

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

ΠΣΚΕ «TAEDR 0537347»

Παραδοτέο 4.3.

Ανάπτυξη πειραματικών πρωτοκόλλων για
δοκιμές σε εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες
λειτουργίας των ενθυλακωμένων διατάξεων
εργαστηριακής και μεγάλης κλίμακας



Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2. ΤΟ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟ ΌΡΑΜΑ ΤΗΣ Bankability.....	4
2.1 Στρατηγική Bankability.....	4
2.2 Πίνακας: Σύνοψη KPIs & Οικονομική Συσχέτιση	5
3. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ: ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ.....	7
3.1 Εξέλιξη και Αρχιτεκτονική του Πλαισίου ISOS	7
4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: MPPT vs VOC.....	8
4.1 Η Επίδραση του Εσωτερικού Ηλεκτρικού Πεδίου	9
4.2 Πίνακας: Σύγκριση Δυναμικής Φορτίων MPP vs Voc	9
5. ΘΕΩΡΙΑ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ MPPT ΓΙΑ ΠΕΡΟΒΣΚΙΤΕΣ	9
5.1 Αλγόριθμοι εξαντλητική αναζήτησης Ρεύματος (I) – Τάσης (V).....	10
5.2 Αποτυχία του Standard Perturb and Observe (P&O).....	10
5.3 Καινοτομία προτεινόμενου αλγορίθμου	11
5.4 Προβλεπτικοί και Γαλβανοστατικοί Αλγόριθμοι	14
5.5 Χαρακτηριστικά Αλγορίθμων 3GPV-4INDUSTRY	16
6. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ Φ/Β 3 ^{ης} ΓΕΝΙΑΣ.....	17
6.1. Κατασκευή ηλεκτρονικής διάταξης ρυθμιστή φόρτισης IV -MPPT	17
6.2. Ανάπτυξη Αυτοματοποιημένης Διάταξης Ιχνηλάτησης για την Αξιολόγηση Καινοτόμων Φ/Β Συστημάτων	20
7. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ	21
7.1. Επίδραση Υγρασίας και Οξυγόνου	21
7.2. Θερμική και Μηχανική Καταπόνηση.....	22
8. ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	29
8.1 Διαδικασία Εσωτερικών Μετρήσεων (Indoor Protocol).....	29
8.2 Ανάλυση EQE και Φασματικής Απόκρισης.....	30
8.3 Διαδικασία Υπαίθριων Μετρήσεων (Outdoor Protocol).....	30
8.4 Ημερήσια Απόδοση (Diurnal Performance) και Σκέδαση Rayleigh.....	31
8.5 Φαινόμενο Thermal Lag.....	31
9. ΜΗΧΑΝΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ (FAILURE ANALYSIS).....	32
9.1 Μονοπάτια Υγρασίας και Οξυγόνου.....	32
9.2 Πίνακας: Διάγνωση Αστοχιών στο Πεδίο (Failure Matrix).....	32

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ	32
10.1 Πρωτόκολλο Μετρήσεων — Master Parameter Table.....	33
11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	34

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Πρωτόκολλα αξιολόγησης Φ/Β 3 ^{ης} γενιάς.....	5
Εικόνα 2 Πίνακας Βασικών Δεικτών Απόδοσης (KPIs - Key Performance Indicators) Φ/Β 3 ^{ης} γενιάς.....	5
Εικόνα 3 Πίνακας και αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων ISOS	8
Εικόνα 4 Πίνακας: Σύγκριση Δυναμικής Φορτίων MPP vs Voc.....	9
Εικόνα 5 Αποτυχία του Standard Perturb and Observe (P&O)	11
Εικόνα 6 Χαρακτηριστική καμπύλη Ισχύος – Τάσης	12
Εικόνα 7. Διάγραμμα ροής αλγόριθμου Αναρρίχησης Λόφου, Διαταραχής και Παρατήρησης (HCPO)...	14
Εικόνα 8. Γραφήματα HCPO, α) Ισχύς - Χρόνος, β) Duty Cycle - Χρόνος, γ) Τάση-Χρόνος, δ) Ρεύμα-Χρόνος.....	14
Εικόνα 9. Δυναμικοί αλγόριθμοι MPPT που προτείνονται	16
Εικόνα 10. Σύγκριση αλγορίθμων MPPT	16
Εικόνα 11. Θεώρημα Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος.....	17
Εικόνα 12. PWM σήμα.....	18
Εικόνα 13. DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης.....	18
Εικόνα 14. DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης mosfet Q ₁ σε ανοιχτή κατάσταση κλειστού διακόπτη.....	19
Εικόνα 15. DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης mosfet Q ₁ κλειστό σαν ανοιχτός διακόπτης.....	19
Εικόνα 16. Σύστημα στήριξης με αυτόματη ρύθμιση γωνίας κεκλιμένου επιπέδου και ιχνηλάτηση ήλιου δύο αξόνων. α) Η διεπαφή χρήστη, β) ο ιχνηλάτης σε λειτουργία, γ-δ) το ηλεκτρονικό σύστημα	21
Εικόνα 17. Πρωτόκολλο εσωτερικών μετρήσεων	30
Εικόνα 18. Πρωτόκολλο εξωτερικών μετρήσεων.....	31
Εικόνα 19. Διάγνωση Αστοχιών στο Πεδίο.....	32
Εικόνα 20. Πίνακας Κύριων Παραμέτρων	33
Εικόνα 21. Καταγραφή Βαθμονόμησης Οργάνων ΕΛΜΕΠΑ (Calibration Log).....	34

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για να εισέλθουν στην αγορά, οι φωτοβολταϊκές (Φ/Β) τεχνολογίες πρέπει να παρέχουν οικονομικά αποδοτικές, αποδοτικές και ανθεκτικές μονάδες σε κλίμακα με προβλέψιμη ενεργειακή απόδοση στο πεδίο. Για να επιτευχθεί αυτό το στάδιο, οι αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως οι αρχιτεκτονικές περοβσκίτη και οργανικών Φ/Β, πρέπει να ξεπεράσουν αρκετές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής ποιοτικών κυψελίδων σε κλίμακα, της ενσωμάτωσης αυτών των κυψελίδων σε μονάδες υψηλής ενεργειακής απόδοσης σε σχετική κλίμακα και της παραγωγής προβλέψιμης ενεργειακής απόδοσης σε εξωτερικούς χώρους. Μέχρι στιγμής, οι επιδείξεις με υποσχόμενη απόδοση και ανθεκτικότητα πραγματοποιούνται κυρίως υπό προσομοιωμένες συνθήκες πεδίου. Ενώ η εστίαση αρχίζει να μετατοπίζεται στην επεξεργασία σε κλίμακα, η ανάγκη για υπαίθριες επιδείξεις στο πεδίο είναι επιτακτική. Στην παρούσα έκθεση, παραθέτουμε τα πειραματικά πρωτοκόλλων για δοκιμές σε εσωτερικές συνθήκες συμπεριλαμβανομένου πειράματα σταθερότητας σε ηλιακές μονάδες περοβσκίτη καθώς και τον τρόπο ενθυλάκωσης Φ/Β μονάδων. Παράλληλα παρουσιάζονται τα πρωτόκολλα και ο τρόπος μέτρησης περοβσκιτικών Φ/Β σε εξωτερικές συνθήκες στην υποδομή του ΕΛΜΕΠΑ για την παρακολούθηση της απόδοσης διαφόρων Φ/Β τεχνολογιών.

2. ΤΟ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟ ΌΡΑΜΑ ΤΗΣ Bankability

2.1 Στρατηγική Bankability

Η στρατηγική Bankability (Δανειοληπτική Ικανότητα) εστιάζει στη μείωση της τεχνικής αβεβαιότητας, η οποία ενσωματώνεται άμεσα στο Σταθμισμένο Κόστος Κεφαλαίου (WACC). Σύμφωνα με χρηματοοικονομικά μοντέλα ευαισθησίας, μια μείωση της αβεβαιότητας που οδηγεί σε πτώση του WACC κατά μόλις 1%, μπορεί να βελτιώσει το LCOE (Levelized Cost of Energy) κατά 5-10%. Τα πειραματικά πρωτόκολλα που παρουσιάζονται σε συνδυασμό με την ανοικτή πλατφόρμα μετρήσεων που παρουσιάστηκε στο παραδοτέο Π4.2 διασφαλίζει την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων μέσω των αρχών FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable).

ερευνητικών ομάδων, διευκολύνοντας τη μετα-ανάλυση δεδομένων και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη μακροχρόνια αξιοπιστία της τεχνολογίας.

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται οι βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs - Key Performance Indicators) που είναι μετρήσιμα στοιχεία που αξιολογούν την αποτελεσματικότητα των Φ/Β στοιχείων ή παλισίων.

Αναλυτικά οι παράμετροι αυτοί είναι :

T_{80} : Ο όρος T_{80} αναφέρεται στον χρόνο που απαιτείται ώστε η απόδοση ενός πλαισίου να πέσει στο 80% της αρχικής του ονομαστικής ισχύος. Αποτελεί ένα κρίσιμο ορόσημο για την έρευνα στο πεδίο και για τους επενδυτές, καθώς το 80% θεωρείται το τέλος της ωφέλιμης ζωής (End of Life - EOL) για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Παράλληλα όταν ένα πλαίσιο φτάσει στο T_{80} , δεν σταματά να λειτουργεί, αλλά η παραγωγή του θεωρείται πλέον ανεπαρκής για να δικαιολογήσει το κόστος συντήρησης ή την κατάληψη του χώρου, οδηγώντας συχνά σε αντικατάσταση (repowering). Ο δείκτης αυτός αποτυπώνει την ταχύτητα υποβάθμισης κατά την πρώιμη και μεσαία φάση λειτουργίας, όπου οι μηχανισμοί αποδόμησης είναι κυρίως χημικοί και φωτοχημικοί. Η χρήση του T_{80} επιτρέπει την άμεση σύγκριση διαφορετικών αρχιτεκτονικών, υλικών και στρατηγικών ενθυλάκωσης, ενώ αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής σε εφαρμογές όπου η αρχική απόδοση είναι καθοριστική.

Ωστόσο, η συμπεριφορά των περοβσκίτικων συσκευών χαρακτηρίζεται συχνά από ένα αρχικό στάδιο ταχείας πτώσης της απόδοσης, γνωστό ως burn-in. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με αστάθειες στις διεπιφάνειες, ανακατανομή ιόντων και παθητικοποίηση παγίδων, και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική απώλεια απόδοσης μέσα στις πρώτες ώρες λειτουργίας.

TS_{80} : Ο όρος TS_{80} επικεντρώνεται στη σταθεροποιημένη απόδοση μετά την αρχική περίοδο (burn-in loss) που υφίστανται τα νέα υλικά που χρησιμοποιούνται στις αναδυόμενες τεχνολογίες όπως τα οργανικά Φ/Β ή οι περοβσκίτες). Το Burn-in Loss αποτελεί ξεχωριστή μετρική, η οποία ποσοτικοποιεί το μέγεθος της αρχικής πτώσης απόδοσης. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την κατανόηση των διεπιφανειακών φαινομένων και των μηχανισμών που σχετίζονται με την κινητικότητα ιόντων, την ποιότητα των στρωμάτων μεταφοράς φορτίου και την αποτελεσματικότητα της παθητικοποίησης. Η ανάλυση του burn-in επιτρέπει την απομόνωση των ταχέων μηχανισμών υποβάθμισης από τους βραδύτερους, μακροχρόνιους μηχανισμούς, διευκολύνοντας την ανάπτυξη υλικών και διεπιφανειών με βελτιωμένη σταθερότητα.

PR : Ο δείκτης απόδοσης ή performance ratio (PR) δείχνει την πραγματική ενέργεια που παρήχθη σε σχέση με την θεωρητική ενέργεια βάσει της ηλιακής ακτινοβολίας που προσέπεσε στο Φ/Β πλαίσιο.

