



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη Αλγορίθμων Εντοπισμού Σφαλμάτων σε Φωτοβολταϊκά
Συστήματα**

Παναγιώτης Κληρονόμος
A.M. 71151128

Εισηγητής: Στυλιανός Βουτσινάς

(Κενό φύλλο)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη Αλγορίθμων Εντοπισμού Σφαλμάτων σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα

**Παναγιώτης Κληρονόμος
Α.Μ. 711151128**

Εισηγητής: Στυλιανός Βουτσινάς

Εξεταστική Επιτροπή:

Στυλιανός Βουτσινάς	
Ιωάννης Βογιατζής	
Σταύρος Φατούρος	

Ημερομηνία εξέτασης : 15/03/2024

(Κενό φύλλο)

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παναγιώτης Κληρονόμος του Θεοδώρου, με αριθμό μητρώου 711151128 φοιτητής του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 0 μήνες και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο Δηλών

Παναγιώτης Κληρονόμος



(Κενό φύλλο)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες, σε ένα ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο, όπως αυτό των αλγορίθμων εντοπισμού σφαλμάτων σε φωτοβολταϊκά Συστήματα. Την προσπάθειά μου αυτή υποστήριξε ο επιβλέπων καθηγητής μου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω. Ευχαριστώ επίσης θερμά όλους τους καθηγητές και συμφοιτητές με τους οποίους συνεργάστηκα. Επίσης, εκφράζω βαθιά ευγνωμοσύνη στους γονείς μου για την αμέριστη στήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

(Κενό φύλλο)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή έχει σκοπό τη μελέτη αλγορίθμων εντοπισμού σφαλμάτων σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Πιο συγκεκριμένα, αναζητήθηκε σύγχρονη διεθνή βιβλιογραφία στις βάσεις δεδομένων Google Scholar και Science Direct. Οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: αλγόριθμοι, εντοπισμός σφαλμάτων, φωτοβολταϊκά συστήματα. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποκλείστηκαν μελέτες οι οποίες αφορούσαν σε εντοπισμό σφαλμάτων σε φωτοβολταϊκά συστήματα χωρίς όμως να αναφέρονται συγκεκριμένοι αλγόριθμοι

Από την παρούσα μελέτη διαπιστώθηκε ότι ορισμένες προσεγγίσεις απαιτούν επιπλέον κυκλώματα και εξοπλισμό για την αποτελεσματική τους λειτουργία, ενώ άλλες απαιτούν σημαντική ποσότητα εισαγόμενων δεδομένων για τη δημιουργία ενός μοντέλου εργασίας, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για πραγματικές μετρήσεις. Συνεπώς, το κόστος επένδυσης για την υλοποίηση αυτών των μεθόδων σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να ποικίλλει, ανάλογα με τους κατάλληλους αισθητήρες, τα εξωτερικά κυκλώματα και την απαραίτητη επεξεργαστική ισχύ.

Βάσει των τεσσάρων κριτηρίων που έχουν τεθεί, καθώς και των διαθέσιμων δεδομένων, οι μέθοδοι που βασίζονται σε καμπύλες I-V και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν Μηχανική Μάθηση φαίνεται να είναι σε θέση να ανιχνεύσουν περισσότερα είδη βλαβών. Αντίθετα, οι υπόλοιπες μέθοδοι της διεθνούς βιβλιογραφίας φαίνεται να είναι περιορισμένες στην ανίχνευση μόνο ενός τύπου σφάλματος. Επιπλέον, η χρήση μεθόδων όπως η Earth Capacitance Measurement (ECM) για να υπολογιστεί η θέση ενός ελαττωματικού στοιχείου απαιτεί το φωτοβολταϊκό σύστημα να είναι εκτός λειτουργίας, γεγονός που μπορεί να αντικατασταθεί από άλλες μεθόδους που προορίζονται για πραγματικό χρόνο. Όσον αφορά το κόστος, οι μέθοδοι είναι υψηλού κόστους, καθώς απαιτούν θερμικές κάμερες και άλλον εξοπλισμό, καθώς και λογισμικό για την επεξεργασία εικόνας. Το κόστος των υπολοίπων μεθόδων θεωρείται χαμηλό έως μέτριο, ανάλογα με τη μέθοδο και τις απαιτήσεις της.

Λέξεις κλειδιά: αλγόριθμοι, εντοπισμός σφαλμάτων, φωτοβολταϊκά συστήματα.

ABSTRACT

This thesis aims to study fault detection algorithms in photovoltaic systems. The study was carried out using the bibliographic review method. More specifically, contemporary international literature was searched in the Google Scholar and Science Direct databases. The keywords used were algorithms, debugging, photovoltaic systems. From the obtained results, studies were excluded that referred to fault detection in photovoltaic systems but without mentioning specific algorithms.

The present study found that some approaches require additional circuitry and equipment to operate effectively, while others require a significant amount of input data to create a working model, which will be used as a reference for actual measurements. Therefore, the investment cost of implementing these methods in a PV system can vary, depending on the appropriate sensors, external circuits, and necessary processing power.

Based on the four criteria set, as well as the available data, methods based on I-V curves and methods using Machine Learning appear to be able to detect more types of damage. In contrast, the rest of the methods in international literature seem to be limited to detecting only one type of error. In addition, using methods such as Earth Capacitance Measurement (ECM) to calculate the location of a faulty element requires the PV system to be out of service, which can be replaced by other real-time methods. In terms of cost, the methods are expensive, as they require thermal cameras and other equipment, as well as software for image processing. The cost of the remaining methods is considered low to moderate, depending on the method and its requirements.

Keywords: algorithms, debugging, photovoltaic systems.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	16
1.1 Συνοπτική Επισκόπηση	16
1.2. Σκοπός της Διπλωματικής	16
1.3. Ανάγκη για τον Εντοπισμό Σφαλμάτων σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα... 16	
1.4. Περιγραφή του Προβλήματος.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	18
2.1. Φωτοβολταϊκή κυψέλη	18
2.2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	20
2.3. Συγκριτική ανάλυση μεταξύ Μοντέλου Μονής Διόδου και Διπλών Διόδων Φ/Β κυψέλης	20
2.3.1. Μοντέλα μίας διόδου και διπλής διόδου	21
2.4. Αποδοτικότητα	24
2.5. Προσομοίωση και Παρατήρηση	26
2.5.1. Ακτινοβολία	26
2.6. Θερμοκρασία	29
2.7. Αντίσταση διακλάδωσης (R_p : Shunt Resistance)	33
2.8. Αντίσταση σειράς (R_s : Series Resistance).....	37
2.9. Αριθμός συνδεδεμένων κυψελών σε σειρά (N_s : Number of Series Connected Cells)	37
2.10 Παράλληλα συνδεδεμένα κελιά (N_p : Parallel Connected Cells)	43
2.11 Συντελεστής Ιδεατότητας Διόδου	47
2.12 Σύγκριση μίας διόδου και διπλής διόδου.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Τεχνικές εντοπισμού και αναγνώρισης ελαττωμάτων φωτοβολταϊκών συστημάτων	51

3.1. Τύποι αστοχίας PVS	51
3.1.1. Δυσλειτουργίες συνεχούς ρεύματος	52
3.2. Μέθοδοι Ανίχνευσης Σφαλμάτων	54
A. Μέθοδοι ανεξάρτητες από ακτινοβολία	56
B. Μέθοδοι με βάση την καμπύλη I-V	56
Γ. Μέθοδοι βασισμένες στη μηχανική μάθηση	58
Δ. Μέθοδοι με βάση τη θερμότητα	62
Ε. Παρακολούθηση υπολειπόμενου ρεύματος (RCM: Residual current monitoring)	62
ΣΤ. Παρακολούθηση τόξου	63
Z. Νευρωνικά δίκτυα τροφοδότησης πολλαπλών εξόδων για ανίχνευση σφαλμάτων φωτοβολταϊκού συστήματος	63
ΣΥΖΗΤΗΣΗ	68
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	70

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Φωτοβολταϊκή κυψέλη [85].....	19
Εικόνα 2. Μοντέλο μιας διόδου [20-26]	21
Εικόνα 3. Μοντέλο διπλής διόδου [27-31]	22
Εικόνα 4. Διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας (G) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Αποδοτικότητα έναντι ακτινοβολίας. (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή [37-38].....	27
Εικόνα 5. Διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας (G) για δύο μοντέλα διόδων. (α) Αποδοτικότητα έναντι ακτινοβολίας. (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. [Πηγή 37-38].....	28
Εικόνα 6. Διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας (T) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Απόδοση έναντι θερμοκρασίας (T); (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου.Πηγή: [39-40].....	30
Εικόνα 7. Διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας (T) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Απόδοση έναντι θερμοκρασίας (T); (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [39-40].....	31
Εικόνα 8. Διαφορετικές τιμές αντίστασης διακλάδωσης (R_p) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Αποδοτικότητα έναντι αντίστασης διακλάδωσης (R_p). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [44].....	34
Εικόνα 9. Διαφορετικές τιμές αντίστασης διακλάδωσης (R_p) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Αποδοτικότητα έναντι αντίστασης διακλάδωσης (R_p). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου Πηγή [44].....	35
Εικόνα 10. Διαφορετικές τιμές αντίστασης σειράς (R_s) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Αποδοτικότητα έναντι αντίστασης σειράς (R_s). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου Πηγη [45].	38
Εικόνα 11. Διαφορετικές τιμές αντίστασης σειράς (R_s) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Αποδοτικότητα έναντι αντίστασης σειράς (R_s). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου Πηγή [45].	39
Εικόνα 12. Διαφορετικές τιμές του αριθμού των συνδεδεμένων σε σειρά κυψελών (N_s) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Αποδοτικότητα έναντι αριθμού κυψελών που συνδέονται σε σειρά (N_s). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου Πηγή [47].....	41

Εικόνα 13. Διαφορετικές τιμές αριθμού συνδεδεμένων κυψελών σε σειρά (Ns) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Αποδοτικότητα έναντι αριθμού κυψελών που συνδέονται σε σειρά (Ns). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [49]	42
Εικόνα 14. Διαφορετικές τιμές του αριθμού των παράλληλα συνδεδεμένων κυψελών (Np) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Αποδοτικότητα έναντι παράλληλων συνδεδεμένων κυψελών (Np). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή [46]	44
Εικόνα 15. Διαφορετικές τιμές των παράλληλα συνδεδεμένων κυψελών (Np) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Αποδοτικότητα έναντι αριθμού κυψελών που συνδέονται σε σειρά (Ns). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [46]	45
Εικόνα 16. Διαφορετικές τιμές συντελεστή ιδεατότητας διόδου (α) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Συντελεστής απόδοσης έναντι συντελεστή ιδανικότητας διόδου. (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [50].....	48
Εικόνα 17. Διαφορετικές τιμές συντελεστή ιδεατότητας διόδου (a2) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Συντελεστής απόδοσης έναντι ιδανικότητας διόδου (a2). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [41].....	49
Εικόνα 18. Παραδείγματα σφαλμάτων DC σε PVS [56]	54
Εικόνα 19. α) Συνήθεις βλάβες ΦΒ. β) Κοινά σφάλματα ΦΒ που απεικονίζονται σε μια καμπύλη I-V πηγή[68]	57
Εικόνα 20. Καμπύλη I-V με όλες τις παραγόμενες παραμέτρους. Πηγή [70].....	57
Εικόνα 21. Μοντέλο διάγνωσης βλαβών SLFN με βάση το KELM [14].....	61
Εικόνα 22. Το αναπτυγμένο feed-forward ANN από τους Voutsinas et al., [83]. Οι νευρώνες με γκρι χρώμα απεικονίζουν την είσοδο, το πορτοκαλί απεικονίζει τα κρυφά στρώματα των νευρώνων, ενώ οι νευρώνες του στρώματος εξόδου απεικονίζονται με μωβ για την έξοδο παλινδρόμησης και με μπλε για την έξοδο ταξινόμησης. Για κάθε νευρώνα των κρυφών επιπέδων και του στρώματος εξόδου, η συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται φαίνεται στην κάτω πλευρά του σχήματος.....	64
Εικόνα 23. Γραφική αναπαράσταση των μετρήσεων τάσης και έντασης που παράγονται από SDM με βάση τη μέθοδο Tadatoshi (Πορτοκαλί) και τη μέθοδο DeSoto (γκρι), σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του φύλλου δεδομένων (μπλε) από τους Voutsinas et al., [83]	65
Εικόνα 24. Γραφική αναπαράσταση των μετρήσεων (Ακρίβεια και Απώλεια) για τις δύο εξόδους του ANN από την έρευνα των Voutsinas et al. [83].....	66

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Προδιαγραφές για Φ/Β κυψέλη. [34-36].....	26
Πίνακας 2. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας (G). [36].....	29
Πίνακας 3. Το ενσωματωμένο δυναμικό της διόδου σχετίζεται με την αγώγιμη τάση ενός ηλιακού κυττάρου. Καθώς ένα ηλιακό κύτταρο θερμαίνεται, η τάση μειώνεται και επομένως η ισχύς εξόδου και η απόδοση και τα δύο μειώνονται. Έτσι η απόδοση των ηλιακών κυψελών μειώνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η Εικόνα 6(β) και Η Εικόνα 7(β) το απεικονίζουν ξεκάθαρα γεγονός για προσομοιωμένα μαθηματικά μοντέλα [41] .	32
Πίνακας 4. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές αντίστασης διακλάδωσης (R_p). Πηγή [42].....	36
Πίνακας 5. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές αντίστασης σειράς (R_s). Πηγή: [46].....	40
Πίνακας 6. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές αριθμού συνδεδεμένων κυψελών σε σειρά (N_s). Πηγή: [47]	43
Πίνακας 7. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές παράλληλων συνδεδεμένων κυψελών (N_p). Πηγή: [48]	46
Πίνακας 8. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές συντελεστή ιδανικότητας διόδου. Πηγή: [42]	50

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αναπτυσσόμενο ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων ως βασική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρέχουν μια αποτελεσματική και βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση των ενεργειακών αναγκών, όμως, η αποτελεσματικότητά τους είναι στενά συνδεδεμένη με την ακρίβεια και τη σταθερότητα της λειτουργίας τους.

Ένα από τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων και ανωμαλιών στην λειτουργία τους. Η ανίχνευση και ο εντοπισμός αυτών των σφαλμάτων αποτελεί ένα κρίσιμο στάδιο για τη διασφάλιση της σταθερής και αποδοτικής λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η παρούσα βιβλιογραφική εργασία επιδιώκει να εξετάσει και να αναλύσει τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Θα εξετάσουμε τις τεχνικές και τις μεθόδους που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία για την αντιμετώπιση των διαφόρων ειδών σφαλμάτων, καθώς και τις προκλήσεις που σχετίζονται με τον εντοπισμό τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Συνοπτική Επισκόπηση

Η φωτοβολταϊκή ενέργεια αποτελεί μια σημαντική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας που έχει κερδίσει ολοένα και περισσότερη προσοχή στις τελευταίες δεκαετίες. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν βασικό στοιχείο του φάσματος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προσφέροντας καθαρή και απεριόριστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2. Σκοπός της Διπλωματικής

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η εμβάθυνση στη μελέτη των αλγορίθμων εντοπισμού σφαλμάτων σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Ο εντοπισμός σφαλμάτων αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη διατήρηση και βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς και για την εξασφάλιση της μακροπρόθεσμής τους αξιοπιστίας.

1.3. Ανάγκη για τον Εντοπισμό Σφαλμάτων σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα εκτίθενται σε διάφορες πηγές σφαλμάτων που μπορούν να περιορίσουν την απόδοσή τους. Αυτά τα σφάλματα μπορεί να οφείλονται σε προβλήματα εγκατάστασης, φυσικές φθορές, ηλεκτρονικές βλάβες, ή άλλες αιτίες. Η έγκαιρη ανίχνευση και επιδιόρθωση αυτών των σφαλμάτων είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της αποτελεσματικής λειτουργίας των συστημάτων.

1.4. Περιγραφή του Προβλήματος

Το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται σε αυτήν τη διπλωματική είναι η αξιολόγηση αλγορίθμων για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Η επιτυχημένη υλοποίηση αυτών των αλγορίθμων θα επιτρέψει την αποτελεσματικότερη διαχείριση και συντήρηση των φωτοβολταϊκών

εγκαταστάσεων, εξασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή απόδοση και διάρκεια ζωής τους.

Στα επόμενα κεφάλαια, θα παρουσιαστεί μια λεπτομερής ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας και των προηγούμενων ερευνητικών εργασιών που αφορούν τον εντοπισμό σφαλμάτων σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Ένα φωτοβολταϊκό (PV:Photovoltaic) σύστημα μετατρέπει άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα συστήματα μπορούν να τοποθετηθούν στον ίδιο χώρο ή κοντά στον τόπο όπου υπάρχει η ανάγκη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αποφεύγοντας έτσι τις απώλειες μετάδοσης και συνεισφέροντας στη μείωση των εκπομπών CO₂ στα αστικά κέντρα.

2.1. Φωτοβολταϊκή κυψέλη

Μια φωτοβολταϊκή κυψέλη μετατρέπει την ενέργεια που προέρχεται από την ακτινοβολία του ηλίου ή άλλη πηγή φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Το βασικό της στοιχείο είναι ένας ημιαγωγός, συνήθως πυρίτιο, που έχει υποστεί εκτεταμένη επεξεργασία. Κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο στη δομή του κρυστάλλου συνδέεται με μη ολοκληρωμένους δεσμούς ανάμεσα στα άτομα, δημιουργώντας περιοχές όπου υπάρχει έλλειψη ηλεκτρονίου, γνωστές ως "οπές".

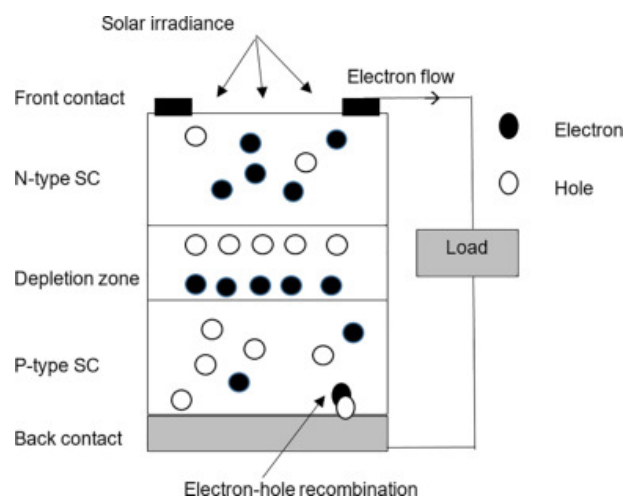
Η εισαγωγή ενός μικρού ποσοστού ατόμων σθένους στον ημιαγωγό επιφέρει αύξηση της αγωγιμότητας του, καθώς και τον αντίστοιχο αριθμό των οπών, λόγω της έλλειψης ενός ηλεκτρονίου. Αντίστοιχα, η εισαγωγή του ίδιου ποσοστού από τρισθενή άτομα οδηγεί στην αύξηση των οπών κατά τον ίδιο λόγο. Αυτή η ιδιότητα επηρεάζει την απόδοση της κυψέλης, καθιστώντας την ικανή να μετατρέπει το φως σε ηλεκτρική ενέργεια με αυξημένη αποτελεσματικότητα.

Η περιοχή του κρυστάλλου του ημιαγωγού που ντοπάρεται με πεντασθενικά άτομα, όπως του φωσφόρου, χαρακτηρίζεται ως τύπος N, ενώ η περιοχή που ντοπάρεται με τρισθενή άτομα, όπως του βορίου, ονομάζεται τύπος P. Η αλληλεπίδραση αυτών των δύο περιοχών προκαλεί διάχυση ηλεκτρονίων από την περιοχή N στην περιοχή P και διάχυση οπών από την περιοχή P στην περιοχή N. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο σε αντίθετη κατεύθυνση από τη φυσική διάχυση.

Σε κατάσταση ισορροπίας, το ρεύμα μέσα από την επαφή PN είναι μηδενικό. Όταν δέχεται φως, η επιφάνεια PN δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών καθώς τα ηλεκτρόνια απορροφούν ενέργεια από τα φωτόνια. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια από

την περιοχή P μεταφέρονται στην περιοχή N, ενώ οι οπές από την περιοχή N μεταφέρονται στην περιοχή P λόγω του ηλεκτρικού πεδίου στην επαφή PN. Αυτή η μεταφορά δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού στα άκρα της διάταξης.

Εάν οι ακροδέκτες συνδεθούν με έναν αγωγό, θα προκύψει ένα ρεύμα όταν προσπίπτει φως στην επαφή PN.



Εικόνα 1. Φωτοβολταϊκή κυψέλη [85]

2.2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποτελεί τη βάση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κυψελών και είναι ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα στον τομέα της ενέργειας. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι συσκευές που αξιοποιούν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο για να μετατρέψουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Ας εξετάσουμε αυτό το φαινόμενο σε βάθος.

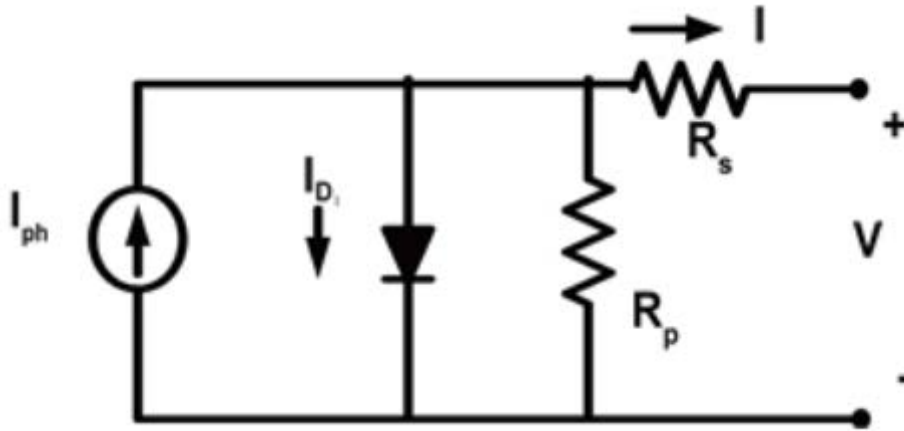
Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες αποτελούνται από ένα υπόστρωμα και μια λεπτή επικάλυψη. Το υπόστρωμα είναι ντοπαρισμένο με φορείς p-τύπου, ενώ η επικάλυψη είναι ντοπαρισμένη με φορείς n-τύπου. Αυτή η διαφορά στη ντοπαρίσση οδηγεί στη δημιουργία μιας απαγορευμένης ενεργειακής ζώνης μεταξύ τους. Μίας περιοχής δηλαδή απογυμνωμένη από ιόντα όπου ορίζει την ένταση της εξωτερικής διέγερσης που χρειάζεται (ηλιακή ακτινοβολία) ώστε να προκύψει ηλεκτρικό ρεύμα εάν συνδεθούν οι ακροδέκτες με έναν αγωγό

2.3. Συγκριτική ανάλυση μεταξύ Μοντέλου Μονής Διόδου και Διπλών Διόδων Φ/B κυψέλης

Τυπικά, το πυρίτιο χρησιμοποιείται για τη συναρμολόγηση ηλιακών κυψελών και παράγεται ανεπαρκής ποσότητα ενέργειας από το στοιχείο πυριτίου, λόγω της χαμηλής απόδοσης μετατροπής [7]. Επομένως, η μελέτη βελτίωσης της απόδοσης μετατροπής είναι πολύ σημαντική για την ισχύ που βασίζεται στα φωτοβολταϊκά. Τα πιο κρίσιμα στοιχεία που επηρεάζουν την ακρίβεια της προσομοίωσης είναι η μοντελοποίηση των Φ/B κυψελών, η οποία συνδέει κυρίως την αξιολόγηση της καμπύλης απόδοσης και τη μη γραμμική καμπύλη χαρακτηριστικών εξόδου I-V, P-V.

