

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΒΛΑΒΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΜΑΘΗΣΗΣ**

**ΗΛΙΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Αναπλ. Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος (Επιβλέπων)  
Αναπλ. Καθηγητής Λαγουδάκης Μιχαήλ  
Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος**

## **ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για την ανίχνευση σφαλμάτων στη λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων. Είναι προφανές, ότι όπως όλα τα συστήματα, έτσι και τα φωτοβολταϊκά εμφανίζουν συγκεκριμένες προϋποθέσεις ορθής λειτουργίας. Όταν αυτές δεν ικανοποιούνται, μπορούμε να ισχυριστούμε με βεβαιότητα ότι η ομαλή λειτουργία του συστήματος έχει διαταραχτεί. Για τους σκοπούς της μελέτης αυτής, προσομοιώθηκε σε περιβάλλον Matlab/Simulink ένα φωτοβολταϊκό σύστημα το οποίο περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα. Προκειμένου να διαπιστωθεί αν το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί ομαλά, το λογισμικό που αναπτύχθηκε βασίζεται κυρίως σε τεχνικές μηχανικής μάθησης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί αποθηκευμένα δεδομένα που αντιστοιχούν σε ομαλές και μη καταστάσεις λειτουργίας, τα οποία συγκρίνει με την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος, και ανάλογα αποφασίζει αν υπάρχει κάποιο σφάλμα στη λειτουργία, ή όχι. Το λογισμικό αυτό χαρακτηρίζεται από ευελιξία, καθώς με μικρές προσαρμογές είναι δυνατόν να λειτουργήσει για αρκετές συνδεσμολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων. Όσον αφορά την αποδοτικότητα του αλγορίθμου, αυτή είναι αρκετά υψηλή, καθώς ο αλγόριθμος είναι ικανός να αποφασίσει σωστά την κατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος στην πλειοψηφία των περιπτώσεων.

## **ABSTRACT**

The purpose of this project is the development of an algorithm, which is able to detect faults in the operation of Photovoltaic Systems. It is obvious that, like in every system, photovoltaic systems have specific conditions in order to function properly. When those conditions are not satisfied, we can claim with certainty that the normal function of the system has been affected. For the purposes of this research, a photovoltaic system consisting of photovoltaic panels connected in series and parallel, was simulated in the Matlab/Simulink environment. In order to decide if the system operates properly, the software that was developed relies mainly on machine learning techniques. More specifically, it uses stored data, which correspond to normal or not states of function, it compares them with the current state of the system, and decides accordingly if there is an error in the operation of the Photovoltaic system or not. The software can be described as flexible, because with small adjustments it is able to operate for several different connections of photovoltaic panels. When it comes to the performance of the algorithm, it can be described as very effective, since the software which was developed is in most cases able to detect the state of the Photovoltaic system correctly.

## Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>6</b>
1.1 Γενικά.....	6
<b>2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>8</b>
2.1. Περιγραφή λειτουργίας Φ/Β συστημάτων.....	8
<b>3. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>11</b>
3.1 Εισαγωγή.....	11
3.2 Σφάλμα ανοικτοκυκλώματος.....	13
3.3 Σφάλμα βραχυκυκλώματος.....	17
3.4 Σφάλμα υποβιβασμού.....	22
3.5 Κατάσταση μερικής σκίασης.....	29
<b>4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΒΛΑΒΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ.....</b>	<b>34</b>
4.1 Εισαγωγή.....	34
4.2 Αποθηκευμένα δεδομένα του λογισμικού που αναπτύχθηκε.....	36
4.3 Λειτουργία του αλγορίθμου.....	46
4.3.1 Ανίχνευση σφαλμάτων.....	48
<b>5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΒΛΑΒΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ.....</b>	<b>57</b>
5.1. Μετρήσεις.....	57
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>93</b>
<b>7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>96</b>

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Είναι γεγονός ότι στις μέρες μας, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι πιο δημοφιλείς από ποτέ. Η αξιοποίησή τους έχει αυξηθεί δραματικά σε σχέση με το πρόσφατο παρελθόν, ενώ η έρευνα που διεξάγεται για τον σχετικά νέο αυτό τομέα, έχει συμβάλει στη διάδοση των τεχνολογιών αξιοποίησής τους παγκοσμίως. Οι λόγοι για την γρήγορη άνοδο τους είναι πολυάριθμοι, και σχετίζονται τόσο με οικονομικά κίνητρα, όσο και με την ευαισθητοποίηση του κόσμου για την προστασία του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, οι κυριότερες αιτίες για την ταχύτατη εξέλιξη του τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, είναι οι ακόλουθες:

- Η παραγωγή της πράσινης ενέργειας είναι σαφώς φτηνότερη από τα συμβατικά καύσιμα, καθώς το μόνο οικονομικό κόστος αφορά την εγκατάσταση των σταθμών εκμετάλλευσής της, καθώς και τη συντήρησή τους.
- Τα αποθέματα των συμβατικών καυσίμων είναι πεπερασμένα, σε αντίθεση με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, οι οποίες είναι ανεξάντλητες.
- Έχουν μηδενικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, καθώς δεν αφήνουν κατάλοιπα μετά την αξιοποίησή τους.
- Είναι αρκετά πιο ασφαλείς μορφές ενέργειας από τα συμβατικά καύσιμα, τα οποία είναι εύκολο να προκαλέσουν μεγάλες καταστροφές, αν συμβεί κάποιο ατύχημα.

Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, έχει σχετικά μικρό συντελεστή απόδοσης. Αυτό είναι και το κύριο μειονέκτημά τους. Οι κυριότερες μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η βιομάζα και η γεωθερμία.

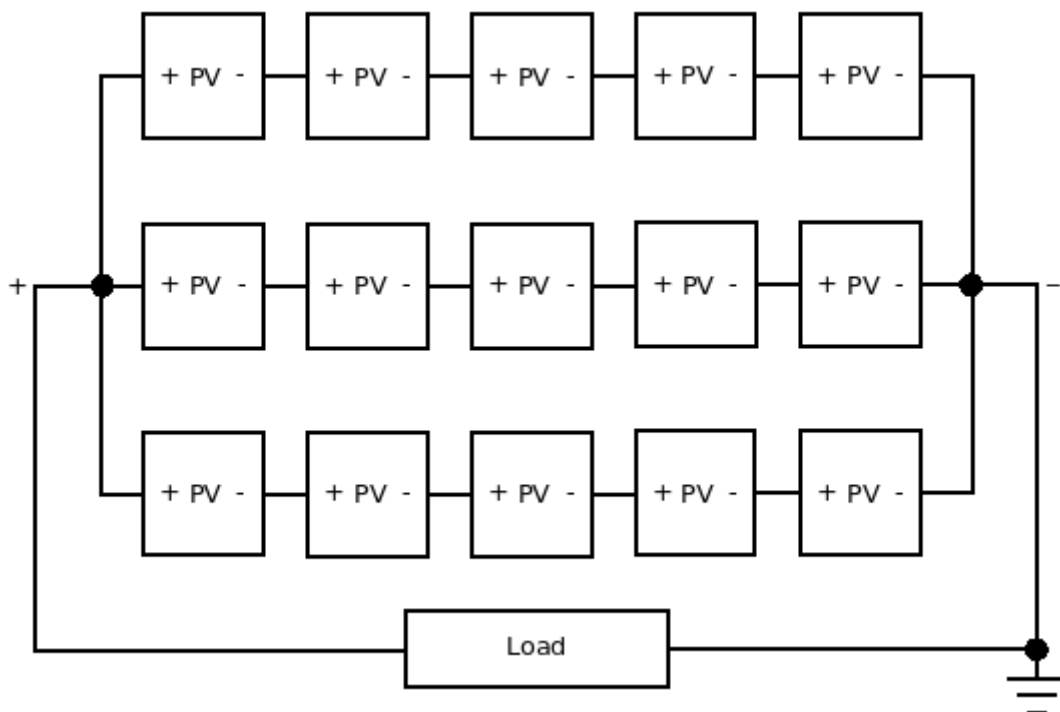
Η εργασία αυτή ασχολείται κατεξοχήν με τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα, τα οποία αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια, μετατρέποντάς την σε ηλεκτρική. Συγκεκριμένα, εξετάζει τα πιθανά σφάλματα που μπορούν να προκύψουν κατά τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς και την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για την ανίχνευση τους.

Στο επόμενο κεφάλαιο, περιγράφεται η βασική λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Στο Κεφάλαιο 3, αναλύονται τα σφάλματα που μπορούν να προκύψουν κατά τη λειτουργία του, ενώ στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία για την ανίχνευση τους. Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται ένας εκτενής έλεγχος της απόδοσης του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, όπου εξετάζεται η ικανότητά του να εντοπίσει σωστά την κατάσταση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος για έναν μεγάλο αριθμό περιπτώσεων λειτουργίας.

## 2. Φωτοβολταϊκά συστήματα

### 2.1 Περιγραφή λειτουργίας Φ/Β συστημάτων

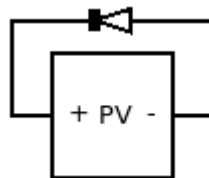
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, προκειμένου να αξιοποιηθεί για να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από έναν αριθμό φωτοβολταϊκών πλασιών (panels), τα οποία συνδέονται μεταξύ τους είτε σε σειρά, είτε παράλληλα, είτε σε συνδυασμό σειριακής και παράλληλης συνδεσμολογίας. Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από επιμέρους φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά. Για παράδειγμα, η συνδεσμολογία η οποία προσομοιώθηκε για τις ανάγκες της ανάπτυξης του αλγορίθμου στην παρούσα εργασία, φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



**Σχήμα 2.1.** Παράδειγμα διάταξης της Φ/Β συστοιχίας σε ένα Φ/Β σύστημα.



Όπως φαίνεται, αποτελείται από τρεις σειρές φωτοβολταϊκών πλαισίων οι οποίες συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους, κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από πέντε φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία συνδέονται σε σειρά. Κάθε ένα από αυτά τα πλαίσια, έχει οριστεί να αποτελείται από τριάντα (30) φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης, για κάθε ένα από τα πλαίσια υπάρχει μια διάοδος, η οποία ονομάζεται bypass diode και συνδέεται σε ανάστροφη συνδεσμολογία με τα άκρα του κάθε πλαισίου (Σχήμα 2.2). Η λειτουργία της είναι να προστατεύει το πλαίσιο σε καταστάσεις μερικής σκίασης του, καθώς η ανομοιόμορφη κατανομή του φωτός μπορεί να προξενήσει την καταστροφή του.



**Σχήμα 2.2.** Σύνδεση της διάόδου bypass σε ένα Φ/Β πλαίσιο.

Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει τις εξής βασικές παραμέτρους λειτουργίας:

**1 Τάση ανοικτοκύκλωσης ( $V_{oc}$  – open-circuit voltage):**

Είναι η τάση που αναπτύσσει ένα Φ/Β στοιχείο στα άκρα του, όταν δεν συνδέεται φορτίο σε αυτά, δηλαδή όταν είναι ανοικτοκυκλωμένο. Μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η ηλιακή ακτινοβολία.

**2 Ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$  – short-circuit current):**

Είναι το ρεύμα που διαρρέει ένα Φ/Β στοιχείο, όταν τα άκρα του συνδέονται μεταξύ τους, δηλαδή όταν είναι βραχυκυκλωμένο. Είναι επίσης εξαρτώμενο από την θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία.

**3 Μέγιστη ισχύς λειτουργίας ( $P_{mpp}$  – Maximum Power Point):**

Είναι η μέγιστη τιμή της ισχύος που μπορεί να παρέχει ένα Φ/Β πλαίσιο, όταν αυτό βρίσκεται σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

**4 Πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας:**

Είναι οι συνθήκες θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας, στις οποίες αντιστοιχεί η ονομαστική τάση ανοικτοκυκλώματος και το ονομαστικό ρεύμα βραχυκυκλώματος. Συνήθως, είναι 25°C και 1000 W/m<sup>2</sup>, αντίστοιχα.

## 3. Σφάλματα λειτουργίας των Φ/Β συστημάτων

### 3.1 Εισαγωγή

Καθώς το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η ανίχνευση σφαλμάτων στα φωτοβολταϊκά συστήματα, μια σύντομη περιγραφή τους κρίνεται απαραίτητη, προκειμένου να κατανοηθεί ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε. Τα κυριότερα σφάλματα που μπορούν να λάβουν χώρα είναι:

1. Σφάλμα ανοικτοκυκλώματος (open circuit fault)
2. Σφάλμα βραχυκυκλώματος (short circuit fault)
3. Σφάλμα υποβιβασμού (degradation fault)
4. Κατάσταση μερικής σκίασης (partial shading condition)

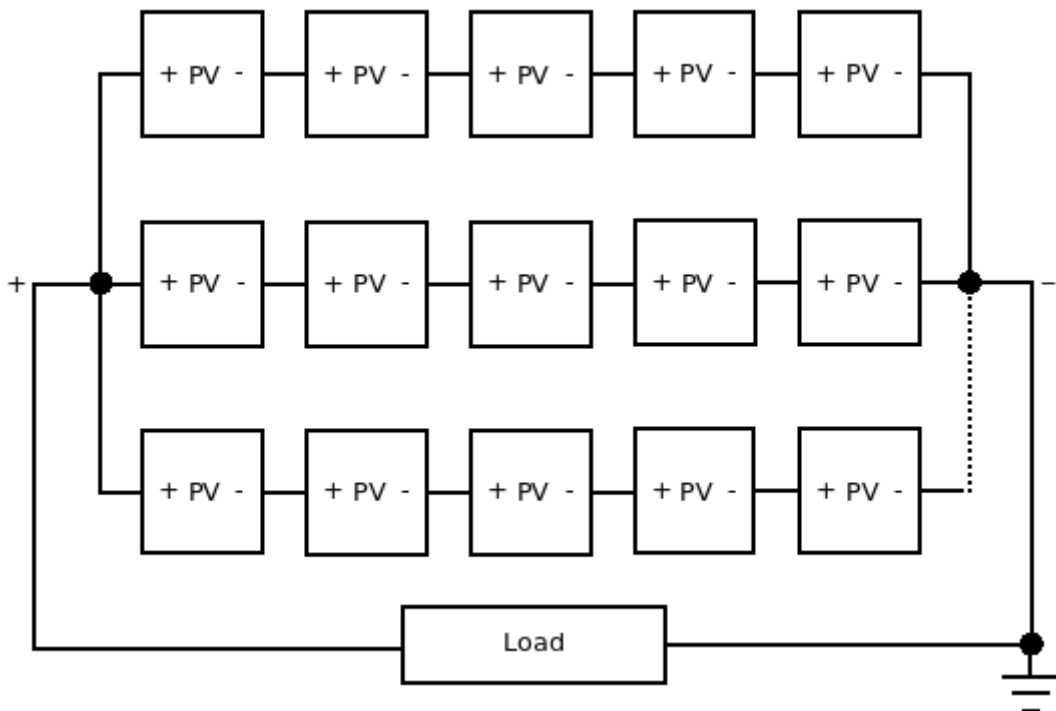
Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των παραπάνω σφαλμάτων είναι ότι οδηγούν σε μείωση της παραγόμενης ισχύος του συστήματος. Η μείωση αυτή εξαρτάται από την έκταση του σφάλματος, δηλαδή μπορεί να είναι από πολύ μικρή, έως αρκετά σημαντική, υποβιβάζοντας την εύρυθμη λειτουργία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Παρακάτω, θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή των σφαλμάτων αυτών. Επίσης θα παρουσιαστούν οι γραφικές παραστάσεις ρεύματος-τάσης [ $I = f(V)$ ] και ισχύος-τάσης [ $P = f(V)$ ] για κάθε ένα από αυτά, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις της συστοιχίας, όταν αυτή λειτουργεί ορθά. Οι συγκρίσεις των γραφικών παραστάσεων της συστοιχίας σε ορθή

λειτουργία, με τις γραφικές παραστάσεις της συστοιχίας, όταν αυτή έχει υποστεί κάποιο σφάλμα, αποτελούν τη βάση επάνω στην οποία αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος της εργασίας αυτής.

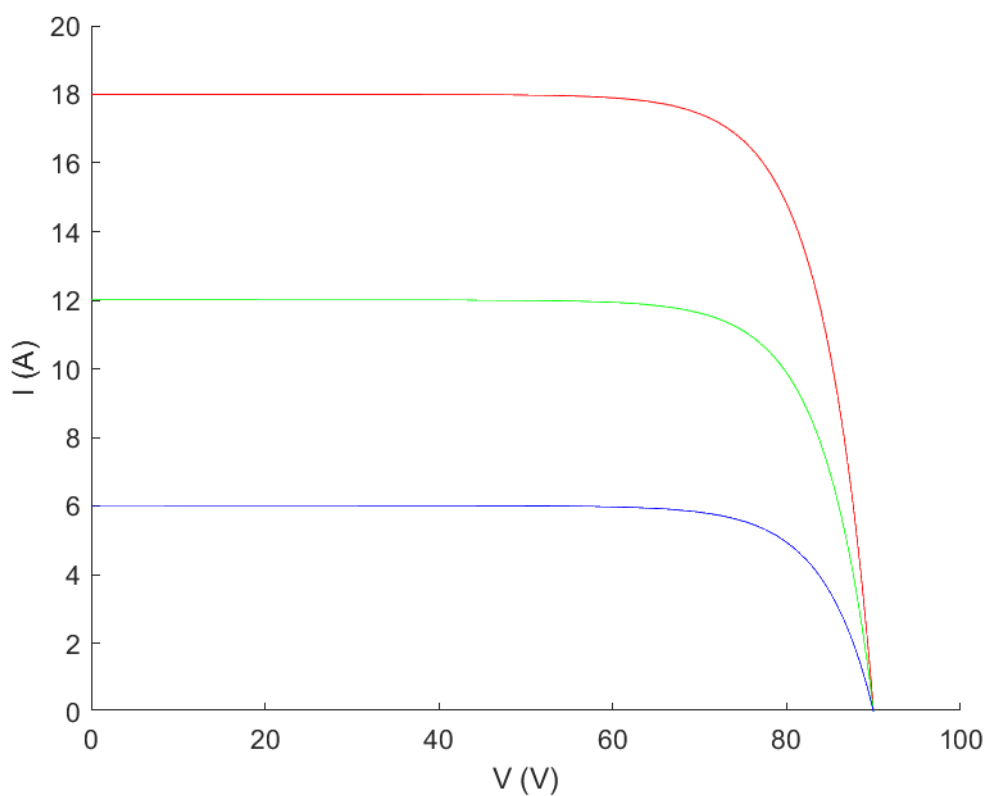
### 3.2. Σφάλμα ανοικτοκυκλώματος

Το σφάλμα αυτό συμβαίνει, όταν μια ή περισσότερες από τις σειρές της συστοιχίας αποσυνδεθούν με κάποιον τρόπο από το υπόλοιπο κύκλωμα. Στο Σχήμα 3.1, φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή ένα άνοιγμα στο κύκλωμα της τρίτης σειράς της συστοιχίας. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα λειτουργεί πλέον μόνο με δυο σειρές φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η ίδια ακριβώς κατάσταση λειτουργίας προκύπτει και όταν αποσυνδεθούν ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή στοιχεία που περιλαμβάνονται μέσα σε οποιαδήποτε σειρά της συστοιχίας.