HI : Οι περοβσκίτες και άλλες αναδύμενες τεχνολογίες Φ/Β παρουσιάζουν το φαινόμενο της υστέρησης (Hysteresis) στην καμπύλη I-V. Αυτό σημαίνει ότι η μετρούμενη ισχύς εξαρτάται από την κατεύθυνση της σάρωσης (από την τάση ανοιχτοκυκλώματος προς το βραχυκύκλωμα ή αντίστροφα) και ο δείκτης Hysteresis index δείχνει την απόκλιση της απόδοσης ανάλογα με τον τρόπο που μετράται η καμπύλη I-V.

DR : Ο ρυθμός υποβάθμισης (Degradation Rate - RD) στα περοβσκίτικα φωτοβολταϊκά (PSCs) είναι ίσως η σημαντικότερη παράμετρος για τη μετάβαση της τεχνολογίας από το εργαστήριο στην αγορά. Γενικά οι περοβσκίτες και λιγότερο οι άλλες τεχνολογίες Φ/Β της 3^{ης} γενιάς παρουσιάζουν πολύ πιο σύνθετους και ταχείς μηχανισμούς υποβάθμισης.

Συνολικά, οι παραπάνω δείκτες αποτελούν θεμελιώδη εργαλεία για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των περοβσκίτικων φωτοβολταϊκών. Η συνδυαστική τους χρήση επιτρέπει την πλήρη αποτύπωση της δυναμικής υποβάθμισης, από την αρχική φάση αστάθειας έως τη μακροχρόνια λειτουργική συμπεριφορά, και συμβάλλει στη διαμόρφωση ενός ενιαίου πλαισίου αναφοράς για την τεχνολογία.

3. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ: ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ

Η παγκόσμια στροφή προς βιώσιμες και οικονομικά αποδοτικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει τοποθετήσει τις αναδύμενες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες, ειδικά τα οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV) και τους μεταλλικούς αλογονιδικούς περοβσκίτες (PSCs), στην πρωτοπορία της επιστήμης των υλικών. Ενώ η απόδοση μετατροπής ισχύος (PCE) αυτών των διατάξεων τρίτης γενιάς έχει προχωρήσει με πρωτοφανή ταχύτητα —ξεπερνώντας το 25% για κυψελίδες απλής επαφής και το 28% για tandem διατάξεις περοβσκίτη-πυριτίου— η πρόκληση της μακροπρόθεσμης επιχειρησιακής σταθερότητας παραμένει το "τελικό σύνορο" πριν την εμπορευματοποίηση μεγάλης κλίμακας.

3.1 Εξέλιξη και Αρχιτεκτονική του Πλαισίου ISOS

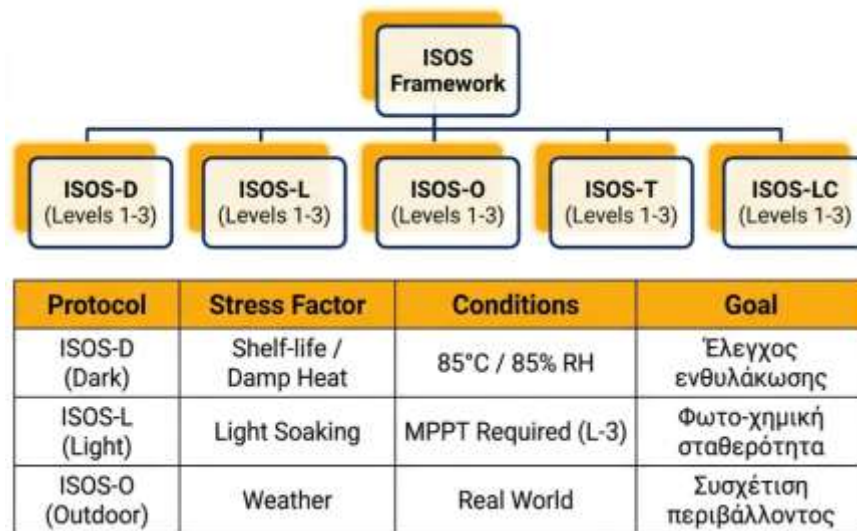
Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά φωτοβολταϊκά με βάση το πυρίτιο, τα οποία χαρακτηρίζονται από ένα άκαμπτο και καλά εδραιωμένο κρυσταλλικό πλέγμα, τα υλικά OPV και PSC είναι εγγενώς πιο δυναμικά και ευαίσθητα σε περιβαλλοντικούς παράγοντες καταπόνησης. Η ιστορική τροχιά των δοκιμών σταθερότητας μεταβλήθηκε σημαντικά το 2010 κατά τη διάρκεια του International Summit on Organic PV Stability στο Roskilde της Δανίας. Εκεί αναγνωρίστηκε ότι τα πρότυπα της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC), όπως το IEC 61215, σχεδιάστηκαν για ώριμες τεχνολογίες και δεν ευνοούσαν την

ανάπτυξη διατάξεων λεπτών υμενίων σε πρώιμο στάδιο, όπου η κατανόηση των τρόπων αστοχίας είναι εξίσου κρίσιμη με την επιτυχή ολοκλήρωση μιας δοκιμής πιστοποίησης.

Τα αποτελέσματα αυτού του συνεδρίου ήταν τα πρωτόκολλα ISOS, τα οποία σχεδιάστηκαν για να είναι αρθρωτά και κλιμακωτά (tiered), παρέχοντας στους ερευνητές ένα εύρος συνθηκών δοκιμών που ευθυγραμμίζονται με διάφορα επίπεδα εργαστηριακής υποδομής:

- Level 1 (Basic): Επιτρέπει δοκιμές με τυπικό εργαστηριακό εξοπλισμό και ελάχιστο έλεγχο.
- Level 2 (Intermediate): Εισάγει καλύτερη περιβαλλοντική ρύθμιση και περιοδικό χαρακτηρισμό.
- Level 3 (Advanced): Απαιτεί εξελιγμένους περιβαλλοντικούς θαλάμους και συνεχή παρακολούθηση μέσω αυτοματοποιημένων συστημάτων ιχνηλάτησης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).

Τα πρωτόκολλα ISOS παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα και αναλύθηκαν στο παραδοτέο Π4.1.



Εικόνα 3 Πίνακας και αρχιτεκτονική πρωτοκόλλων ISOS

4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ: MPPT vs VOC

Ο καθορισμός της βέλτιστης κατάστασης ηλεκτρικού φορτίου για τις δοκιμές σταθερότητας αποτελεί αντικείμενο έντονης συζήτησης. Η επιλογή μεταξύ MPPT και γήρανσης υπό τάση ανοικτού κυκλώματος (Voc) μεταβάλλει θεμελιωδώς το προφίλ καταπόνησης στο εσωτερικό της διάταξης.

4.1 Η Επίδραση του Εσωτερικού Ηλεκτρικού Πεδίου

Σε μια λειτουργική ηλιακή κυψελίδα, η παραμονή στη V_{oc} οδηγεί σε κατάσταση "flat-band" όπου το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο ελαχιστοποιείται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη δυνατή συγκέντρωση φωτογεννημένων φορέων (ηλεκτρονίων και οπών) εντός του φωτοενεργού στρώματος. Αυτή η συσσώρευση φορέων αυξάνει το ρυθμό μη-ακτινοβόλου ανασύνδεσης και προωθεί επιβλαβείς ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

4.2 Πίνακας: Σύγκριση Δυναμικής Φορτίων MPP vs V_{oc}

Παράμετρος	Κατάσταση MPP	V_{oc} Κατάσταση (V_{oc})
Εσωτερικό Πεδίο	Υψηλό (Προωθεί την εξαγωγή φορτίου)	Χαμηλό/Flat (Προωθεί τη συσσώρευση)
Μετανάστευση Ιόντων	Μέτρια (Το πεδίο ανθίσταται στην κίνηση)	Υψηλή (Επιτρέπει τη διάχυση/drift)
Ρυθμός Υποβάθμισης	Τυπικός Επιχειρησιακός	Ταχύς και Σοβαρός
Σκοπός Δοκιμής	Πρόβλεψη Ενεργειακής Απόδοσης	Αναγνώριση Μηχανισμών Αστοχίας

Εικόνα 4 Πίνακας: Σύγκριση Δυναμικής Φορτίων MPP vs V_{oc}

Ολοκληρωμένες μελέτες, συμπεριλαμβανομένης μιας μετα-ανάλυσης του NREL σε πάνω από 480 διατάξεις, έδειξαν οριστικά ότι η γήρανση στη V_{oc} είναι σημαντικά σκληρότερη από τη γήρανση στο MPP. Ενώ οι απώλειες απόδοσης και στις δύο συνθήκες συσχετίζονται, η κατάσταση V_{oc} επιταχύνει την αστοχία ενισχύοντας το σχηματισμό καταστάσεων βαθιάς παγίδας (deep-trap states) και την πλευρική μετανάστευση ιόντων.

5. . ΘΕΩΡΙΑ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ MPPT ΓΙΑ ΠΕΡΟΒΣΚΙΤΕΣ

Η παρουσία υστέρησης ρεύματος-τάσης και αργών ιοντικών μεταβατικών φαινομένων (transients) παρουσιάζει σημαντική πρόκληση για τους συμβατικούς αλγορίθμους MPPT που έχουν σχεδιαστεί για τεχνολογίες πυριτίου.

5.1 Αλγόριθμοι εξαντλητική αναζήτησης Ρεύματος (I) – Τάσης (V)

Οι αλγόριθμοι εξαντλητική αναζήτησης Ρεύματος (I) – Τάσης (V) χρησιμοποιούνται κατά κόρων για τον πλήρη ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των φωτοβολταϊκών, καθώς μπορούν να εξαγάγουν με 100% ακρίβεια όλα τους τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά όπως: Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}), ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{sc}), σημείο μέγιστης ισχύος (P_{mp}), τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{mp}), ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος (I_{mp}), τον συντελεστή πλήρωσης (FF), καθώς και την απόδοση του (PCE).

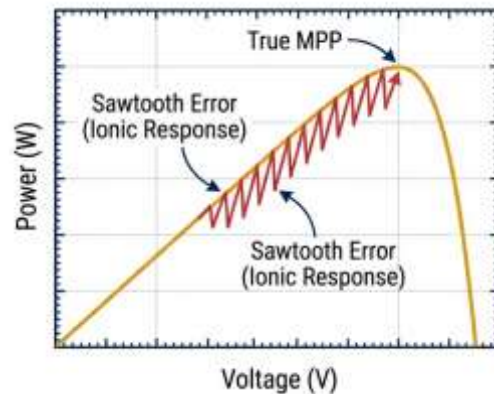
Συμπεριλαμβάνονται τέσσερις αλγόριθμοι εξαντλητικής αναζήτησης με την δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας και της διεύθυνσης σάρωσής. Οι αλγόριθμοι εξαντλητικής αναζήτησης είναι οι εξής:

1. Αλγόριθμος ορθής σάρωσης (Forward I-V), στον οποίο η σάρωση ξεκινάει από το βραχυκύκλωμα και τελειώνει στο ανοιχτό-κύκλωμα
2. Αλγόριθμος αντίστροφης σάρωσης (Reverse I-V), στον οποίο η σάρωση ξεκινάει από το ανοιχτό-κύκλωμα και τελειώνει στο βραχυκύκλωμα
3. Έπειτα ο ακολουθιακός αλγόριθμος που συνδυάζει τον Forward I-V και τον Reverse I-V, με την ονομασία Forward-Reverse I-V, δίνει την δυνατότητα να γίνει πρώτα η εκτέλεση του Forward I-V και απευθείας να ακολουθήσει ο Reverse I-V.
4. Καθώς και ο δεύτερος ακολουθιακός αλγόριθμος που συνδυάζει τον Reverse I-V και τον Forward I-V, με την ονομασία Reverse-Forward I-V, δίνει την δυνατότητα να γίνει πρώτα η εκτέλεση του Reverse I-V και απευθείας να ακολουθήσει ο Forward I-V.

