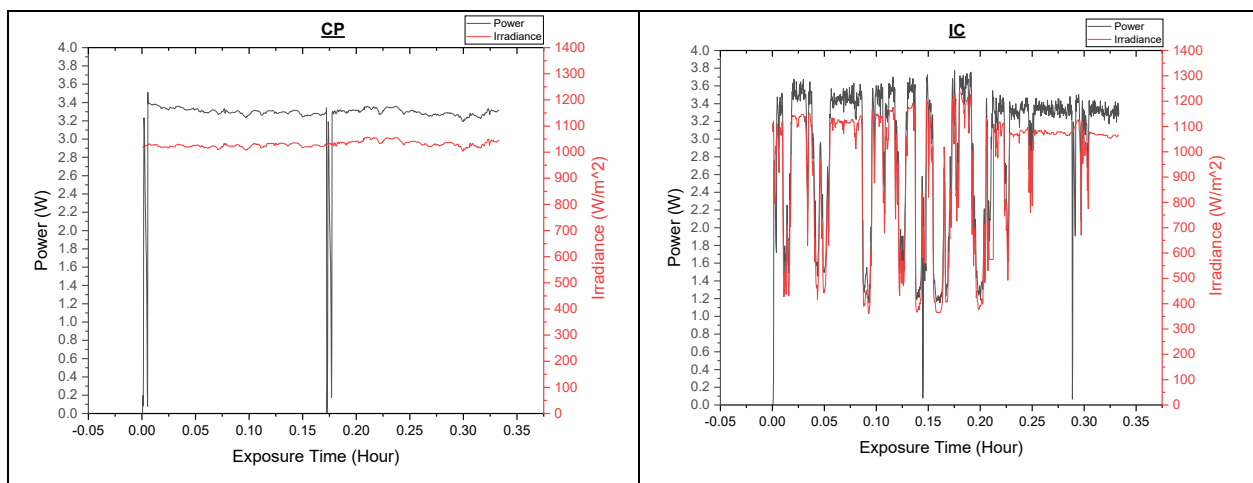


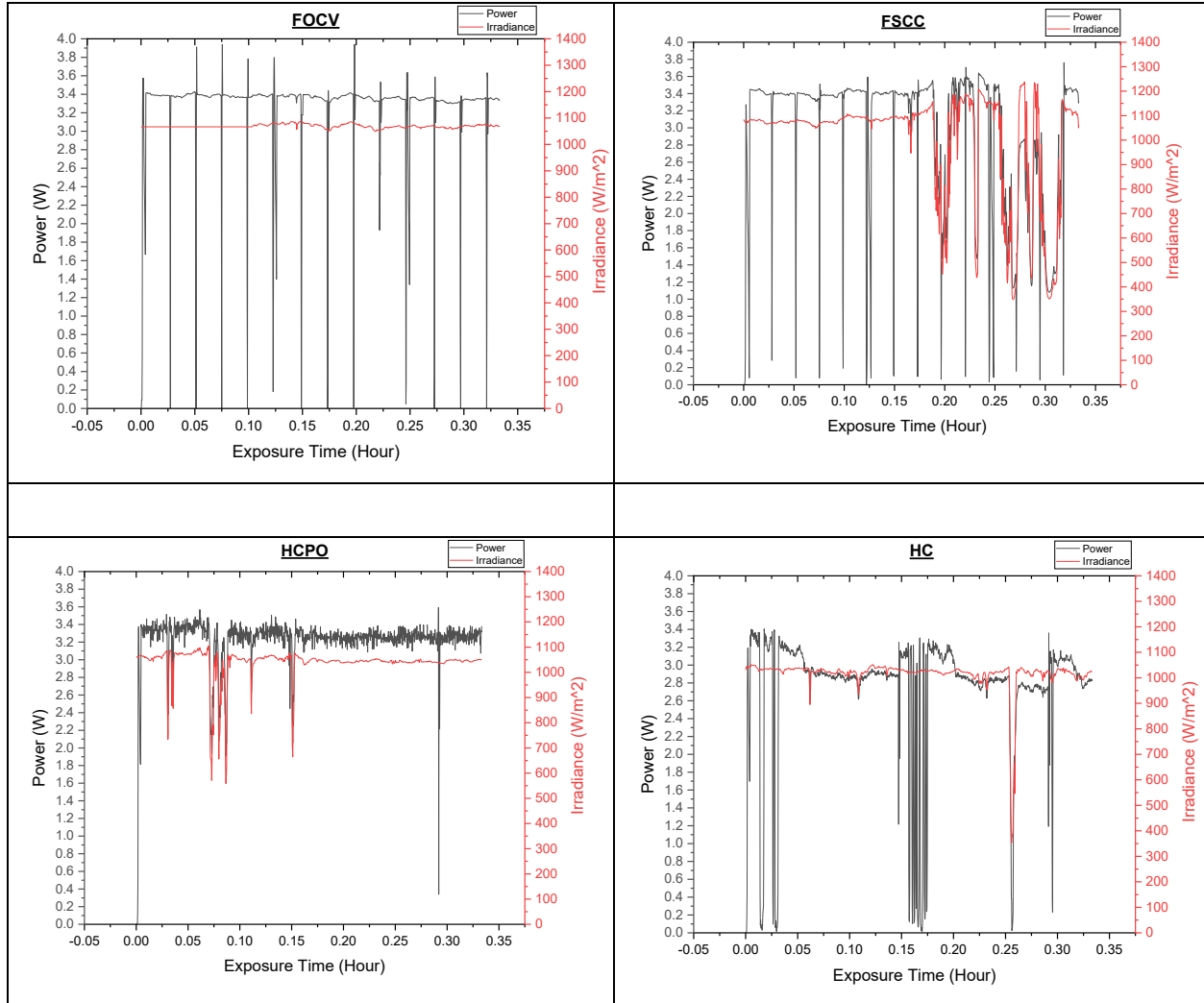
Εικόνα 22. Λειτουργία ηλιακού ιχνηλάτη 2 – αξόνων με εγκατάσταση εύκαμπτου οργανικού Φ/Β κατά τη διάρκεια μίας μέρας