2.3.1. Μοντέλα μίας διόδου και διπλής διόδου

Στην εικόνα παρακάτω παρατίθεται ένα μοντέλο μιας διόδου.



Εικόνα 2. Μοντέλο μιας διόδου [20-26]

Έπειτα παρατίθενται οι σχετικές μαθηματικές σχέσεις.

$$I = I_{ph} - I_o * \left(\exp\left(\frac{(V + I * R_s)}{(a * V_T)}\right) - 1 \right) - \frac{(V + I * R_s)}{R_p} \quad (1)$$

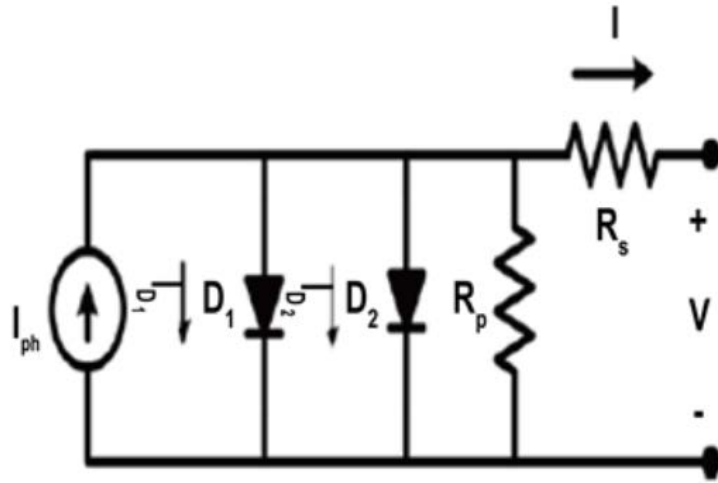
$$V_T = \frac{N_s * k * T}{q} \quad (2)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} * \left(I_{pvn} + K_I * (T - T_n) \right) \quad (3)$$

$$I_o = I_{on} * \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 * \exp\left(\frac{q * E_g}{a * k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)\right) \quad (4)$$

$$I_{on} = \frac{I_{scn}}{\exp\left(\frac{V_{ocn}}{a * V_{Tn}}\right) - 1} \quad (5)$$

Στην εικόνα παρακάτω παρατίθεται ένα μοντέλο διπλής διόδου.



Εικόνα 3. Μοντέλο διπλής διόδου [27-31]

Έπειτα παρατίθενται οι σχετικές μαθηματικές σχέσεις:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} \quad (6)$$

$$I_{D1} = I_{o1} * \left(\exp\left(\frac{(V + I * R_s)}{(a_1 * V_T)}\right) - 1 \right) \quad (7)$$

$$I_{D2} = I_{o2} * \left(\exp\left(\frac{(V + I * R_s)}{(a_2 * V_T)}\right) - 1 \right) \quad (8)$$

$$I = I_{ph} - I_{o1} * \left(\exp\left(\frac{(V + I * R_s)}{(a_1 * V_T)}\right) - 1 \right) - I_{o2} * \left(\exp\left(\frac{(V + I * R_s)}{(a_2 * V_T)}\right) - 1 \right) - \frac{(V + I * R_s)}{R_p} \quad (9)$$

$$I_{ph} = \left(\frac{G}{Gn} \right) * (I_{ph,n} + K_I * \Delta T) \quad (10)$$

$$I_{o1} = I_{o2} = \frac{(I_{sc,n} + K_I * \Delta T)}{\left(\exp\left(\frac{(V_{oc,n} + K_V * \Delta T)}{\frac{(a_1 + a_2)}{p} V_t} \right) - 1 \right)} \quad (11)$$

Όπου:

- I_{ph} είναι το ρεύμα που παράγεται από το προσπίπτον φως.
- $ID1$ είναι η εξίσωση διόδου Shockley λόγω διάχυσης.
- $ID2$ είναι η εξίσωση διόδου Shockley λόγω μηχανισμών ανασυνδυασμού φορτίου.
- I είναι το ρεύμα εξόδου της φωτοβολταϊκής κυψέλης.
- I_{01}, I_{02} [A] είναι το αντίστροφο ρεύμα κορεσμού των διόδων D1 και D2 αντίστοιχα.
- q είναι το φορτίο ηλεκτρονίου [$1,60217646 \cdot 10^{-19}$ C].
- k είναι η σταθερά Boltzmann [$1.3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K].
- T [K] είναι η θερμοκρασία της διασταύρωσης p-n.
- a_1 και a_2 είναι παράγοντας ιδανικότητας των διόδων D1 και D2 αντίστοιχα για μοντέλο δύο διόδων.
- a είναι ο παράγοντας ιδεατότητας της διόδου για ένα μοντέλο διόδου.
- V_T είναι η θερμική τάση της μονάδας.

2.4. Αποδοτικότητα

Η αναλογία της ενέργειας εξόδου του ηλιακού κυττάρου προς την ενέργεια εισόδου από τον ήλιο περιγράφεται ως απόδοση. Αντικατοπτρίζοντας ταυτόχρονα την ικανότητα του ίδιου του ηλιακού κυττάρου, η απόδοση εξαρτάται από το φάσμα και την ένταση του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός και τη θερμοκρασία του ηλιακού στοιχείου [32]. Επομένως, οι συνθήκες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της απόδοσης πρέπει να ρυθμίζονται προσεκτικά προκειμένου να συσχετίζεται η απόδοση μιας συσκευής με μια άλλη. Ο συντελεστής μορφής (FF: Form factor) οριοθετείται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος εξόδου από το ηλιακό στοιχείο προς το γινόμενο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc} : open circuit voltage) και βραχυκύκλωμα ρεύμα κυκλώματος (I_{sc} : short circuit current).

$$FF = \frac{(V_m * I_m)}{(V_{oc} * I_{sc})} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{V_{oc} * I_{sc} * FF}{P_{in}} \quad (13)$$

$$\Delta T = T - T_n \quad (14)$$

Όπου:

- V_{OC} είναι τάση ανοιχτού κυκλώματος & I_{SC} είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος και
- G_n είναι η ακτινοβολία, T_n είναι η θερμοκρασία, όλα σε τυπικές συνθήκες δοκιμής.
- K_V είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας τάσης ανοιχτού κυκλώματος & K_I είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας ρεύματος βραχυκυκλώματος. η είναι αποτελεσματικότητα.

Τα κυρίαρχα φαινόμενα που περιορίζουν την απόδοση των κυττάρων είναι [33] :

- ∅ Αντανάκλαση από το εξωτερικό του κυττάρου.
- ∅ Αντίσταση στην τρέχουσα κίνηση.
- ∅ Αυτοσκίαση που προκύπτει από ηλεκτρικές επαφές της άνω επιφάνειας.
- ∅ Ηλεκτρόνια και οπές που παράγονται από το φως (άδειοι δεσμοί) που τυχαία συγκρούονται μεταξύ τους και ανασυνδυάζονται πριν μπορέσουν να προωθήσουν την απόδοση των κυττάρων.
- ∅ Ηλεκτρόνια και οπές που παράγονται από το φως που συγκεντρώνονται από εξωτερικές και υλικές ατέλειες στο κύτταρο.
- ∅ Υποβάθμιση της απόδοσης σε μη βέλτιστες (υψηλές ή χαμηλές) αγωγιμες θερμοκρασίες.
- ∅ Φως που δεν είναι αρκετά δυναμικό για να απομονώσει ηλεκτρόνια από τους ατομικούς τους δεσμούς.
- ∅ Φως που έχει περίσσεια ενέργειας πέραν αυτής που απαιτείται για την απομόνωση ηλεκτρονίων από δεσμούς.

2.5. Προσομοίωση και Παρατήρηση

Για να αναλυθεί η συμπεριφορά και των δύο Φ/Β μοντέλων, η προσομοίωση στη διεθνή βιβλιογραφία λειτουργεί σε περιβάλλον MATLAB [5] [8] [34] - [36.Πίνακας 1] . Για σύγκριση μοντέλων φωτοβολταϊκών & για την επιθεώρηση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων, χρησιμοποιούνται οι ίδιες προδιαγραφές. Αυτές οι προδιαγραφές συνοψίζονται στον πίνακα παρακάτω

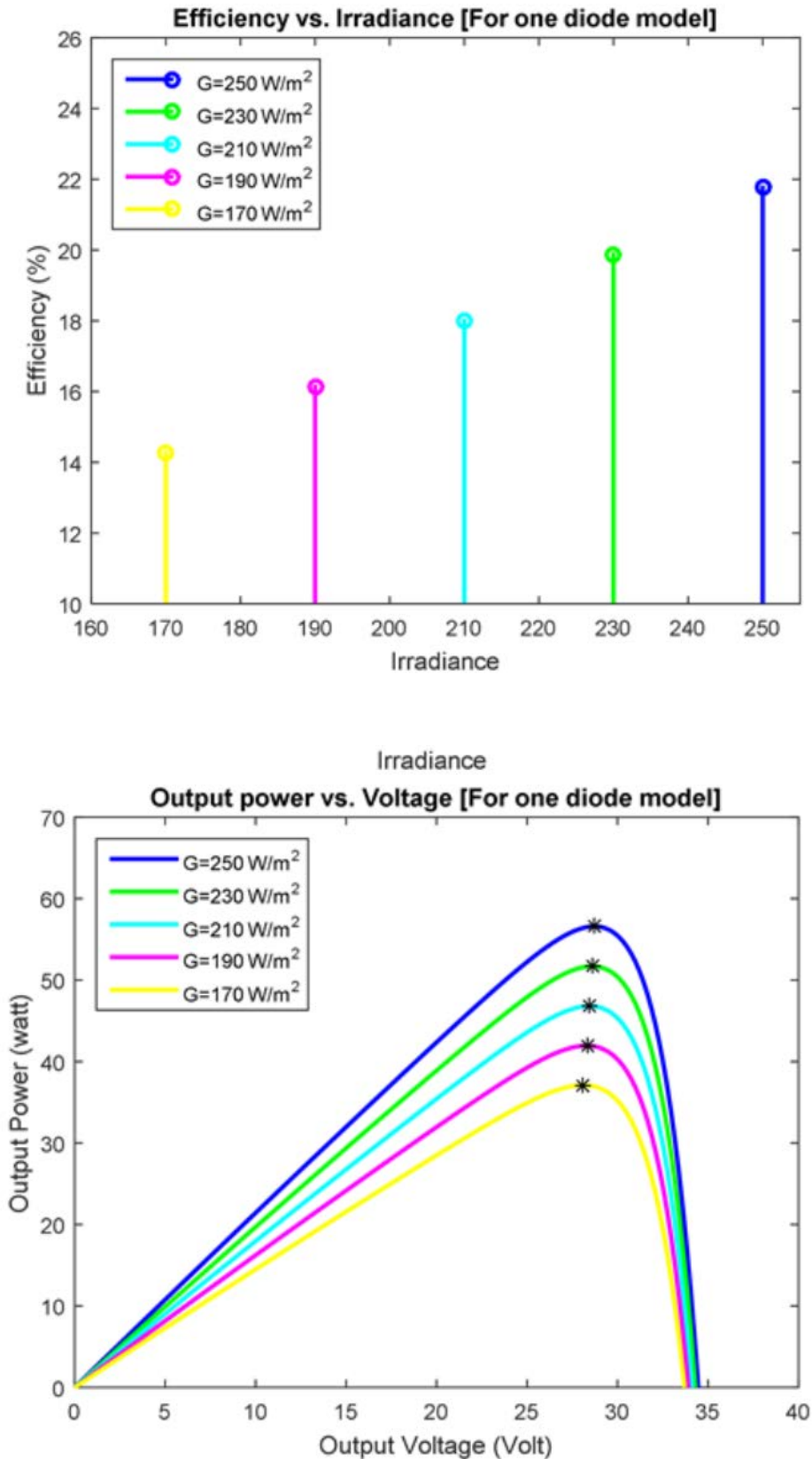
Πίνακας 1. Προδιαγραφές για Φ/Β κυψέλη. [34-36]

Δύναμη εισαγωγής	260 W
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc})	37,92 V
Ρεύμα βραχυκυκλώματος (I_{sc})	8,67 A
Συντελεστής θερμοκρασίας V_{oc}	-0,33%/°C
Συντελεστής θερμοκρασίας I_{sc}	0,06%/°C
Θερμοκρασία αναφοράς	25°C

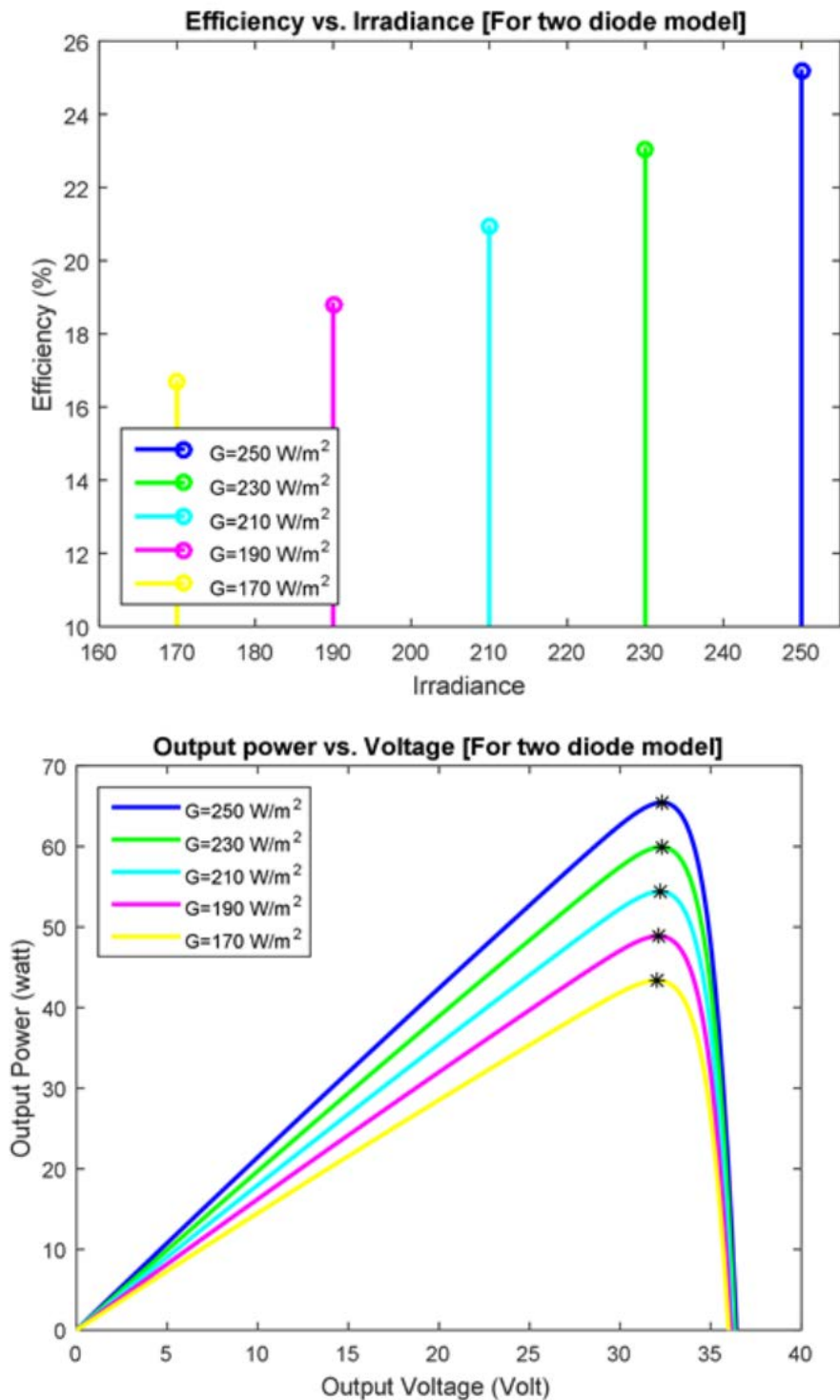
2.5.1. Ακτινοβολία

Η απόδοση μιας φωτοβολταϊκής συσκευής εξαρτάται από τη φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο Ήλιος είναι πηγή φωτός και το φάσμα ακτινοβολίας του μπορεί να εξεταστεί με το φάσμα ενός μαύρου σώματος κοντά στα 6000 K. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε όλα τα μήκη κύματος απορροφάται και εκπέμπεται από ένα μαύρο σώμα [37] .

Η μελέτη της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις φωτοβολταϊκές συσκευές είναι δύσκολη επειδή το φάσμα του ηλιακού φωτός εξωτερικά της Γης επηρεάζεται από στοιχεία όπως η διακύμανση της θερμοκρασίας στον ηλιακό δίσκο και η επίδραση του περιβάλλοντος [38] .



Εικόνα 4. Διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας (G) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Αποδοτικότητα έναντι ακτινοβολίας. (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή [37-38]



(a) (b)

Εικόνα 5. Διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας (G) για δύο μοντέλα διόδων. (α) Αποδοτικότητα έναντι ακτινοβολίας. (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. [Πηγή 37-38]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4(β) και Εικόνα 5(β), μια αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας αναγκάζει τις καμπύλες ισχύος να κινηθούν προς τα πάνω. Μαζί με αυτό, ο Πίνακας 2 δείχνει ότι η μέγιστη ισχύς και η απόδοση αυξάνονται σε σημαντικό βαθμό με την αύξηση της τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας και για τα δύο μοντέλα φωτοβολταϊκών κυψελών. Όταν η ακτινοβολία είναι 170 W/m², η απόδοση δύο μοντέλων διόδων είναι 2,4% υψηλότερη από ένα μοντέλο διόδου. Κατά συνέπεια, όταν η ακτινοβολία είναι 250 W/m², η απόδοση δύο μοντέλων διόδων είναι 3,4% υψηλότερη από ένα μοντέλο διόδου. Ως εκ τούτου, Ο Πίνακας 2 δείχνει ξεκάθαρα ότι δύο μοντέλα διόδων παρέχουν καλύτερη απόδοση.

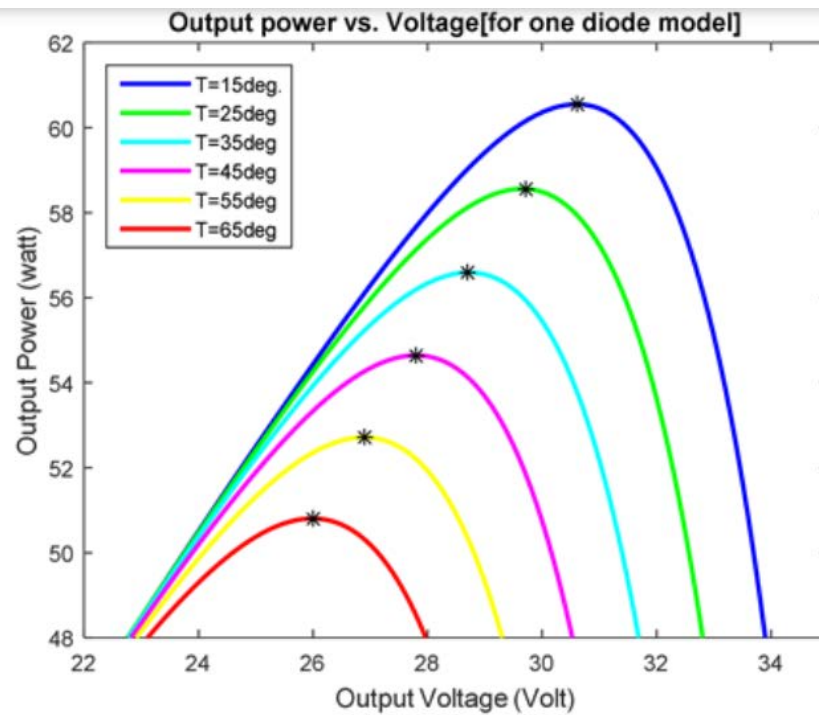
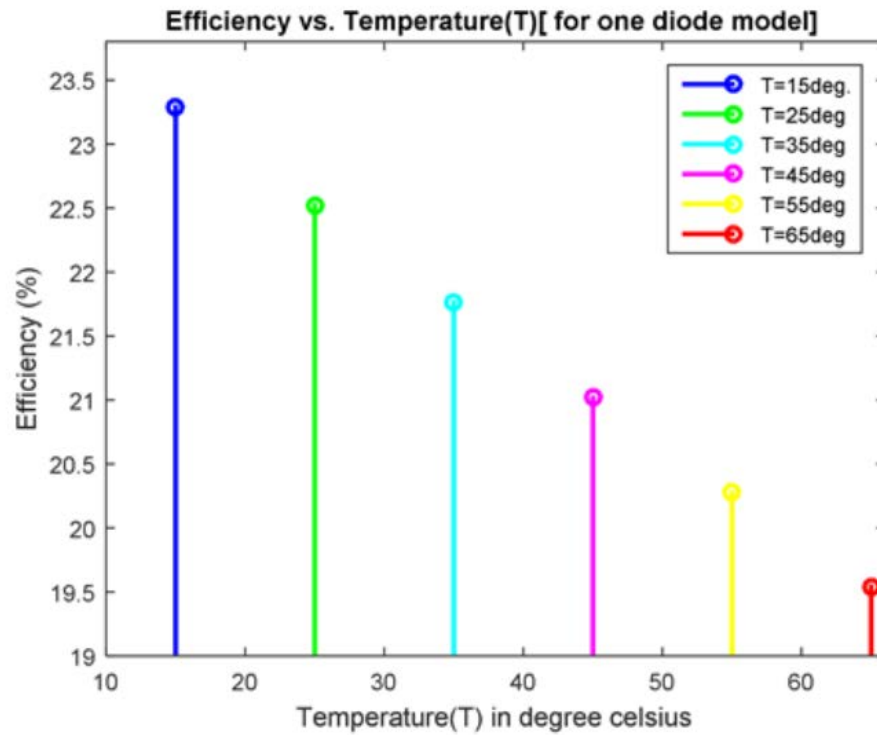
Πίνακας 2. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας (G).