Οι δύο ακολουθιακοί I-V αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται κυρίως για την μελέτη υστέρησης στις νέες αναδυόμενες φωτοβολταϊκές τεχνολογίες [1].

5.2 Αποτυχία του Standard Perturb and Observe (P&O)

Ο αλγόριθμος P&O είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος λόγω της απλότητάς του. Ωστόσο, σε υστερητικές διατάξεις περοβσκίτη, μια διαταραχή τάσης προκαλεί μια ιοντική απόκριση που μεταβάλλει το ρεύμα σε διάστημα δευτερολέπτων ή και λεπτών. Εάν ο αλγόριθμος δειγματίζει την ισχύ πολύ γρήγορα, μπορεί να συλλάβει μια παροδική πτώση και να αντιστρέψει εσφαλμένα την κατεύθυνση, οδηγώντας σε μοτίβο ταλάντωσης "sawtooth" που υποτιμά σημαντικά το πραγματικό σημείο μέγιστης ισχύος.



Εικόνα 5 Αποτυχία του Standard Perturb and Observe (P&O)

5.3 Καινοτομία προτεινόμενου αλγορίθμου

Στο εργαστήριο του ΕΛΜΕΠΑ αναπτύχθηκε βελτιωμένος αλγόριθμος Αναρρίχησης Λόφου, Διαταραχής και Παρατήρησης (Improved Hill Climbing Perturb and Observe - HCPO) που αποτελεί παραλλαγή του αλγορίθμου που παρουσιάστηκε παραπάνω για διατάξεις Φ/Β 3^{ης} γενιάς.

Η καινοτομία έγκειται στο ότι το ηλεκτρονικό σύστημα του εργαστηρίου μπορεί να υλοποιεί αλγόριθμους I-V και MPPT, καθώς και να φορτίζει την μπαταρία του αυτόνομου συστήματος, δίνοντας την δυνατότητα να συνδυάσει την μέγιστη μεταφορά ενέργειας στην μπαταρία καθώς να έχει ολιστική προσέγγιση στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό.

Για την βελτίωση του δυναμικού αλγορίθμου HCPO, αρχικά πραγματοποιείται σάρωση από το ανοιχτό κύκλωμα έως το 80% της καμπύλης I-V του βραχυκυκλώματος, και δεν επιτρέπεται στον αλγόριθμο να προκαλέσει βραχυκύκλωμα στα φωτοβολταϊκά (από 0 έως 80% των σημείων της καμπύλης) διότι είναι γνωστό ότι το βραχυκύκλωμα είναι καταστρεπτικό για τα φωτοβολταϊκά. Αφού ολοκληρωθεί η εξαγωγή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών όπως V_{oc} , V_{mpp} , I_{mpp} , P_{mpp} , στη συνέχεια ξεκινά η λειτουργία στο σημείο P_{mpp} , πραγματοποιείται συνεχής σάρωση και σύγκριση της νέας μέτρησης ισχύος με την προηγούμενη (διαφορική μέτρηση ισχύος– ΔP):

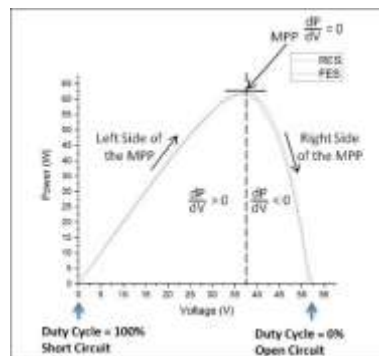
- Εάν η νέα μέτρηση σάρωσης είναι υψηλότερη ($\Delta P < 0$) από την προηγούμενη, ελέγχει αυτόματα την τάση και τη συγκρίνει με την προηγούμενη τάση· εάν είναι υψηλότερη ($\Delta V < 0$), αλλάζει τα βήματα της καμπύλης πηγαίνοντας σε χαμηλότερη τάση, αλλιώς εάν η τάση είναι χαμηλότερη ($\Delta V > 0$), αυξάνει αντίστοιχα ώστε να πάει σε υψηλότερη τάση.

- Στη συνέχεια, εάν η νέα μέτρηση σάρωσης είναι χαμηλότερη ($\Delta P > 0$) από την προηγούμενη, ελέγχει ξανά αυτόματα την τάση και τη συγκρίνει με την προηγούμενη τάση, εάν είναι υψηλότερη ($\Delta V < 0$) πηγαίνει προς μεγαλύτερη τάση, αλλιώς εάν η τάση είναι χαμηλότερη ($\Delta V > 0$) πηγαίνει ανάστροφα.

Η τάση και η ισχύς συνδυαστικά δίνουν την κατεύθυνση κίνησης και το σε ποια πλευρά του MPP βρισκόμαστε:

- Αυξημένη ισχύς και τάση σημαίνουν ότι η κατεύθυνση είναι δεξιά, αλλά στην αριστερή πλευρά του MPP.
- Αυξημένη ισχύς και μειωμένη τάση σημαίνουν ότι η κατεύθυνση είναι αριστερά, αλλά στη δεξιά πλευρά του MPP.
- Μειωμένη ισχύς και αυξημένη τάση σημαίνουν ότι η κατεύθυνση είναι δεξιά και στη δεξιά πλευρά του MPP.
- Μειωμένη ισχύς και τάση σημαίνουν ότι η κατεύθυνση είναι αριστερά και στην αριστερή πλευρά του MPP. Το πρόσημο του $\frac{dP}{dV}$, όπου dP είναι η διαφορά μεταξύ της ισχύος και dV είναι η διαφορά μεταξύ της τάσης δύο διαδοχικών σημείων, στην αναρρίχηση λόφου περιλαμβάνει μια διαταραχή στο σημεία που παίρνει ο μετατροπέας μέσω της αλλαγής του κύκλου λειτουργίας (duty cycle) στον μικροελεγκτή που χρησιμοποιείται.

Παρατηρείται από την καμπύλη χαρακτηριστικών PV του φωτοβολταϊκού (Εικόνα 6) και από το διάγραμμα ροής (Εικόνα 7.) ότι υπάρχουν τρεις κύριες περιοχές λειτουργίας:



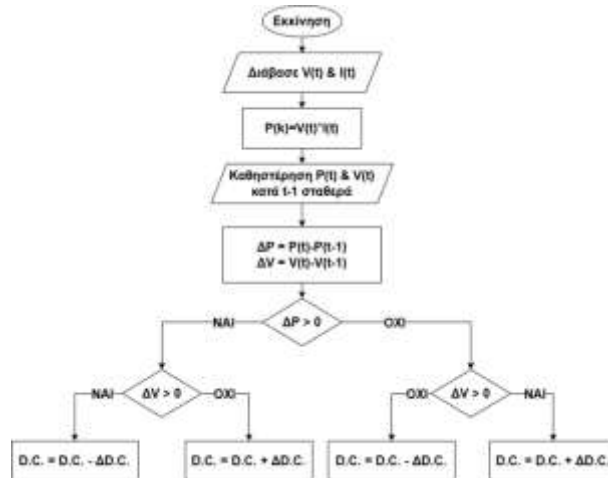
Εικόνα 6 Χαρακτηριστική καμπύλη Ισχύος – Τάσης

- Η πρώτη περιοχή είναι στη δεξιά πλευρά του MPP, όπου ο λόγος της μεταβολής της ισχύος προς τη μεταβολή της τάσης $\frac{dP}{dV} < 0$ είναι αρνητικός.
- Η δεύτερη περιοχή είναι στην αριστερή πλευρά του MPP, όπου ο λόγος $\frac{dP}{dV} > 0$ είναι θετικός.
- Και η τρίτη περιοχή είναι ακριβώς στο MPP, όπου ο λόγος $\frac{dP}{dV} = 0$ είναι μηδέν.

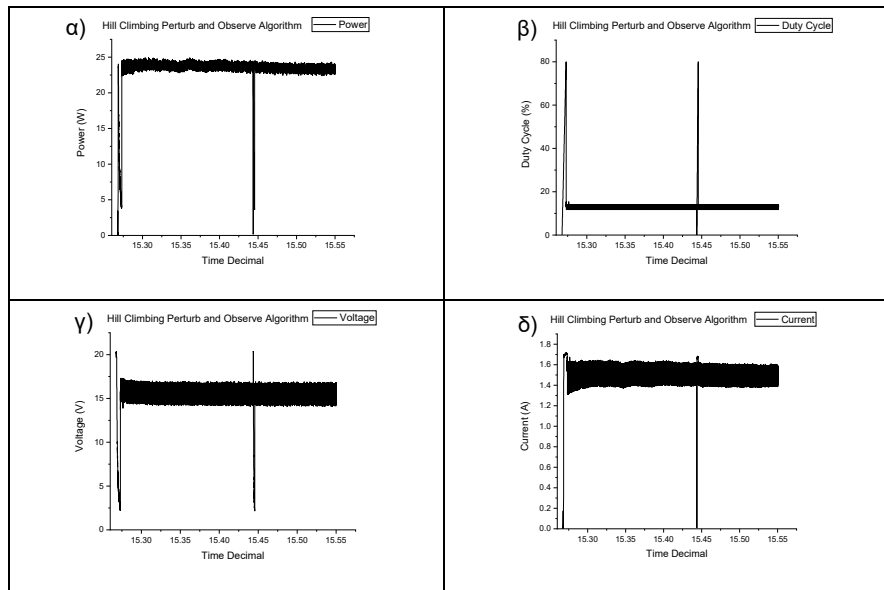
Έτσι, ο αλγόριθμος HCPO, αλλάζοντας τα βήματα του αλγορίθμου πάνω και κάτω ανάλογα με αυτές τις τρεις περιοχές λειτουργίας, μπορεί να διατηρήσει το P_{mpp} και την τάση ακόμα και με διαταραχές από αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία (σύννεφα, ή θέση του ήλιου το πρωί ή το απόγευμα, κ.λπ.). Επίσης, κάθε 10 λεπτά επαναλαμβάνει τη σάρωση από το ανοιχτό κύκλωμα έως το 80% του βραχυκυκλώματος της IV για να εξάγει τα νέα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (Εικόνα 8).

- Το πλεονέκτημα είναι ότι σαρώνει συνεχώς, οπότε μπορεί να διατηρεί το P_{mpp} όλη την ώρα.
- Επίσης, πλεονέκτημα είναι η απλότητα της δημιουργίας αυτού του αλγορίθμου και η πολύ καλή απόδοση.
- Το μειονέκτημα είναι ότι ο αλγόριθμος μπορεί να παγιδευτεί σε τοπικό μέγιστο όταν σαρώνει συνεχώς για το P_{mpp} και την Τάση, κάτι που μπορεί να λυθεί με αυξημένα βήματα στις μεταβάσεις στην καμπύλη.
- Το άλλο μειονέκτημα είναι ότι οι συνεχείς αλλαγές σε βήματα μπορεί να σημαίνουν απώλειες ισχύος
- Επίσης, εάν το βήμα αυξηθεί για τη διαφυγή από την παγίδευση, αυτό σημαίνει επιπλέον απώλειες ισχύος και χαμηλότερη ανάλυση στην εύρεση του P_{mpp} .

Στον βελτιωμένο αλγόριθμο τα παραπάνω μειονεκτήματα εξομαλύνονται με την περιοδική I-V καμπύλη που γίνεται κάθε 10 λεπτά γιατί επαναρυθμίζονται όλοι οι παράμετροι του αλγορίθμου.