Εικόνα 23. Κανονικοποιημένη απόδοση και ακτινοβολία Οργανικού Φ/Β πλαισίου με χρήση ηλιακού ιχνηλάτη 2 – αξόνων κατά τη διάρκεια μίας μέρας

Κατά την διάρκεια μιας ημέρας χρησιμοποιώντας τον ιχνηλάτη δύο αξόνων του εργαστηρίου του ΕΛΜΕΠΑ, εφαρμόστηκαν διάφοροι αλγόριθμοι εύρεσης μέγιστου σημείου λειτουργίας (MPP) ώστε να συγκριθούν οι αλγόριθμοι ως προς την αποδοτικότητα τους στην παραγωγή της μέγιστης ενέργειας σε συνθήκες ακτινοβολίας περίπου 1000 W/m².





Εικόνα 24 Αποτύπωση παραγωγής ισχύος από οργανικό Φ/Β με χρήση διάφορων αλγορίθμων MPP

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για περίπου 20-25 λεπτά ο καθένας είναι αρχικά ο κλασικός αλγόριθμος P&O, καθώς και ο τροποποιημένος P&O με δυναμική αλλαγή βημάτων, ενώ παράλληλα εφαρμόστηκαν οι αλγόριθμοι, σταθερής ισχύος, σταθερής τάσης ανοικτού κυκλώματος, σταθερού ρεύματος βραχυκύκλωσης και τέλος του αλγορίθμου επαυξημένης αγωγιμότητας. Η σύγκριση έγινε με βάση την παραγόμενη ενέργεια σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε σχέση με την ακτινοβολία που δέχτηκε το οργανικό Φ/Β πλαίσιο. Η σύγκριση επιβεβαίωσε ότι ο αλγόριθμος P&O που χρησιμοποιείται κατά κόρον για την εύρεση του MPP στα συμβατικά Φ/Β πλαίσια κρυσταλικού πυριτίου έχει περίπου 14% διαφορά σε σχέση με τον πιο αποδοτικό αλγόριθμο που είναι ο αλγόριθμος σταθερής ισχύος ενώ διαφέρει περίπου 13% από τον τροποποιημένο δυναμικό αλγόριθμο P&O και από τον δυναμικό

αλγόριθμο αυξημένης αγωγιμότητας. Η πολύ καλή απόδοση των σταθερών αλγορίθμων ισχύος και ρεύματος κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στις σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας κατά την διάρκεια του πειράματος. Παρόλα αυτά όμως από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι για την εύρεση του σημείου MPP και την εξαγωγή της μέγιστης ενέργειας πρέπει να εξετάζεται διαφορετικός αλγόριθμος σε κάθε τεχνολογία Φ/Β 3^{ης} γενιάς αυξάνοντας την εμεργειακή αποδοτικότητα κατά ένα ποσοστό 10-15%

Όνομα Αλγορίθμου	Παραγόμενη ενέργεια (Wh)	Ενεργειακή ηλιακή απολαβή (Wh/m ²)	Κανονικοποιημένη απόδοση αλγορίθμων MPPT (%)
Constant Power (CP)	1.081	3.714	100
Fractional Open Circuit Voltage (FOCV)	1.091	3.749	97.23
Fractional Short Circuit Current (FSCC)	0.981	3.370	93.35
Incremental Conductance (IC)	0.960	3.298	98.15
Hill Climbing Perturb and Observe (HCPO)	1.073	3.688	98.48
Hill Climbing (HC)	0.912	3.134	85.60