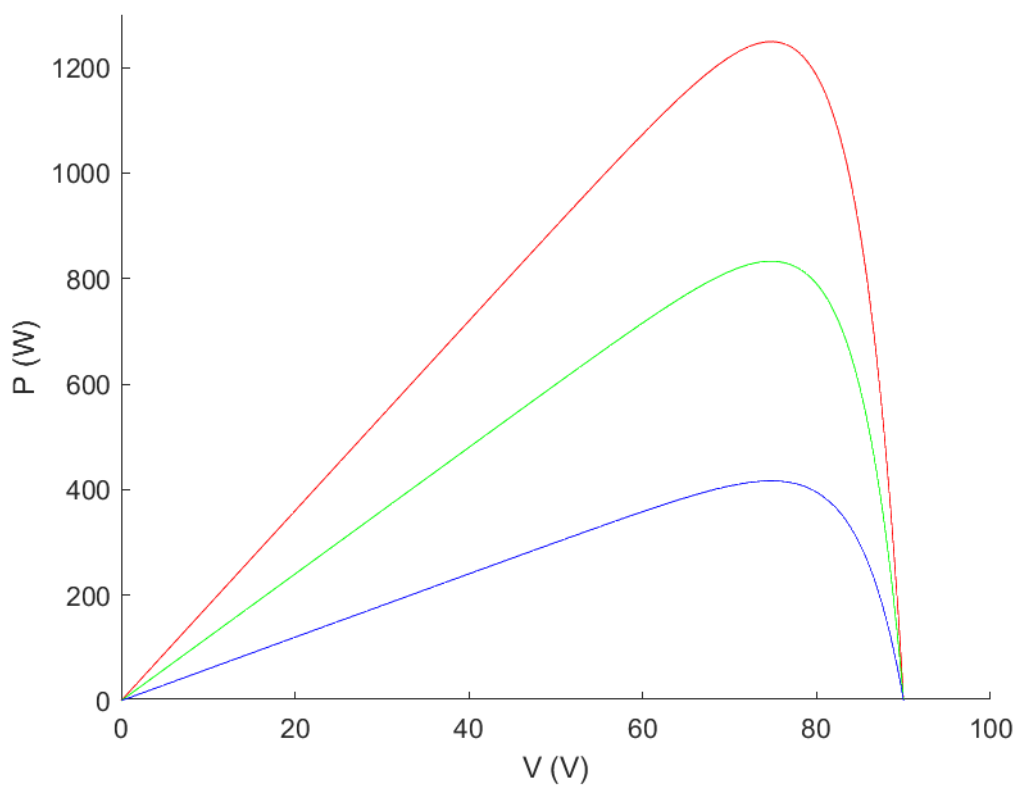


**Σχήμα 3.1.** Παράδειγμα διάταξης της Φ/Β συστοιχίας σε ένα Φ/Β σύστημα με σφάλμα ανοικτοκυκλώματος.

Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις, με κόκκινο απεικονίζεται η κανονική κατάσταση λειτουργίας, με πράσινο η κατάσταση λειτουργίας με μια σειρά ανοικτοκυκλωμένη, ενώ με μπλε η κατάσταση λειτουργίας με δυο σειρές ανοικτοκυκλωμένες.



**Σχήμα 3.2.** Γραφική παράσταση I-V. Σύγκριση κανονικής λειτουργίας με σφάλμα ανοικτοκυκλώματος.



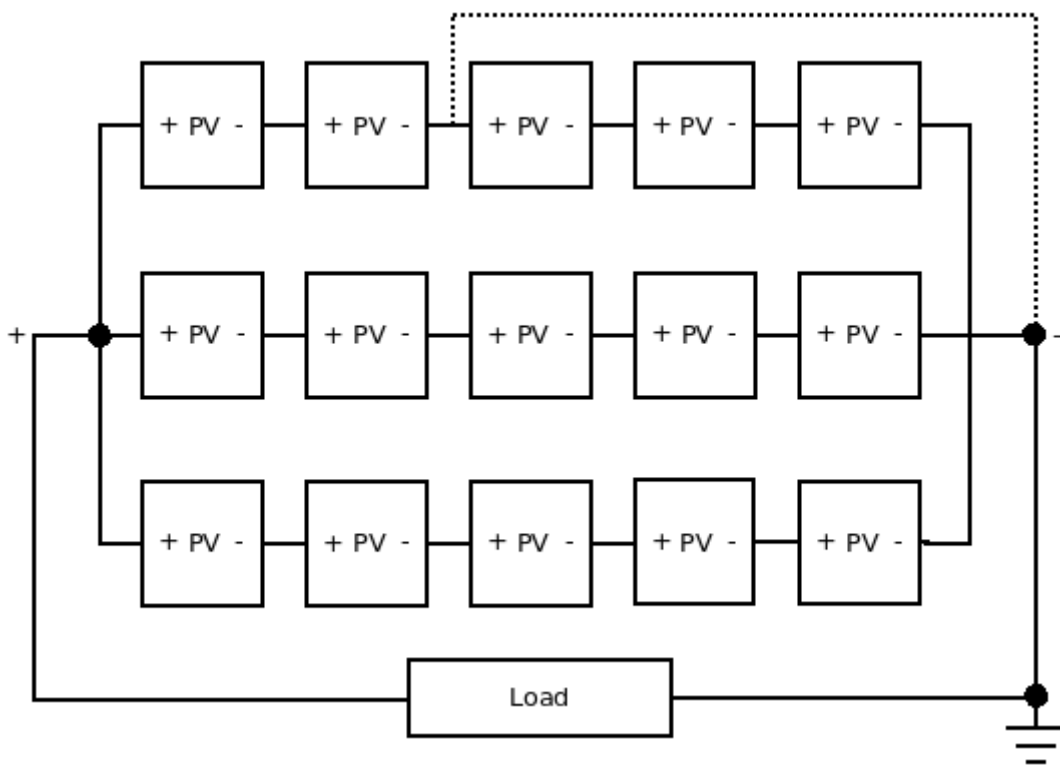
**Σχήμα 3.3.** Γραφική παράσταση P-V. Σύγκριση κανονικής λειτουργίας με σφάλμα ανοικτοκυκλώματος.

Όπως φαίνεται από τις γραφικές παραστάσεις (Σχήματα 3.2, 3.3), το σφάλμα ανοικτοκυκλώματος οδηγεί σε μείωση της ισχύος και της έντασης του ρεύματος που παρέχει η φωτοβολταϊκή συστοιχία, ενώ η τάση του παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με την τάση που αναπτύσσεται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας.



### 3.3. Σφάλμα βραχυκυκλώματος

Το σφάλμα αυτό αφορά την περίπτωση κατά την οποία αναπτύσσεται αγωγιμότητα αμελητέας αντίστασης μεταξύ των ακροδεκτών, σε ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια της συστοιχίας. Αυτό έχει ως συνέπεια να παύει η λειτουργία των πλαισίων αυτών, καθώς όλο το ρεύμα διέρχεται από το βραχυκύκλωμα. Στο Σχήμα 3.4, φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή ένα βραχυκύκλωμα σε τρία πλαίσια της συστοιχίας.

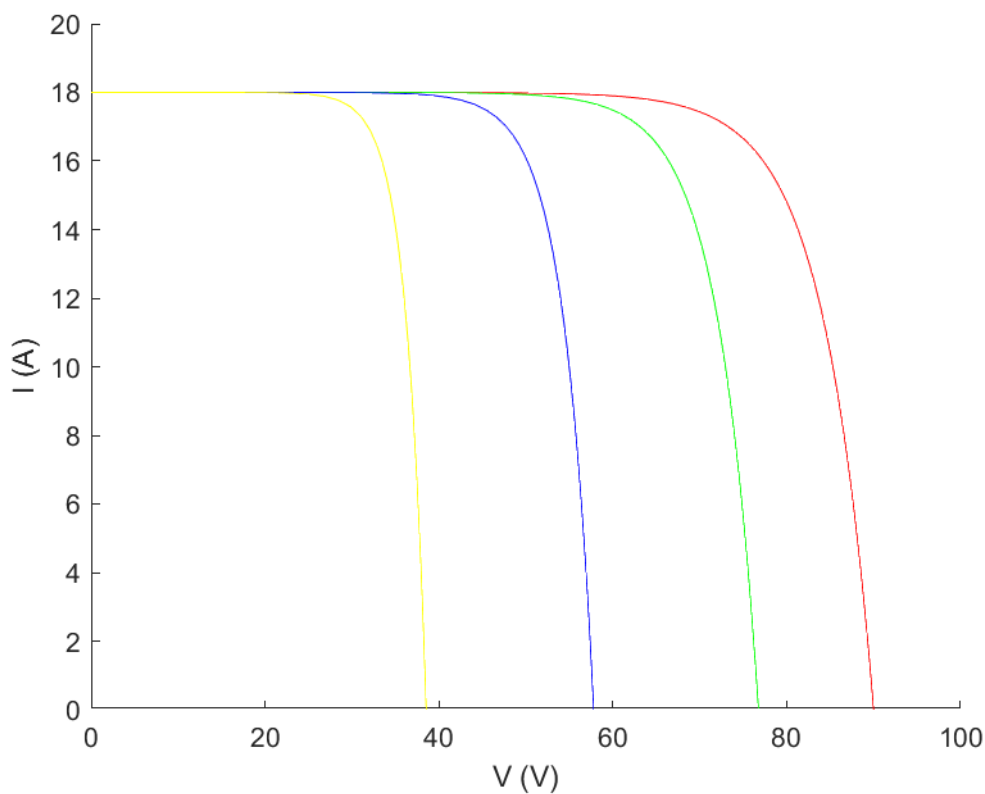


Σχήμα 3.4.

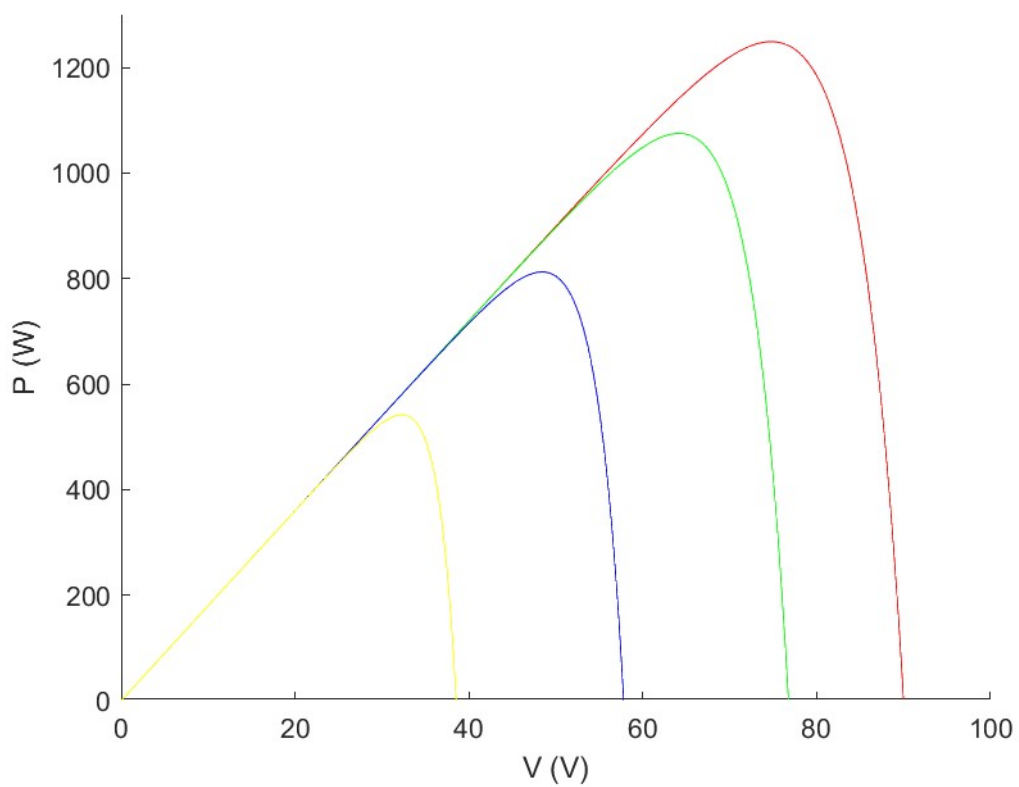
Παράδειγμα διάταξης της Φ/Β συστοιχίας σε ένα Φ/Β σύστημα με σφάλμα βραχυκυκλώματος.

Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις, με κόκκινο απεικονίζεται η κανονική κατάσταση λειτουργίας, με πράσινο η κατάσταση λειτουργίας με ένα πλαίσιο βραχυκυκλωμένο, με μπλε η κατάσταση λειτουργίας με δυο πλαίσια βραχυκυκλωμένα, ενώ με κίτρινο η κατάσταση λειτουργίας

με τρία πλαίσια βραχυκυκλωμένα. Όλα αυτά τα πλαίσια βρίσκονται στην ίδια σειρά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



**Σχήμα 3.5.** Γραφική παράσταση I-V. Σύγκριση κανονικής λειτουργίας με σφάλμα βραχυκυκλώματος.

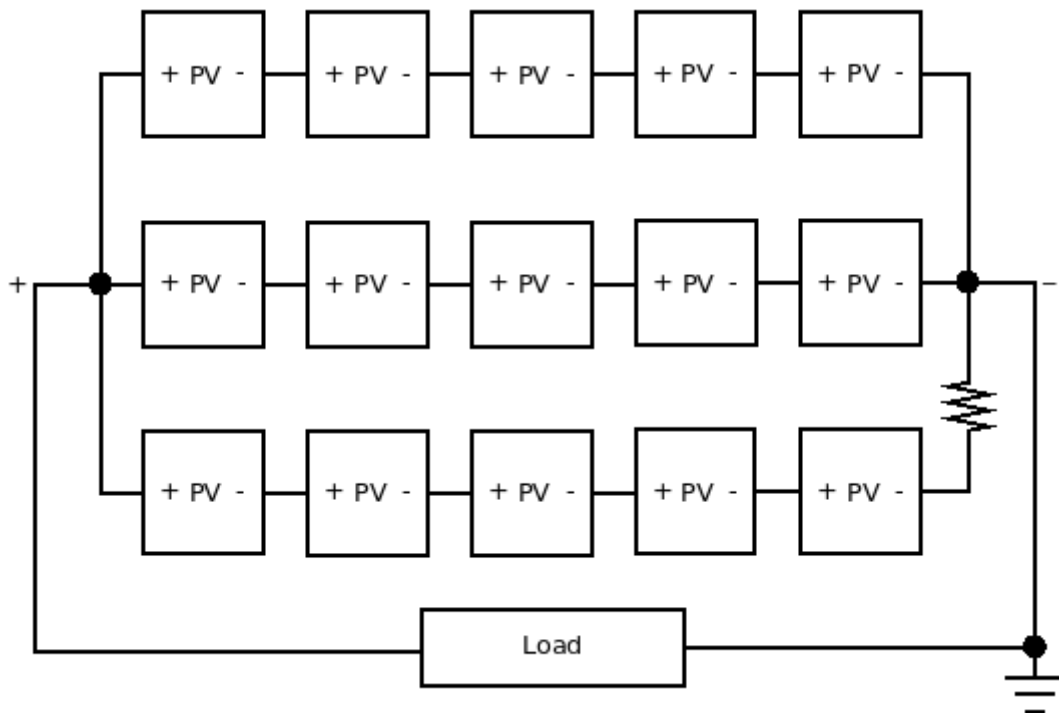


**Σχήμα 3.6.** Γραφική παράσταση P-V. Σύγκριση κανονικής λειτουργίας με σφάλμα βραχυκυκλώματος.

Παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις (Σχήματα 3.5, 3.6), γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το σφάλμα βραχυκυκλώματος οδηγεί σε μείωση της ισχύος και της τάσης του συστήματος. Αντιθέτως, η ένταση του ρεύματος που παρέχει η φωτοβολταϊκή συστοιχία παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με την ένταση του ρεύματος που θα παρείχε σε κανονική κατάσταση λειτουργίας.

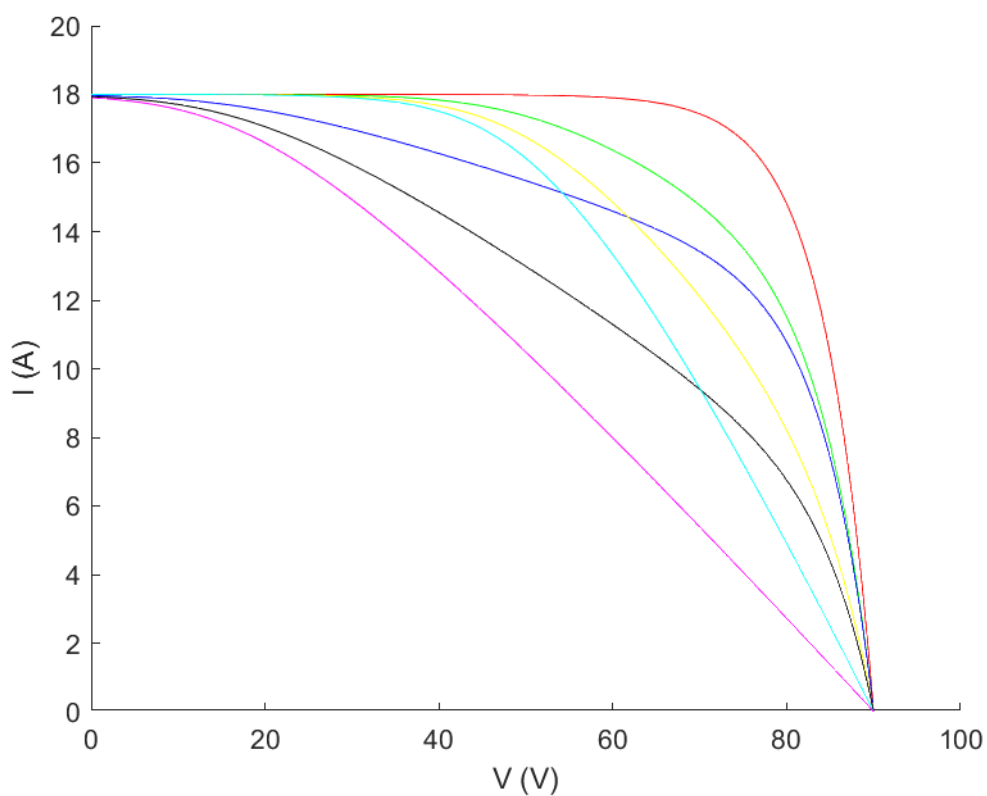
### 3.4. Σφάλμα υποβιβασμού

Όταν λαμβάνει χώρα το σφάλμα αυτό, σημαίνει ότι έχει αναπτυχθεί παρασιτική ηλεκτρική αντίσταση σε μια ή περισσότερες από τις σειρές του φωτοβολταϊκού συστήματος που περιέχουν φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Το σφάλμα αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στους αγωγούς ή τα εξαρτήματα που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά, είτε σε βλάβη λειτουργίας των ίδιων των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αυτό έχει ως συνέπεια να καταναλώνεται μέρος της παραγόμενης ισχύος στην αντίσταση αυτή, και να χάνεται. Αυτό οδηγεί στη μείωση της απόδοσης του συστήματος. Στο Σχήμα 3.7, απεικονίζεται ένα σφάλμα υποβιβασμού στην τρίτη σειρά της συστοιχίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σφάλμα ανοικτοκυκλώματος, το οποίο περιγράφηκε παραπάνω, είναι μια υποπερίπτωση του σφάλματος υποβιβασμού, όταν η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη.