Εικόνα 7. Διάγραμμα ροής αλγόριθμου Αναρρίχησης Λόφου, Διαταραχής και Παρατήρησης (HCPO)



Εικόνα 8. Γραφήματα HCPO, α) Ισχύς - Χρόνος, β) Duty Cycle - Χρόνος, γ) Τάση-Χρόνος, δ) Ρεύμα-Χρόνος

5.4 Προβλεπτικοί και Γαλβανοστατικοί Αλγόριθμοι

Παράλληλα για την αντιμετώπιση των ελαττωμάτων των συμβατικών αλγορίθμων MPP που χρησιμοποιούνται σε κρυσταλλικά πυρίτια αναπτύχθηκαν και κάποιοι επιπλέον δυναμικοί αλγόριθμοι που παρουσιάζονται παρακάτω :

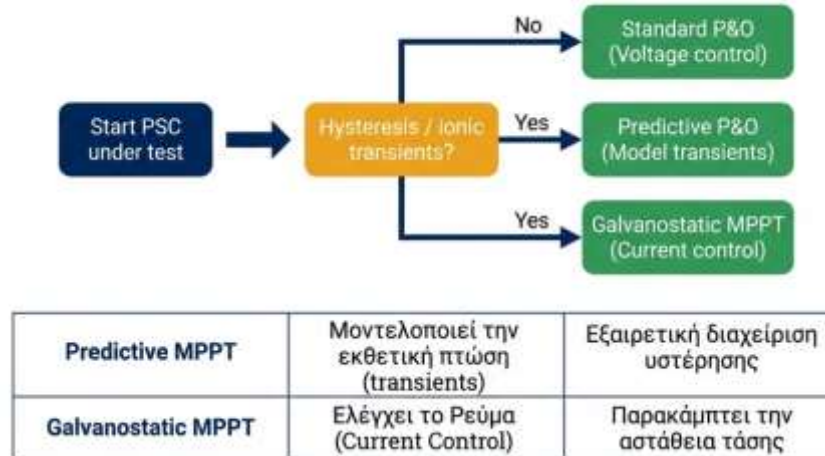
- Predictive MPPT : Μοντελοποιεί τη μείωση ή αύξηση του ρεύματος μετά από ένα βήμα τάσης (π.χ. εκθετική πτώση), προβλέποντας την τελική πυκνότητα ρεύματος σταθερής κατάστασης (J_{ss}), επιταχύνοντας τη διαδικασία ιχνηλάτησης, χωρίς να απαιτείται η αναμονή για πλήρη σταθεροποίηση (dwell times). Ο προβλεπτικός αλγόριθμος MPPT χρησιμοποιεί ένα μοντέλο της δυναμικής απόκρισης του ρεύματος μετά από ένα μικρό βήμα τάσης. Αντί να περιμένει την πλήρη σταθεροποίηση του ρεύματος (η οποία μπορεί να απαιτεί δευτερόλεπτα λόγω ιονικών transients), ο αλγόριθμος προβλέπει την τελική τιμή της πυκνότητας ρεύματος σταθερής κατάστασης J_s . Η προσέγγιση αυτή μειώνει δραστικά τους χρόνους αναμονής (dwell times), αποτρέπει την υπερβολική διέγερση του στοιχείου, επιτρέπει ταχύτερη και πιο σταθερή σύγκλιση στο MPP, περιορίζει την επίδραση της υστέρησης μέσω μοντελοποίησης αντί για brute force μετρήσεις.

Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε συστήματα με έντονη ιοντική κινητικότητα, όπου η ηλεκτρική απόκριση δεν είναι στιγμιαία.

- Galvanostatic MPPT (Perovskino (Galvanostatic MPPT algorithm)): Μια πρόσφατη καινοτομία όπου ο ιχνηλάτης ρυθμίζει το ρεύμα εξόδου (ενεργό φορτίο) και μετρά την προκύπτουσα τάση. Με τη σάρωση του ρεύματος αντί της τάσης, το σύστημα μπορεί να παρακάμψει μεγάλο μέρος της αστάθειας που σχετίζεται με την εξαρτώμενη από την τάση ιοντική υστέρηση.

Η γαλβανοστατική προσέγγιση αντιστρέφει τη λογική των κλασικών MPPT: αντί να μεταβάλλει την τάση και να μετρά το ρεύμα, ρυθμίζει το ρεύμα εξόδου και μετρά την προκύπτουσα τάση. Με αυτόν τον τρόπο, η διέγερση του συστήματος γίνεται μέσω ελέγχου ρεύματος, το οποίο είναι λιγότερο ευαίσθητο στην ιοντική υστέρηση. Η μέθοδος αυτή παρακάμπτει την εξαρτώμενη από την τάση υστέρηση, μειώνει τις ταλαντώσεις που προκαλούνται από τα αργά transients, επιτρέπει σταθερή λειτουργία ακόμη και σε συσκευές με έντονη ιοντική κινητικότητα και τέλος είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για περοβσκίτες με υψηλή χωρητικότητα διεπιφανειών.

Η γαλβανοστατική MPPT θεωρείται μία από τις πιο υποσχόμενες προσεγγίσεις για βιομηχανική εφαρμογή, καθώς προσφέρει σταθερότητα και προβλεψιμότητα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 9. Δυναμικοί αλγόριθμοι MPPT που προτείνονται

5.5 Χαρακτηριστικά Αλγορίθμων 3GPV-4INDUSTRY

Η παρακάτω σύγκριση συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των τριών κατηγοριών αλγορίθμων MPPT, όπως αξιολογούνται στο πλαίσιο 3GPV-4INDUSTRY. Η σύγκριση εστιάζει στον τρόπο ελέγχου, στη διαχείριση της υστέρησης, στον απαιτούμενο ρυθμό δειγματοληψίας και στην πολυπλοκότητα υλοποίησης.

Χαρακτηριστικό	Standard P&O	Predictive P&O	Galvanostatic MPPT
Παράμετρος Ελέγχου	Τάση (V)	Τάση (V)	Ρεύμα (I)
Διαχείριση Υστέρησης	Κακή – εμφανίζει ταλαντώσεις λόγω αργών transients	Εξαιρετική – βασίζεται σε μοντελοποίηση της δυναμικής	Εξαιρετική – αποφεύγει την τάση-εξαρτώμενη υστέρηση
Sampling Rate	Υψηλό (απαιτεί συνεχείς μετρήσεις)	Μέτριο (μειωμένα dwell times)	Προσαρμοστικό (adaptive control)
Υλοποίηση	Απλή ψηφιακή υλοποίηση	Αυξημένη πολυπλοκότητα λογισμικού	Αυξημένη απαίτηση σε υλικό (hardware-intensive)

Εικόνα 10. Σύγκριση αλγορίθμων MPPT

Οι προηγμένες μέθοδοι (Predictive και Galvanostatic) ανταποκρίνονται καλύτερα στη φυσική των περοβσκίτικων συσκευών, προσφέροντας σταθερότερη λειτουργία και υψηλότερη ακρίβεια στον εντοπισμό του MPP. Η επιλογή μεταξύ τους εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος, την επιθυμητή ταχύτητα απόκρισης και τους περιορισμούς υλοποίησης.

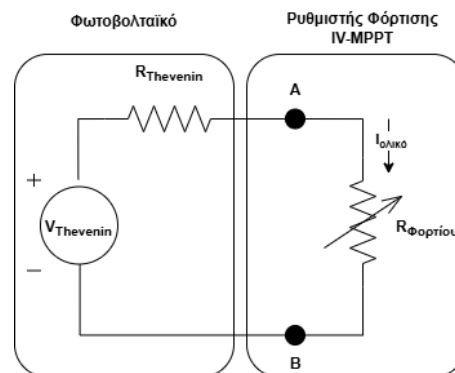
6. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ Φ/Β 3^{ης} ΓΕΝΙΑΣ

6.1. Κατασκευή ηλεκτρονικής διάταξης ρυθμιστή φόρτισης IV-MPPT

Στα πλαίσια του έργου 3GP-4INDUSTRY σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ειδικό ηλεκτρονικό σύστημα με σκοπό τη ρύθμιση φόρτισης της μπαταρίας του αυτόνομου συστήματος, και παράλληλα η εκτέλεση καμπυλών IV και ιχνηλάτηση μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT) με την εκτέλεση των αλγορίθμων που αναφέρθηκαν. Το σύστημα σχεδιάστηκε για την αποτελεσματική μελέτη της συμπεριφοράς φωτοβολταϊκών διαφόρων τεχνολογιών σε πραγματικές συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος. Η διάταξη δημιουργεί καμπύλες I-V και P-V για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό τους, ενώ παράλληλα ανιχνεύει το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση μετατροπής ισχύος των φωτοβολταϊκών για την αποδοτικότερη φόρτιση μπαταριών και την εκτενέστερη μελέτη τους. Πιο αναλυτικά η αρχή λειτουργίας της διάταξης του Ρυθμιστή Φόρτισης IV-MPPT βασίζεται στο θεώρημα μεταφοράς μέγιστης ισχύος. Το θεώρημα μεταφοράς μέγιστης ισχύος ορίζει ότι η μέγιστη ισχύς μεταφέρεται από την πηγή $\{V_{Thevenin}, R_{Thevenin}\}$ στο φορτίο $\{R_{Φορτίου}\}$, όταν η αντίσταση του φορτίου είναι ίση με την ισοδύναμη αντίσταση Thevenin [1].

$$\text{➤ } R_{Φορτίου} = R_{Thevenin}$$

Στην περίπτωσή μας, η πηγή είναι τα φωτοβολταϊκά και το φορτίο είναι ο Ρυθμιστής Φόρτισης IV-MPPT όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα.

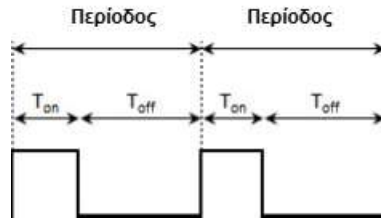


Εικόνα 11. Θεώρημα Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος

Η ηλεκτρονική διάταξη μπορεί να προσαρμόζει το φορτίο ($R_{Φορτίου}$), επιτυγχάνοντας έτσι την εξίσωση με την εσωτερική αντίσταση του φωτοβολταϊκού ($R_{Thevenin}$) υπό διαφορετικές συνθήκες καιρού, σκίασης, κλίσης, καθώς και υποβάθμισης του υλικού, ώστε να επιτυγχάνεται το σημείο μέγιστης ισχύος ανά πάσα στιγμή.

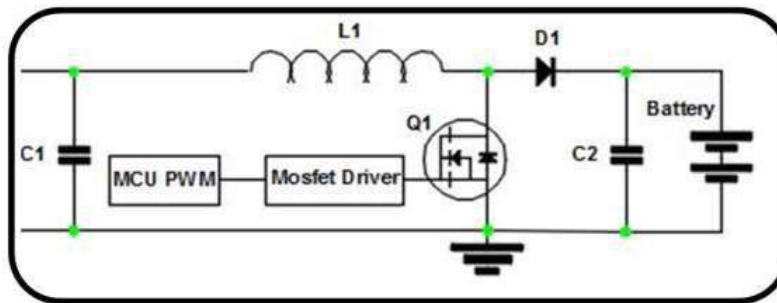
Η προσαρμογή του φορτίου πραγματοποιείται με τη βοήθεια μικροελεγκτή, μέσω αλλαγών στον κύκλο εργασίας (Duty Cycle – D.C.) του σήματος διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) (Εικόνα 12).

$$D.C.(\%) = \frac{T_{on}}{T_{period}} = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} [2]$$



Εικόνα 12. PWM σήμα

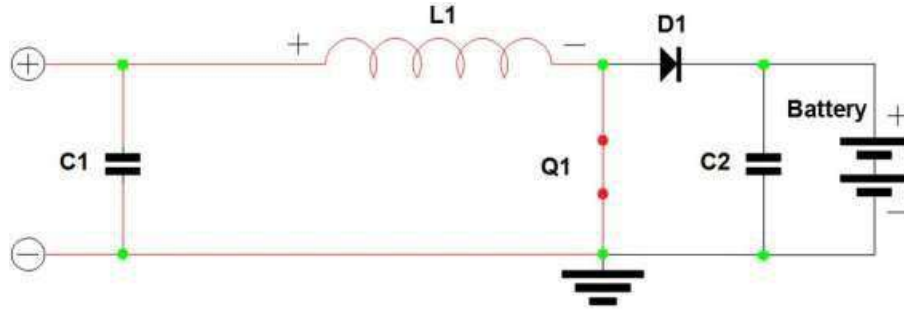
Ο μετατροπέας ανύψωσης (DC-DC Boost Converter) είναι μια διάταξη που αυξάνει την τάση ενώ ταυτόχρονα μειώνει την ένταση του ρεύματος από την είσοδο προς την έξοδό του (Εικόνα 13). Η τάση εξόδου είναι πάντα υψηλότερη από την τάση εισόδου.