[36]

Αλλαγή παραμέτρου	Μοντέλο δύο διόδων		Μοντέλο μίας διόδου	
	P _{μέγιστο} (W)	Αποδοτικότητα (%)	P _{μέγιστο} (W)	Αποδοτικότητα (%)
250	65,45	25.1733	56,59	21,7667
230	59,92	23.0467	51,69	19.8822
210	54,39	20,9229	46,81	18.0038
190	48,88	18.8008	41,94	16.1340
170	43,37	16.6818	37.11	14,2731

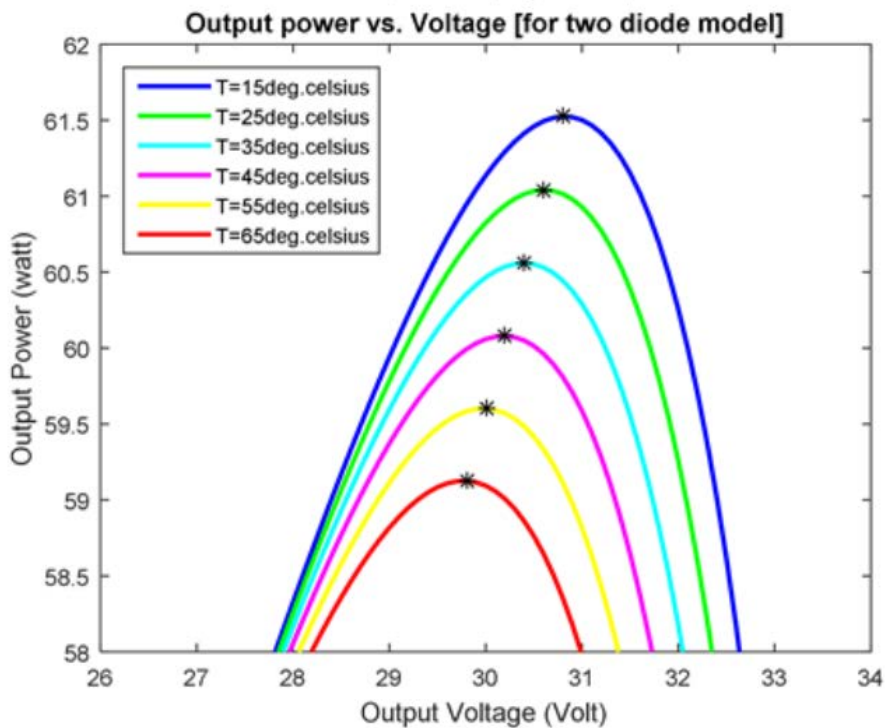
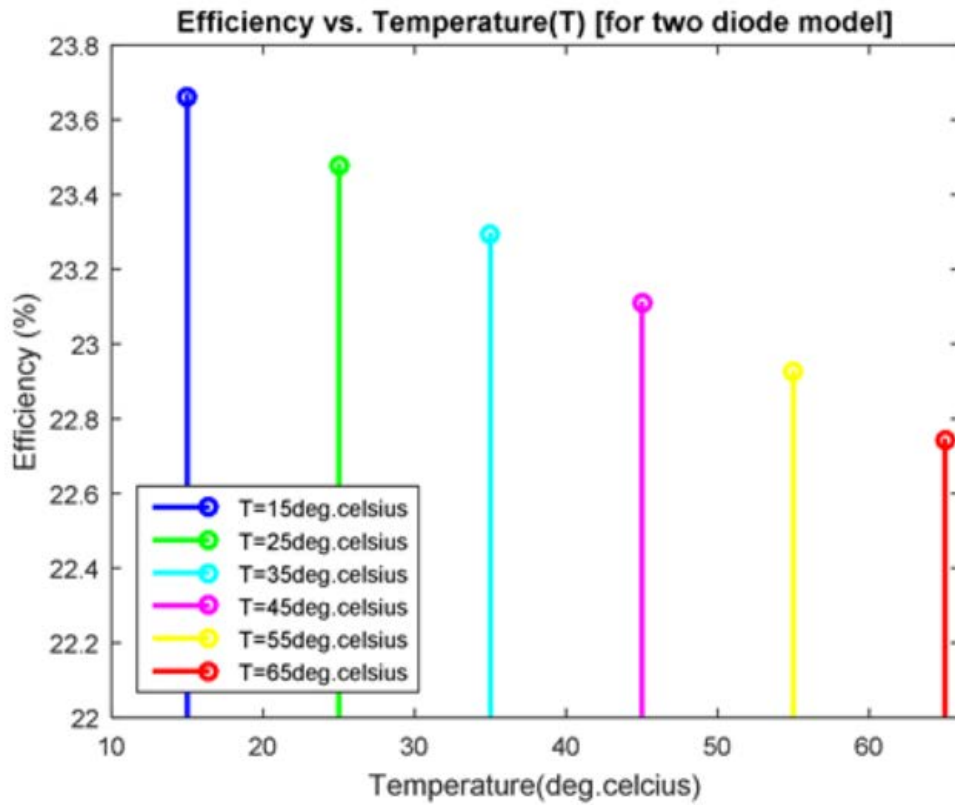
2.6. Θερμοκρασία

Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την εγγενή συγκέντρωση του φορέα. Αυτό ωθεί το επίπεδο Fermi δίπλα στο εγγενές επίπεδο Fermi (το μέσο του κενού ζώνης). Η ανισότητα μεταξύ των επιπέδων Fermi των περιοχών τύπου p και n καθορίζει το ενσωματωμένο δυναμικό μιας διόδου. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, το επίπεδο Fermi σε κάθε περιοχή μετατοπίζεται πιο κοντά στο κέντρο του διακένου, επομένως το ενσωματωμένο δυναμικό μειώνεται [39] [40]



(α) (β)

Εικόνα 6. Διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας (T) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Απόδοση έναντι θερμοκρασίας (T); (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [39-40]



(α) (β)

Εικόνα 7. Διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας (T) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Απόδοση έναντι θερμοκρασίας (T); (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή:

[39-40]

Πίνακας 3. Το ενσωματωμένο δυναμικό της διόδου σχετίζεται με την αγωγήμη τάση ενός ηλιακού κυττάρου. Καθώς ένα ηλιακό κύτταρο θερμαίνεται, η τάση μειώνεται και επομένως η ισχύς εξόδου και η απόδοση και τα δύο μειώνονται. Έτσι η απόδοση των ηλιακών κυψελών μειώνεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η Εικόνα 6(β) και Η Εικόνα 7(β) το απεικονίζουν ξεκάθαρα γεγονός για προσομοιωμένα μαθηματικά μοντέλα [41] .

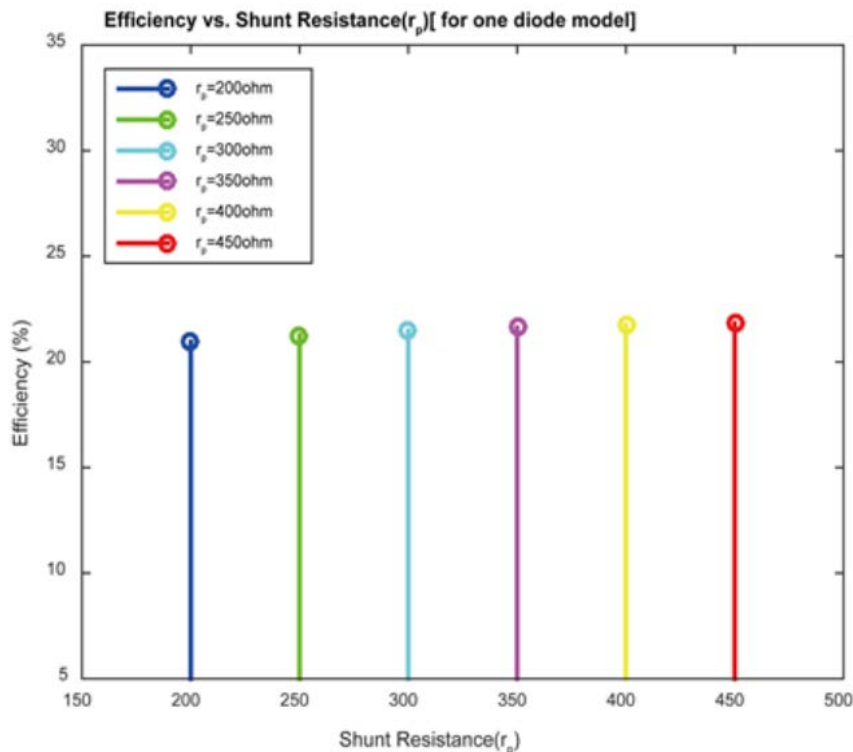
Αλλαγή παραμέτρου	Μοντέλο δύο διόδων		Μοντέλο μίας διόδου	
	$P_{\text{μέγιστο}}$ (W)	Αποδοτικότητα (%)	$P_{\text{μέγιστο}}$ (W)	Αποδοτικότητα (%)
Θερμοκρασία (βαθμοί Κελσίου)				
15	61.52	23.6634	60,55	23.2895
25	61.04	23.4774	58.56	19.8822
35	60.55	23.2922	56.59	21.7667
45	60.08	23.1077	54.64	21.0170
55	59.60	22.9239	52.71	20.2749
65	59.12	22.7407	50.80	19.5407

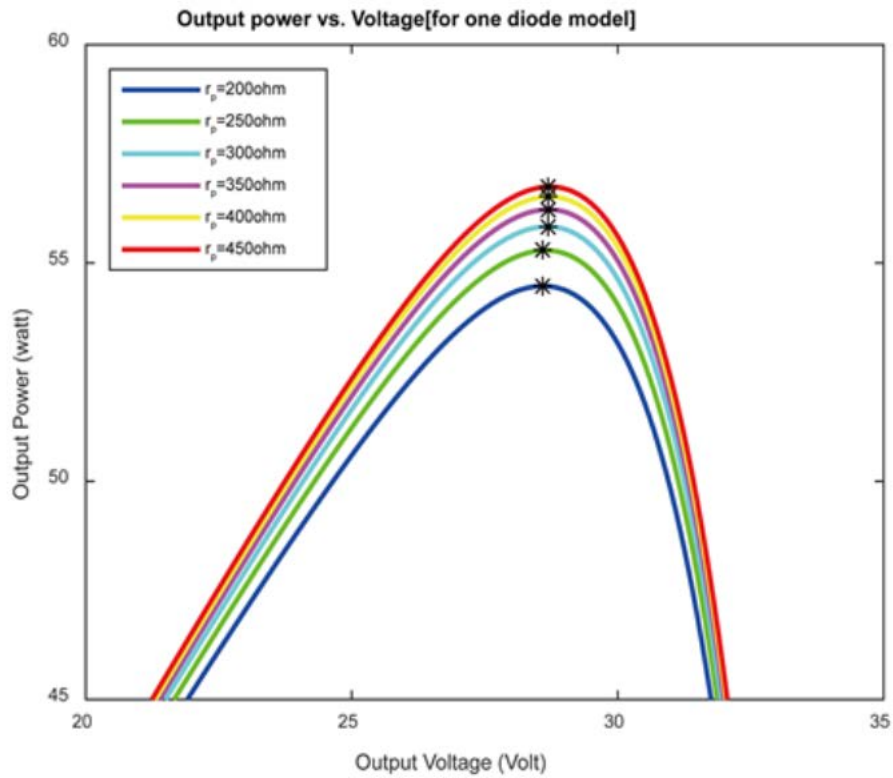
Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει ότι, σε χαμηλή θερμοκρασία και τα δύο μοντέλα παρέχουν περίπου την ίδια απόδοση, ενώ σε υψηλή θερμοκρασία, το μοντέλο διπλής διόδου παρέχει καλύτερη απόδοση.

2.7. Αντίσταση διακλάδωσης (R_p : Shunt Resistance)

Η διασπορά ισχύος στις εσωτερικές αντιστάσεις επηρεάζει την απόδοση καθώς και τη μέγιστη ισχύ εξόδου των ηλιακών κυψελών. Αυτές οι παρασιτικές αντιστάσεις μπορούν να μοντελοποιηθούν ως αντίσταση παράλληλης διακλάδωσης (R_p) και αντίσταση σειράς (R_s θα ήταν μηδέν, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει περαιτέρω πτώση τάσης πριν από το φορτίο S θα ήταν άπειρο και δεν θα παρείχε εναλλακτική διαδρομή για τη ροή του ρεύματος, ενώ το R_p].

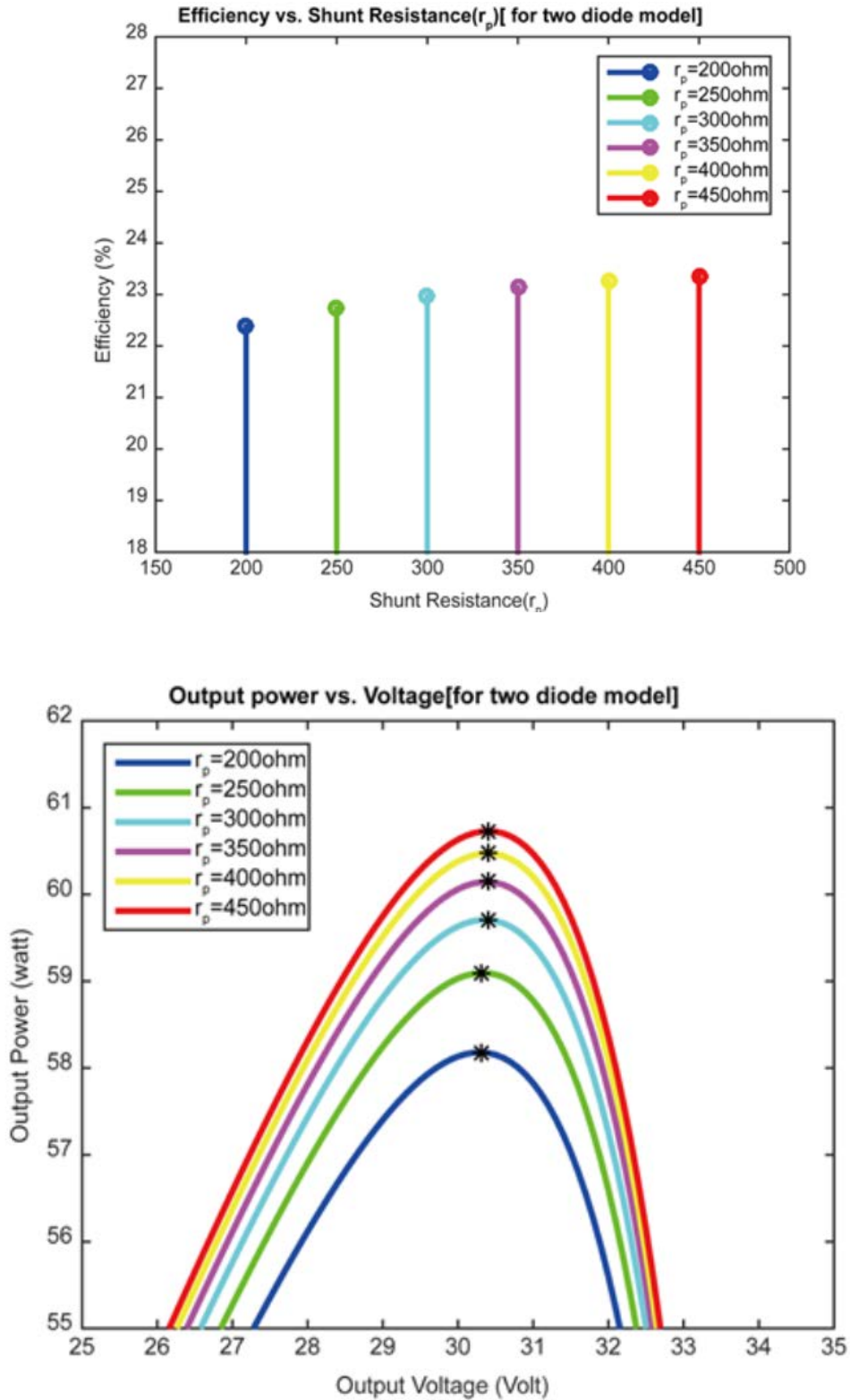
Καθώς η αντίσταση διακλάδωσης μειώνεται, το ρεύμα που περνά μέσα από αυτό αυξάνεται για ένα δεδομένο επίπεδο τάσης διακλάδωσης. Η συνέπεια είναι ότι το ελεγχόμενο από την τάση τμήμα της καμπύλης I-V αρχίζει να κρεμάει μακριά από την αρχή, προκαλώντας μια αξιοσημείωτη υποτίμηση στο ρεύμα τερματικού I και μια μικρή μείωση στο $VOC < a i=2 >$. Ως εκ τούτου, η ισχύς εξόδου μειώνεται. Πολύ κατώτερη ποσότητα R_p θα επιτύχει σημαντικό αποπληθωρισμό στο VOC . Όπως και στην περίπτωση μιας μεγάλης τιμής αντίστασης σειράς, ένα ηλιακό κύτταρο με κακή διακλάδωση θα αποκτήσει χαρακτηριστικά λειτουργίας ανάλογα με εκείνα μιας αντίστασης [44].





(α) (β)

Εικόνα 8. Διαφορετικές τιμές αντίστασης διακλάδωσης (R_p) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Αποδοτικότητα έναντι αντίστασης διακλάδωσης (R_p). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [44]



(α) (β)

Εικόνα 9. Διαφορετικές τιμές αντίστασης διακλάδωσης (R_p) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Αποδοτικότητα έναντι αντίστασης διακλάδωσης (R_p). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου Πηγή [44].

Πίνακας 4. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές αντίστασης διακλάδωσης (R_p). Πηγή [42]

Αλλαγή παραμέτρου	Μοντέλο δύο διόδων		Μοντέλο μίας διόδου	
	$P_{\text{μέγιστο}}$ (W)	Αποδοτικότητα (%)	$P_{\text{μέγιστο}}$ (W)	Αποδοτικότητα (%)
Παραδιακλάδωση Αντίσταση (R_p)				
200	58.18	22.3772	54.47	20.9507
250	59.09	22.7291	55.28	21.2642
300	59.70	22.9642	55.83	21.4744
350	60.14	23.1329	56.22	21.6247
400	60.47	23.2594	56.51	21.7374
450	60.73	23.3578	56.74	21.8251

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών καθώς και η μέγιστη ισχύς αυξάνονται με την αύξηση της τιμής της αντίστασης διακλάδωσης. Η Εικόνα 8 και η Εικόνα 9 αποκαλύπτουν αυτό το γεγονός. Εξετάζοντας τον Πίνακα 4, εξετάζεται ότι η απόδοση των Φ/Β κυψελών θα γίνει σχεδόν σταθερή μετά από μια ορισμένη τιμή αντίστασης διακλάδωσης. Και αυτό το σταθερό σημείο εμφανίζεται νωρίτερα (λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της αντίστασης διακλάδωσης) για ένα μοντέλο διόδου σε σύγκριση με το μοντέλο διπλής διόδου.

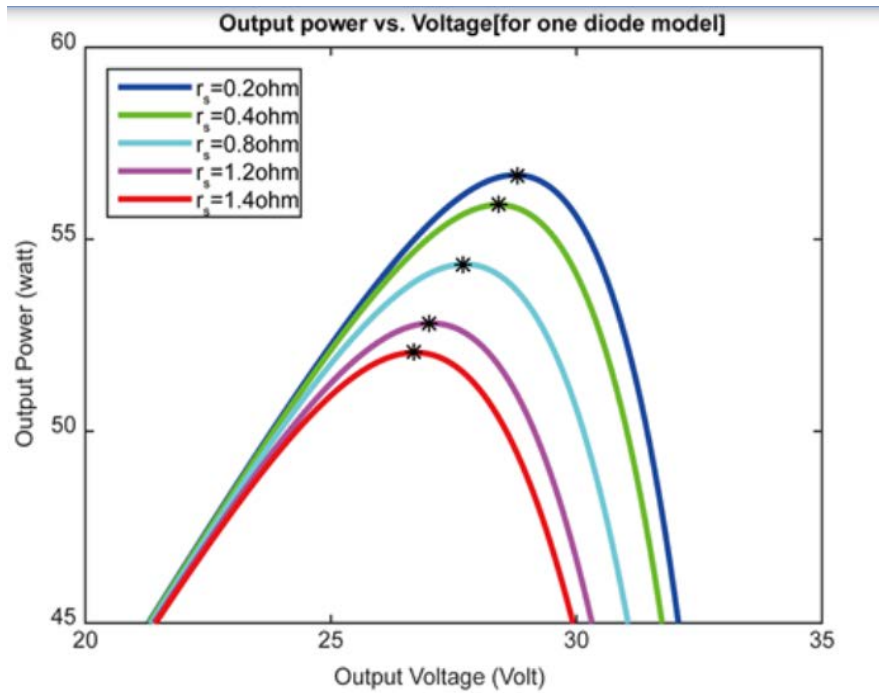
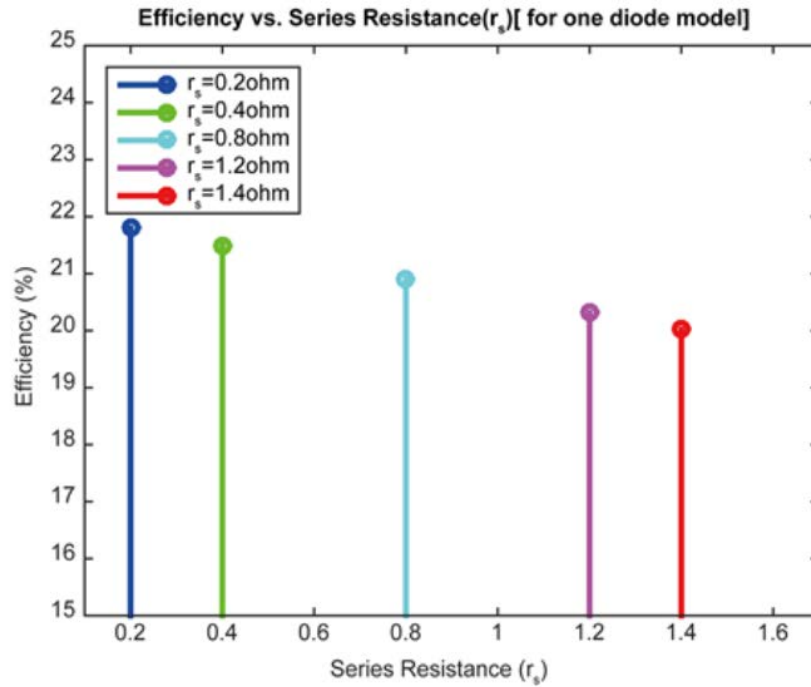
2.8. Αντίσταση σειράς (R_s : Series Resistance)

Για την ίδια ποσότητα ρεύματος, η πτώση τάσης μεταξύ της τάσης διασταύρωσης και της τάσης ακροδεκτών γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η αντίσταση σειράς [44]. Ως αποτέλεσμα, το ελεγχόμενο από ρεύμα τμήμα της καμπύλης I-V αρχίζει να υποχωρεί προς την αρχή, προκαλώντας μια αξιοσημείωτη μείωση στην τάση τερματικού και μια μικρή συστολή στο ISC, το ρεύμα βραχυκυκλώματος. Οι τεράστιες τιμές του R_s θα προκαλέσουν επίσης σημαντική μείωση στο ISC. Σε αυτά τα καθεστώτα, κυριαρχεί η αντίσταση σειράς και η συμπεριφορά του ηλιακού κυττάρου μοιάζει με αυτή μιας αντίστασης [44].