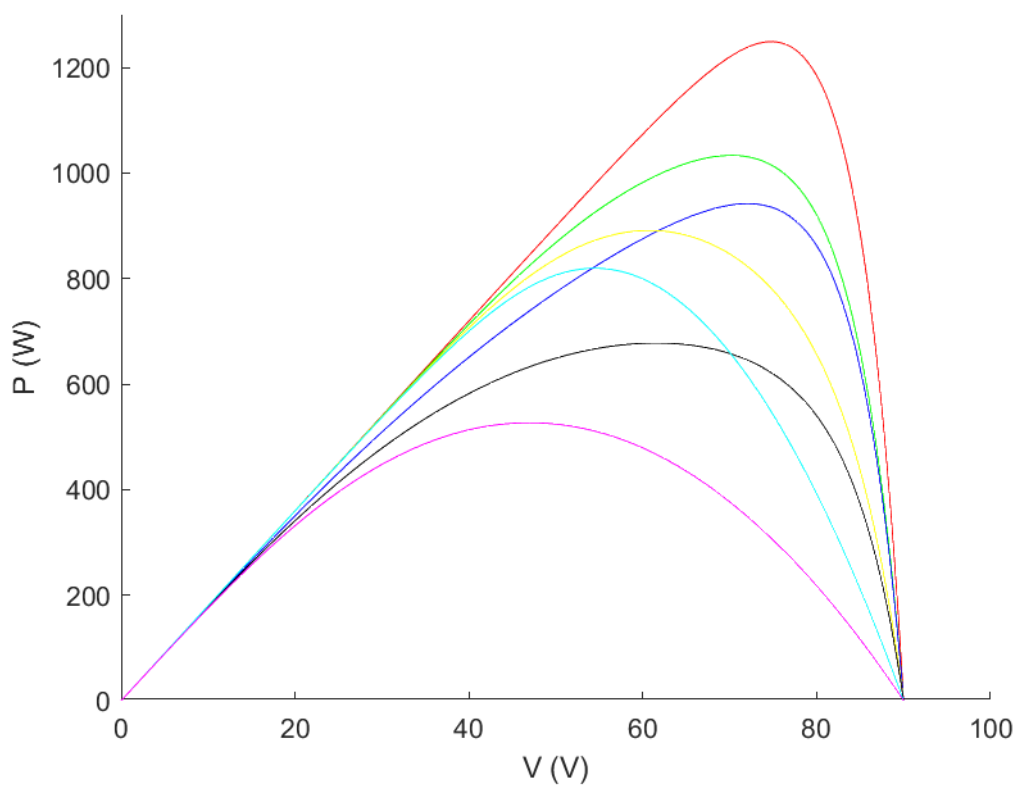
**Σχήμα 3.7.** Παράδειγμα διάταξης της Φ/Β συστοιχίας σε ένα Φ/Β σύστημα με σφάλμα υποβιβασμού.

Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις, με κόκκινο απεικονίζεται η κανονική κατάσταση λειτουργίας, με πράσινο η κατάσταση λειτουργίας με σφάλμα υποβιβασμού αντίστασης  $5\Omega$  σε μια σειρά, με μπλε η κατάσταση λειτουργίας με σφάλμα υποβιβασμού αντίστασης  $10\Omega$  σε μια σειρά, με κίτρινο η κατάσταση λειτουργίας με σφάλμα υποβιβασμού αντίστασης  $5\Omega$  σε δυο σειρές, με μαύρο η κατάσταση λειτουργίας με σφάλμα υποβιβασμού αντίστασης  $10\Omega$  σε δυο σειρές, με κυανό η κατάσταση λειτουργίας με σφάλμα υποβιβασμού αντίστασης  $5\Omega$  σε τρεις σειρές, ενώ με μωβ η κατάσταση λειτουργίας με σφάλμα υποβιβασμού αντίστασης  $10\Omega$  σε τρεις σειρές του φωτοβολταϊκού συστήματος.



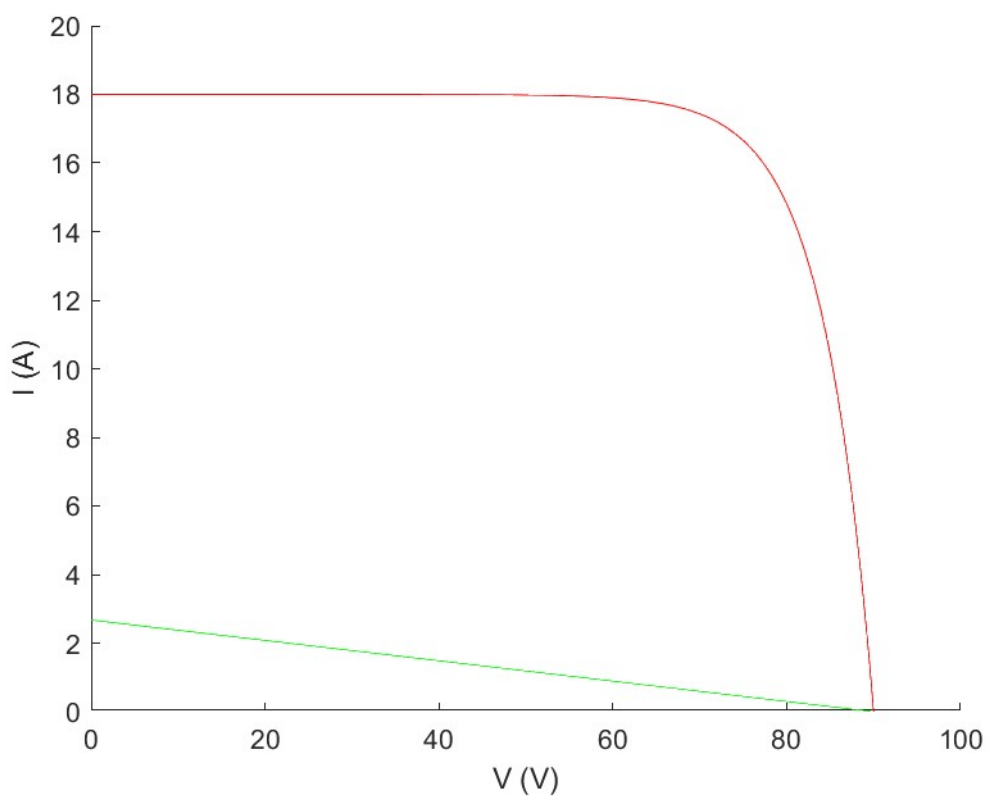
**Σχήμα 3.8.** Γραφική παράσταση I-V. Σύγκριση κανονικής λειτουργίας με σφάλμα υποβιβασμού για διάφορες τιμές της παρασιτικής αντίστασης σε μία ή περισσότερες σειρές.



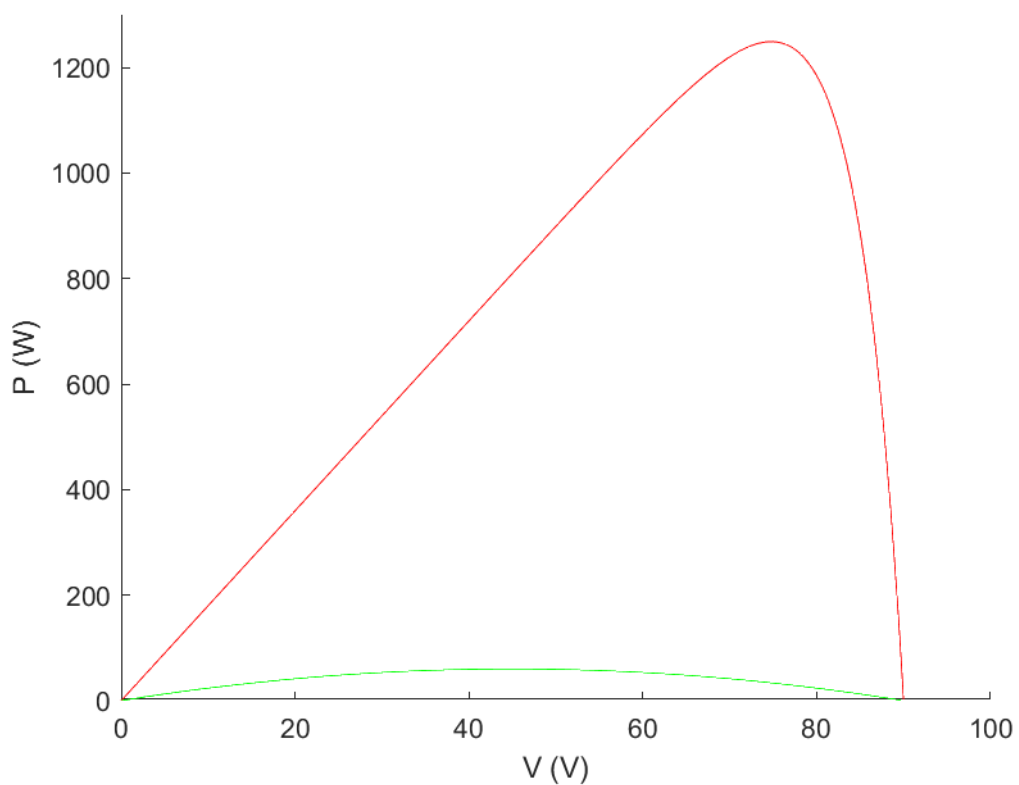


**Σχήμα 3.9.** Γραφική παράσταση P-V. Σύγκριση κανονικής λειτουργίας με σφάλμα υποβιβασμού για διάφορες τιμές της παρασιτικής αντίστασης σε μία ή περισσότερες σειρές.

Οι γραφικές παραστάσεις (Σχήματα 3.8, 3.9), δείχνουν ότι το σφάλμα υποβιβασμού οδηγεί σε μείωση της ισχύος του συστήματος. Όταν η αντίσταση που αναπτύσσεται είναι σχετικά μικρή, η ένταση του ρεύματος της συστοιχίας μειώνεται ελάχιστα σε σχέση με την ένταση του ρεύματος που θα είχε η συστοιχία στην κανονική κατάσταση λειτουργίας. Όσο η αντίσταση μεγαλώνει, τόσο και η ένταση του ρεύματος μειώνεται. Αυτό φαίνεται στα Σχήματα 3.10 και 3.11, όπου απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις της συστοιχίας με σφάλμα υποβιβασμού αντίστασης  $100\Omega$  και στις τρεις σειρές του συστήματος.



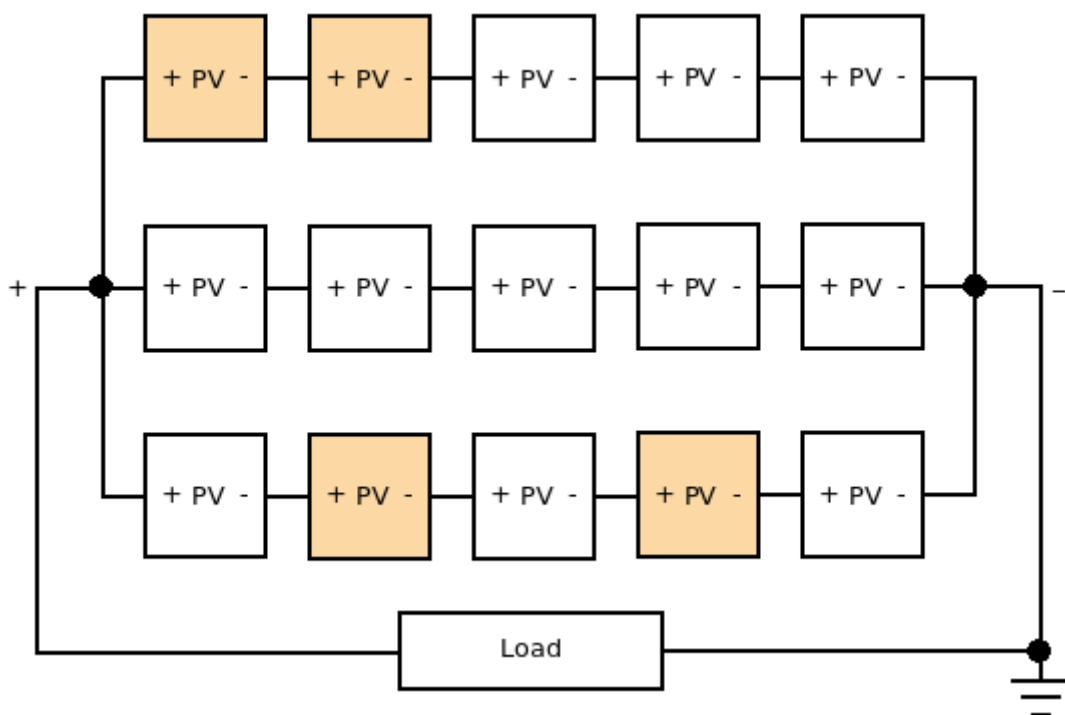
**Σχήμα 3.10.** Γραφική παράσταση I-V. Σύγκριση κανονικής λειτουργίας του συστήματος με σφάλμα υποβιβασμού αντίστασης  $100\Omega$  και στις τρεις σειρές της συστοιχίας.



**Σχήμα 3.11.** Γραφική παράσταση P-V. Σύγκριση κανονικής λειτουργίας του συστήματος με σφάλμα υποβιβασμού αντίστασης  $100\Omega$  και στις τρεις σειρές της συστοιχίας.

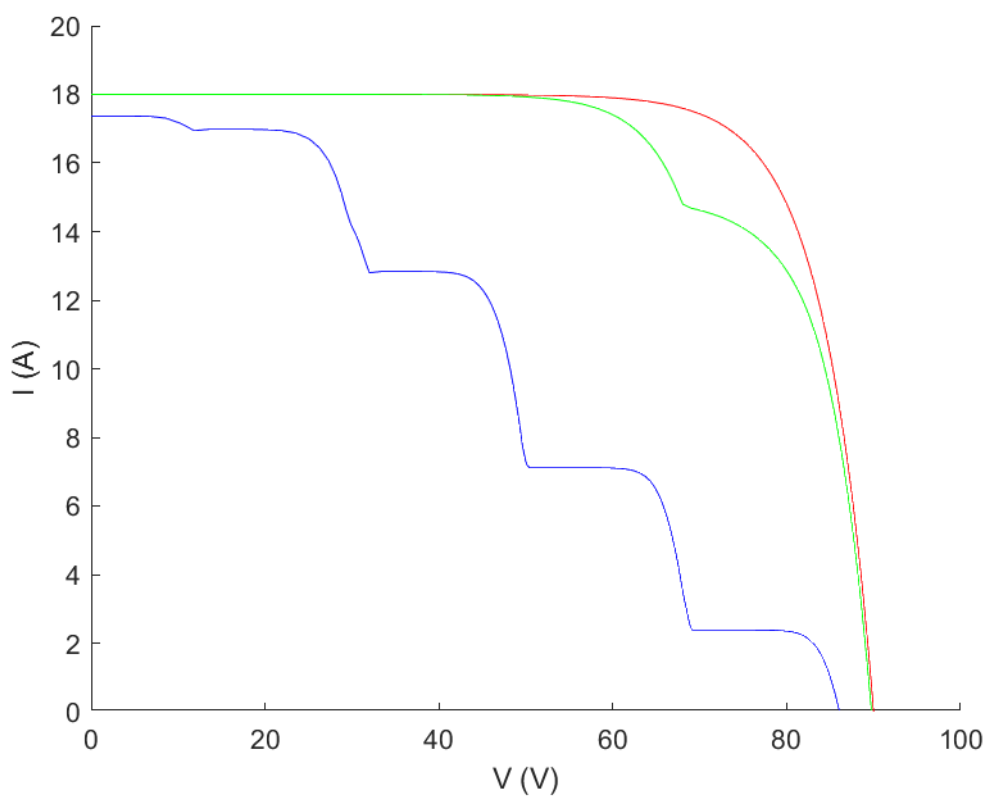
### 3.5. Κατάσταση μερικής σκίασης

Η κατάσταση μερικής σκίασης εμφανίζεται λόγω ανομοιόμορφης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα ή περισσότερα Φ/Β πλαίσια (πχ. λόγω γειτονικών κτηρίων, επικάθισης σκόνης κλπ.), το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη κατανομή του ηλιακού φωτός επάνω στο πλαίσιο. Δεν κατηγοριοποιείται απαραίτητα ως σφάλμα, καθώς δεν αφορά κάποια βλάβη των ηλεκτρικών τμημάτων της συστοιχίας. Όμως, η κατάσταση αυτή συμβάλλει στη μείωση της παραγόμενης ισχύος. Στο Σχήμα 3.12, απεικονίζεται ένα παράδειγμα μερικής σκίασης, όπου στα τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία είναι χρωματισμένα η κατανομή του ηλιακού φωτός είναι ανομοιόμορφη. Όλα τα υπόλοιπα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν κανονικά.

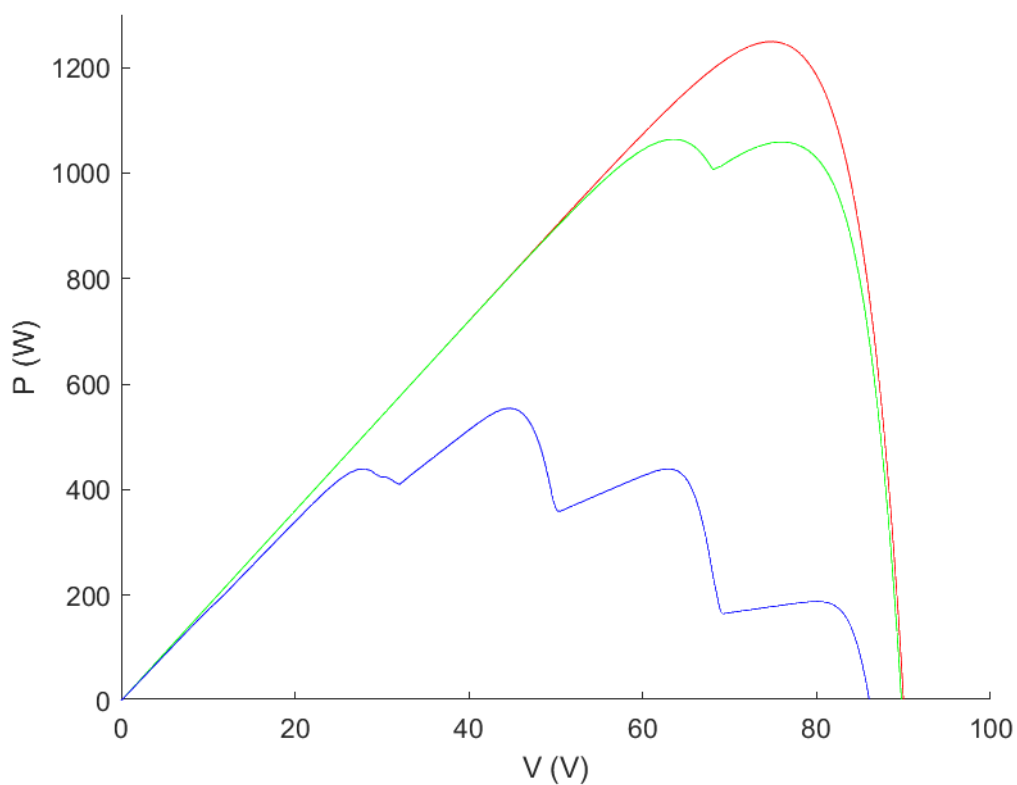


**Σχήμα 3.12.** Παράδειγμα διάταξης της Φ/Β συστοιχίας σε ένα Φ/Β σύστημα σε κατάσταση μερικής σκίασης.

Στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις, με κόκκινο απεικονίζεται η κανονική κατάσταση λειτουργίας, με πράσινο η κατάσταση λειτουργίας όπου ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σκιάζεται και λαμβάνει το 50% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ με μπλε η κατάσταση λειτουργίας με μερική σκίαση όλων των πλαισίων, με τυχαία ποσοστά σκίασης.



**Σχήμα 3.13.** Γραφική παράσταση I-V. Σύγκριση κανονικής λειτουργίας με κατάσταση μερικής σκίασης.



**Σχήμα 3.14.** Γραφική παράσταση P-V. Σύγκριση κανονικής λειτουργίας με κατάσταση μερικής σκίασης.



Στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις (Σχήματα 3.13, 3.14), φαίνεται ξεκάθαρα ότι η κατάσταση μερικής σκίασης μειώνει την παραγόμενη ισχύ του συστήματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα, όπως για παράδειγμα όταν όλα τα πλαίσια έχουν υποστεί κάποια σκίαση, παρατηρείται επίσης μείωση της τάσης και της έντασης του ρεύματος της συστοιχίας, σε σχέση με την τάση και την ένταση του ρεύματος της όταν αυτή βρίσκεται σε κανονική λειτουργία.

Όμως, το πιο ενδιαφέρον συμπέρασμα για τους σκοπούς της ανάπτυξης του αλγορίθμου εντοπισμού βλαβών που πραγματοποιείται σε αυτή τη διπλωματική εργασία, είναι ότι στις καταστάσεις μερικής σκίασης εμφανίζονται παραπάνω από ένα τοπικά μέγιστα στην χαρακτηριστική  $P = f(V)$ . Αυτό, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, είναι το χαρακτηριστικό που διακρίνει τις περιπτώσεις μερικής σκίασης από όλα τα άλλα σφάλματα, καθώς δεν εμφανίζονται ποτέ τοπικά μέγιστα στις χαρακτηριστικές  $P = f(V)$  των υπόλοιπων σφαλμάτων.