Εικόνα 13. DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης

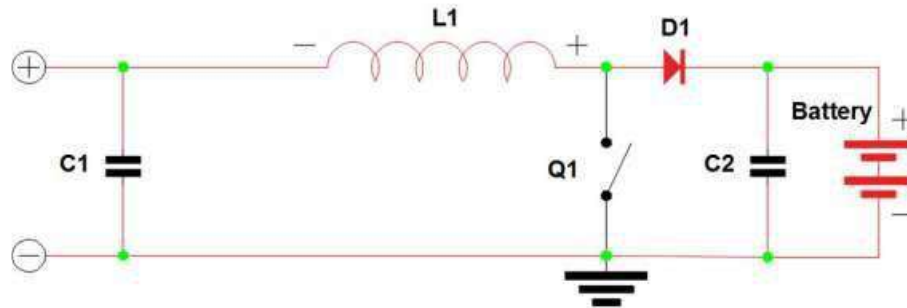
Η αρχή λειτουργίας που διέπει τον μετατροπέα ανύψωσης (Boost Converter) είναι η τάση του πηνίου να αντιστέκεται στις μεταβολές της έντασης του ρεύματος, είτε αυξάνοντας είτε μειώνοντας την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο μαγνητικό του πεδίο. Με τη χρήση του σήματος PWM που οδηγεί το mosfet **Q1**, ο μετατροπέας DC-DC Boost λειτουργεί σε δύο καταστάσεις :

Στην πρώτη κατάσταση, το mosfet **Q1** είναι ανοιγμένο (ON) και άγει, λειτουργώντας σαν κλειστός διακόπτης όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Το ρεύμα της εισόδου και του πυκνωτή **C1** ρέει στον αριστερό βρόχο (κόκκινο χρώμα), μέσω του πηνίου **L1** και μετά στο mosfet **Q1**. η ενέργεια αποθηκεύεται στο πηνίο **L1** δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο σε αυτή την κατάσταση. Η πολικότητα του πηνίου στην αριστερή πλευρά είναι θετική.



Εικόνα 14. DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης mosfet Q_1 σε ανοιχτή κατάσταση κλειστού διακόπτη

Στη δεύτερη κατάσταση, το mosfet Q_1 είναι κλειστό (OFF) και δεν άγει, λειτουργώντας σαν ανοιχτός διακόπτης όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Η ενέργεια του προηγουμένως αποθηκευμένου μαγνητικού πεδίου θα μειωθεί για να διατηρηθεί η ροή του ρεύματος προς το φορτίο· έτσι, η πολικότητα θα αντιστραφεί, πράγμα που σημαίνει ότι η αριστερή πλευρά του πηνίου θα γίνει αρνητική. Ως αποτέλεσμα, η είσοδος και το πηνίο L_1 λειτουργούν ως δύο πηγές σε σειρά με την ίδια πολικότητα, οδηγώντας σε μια υψηλότερη τάση για τη φόρτιση του πυκνωτή C_2 μέσω της διόδου D_1 και της μπαταρίας-στόχου αντίστοιχα [3].



Εικόνα 15. DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης mosfet Q_1 κλειστό σαν ανοιχτός διακόπτης

Στην περίπτωση που το ρεύμα στο πηνίο είναι συνεχόμενο, αυτό έχει ως αποτέλεσμα:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} = \frac{1}{1 - D.C.}, V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D.C.}, I_{out} = I_{in} \times (1 - D.C.)$$

Επομένως, σε αυτή την περίπτωση, ελέγχοντας το εύρος παλμού (αλλαγές στο D.C.), είναι εφικτός ο έλεγχος της τάσης εξόδου, η οποία θα προκύψει μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. (Εξ ορισμού $D.C. < 1$). Η τοπολογία του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης επιλέχθηκε λόγω της θέσης του mosfet στο κύκλωμα, η οποία μπορεί να δώσει αυτές τις δύο καταστάσεις· στην πρώτη κατάσταση με το mosfet ON μπορούμε να έχουμε πλήρες βραχυκύκλωμα, ώστε να συλλεχθεί το σημείο του **ρεύματος βραχυκυκλώματος (I_{sc})**

19

στην καμπύλη I-V, και στη δεύτερη κατάσταση με το mosfet OFF μπορούμε να έχουμε πλήρες ανοιχτό κύκλωμα εάν η τάση του φωτοβολταϊκού είναι μικρότερη ή ίδια με της μπαταρίας, επειδή η **D1** δεν επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει εάν η τάση είναι μικρότερη από της μπαταρίας έτσι γίνεται η συλλογή του σημείου τάσης **ανοιχτού κυκλώματος (Voc)** στην καμπύλη I-V. Καθώς, πρέπει να υπάρχει η ίδια τάση με της μπαταρίας συν την τάση πόλωσης της διόδου για να υπάρξει αγωγιμότητα με την μπαταρία μέσω της **D1** για τη φόρτισή της.

Η μπαταρία πρέπει να είναι πάντα συνδεδεμένη στον μετατροπέα πριν αυτός τροφοδοτηθεί από τα φωτοβολταϊκά. Με D.C. 0% (mosfet πάντα OFF), η μπαταρία δίνει την αρχική τάση στη **D1** για να γίνει η συλλογή του **σημείου ανοιχτού κυκλώματος (Voc)** και λειτουργεί ως δυναμικό φορτίο στο σύστημα όπως φαίνεται παραπάνω· όταν το D.C. αρχίσει να αυξάνεται, η τάση επίσης αυξάνεται, οπότε το ρεύμα ρέει μέσω της **D1** και ο μετατροπέας αρχίζει να φορτίζει την μπαταρία. Επίσης, όταν η αντίσταση του φορτιστή και της μπαταρίας γίνει ίδια με του φωτοβολταϊκού (μέσω των αλλαγών του D.C.), επιτυγχάνεται το **σημείο μέγιστης ισχύος (Pmax)** στην καμπύλη I-V. Τέλος, εάν το D.C. φτάσει στο 100% (mosfet πάντα ON), επιτυγχάνεται απομόνωση από την μπαταρία όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, και με τη σειρά του επιτυγχάνεται βραχυκύκλωμα με το φωτοβολταϊκό, οπότε γίνεται η συλλογή του **ρεύματος βραχυκυκλώματος (Isc)**.

6.2. Ανάπτυξη Αυτοματοποιημένης Διάταξης Ιχνηλάτησης για την Αξιολόγηση Καινοτόμων Φ/Β Συστημάτων

Η παρούσα υποδομή αναπτύχθηκε για την υποστήριξη καινοτόμων φωτοβολταϊκών πλαισίων, με κύριο αντικείμενο τη συστηματική καταγραφή δεδομένων ηλεκτρικής παραγωγής. Το σύστημα ενσωματώνει τεχνολογία ιχνηλάτησης δύο αξόνων, επιτρέποντας τη δυναμική ρύθμιση της γωνίας κλίσης σε σχέση με το αζιμούθιο και το ζενίθ.

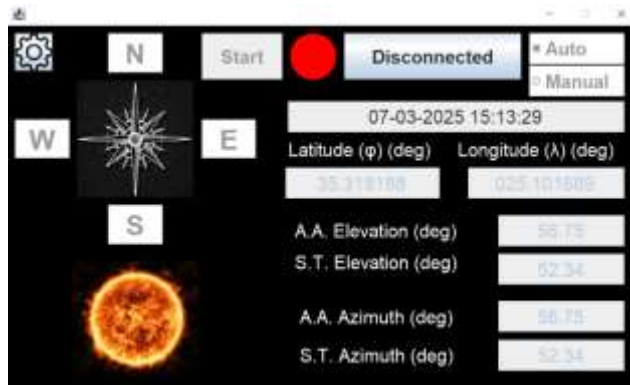
Η διαχείριση της διάταξης πραγματοποιείται μέσω ασύρματης εφαρμογής Java GUI. Ο έλεγχος βασίζεται στη συνδυαστική λειτουργία ενός Arduino Mega 2560 και ενός ESP8266, οι οποίοι επικοινωνούν μέσω πρωτοκόλλου SPI. Ο προσδιορισμός της θέσης επιτυγχάνεται με τη χρήση αισθητήρων GY-521 (επιταχυνσιόμετρα XYZ), ενώ η μηχανική κίνηση εκτελείται από δύο γραμμικούς πνευματικούς κινητήρες.

Το λογισμικό υποστηρίζει δύο καταστάσεις λειτουργίας:

1. **Αυτόματη**, όπου η ευθυγράμμιση επιτυγχάνεται μέσω αστρονομικού αλγορίθμου και ανάδρασης από τους αισθητήρες.

2. **Χειροκίνητη**, η οποία επιτρέπει στον χρήστη τον άμεσο προσανατολισμό της βάσης στα τέσσερα σημεία του ορίζοντα.

3.



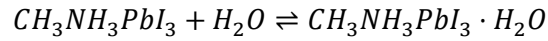
Εικόνα 16. Σύστημα στήριξης με αυτόματη ρύθμιση γωνίας κεκλιμένου επιπέδου και ιχνηλάτηση ήλιου δύο αξόνων. α) Η διεπαφή χρήστη, β) ο ιχνηλάτης σε λειτουργία, γ-δ) το ηλεκτρονικό σύστημα

7. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ

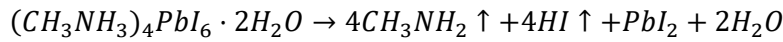
7.1. Επίδραση Υγρασίας και Οξυγόνου

Η υγρασία και το οξυγόνο αποτελούν τους δύο σημαντικότερους εξωγενείς παράγοντες που καθορίζουν τη μακροχρόνια σταθερότητα των οργανικών ανόργανων αλογονιδικών περοβσκιτών. Συστήματα όπως το MAPbI₃ παρουσιάζουν έντονη ευαισθησία σε περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς το κρυσταλλικό τους πλέγμα είναι θερμοδυναμικά οριακά σταθερό και μπορεί εύκολα να μεταπέσει σε υποβαθμισμένες φάσεις. Η αλληλεπίδραση με υδρατμούς και οξυγόνο ενεργοποιεί μια σειρά από χημικούς και φωτοχημικούς μηχανισμούς που οδηγούν σε απώλεια της φωτοηλεκτρικής απόδοσης.

Υδρόλυση και Σχηματισμός Υδριτών Η πρώτη φάση της υποβάθμισης περιλαμβάνει την απορρόφηση μορίων νερού στο πλέγμα. Το νερό σχηματίζει μονοϋδρίτες, μια διαδικασία που αρχικά μπορεί να είναι αναστρέψιμη:

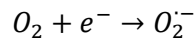


Σε συνθήκες παρατεταμένης έκθεσης, η αντίδραση εξελίσσεται προς μη αναστρέψιμη αποσύνθεση, με παραγωγή πτητικών οργανικών προϊόντων και ιωδιδίου μολύβδου:



Η απώλεια του κατιόντος MA^+ και η δημιουργία PbI_2 οδηγούν σε σημαντική μείωση της απορρόφησης και αύξηση των παγίδων επανασύνδεσης. Επιπλέον, τα πτητικά προϊόντα (CH_3NH_2 , HI) μπορούν να διαβρώσουν γειτονικά στρώματα, επιταχύνοντας την υποβάθμιση.