Από την Εικόνα 10 και Εικόνα 11, προκύπτει ότι η μέγιστη ισχύς καθώς και η απόδοση κυψέλης μειώθηκαν με την αύξηση της τιμής της αντίστασης σειράς και για τα δύο μοντέλα. Επομένως, ο Πίνακας 5 παρουσιάζει ότι το μοντέλο διπλής δίοδου παρέχει καλύτερη απόδοση για την αλλαγή των τιμών της αντίστασης σειράς.

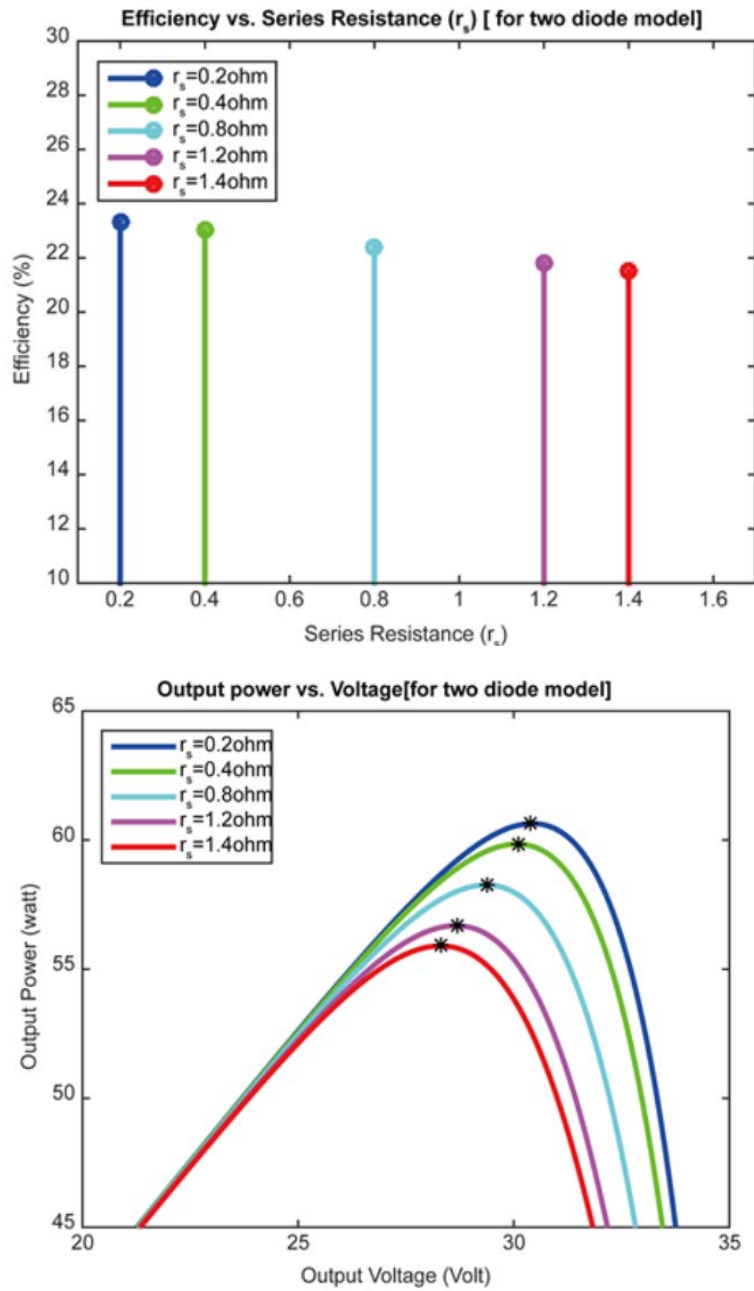
2.9. Αριθμός συνδεδεμένων κυψελών σε σειρά (N_s : Number of Series Connected Cells)

Πολλαπλοί αριθμοί ηλιακών κυψελών συνδέονται για να σχηματίσουν πάνελ. Επομένως, τα πάνελ μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για να αυξήσουν το επίπεδο τάσης και παράλληλα για να αυξήσουν το επίπεδο ρεύματος ή σε μια ενοποίηση των δύο. Η ακριβής διαμόρφωση εξαρτάται από τις προϋποθέσεις του φορτίου ρεύματος και τάσης. Η απόδοση της συστοιχίας μπορεί να μεγιστοποιηθεί με το συντονισμό των διασυνδεδεμένων πινάκων σε σχέση με τις εξόδους τους [45].



(α) (β)

Εικόνα 10. Διαφορετικές τιμές αντίστασης σειράς (R_s) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Αποδοτικότητα έναντι αντίστασης σειράς (R_s). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου Πηγη [45].

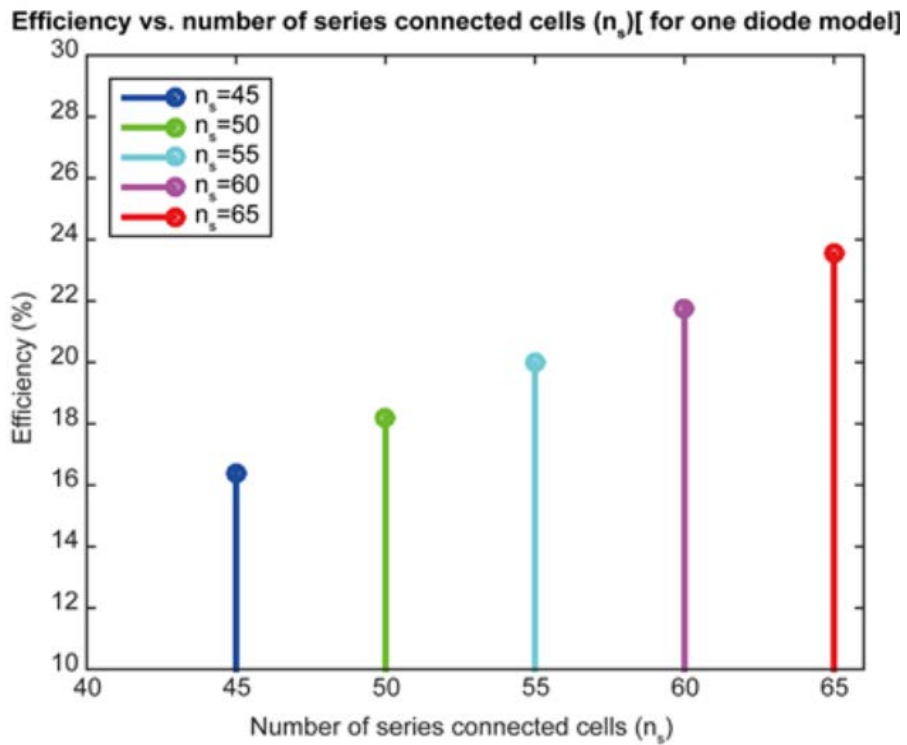


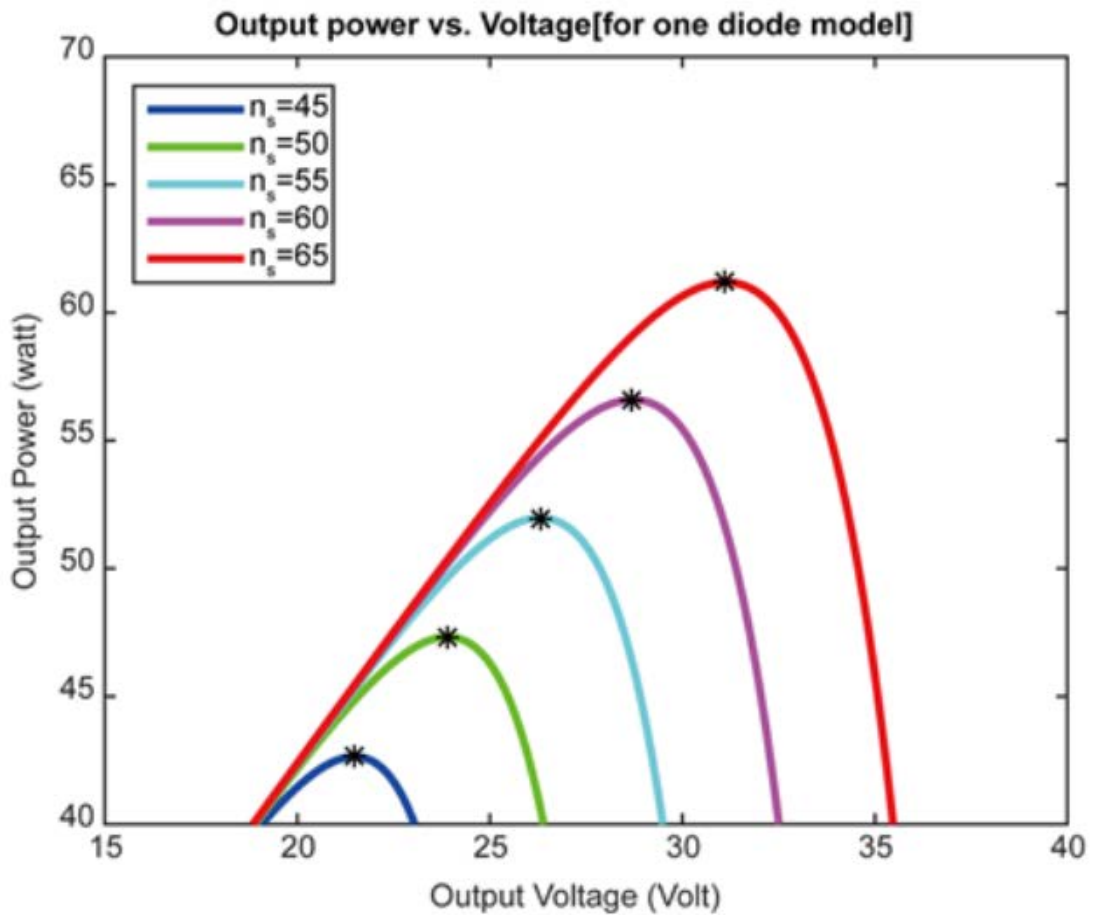
(α) (β)

Εικόνα 11. Διαφορετικές τιμές αντίστασης σειράς (R_s) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Αποδοτικότητα έναντι αντίστασης σειράς (R_s). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου Πηγή [45].

Πίνακας 5. Αποτελεσματικότητα & Pmax για διαφορετικές τιμές αντίστασης σειράς (Rs). Πηγή: [46]

Αλλαγή παραμέτρου Αντίσταση σειράς (Rs)	Μοντέλο δύο διόδων		Μοντέλο μίας διόδου	
	P _{μέγιστο} (W)	Αποδοτικότητα (%)	P _{μέγιστο} (W)	Αποδοτικότητα (%)
0.2	60.64	23.3241	56.67	21.7978
0.4	59.84	23.0182	55.89	21.4989
0.8	58.26	22.4085	54.34	20.9034
1.2	56.68	21.8026	52.81	20.3122
1.4	55.90	21.5015	52.04	20.0189



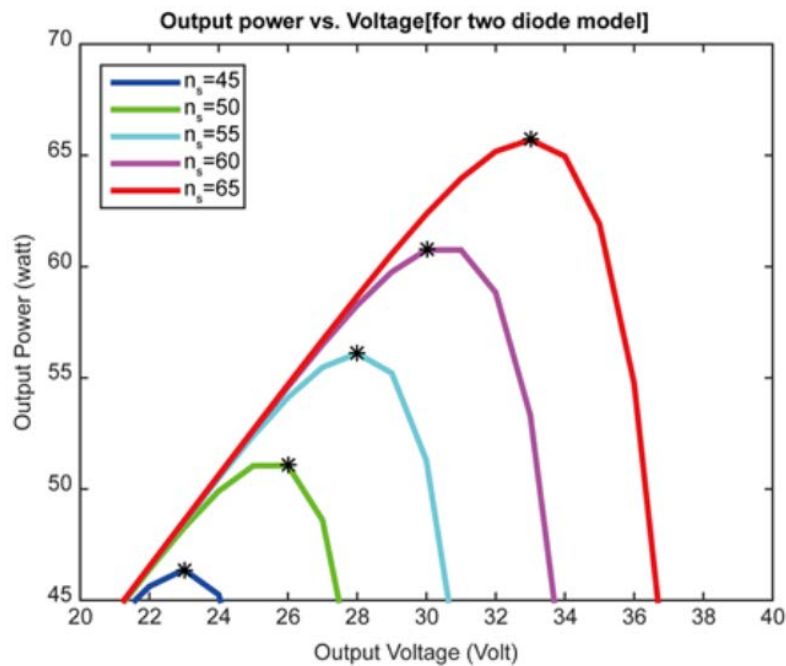
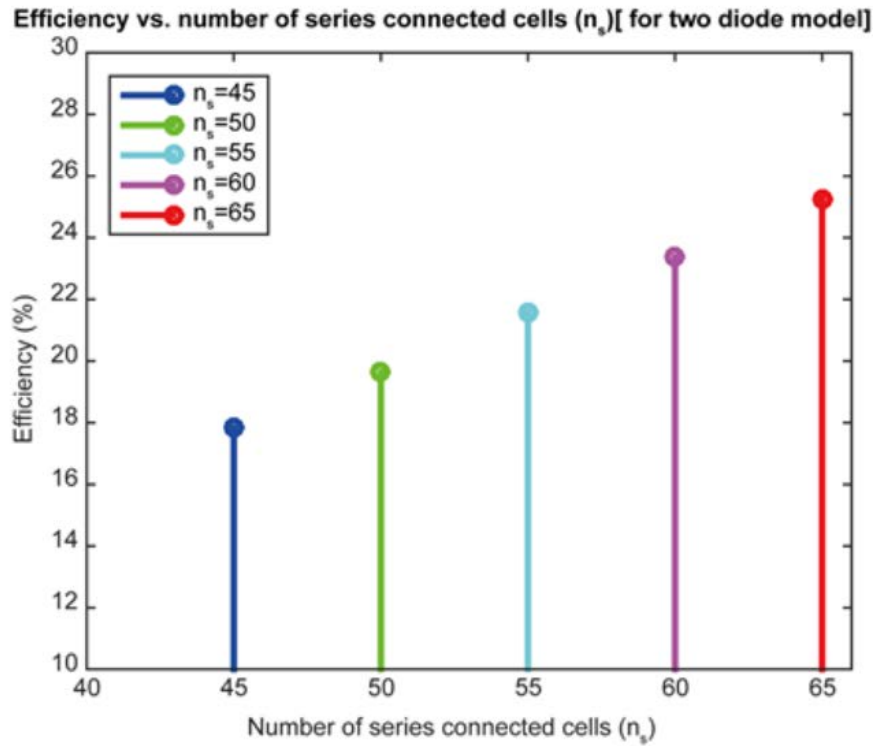


(α) (β)

Εικόνα 12. Διαφορετικές τιμές του αριθμού των συνδεδεμένων σε σειρά κυψελών (N_s) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Αποδοτικότητα έναντι αριθμού κυψελών που συνδέονται σε σειρά (N_s). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου Πηγή [47].

Η ανισορροπία στο ρεύμα βραχυκύκλωσης των σειριακών συνδεδεμένων ηλιακών κυψελών μπορεί, ανάλογα με το σημείο αγωγής της μονάδας και τον βαθμό σύγκρουσης, να έχει σοβαρές επιπτώσεις στη φωτοβολταϊκή μονάδα.

Οι συνδέσεις σειράς αυξάνουν την ισχύ εξόδου επειδή η τάση εξόδου αυξάνεται ενώ το ρεύμα εξόδου παραμένει σχεδόν σταθερό. Η Εικόνα 12 και 13 δικαιολογούν ξεκάθαρα αυτό το γεγονός. Η απόδοση του ηλιακού πάνελ αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των συνδεδεμένων σε σειρά κυψελών. Για διαφορετικές τιμές κυψελών συνδεδεμένων σε σειρά, το μοντέλο διπλής διόδου εξυπηρετεί με υψηλότερη απόδοση από το μοντέλο μονής διόδου. Αυτή η αξιολόγηση παρουσιάζεται ξεκάθαρα στον Πίνακα 6.



(α) (β)

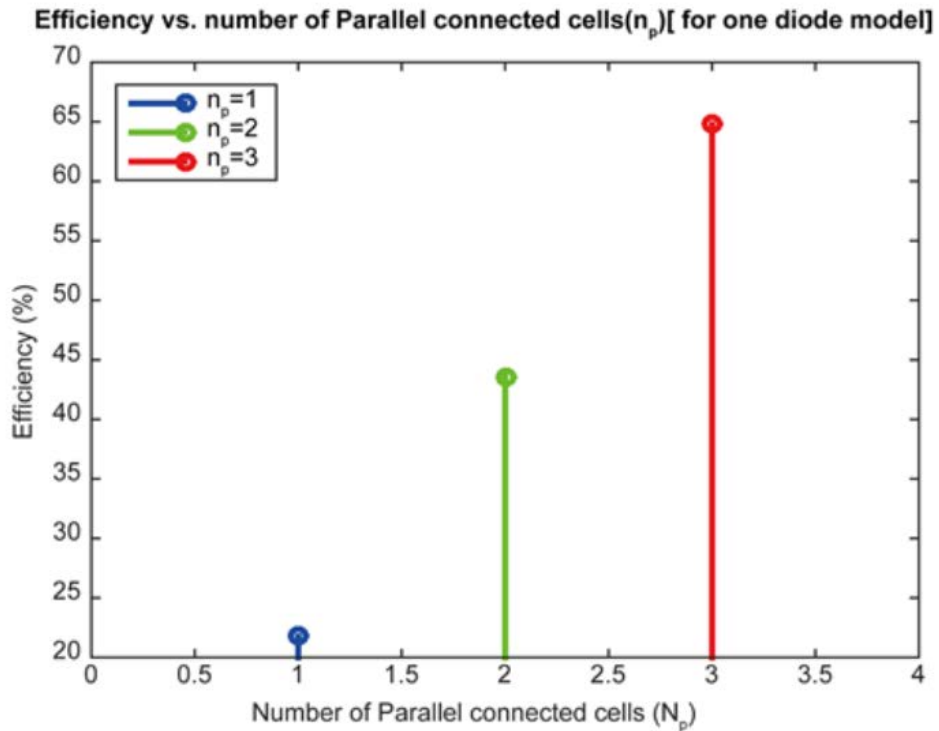
Εικόνα 13. Διαφορετικές τιμές αριθμού συνδεδεμένων κυψελών σε σειρά (N_s) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Αποδοτικότητα έναντι αριθμού κυψελών που συνδέονται σε σειρά (N_s). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [49]

2.10 Παράλληλα συνδεδεμένα κελιά (Np: Parallel Connected Cells)

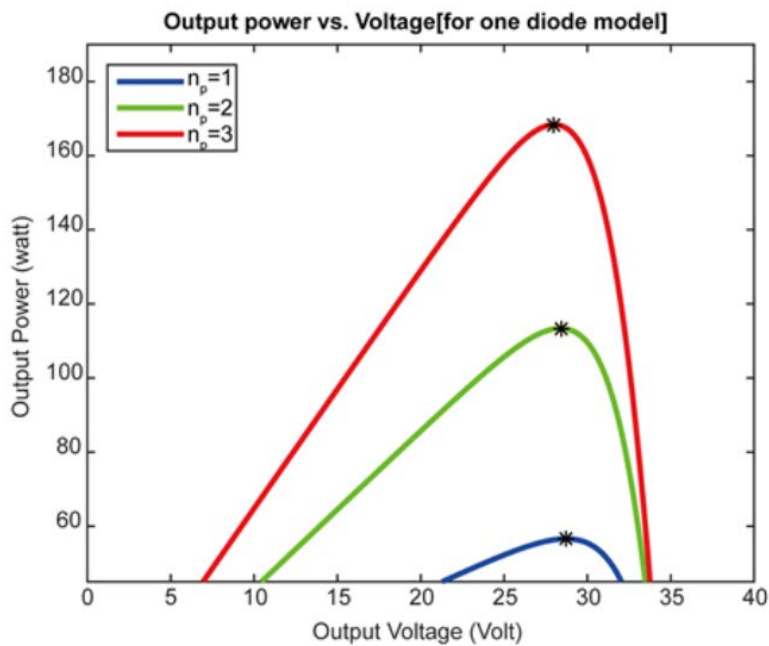
Σε μικρούς ηλιακούς συλλέκτες, οι φωτοβολταϊκές κυψέλες συνδέονται συνήθως σε σειρά, έτσι το θέμα της ανισορροπίας σε παράλληλη σύνδεση δεν αποτελεί πρόβλημα. Σε μεγαλύτερα συστήματα, όπου οι ηλιακοί συλλέκτες συνδέονται παράλληλα, η ανισορροπία εμφανίζεται συνήθως σε επίπεδο συλλέκτη και όχι σε επίπεδο κυψέλης.