# 4. Περιγραφή του αλγορίθμου εντοπισμού βλαβών που αναπτύχθηκε

## 4.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε Φ/Β συστήματα, στηρίζεται κυρίως σε τεχνικές μηχανικής μάθησης. Σε κάθε εκτέλεση του λογισμικού αυτού, σχηματίζονται οι χαρακτηριστικές  $I = f(V)$  και  $P = f(V)$ , από τις οποίες εξάγονται τέσσερις τιμές:

- 1 Η τάση ανοικτοκυκλώματος  $V_{oc}$
- 2 Το ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$
- 3 Η μέγιστη ισχύς  $P_{max}$
- 4 Ο αριθμός των τοπικών μεγίστων της χαρακτηριστικής  $P = f(V)$

Οι παραπάνω αυτές τιμές, συγκρίνονται με ήδη αποθηκευμένα δεδομένα του λογισμικού, τα οποία αντιστοιχούν σε έναν μεγάλο αριθμό καταστάσεων λειτουργίας. Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης, λαμβάνοντας υπόψιν τις συγκρίσεις είναι υπεύθυνες να αποφασίσουν σε ποια κατάσταση βρίσκεται το Φ/Β σύστημα (κανονική κατάσταση λειτουργίας, σφάλμα ανοικτοκυκλώματος, σφάλμα βραχυκυκλώματος, σφάλμα υποβιβασμού ή κατάσταση μερικής σκίασης).

Παρακάτω θα εξηγηθεί αναλυτικά τόσο η λειτουργία του αλγορίθμου εντοπισμού βλαβών, όσο και η δομή των αποθηκευμένων δεδομένων τα οποία χρησιμοποιεί το λογισμικό για να αποφασίσει που ανήκει μια συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο.

Όλα τα αποθηκευμένα δεδομένα του λογισμικού που αναπτύχθηκε, τα οποία αντιστοιχούν σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας, συλλέχθηκαν προσομοιώνοντας τις καταστάσεις αυτές σε περιβάλλον Simulink.

## 4.2 Αποθηκευμένα δεδομένα του λογισμικού που αναπτύχθηκε

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το λογισμικό που αναπτύχθηκε αξιοποιεί έναν μεγάλο αριθμό αποθηκευμένων δεδομένων, προκειμένου να αποφασίσει που ανήκει η τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας του Φ/Β συστήματος. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να λειτουργεί κάτω από πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ηλιακής ακτινοβολίας. Για την εργασία αυτή, έχει θεωρηθεί το εύρος  $[100 \text{ W/m}^2, 1000 \text{ W/m}^2]$  για την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς και το εύρος τιμών  $[-5^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}]$  για την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Ισχύει ότι για την ίδια ακριβώς κατάσταση λειτουργίας (πχ. χωρίς σφάλματα), οι τιμές της τάσης ανοικτοκυκλώματος, του ρεύματος βραχυκυκλώματος και της μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος δεν είναι οι ίδιες για όλους τους συνδυασμούς θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας. Η πρώτη ομάδα αποθηκευμένων δεδομένων που συλλέχθηκε περιλαμβάνει τις τιμές  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$  για ένα μεγάλο αριθμό συνδυασμών θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας, όταν το σύστημα λειτουργεί χωρίς κανένα σφάλμα.

Η χρησιμότητα της ομάδας αυτής δεδομένων είναι η εξής: για κάθε εκτέλεση του προγράμματος σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την ηλιακή ακτινοβολία κάτω από τις οποίες λειτουργεί το σύστημα, ανακτώνται οι τιμές  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$  που αντιστοιχούν στον κοντινότερο αποθηκευμένο συνδυασμό θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας. Οι αποθηκευμένες τιμές  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$  θα συγκριθούν με τις αντίστοιχες τιμές  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$  που μετρήθηκαν. Το λογισμικό θα ελέγξει τη σύγκριση και θα αποφανθεί σε ποια κατάσταση λειτουργίας βρίσκεται το φωτοβολταϊκό σύστημα. Ουσιαστικά, ο αλγόριθμος ελέγχει το πόσο απέχουν οι μετρημένες τιμές  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$ , από τις αντίστοιχες αποθηκευμένες, οι οποίες είναι η πιο κοντινή προσέγγιση του φωτοβολταϊκού συστήματος σε κατάσταση λειτουργίας χωρίς σφάλματα.

Παρακάτω, φαίνεται ο Πίνακας 4.1 ο οποίος περιλαμβάνει κάποια από αυτά τα δεδομένα, προκειμένου να γίνει κατανοητή η χρησιμότητά τους. Σημειώνεται ότι το εύρος για την ηλιακή ακτινοβολία είναι  $[100 \text{ W/m}^2, 1000 \text{ W/m}^2]$  με βήμα  $10 \text{ W/m}^2$ , ενώ το εύρος για τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι  $[-5^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}]$  με βήμα  $10^\circ\text{C}$ .

Για παράδειγμα, αν οι μετρημένες τιμές θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας είναι  $8^\circ\text{C}$  και  $532 \text{ W/m}^2$ , θα ανακτηθεί ο συνδυασμός  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$ , ο οποίος αντιστοιχεί σε τιμές θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας  $10^\circ\text{C}$  και  $530 \text{ W/m}^2$  αντίστοιχα.

**Πίνακας 4.1.** 1η ομάδα αποθηκευμένων δεδομένων.

Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρασία (°C)	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (A)	P <sub>max</sub> (W)
100	-5	86.1	1.8	120.3
100	5	82.7	1.8	114.5
100	15	79.4	1.8	108.7
100	25	76	1.8	102.8
100	35	72.7	1.8	97
100	45	69.3	1.8	91.2
110	-5	86.6	2	133.2
...	...	...	...	...
110	45	69.9	2	101.3
...	...	...	...	...
200	-5	90	3.5	252.5
200	5	86.8	3.6	241.3
200	15	83.6	3.6	230.1
200	25	80.4	3.6	218.9
200	35	77.1	3.6	207.7
200	45	73.9	3.6	196.4
...	...	...	...	...
500	-5	95	8.9	670.7
500	5	91.9	8.9	644.4
500	15	88.9	9	617.9
500	25	85.9	9	591.2
500	35	82.8	9	564.5
500	45	79.7	9.1	537.7
...	...	...	...	...
1000	-5	98.6	17.7	1401.6
1000	5	95.8	17.8	1351.1
1000	15	92.8	17.9	1300.3
1000	25	89.9	18	1249.3
1000	35	87	18.1	1198
1000	45	84.1	18.2	1146.6

Η παραπάνω ομάδα δεδομένων περιέχει για όλο το φάσμα των τιμών της θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας πολλούς συνδυασμούς των τιμών αυτών. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα βήματα των μετρήσεων είναι σχετικά μικρά ( $10 \text{ W/m}^2$  για την ηλιακή ακτινοβολία,  $10^\circ\text{C}$  για την θερμοκρασία). Μικρότερο βήμα συνεπάγεται περισσότερη ακρίβεια, αλλά σαφώς μεγαλύτερο χρόνο για τη δημιουργία της ομάδας αυτής. Αντίθετα, μεγάλο βήμα συνεπάγεται μικρότερη ακρίβεια, αλλά μικρότερο χρόνο για τη μέτρηση των δεδομένων της ομάδας.

Στη συνέχεια, θα γίνεται η χρήση των συμβολισμών  $V_{\text{measured}}$ ,  $I_{\text{measured}}$ ,  $P_{\text{measured}}$ , όταν γίνεται αναφορά στις τιμές  $V_{\text{oc}}$ ,  $I_{\text{sc}}$ ,  $P_{\text{max}}$  της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος, ενώ θα γίνεται η χρήση των συμβολισμών  $V_{\text{expected}}$ ,  $I_{\text{expected}}$ ,  $P_{\text{expected}}$ , όταν γίνεται αναφορά στις τιμές  $V_{\text{oc}}$ ,  $I_{\text{sc}}$ ,  $P_{\text{max}}$  που ανακτήθηκαν από τον Πίνακα 4.1.

Για την ολοκληρωμένη και επιτυχή λειτουργία του αλγορίθμου, ήταν απαραίτητη και η συλλογή μιας δεύτερης κατηγορίας δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, για αρκετές πιθανές καταστάσεις λειτουργίας της συστοιχίας (λειτουργία χωρίς σφάλματα, λειτουργία με σφάλμα ανοικτοκυκλώματος, λειτουργία με σφάλμα βραχυκυκλώματος, λειτουργία με σφάλμα υποβιβασμού, λειτουργία σε κατάσταση μερικής σκίασης), και για διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας, συλλέχθηκαν τα εξής δεδομένα:

- Ποσοστιαία διαφορά τάσης σε κανονική λειτουργία και τάσης που μετρήθηκε:

$$\Delta V = \frac{|V_{\text{expected}} - V_{\text{measured}}|}{V_{\text{expected}}} \quad (1)$$

- Ποσοστιαία διαφορά έντασης παραγόμενου ρεύματος σε κανονική λειτουργία και έντασης παραγόμενου ρεύματος που μετρήθηκε:

$$\Delta I = \frac{|I_{expected} - I_{measured}|}{I_{expected}} \quad (2)$$

- Ποσοστιαία διαφορά μέγιστης ισχύος σε κανονική λειτουργία και μέγιστης ισχύος που μετρήθηκε:

$$\Delta P = \frac{|P_{expected} - P_{measured}|}{P_{expected}} \quad (3)$$

- Αριθμός τοπικών μεγίστων στην καμπύλη  $P = f(V)$

Όπως εξηγήθηκε και προηγουμένως, ο αλγόριθμος βασίζεται στην απόκλιση των μετρημένων  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$ , από τις αντίστοιχες αποθηκευμένες τιμές  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$  που θα είχε (προσεγγιστικά) η φωτοβολταϊκή συστοιχία σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, καθώς και στον αριθμό των τοπικών μεγίστων, προκειμένου να αποφανθεί για το αποτέλεσμα.

Τα δεδομένα μετρήθηκαν για αρκετούς συνδυασμούς θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας (εύρος τιμών  $[100 \text{ W/m}^2, 1000 \text{ W/m}^2]$  με βήμα  $100 \text{ W/m}^2$  για την ηλιακή ακτινοβολία και εύρος  $[-5^\circ\text{C}, 45^\circ\text{C}]$  με βήμα  $10^\circ\text{C}$  για τη θερμοκρασία). Όπως και με την 1η ομάδα αποθηκευμένων δεδομένων (Πίνακας 4.1), συλλέχθηκαν δεδομένα που αφορούν και τις τέσσερις περιπτώσεις σφαλμάτων για πολλούς δυνατούς συνδυασμούς θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας, για όλο το φάσμα των τιμών τους.



- 1 Κανονική λειτουργία της συστοιχίας χωρίς σφάλματα. Και οι τρεις ποσοστιαίες διαφορές, όπως αυτές ορίστηκαν παραπάνω, προκύπτουν ίσες με 0. Αυτό συμβαίνει καθώς οι μετρούμενες τιμές  $V_{\text{measured}}$ ,  $I_{\text{measured}}$ ,  $P_{\text{measured}}$  συμπίπτουν απόλυτα με τις  $V_{\text{expected}}$ ,  $I_{\text{expected}}$ ,  $P_{\text{expected}}$ . Ο λόγος για τον οποίο συμπίπτουν είναι ότι όλοι οι συνδυασμοί θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας είναι υποσύνολο της 1ης ομάδας αποθηκευμένων δεδομένων, οπότε η σύμπτωση ήταν απόλυτη.
- 2 Σφάλμα υποβιβασμού σε μια σειρά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, με αντίσταση  $R = 5\Omega$ .
- 3 Σφάλμα υποβιβασμού σε μια σειρά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, με αντίσταση  $R = 10\Omega$ .
- 4 Σφάλμα ανοικτοκυκλώματος σε μια σειρά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.
- 5 Σφάλμα βραχυκυκλώματος σε ένα πλαίσιο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.
- 6 Σφάλμα μερικής σκίασης σε ένα πλαίσιο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, το οποίο σκιάζεται και λαμβάνει το 50% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι παραπάνω έξι περιπτώσεις αντιπροσωπεύουν έναν πολύ μικρό αριθμό καταστάσεων λειτουργίας. Όμως, είναι αρκετά αντιπροσωπευτικές, ώστε να μπορεί να ταυτοποιηθεί η πλειοψηφία των περιπτώσεων πραγματικής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η συλλογή δεδομένων περισσότερων περιπτώσεων για τα ίδια σφάλματα θα ήταν πλεονασμός, καθώς ο αλγόριθμος στηρίζεται στις διαφορές μεταξύ των σφαλμάτων, όπως αυτές φαίνονται στις χαρακτηριστικές στο Κεφάλαιο 3. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η ταυτοποίηση αυτή θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενη ενότητα. Όμως, πρέπει πρώτα να γίνει κατανοητό πως χρησιμοποιούνται τα παραπάνω δεδομένα. Παρακάτω, θα παρουσιαστεί ένα δείγμα από αυτά για κάθε μια από τις έξι περιπτώσεις.

**Πίνακας 4.2.** Χαρακτηριστικά λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας χωρίς σφάλματα.

Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρασία (°C)	$\Delta V$	$\Delta I$	$\Delta P$	Τοπικά μέγιστα
100	-5	0	0	0	1
100	5	0	0	0	1
...	...	...	...	...	...
100	45	0	0	0	1
200	-5	0	0	0	1
...	...	...	...	...	...
200	45	0	0	0	1
300	-5	0	0	0	1
...	...	...	...	...	...
1000	45	0	0	0	1

**Πίνακας 4.3.** Χαρακτηριστικά λειτουργία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με σφάλμα ανοικτοκυκλώματος σε μια σειρά.

Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρασία (°C)	$\Delta V$	$\Delta I$	$\Delta P$	Τοπικά μέγιστα
100	-5	0.0043	0.3333	0.3333	1
100	5	0.0044	0.3333	0.3333	1
...	...	...	...	...	...
100	45	0.0047	0.3333	0.3333	1
200	-5	0.0020	0.3333	0.3333	1
...	...	...	...	...	...
200	45	0.0022	0.3333	0.3333	1
300	-5	0.0013	0.3333	0.3333	1
...	...	...	...	...	...
1000	45	0.0004	0.3333	0.3333	1

**Πίνακας 4.4.** Χαρακτηριστικά λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με σφάλμα βραχυκυκλώματος σε ένα πλαίσιο.

Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρασία (°C)	$\Delta V$	$\Delta I$	$\Delta P$	Τοπικά μέγιστα
100	-5	0.1487	0	0.1425	1
100	5	0.1455	0	0.1389	1
...	...	...	...	...	...
100	45	0.1323	0	0.1243	1
200	-5	0.1511	0	0.1444	1
...	...	...	...	...	...
200	45	0.1355	0	0.1270	1
300	-5	0.1522	0	0.1455	1
...	...	...	...	...	...
1000	45	0.1414	0	0.1328	1

**Πίνακας 4.5.** Χαρακτηριστικά λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με σφάλμα υποβιβασμού ( $R = 5\Omega$ , μια σειρά).

Ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	Θερμοκρασία (°C)	$\Delta V$	$\Delta I$	$\Delta P$	Τοπικά μέγιστα
100	-5	0.0010	0	0.0145	1
100	5	0.0011	0	0.0151	1
...	...	...	...	...	...
100	45	0.0011	0	0.0180	1
200	-5	0.0008	0	0.0310	1
...	...	...	...	...	...
200	45	0.0009	0	0.0368	1
300	-5	0.0007	0	0.0495	1
...	...	...	...	...	...
1000	45	0.0003	0.0001	0.1744	1

**Πίνακας 4.6.** Χαρακτηριστικά λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με σφάλμα υποβιβασμού ( $R = 10\Omega$ , μια σειρά).

Ακτινοβολία ( $W/m^2$ )	Θερμοκρασία ( $^{\circ}C$ )	$\Delta V$	$\Delta I$	$\Delta P$	Τοπικά μέγιστα
100	-5	0.0017	0	0.0323	1
100	5	0.0017	0	0.0334	1
...	...	...	...	...	...
100	45	0.0018	0	0.0388	1
200	-5	0.0012	0	0.0711	1
...	...	...	...	...	...
200	45	0.0012	0	0.0801	1
300	-5	0.0009	0	0.1105	1
...	...	...	...	...	...
1000	45	0.0004	0.0061	0.2459	1

**Πίνακας 4.7.** Χαρακτηριστικά λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε κατάσταση μερικής σκίασης (σκίαση 50%) σε ένα πλαίσιο της συστοιχίας.

Ακτινοβολία ( $W/m^2$ )	Θερμοκρασία ( $^{\circ}C$ )	$\Delta V$	$\Delta I$	$\Delta P$	Τοπικά μέγιστα
100	-5	0.0031	0	0.1511	2
100	5	0.0033	0	0.1477	2
...	...	...	...	...	...
100	45	0.0043	0	0.1341	2
200	-5	0.0027	0	0.1529	2
...	...	...	...	...	...
200	45	0.0038	0	0.1366	2
300	-5	0.0026	0	0.1540	2
...	...	...	...	...	...
1000	45	0.0032	0	0.1422	2

Προκειμένου τα δεδομένα των έξι παραπάνω πινάκων να είναι χρήσιμα για τον αλγόριθμο, πρέπει για κάθε έναν από τους έξι πίνακες να βρεθεί ο αριθμητικός μέσος όρος για κάθε στήλη ( $\Delta V$ ,  $\Delta I$ ,  $\Delta P$ , Τοπικά μέγιστα). Αξίζει να σημειωθεί ότι, στη συγκεκριμένη περίπτωση φωτοβολταϊκής συστοιχίας, για όλους σχεδόν τους συνδυασμούς θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας, οι τιμές της κάθε στήλης αποκλίνουν ελάχιστα από το μέσο όρο της στήλης. Στον Πίνακα 4.8, φαίνονται οι μέσοι όροι για κάθε στήλη, για κάθε μια από τις έξι περιπτώσεις λειτουργίας:

**Πίνακας 4.8.** Μέσος όρος διαφορών και τοπικών μεγίστων ανά κατάσταση λειτουργίας.

Κατάσταση λειτουργίας	μ.ο. $\Delta V$	μ.ο. $\Delta I$	μ.ο. $\Delta P$	μ.ο. τοπικών μεγίστων
1. Κανονική	0	0	0	1
2. Ανοικτοκύκλωμα	0.0012	0.3333	0.3333	1
3. Βραχυκύκλωμα	0.1459	0	0.1383	1
4. Υποβιβασμός ( $R = 5\Omega$ )	0.0005	0	0.0985	1
5. Υποβιβασμός ( $R = 10\Omega$ )	0.0007	0.0003	0.1669	1
6. Μερική σκίαση	0.0030	0	0.1471	2

Ο Πίνακας 4.8 αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται ο αλγόριθμος εντοπισμού βλαβών που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, προκειμένου να αποφανθεί σε ποια κατάσταση λειτουργίας βρίσκεται το φωτοβολταϊκό σύστημα. Ο τρόπος με τον οποίο ο αλγόριθμος χειρίζεται τα δεδομένα αυτά, θα περιγραφεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

### 4.3 Λειτουργία του αλγορίθμου

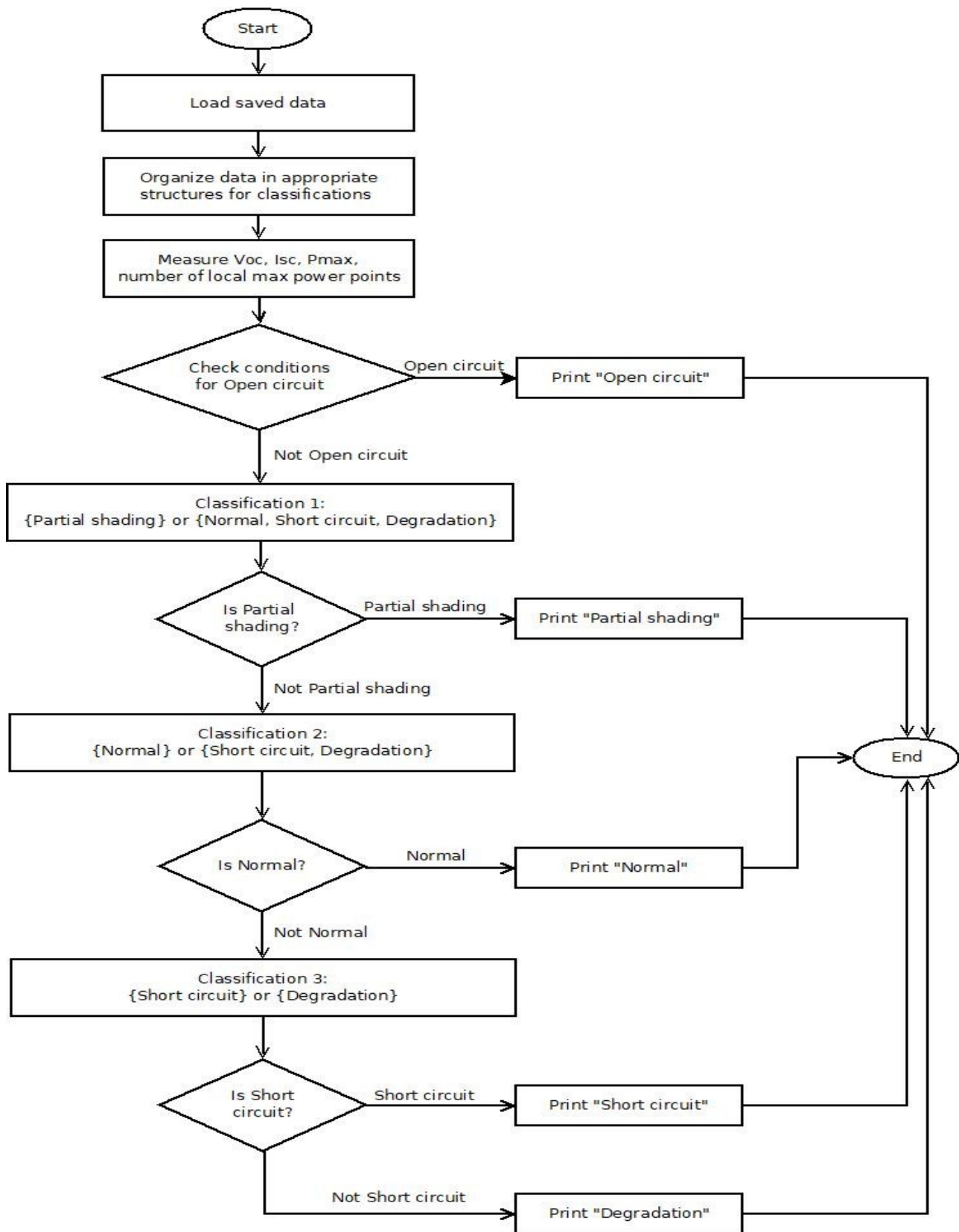
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το μεγαλύτερο μέρος της λειτουργίας του προγράμματος στηρίζεται στον Πίνακα 4.8 με τους μέσους όρους των διαφορών και των τοπικών μεγίστων, ανά κατάσταση λειτουργίας.