Παράλληλα η φωτο-οξειδωση και οι ρίζες υπεροξειδίου βοηθούν την υποβάθμιση των υλικών. Ακόμη και σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας, η παρουσία οξυγόνου σε συνδυασμό με UV φωτισμό ενεργοποιεί φωτοχημικές διεργασίες. Το οξυγόνο παγιδεύει ηλεκτρόνια από το υλικό, σχηματίζοντας ρίζες υπεροξειδίου:



Οι ρίζες αυτές επιτίθενται στο κατιόν MA^+ , προκαλώντας αποπρωτονίωση και διάσπαση των οργανικών δεσμών. Το αποτέλεσμα είναι η σταδιακή κατάρρευση της περοβσκίτικής δομής, ακόμη και χωρίς την παρουσία υγρασίας. Η διαδικασία είναι αυτοενισχυόμενη: η μερική αποδόμηση αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα, διευκολύνοντας τη δημιουργία νέων ριζών και επιταχύνοντας την υποβάθμιση.

7.2. Θερμική και Μηχανική Καταπόνηση

Οι θερμικές διακυμάνσεις που προκύπτουν από τον ημερήσιο κύκλο ή από πρωτόκολλα επιταχυνόμενης γήρανσης (ISOS T) προκαλούν σημαντική μηχανική κόπωση στα υλικά της συσκευής. Η ετερογένεια των στρωμάτων (περοβσκίτης, ETL, HTL, TCO, υπόστρωμα) οδηγεί σε διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής, δημιουργώντας έντονες μηχανικές τάσεις.

Ασυμφωνία Θερμικής Διαστολής (CTE Mismatch) Οι περοβσκίτες εμφανίζουν υψηλό συντελεστή θερμικής διαστολής:

$$CTE_{\text{perovskite}} \approx 50 \times 10^{-6} K^{-1}$$

ενώ τα υποστρώματα γυαλιού και τα αγώγιμα οξειδία (TCOs) έχουν πολύ χαμηλότερο:

$$CTE_{\text{glass/TCO}} \approx 9 \times 10^{-6} K^{-1}$$

Η διαφορά αυτή οδηγεί σε ανάπτυξη διατμητικών τάσεων κατά τη θέρμανση και ψύξη. Με την πάροδο του χρόνου, οι τάσεις αυτές συσσωρεύονται και προκαλούν μηχανικές αστοχίες.

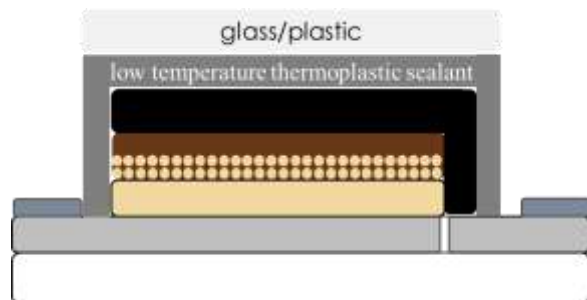
Μια μηχανική αστοχία αποτελεί η αποσυναρμολόγηση (Delamination) και η αποκόλληση στρωμάτων. Η επαναλαμβανόμενη θερμική φόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε αποκόλληση των στρωμάτων μεταφοράς φορτίου (HTL/ETL) από τον περοβσκίτη. Η αποκόλληση αυξάνει την αντίσταση επαφής, μειώνει την ομοιομορφία της ροής φορτίων και οδηγεί σε τοπικές περιοχές υπερθέρμανσης, επιταχύνοντας την υποβάθμιση.

Τέλος μικρο-σπασίματα (Micro cracking) και άλλοι δευτερογενείς παράγοντες χημικής υποβάθμισης οδηγούν σε συνολική υποβάθμιση το Φ/Β στοιχείο. Οι μικρο ρωγμές που σχηματίζονται λόγω μηχανικής κόπωσης λειτουργούν ως κανάλια εισόδου υγρασίας και οξυγόνου. Η παρουσία τους αυξάνει την επιφάνεια έκθεσης σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, δημιουργεί τοπικές συγκεντρώσεις ηλεκτρικού πεδίου και επιταχύνει την υδρόλυση και τη φωτο-οξείδωση.

7.2. Ανάπτυξη πειραματικών μοντέλων ενθυλάκωσης

Στο πλαίσιο της ΥΕ4.1 με τίτλο «Έλεγχος σταθερότητας Φ/Β όλων των κατηγοριών μέσω διεθνών πρωτοκόλλων σε ελεγχόμενες εσωτερικές συνθήκες (ISOS και IEC)», εξετάστηκε εκτενώς η διεργασία της ενθυλάκωσης των περοβσκιτικών ηλιακών στοιχείων που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της ΕΕ2 για την μείωση της περιβαλλοντικής υποβάθμισης που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η ενθυλάκωση θεωρείται κρίσιμη διεργασία για την προστασία των ενεργών υλικών από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως υγρασία και οξυγόνο, και για την αξιολόγηση της μακροχρόνιας σταθερότητας των διατάξεων υπό ρεαλιστικές ή επιταχυνόμενες συνθήκες.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην εφαρμογή του υλικού ethylene-vinyl acetate (EVA), ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου θερμοπλαστικού στεγανού. Η διαδικασία ενθυλάκωσης με EVA πραγματοποιήθηκε με τη χρήση θερμοπρέσας, σε θερμοκρασία 120°C και υπό πίεση 1 bar. Αξιολογήθηκε η επίδραση αυτής της διεργασίας στην ηλεκτρική απόδοση των ηλιακών στοιχείων, με στόχο την ελαχιστοποίηση της απώλειας απόδοσης κατά την ενθυλάκωση. Η **Εικόνα 17** παρουσιάζει μια σχηματική αναπαράσταση της διάταξης μετά την εφαρμογή του EVA.



Εικόνα 17 Σχηματική αναπαράσταση ενός ηλιακού στοιχείου μετά την ενθυλάκωσή του με EVA.

Παράλληλα, στο πλαίσιο της ίδιας υποενότητας, το Πα.Πελ. προχώρησε στην περαιτέρω διερεύνηση της σταθερότητας των περοβσκιτικών φωτοβολταϊκών διατάξεων που ενσωματώνουν ηλεκτρόδιο άνθρακα χαμηλής θερμοκρασίας κατεργασίας. Συγκεκριμένα, βελτιστοποιήθηκε η διαδικασία ενθυλάκωσης των ηλιακών μονάδων που είχαν αναπτυχθεί στο πλαίσιο της ΕΕ3 και πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της λειτουργικής τους σταθερότητας μέσω εφαρμογής πρωτοκόλλων επιταχυνόμενης γήρανσης του International Summit on Organic Photovoltaic Stability (ISOS). Οι δοκιμές περιλάμβαναν ισοθερμική γήρανση (isothermal ageing), κυκλική θερμική καταπόνηση (thermal shock cycling), καθώς και μακροχρόνια έκθεση σε συνεχή ακτινοβολία (light soaking), σύμφωνα με τις προδιαγραφές των σχετικών πρωτοκόλλων (βλ. Πίνακα της εικόνας 18).

Πριν από κάθε δοκιμή γήρανσης, οι συσκευές σφραγίστηκαν ερμητικά υπό συνθήκες περιβάλλοντος. Σε αυτή την περίπτωση, το στεγανό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ethylene-vinyl acetate (EVA).

Πειράματα γήρανσης φωτοβολταϊκών	Κωδική ονομασία πρωτοκόλλου	Συνθήκες γήρανσης σύμφωνα με τα πρωτόκολλα	Συνθήκες γήρανσης που εφαρμόστηκαν στην παρούσα μελέτη
Isothermal at a high temperature	ISOS-D-2	65/85°C	85°C
Isothermal at a low temperature	–	–	-25°C
Thermal shock cycling	ISOS-T-1	RT to 65/85°C	RT to 65°C
		Ambient temperature (23±4°C)	Ambient temperature (25±5°C)
Light soaking	ISOS-L-1	Ambient humidity	Ambient humidity
		Light only	
		MPP or OC	

			Light only (LED solar simulator)
			OC
		65/85°C	85°C
		Ambient humidity	Ambient humidity
Light soaking	ISOS-L-2	Light & temperature Solar simulator	Light & temperature Solar simulator
		MPP or OC	OC

Εικόνα 18. Πειράματα σταθερότητας σε ηλιακές μονάδες περοβσκήτη.

Σε επόμενο στάδιο, διευρύνθηκε η μελέτη με την ενσωμάτωση και άλλων τύπων στεγανών, τόσο θερμοπλαστικών όσο και φωτοπολυμεριζόμενων. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν στεγανά όπως Surlyn, PEO, όπου σε αυτή την περίπτωση, η ενθυλάκωση των ηλιακών στοιχείων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση θερμοπρέσας, σε θερμοκρασία ενθυλάκωσης τους 120°C. Ακόμα αξιολογήθηκαν και ρητίνες ακρυλικής φύσης οι οποίες πολυμερίστηκαν υπό UV ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα ο πολυμερισμός πραγματοποιήθηκε με τη χρήση φωτός από λάμπες εκπομπής τόσο στα 365 nm όσο και στα 405 nm, ανάλογα με τον τύπο της ρητίνης. Όλα τα υλικά εφαρμόστηκαν σε ηλιακές κυψελίδες τύπου LT-CPSC, με στρώμα μεταφοράς ηλεκτρονίων από μεσοπορώδες TiO₂ και ηλεκτρόδιο άνθρακα χαμηλής θερμοκρασίας.

Στο πλαίσιο της **ΥΕ 4.3** με τίτλο «**Πρωτόκολλα βελτίωσης λειτουργίας και σταθερότητας**» τα περοβσκήτικα ηλιακά στοιχεία που ενσωματώνουν το ηλεκτρόδιο άνθρακα υψηλής θερμοκρασίας κατεργασίας, το Πα.Πελ. προχώρησε στην τροποποίηση της επιφάνειας των ολοκληρωμένων ηλιακών κυψελίδων με πολυμερή με στόχο α) την παθητικοποίηση της διεπιφάνειας περοβσκήτη/C και β) την ταυτόχρονη προστασία από περιβαλλοντικούς παράγοντες (εισχώρηση υγρασίας και οξυγόνου που αποδομούν σταδιακά τον περοβσκήτη) μη επιθυλακωμένων (unencapsulated) διατάξεων, με σκοπό την αύξηση της σταθερότητάς τους, αρχικά σε συνθήκες αποθήκευσης σκότους, όπως ορίζονται από το πρωτόκολλο ISOS-D-1. Προς την κατεύθυνση αυτή έγινε διερεύνηση των πολυμερών polymethylmethacrylate (PMMA) και polyvinylpyrrolidone (PVP), τα οποία εισήχθησαν στις κυψελίδες μέσω επικάλυψης ενός λεπτού στρώματος του πολυμερούς με τη μέθοδο drop casting μικρής ποσότητας διαλύματος του πολυμερούς σε εύρος συγκεντρώσεων, σε κατάλληλο οργανικό διαλύτη.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τις ενθυλακωμένες διατάξεις με χρήση του θερμοπλαστικού στεγανού EVA. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των διατάξεων μετά την ενθυλάκωση παρουσιάζονται στον πίνακα της εικόνας 19.

Solar cell type	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (-)	PCE (%)	PCE loss (%)
1	22.3	895	0.54	10.78	5
2	23.6	912	0.64	13.77	3
3	23.0	946	0.63	13.71	8
4	23.0	903	0.59	12.25	20
5	23.8	899	0.60	12.84	12
6	23.3	788	0.55	10.10	26

Εικόνα 19. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά περοβσκιτικών κυψελίδων μετά την ενθυλάκωση με EVA.