Πίνακας 6. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές αριθμού συνδεδεμένων κυψελών σε σειρά (N_s). Πηγή: [47]

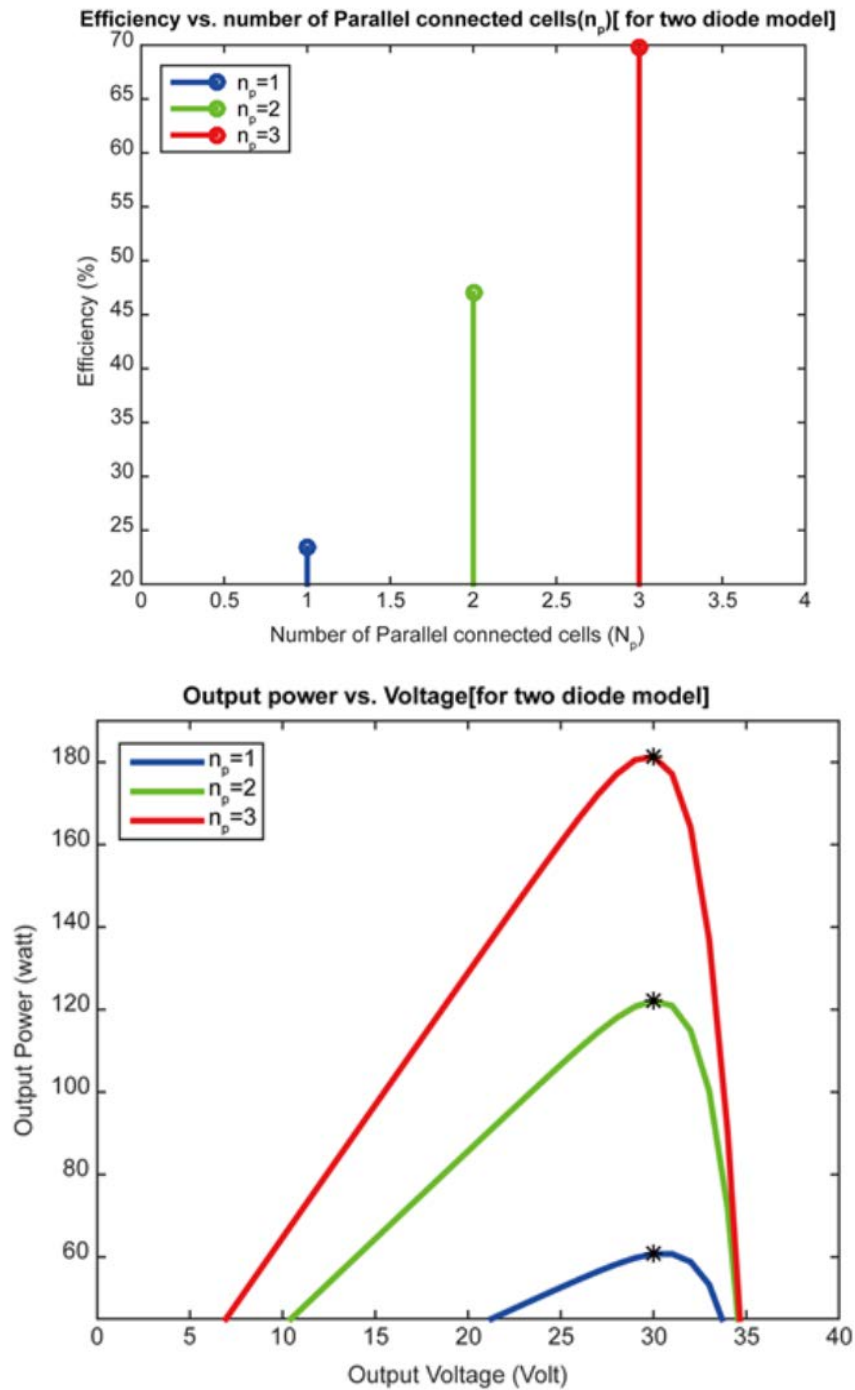
Αλλαγή παραμέτρου	Μοντέλο δύο διόδων		Μοντέλο μίας διόδου	
	P _{μέγιστο} (W)	Αποδοτικότητα (%)	P _{μέγιστο} (W)	Αποδοτικότητα (%)
Αριθμός συνδεδεμένων κυψελίδων σειρών (N _s)				
45	46.37	17.8366	42.64	16.4025
50	51.05	19.6374	47.32	18.2015
55	56.09	21.5768	51.97	19.9895
60	60.75	23.3656	56.59	21.7667
65	65.70	25.2705	61.18	23.5331



(α) (β)



Εικόνα 14. Διαφορετικές τιμές του αριθμού των παράλληλα συνδεδεμένων κυψελών (N_p) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Αποδοτικότητα έναντι παράλληλων συνδεδεμένων κυψελών (N_p). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή [46]



(α) (β)

Εικόνα 15. Διαφορετικές τιμές των παράλληλα συνδεδεμένων κυψελών (N_p) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Αποδοτικότητα έναντι αριθμού κυψελών που συνδέονται σε σειρά (N_s). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [46]

Ο διευρυμένος αριθμός των παράλληλα συνδεδεμένων κυψελών προκαλεί αύξηση του ρεύματος εξόδου και το οριζόντιο τμήμα της καμπύλης I-V μετακινείται προς τα πάνω. Μαζί με αυτό, Εικόνα 14(β) και Εικόνα 15(β) δείχνουν ότι η μέγιστη ισχύς κινείται προς τα πάνω με την αντίστοιχη μεταβαλλόμενη παράμετρο. Επίσης τα σχήματα 14(α) και 15(α) δείχνουν καθαρά αυτή η απόδοση αυξήθηκε αναλογικά με την αύξηση του αριθμού των παράλληλα συνδεδεμένων κυψελών. Παρόμοια με άλλες παραμέτρους, δύο μοντέλα διόδων συμβάλλουν στη βελτιωμένη απόδοση από κάθε μοντέλο. Με τις ποσοστιαίες τιμές απόδοσης και για τα δύο μοντέλα που εμφανίζονται στον Πίνακα 7 επιβεβαιώνει την αυθεντικότητα αυτού του ευρήματος.

Πίνακας 7. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές παράλληλων συνδεδεμένων κυψελών (N_p). Πηγή: [48]

Αλλαγή παραμέτρου	Μοντέλο δύο διόδων		Μοντέλο μίας διόδου	
	P _{μέγιστο} (W)	Αποδοτικότητα (%)	P _{μέγιστο} (W)	Αποδοτικότητα (%)
Παράλληλα συνδεδεμένα κελιά (N _p)				
1	60.75	23.3656	21.7667	56.59
2	122.12	46.9694	113.39	43.6139
3	181.30	69.7340	168.38	64.7632

2.11 Συντελεστής Ιδεατότητας Διόδου

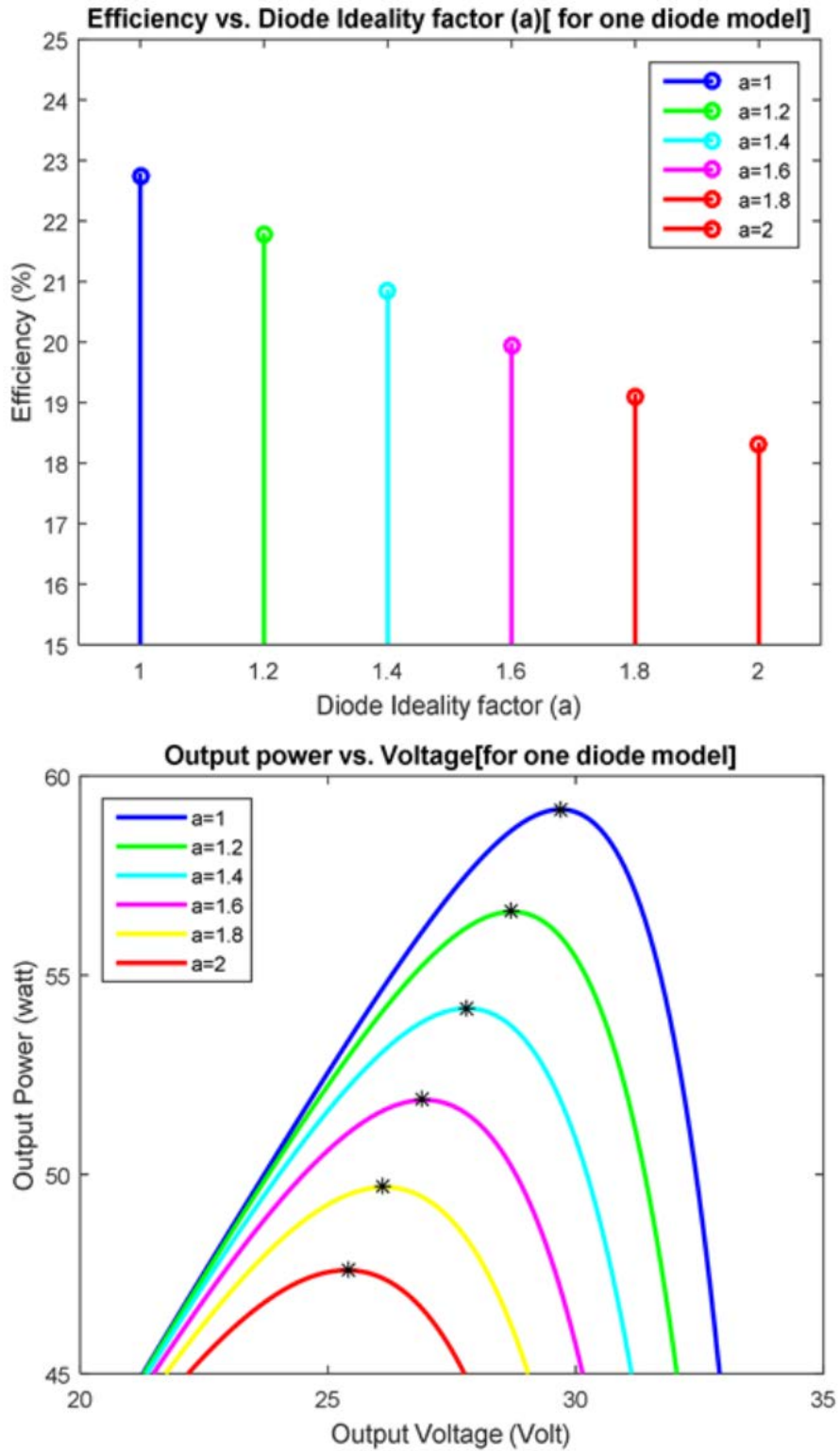
Ο συντελεστής ιδεατότητας (ή ιδανικότητας) μιας διόδου είναι μια εκτίμηση του πόσο στενά η δίοδος ακολουθεί την εννοιολογική εξίσωση της διόδου. Αξιολογεί επίσης τη δυνατότητα σύνδεσης και τον τύπο ανασυνδυασμού σε ένα ηλιακό στοιχείο [46] .

Μια σταθερή τιμή για τον παράγοντα ιδεατότητας θεωρείται για την εξίσωση μιας διόδου. Πρακτικά, ο παράγοντας ιδεατότητας είναι συνάρτηση της τάσης σε όλη τη συσκευή. Στην υψηλή τάση, όταν οι επιφάνειες δίνουν εντολή για ανασυνδυασμό στη συσκευή, ο παράγοντας ιδανικότητας (a_1) είναι περίπου μονάδα. Ωστόσο, ο παράγοντας ιδεατότητας (a_2) πλησιάζει δύο όταν ο ανασυνδυασμός στη διασταύρωση κυριαρχεί σε χαμηλότερες τάσεις. Ο ανασυνδυασμός διασταύρωσης σχεδιάζεται συμπεριλαμβάνοντας μια δεύτερη δίοδο παράλληλα με την πρώτη και εντοπίζοντας τον παράγοντα ιδανικότητας συνήθως σε δύο [47] .

Μια ανώτερη τιμή συντελεστή ιδανικότητας διόδου υποβαθμίζει το FF και την απόδοση για ένα μοντέλο μεμονωμένης διόδου. Ωστόσο, συνήθως σηματοδοτεί υψηλό ανασυνδυασμό και δίνει χαμηλές τάσεις ανοιχτού κυκλώματος [48] . Το σχήμα 15 δικαιολογεί σωστά αυτή τη θεωρητική υπόθεση.

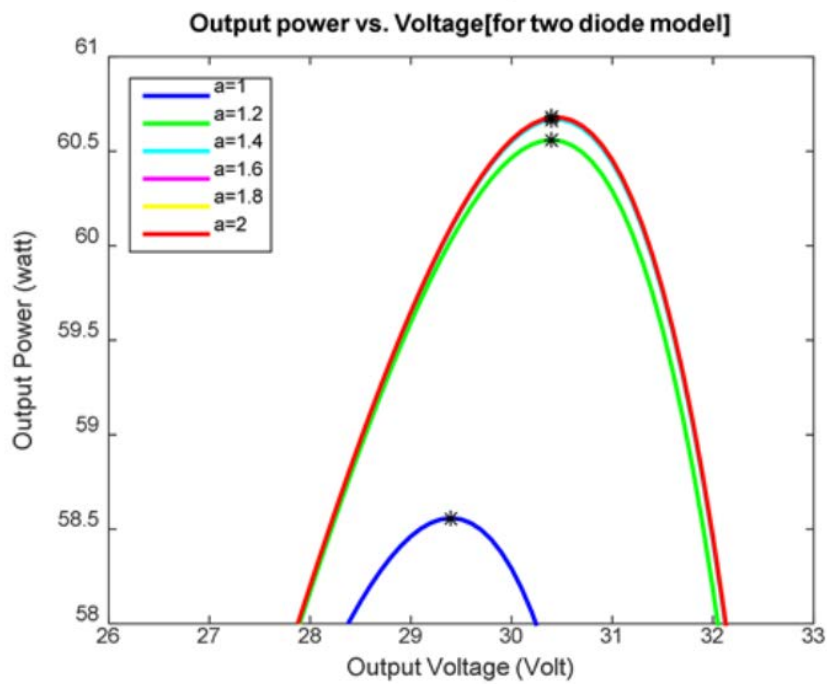
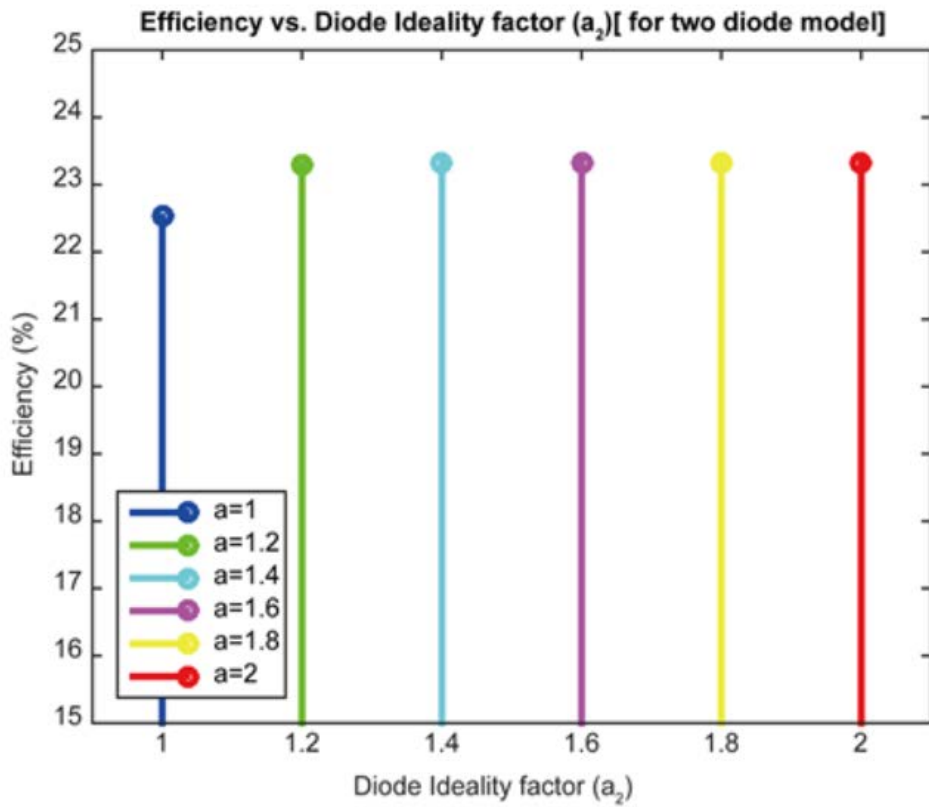
Παράγοντες ιδεατότητας διόδου a_1 και a_2 αντίστοιχα αντιπροσωπεύουν τα στοιχεία του ρεύματος διάχυσης και ανασυνδυασμού για ένα μοντέλο διπλής διόδου. Σύμφωνα με τη θεωρία διάχυσης του Shockley, το ρεύμα διάχυσης, a_1 πρέπει να είναι μονάδα [49][50].

Ωστόσο, η τιμή του a_2 είναι εύπλαστη. Το σχήμα 16 περιγράφει ότι το P_{max} και η απόδοση είναι σχεδόν σταθερές μετά από 2 φτάνει την τιμή του (1,2). Ως εκ τούτου, αυτός θα είναι ο κατάλληλος παράγοντας ιδανικότητας για τη δίοδο (D_2) να έχει μέγιστη απόδοση κυψέλης. Ο Πίνακας 8 επικυρώνει τις θεωρητικές αναγνώρισεις και για τα δύο μοντέλα σχετικά με τον παράγοντα ιδεατότητας διόδου.



(a) (β)

Εικόνα 16. Διαφορετικές τιμές συντελεστή ιδεατότητας διόδου (α) για ένα μοντέλο διόδου. (α) Συντελεστής απόδοσης έναντι συντελεστή ιδανικότητας διόδου. (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [50]



(α) (β)

Εικόνα 17. Διαφορετικές τιμές συντελεστή ιδεατότητας διόδου (a_2) για μοντέλο δύο διόδων. (α) Συντελεστής απόδοσης έναντι ιδανικότητας διόδου (a_2). (β) Ισχύς εξόδου έναντι τάσης εξόδου. Πηγή: [41]

Πίνακας 8. Αποτελεσματικότητα & P_{max} για διαφορετικές τιμές συντελεστή ιδανικότητας διόδου. Πηγή: [42]

Αλλαγή παραμέτρου	Μοντέλο δύο διόδων		Μοντέλο μίας διόδου	
	$P_{\text{μέγιστο}}$ (W)	Αποδοτικότητα (%)	$P_{\text{μέγιστο}}$ (W)	Αποδοτικότητα (%)
Συντελεστής ιδεατότητας διόδου ("a") για ένα μοντέλο διόδου και "a2" για μοντέλο δύο διόδων				
1	58.55	22.5226	59.15	22.7537
1.2	60.55	23.2922	56.59	21.7667
1.4	60.66	23.3333	54.16	20.8342
1.6	60.67	23.3371	51.86	19.9493
1.8	60.67	23.3377	49.68	19.1082
2	60.67	23.3379	47.59	18.3066

2.12 Σύγκριση μίας διόδου και διπλής διόδου

Λόγω της μεγάλης δαπάνης των φωτοβολταϊκών μονάδων, πρέπει να διασφαλιστεί η βέλτιστη χρήση της προσβάσιμης ηλιακής ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά. Αυτό επιθυμεί μια αυθεντική, λεπτομερή, αξιόπιστη και εκτενή έρευνα του σχεδιασμένου σχήματος πριν από την έναρξη.

Η συμπερίληψη της πρόσθετης διόδου για το μοντέλο διπλής διόδου αυξάνει τις παραμέτρους του μοντέλου. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση, η κύρια πρόκληση είναι να υπολογιστούν οι τιμές όλων των προδιαγραφών του μοντέλου. Χρησιμοποιώντας αυτή τη συγκριτική ανάλυση που βασίζεται σε προσομοίωση MATLAB, το μοντέλο διπλής διόδου φαίνεται στη διεθνή βιβλιογραφία ότι συμβάλλει στην ανώτερη απόδοση σε σύγκριση με το μοντέλο μίας διόδου. Αντίστοιχα, το επιλεγμένο μοντέλο θα μπορούσε να είναι αποτελεσματικό για επαγγελματίες που απαιτούν εύκολα, κατανοητά και ακριβή μοντέλα ΦΒ με την πιο επιθυμητή απόδοση για να σχεδιάσουν το σύστημά τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Τεχνικές εντοπισμού και αναγνώρισης ελαττωμάτων φωτοβολταϊκών συστημάτων

Όταν πρόκειται για την παραγωγή ενέργειας, είτε με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας είτε με τη μορφή ενέργειας από υδρογονοφόρα φυτά που δεν εκπέμπουν αέρια του θερμοκηπίου (GHG), τα φωτοβολταϊκά συστήματα θεωρούνται από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες [51, 52]. Επειδή τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ακριβά, η αξιοπιστία και το προσδόκιμο ζωής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος παίζουν καθοριστικό ρόλο στην απόφαση για την αγορά ή όχι ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Οι βλάβες μπορεί να συμβούν κατά τη λειτουργία του συστήματος, τη μεταφορά, την εγκατάσταση ή και τα δύο [53]. Η αξιοπιστία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (PVS) επηρεάζεται σημαντικά από τον τόπο εγκατάστασής του- η μερική σκίαση που προκαλείται από την τοπογραφία και το περιβάλλον φυσικό περιβάλλον μπορεί να έχει αντίκτυπο στην παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, καθώς οι καιρικές συνθήκες συνδέονται με την ανάπτυξη ρωγμών στα ΦΒΣ, οι τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες (όπως η ακραία ζέστη ή το κρύο, το χαλάζι και η σκόνη) [54] έχουν αντίκτυπο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1. Τύποι αστοχίας PVS

Στόχος των τεχνικών ανίχνευσης και ταξινόμησης βλαβών είναι να εντοπίσουν το πρόβλημα που επηρεάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενός PVS, ώστε να ειδοποιηθεί η ομάδα εξυπηρέτησης του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και να μπορέσει το PVS να επανέλθει στην κανονική λειτουργία. Τα τελευταία δέκα χρόνια έχουν δημοσιευτεί στη βιβλιογραφία διάφορες τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων. Τόσο η πλευρά AC όσο και η πλευρά DC ενός PVS είναι επιρρεπείς σε σφάλματα. Τα συμβατικά συστήματα προστασίας εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται για την προστασία από σφάλματα στην πλευρά εναλλασσόμενου ρεύματος, έναν από τους πολλούς τύπους βλαβών σε ένα ΦΒΣ [55]. Ωστόσο,

υπάρχουν διάφορα προβλήματα που είναι δύσκολο να βρεθούν στην πλευρά DC. Θα περιορίσουμε την προσοχή μας σε μεθόδους ανίχνευσης σφαλμάτων που στοχεύουν στην πλευρά DC του PVS από όλες τις στρατηγικές που έχουν προσφερθεί. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητο να μιλήσουμε για τα κοινά είδη προβλημάτων DC πριν περιγράψουμε τις διάφορες τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων.