Στα παρακάτω Σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου, όπου παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία ανίχνευσης σφαλμάτων.

Τα βασικά στάδια εκτέλεσης είναι τα ακόλουθα:

- Φόρτωση των αποθηκευμένων δεδομένων και οργάνωσή τους στις δομές που περιγράφηκαν στους παραπάνω Πίνακες (4.1 – 4.8), προκειμένου να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά από τον αλγόριθμο.
- Μέτρηση των  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$  και του αριθμού τοπικών μεγίστων στην χαρακτηριστική  $P = f(V)$  της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος, καθώς και υπολογισμός των ποσοστιαίων διαφορών από τις αποθηκευμένες τιμές  $V_{expected}$ ,  $I_{expected}$ ,  $P_{expected}$ .
- Εύρεση της κατάστασης του συστήματος.

Στη συνέχεια, θα εξηγηθούν αναλυτικά όλα τα παραπάνω.



**Σχήμα 4.1.** Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου εντοπισμού βλαβών που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

### 4.3.1. Ανίχνευση σφαλμάτων

Προτού εξηγηθεί ο τρόπος με τον οποίο οργανώνονται τα δεδομένα, πρέπει να σημειωθεί ότι το σφάλμα ανοικτοκυκλώματος, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα ροής, είναι η μόνη κατάσταση λειτουργίας η οποία δεν εντοπίζεται με τεχνικές μηχανικής μάθησης. Είναι εξαιρετικά απλό να εντοπιστεί ένα σφάλμα ανοικτοκυκλώματος, και μάλιστα το λογισμικό είναι ικανό να αποφανθεί και σε πόσες σειρές του συστήματος συμβαίνει το σφάλμα αυτό. Η συστοιχία που μελετάται στην εργασία αυτή αποτελείται από τρεις σειρές (χωρίς όμως αυτό να περιορίζει τον αλγόριθμο να λειτουργήσει σε κάποια άλλη συστοιχία, κάνοντας μόνο μικρές προσαρμογές). Σύμφωνα με το νόμο ρευμάτων του Kirchhoff, η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την κάθε γραμμή της συστοιχίας είναι ακριβώς η ίδια (θερώντας ότι όλες οι γραμμές αποτελούνται από φωτοβολταϊκά πλαίσια με ακριβώς ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά λειτουργίας) και ίση με το  $1/3$  της έντασης του συνολικού ρεύματος εξόδου της συστοιχίας. Δηλαδή, για μια συστοιχία με  $n$  γραμμές, η ένταση του ρεύματος της κάθε γραμμής είναι ίση με  $1/n$ . Επομένως, όταν η ποσοστιαία διαφορά της έντασης του ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας  $I_{\text{measured}}$  της τρέχουσας κατάστασης από την ένταση του ρεύματος  $I_{\text{expected}}$  που θα παρείχε το σύστημα αν αυτό λειτουργούσε κανονικά είναι ίση με  $1/3$ , αυτό σημαίνει ότι είναι πολύ πιθανόν να υπάρχει σφάλμα ανοικτοκυκλώματος σε μια σειρά του συστήματος. Φυσικά, κατά την ανάπτυξη του λογισμικού, θεωρήθηκε ότι η ποσοστιαία διαφορά θα μπορούσε να είναι λίγο μεγαλύτερη ή λίγο μικρότερη από το  $1/3$ . Επομένως, ο αλγόριθμος αποφασίζει ότι υπάρχει ανοικτοκύκλωμα σε μια γραμμή, αν η ποσοστιαία διαφορά αποκλίνει από το  $1/3$  το πολύ κατά μια θετική σταθερά ίση με  $0.03$ . Η τιμή αυτή επιλέχθηκε καθώς είναι αρκετά μικρή, επομένως η πιθανότητα να οδηγήσει τον αλγόριθμο σε λάθος απόφαση είναι μειωμένη. Δεν μπορεί όμως να υπάρχει η απόλυτη σιγουριά ότι πρόκειται για ανοικτοκύκλωμα, καθώς ορισμένες περιπτώσεις σφάλματος υποβιβασμού με μεγάλη αντίσταση, παρουσιάζουν πτώση έντασης του ρεύματος, η οποία πλησιάζει, ή και ξεπερνάει τις παραπάνω



τιμές. Εδώ αξίζει να υπενθυμιστεί ότι το σφάλμα ανοικτοκυκλώματος είναι μια υποκατηγορία του σφάλματος υποβιβασμού.

Αντίστοιχα, αν η ποσοστιαία διαφορά είναι ίση με  $2/3$ , τότε είναι πολύ πιθανό να υπάρχει σφάλμα ανοικτοκυκλώματος σε δυο σειρές της συστοιχίας. Αντίστοιχα με την περίπτωση του ανοικτοκυκλώματος σε μια γραμμή, θεωρήθηκε ότι η ποσοστιαία διαφορά θα μπορούσε να αποκλίνει από την τιμή  $2/3$ , οπότε τέθηκε ξανά το όριο  $0.03$ , όπως περιγράφηκε παραπάνω. Τέλος, αν η ένταση του ρεύματος που παράγεται είναι μηδέν, τότε όλη η φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι σε κατάσταση ανοικτοκυκλώματος. Στον αλγόριθμο έχει τεθεί το εύρος τιμών από  $97\%$  έως  $100\%$  για την πτώση της έντασης του ρεύματος, λαμβάνοντας ξανά υπόψη τη σταθερά  $0.03$  ως μέγιστη αποδεκτή απόκλιση από το  $3/3$ , ώστε να χαρακτηριστεί όλη η φωτοβολταϊκή συστοιχία ως ανοικτοκύκλωμα.

Όταν ξεκινάει η διαδικασία εντοπισμού των σφαλμάτων, ο πρώτος έλεγχος που γίνεται είναι αν υπάρχει ανοικτοκύκλωμα. Αν υπάρχει, τότε ο αλγόριθμος εμφανίζει ότι βρέθηκε ανοικτοκύκλωμα και τερματίζει τη λειτουργία του. Όμως, εάν ο αλγόριθμος αποφασίσει ότι δεν υπάρχει ανοικτοκύκλωμα, τότε πρέπει να αποφασίσει σε ποια από τις τέσσερις υπόλοιπες περιπτώσεις βρίσκεται το φωτοβολταϊκό σύστημα:

- Λειτουργία χωρίς σφάλματα
- Λειτουργία με σφάλμα βραχυκυκλώματος
- Λειτουργία με σφάλμα υποβιβασμού
- Λειτουργία σε κατάσταση μερικής σκίασης

Επομένως, οι τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτό το σημείο για να διακρίνουν σε ποια από τις τέσσερις παραπάνω περιπτώσεις ανήκει η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος, σε περίπτωση που έχει αποκλειστεί η περίπτωση να υπάρχει σφάλμα ανοικτοκυκλώματος.

Εδώ, είναι αναγκαίο να περιγραφεί συνοπτικά ο αλγόριθμος μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, ο οποίος ονομάζεται «**Κανόνας του K κοντινότερου γείτονα**». Η λειτουργία του είναι αρκετά απλή και έχει ως εξής. Έστω ο παρακάτω πίνακας δυο στηλών:

Αριθμητικές τιμές	Ετικέτες
Αριθμητική τιμή 1	Ετικέτα 1
Αριθμητική τιμή 2	Ετικέτα 2
...	...
Αριθμητική τιμή n	Ετικέτα n

Οι αριθμητικές τιμές είναι αποθηκευμένα δεδομένα, ενώ οι ετικέτες που αντιστοιχούν σε αυτές, παρέχουν μια περιγραφή για την κάθε τιμή αντίστοιχα. Αν ο αλγόριθμος δεχτεί ως είσοδο μια τιμή, ο αλγόριθμος του «K κοντινότερου γείτονα» θα ψάξει όλες τις αποθηκευμένες αριθμητικές τιμές, και θα εντοπίσει σε ποια από αυτές βρίσκεται πιο κοντά η τιμή της εισόδου. Ανάλογα, θα αποδώσει ως χαρακτηρισμό στην τιμή της εισόδου την ετικέτα, η οποία αντιστοιχεί στην αποθηκευμένη τιμή που βρίσκεται κοντινότερα στην τιμή της εισόδου.

Παρατηρώντας τον παραπάνω Πίνακα 4.8 με τους μέσους όρους των διαφορών των  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $P_{max}$  και τους μέσους όρους των τοπικών μεγίστων, αλλά και τις γραφικές παραστάσεις του κάθε σφάλματος, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αυτό που διακρίνει την κατάσταση μερικής σκίασης από

τις άλλες τρεις, είναι ο αριθμός των τοπικών μεγίστων στη χαρακτηριστική καμπύλη  $P = f(V)$ . Σε κάθε περίπτωση πλην της μερικής σκίασης, υπάρχει μόνο ένα τοπικό μέγιστο, το οποίο είναι και το Maximum Power Point.

Οπότε, η πρώτη κατηγοριοποίηση, η οποία θα διακρίνει αν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση μερικής σκίασης ή σε κάποια από τις υπόλοιπες τρεις (κανονική λειτουργία, λειτουργία με σφάλμα βραχυκυκλώματος, λειτουργία με σφάλμα υποβιβασμού) θα είναι η εξής:

- Λειτουργία χωρίς σφάλματα
- Λειτουργία με σφάλμα βραχυκυκλώματος
- Λειτουργία με σφάλμα υποβιβασμού

ή

- Λειτουργία σε κατάσταση μερικής σκίασης

**Πίνακας 4.9.** Πίνακας K-κοντινότερου γείτονα για την πρώτη κατηγοριοποίηση.

Μέσος όρος τοπικών μεγίστων (αριθμητικές τιμές)	Κατάσταση (ετικέτες)
1	Υποβιβασμός ( $R = 5 \Omega$ ) (0)
1	Υποβιβασμός ( $R = 10 \Omega$ ) (0)
1	Κανονική (0)
2	Μερική σκίαση (1)
1	Βραχυκύκλωμα (0)

Ο Πίνακας 4.9 είναι ένα υποσύνολο του Πίνακα 4.8. Ουσιαστικά, επιλέγεται η παράμετρος του Πίνακα 4.8 που χρειάζεται προκειμένου να γίνει η πρώτη κατηγοριοποίηση. Η παράμετρος αυτή δεν είναι άλλη από το μέσο όρο των τοπικών μεγίστων ανά κατάσταση λειτουργίας, ενώ οι ετικέτες είναι οι καταστάσεις λειτουργίας που αντιστοιχούν στους μέσους όρους των τοπικών μεγίστων. Από τη στιγμή που η κατηγοριοποίηση γίνεται για να ξεχωρίσει την κατάσταση μερικής

σκίασης από όλες τις υπόλοιπες (λειτουργία με σφάλμα ανοικτοκυκλώματος, λειτουργία με σφάλμα βραχυκυκλώματος και λειτουργία χωρίς σφάλματα), οι ετικέτες για τον πίνακα του “Κοντινότερου γείτονα” είναι 2: η (1), η οποία αντιστοιχεί στην κατάσταση μερικής σκίασης, και η (0), η οποία αντιστοιχεί στις υπόλοιπες καταστάσεις. Να σημειωθεί ότι από τον Πίνακα 4.8 αφαιρείται η γραμμή που αφορά το σφάλμα ανοικτοκυκλώματος, καθώς η περίπτωση αυτή έχει αποκλειστεί.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.9, όταν το σύστημα δεν βρίσκεται σε κατάσταση μερικής σκίασης, θα υπάρχει πάντα ένα μέγιστο. Οπότε, ο αλγόριθμος δεν υπάρχει καμία περίπτωση να μπερδέψει την κατάσταση αυτή με κατάσταση μερικής σκίασης. Αντιθέτως, όταν υπάρχει μερική σκίαση, τα τοπικά μέγιστα θα είναι πάντα δύο ή και περισσότερα. Επομένως, η κοντινότερη τιμή θα είναι το 2, άρα η περίπτωση θα κατατάσσεται ως μερική σκίαση.

Αν ο αλγόριθμος αποφασίσει ότι η περίπτωση που εξετάζεται αφορά μερική σκίαση, τότε η ετικέτα που επιστρέφεται είναι η (1). Τότε εμφανίζει το κατάλληλο μήνυμα και τερματίζει τη λειτουργία του. Αν όμως κρίνει ότι η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος ανήκει σε μια από τις υπόλοιπες τρεις κατηγορίες, τότε επιστρέφεται η ετικέτα (0) και το λογισμικό πρέπει να αποφασίσει σε ποια από αυτές ανήκει.

Αν παρατηρήσουμε τον Πίνακα 4.8 με τους μέσους όρους των διαφορών, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι αυτό που διακρίνει την κατάσταση λειτουργίας χωρίς σφάλματα, από τις υπόλοιπες δύο (κατάσταση λειτουργίας με σφάλμα υποβιβασμού, κατάσταση λειτουργίας με βραχυκύκλωμα), είναι η διαφορά της μέγιστης ισχύος. Παρατηρούμε ότι για κανονική κατάσταση λειτουργίας, η διαφορά αυτή είναι το 0, ενώ για τις άλλες δυο είναι αρκετά μεγαλύτερη.

Οπότε, η δεύτερη κατηγοριοποίηση, η οποία θα διακρίνει αν το σύστημα λειτουργεί χωρίς σφάλματα ή βρίσκεται σε μια από τις υπόλοιπες 2 καταστάσεις λειτουργίας (λειτουργία με σφάλμα βραχυκυκλώματος, λειτουργία με σφάλμα υποβιβασμού) έχει ως εξής:

- Λειτουργία χωρίς σφάλματα

ή

- Λειτουργία με σφάλμα βραχυκυκλώματος
- Λειτουργία με σφάλμα υποβιβασμού

**Πίνακας 4.10.** Πίνακας K-κοντινότερου γείτονα για τη δεύτερη κατηγοριοποίηση.

Ποσοστιαία διαφορά ισχύος $\Delta P$ (αριθμητικές τιμές)	Κατάσταση (ετικέτες)
0.0985	Υποβιβασμός ( $R = 5 \Omega$ ) (0)
0.1669	Υποβιβασμός ( $R = 10 \Omega$ ) (0)
0	Κανονική (1)
0.1383	Βραχυκύκλωμα (0)

Ο Πίνακας 4.10 αποτελεί επίσης ένα υποσύνολο του Πίνακα 4.8, με τη διαφορά ότι εκτός από τη γραμμή που αφορά το σφάλμα ανοικτοκυκλώματος, έχει παραλειφθεί και η γραμμή που αφορά την κατάσταση μερικής σκίασης. Αυτό διότι η περίπτωση να λειτουργεί η συστοιχία σε κατάσταση μερικής σκίασης έχει αποκλειστεί στην πρώτη κατηγοριοποίηση. Από όλες τις παραμέτρους που απεικονίζονται στον Πίνακα 4.8, επιλέγεται η ποσοστιαία διαφορά ισχύος, καθώς είναι αυτή που διακρίνει την κανονική λειτουργία της συστοιχίας από τις υπόλοιπες περιπτώσεις (σφάλμα βραχυκυκλώματος, σφάλμα υποβιβασμού). Οι ετικέτες είναι επίσης 2: η (1), η οποία αντιστοιχεί στην κανονική λειτουργία του Φ/Β συστήματος και η (0) η οποία αντιστοιχεί στις υπόλοιπες καταστάσεις.

Είναι εύκολα κατανοητό ότι όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία χωρίς σφάλματα, πάντα η ποσοστιαία διαφορά της ισχύος θα τείνει στο μηδέν. Αντίθετα, στην πλειοψηφία των υπόλοιπων περιπτώσεων (σφάλμα υποβιβασμού, βραχυκύκλωμα), η ποσοστιαία διαφορά της ισχύος θα είναι σημαντική. Βέβαια, σε πολύ οριακές περιπτώσεις (πχ. σφάλμα υποβιβασμού με αντίσταση  $R = 1\Omega$ ), η πτώση της ισχύος είναι ελάχιστη. Επομένως, το λογισμικό μπορεί να θεωρήσει μια τέτοια περίπτωση ως λειτουργία χωρίς σφάλματα. Αυτό έχει ως συνέπεια η απόδοση του αλγορίθμου να μην είναι 100%, αλλά ελαφρώς μειωμένη. Το ζήτημα αυτό θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο εκτενώς.

Αν ο αλγόριθμος αποφασίσει ότι πρόκειται για κατάσταση λειτουργίας χωρίς σφάλματα, τότε επιστρέφει την ετικέτα (1), εμφανίζει το κατάλληλο μήνυμα και τερματίζει τη λειτουργία του. Αν αποφασίσει ότι δεν πρόκειται για κατάσταση κανονικής λειτουργίας, τότε επιστρέφει την ετικέτα (0), και εκτελείται η τελευταία κατηγοριοποίηση, προκειμένου να αποφανθεί αν πρόκειται για σφάλμα υποβιβασμού, ή για σφάλμα βραχυκυκλώματος.