Βάσει των αποτελεσμάτων, διαπιστώνεται ότι η διαδικασία ενθυλάκωσης με EVA έχει ήπια έως μέτρια επίδραση στην ηλεκτρική απόδοση των ηλιακών κυψελίδων. Οι τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης παραμένουν υψηλές, γεγονός που υποδηλώνει ότι η συλλογή φορέων δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη διεργασία. Αντίστοιχα, μικρές μειώσεις παρατηρούνται στην τάση ανοιχτού κυκλώματος και στον παράγοντα πλήρωσης. Το ποσοστό υποβάθμισης της απόδοσης κυμαίνεται κυρίως από 3% έως 12%, με εξαίρεση μία διάταξη που εμφάνισε απώλεια 26%, πιθανώς ατελούς εφαρμογής του στεγανού. Συνολικά, η χρήση του EVA αναδεικνύεται ως μία κατάλληλη λύση για την ενθυλάκωση, προσφέροντας προστασία με αποδεκτή επίδραση στην αποδοτικότητα των διατάξεων.

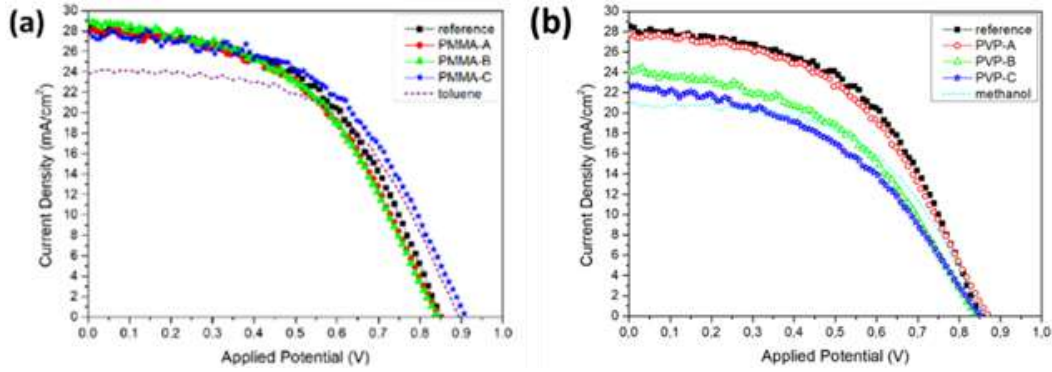
Στο επόμενο στάδιο της μελέτης, διερευνήθηκε η επίδραση διαφόρων επιπλέον στεγανοποιητικών υλικών στην απόδοση των περοβσκιτικών ηλιακών διατάξεων, με στόχο τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας ενθυλάκωσης. Συγκεκριμένα, αξιολογήθηκαν θερμοπλαστικά στεγανά όπως τα Surlyn και PEO, καθώς και φωτοπολυμεριζόμενες ακρυλικές ρητίνες. Τα υλικά εφαρμόστηκαν με αντίστοιχες τεχνικές και οι επιδόσεις των ηλιακών στοιχείων συγκρίθηκαν πριν και μετά την ενθυλάκωση. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα της εικόνας 19.

Solar cell type	Sealant	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (-)	PCE (%)	PCE loss (%)
1	Surlyn	24	965	0.62	14.35	5
		23.1	952	0.62	13.63	
2	EVA	24.3	986	0.63	15.09	11
		22.8	946	0.62	13.37	
3	PEO	24.2	978	0.63	14.91	5
		23.8	965	0.62	14.23	
4	3035B, ThreeBond	23.8	956	0.62	14.10	92
		21	205	0.25	1.08	
5	AB-341, Eversolar	24.2	978	0.64	15.15	0
		24	975	0.65	15.21	

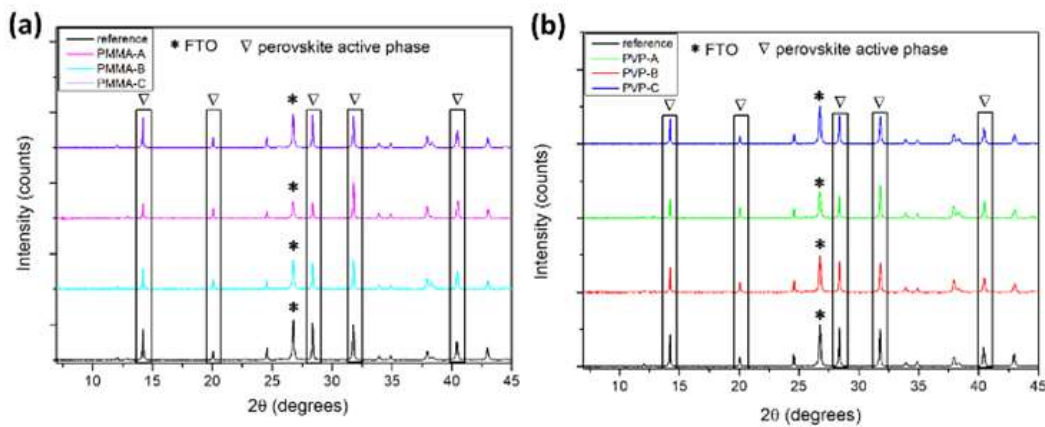
Εικόνα 20. Πίνακας με ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ηλιακών στοιχείων πριν και μετά την ενθυλάκωσή τους.

Όπως φαίνεται από τον πίνακα της εικόνας 20, τα ηλιακά στοιχεία παρουσιάζουν μικρή υποβάθμιση της απόδοσής τους μετά τη διαδικασία ενθυλάκωσης, η οποία κυμαίνεται κάτω από 12% στην περίπτωση των θερμοπλαστικών στεγανών, ενώ δεν παρουσιάστηκε υποβάθμιση της απόδοσής τους στην περίπτωση της χρήσης της φωτο-πολυμεριζώμενης ρητίνης AB-341, Eversolar.

Στο πλαίσιο της **ΥΕ 4.3** με τίτλο «**Πρωτόκολλα βελτίωσης λειτουργίας και σταθερότητας**» τα περοβσκιτικά ηλιακά στοιχεία που ενσωματώνουν το ηλεκτρόδιο άνθρακα υψηλής θερμοκρασίας κατεργασίας και τα πολυμερή, παρουσίασαν χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος – τάσης παρουσιάζονται στην **Εικόνα 20**. Όπως φαίνεται, αμφότερα τα πολυμερή έχουν την ικανότητα να τροποποιούν την επιφάνεια των στοιχείων χωρίς να επιφέρουν αλλοίωση των χαρακτηριστικών του υποκείμενου υμενίου περοβσκιτή, όπως αυτό επιβεβαιώθηκε από μετρήσεις φασματοσκοπίας περίθλασης ακτίνων Χ (**Εικόνα 21**) επιπλέον των μετρήσεων των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών.

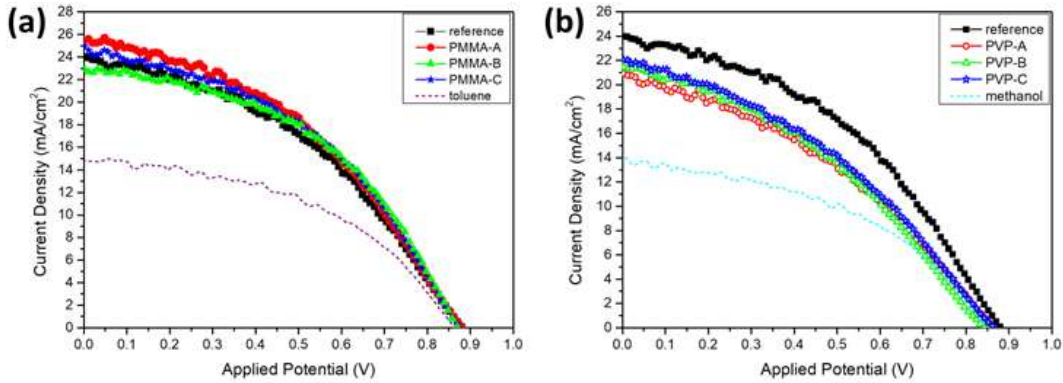


Εικόνα 21. Χαρακτηριστικά διαγράμματα φωτοτάσης-πυκνότητας φωτορεύματος για τις ηλιακές κυψελίδες στις οποίες εφαρμόστηκαν οι επιστρώσεις με α) PMMA και β) PVP.



Εικόνα 22. Φάσμα περίθλασης ακτίνων Χ υμενίων που τροποποιήθηκαν α) με το πολυμερές PMMA σε διάφορες συγκεντρώσεις και β) το πολυμερές PVP σε διάφορες συγκεντρώσεις.

Αναφορικά με τη μελέτη σταθερότητας, το πολυμερές PMMA κατάφερε να ενισχύσει την σταθερότητα των ηλιακών κυψελίδων απέναντι σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως ορίζεται από το πρωτόκολλο ISOS-D1 (RT 20-25°C και RH 25-35%). Οι κυψελίδες που τροποποιήθηκαν με το PMMA διατήρησαν την απόδοση μετατροπής ισχύος κατά 80% έπειτα από 32 ημέρες αποθήκευσης σε συνθήκες περιβάλλοντος (**Εικόνα 22**). Αντίθετα, οι κυψελίδες που τροποποιήθηκαν με το πολυμερές PVP παρουσίασαν μειωμένη σταθερότητα, το οποίο αποδίδεται στην υδροφιλικότητα του εν λόγω πολυμερούς, το οποίο εν τέλει κρίθηκε ακατάλληλο για την εφαρμογή του ως υλικό τροποποίησης.



Εικόνα 23. Χαρακτηριστικά διαγράμματα φωτοτάσης-πυκνότητας φωτορεύματος για τις ηλιακές κυψελίδες στις οποίες εφαρμόστηκαν οι επιστρώσεις με τα δύο πολυμερή, 32 ημέρες μετά την κατασκευή και αποθήκευσή τους σε μη ελεγχόμενες συνθήκες περιβάλλοντος.

8. ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η πειραματική διαδικασία στο ΕΛΜΕΠΑ ακολουθεί μια αυστηρά καθορισμένη αλληλουχία μετρήσεων για κάθε νέο δείγμα (κυψελίδα ή module) τρίτης γενιάς, διασφαλίζοντας την ιχνηλασιμότητα και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

8.1 Διαδικασία Εσωτερικών Μετρήσεων (Indoor Protocol)

1. **Οπτική Επιθεώρηση (Visual Inspection):** Φωτογράφιση υψηλής ανάλυσης των φρέσκων δειγμάτων για την καταγραφή της αρχικής μορφολογίας και τον εντοπισμό τυχόν ελαττωμάτων κατά την κατασκευή ή τη μεταφορά.
2. **Χαρτογράφηση LBIC (Ultrafast Laser Beam Induced Current):** Χρήση του συστήματος Infinity PV LBIC (405nm) για την αξιολόγηση της ομοιομορφίας παραγωγής φωτορεύματος. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό "νεκρών" ζωνών και shunts πριν και μετά την καταπόνηση. Σημειώνεται ότι το μήκος κύματος του laser πρέπει να ευθυγραμμίζεται με το φάσμα απορρόφησης του ενεργού υλικού.
3. Μέτρηση EQE/IPCE: Καταγραφή της εξωτερικής κβαντικής απόδοσης στο εύρος 300nm έως 1000nm με βήμα 10nm. Η ολοκλήρωση του φάσματος EQE χρησιμοποιείται για την επαλήθευση της πυκνότητας ρεύματος βραχυκυκλώματος (J_{sc}) υπό το πρότυπο φάσμα AM1.5G.

4. **Χαρακτηρισμός I-V** : Λήψη καμπυλών υπό διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας (200 έως 1000 W/m²) και κατευθύνσεις σάρωσης (Forward/Reverse) για τον προσδιορισμό του δείκτη υστέρησης (HI).
5. **Προσδιορισμός Θερμοκρασιακών Συντελεστών** : Μέτρηση της απόδοσης σε εύρος θερμοκρασιών από 15°C έως 55°C. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό των θεμελιωδών απωλειών και την εξέταση των μεταβολών του bandgap με τη θερμοκρασία.