3.1.1. Δυσλειτουργίες συνεχούς ρεύματος

i. Υπάρχουν πολυάριθμες αιτίες σφαλμάτων υποβάθμισης. Για παράδειγμα, λιγότερο φως φτάνει στις ηλιακές κυψέλες όταν το συγκολλητικό υλικό μεταξύ του γυαλιού και των κυψελών αποχρωματίζεται. Ένας άλλος λόγος είναι η αποκόλληση, η οποία προκαλείται από κενά μεταξύ των στρωμάτων της φωτοβολταϊκής μονάδας που δημιουργούν σκιά που μειώνει την ισχύ εξόδου.

ii. Τα προσωρινά σφάλματα αναντιστοιχίας μπορούν να μειώσουν σημαντικά την παραγόμενη ισχύ και προκαλούνται από τη συσσώρευση χιονιού, σκόνης, αμμοχάλικου και άλλων σωματιδίων στην εμπρόσθια επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

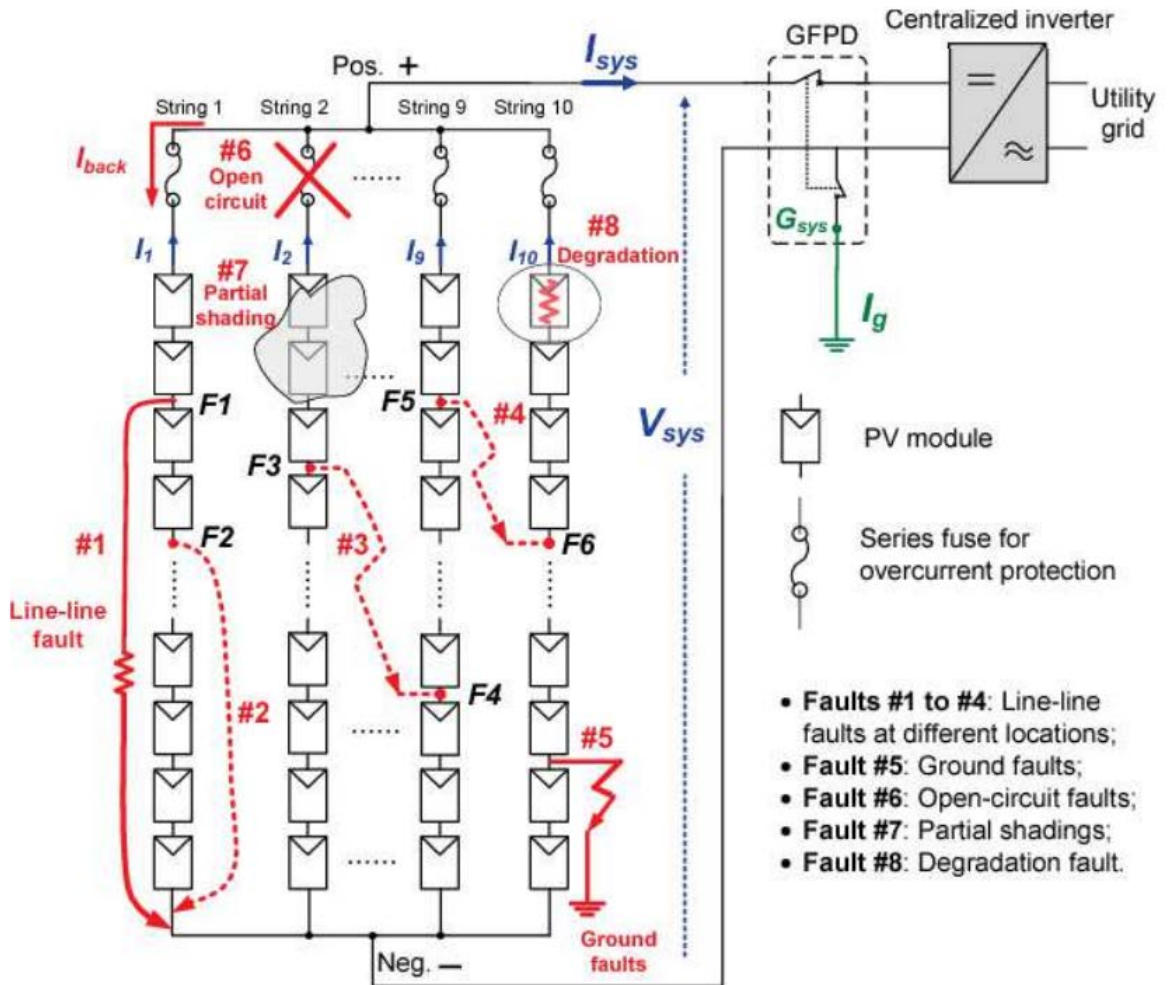
iii. Η αστοχία τόξου μπορεί να προκύψει από τυχόν στραβές συνδέσεις. Επιπλέον, βλάβη στη μόνωση μπορεί να οδηγήσει σε δημιουργία τόξου μεταξύ γειτονικών αγωγών, το οποίο μπορεί να παράγει θόρυβο υψηλής συχνότητας και να προκαλέσει απότομες μειώσεις στο ρεύμα και την τάση εξόδου.

iv. Ένα ακούσιο βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο διαφορετικών σημείων σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αναφέρεται ως σφάλμα γραμμής προς γραμμή.

v. Όταν μια συστοιχία PVS αποσυνδέεται, συμβαίνουν σφάλματα ανοικτού κυκλώματος. Η πλειονότητα των αποσυνδέσεων προκαλείται από κακή συγκόλληση.

vi. Μια ακούσια βραχυκυκλωμένη διαδρομή που περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους αγωγούς ρεύματος μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα γείωσης, τα

οποία αυξάνουν το ρεύμα που διαρρέει τους επηρεαζόμενους αγωγούς. Ανάλογα με την αιτία τους, οι κοινές μορφές σφαλμάτων συνεχούς ρεύματος αναπτύσσονται με διαφορετικό τρόπο, όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα. Τα προσωρινά σφάλματα αναντιστοιχίας, για παράδειγμα, δεν μπορούν να προληφθούν, επειδή προκαλούνται από εξωτερικούς παράγοντες. Ωστόσο, ο ακατάλληλος χειρισμός και η χρήση υλικών υψηλής ποιότητας μπορούν να αποτρέψουν σε μεγάλο βαθμό άλλους τύπους βλαβών, όπως τα μόνιμα σφάλματα αναντιστοιχίας και τα σφάλματα τόξου, τα οποία προκαλούνται κυρίως από εξαρτήματα χαμηλής ποιότητας, κακή συντήρηση και σφάλματα χειρισμού [57]. Επιπλέον, οι οπτικές επιθεωρήσεις ρουτίνας [58-62] μπορούν να εντοπίσουν ηλεκτρομηχανικές ατέλειες στο PVS, αποτρέποντας μελλοντικές εμφανίσεις τέτοιου είδους προβλημάτων. Άλλα είδη ελαττωμάτων είναι αρκετά απλό να εντοπιστούν επί τόπου με εργαλεία και αλγόριθμους παρακολούθησης, ακόμη και όταν είναι αποτέλεσμα ακατάλληλης διαχείρισης.



Εικόνα 18. Παραδείγματα σφαλμάτων DC σε PVS [56]

3.2. Μέθοδοι Ανίχνευσης Σφαλμάτων

Τα σφάλματα ανοικτού κυκλώματος, βραχυκυκλώματος, γήρανσης και σκίασης είναι παραδείγματα σφαλμάτων από την πλευρά του DC που μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρή απώλεια ισχύος, μείωση της διάρκειας ζωής των μονάδων ή ακόμη και σε μείζονα προβλήματα ασφάλειας [63]. Αυτά τα σφάλματα είναι συχνά δύσκολο να αποτραπούν. Παρακάτω περιγράφουμε τις τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων για τη βελτίωση της απόδοσης μετατροπής ισχύος PVS. Στη βιβλιογραφία έχουν

εφαρμοστεί τα ακόλουθα πρότυπα προκειμένου να υπολογιστεί ο συντελεστής μιας μεθόδου ανίχνευσης σφαλμάτων:

- i. Τύποι κατηγοριοποίησης και ανίχνευσης σφαλμάτων: Κάθε τεχνική θα πρέπει να είναι σε θέση να εντοπίσει τον μεγαλύτερο αριθμό σφαλμάτων.
- ii. Οικονομική: Κατά την επιλογή μιας μεθόδου, το κόστος αποτελεί σημαντικό στοιχείο. Ανάλογα με τον τύπο της εγκατάστασης και τις δυνατότητες παρακολούθησης του ΦΒΣ, το κόστος ανά Watt μπορεί να κυμαίνεται από 3,11 έως 1,47 δολάρια, που μεταφράζεται σε ένα φτωχό περιθώριο κέρδους 5-8% [64]. Η μέθοδος ανίχνευσης ελαττωμάτων δεν θα πρέπει να μειώνει περαιτέρω το κέρδος της επένδυσης λόγω του χαμηλού περιθωρίου κέρδους.
- iii. Ευκολία εφαρμογής: ευνοούνται οι τεχνικές που δεν χρειάζονται πολύ επιπλέον εξοπλισμό.
- iv. Καθολική εφαρμογή: οι τεχνικές δεν πρέπει να εξαρτώνται από συγκεκριμένο υλικό.

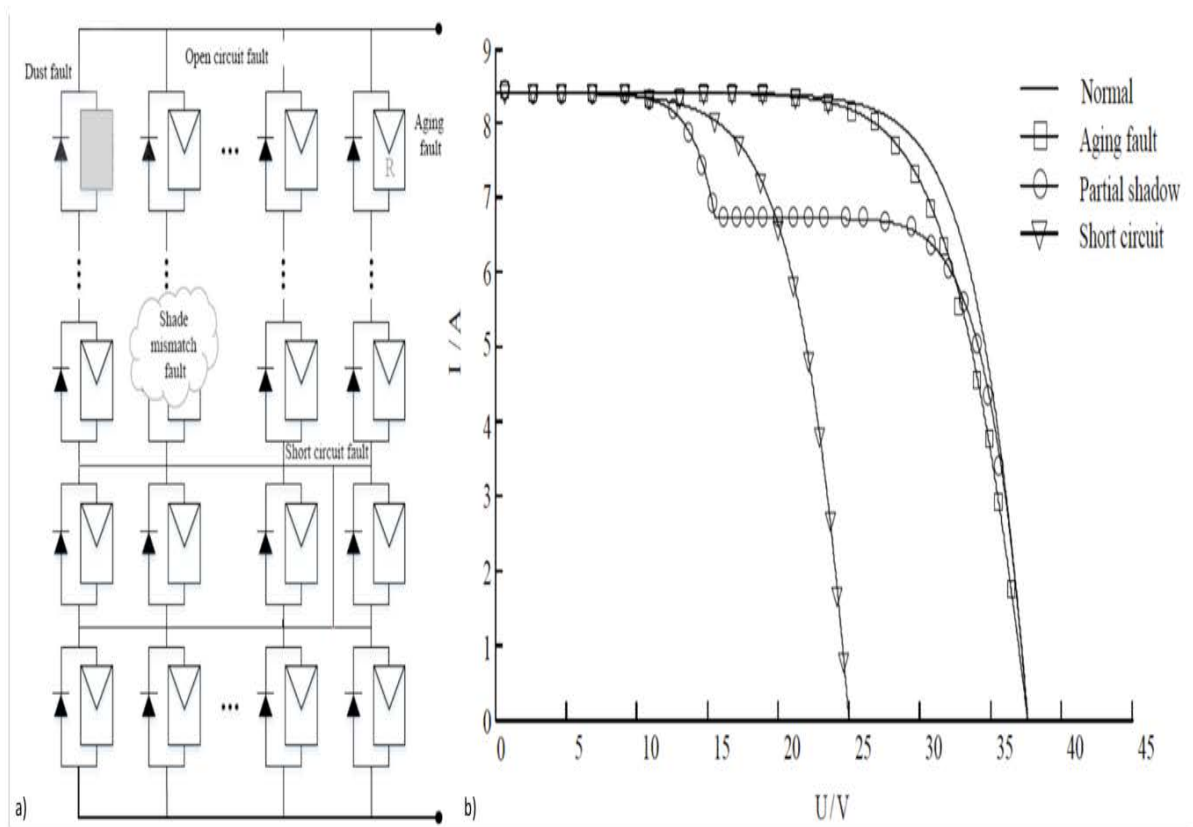
Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορες υλοποιήσεις μεθόδων ανίχνευσης και αναγνώρισης σφαλμάτων. Οι μέθοδοι στις οποίες βασίζονται οι υλοποιήσεις καθορίζουν σε ποια κατηγορία ανήκουν.

A. Μέθοδοι ανεξάρτητες από ακτινοβολία

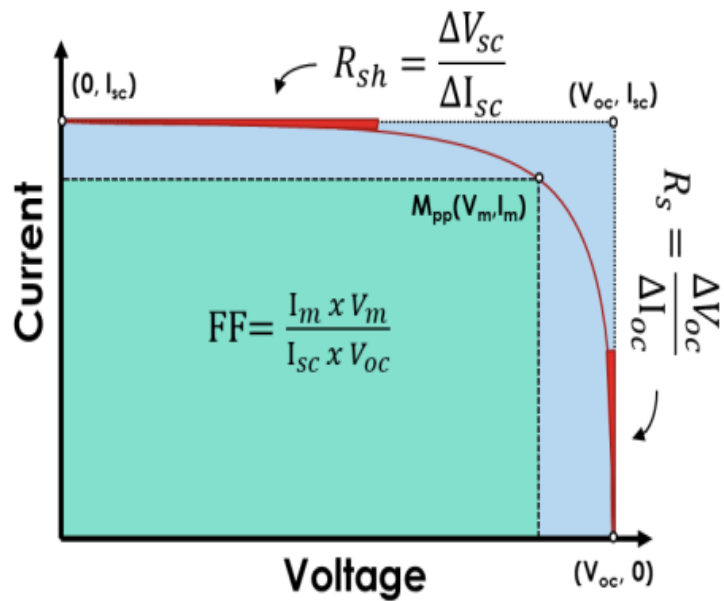
Δύο μέθοδοι για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε μια σειρά φωτοβολταϊκών συστημάτων που είναι ανεξάρτητες από την ακτινοβολία έχουν παρουσιαστεί στις [65], [66]. Η θέση ενός στοιχείου σφάλματος προσδιορίστηκε από τους συγγραφείς με τη χρήση EarthCapacitanceMeasurement (ECM). Η ανακλαστρομετρία στο πεδίο του χρόνου (TDR:Time-domainreflectometry) [67] χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της παρουσίας σφαλμάτων στο PVS με τη σύγκριση της μετατόπισης του σήματος μεταξύ του σήματος εισόδου και του ανακλώμενου σήματος που προκαλείται από την αναντιστοιχία σύνθετης αντίστασης στην εξεταζόμενη γραμμή μεταφοράς.

B. Μέθοδοι με βάση την καμπύλη I-V

Με βάση τις καμπύλες I-V, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για τον εντοπισμό πολυάριθμων σφαλμάτων [68]. Το δυναμικό μετατροπής ενέργειας ενός PVC για μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας και ακτινοβολίας αναπαρίσταται από την καμπύλη I-V [69]. Για τον εντοπισμό της πηγής σφάλματος, το προσομοιωμένο ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοικτού κυκλώματος και το σημείο μέγιστης ισχύος ($Mpp:maximumpowerpoint$) συγκρίνονται με τα υπολογισμένα, όπως προτείνεται από τον αλγόριθμο [70]. Ένα PVS διαιρείται σε N_p σειρές, καθεμία από τις οποίες έχει N_s μονάδες, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία που καθιερώθηκε στο [63]. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι δείκτες τάσης σε πραγματικό χρόνο και τα κατώτατα όρια ανίχνευσης σφαλμάτων. Εάν ξεπεραστούν τα κατώτατα όρια σφαλμάτων, εκδίδεται συναγερμός.



Εικόνα 19. α) Συνήθεις βλάβες ΦΒ. β) Κοινά σφάλματα ΦΒ που απεικονίζονται σε μια καμπύλη I-V πηγή[68]



Εικόνα 20. Καμπύλη I-V με όλες τις παραγόμενες παραμέτρους. Πηγή [70]

Γ. Μέθοδοι βασισμένες στη μηχανική μάθηση

Με διάφορες ονομασίες, όπως υπολογιστική στατιστική, αναγνώριση προτύπων, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, προσαρμοστικό φιλτράρισμα, θεωρία δυναμικών συστημάτων, επεξεργασία εικόνας, εξόρυξη δεδομένων, προσαρμοστικοί αλγόριθμοι κ.λπ., η μηχανική μάθηση (Machine learning, ML) είναι ένα υποπεδίο της τεχνητής νοημοσύνης που συνδυάζει τεχνικές που αναπτύχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες του 20ού αιώνα σε διάφορες επιστημονικές κοινότητες. Στο πλαίσιο της επιστήμης των υπολογιστών, η μηχανική μάθηση αποτελεί μια παραλλαγή του συμβατικού προγραμματισμού, σύμφωνα με την οποία μια μηχανή είναι προικισμένη με την ικανότητα να αποκτά γνώση από δεδομένα από μόνη της, χωρίς ρητές οδηγίες [1] [2]. Σε πολλούς τομείς γνώσης, όπως η όραση υπολογιστών, η αναγνώριση ομιλίας, το φιλτράρισμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και η ιατρική, όπου είναι αδύνατο ή ανέφικτο να δημιουργηθούν παραδοσιακοί αλγόριθμοι για την εκτέλεση των απαραίτητων εργασιών, χρησιμοποιούνται μέθοδοι μηχανικής μάθησης [3].

Η λέξη χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1959 [4] από τον Arthur Samuel, ο οποίος διέκρινε δύο διαφορετικές μεθόδους στη θεωρία. Η πρώτη τεχνική, γνωστή ως νευρωνικό δίκτυο, δημιουργεί μηχανές μηχανικής μάθησης γενικής χρήσης που μαθαίνουν από ένα τυχαία συνδεδεμένο δίκτυο μεταγωγής χρησιμοποιώντας μια ρουτίνα ενισχυτικής μάθησης που αποτελείται από ανταμοιβές και τιμωρίες. Η δεύτερη, πιο εστιασμένη προσέγγιση περιλαμβάνει την προσομοίωση του ίδιου είδους εξαιρετικά δομημένου δικτύου που προορίζεται να μαθαίνει μόνο συγκεκριμένες εργασίες. Πολύ πιο αποδοτική από υπολογιστική άποψη είναι η δεύτερη προσέγγιση, η οποία χρειάζεται επίβλεψη και πρέπει να επαναπρογραμματίζεται για κάθε νέα εφαρμογή.

Η μηχανική μάθηση διερευνά τη δημιουργία και την ανάπτυξη αλγορίθμων που μπορούν να μαθαίνουν και να κάνουν προβλέψεις για ένα σύνολο δεδομένων [6] δημιουργώντας επαγωγικά ένα μοντέλο βασισμένο σε δείγματα. Συνδέεται στενά με την αναγνώριση προτύπων και τη θεωρία υπολογιστικής μάθησης [5, 6]. Σε τομείς της επιστήμης των υπολογιστών όπου η ρητή δημιουργία και ο προγραμματισμός αλγορίθμων είναι ανέφικτοι, χρησιμοποιείται η μηχανική μάθηση.

Οι μηχανές αναζήτησης, η όραση υπολογιστών, η οπτική αναγνώριση χαρακτήρων, η ανίχνευση εισβολών σε δίκτυα, το φιλτράρισμα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου για την αποτροπή ανεπιθύμητης αλληλογραφίας και η παραβίαση δεδομένων είναι μερικά παραδείγματα πιθανών χρήσεων.

Η υπολογιστική στατιστική ασχολείται με την πραγματοποίηση προβλέψεων με υπολογιστές- σχετίζεται και συχνά επικαλύπτεται με τη μηχανική μάθηση. Η μαθηματική βελτιστοποίηση, η οποία προσφέρει τεχνικές, θεωρίες και πεδία εφαρμογής σε αυτόν τον κλάδο, συνδέεται στενά με τη μηχανική μάθηση. Στον κόσμο των επιχειρήσεων, αναφέρεται ως προγνωστική ανάλυση.

Στο βιβλίο του "Machine Learning", ο Tom M. Mitchell έδωσε τον ορισμό της μηχανικής μάθησης που αναφέρεται συχνότερα: "Ένα πρόγραμμα λέγεται ότι μαθαίνει από την εμπειρία E σε σχέση με κάποια κατηγορία εργασιών T και από τη μέτρηση της απόδοσης P , εάν η απόδοσή του στην εργασία T , όπως μετράται από το P , βελτιώνεται με την εμπειρία E ". [18] Απλοποιώντας περαιτέρω, μπορεί κανείς να δηλώσει ότι ένα λογισμικό μαθαίνει όταν η απόδοσή του βελτιώνεται μετά την ολοκλήρωση μιας εργασίας. Επειδή ορίζει τη μηχανική μάθηση λειτουργικά και όχι γνωστικά, ο ορισμός του Mitchell είναι αξιοσημείωτος. Θέτοντας το ερώτημα "Μπορούν οι μηχανές να κάνουν ό,τι μπορούμε να κάνουμε εμείς (ως σκεπτόμενες οντότητες);" στη θέση του προηγούμενου, ο Mitchell υιοθετεί ουσιαστικά τον ορισμό που πρότεινε ο Alan Turing στην εργασία του "Computational Machines and Intelligence". [19].

Η ικανότητα μιας μηχανής να εκτελεί επαγωγικό συλλογισμό, ή να γενικεύει από την εμπειρία της, είναι ο πρωταρχικός στόχος της μηχανικής μάθησης [20]. Όταν μια μηχανή αποκτά εμπειρία σε ένα σύνολο δεδομένων μάθησης, η γενίκευση αναφέρεται στην ικανότητά της να εκτελεί με ακρίβεια νέα παραδείγματα ή εργασίες που δεν έχει βιώσει ποτέ. Το καθήκον της μηχανής είναι να κατασκευάσει ένα γενικό πιθανοτικό μοντέλο του χώρου των περιστατικών, έτσι ώστε να μπορεί να παράγει επαρκώς ακριβείς προβλέψεις όταν εκτίθεται σε νέες περιπτώσεις. Τα παραδείγματα εκπαίδευσης υποτίθεται ότι προέρχονται από κάποια κατανομή πιθανοτήτων, η οποία είναι συνήθως άγνωστη και υποτίθεται ότι είναι αντιπροσωπευτική του χώρου των εμφανίσεων του φαινομένου που πρόκειται να μάθει.

Ένα υποπεδίο της θεωρητικής επιστήμης των υπολογιστών, γνωστό ως θεωρία μάθησης, ασχολείται με την υπολογιστική ανάλυση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και της αποτελεσματικότητάς τους. Η θεωρία μάθησης δεν εγγυάται την επιτυχία των αλγορίθμων επειδή τα παραδείγματα εκπαίδευσης είναι πεπερασμένα σύνολα δεδομένων και είναι αδύνατο να προβλεφθεί πώς θα εξελιχθεί ένα μοντέλο στο μέλλον. Ωστόσο, είναι εξαιρετικά χαρακτηριστικό ότι πιθανοτικοί περιορισμοί διέπουν την εν λόγω απόδοση. Το σφάλμα γενίκευσης μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας διόρθωση μεροληψίας-διακύμανσης.