Οπότε, η τρίτη κατηγοριοποίηση, η οποία θα διακρίνει αν το σύστημα παρουσιάζει σφάλμα βραχυκυκλώματος ή σφάλμα υποβιβασμού, έχει ως εξής:

- Λειτουργία με σφάλμα υποβιβασμού

ή

- Λειτουργία με σφάλμα βραχυκυκλώματος

Παρατηρώντας τον Πίνακα 4.8 με τους μέσους όρους των διαφορών, αλλά και τις χαρακτηριστικές του κάθε σφάλματος, βλέπουμε ότι αυτό που διακρίνει ένα σφάλμα υποβιβασμού από ένα σφάλμα βραχυκυκλώματος, είναι η ποσοστιαία διαφορά της τάσης που αναπτύσσεται στα

άκρα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας: σε ένα σφάλμα βραχυκυκλώματος, η ποσοστιαία διαφορά της τάσης είναι μεγάλη, σε αντίθεση με ένα σφάλμα υποβιβασμού, όπου είναι σχεδόν μηδενική. Βέβαια, σε οριακές περιπτώσεις (πχ σφάλμα υποβιβασμού μεγάλης αντίστασης και στις τρεις σειρές), η διαφορά της τάσης αυξάνεται και είναι δυνατόν ο αλγόριθμος να αποφασίσει λανθασμένα ότι πρόκειται για σφάλμα βραχυκυκλώματος. Αυτό, όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, έχει ως συνέπεια μια μικρή μείωση της απόδοσης του προγράμματος.

**Πίνακας 4.11.** Πίνακας Κ-κοντινότερου γείτονα για την τρίτη κατηγοριοποίηση.

Ποσοστιαία διαφορά τάσης $\Delta V$ (αριθμητικές τιμές)	Κατάσταση (ετικέτες)
0.0005	Υποβιβασμός ( $R = 5 \Omega$ ) (0)
0.0007	Υποβιβασμός ( $R = 10 \Omega$ ) (0)
0.1459	Βραχυκύκλωμα (1)

Ο Πίνακας 4.11 είναι επίσης υποσύνολο του Πίνακα 4.8. Έχουν αφαιρεθεί οι γραμμές που αφορούν το σφάλμα ανοικτοκύκλωσης, την κατάσταση μερικής σκίασης, καθώς και την λειτουργία της συστοιχίας χωρίς σφάλματα, καθώς οι περιπτώσεις αυτές έχουν αποκλειστεί. Η παράμετρος του Πίνακα 4.8 που επιλέχθηκε για την τρίτη κατηγοριοποίηση είναι η ποσοστιαία διαφορά της τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα της συστοιχίας. Αυτό διότι είναι η παράμετρος η οποία μπορεί να ξεχωρίσει αν λαμβάνει χώρα σφάλμα βραχυκυκλώματος ή σφάλμα υποβιβασμού. Οι ετικέτες για τον πίνακα του “Κ κοντινότερου γείτονα” είναι η (1), η οποία αντιστοιχεί στο σφάλμα βραχυκυκλώματος, καθώς και η (0), η οποία αντιστοιχεί στο σφάλμα υποβιβασμού.

Ο αλγόριθμος θα αποφασίσει σε ποιες από τις δυο παραπάνω καταστάσεις λειτουργίας βρίσκεται η φωτοβολταϊκή συστοιχία, θα επιστρέψει την κατάλληλη ετικέτα και ανάλογα θα εμφανίσει το κατάλληλο μήνυμα. Έπειτα θα τερματίσει τη λειτουργία του.



# 5. Έλεγχος απόδοσης του αλγορίθμου εντοπισμού βλαβών που αναπτύχθηκε

## 5.1 Μετρήσεις

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από την εκτέλεση αρκετών προσομοιώσεων πιθανών καταστάσεων λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, για αρκετούς συνδυασμούς θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό που πρέπει να διαπιστωθεί είναι η ικανότητα του αλγορίθμου να εκτιμήσει σωστά σε ποια κατάσταση βρίσκεται το φωτοβολταϊκό σύστημα, σε κάθε προσομοίωση. Να σημειωθεί ότι δεν είναι δυνατόν να βρεθεί η απόδοση του αλγορίθμου με απόλυτη ακρίβεια, καθώς οι συνδυασμοί λειτουργίας είναι πάρα πολλοί. Όμως, τα δεδομένα που θα παρουσιαστούν παρακάτω, είναι ένα αρκετά αντιπροσωπευτικό δείγμα, σύμφωνα με το οποίο ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε καταφέρνει να εκτιμήσει σωστά σε ποια κατάσταση βρίσκεται το φωτοβολταϊκό σύστημα στη συντριπτική πλειοψηφία των προσομοιώσεων.

Συγκεκριμένα, το δείγμα αυτό περιλαμβάνει:

- 15 περιπτώσεις σφάλματος υποβιβασμού
- 3 περιπτώσεις σφάλματος ανοικτοκυκλώματος
- 3 περιπτώσεις σφάλματος βραχυκυκλώματος
- 5 περιπτώσεις κατάστασης μερικής σκίασης
- 1 περίπτωση κατάστασης κανονικής λειτουργία

Για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις, προσομοιώνεται για 32 διαφορετικούς συνδυασμούς θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας η λειτουργία του συστήματος. Οι δοκιμές δεν έγιναν για δεδομένα τα οποία συμπίπτουν με τα αποθηκευμένα που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος, καθώς ο σκοπός της ενότητας αυτής είναι η αξιολόγηση της λειτουργίας του αλγορίθμου για δεδομένα για τα οποία δεν έχει προηγούμενη γνώση. Επομένως, οι συνδυασμοί της θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας είναι διαφορετικοί από αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στα αποθηκευμένα δεδομένα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι πίνακες με τους ελέγχους της απόδοσης του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, για τις περιπτώσεις αυτές.

**Πίνακας 5.1.** Σφάλμα ανοικτοκυκλώματος σε μια σειρά.

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0043	0.3284	0.3325	1
2	100	10	0.0245	0.3271	0.3494	1
3	100	25	0.0046	0.3291	0.3325	1
4	100	40	0.0278	0.3277	0.3525	1
5	225	-5	0.0004	0.3159	0.3167	1
6	225	10	0.0186	0.3143	0.3322	1
7	225	25	0.0002	0.3161	0.3165	1
8	225	40	0.0209	0.3146	0.3346	1
9	350	-5	0.0011	0.3318	0.3331	1
10	350	10	0.0184	0.3302	0.3474	1
11	350	25	0.0012	0.3320	0.3331	1
12	350	40	0.0207	0.3304	0.3497	1
13	475	-5	0.0002	0.3251	0.3256	1
14	475	10	0.0168	0.3235	0.3395	1
15	475	25	0.0001	0.3252	0.3255	1
16	475	40	0.0188	0.3236	0.3415	1
17	600	-5	0.0006	0.3324	0.3332	1
18	600	10	0.0168	0.3308	0.3466	1
19	600	25	0.0007	0.3325	0.3332	1
20	600	40	0.0188	0.3309	0.3486	1
21	725	-5	0.0001	0.3279	0.3283	1
22	725	10	0.0159	0.3263	0.3414	1
23	725	25	0.0001	0.3280	0.3282	1
24	725	40	0.0177	0.3264	0.3433	1
25	850	-5	0.0004	0.3327	0.3332	1
26	850	10	0.0159	0.3310	0.3460	1
27	850	25	0.0005	0.3328	0.3332	1
28	850	40	0.0178	0.3311	0.3479	1
29	975	-5	0.0001	0.3293	0.3296	1
30	975	10	0.0153	0.3277	0.3422	1
31	975	25	0.0001	0.3294	0.3295	1
32	975	40	0.0170	0.3277	0.3440	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>

Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για σφάλμα ανοικτοκυκλώματος σε μια σειρά του συστήματος. Η δεύτερη και η τρίτη στήλη του πίνακα είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού συστήματος αντίστοιχα, η τέταρτη, πέμπτη και έκτη στήλη είναι οι διαφορές τάσης, έντασης του ρεύματος και ισχύος όπως

περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4.1, και συγκεκριμένα στις σχέσεις (1), (2), (3), ενώ η τελευταία στήλη δείχνει αν ο αλγόριθμος εκτίμησε σωστά (1) ή λάθος (0) την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το φωτοβολταϊκό σύστημα. Όπως φαίνεται, για όλες τις εκτελέσεις, ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε αποφάσισε σωστά.

**Πίνακας 5.2.** Σφάλμα ανοικτοκυκλώματος σε δυο σειρές.

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0188	0.6569	0.6650	1
2	100	10	0.0391	0.6567	0.6734	1
3	100	25	0.0197	0.6582	0.6649	1
4	100	40	0.0428	0.6579	0.6750	1
5	225	-5	0.0059	0.6544	0.6578	1
6	225	10	0.0242	0.6538	0.6655	1
7	225	25	0.0062	0.6550	0.6576	1
8	225	40	0.0269	0.6544	0.6667	1
9	350	-5	0.0045	0.6637	0.6662	1
10	350	10	0.0219	0.6630	0.6733	1
11	350	25	0.0049	0.6640	0.6662	1
12	350	40	0.0244	0.6633	0.6745	1
13	475	-5	0.0027	0.6608	0.6625	1
14	475	10	0.0193	0.6601	0.6695	1
15	475	25	0.0028	0.6611	0.6624	1
16	475	40	0.0215	0.6604	0.6705	1
17	600	-5	0.0025	0.6649	0.6664	1
18	600	10	0.0188	0.6641	0.6731	1
19	600	25	0.0028	0.6651	0.6664	1
20	600	40	0.0209	0.6643	0.6741	1
21	725	-5	0.0017	0.6628	0.6640	1
22	725	10	0.0175	0.6621	0.6705	1
23	725	25	0.0018	0.6630	0.6639	1
24	725	40	0.0195	0.6622	0.6715	1
25	850	-5	0.0018	0.6654	0.6665	1
26	850	10	0.0173	0.6646	0.6728	1
27	850	25	0.0019	0.6655	0.6665	1
28	850	40	0.0192	0.6647	0.6738	1
29	975	-5	0.0013	0.6638	0.6647	1
30	975	10	0.0165	0.6630	0.6710	1
31	975	25	0.0014	0.6639	0.6646	1
32	975	40	0.0183	0.6631	0.6718	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>

Και στον Πίνακα 5.2 φαίνεται, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ότι ο αλγόριθμος εκτίμησε σωστά την κατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος για όλες τις περιπτώσεις. Το ίδιο ισχύει και για το σφάλμα ανοικτοκυκλώματος σε τρεις σειρές του συστήματος:

**Πίνακας 5.3.** Σφάλμα ανοικτοκυκλώματος σε τρεις σειρές.

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.8921	0.9853	0.9982	1
2	100	10	0.8943	0.9863	0.9983	1
3	100	25	0.8920	0.9872	0.9984	1
4	100	40	0.8945	0.9881	0.9985	1
5	225	-5	0.8924	0.9930	0.9992	1
6	225	10	0.8943	0.9934	0.9992	1
7	225	25	0.8923	0.9938	0.9992	1
8	225	40	0.8945	0.9942	0.9993	1
9	350	-5	0.8927	0.9955	0.9995	1
10	350	10	0.8945	0.9957	0.9995	1
11	350	25	0.8926	0.9960	0.9995	1
12	350	40	0.8947	0.9962	0.9995	1
13	475	-5	0.8926	0.9966	0.9996	1
14	475	10	0.8944	0.9968	0.9996	1
15	475	25	0.8926	0.9970	0.9996	1
16	475	40	0.8946	0.9971	0.9996	1
17	600	-5	0.8927	0.9973	0.9997	1
18	600	10	0.8945	0.9974	0.9997	1
19	600	25	0.8927	0.9976	0.9997	1
20	600	40	0.8947	0.9977	0.9997	1
21	725	-5	0.8927	0.9977	0.9997	1
22	725	10	0.8944	0.9978	0.9997	1
23	725	25	0.8927	0.9980	0.9997	1
24	725	40	0.8946	0.9981	0.9998	1
25	850	-5	0.8928	0.9981	0.9998	1
26	850	10	0.8944	0.9981	0.9998	1
27	850	25	0.8928	0.9983	0.9998	1
28	850	40	0.8946	0.9983	0.9998	1
29	975	-5	0.8928	0.9983	0.9998	1
30	975	10	0.8944	0.9984	0.9998	1
31	975	25	0.8927	0.9985	0.9998	1
32	975	40	0.8946	0.9985	0.9998	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις προσομοιωμένες καταστάσεις μερικής σκίασης, ξεκινώντας με την περίπτωση όπου όλα τα πλαίσια έχουν υποστεί κάποια σκίαση:

**Πίνακας 5.4.** Κατάσταση μερικής σκίασης, όλα τα πλαίσια σκιασμένα.

<b>Number</b>	<b>Irradiance (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperature (°C)</b>	<b>Number of Local Max Points</b>	<b>Result</b>
1	100	-5	4	1
2	100	10	3	1
3	100	25	3	1
4	100	40	3	1
5	225	-5	4	1
6	225	10	4	1
7	225	25	3	1
8	225	40	3	1
9	350	-5	4	1
10	350	10	4	1
11	350	25	3	1
12	350	40	3	1
13	475	-5	4	1
14	475	10	4	1
15	475	25	3	1
16	475	40	3	1
17	600	-5	4	1
18	600	10	4	1
19	600	25	4	1
20	600	40	3	1
21	725	-5	4	1
22	725	10	4	1
23	725	25	4	1
24	725	40	3	1
25	850	-5	4	1
26	850	10	4	1
27	850	25	4	1
28	850	40	3	1
29	975	-5	4	1
30	975	10	4	1
31	975	25	4	1
32	975	40	3	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>				<b>100.00%</b>

Όπως φαίνεται, ο αλγόριθμος εκτίμησε σωστά για όλες τις προσομοιώσεις.

Στον Πίνακα 5.4, καθώς και σε όλες τις περιπτώσεις μερικής σκίασης, σε αντίθεση με τις προσομοιώσεις για τα σφάλματα ανοικτοκυκλώματος, δεν παρουσιάζονται οι διαφορές τάσης, έντασης του ρεύματος και μέγιστης ισχύος. Αυτό, διότι δεν λαμβάνονται καθόλου υπόψιν στην

κατηγοριοποίηση η οποία ξεχωρίζει την κατάσταση μερικής σκίασης από τις καταστάσεις {κανονική κατάσταση λειτουργίας, σφάλμα βραχυκυκλώματος, σφάλμα υποβιβασμού}. Αντίθετα, αυτό που ξεχωρίζει την κατάσταση μερικής σκίασης από όλες τις υπόλοιπες, είναι ο αριθμός των τοπικών μεγίστων στην χαρακτηριστική  $P = f(V)$ . Επομένως, παρουσιάζεται μόνο ο αριθμός των τοπικών μεγίστων. Να σημειωθεί επίσης, ότι ο λόγος που σε όλες τις υπόλοιπες καταστάσεις δεν παρουσιάζεται ο αριθμός αυτός, είναι ότι είναι πάντα ίσος με 1. Το συγκεκριμένο θέμα έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την κατάσταση μερικής σκίασης, όπου δεν έχουν υποστεί σκίαση όλα τα πλαίσια, αλλά μόνο κάποια από αυτά. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.5, ο αλγόριθμος καταφέρνει να εκτιμήσει σωστά την κατάσταση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος, για όλους τους συνδυασμούς θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας.



**Πίνακας 5.5.** Κατάσταση μερικής σκίασης, μερικά πλαίσια σκιασμένα.

<b>Number</b>	<b>Irradiance (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperature (°C)</b>	<b>Number of Local Max Points</b>	<b>Result</b>
1	100	-5	3	1
2	100	10	3	1
3	100	25	4	1
4	100	40	4	1
5	225	-5	4	1
6	225	10	4	1
7	225	25	4	1
8	225	40	4	1
9	350	-5	4	1
10	350	10	4	1
11	350	25	4	1
12	350	40	4	1
13	475	-5	4	1
14	475	10	4	1
15	475	25	4	1
16	475	40	4	1
17	600	-5	4	1
18	600	10	4	1
19	600	25	4	1
20	600	40	4	1
21	725	-5	4	1
22	725	10	4	1
23	725	25	4	1
24	725	40	4	1
25	850	-5	4	1
26	850	10	4	1
27	850	25	4	1
28	850	40	4	1
29	975	-5	4	1
30	975	10	4	1
31	975	25	4	1
32	975	40	4	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>				<b>100.00%</b>

Στους Πίνακες 5.6 – 5.8 παρουσιάζονται τρεις καταστάσεις μερικής σκίασης, όπου έχει σκιαστεί ένα μόνο πλαίσιο του φωτοβολταϊκού συστήματος:

**Πίνακας 5.6.** Κατάσταση μερικής σκίασης, ένα πλαίσιο σκιασμένο που λαμβάνει το 90% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Number	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Temperature (°C)	Number of Local Max Points	Result
1	100	-5	1	0
2	100	10	1	0
3	100	25	1	0
4	100	40	1	0
5	225	-5	1	0
6	225	10	1	0
7	225	25	1	0
8	225	40	1	0
9	350	-5	1	0
10	350	10	1	0
11	350	25	1	0
12	350	40	1	0
13	475	-5	1	0
14	475	10	1	0
15	475	25	1	0
16	475	40	1	0
17	600	-5	1	0
18	600	10	1	0
19	600	25	1	0
20	600	40	1	0
21	725	-5	1	0
22	725	10	1	0
23	725	25	1	0
24	725	40	1	0
25	850	-5	1	0
26	850	10	1	0
27	850	25	1	0
28	850	40	1	0
29	975	-5	1	0
30	975	10	1	0
31	975	25	1	0
32	975	40	1	0
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>				<b>0.00%</b>

**Πίνακας 5.7.** Κατάσταση μερικής σκίασης, ένα πλαίσιο σκιασμένο που λαμβάνει το 80% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

<b>Number</b>	<b>Irradiance (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperature (°C)</b>	<b>Number of Local Max Points</b>	<b>Result</b>
1	100	-5	1	0
2	100	10	1	0
3	100	25	1	0
4	100	40	1	0
5	225	-5	2	1
6	225	10	1	0
7	225	25	1	0
8	225	40	1	0
9	350	-5	2	1
10	350	10	1	0
11	350	25	1	0
12	350	40	1	0
13	475	-5	2	1
14	475	10	1	0
15	475	25	1	0
16	475	40	1	0
17	600	-5	2	1
18	600	10	1	0
19	600	25	1	0
20	600	40	1	0
21	725	-5	2	1
22	725	10	1	0
23	725	25	1	0
24	725	40	1	0
25	850	-5	2	1
26	850	10	2	1
27	850	25	1	0
28	850	40	1	0
29	975	-5	2	1
30	975	10	2	1
31	975	25	1	0
32	975	40	1	0
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>				<b>28.13%</b>

**Πίνακας 5.8.** Κατάσταση μερικής σκίασης, ένα πλαίσιο σκιασμένο που λαμβάνει το 70% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Number	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Temperature (°C)	Number of Local Max Points	Result
1	100	-5	2	1
2	100	10	2	1
3	100	25	2	1
4	100	40	2	1
5	225	-5	2	1
6	225	10	2	1
7	225	25	2	1
8	225	40	2	1
9	350	-5	2	1
10	350	10	2	1
11	350	25	2	1
12	350	40	2	1
13	475	-5	2	1
14	475	10	2	1
15	475	25	2	1
16	475	40	2	1
17	600	-5	2	1
18	600	10	2	1
19	600	25	2	1
20	600	40	2	1
21	725	-5	2	1
22	725	10	2	1
23	725	25	2	1
24	725	40	2	1
25	850	-5	2	1
26	850	10	2	1
27	850	25	2	1
28	850	40	2	1
29	975	-5	2	1
30	975	10	2	1
31	975	25	2	1
32	975	40	2	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>				<b>100.00%</b>

Παρατηρώντας τους Πίνακες 5.4 – 5.8 προκύπτει το εξής ενδιαφέρον συμπέρασμα: όταν ένα πλαίσιο έχει σκιαστεί και λαμβάνει το 90% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, τότε ο αλγόριθμος αδυνατεί να το εντοπίσει. Αυτό συμβαίνει καθώς σαν σφάλμα έχει πρακτικά πολύ

μικρή επίδραση στη λειτουργία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και σχηματίζεται μόνο ένα τοπικό μέγιστο στην χαρακτηριστική καμπύλη της ισχύος. Όταν είναι σκιασμένο το 20% του πλαισίου, η κατάσταση εμφανίζεται κάπως βελτιωμένη. Ο αλγόριθμος είναι ικανός πλέον να εντοπίσει σχεδόν μια στις τρεις περιπτώσεις. Τέλος, όταν είναι σκιασμένο το 30% του πλαισίου, εκεί ο αλγόριθμος αποφασίζει σωστά σε όλες τις εκτελέσεις. Γενικά, διαπιστώθηκε ότι όσο περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι σκιασμένα, τόσο μικρότερο ποσοστό τους απαιτείται να είναι σκιασμένο, προκειμένου ο αλγόριθμος να αποφασίσει σωστά ότι πρόκειται για κατάσταση μερικής σκίασης. Αυτό φαίνεται στον Πίνακα 5.9, όπου είναι σκιασμένα δυο πλαίσια του συστήματος, τα οποία ανήκουν σε διαφορετικές σειρές, και το καθένα τους λαμβάνει το 20% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

**Πίνακας 5.9.** Κατάσταση μερικής σκίασης, δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια σκιασμένα που λαμβάνουν το 80% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Number	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Temperature (°C)	Number of Local Max Points	Result
1	100	-5	2	1
2	100	10	2	1
3	100	25	2	1
4	100	40	2	1
5	225	-5	2	1
6	225	10	2	1
7	225	25	2	1
8	225	40	2	1
9	350	-5	2	1
10	350	10	2	1
11	350	25	2	1
12	350	40	2	1
13	475	-5	2	1
14	475	10	2	1
15	475	25	2	1
16	475	40	2	1
17	600	-5	2	1
18	600	10	2	1
19	600	25	2	1
20	600	40	2	1
21	725	-5	2	1
22	725	10	2	1
23	725	25	2	1
24	725	40	2	1
25	850	-5	2	1
26	850	10	2	1
27	850	25	2	1
28	850	40	2	1
29	975	-5	2	1
30	975	10	2	1
31	975	25	2	1
32	975	40	2	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>				<b>100.00%</b>

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περίπτωση κατά την οποία το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί χωρίς σφάλματα (κανονική κατάσταση λειτουργίας), καθώς και τρεις περιπτώσεις σφαλμάτων βραχυκυκλώματος: ένα πλαίσιο βραχυκυκλωμένο, δυο πλαίσια

βραχυκυκλωμένα στην ίδια σειρά, και τρία πλαίσια βραχυκυκλωμένα στην ίδια σειρά. Και στις τέσσερις αυτές περιπτώσεις, ο αλγόριθμος κάνει σωστή εκτίμηση στο 100% των προσομοιώσεων.