Εικόνα 25 Πίνακας με την σύγκριση της αποδοτικότητας διαφορετικών MPP αλγορίθμων για εύκαμπτο οργανικό Φ/Β πλαίσιο

8. Συμπεράσματα

Το παρών παραδοτέο μελέτη επικεντρώθηκε στη διερεύνηση της λειτουργικής σταθερότητας και των μηχανισμών υποβάθμισης φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλαισίων τεχνολογίας περοβσκίτη, υπό πραγματικές εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Παράλληλα εξετάστηκαν και οργανικά Φ/Β πλαίσια και συγκρίθηκαν ως προς την αποδοτικότητα τους οι αλγόριθμοι εύρεσης του μέγιστου σημείου λειτουργίας.

Μέσω ενός συνδυασμού ηλεκτρικών, φασματικών, τεχνικές χαρτογράφησης της επιφάνειας, θερμικών και οπτικών τεχνικών χαρακτηρισμού, κατέστη δυνατή η ολοκληρωμένη αξιολόγηση της εξέλιξης της απόδοσης των δειγμάτων και η αιτιολόγηση των παρατηρούμενων μεταβολών.

Η σταδιακή μείωση της παραγόμενης ισχύος, όπως προέκυψε από τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό, οδήγησε και στις δύο διατάξεις στην επίτευξη του ορίου TS_{80} περίπου στις έξι (6) εβδομάδες έκθεσης (περίπου 1000 ώρες). Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι, παρά την αναπόφευκτη υποβάθμιση, οι εξεταζόμενες Φ/Β διατάξεις από περοβσκίτη διατηρούν λειτουργικά αποδεκτά επίπεδα απόδοσης για σημαντικό χρονικό διάστημα υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η παρατηρούμενη αντοχή αποκτά ιδιαίτερη σημασία δεδομένου ότι πρόκειται για μια αναδυόμενη φωτοβολταϊκή τεχνολογία, της οποίας η μακροχρόνια σταθερότητα αποτελεί βασικό πεδίο έρευνας και βελτιστοποίησης.

Η μείωση της μέγιστης παραγόμενης ισχύος (P_{max}) επιβεβαιώνεται και ερμηνεύεται μέσω των αποτελεσμάτων Φασματοσκοπίας Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης. Η εξέλιξη των παραμέτρων εμπέδησης υποδεικνύει αύξηση της χωρητικότητας και της αντίστασης μεταφοράς φορτίου (R_{ct}), γεγονός που σχετίζεται με ενισχυμένους μηχανισμούς επανασύνδεσης φορέων και υποβάθμιση των διεπιφανειών. Οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν άμεσα την ικανότητα συλλογής φορτίου και εξηγούν τη σταδιακή απώλεια απόδοσης που καταγράφεται στις καμπύλες I-V, επιβεβαιώνοντας τη συνέπεια μεταξύ ηλεκτρικών και φασματικών μετρήσεων.

Η χωρικά επιλυμένη ανάλυση (surface resolved analysis) ανέδειξε ότι η υποβάθμιση δεν εξελίσσεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια των περοβσκιτικών στοιχείων, αλλά εμφανίζεται τοπικά, με διαφοροποιήσεις στη συλλογή φωτορεύματος. Οι ανομοιογένειες αυτές συνδέονται άμεσα με τις μεταβολές των παραμέτρων εμπέδησης και με τη θερμική συμπεριφορά των δειγμάτων, υποδεικνύοντας ότι οι μηχανισμοί υποβάθμισης έχουν έντονο χωρικό χαρακτήρα και σχετίζονται με τοπικές αλλοιώσεις στα ενεργά στρώματα ή στις διεπιφάνειες.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **M. V. Khenkin et al.**, "Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures," *Nature Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 35-49, 2020.
2. **T. J. Silverman et al.**, "Durability research is pivotal for perovskite photovoltaics," *Nature Energy*, vol. 10, no. 1, 2025.
3. **R. Singh et al.**, "Hysteresis in Perovskite Solar Cells," *AIP Publishing*, 2020.
4. **M. D. Wilkinson et al.**, "The FAIR Guiding Principles for scientific data management," *Scientific Data*, 2016.
5. **S. Pescetelli et al.**, "Integration of two-dimensional materials-based perovskite solar farm," *Nature Energy*, vol. 7, no. 7, 2022.
6. **E. Spiliarotis et al.**, "Long-term outdoor performance of a solar farm enabled by graphene-perovskite panels...", *EES Solar*, 2025.