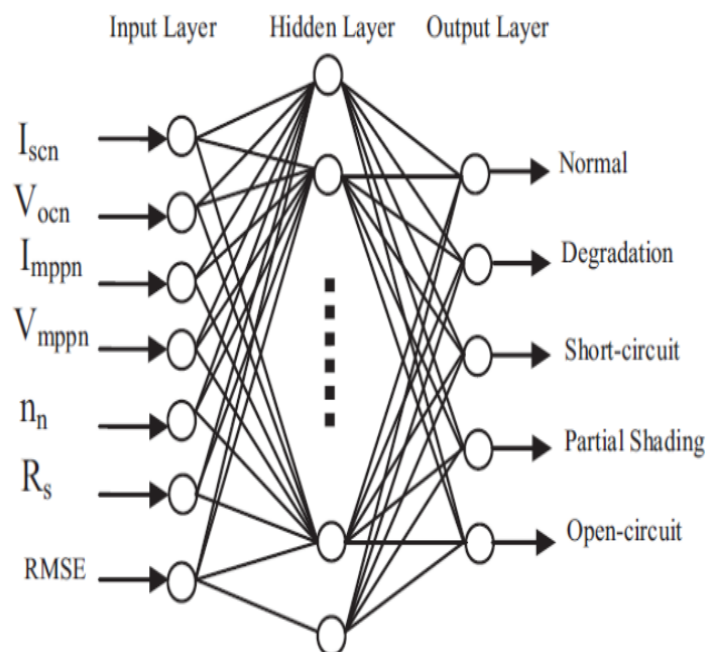
Η πολυπλοκότητα της επαγωγικής υπόθεσης πρέπει να ταιριάζει με την πολυπλοκότητα της υποκείμενης συνάρτησης στα δεδομένα, ώστε η γενίκευση να εκτελείται όσο το δυνατόν καλύτερα. Το μοντέλο παρουσιάζει υποπροσαρμογή εάν η υπόθεση είναι λιγότερο πολύπλοκη από τη συνάρτηση. Το σφάλμα μάθησης μειώνεται καθώς η πολυπλοκότητα του μοντέλου αυξάνεται ως απάντηση. Από την άλλη πλευρά, η υπερπροσαρμογή του μοντέλου οδηγεί σε φτωχότερη γενίκευση εάν η υπόθεση είναι πολύ περίπλοκη [21].

Οι θεωρητικοί της μάθησης εξετάζουν τη χρονική πολυπλοκότητα και την εφικτότητα της μάθησης εκτός από τους περιορισμούς της απόδοσης. Εάν ένας υπολογισμός μπορεί να ολοκληρωθεί σε πολυωνυμικό χρόνο, θεωρείται βιώσιμος.

Πολυάριθμες τεχνικές βασισμένες στη μηχανική μάθηση έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία [68].

Πολλές από αυτές τις τεχνικές τροφοδοτούν τα νευρωνικά τους δίκτυα με πληροφορίες που λαμβάνονται από τις καμπύλες I-V. Άλλες τεχνικές εκτιμούν την καμπύλη I-V για μια δεδομένη είσοδο χρησιμοποιώντας δεδομένα αισθητήρων. Οι ξεχωριστές τεχνικές τους επιτρέπουν να ταξινομηθούν ως αυτόνομες μέθοδοι, ακόμη και αν χρησιμοποιούν ή παράγουν δεδομένα που συνδέονται με την καμπύλη I-V. Στην προσέγγιση που περιγράφεται στο [71] χρησιμοποιείται μια Extreme Learning Machine (KELM) με βάση τον πυρήνα. Έχει πέντε εξόδους (τέσσερις ελαττωματικές καταστάσεις και μία κανονική κατάσταση) και επτά εισόδους (κανονικοποιημένες τιμές των V_{oc} , I_{sc} , V_{mpp} , I_{mpp} , n , R_s και Root-Mean-Square Error, RMSE). Τα ελαττώματα μερικής σκίασης, τα σφάλματα φθοράς και τα προβλήματα ανοικτού/βραχυκυκλώματος ανιχνεύονται και από τις τέσσερις προσεγγίσεις. Μια τεχνική που χρησιμοποιεί ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ANN:

Artificial Neural Network) με δύο x επτά x δώδεκα x δύο νευρώνες προτάθηκε από την [72] για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε πραγματικό χρόνο. Αφού λάβει δεδομένα θερμοκρασίας και ακτινοβολίας ως είσοδο, το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN) προβλέπει τις τιμές τάσης και ρεύματος εξόδου, οι οποίες στη συνέχεια συγκρίνονται με τις μετρούμενες τιμές. Υπάρχει σφάλμα εάν η απόκλισή τους είναι μεγαλύτερη από το καθορισμένο ποσό. Στο [73], σε έναν αλγόριθμο Artificial Bee Colony (ABC: Artificial Bee Colony) δόθηκαν δεδομένα θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Βρέθηκαν οι προβλεπόμενες τιμές για την ισχύ, την τάση και το ρεύμα στο υψηλότερο σημείο ισχύος. Μια ένδειξη είναι η απόκλιση μεταξύ των μετρούμενων και των προσομοιωμένων τιμών. Με ένα αξιοσημείωτο ποσοστό επιτυχίας 92,1%, η εργασία του [74] πρότεινε την αναλογία των θεωρητικών προς τις μετρημένες τιμές ισχύος και τάσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε μια μέθοδο ανίχνευσης σφαλμάτων με βάση το ANN.



Εικόνα 21. Μοντέλο διάγνωσης βλαβών SLFN με βάση το KELM [14]

Δ. Μέθοδοι με βάση τη θερμότητα

Οι συγγραφείς του [75] χρησιμοποίησαν θερμικές κάμερες για τον εντοπισμό θερμών περιοχών που προκύπτουν από την υποβάθμιση των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Το ηλεκτρικό μοντέλο και η εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου συνδέθηκαν στο [76] για να δημιουργηθεί μια σύνδεση μεταξύ των ηλεκτρικών και θερμικών ιδιοτήτων του ΦΒΣ. Τελικά, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο για την ανίχνευση ελαττωμάτων που βασίζεται σε παραμέτρους. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που παράγουν λιγότερο ρεύμα πολώνονται αντίστροφα, λειτουργούν ως αντιστάσεις και απελευθερώνουν θερμότητα σε σύγκριση με άλλα φωτοβολταϊκά στοιχεία που συνδέονται σε σειρά. Όταν η θερμότητα εκλύεται, η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά και φαίνεται στη θερμική απεικόνιση ως λαμπρές κηλίδες. Διάφορες λήψεις θερμικής απεικόνισης, συμπεριλαμβανομένων κοντινών και πανοραμικών όψεων, έχουν χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό αυτών των μεταβολών της θερμοκρασίας στο [77].

Ε. Παρακολούθηση υπολειπόμενου ρεύματος (RCM: Residual current monitoring)

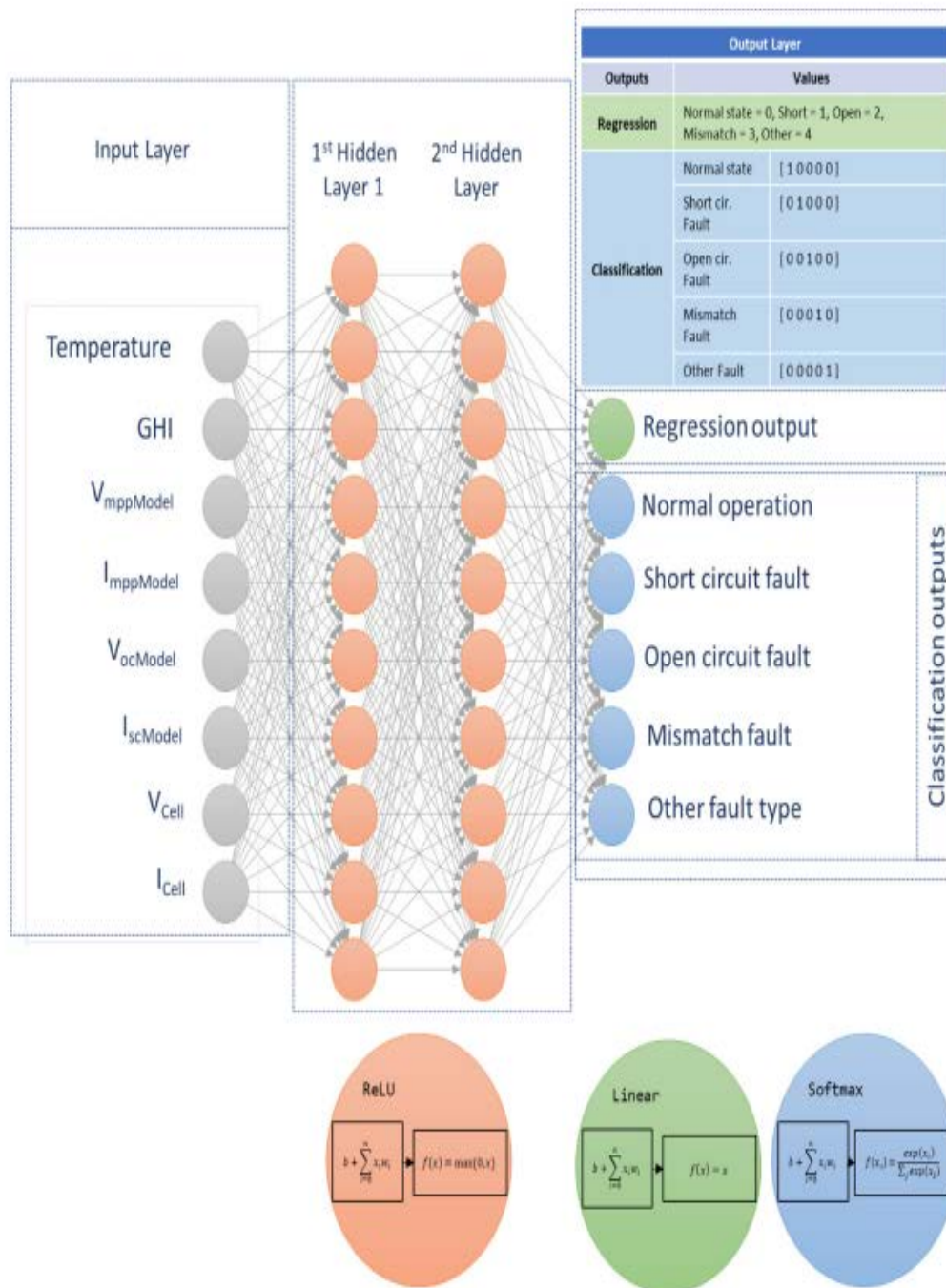
Η ύπαρξη υπολειπόμενων ρευμάτων που προκαλούνται από προβλήματα μόνωσης μπορεί να μειώσει σοβαρά την ισχύ εξόδου ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα σφάλματα γραμμής προς γραμμή και γραμμής προς γη μπορούν να εντοπιστούν με τη χρήση αυτής της τεχνικής [78]. Μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως εγχειρίδιο για την προστασία από σφάλματα γης/γραμμής προς γραμμή. Για την ασφάλεια του συστήματος, σε ένα PVS πρέπει να εγκατασταθεί μια συσκευή παρακολούθησης του ρεύματος διαρροής [79]. Η συσκευή αυτή μπορεί να εμποδίσει την έναρξη πυρκαγιάς. Επιπλέον, δεν ανιχνεύονται όλα τα είδη σφαλμάτων γείωσης που θα μπορούσαν να προκύψουν σε γειωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα από τα παραδοσιακά συστήματα προστασίας που βασίζονται σε ασφάλειες [30]. Η χρήση μιας συσκευής υπολειπόμενου ρεύματος μπορεί να συμβάλει στη μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς. [79].

ΣΤ. Παρακολούθηση τόξου

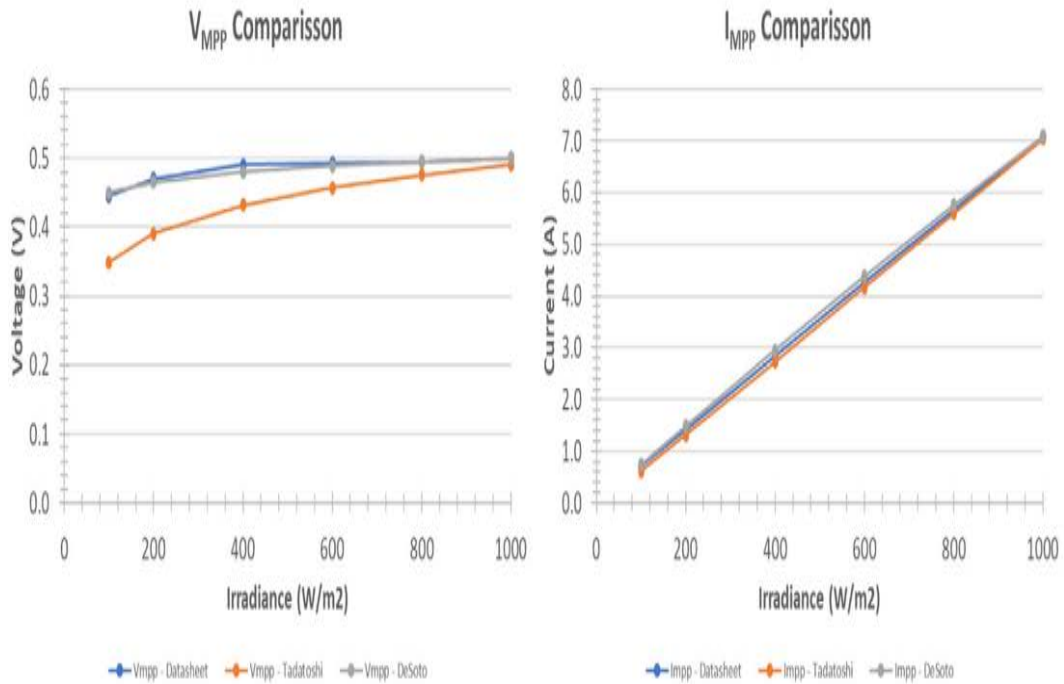
Τα τελευταία δέκα χρόνια, οι οικιακές εγκαταστάσεις υποχρεούνται να χρησιμοποιούν ανιχνευτή σφαλμάτων τόξου και διακόπτη κυκλώματος (AFDCI) σύμφωνα με την ενότητα 690.11 του Εθνικού Ηλεκτρικού Κώδικα® (NEC®:NationalElectricalCode®). Με τη χρήση τέτοιων κυκλωμάτων, οι ηλιακές εγκαταστάσεις μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο έναρξης πυρκαγιών λόγω σφαλμάτων τόξου. Οι περισσότερες μέθοδοι για την ανίχνευση σφαλμάτων τόξου στην πλευρά DC του φωτοβολταϊκού βασίζονται στον θόρυβο εναλλασσόμενου ρεύματος που παράγεται κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος τόξου. Αφού διεξήγαγαν μια πειραματική έρευνα σχετικά με το θόρυβο που παράγεται από σφάλματα τόξου, οι συγγραφείς του [81] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, μεταξύ 1 Hz και 100 kHz, ο θόρυβος τόξου είναι μεγαλύτερος από το θόρυβο χωρίς τόξο.

Ζ. Νευρωνικά δίκτυα τροφοδότησης πολλαπλών εξόδων για ανίχνευση σφαλμάτων φωτοβολταϊκού συστήματος

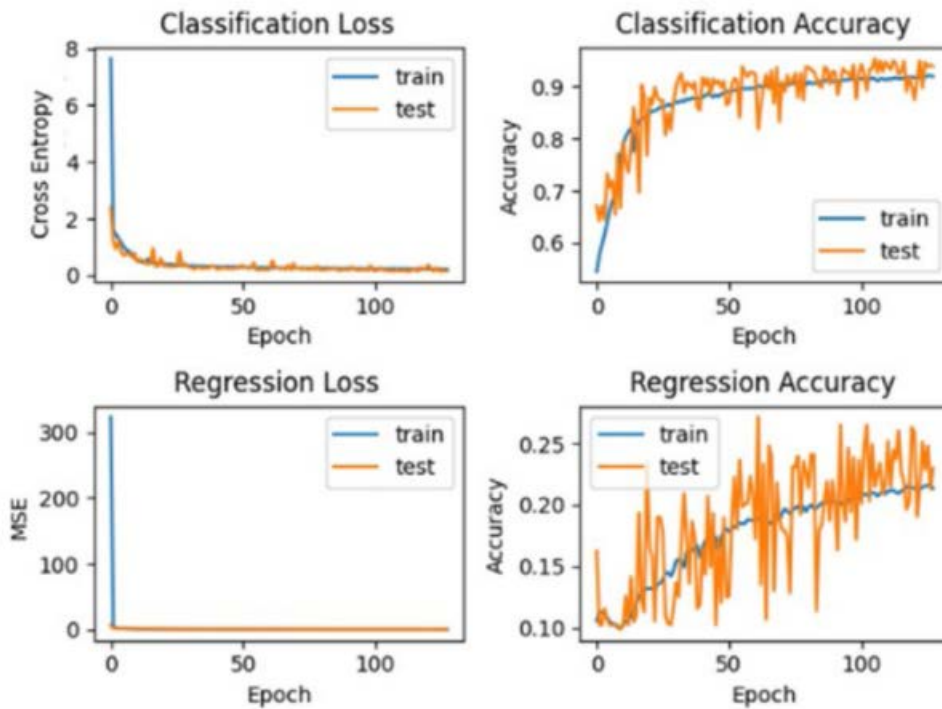
Σε μια πρόσφατη μελέτη [83] αναπτύχθηκε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο πολλαπλών εξόδων (ANN) για την ανίχνευση και διάγνωση προβλημάτων στην πλευρά DC ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (PVS). Για να επιβεβαιωθεί ότι ο αλγόριθμος μπορούσε να εντοπίσει και να ταξινομήσει τα σφάλματα που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία του πειράματος καθώς και κατά την κανονική λειτουργία στη μέγιστη ισχύ, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και συγκριτική αξιολόγηση. Αποδείχθηκε ότι η έξοδος ταξινόμησης δίνει μια πιο ακριβή προσέγγιση της κατάστασης λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου από ό,τι το αποτέλεσμα της παλινδρόμησης. Χρησιμοποιώντας την έξοδο ταξινόμησης, η επινοηθείσα προσέγγιση ανιχνεύει σφάλματα ανοικτού κυκλώματος, βραχυκυκλώματος και αναντιστοιχίας με ακρίβεια 93,4 %. Η έξοδος παλινδρόμησης αποδίδει μια εκτίμηση της κατάστασης λειτουργίας με μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE: σφάλματα αναντιστοιχίας) 0,305. Τα αποτελέσματα είναι πολλά υποσχόμενα σε σύγκριση με προηγούμενες υλοποιήσεις, γεγονός που υποδηλώνει ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί αυτή η προσέγγιση.



Εικόνα 22. Το αναπτυγμένο feed-forward ANN από τους Voutsinas et al., [83]. Οι νευρώνες με γκρι χρώμα απεικονίζουν την είσοδο, το πορτοκαλί απεικονίζει τα κρυφά στρώματα των νευρώνων, ενώ οι νευρώνες του στρώματος εξόδου απεικονίζονται με μωβ για την έξοδο παλινδρόμησης και με μπλε για την έξοδο ταξινόμησης. Για κάθε νευρώνα των κρυφών επιπέδων και του στρώματος εξόδου, η συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται φαίνεται στην κάτω πλευρά του σχήματος.



Εικόνα 23. Γραφική αναπαράσταση των μετρήσεων τάσης και έντασης που παράγονται από SDM με βάση τη μέθοδο Tadatoshi (Πορτοκαλί) και τη μέθοδο DeSoto (γκρι), σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του φύλλου δεδομένων (μπλε) από τους Voutsinas et al., [83]



Εικόνα 24. Γραφική αναπαράσταση των μετρήσεων (Ακρίβεια και Απώλεια) για τις δύο εξόδους του ANN από την έρευνα των Voutsinas et al. [83]

Χρησιμοποιώντας επιτόπιες μετρήσεις από ένα ηλιακό κύτταρο και καμπύλες I-V, το παραπάνω σχήμα μελετήθηκε προκειμένου να αναπτυχθεί μια μέθοδος αναγνώρισης και εντοπισμού σφαλμάτων με βάση ANN πολλαπλών εξόδων.

Εξετάστηκαν η αποτελεσματικότητα, τα οφέλη και τα μειονεκτήματα των τεχνικών που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Τέλος, αξιολογήθηκε η ακρίβεια και η ικανότητα εντοπισμού τουλάχιστον τεσσάρων διαφορετικών ειδών βλάβης μεταξύ των μεθόδων που περιγράφηκαν προηγουμένως και του αλγορίθμου που δημιουργήθηκε. Τα αποτελέσματα είναι ελπιδοφόρα και καταδεικνύουν ότι στα PVS θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί εφαρμογή του δημιουργηθέντος ANN. Το SDM της δημιουργηθείσας μεθόδου αποδίδει εξαιρετικά καλά. Ανεξάρτητα από το πόσο υψηλή ή χαμηλή είναι η τρέχουσα ακτινοβολία, αποδίδει αποτελέσματα που είναι συγκρίσιμα με τις τιμές ελέγχου που παρέχονται από τον κατασκευαστή. Επειδή η επινοηθείσα μέθοδος έχει ακρίβεια άνω του 90%, έχει παρόμοιες επιδόσεις με

άλλες μεθόδους που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. (93,4 % για ταξινόμηση). Με MAE 0,305, η έξοδος παλινδρόμησης προβλέπει τη λειτουργική κατάσταση του PVS. Επιπλέον, η κλήση παλινδρόμησης είναι παρόμοια γρήγορη αλλά χρησιμοποιεί περισσότερη μνήμη (770 kB/κλήση, 43 ms/κλήση), ενώ η πρόβλεψη εξόδου με χρήση της εξόδου ταξινόμησης είναι γρήγορη και αποδοτική ως προς τη μνήμη (220 kB/κλήση, 44 ms/κλήση).

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η εν λόγω μελέτη εξετάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνικών για την αντιμετώπιση προβλημάτων στην πλευρά DC ενός PVS που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία.