**Πίνακας 5.10.** Κατάσταση λειτουργίας χωρίς σφάλματα.

<b>Number</b>	<b>Irradiance (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperature (°C)</b>	<b>dV</b>	<b>dI</b>	<b>dP</b>	<b>Result</b>
1	100	-5	0.0000	0.0000	0.0000	1
2	100	10	0.0202	0.0025	0.0254	1
3	100	25	0.0000	0.0000	0.0000	1
4	100	40	0.0232	0.0025	0.0301	1
5	225	-5	0.0014	0.0227	0.0243	1
6	225	10	0.0168	0.0253	0.0011	1
7	225	25	0.0017	0.0227	0.0247	1
8	225	40	0.0189	0.0253	0.0024	1
9	350	-5	0.0000	0.0000	0.0000	1
10	350	10	0.0173	0.0025	0.0215	1
11	350	25	0.0000	0.0000	0.0000	1
12	350	40	0.0195	0.0025	0.0250	1
13	475	-5	0.0006	0.0106	0.0113	1
14	475	10	0.0160	0.0132	0.0095	1
15	475	25	0.0007	0.0106	0.0115	1
16	475	40	0.0179	0.0132	0.0126	1
17	600	-5	0.0000	0.0000	0.0000	1
18	600	10	0.0162	0.0025	0.0201	1
19	600	25	0.0000	0.0000	0.0000	1
20	600	40	0.0181	0.0025	0.0231	1
21	725	-5	0.0004	0.0069	0.0074	1
22	725	10	0.0154	0.0095	0.0123	1
23	725	25	0.0005	0.0069	0.0075	1
24	725	40	0.0172	0.0094	0.0151	1
25	850	-5	0.0000	0.0000	0.0000	1
26	850	10	0.0155	0.0025	0.0192	1
27	850	25	0.0000	0.0000	0.0000	1
28	850	40	0.0173	0.0025	0.0220	1
29	975	-5	0.0003	0.0052	0.0055	1
30	975	10	0.0149	0.0077	0.0134	1
31	975	25	0.0003	0.0052	0.0056	1
32	975	40	0.0166	0.0077	0.0161	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>



**Πίνακας 5.11.** Σφάλμα βραχυκυκλώματος σε ένα πλαίσιο.

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.1487	0.0000	0.1425	1
2	100	10	0.1612	0.0025	0.1589	1
3	100	25	0.1390	0.0000	0.1315	1
4	100	40	0.1540	0.0025	0.1523	1
5	225	-5	0.1502	0.0227	0.1240	1
6	225	10	0.1612	0.0253	0.1387	1
7	225	25	0.1408	0.0227	0.1130	1
8	225	40	0.1539	0.0253	0.1312	1
9	350	-5	0.1526	0.0000	0.1459	1
10	350	10	0.1630	0.0025	0.1594	1
11	350	25	0.1438	0.0000	0.1358	1
12	350	40	0.1560	0.0025	0.1525	1
13	475	-5	0.1529	0.0106	0.1371	1
14	475	10	0.1628	0.0132	0.1500	1
15	475	25	0.1442	0.0106	0.1269	1
16	475	40	0.1557	0.0132	0.1428	1
17	600	-5	0.1539	0.0000	0.1473	1
18	600	10	0.1635	0.0025	0.1597	1
19	600	25	0.1455	0.0000	0.1376	1
20	600	40	0.1567	0.0025	0.1527	1
21	725	-5	0.1541	0.0069	0.1415	1
22	725	10	0.1634	0.0095	0.1536	1
23	725	25	0.1457	0.0069	0.1317	1
24	725	40	0.1565	0.0094	0.1464	1
25	850	-5	0.1547	0.0000	0.1482	1
26	850	10	0.1638	0.0025	0.1599	1
27	850	25	0.1465	0.0000	0.1387	1
28	850	40	0.1571	0.0025	0.1529	1
29	975	-5	0.1548	0.0052	0.1439	1
30	975	10	0.1637	0.0077	0.1554	1
31	975	25	0.1466	0.0052	0.1343	1
32	975	40	0.1569	0.0077	0.1483	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>

**Πίνακας 5.12.** Σφάλμα βραχυκυκλώματος σε δυο πλαίσια.

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.3585	0.0000	0.3529	1
2	100	10	0.3668	0.0025	0.3633	1
3	100	25	0.3484	0.0000	0.3397	1
4	100	40	0.3576	0.0025	0.3519	1
5	225	-5	0.3606	0.0227	0.3397	1
6	225	10	0.3680	0.0253	0.3490	1
7	225	25	0.3513	0.0227	0.3272	1
8	225	40	0.3595	0.0253	0.3380	1
9	350	-5	0.3627	0.0000	0.3565	1
10	350	10	0.3697	0.0025	0.3652	1
11	350	25	0.3542	0.0000	0.3453	1
12	350	40	0.3618	0.0025	0.3552	1
13	475	-5	0.3631	0.0106	0.3501	1
14	475	10	0.3698	0.0132	0.3584	1
15	475	25	0.3548	0.0106	0.3390	1
16	475	40	0.3621	0.0132	0.3484	1
17	600	-5	0.3640	0.0000	0.3579	1
18	600	10	0.3705	0.0025	0.3659	1
19	600	25	0.3560	0.0000	0.3474	1
20	600	40	0.3631	0.0025	0.3565	1
21	725	-5	0.3642	0.0069	0.3537	1
22	725	10	0.3705	0.0095	0.3615	1
23	725	25	0.3563	0.0069	0.3432	1
24	725	40	0.3632	0.0094	0.3520	1
25	850	-5	0.3648	0.0000	0.3588	1
26	850	10	0.3710	0.0025	0.3664	1
27	850	25	0.3571	0.0000	0.3487	1
28	850	40	0.3638	0.0025	0.3572	1
29	975	-5	0.3649	0.0052	0.3556	1
30	975	10	0.3710	0.0077	0.3631	1
31	975	25	0.3573	0.0052	0.3456	1
32	975	40	0.3639	0.0077	0.3540	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>

**Πίνακας 5.13.** Σφάλμα βραχυκυκλώματος σε τρία πλαίσια.

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.5716	0.0000	0.5685	1
2	100	10	0.5771	0.0025	0.5752	1
3	100	25	0.5646	0.0000	0.5592	1
4	100	40	0.5706	0.0025	0.5669	1
5	225	-5	0.5734	0.0227	0.5597	1
6	225	10	0.5783	0.0253	0.5658	1
7	225	25	0.5671	0.0227	0.5510	1
8	225	40	0.5724	0.0253	0.5579	1
9	350	-5	0.5750	0.0000	0.5709	1
10	350	10	0.5796	0.0025	0.5766	1
11	350	25	0.5691	0.0000	0.5632	1
12	350	40	0.5742	0.0025	0.5695	1
13	475	-5	0.5753	0.0106	0.5666	1
14	475	10	0.5797	0.0132	0.5721	1
15	475	25	0.5696	0.0106	0.5590	1
16	475	40	0.5744	0.0132	0.5651	1
17	600	-5	0.5759	0.0000	0.5719	1
18	600	10	0.5802	0.0025	0.5771	1
19	600	25	0.5705	0.0000	0.5646	1
20	600	40	0.5751	0.0025	0.5705	1
21	725	-5	0.5760	0.0069	0.5691	1
22	725	10	0.5802	0.0095	0.5742	1
23	725	25	0.5707	0.0069	0.5619	1
24	725	40	0.5752	0.0094	0.5676	1
25	850	-5	0.5764	0.0000	0.5725	1
26	850	10	0.5806	0.0025	0.5775	1
27	850	25	0.5712	0.0000	0.5655	1
28	850	40	0.5757	0.0025	0.5711	1
29	975	-5	0.5765	0.0052	0.5704	1
30	975	10	0.5806	0.0077	0.5753	1
31	975	25	0.5714	0.0052	0.5635	1
32	975	40	0.5757	0.0077	0.5689	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>

Τέλος, στους Πίνακες 5.14-5.28 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για 15 διαφορετικές περιπτώσεις σφάλματος υποβιβασμού. Κοιτώντας τα αποτελέσματα αυτά, μπορεί να διαπιστωθεί πολύ εύκολα ότι για σφάλμα υποβιβασμού μικρής αντίστασης (πχ. 2 Ω), ο αλγόριθμος δεν είναι ιδιαίτερα ικανός να αποφασίσει σωστά. Αυτό συμβαίνει καθώς η πτώση ισχύος είναι εξαιρετικά

μικρή για μικρές αντιστάσεις, οπότε και ο αλγόριθμος μπερδεύει την κατάσταση αυτή με την κανονική λειτουργία. Όμως, για μεγαλύτερες τιμές αντίστασης και ιδιαίτερα αν το σφάλμα εντοπίζεται σε πολλές σειρές, ο αλγόριθμος αποφασίζει σωστά στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων.

**Πίνακας 5.14.** Σφάλμα υποβιβασμού σε μια σειρά (αντίσταση 2Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0005	0.0000	0.0054	0
2	100	10	0.0207	0.0025	0.0309	0
3	100	25	0.0005	0.0000	0.0062	0
4	100	40	0.0237	0.0025	0.0365	0
5	225	-5	0.0009	0.0227	0.0117	0
6	225	10	0.0172	0.0253	0.0120	0
7	225	25	0.0013	0.0227	0.0106	0
8	225	40	0.0193	0.0253	0.0171	0
9	350	-5	0.0004	0.0000	0.0198	0
10	350	10	0.0176	0.0025	0.0419	0
11	350	25	0.0004	0.0000	0.0219	0
12	350	40	0.0199	0.0025	0.0476	0
13	475	-5	0.0003	0.0106	0.0169	0
14	475	10	0.0163	0.0132	0.0384	0
15	475	25	0.0004	0.0106	0.0193	0
16	475	40	0.0182	0.0132	0.0442	0
17	600	-5	0.0003	0.0000	0.0365	0
18	600	10	0.0165	0.0025	0.0572	1
19	600	25	0.0003	0.0000	0.0395	0
20	600	40	0.0184	0.0025	0.0634	1
21	725	-5	0.0001	0.0069	0.0384	0
22	725	10	0.0157	0.0095	0.0588	1
23	725	25	0.0002	0.0069	0.0417	0
24	725	40	0.0174	0.0094	0.0651	1
25	850	-5	0.0002	0.0000	0.0548	1
26	850	10	0.0157	0.0025	0.0745	1
27	850	25	0.0003	0.0000	0.0583	1
28	850	40	0.0175	0.0025	0.0810	1
29	975	-5	0.0000	0.0052	0.0592	1
30	975	10	0.0152	0.0077	0.0785	1
31	975	25	0.0001	0.0052	0.0628	1
32	975	40	0.0168	0.0077	0.0850	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>37.50%</b>

**Πίνακας 5.15.** Σφάλμα υποβιβασμού σε μια σειρά (αντίσταση 4Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0009	0.0000	0.0113	0
2	100	10	0.0211	0.0025	0.0371	0
3	100	25	0.0009	0.0000	0.0129	0
4	100	40	0.0241	0.0025	0.0435	0
5	225	-5	0.0007	0.0227	0.0036	0
6	225	10	0.0175	0.0253	0.0275	0
7	225	25	0.0010	0.0227	0.0061	0
8	225	40	0.0196	0.0253	0.0341	0
9	350	-5	0.0006	0.0000	0.0452	0
10	350	10	0.0178	0.0025	0.0674	1
11	350	25	0.0006	0.0000	0.0489	0
12	350	40	0.0200	0.0025	0.0748	1
13	475	-5	0.0001	0.0106	0.0537	1
14	475	10	0.0165	0.0132	0.0752	1
15	475	25	0.0002	0.0106	0.0578	1
16	475	40	0.0184	0.0131	0.0826	1
17	600	-5	0.0004	0.0000	0.0839	1
18	600	10	0.0166	0.0025	0.1042	1
19	600	25	0.0004	0.0000	0.0881	1
20	600	40	0.0185	0.0025	0.1116	1
21	725	-5	0.0000	0.0069	0.0965	1
22	725	10	0.0157	0.0095	0.1160	1
23	725	25	0.0001	0.0069	0.1004	1
24	725	40	0.0175	0.0094	0.1230	1
25	850	-5	0.0003	0.0000	0.1213	1
26	850	10	0.0158	0.0025	0.1398	1
27	850	25	0.0003	0.0000	0.1250	1
28	850	40	0.0176	0.0025	0.1463	1
29	975	-5	0.0000	0.0052	0.1336	1
30	975	10	0.0152	0.0077	0.1512	1
31	975	25	0.0000	0.0052	0.1365	1
32	975	40	0.0169	0.0076	0.1570	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>68.75%</b>

**Πίνακας 5.16.** Σφάλμα υποβιβασμού σε μια σειρά (αντίσταση 8Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0015	0.0000	0.0248	0
2	100	10	0.0216	0.0025	0.0509	1
3	100	25	0.0015	0.0000	0.0278	0
4	100	40	0.0247	0.0025	0.0588	1
5	225	-5	0.0004	0.0227	0.0397	0
6	225	10	0.0178	0.0253	0.0636	1
7	225	25	0.0007	0.0227	0.0440	0
8	225	40	0.0199	0.0253	0.0721	1
9	350	-5	0.0007	0.0000	0.1020	1
10	350	10	0.0180	0.0025	0.1234	1
11	350	25	0.0008	0.0000	0.1066	1
12	350	40	0.0203	0.0025	0.1316	1
13	475	-5	0.0000	0.0106	0.1281	1
14	475	10	0.0166	0.0132	0.1477	1
15	475	25	0.0001	0.0106	0.1316	1
16	475	40	0.0185	0.0131	0.1544	1
17	600	-5	0.0005	0.0000	0.1675	1
18	600	10	0.0167	0.0025	0.1852	1
19	600	25	0.0005	0.0000	0.1698	1
20	600	40	0.0186	0.0024	0.1904	1
21	725	-5	0.0000	0.0069	0.1849	1
22	725	10	0.0158	0.0095	0.2013	1
23	725	25	0.0000	0.0069	0.1860	1
24	725	40	0.0176	0.0093	0.2052	1
25	850	-5	0.0004	0.0000	0.2092	1
26	850	10	0.0158	0.0025	0.2244	1
27	850	25	0.0004	0.0001	0.2095	1
28	850	40	0.0177	0.0022	0.2274	1
29	975	-5	0.0001	0.0051	0.2193	1
30	975	10	0.0153	0.0076	0.2338	1
31	975	25	0.0000	0.0050	0.2190	1
32	975	40	0.0169	0.0071	0.2361	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>87.50%</b>

**Πίνακας 5.17.** Σφάλμα υποβιβασμού σε μια σειρά (αντίσταση 20Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0024	0.0000	0.0735	1
2	100	10	0.0226	0.0025	0.0995	1
3	100	25	0.0025	0.0000	0.0791	1
4	100	40	0.0257	0.0025	0.1100	1
5	225	-5	0.0000	0.0227	0.1426	1
6	225	10	0.0182	0.0253	0.1635	1
7	225	25	0.0003	0.0227	0.1455	1
8	225	40	0.0204	0.0252	0.1702	1
9	350	-5	0.0009	0.0000	0.2148	1
10	350	10	0.0182	0.0025	0.2319	1
11	350	25	0.0010	0.0002	0.2155	1
12	350	40	0.0205	0.0017	0.2358	1
13	475	-5	0.0001	0.0104	0.2351	1
14	475	10	0.0167	0.0125	0.2506	1
15	475	25	0.0000	0.0084	0.2346	1
16	475	40	0.0187	0.0073	0.2530	1
17	600	-5	0.0006	0.0024	0.2614	1
18	600	10	0.0167	0.0041	0.2758	1
19	600	25	0.0006	0.0144	0.2607	1
20	600	40	0.0187	0.0233	0.2777	1
21	725	-5	0.0001	0.0097	0.2680	1
22	725	10	0.0159	0.0190	0.2818	1
23	725	25	0.0001	0.0350	0.2670	1
24	725	40	0.0177	0.0474	0.2833	1
25	850	-5	0.0004	0.0437	0.2819	1
26	850	10	0.0159	0.0550	0.2951	1
27	850	25	0.0004	0.0714	0.2810	1
28	850	40	0.0177	0.0834	0.2966	1
29	975	-5	0.0001	0.0666	0.2844	1
30	975	10	0.0153	0.0774	0.2973	1
31	975	25	0.0001	0.0929	0.2834	1
32	975	40	0.0170	0.1038	0.2986	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>



**Πίνακας 5.18.** Σφάλμα υποβιβασμού σε μια σειρά (αντίσταση 100Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0037	0.0015	0.2509	1
2	100	10	0.0239	0.0025	0.2699	1
3	100	25	0.0039	0.0126	0.2511	1
4	100	40	0.0271	0.0226	0.2742	1
5	225	-5	0.0003	0.0987	0.2782	1
6	225	10	0.0185	0.1096	0.2942	1
7	225	25	0.0001	0.1249	0.2774	1
8	225	40	0.0207	0.1356	0.2964	1
9	350	-5	0.0011	0.1878	0.3086	1
10	350	10	0.0183	0.1942	0.3232	1
11	350	25	0.0011	0.2046	0.3081	1
12	350	40	0.0206	0.2108	0.3253	1
13	475	-5	0.0002	0.2149	0.3072	1
14	475	10	0.0168	0.2192	0.3213	1
15	475	25	0.0001	0.2273	0.3067	1
16	475	40	0.0188	0.2315	0.3231	1
17	600	-5	0.0006	0.2445	0.3187	1
18	600	10	0.0168	0.2475	0.3322	1
19	600	25	0.0007	0.2542	0.3184	1
20	600	40	0.0188	0.2571	0.3340	1
21	725	-5	0.0001	0.2537	0.3162	1
22	725	10	0.0159	0.2558	0.3294	1
23	725	25	0.0001	0.2617	0.3158	1
24	725	40	0.0177	0.2638	0.3311	1
25	850	-5	0.0004	0.2691	0.3230	1
26	850	10	0.0159	0.2707	0.3358	1
27	850	25	0.0005	0.2758	0.3227	1
28	850	40	0.0177	0.2773	0.3375	1
29	975	-5	0.0001	0.2731	0.3206	1
30	975	10	0.0153	0.2742	0.3332	1
31	975	25	0.0001	0.2790	0.3203	1
32	975	40	0.0170	0.2801	0.3348	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>