Πρωτόκολλο Εσωτερικών Μετρήσεων (Indoor Protocol)



Εικόνα 24. Πρωτόκολλο εσωτερικών μετρήσεων

Προκαταρκτικές μετρήσεις σε δείγματα τρίτης γενιάς έδειξαν φάσμα απορρόφησης μεταξύ 550nm και 1000nm, με μέγιστη κβαντική απόδοση (Quantum Efficiency) στα 850nm (περίπου 76.5%). Η τιμή SR (Spectral Response) στο μέγιστο ανήλθε σε 0.525 A/W, επιβεβαιώνοντας την υψηλή ευαισθησία στο εγγύς υπέρυθρο (NIR).

8.2 Ανάλυση EQE και Φασματικής Απόκρισης

Προκαταρκτικές μετρήσεις σε δείγματα τρίτης γενιάς έδειξαν φάσμα απορρόφησης μεταξύ 550nm και 1000nm, με μέγιστη κβαντική απόδοση (Quantum Efficiency) στα 850nm (περίπου 76.5%). Η τιμή SR (Spectral Response) στο μέγιστο ανήλθε σε 0.525 A/W, επιβεβαιώνοντας την υψηλή ευαισθησία στο εγγύς υπέρυθρο (NIR).

8.3 Διαδικασία Υπαίθριων Μετρήσεων (Outdoor Protocol)

- **Τοποθέτηση (Placement)**: Τα δείγματα τοποθετούνται σε ειδικά σχεδιασμένες ξύλινες ή αλουμινένιες βάσεις με κλίση 29° στο Open-Air Lab του ΕΛΜΕΠΑ.

- **Συνεχής Παρακολούθηση:** Καταγραφή καμπυλών I-V ανά λεπτό και συνεχής ιχνηλάτηση MPPT. Χρησιμοποιούνται αισθητήρες Pt100 RTD (4-wire Kelvin) προσαρτημένοι στην οπίσθια πλευρά της διάταξης για την ακριβή μέτρηση της θερμοκρασίας του module (T_{mod}).
- **Συσχέτιση Δεδομένων:** Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά συσχετίζονται σε πραγματικό χρόνο με τις περιβαλλοντικές μεταβλητές (ακτινοβολία G , T_{amb} , υγρασία RH, ταχύτητα ανέμου W_s) που καταγράφονται από τον μετεωρολογικό σταθμό.

Πρωτόκολλο Υπαίθριων Μετρήσεων (Outdoor Protocol)



Εικόνα 25. Πρωτόκολλο εξωτερικών μετρήσεων

8.4 Ημερήσια Απόδοση (Diurnal Performance) και Σκέδαση Rayleigh

Κατά τη διάρκεια των υπαίθριων δοκιμών (ISOS-O-2), παρατηρήθηκε μια ενδιαφέρουσα διαφοροποίηση μεταξύ των πρωινών και απογευματινών μετρήσεων για το ίδιο επίπεδο ακτινοβολίας:

- **Rayleigh Scattering:** Η ανώτερη απόδοση κατά την απογευματινή συνεδρία αποδίδεται στη μετατόπιση του ηλιακού φάσματος προς το ερυθρό και το NIR τμήμα (λόγω μεγαλύτερης διαδρομής Air Mass).
- **Spectral Mismatch:** Επειδή οι εξεταζόμενες κυψελίδες απορροφούν ισχυρά στα 850nm, η αύξηση της NIR συνιστώσας το απόγευμα οδηγεί σε υψηλότερο I_{sc} σε σύγκριση με το πρωί υπό την ίδια ολική ακτινοβολία.

8.5 Φαινόμενο Thermal Lag

Η ανάλυση PR (Performance Ratio) αποκάλυψε μια υστέρηση (Thermal Lag) περίπου 60 λεπτών μεταξύ της μέγιστης ακτινοβολίας και της μέγιστης θερμοκρασίας του πάνελ. Για την αποφυγή σφαλμάτων στην αξιολόγηση Bankability, είναι απαραίτητη η χρήση της στιγμιαίας T_{mod} για όλες τις διορθώσεις.





9. ΜΗΧΑΝΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΗΣ (FAILURE ANALYSIS)

9.1 Μονοπάτια Υγρασίας και Οξυγόνου

Η σταθερότητα των διατάξεων δεν είναι μόνο ποσοτική αλλά και διαγνωστική διαδικασία. Το νερό διεισδύει στο πλέγμα του περοβσκίτη, προκαλώντας υδρόλυση των οργανικών κατιόντων (π.χ. MA⁺) και σχηματισμό PbI₂. Η παρουσία οξυγόνου και UV φως μετατρέπει το O₂ σε εξαιρετικά αντιδραστικές ρίζες υπεροξειδίου (O₂⁻), οι οποίες επιτίθενται στη δομή. Στους περοβσκίτες κασσιτέρου (Sn-PSCs), ο μηχανισμός είναι κυκλικός: η οξείδωση του Sn²⁺ σε Sn⁴⁺ δημιουργεί SnI₄, το οποίο υδρολύεται παράγοντας HI, το οποίο με τη σειρά του οξειδώνεται παράγοντας I₂, επιτιθέμενο εκ νέου στο υλικό.

9.2 Πίνακας: Διάγνωση Αστοχιών στο Πεδίο (Failure Matrix)

Σύμπτωμα	Πιθανή Διάγνωση	Μηχανισμός Αστοχίας	Τεχνική Επαλήθευσης
Πτώση J _{sc}	Edge Bleaching	Εισχώρηση υγρασίας / Αποσύνθεση σε PbI ₂	Visual / UV-Vis Mapping
Αύξηση R _s	Grid Corrosion	Αντίδραση αλογόνων-Ag (Insulating Ag-halides)	EIS / XRD analysis
Πτώση V _{oc}	Phase Segregation	Hoke Effect (Iodide/Bromide domains)	EL / PL Spectroscopy
Πτώση FF	Delamination	Θερμική κόπωση / Αποκόλληση διεπαφών	Acoustic Imaging

Symptom	Diagnosis		Cause
Πτώση Jsc	Edge Bleaching		Εισχώρηση υγρασίας / PbI ₂
Αύξηση Rs	Grid Corrosion		Αντίδραση αλογόνων με άργυρο (Ag)
Πτώση Voc	Phase Segregation		Hoke Effect (διαχωρισμός I/Br)
Πτώση FF	Delamination		Θερμική κόπωση διεπαφών

Εικόνα 26. Διάγνωση Αστοχιών στο Πεδίο

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ

Το παρόν παραδοτέο συγκεντρώνει σε ενιαία μορφή όλες τις κρίσιμες παραμέτρους που απαιτούνται για την ακριβή, αναπαραγώγιμη και διεθνώς συγκρίσιμη αξιολόγηση φωτοβολταϊκών τεχνολογιών τρίτης γενιάς. Η δομή ακολουθεί τα επικαιροποιημένα πρότυπα ISOS-2020, IEC, NIST και PACT καθώς και τις βέλτιστες πρακτικές που αναπτύχθηκαν στο έργο 3GPV-4INDUSTRY. Το πρωτόκολλο καλύπτει τον ορισμό

της ενεργής περιοχής, τις παραμέτρους σάρωσης I-V, τις διαδικασίες σταθεροποίησης, τον θερμικό έλεγχο, τις απαιτήσεις υλικού, την ακεραιότητα δεδομένων, τα πρωτόκολλα ISOS για εργαστηριακές και εξωτερικές δοκιμές, τους δείκτες σταθερότητας (T_{80} , TS_{80} , Energy Yield), καθώς και την επιλογή αλγορίθμων MPPT για υλικά με υστέρηση. Η ενότητα αυτή λειτουργεί ως πλήρες πλαίσιο τεκμηρίωσης για εργαστηριακή έρευνα, βιομηχανική αξιολόγηση και μετα-ανάλυση δεδομένων.

10.1 Πρωτόκολλο Μετρήσεων — Master Parameter Table

Η ακριβής μέτρηση φωτοβολταϊκών τρίτης γενιάς απαιτεί αυστηρή τυποποίηση όλων των παραμέτρων. Για υλικά με υψηλή υστέρηση, ο χρόνος σταθεροποίησης (dwell time) μπορεί να χρειαστεί να υπερβεί τα 1500 ms, ώστε να επιτραπεί η πλήρης ιοντική ανακατανομή. Παρακάτω αναφέρονται η κατηγορία του ελέγχου που προτείνεται, οι παράμετροι που παίζουν σημαντικό ρόλο, το πρότυπο / πρωτόκολλο βάσει του οποίου προτείνονται καθώς και η βέλτιστη τιμή που προτείνεται για τις τεχνολογίες Φ/Β 3^{ης} γενιάς.

Κατηγορία	Παράμετρος	Πρότυπο / Πρωτόκολλο	Βέλτιστη Τιμή / Απαίτηση
Έλεγχος Επιφάνειας	Ορισμός ενεργής περιοχής	Almora Consensus	Μαύρη μεταλλική μάσκα
	Επαλήθευση	NIST Handbook	Stylus Profilometry / Laser Mapping
Σάρωση I-V	Ανοχή σφάλματος	ISOS-2020	
	Ταχύτητα σάρωσης	ISOS-L-3, ISOS-O-2	10–50 mV/s
	Dwell time	ISOS Consensus	1000–1500 ms
Σταθεροποίηση	Κατεύθυνση	ISOS-2020	Forward & Reverse
	Light soaking	ISOS-P	2–12 ώρες (AM1.5G)
	Προ-πόλωση	PACT	MPP holding >300 s
Θερμικός Έλεγχος	Κριτήριο	IEC 61215-2	$\Delta P < 0.1\%/min$
	Θερμοκρασία STC	IEC 60904-3	$25 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$
	Accelerated Temp	IR Thermography	20–55 $^\circ\text{C}$
Υλικό	Αισθητήρας	IEC 60751	RTD Pt100 Class A
	ADC Resolution	HMU Design	16-bit (V/I), 24-bit (T)
	Τοπολογία μέτρησης	Kelvin	4-wire Force/Sense
Ακεραιότητα Δεδομένων	MPPT Sampling	ISOS-L-3, ISOS-O-2	
	Metadata	FAIR	Scan rate, dwell, T, RH
	Raw data	ELMEPA SOP	SHA-256 hashing

Εικόνα 27. Πίνακας Κύριων Παραμέτρων

Τέλος παρακάτω καταγράφονται τα όργανα και ο εξοπλισμός που προτείνεται να χρησιμοποιηθεί για την καταγραφή μετεωρολογικών δεδομένων.

Όργανο	Έλεγχος	Όριο	Αποτέλεσμα	Ιχνηλασιμότητα
MS-711N EKO	Wavelength	±0.5 nm	0.2 nm	EKO / NIST
Newport Simulator	Uniformity		1.8%	NIST
Reference Cell	Isc Verify	±1%	±0.4%	NIST

Εικόνα 28. Καταγραφή Βαθμονόμησης Οργάνων ΕΛΜΕΠΑ (Calibration Log)

11. 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.
7. **D. Almora et al.**, "Standardization of Characterization and Reporting for Perovskite Photovoltaics," *Advanced Energy Materials*, vol. 11, no. 1, 2021.
8. 3, pp. 296–298, Aug. 1995, doi: 10.1109/13.406510.
9. **Z. Yu, A. Mohammed, and I. Panahi**, "A review of three PWM techniques," in *Proceedings of the 1997 American Control Conference (Cat. No.97CH36041)*, Albuquerque, NM, USA: IEEE, 1997, pp. 257–261 vol.1. doi: 10.1109/ACC.1997.611797.
10. **E. Rogers**, "Understanding Boost Power Stages in Switchmode Power Supplies".
11. **Y. Wu et al.**, "On the Origin of Hysteresis in Perovskite Solar Cells," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 26, no. 37, pp. 6807–6813, Oct. 2016, doi: 10.1002/adfm.201602231.
12. **M. Ahmed Ebrahim and R. G. Mohamed**, "Comparative Study and Simulation of Different Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Using Fractional Control and Grey Wolf Optimizer for Grid Connected PV System with Battery," in *Electric Power Conversion*, M. Găiceanu, Ed., IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.82302.