Ορισμένες τεχνικές χρειάζονται επιπλέον υλικό και κυκλώματα για να λειτουργήσουν, ενώ άλλες χρειάζονται μεγάλη εισαγωγή δεδομένων για τη δημιουργία ενός λειτουργικού μοντέλου που μπορεί να συγκριθεί με πραγματικές παρατηρήσεις. Κατά συνέπεια, το κόστος επένδυσης για την εφαρμογή μιας από αυτές τις τεχνικές σε ένα PVS μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τα απαραίτητα εξωτερικά κυκλώματα, την υπολογιστική ισχύ και τους κατάλληλους αισθητήρες. Οι μέθοδοι που βασίζονται σε δεδομένα που παράγονται από καμπύλες I-V [63], [70] και οι μέθοδοι που βασίζονται στη μηχανική μάθηση [71], [73] μπορούν να ανιχνεύσουν πολλαπλούς τύπους προβλημάτων με βάση τα τέσσερα κριτήρια που έχουν καθοριστεί και τα δεδομένα. Υπάρχει μόνο ένας τύπος προβλήματος που μπορεί να ανιχνευθεί από τις τεχνικές [65], [66], [81]-[83], [67], [72], [74]-[79]. Επιπλέον, οι μέθοδοι [65]-[67] απαιτούν το PVS να είναι εκτός σύνδεσης, επομένως μπορούν να αντικατασταθούν από άλλη προσέγγιση σχεδιασμένη για χρήση σε πραγματικό χρόνο. Οι προσεγγίσεις [75]-[77] είναι ακριβείς, καθώς χρειάζονται θερμικές κάμερες μαζί με πρόσθετο υλικό και λογισμικό για την επεξεργασία της εικόνας. Ανάλογα με την τεχνική και τις προδιαγραφές της, το κόστος των υπόλοιπων προσεγγίσεων κυμαίνεται από χαμηλό έως μέτριο.

Επιπλέον, η πλειονότητα των τρόπων δεν είναι πολύ δύσκολη στη χρήση. Οι μόνες τεχνικές που είναι πιο περίπλοκες είναι εκείνες που βασίζονται στη μηχανική μάθηση, οι οποίες χρειάζονται τη δημιουργία και την εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων, και εκείνες που βασίζονται στη θερμότητα, οι οποίες χρειάζονται εξελιγμένα μηχανήματα. Από τις τεχνικές και τις υλοποιήσεις που παρουσιάστηκαν, προτείνεται η συστηματική οπτική επιθεώρηση [58] σε συνδυασμό με ένα από τα συστήματα των [63], [70], [71] έως [78], [79], προκειμένου να παρακολουθούνται όσο το δυνατόν περισσότερα διαφορετικά είδη σφαλμάτων. Επιπλέον, η χρήση AFDCI είναι απαραίτητη για την πλήρη συμμόρφωση με το πρότυπο NEC®.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διατριβής πραγματοποιήθηκε μια μελέτη των τυπικών τύπων σφαλμάτων που επηρεάζουν την πλευρά DC του φωτοβολταϊκού συστήματος. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν μοντέλα που αναπαράγουν τη λειτουργία μιας ΦΒ μονάδας σε λειτουργία. Οι προτεινόμενες από τη βιβλιογραφία διαδικασίες εξετάστηκαν ως προς την αποτελεσματικότητα, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα. Τέλος, με βάση έναν αριθμό παραγόντων που αξιολογούν την απόδοση και την αξιοπιστία της κάθε μεθόδου, κατηγοριοποιήθηκαν οι υλοποιήσεις που βασίζονται στις προαναφερθείσες τεχνικές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Bagher, A.M., Vahid, M.M.A. and Mohsen, M. (2015) Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3, 94-113.

<http://dx.doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17>

[2] Hosenuzzaman, M., Rahim, N.A., Selvaraj, J., Hasanuzzaman, M., Malek, A.B.M.A. and Nahar, A. (2015) Global Prospects, Progress, Policies, and Environmental Impact of Solar Photovoltaic Power Generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 284–297.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.046>

[3] Yue, C.D. and Huang, G.R. (2011) An Evaluation of Domestic Solar Energy Potential in Taiwan Incorporating Land Use Analysis. *Energy Policy*, 39, 7988-8002.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.054>

[4] Tsai, H.-L., Tu, C.-S. and Su, Y.-J. (2008) Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, October 2008, 1-6.

[5] Suthar, M., Singh, G.K. and Saini, R.P. (2013) Comparison of Mathematical Models of Photo-Voltaic (PV) Module and Effect of Various Parameters on Its Performance. *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)*, 10-12 April 2013, 1354-1359.

<http://dx.doi.org/10.1109/ICEETS.2013.6533584>

[6] Senthilingam, M. (2014) A Brighter Future: Five Ideas That Will Change Solar Energy.

<http://edition.cnn.com/2014/09/18/tech/innovation/solar-cells-of-the-future/>

[7] Das, N., Al Ghadeer, A. and Islam, S. (2014) Modelling and Analysis of Multi-Junction Solar Cells to Improve the Conversion Efficiency of Photovoltaic Systems. Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, 28 September-1 October 2014, 1-5.

<http://dx.doi.org/10.1109/aupec.2014.6966482>

[8] Soon, J.J., Low, K.-S. and Goh, S.T. (2014) Multi-Dimension Diode Photovoltaic (PV) Model for Different PV Cell Technologies. 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, 1-4 June 2014, 2496-2501.

<http://dx.doi.org/10.1109/ISIE.2014.6865012>

[9] Gow, A. and Manning, C.D. (1999) Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power-Electronics Simulation Studies. IEE Proceedings—Electric Power Applications, 146, 193-200.

<http://dx.doi.org/10.1049/ip-epa:19990116>

[10] Gow, J.A. and Manning, C.D. (1996) Development of a Model for Photovoltaic Arrays Suitable for Use in Simulation Studies of Solar Energy Conversion Systems. Sixth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, 23-25 September 1996, 69-74.

<http://dx.doi.org/10.1049/cp:19960890>

[11] Chowdhury, S., Taylor, G.A., Chowdhury, S.P., Saha, A.K. and Song, Y.H. (2007) Modeling, Simulation and Performance Analysis of a PV Array in an

Embedded Environment. 42nd International Universities Power Engineering Conference, Brighton, 4-6 September 2007, 781-785.

<http://dx.doi.org/10.1049/cp:19960890>

[12] Hovinen, A. (1994) Fitting of the Solar Cell/V-Curve to the Two Diode Model. *Physica Scripta*, T54, 175-176.

<http://dx.doi.org/10.1049/cp:19960890>

[13] Hyvarinen, J. and Karila, J. (2003) New Analysis Method for Crystalline Silicon Cells. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2, 1521-1524.

[14] Kurobe, K. and Matsunami, H. (2005) New Two-Diode Model for Detailed Analysis of Multicrystalline Silicon Solar Cells. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44, 8314-8321.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.44.8314>

[15] Nishioka, K., Sakitani, N., Kurobe, K., Yamamoto, Y., Ishikawa, Y., Uraoka, Y. and Fuyuki, T. (2003) Analysis of the Temperature Characteristics in Polycrystalline Si Solar Cells Using Modified Equivalent Circuit Model. *Japanese Journal of Applied Physics*, 42, 7175-7179.

<http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.42.7175>

[16] Nishioka, K., Sakitani, N., Uraoka, Y. and Fuyuki, T. (2007) Analysis of Multicrystalline Silicon Solar Cells by Modified 3-Diode Equivalent Circuit Model Taking Leakage Current through Periphery into Consideration. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91, 1222-1227.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2007.04.009>

[17] Patel, H. and Agarwal, V. (2008) MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics. IEEE Transactions on Energy Conversion, 23, 302-310.

<http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2007.914308>

[18] Alonso-Gracia, M.C., Ruiz, J.M. and Chenlo, F. (2006) Experimental Study of Mismatch and Shading Effects. Solar Energy Materials and Solar Cells, 90, 329-340.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2005.04.022>

[19] Kawamura, H., Naka, K., Yonekura, N., Yamanaka, S., Kawamura, H., Ohno, H. and Naito, K. (2003) Simulation of I-V Characteristics of a PV Module with Shaded PV Cells. Solar Energy Materials and Solar Cells, 75, 613-621.

[http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00134-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00134-4)

[20] Carrero, C., Amador, J. and Arnaltes, S. (2007) A Single Procedure for Helping PV Designers to Select Silicon PV Modules and Evaluate the Loss Resistances. Renewable Energy, 32, 2579-2589.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2007.01.001>

[21] Liu, S. and Dougal, R. (2002) Dynamic Multiphysics Model for Solar Array. IEEE Transactions on Energy Conversion, 17, 285-294.

<http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2002.1009482>

[22] Yadir, S., Benhmida, M., Sidki, M., Assaid, E. and Khaidar, M. (2009) New Method for Extracting the Model Physical Parameters of Solar Cells Using Explicit

Analytic Solutions of Current-Voltage Equation. 2009 International Conference on Microelectronics (ICM), Marrakech, 19-22 December 2009, 390-393.

<http://dx.doi.org/10.1109/icm.2009.5418599>

[23] Aazou, S. and Assaid, E.M. (2009) Modelling Real Photovoltaic Solar Cell Using Maple. 2009 International Conference on Microelectronics (ICM), Marrakech, 19-22 December 2009, 394-397.

<http://dx.doi.org/10.1109/ICM.2009.5418600>

[24] Ramos Hernanz, J., Campayo Martín, J.J., Zamora Belver, I., Larrañaga Lesaka, J., Zulueta Guerrero, E. and Puelles Pérez, E. (2010) Modelling of Photovoltaic Module. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada, 23-25 March 2010.

[25] Ahmad, T. and Sobhan, S. (2015) Performance Study of Photovoltaic Solar Cell. International Journal of Research in Engineering and Technology, 4, 12-18.

<http://dx.doi.org/10.15623/ijret.2015.0410003>

[26] Nayan, M.F. and Safayet Ullah, S.M. (2015) Modelling of Solar Cell Characteristics Considering the Effect of Electrical and Environmental Parameters. 2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET), Dhaka, 11 September 2015, 1-6.

<http://dx.doi.org/10.1109/icget.2015.7315096>

[27] Xiao, W., Dunford, W.G. and Capel, A. (2004) A Novel Modeling Method for Photovoltaic Cells. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC 04, 3, 1950-1956.

<http://dx.doi.org/10.1109/PESC.2004.1355416>

[28] Alboteanu, L., Manolea, G. and Ravigan, F. (2008) Methods of Modeling for Photovoltaic Cells. Annals of the University of Craivo, Electrical Engineering Series, No. 32.

[29] Ishaque, K., Salam, Z. and Taheri, H. (2011) Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model. Journal of Power Electronics, 11, 179-187.

<http://dx.doi.org/10.6113/JPE.2011.11.2.179>

[30] Alsayid, B. (2012) Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell/Module/Array with Two-Diode Model. International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE), 1, 6-11.

[31] Salam, Z., Ishaque, K. and Taheri, H. (2010) An Improved Two-Diode Photovoltaic (PV) Model for PV System. 2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, New Delhi, 20-23 December 2010, 1-5.

<http://dx.doi.org/10.1109/pedes.2010.5712374>

[32] Azim, M.I., Rahman, M.R. and Rahman, M.F. (2013) Integration of the Output of a Silicon Solar Cell to the Grid System. European Scientific Journal, 9, 261-271.

[33] Basic Photovoltaic Principles and Methods, SERI/SP-290-1448, Solar Information Module 6213 (1982).

[34] Villalva, M.G. and Gazoli, J.R. (2009) Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, 24, 1198-1208.

<http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>

[35] Shannan, A.A., Yahaya, N.Z. and Singh, B. (2013) Single-Diode Model and Two-Diode Model of PV Modules: A Comparison. 2013 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), Mindeb, 29 November-1 December 2013, 210-214.

<http://dx.doi.org/10.1109/ICCSCE.2013.6719960>

[36] Pavan Kumar, A.V., Parimi, A.M. and Rao, K.U. (2014) Performance Analysis of a Two-Diode Model of PV Cell for PV Based Generation in MATLAB. 2014 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), Ramanathapuram, 8-10 May 2014, 68-72.

<http://dx.doi.org/10.1109/icaccct.2014.7019191>

[37] Guechi, A. and Chegaar, M. (2007) Effects of Diffuse Spectral Illumination on Microcrystalline Solar Cells. Journal of Electron Devices, 5, 116-121.

[38] Villalva, M.G. and Gazoli, J.R. (2009) Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, 24, 1198-1208.

<http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>

[39]

<http://electronics.stackexchange.com/>

[40] Ahmad, T., Sobhan, S. and Arif, S. (2016) MATLAB Simulation Based Efficiency Study for Two Diode Model of Photovoltaic Solar Cell I. International Journal of Engineering and Technology (IJET), 6, 28-35.

[41] Dubey, S., Sarvaiya, J.N. and Seshadri, B. (2013) Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World—A Review. Energy Procedia, 33, 311-321.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>

[42] Ginley, D.S. and Cahen, D., Eds. (2011) Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability. Cambridge University Press, Cambridge.

<http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511718786>

[43] Abd El-Basit, W., Abd El-Maksood, A.M. and Soliman, F.A.E.-M.S. (2013) Mathematical Model for Photovoltaic Cells. Leonardo Journal of Sciences, 23, 13-28.

[44] Yan, J. (2015) Handbook of Clean Energy Systems, 6 Volume Set. Vol. 5, John Wiley & Sons, Hoboken.

<http://dx.doi.org/10.1002/9781118991978>

[45] Ramabadran, R. and Mathur, B. (2009) Matlab Based Modelling and Performance Study of Series Connected SPVA under Partial Shaded Conditions. Journal of Sustainable Development, 2, 85-94.

<http://dx.doi.org/10.5539/jsd.v2n3p85>

[46] Jeng, M.-J., Lee, Y.-L. and Chang, L.-B. (2009) Temperature Dependences of In_xGa_{1-x}N Multiple Quantum Well Solar Cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42, Article ID: 105101.

<http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/42/10/105101>

[47] Koirala, B.P., Sahan, B. and Henze, N. (2009) Study on MPP Mismatch Losses in Photovoltaic Applications. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 21-25 September 2009, 3727-3733.

[48] Green, M.A. (1981) Solar Cell Fill Factors: General Graph and Empirical Expressions. *Solid-State Electronics*, 24, 788-789.

[http://dx.doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90062-9](http://dx.doi.org/10.1016/0038-1101(81)90062-9)

[49] Sah, C., Noyce, R.N. and Shockley, W. (1957) Carrier Generation and Recombination in p-n Junctions and p-n Junction Characteristics. *Proceedings of the IRE*, 45, 1228-1243.

<http://dx.doi.org/10.1109/JRPROC.1957.278528>

[50] Villalva, M.G. and Gazoli, J.R. (2009) Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24, 1198-1208.

[51] L. Hernández-Callejo, S. Gallardo-Saavedra, and V. Alonso-Gómez, "A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance", *Sol. Energy*, vol. 188, no. June, pp. 426–440, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.06.017.

[52] A. Nicita, G. Maggio, A. P. F. Andaloro, and G. Squadrito, "Green hydrogen as feedstock: Financial analysis of a photovoltaic-powered electrolysis plant", *Int. J.*

Hydrogen Energy, vol. 45, no. 20, pp. 11395– 11408, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.062.

[53] L. Hocine, K. M. Samira, M. Tarek, N. Salah, and K. Samia, “Automatic detection of faults in a photovoltaic power plant based on the observation of degradation indicators”, Renew. Energy, vol. 164, pp. 603–617, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.094.

[54] M. Memiche, C. Bouzian, A. Benzahia, and A. Moussi, “Effects of dust, soiling, aging, and weather conditions on photovoltaic system performances in a Saharan environment - Case study in Algeria”, Glob. Energy Interconnect., vol. 3, no. 1, pp. 60–67, 2020, doi: 10.1016/j.gloei.2020.03.004.

[55] M. Monadi, M. A. Zamani, J. I. Candela, A. Luna, and P. Rodriguez, “Protection of AC and DC distribution systems Embedding distributed energy resources: A comparative review and analysis”, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 51, pp. 1578–1593, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.013.

[56] Y. Zhao, B. Lehman, R. Ball, J. Mosesian, and J. F. De Palma, “Outlier detection rules for fault detection in solar photovoltaic arrays”, Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC, pp. 2913– 2920, 2013, doi: 10.1109/APEC.2013.6520712.

[57] N. R. E. Laboratory, S. A. Sandia National Laboratory, and the S. N. L. M. Partnership, and (SuNLaMP) PV O&M Best Practices Working Group, “Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems ; 3rd Edition.”, Nrel, no. December, p. 153, 2018, [5Online]. Available: <https://www.nrel.gov/research/publications.html>.

[58] C. E. Packard, J. H. Wohlgemuth, and S. R. Kurtz, “Development of a Visual Inspection Checklist for Evaluation of Fielded PV Module Condition”, *PV Modul. Reliab. Work.*, no. March, p. 54568, 2012.

[59] S. R. Madeti and S. N. Singh, “A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system”, *Sol. Energy*, vol. 158, no. June, pp. 161–185, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.08.069. [60] N. M. A. Alrahim Shannan, N. Z. Yahaya, and B. Singh, “Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison”, 2013. doi: 10.1109/ICCSCE.2013.6719960.

[61] K. Chennoufi, M. Ferfra, and M. Mokhlis, “An accurate modelling of Photovoltaic modules based on two-diode model”, *Renew. Energy*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.11.085.

[62] M. R. Arabshahi, H. Torkaman, and A. Keyhani, “A method for hybrid extraction of single-diode model parameters of photovoltaics”, *Renew. Energy*, vol. 158, pp. 236–252, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.035. [63] T. Pei and X. Hao, “A fault detection method for photovoltaic systems based on voltage and current observation and evaluation”, *Energies*, vol. 12, no. 9, 2019, doi: 10.3390/en12091712.

[64] R. Fu, D. Feldman, and R. Margolis, “U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2018”, Nrel, no. Novmber, pp. 1–47, 2018, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72399.pdf>. [

[65] T. Takashima, J. Yamaguchi, K. Otani, T. Oozeki, K. Kato, and M. Ishida, “Experimental studies of fault location in PV module strings”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 6–7, pp. 1079–1082, 2009, doi: 10.1016/j.solmat.2008.11.060.

[66] T. Takashima, J. Yamaguchi, K. Otani, K. Kato, and M. Ishida, “Experimental Studies of Failure Detection Methods in PV Module Strings”, in Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, WCPEC-4, 2006, vol. 2, pp. 2227–2230, doi: 10.1109/WCPEC.2006.279952.

[67] L. Schirone, F. P. Califano, and M. Pastena, “Fault detection in a photovoltaic plant by time domain reflectometry”, Prog. Photovoltaics Res. Appl., vol. 2, no. 1, pp. 35–44, 1994, doi: 10.1002/pip.4670020106. [68] S. Voutsinas, D. Karolidis, I. Voyiatzis, and M. Samarakou, “A survey of fault detection and identification methods for Photovoltaic systems based on I-V curves”, in 24th Pan-Hellenic Conference on Informatics (PCI 2020), 2020, p. 4 pages, doi: <https://doi.org/10.1145/3437120.3437325>.

[69] Solmetric, “Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays”, Appl. Note PVA-600-1, p. 23, 2011.

[70] S. Sarikh, M. Raoufi, A. Bennouna, A. Benlarabi, and B. Ikken, “Fault diagnosis in a photovoltaic system through I-V characteristics analysis”, in 2018 9th International Renewable Energy Congress, IREC 2018, 2018, no. March, pp. 1–6, doi: 10.1109/IREC.2018.8362572.

[71] Z. Chen, L. Wu, S. Cheng, P. Lin, Y. Wu, and W. Lin, “Intelligent fault diagnosis of photovoltaic arrays based on optimized kernel extreme learning machine and I-V characteristics”, Appl. Energy, vol. 204, no. March 2018, pp. 912–931, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.034.

[72] H. Mekki, A. Mellit, and H. Salhi, “Artificial neural network-based modelling and fault detection of partial shaded photovoltaic modules”, Simul. Model. Pract. Theory, vol. 67, pp. 1–13, 2016, doi: 10.1016/j.simpat.2016.05.005. [73] F. Harrou, Y. Sun,

B. Taghezouit, A. Saidi, and M. E. Hamlati, “Reliable fault detection and diagnosis of photovoltaic systems based on statistical monitoring approaches”, *Renew. Energy*, vol. 116, pp. 22– 37, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.09.048.

[74] M. Dhimish, V. Holmes, B. Mehrdadi, and M. Dales, “Comparing Mamdani Sugeno fuzzy logic and RBF ANN network for PV fault detection”, *Renew. Energy*, vol. 117, pp. 257–274, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.10.066.

[75] E. Kaplani, “Detection of degradation effects in field-aged c-Si solar cells through IR thermography and digital image processing”, *Int. J. Photoenergy*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/396792. [76] Y. Hu, B. Gao, X. Song, G. Y. Tian, K. Li, and X. He, “Photovoltaic fault detection using a parameter based model”, *Sol. Energy*, vol. 96, pp. 96–102, 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.07.004.

[77] M. Cubukcu and A. Akanalci, “Real-time inspection and determination methods of faults on photovoltaic power systems by thermal imaging in Turkey”, *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 1231–1238, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.075>.

[78] J. C. Hernández and P. G. Vidal, “Guidelines for protection against electric shock in PV generators”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp. 274–282, 2009, doi: 10.1109/TEC.2008.2008865.

[79] J. Johnson, G. Ball, A. Rosenthal, and M. Albers, “Inverter GroundFault Detection ‘ Blind Spot ’ and Mitigation Methods Prepared by Sandia National Laboratories Jay Johnson Southwest Technology Development Institute Tim Zgonena June 2013 Solar America Board for Codes and Standards”, no. June 2015, 2013, doi: 10.13140/RG.2.1.3836.8720.

[80] J. Johnson and J. Flicker, “Photovoltaic Ground Fault and Blind Spot Electrical Simulations”, no. June, 2013, [Online]. Available:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.455.7101&rep=rep1&type=pdf>.

[81] J. Johnson et al., “Photovoltaic DC arc fault detector testing at Sandia National Laboratories”, Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf., no. June, pp. 003614–003619, 2011, doi: 10.1109/PVSC.2011.6185930.

[82] S. McCalmonit, “Low cost arc fault detection and protection for PV systems”, Contract, vol. 303, no. October, pp. 275–3000, 2013. [33] Z. Wang and R. Balog, “Arc Fault and Flash Signal Analysis in DC Distribution Systems Using Wavelet Transformation”, IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, pp. 1955–1963, 2015.

[83] Voutsinas, S., Karolidis, D., Voyiatzis, I., & Samarakou, M. (2022). Development of a multi-output feed-forward neural network for fault detection in Photovoltaic Systems. Energy Reports, 8, 33-42.

[84] Voutsinas, S., Karolidis, D., Voyiatzis, I., & Samarakou, M. (2022). Development of a multi-output feed-forward neural network for fault detection in Photovoltaic Systems. Energy Reports, 8, 33-42.

[85]

<https://www.sciencedirect.com/book/9780128128176/handbook-of-energy-efficiency-in-buildings>