**Πίνακας 5.19.** Σφάλμα υποβιβασμού σε δυο σειρές (αντίσταση 2Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0010	0.0000	0.0104	0
2	100	10	0.0212	0.0025	0.0362	0
3	100	25	0.0010	0.0000	0.0120	0
4	100	40	0.0242	0.0025	0.0426	0
5	225	-5	0.0004	0.0227	0.0008	0
6	225	10	0.0178	0.0253	0.0234	0
7	225	25	0.0007	0.0227	0.0020	0
8	225	40	0.0199	0.0253	0.0303	0
9	350	-5	0.0009	0.0000	0.0358	0
10	350	10	0.0181	0.0025	0.0586	1
11	350	25	0.0009	0.0000	0.0402	0
12	350	40	0.0204	0.0025	0.0667	1
13	475	-5	0.0002	0.0106	0.0380	0
14	475	10	0.0168	0.0132	0.0605	1
15	475	25	0.0001	0.0106	0.0435	0
16	475	40	0.0187	0.0132	0.0696	1
17	600	-5	0.0008	0.0000	0.0621	1
18	600	10	0.0169	0.0025	0.0840	1
19	600	25	0.0008	0.0000	0.0688	1
20	600	40	0.0189	0.0025	0.0941	1
21	725	-5	0.0003	0.0069	0.0687	1
22	725	10	0.0161	0.0095	0.0905	1
23	725	25	0.0003	0.0069	0.0764	1
24	725	40	0.0179	0.0094	0.1015	1
25	850	-5	0.0007	0.0000	0.0890	1
26	850	10	0.0162	0.0025	0.1106	1
27	850	25	0.0007	0.0000	0.0978	1
28	850	40	0.0180	0.0025	0.1225	1
29	975	-5	0.0004	0.0052	0.0977	1
30	975	10	0.0156	0.0077	0.1192	1
31	975	25	0.0003	0.0052	0.1073	1
32	975	40	0.0173	0.0077	0.1319	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>62.50%</b>

**Πίνακας 5.20.** Σφάλμα υποβιβασμού σε δυο σειρές (αντίσταση 4Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0020	0.0000	0.0213	0
2	100	10	0.0221	0.0025	0.0476	0
3	100	25	0.0020	0.0000	0.0245	0
4	100	40	0.0251	0.0025	0.0557	1
5	225	-5	0.0003	0.0227	0.0249	0
6	225	10	0.0185	0.0253	0.0499	1
7	225	25	0.0000	0.0227	0.0307	0
8	225	40	0.0206	0.0253	0.0599	1
9	350	-5	0.0015	0.0000	0.0756	1
10	350	10	0.0187	0.0025	0.0994	1
11	350	25	0.0015	0.0000	0.0841	1
12	350	40	0.0210	0.0025	0.1117	1
13	475	-5	0.0007	0.0106	0.0933	1
14	475	10	0.0173	0.0132	0.1171	1
15	475	25	0.0006	0.0106	0.1039	1
16	475	40	0.0193	0.0131	0.1313	1
17	600	-5	0.0012	0.0000	0.1314	1
18	600	10	0.0173	0.0025	0.1547	1
19	600	25	0.0012	0.0000	0.1439	1
20	600	40	0.0193	0.0025	0.1705	1
21	725	-5	0.0007	0.0069	0.1527	1
22	725	10	0.0165	0.0095	0.1760	1
23	725	25	0.0007	0.0069	0.1669	1
24	725	40	0.0183	0.0094	0.1932	1
25	850	-5	0.0010	0.0000	0.1859	1
26	850	10	0.0165	0.0025	0.2089	1
27	850	25	0.0010	0.0000	0.2013	1
28	850	40	0.0183	0.0025	0.2270	1
29	975	-5	0.0006	0.0052	0.2078	1
30	975	10	0.0158	0.0077	0.2306	1
31	975	25	0.0006	0.0051	0.2242	1
32	975	40	0.0176	0.0076	0.2495	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>84.38%</b>

**Πίνακας 5.21.** Σφάλμα υποβιβασμού σε δυο σειρές (αντίσταση 8Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0035	0.0000	0.0444	0
2	100	10	0.0237	0.0025	0.0715	1
3	100	25	0.0036	0.0000	0.0506	1
4	100	40	0.0267	0.0025	0.0827	1
5	225	-5	0.0014	0.0227	0.0798	1
6	225	10	0.0195	0.0253	0.1061	1
7	225	25	0.0011	0.0227	0.0911	1
8	225	40	0.0217	0.0253	0.1218	1
9	350	-5	0.0022	0.0000	0.1588	1
10	350	10	0.0195	0.0025	0.1842	1
11	350	25	0.0023	0.0000	0.1741	1
12	350	40	0.0218	0.0025	0.2031	1
13	475	-5	0.0013	0.0106	0.2047	1
14	475	10	0.0179	0.0132	0.2297	1
15	475	25	0.0012	0.0106	0.2225	1
16	475	40	0.0199	0.0131	0.2504	1
17	600	-5	0.0016	0.0000	0.2644	1
18	600	10	0.0178	0.0025	0.2882	1
19	600	25	0.0017	0.0000	0.2831	1
20	600	40	0.0198	0.0024	0.3089	1
21	725	-5	0.0010	0.0069	0.3053	1
22	725	10	0.0168	0.0095	0.3278	1
23	725	25	0.0010	0.0069	0.3234	1
24	725	40	0.0187	0.0092	0.3474	1
25	850	-5	0.0013	0.0000	0.3508	1
26	850	10	0.0168	0.0025	0.3714	1
27	850	25	0.0013	0.0002	0.3673	1
28	850	40	0.0186	0.0020	0.3890	1
29	975	-5	0.0009	0.0051	0.3823	1
30	975	10	0.0161	0.0076	0.4012	1
31	975	25	0.0009	0.0048	0.3969	1
32	975	40	0.0178	0.0064	0.4166	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>96.88%</b>

**Πίνακας 5.22.** Σφάλμα υποβιβασμού σε δυο σειρές (αντίσταση 20Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0068	0.0000	0.1190	1
2	100	10	0.0270	0.0025	0.1479	1
3	100	25	0.0070	0.0000	0.1332	1
4	100	40	0.0301	0.0025	0.1673	1
5	225	-5	0.0030	0.0227	0.2418	1
6	225	10	0.0212	0.0253	0.2691	1
7	225	25	0.0029	0.0227	0.2625	1
8	225	40	0.0235	0.0251	0.2926	1
9	350	-5	0.0032	0.0000	0.3685	1
10	350	10	0.0205	0.0024	0.3906	1
11	350	25	0.0034	0.0005	0.3855	1
12	350	40	0.0229	0.0010	0.4087	1
13	475	-5	0.0019	0.0102	0.4357	1
14	475	10	0.0186	0.0118	0.4531	1
15	475	25	0.0019	0.0062	0.4470	1
16	475	40	0.0206	0.0015	0.4653	1
17	600	-5	0.0021	0.0048	0.4903	1
18	600	10	0.0183	0.0107	0.5041	1
19	600	25	0.0022	0.0288	0.4973	1
20	600	40	0.0203	0.0491	0.5121	1
21	725	-5	0.0014	0.0264	0.5196	1
22	725	10	0.0172	0.0474	0.5310	1
23	725	25	0.0014	0.0770	0.5236	1
24	725	40	0.0191	0.1042	0.5363	1
25	850	-5	0.0015	0.0873	0.5462	1
26	850	10	0.0170	0.1125	0.5560	1
27	850	25	0.0016	0.1428	0.5485	1
28	850	40	0.0189	0.1692	0.5596	1
29	975	-5	0.0011	0.1383	0.5608	1
30	975	10	0.0163	0.1625	0.5695	1
31	975	25	0.0011	0.1910	0.5619	1
32	975	40	0.0181	0.2153	0.5720	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>

**Πίνακας 5.23.** Σφάλμα υποβιβασμού σε δυο σειρές (αντίσταση 100Ω).

<b>Number</b>	<b>Irradiance (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperature (°C)</b>	<b>dV</b>	<b>dI</b>	<b>dP</b>	<b>Result</b>
1	100	-5	0.0138	0.0031	0.4670	1
2	100	10	0.0340	0.0075	0.4858	1
3	100	25	0.0144	0.0251	0.4777	1
4	100	40	0.0374	0.0477	0.4983	1
5	225	-5	0.0051	0.2202	0.5721	1
6	225	10	0.0233	0.2446	0.5821	1
7	225	25	0.0052	0.2725	0.5727	1
8	225	40	0.0258	0.2966	0.5848	1
9	350	-5	0.0042	0.3757	0.6137	1
10	350	10	0.0215	0.3910	0.6218	1
11	350	25	0.0045	0.4092	0.6134	1
12	350	40	0.0240	0.4242	0.6231	1
13	475	-5	0.0025	0.4405	0.6238	1
14	475	10	0.0191	0.4516	0.6313	1
15	475	25	0.0026	0.4653	0.6232	1
16	475	40	0.0213	0.4762	0.6321	1
17	600	-5	0.0024	0.4891	0.6363	1
18	600	10	0.0187	0.4975	0.6432	1
19	600	25	0.0026	0.5084	0.6357	1
20	600	40	0.0208	0.5166	0.6440	1
21	725	-5	0.0016	0.5144	0.6389	1
22	725	10	0.0175	0.5212	0.6457	1
23	725	25	0.0017	0.5303	0.6384	1
24	725	40	0.0194	0.5370	0.6464	1
25	850	-5	0.0017	0.5383	0.6453	1
26	850	10	0.0172	0.5439	0.6518	1
27	850	25	0.0019	0.5517	0.6448	1
28	850	40	0.0192	0.5572	0.6525	1
29	975	-5	0.0012	0.5514	0.6461	1
30	975	10	0.0165	0.5562	0.6525	1
31	975	25	0.0013	0.5631	0.6457	1
32	975	40	0.0183	0.5678	0.6532	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>

**Πίνακας 5.24.** Σφάλμα υποβιβασμού σε τρεις σειρές (αντίσταση 2Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0017	0.0000	0.0151	0
2	100	10	0.0218	0.0025	0.0412	0
3	100	25	0.0016	0.0000	0.0175	0
4	100	40	0.0248	0.0025	0.0485	0
5	225	-5	0.0003	0.0227	0.0089	0
6	225	10	0.0184	0.0253	0.0335	0
7	225	25	0.0000	0.0227	0.0132	0
8	225	40	0.0206	0.0253	0.0421	0
9	350	-5	0.0017	0.0000	0.0490	0
10	350	10	0.0189	0.0025	0.0725	1
11	350	25	0.0017	0.0000	0.0556	1
12	350	40	0.0211	0.0025	0.0830	1
13	475	-5	0.0011	0.0106	0.0545	1
14	475	10	0.0176	0.0132	0.0780	1
15	475	25	0.0009	0.0106	0.0630	1
16	475	40	0.0195	0.0131	0.0902	1
17	600	-5	0.0017	0.0000	0.0810	1
18	600	10	0.0178	0.0025	0.1042	1
19	600	25	0.0017	0.0000	0.0912	1
20	600	40	0.0197	0.0025	0.1180	1
21	725	-5	0.0013	0.0069	0.0900	1
22	725	10	0.0170	0.0095	0.1134	1
23	725	25	0.0012	0.0069	0.1018	1
24	725	40	0.0188	0.0094	0.1287	1
25	850	-5	0.0017	0.0000	0.1121	1
26	850	10	0.0171	0.0025	0.1354	1
27	850	25	0.0017	0.0000	0.1255	1
28	850	40	0.0189	0.0025	0.1522	1
29	975	-5	0.0014	0.0052	0.1225	1
30	975	10	0.0166	0.0077	0.1461	1
31	975	25	0.0013	0.0052	0.1374	1
32	975	40	0.0182	0.0077	0.1643	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>71.88%</b>

**Πίνακας 5.25.** Σφάλμα υποβιβασμού σε τρεις σειρές (αντίσταση 4Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0033	0.0000	0.0302	0
2	100	10	0.0234	0.0025	0.0570	1
3	100	25	0.0033	0.0000	0.0350	0
4	100	40	0.0264	0.0025	0.0668	1
5	225	-5	0.0020	0.0227	0.0417	0
6	225	10	0.0201	0.0253	0.0678	1
7	225	25	0.0016	0.0227	0.0507	1
8	225	40	0.0222	0.0253	0.0812	1
9	350	-5	0.0033	0.0000	0.0972	1
10	350	10	0.0205	0.0025	0.1227	1
11	350	25	0.0033	0.0000	0.1101	1
12	350	40	0.0227	0.0025	0.1397	1
13	475	-5	0.0027	0.0106	0.1192	1
14	475	10	0.0193	0.0132	0.1450	1
15	475	25	0.0026	0.0106	0.1355	1
16	475	40	0.0212	0.0131	0.1653	1
17	600	-5	0.0033	0.0000	0.1601	1
18	600	10	0.0194	0.0025	0.1859	1
19	600	25	0.0033	0.0000	0.1793	1
20	600	40	0.0214	0.0025	0.2090	1
21	725	-5	0.0029	0.0069	0.1844	1
22	725	10	0.0187	0.0095	0.2107	1
23	725	25	0.0029	0.0069	0.2064	1
24	725	40	0.0204	0.0094	0.2364	1
25	850	-5	0.0033	0.0000	0.2199	1
26	850	10	0.0187	0.0025	0.2464	1
27	850	25	0.0033	0.0000	0.2443	1
28	850	40	0.0205	0.0025	0.2742	1
29	975	-5	0.0030	0.0052	0.2447	1
30	975	10	0.0182	0.0077	0.2715	1
31	975	25	0.0030	0.0051	0.2712	1
32	975	40	0.0199	0.0076	0.3013	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>90.63%</b>



**Πίνακας 5.26.** Σφάλμα υποβιβασμού σε τρεις σειρές (αντίσταση 8Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0066	0.0000	0.0602	1
2	100	10	0.0266	0.0025	0.0883	1
3	100	25	0.0066	0.0000	0.0696	1
4	100	40	0.0296	0.0025	0.1029	1
5	225	-5	0.0052	0.0227	0.1065	1
6	225	10	0.0233	0.0253	0.1350	1
7	225	25	0.0049	0.0227	0.1240	1
8	225	40	0.0254	0.0253	0.1573	1
9	350	-5	0.0066	0.0000	0.1913	1
10	350	10	0.0238	0.0025	0.2199	1
11	350	25	0.0066	0.0000	0.2152	1
12	350	40	0.0260	0.0025	0.2480	1
13	475	-5	0.0060	0.0106	0.2434	1
14	475	10	0.0225	0.0132	0.2727	1
15	475	25	0.0059	0.0106	0.2723	1
16	475	40	0.0244	0.0131	0.3054	1
17	600	-5	0.0066	0.0000	0.3092	1
18	600	10	0.0227	0.0025	0.3384	1
19	600	25	0.0066	0.0000	0.3414	1
20	600	40	0.0246	0.0023	0.3737	1
21	725	-5	0.0062	0.0069	0.3584	1
22	725	10	0.0219	0.0095	0.3874	1
23	725	25	0.0062	0.0068	0.3927	1
24	725	40	0.0237	0.0091	0.4241	1
25	850	-5	0.0066	0.0000	0.4131	1
26	850	10	0.0220	0.0025	0.4411	1
27	850	25	0.0066	0.0002	0.4477	1
28	850	40	0.0238	0.0017	0.4774	1
29	975	-5	0.0063	0.0051	0.4558	1
30	975	10	0.0214	0.0075	0.4827	1
31	975	25	0.0063	0.0046	0.4900	1
32	975	40	0.0231	0.0058	0.5179	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>100.00%</b>

**Πίνακας 5.27.** Σφάλμα υποβιβασμού σε τρεις σειρές (αντίσταση 20Ω).

Number	Irradiance (W/m <sup>2</sup> )	Temperature (°C)	dV	dI	dP	Result
1	100	-5	0.0163	0.0000	0.1484	1
2	100	10	0.0361	0.0025	0.1800	1
3	100	25	0.0163	0.0000	0.1702	1
4	100	40	0.0391	0.0024	0.2076	1
5	225	-5	0.0150	0.0227	0.2895	1
6	225	10	0.0329	0.0253	0.3227	1
7	225	25	0.0147	0.0226	0.3253	1
8	225	40	0.0349	0.0250	0.3625	1
9	350	-5	0.0164	0.0000	0.4393	1
10	350	10	0.0333	0.0023	0.4696	1
11	350	25	0.0164	0.0007	0.4770	1
12	350	40	0.0355	0.0002	0.5089	1
13	475	-5	0.0158	0.0101	0.5371	1
14	475	10	0.0321	0.0111	0.5632	1
15	475	25	0.0156	0.0040	0.5709	1
16	475	40	0.0340	0.0043	0.5976	1
17	600	-5	0.0164	0.0072	0.6178	1
18	600	10	0.0323	0.0173	0.6394	1
19	600	25	0.0164	0.0432	0.6461	1
20	600	40	0.0342	0.0749	0.6678	1
21	725	-5	0.0160	0.0431	0.6708	1
22	725	10	0.0315	0.0759	0.6891	1
23	725	25	0.0159	0.1190	0.6949	1
24	725	40	0.0332	0.1610	0.7133	1
25	850	-5	0.0164	0.1310	0.7150	1
26	850	10	0.0316	0.1699	0.7306	1
27	850	25	0.0164	0.2142	0.7355	1
28	850	40	0.0334	0.2551	0.7512	1
29	975	-5	0.0161	0.2100	0.7460	1
30	975	10	0.0311	0.2476	0.7597	1
31	975	25	0.0161	0.2891	0.7640	1
32	975	40	0.0327	0.3268	0.7778	0
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>96.87%</b>

**Πίνακας 5.28.** Σφάλμα υποβιβασμού σε τρεις σειρές (αντίσταση 100Ω).

Number	Irradiance Temperature		dV	dI	dP	Result
	(W/m <sup>2</sup> )	(°C)				
1	100	-5	0.0102	0.0046	0.5879	1
2	100	10	0.0299	0.0125	0.6159	1
3	100	25	0.0096	0.0377	0.6238	1
4	100	40	0.0323	0.0729	0.6524	1
5	225	-5	0.0124	0.3416	0.7880	0
6	225	10	0.0302	0.3795	0.8013	1
7	225	25	0.0118	0.4202	0.8053	1
8	225	40	0.0320	0.4575	0.8188	1
9	350	-5	0.0147	0.5635	0.8617	1
10	350	10	0.0316	0.5878	0.8700	1
11	350	25	0.0145	0.6138	0.8724	1
12	350	40	0.0337	0.6375	0.8808	0
13	475	-5	0.0146	0.6660	0.8947	0
14	475	10	0.0309	0.6840	0.9007	0
15	475	25	0.0143	0.7032	0.9025	1
16	475	40	0.0326	0.7208	0.9087	1
17	600	-5	0.0154	0.7336	0.9163	1
18	600	10	0.0313	0.7475	0.9210	1
19	600	25	0.0153	0.7626	0.9224	1
20	600	40	0.0331	0.7762	0.9271	1
21	725	-5	0.0152	0.7750	0.9295	1
22	725	10	0.0307	0.7865	0.9333	1
23	725	25	0.0151	0.7990	0.9345	1
24	725	40	0.0324	0.8102	0.9383	1
25	850	-5	0.0157	0.8074	0.9397	1
26	850	10	0.0309	0.8170	0.9430	1
27	850	25	0.0156	0.8275	0.9439	1
28	850	40	0.0326	0.8370	0.9472	1
29	975	-5	0.0155	0.8297	0.9468	1
30	975	10	0.0305	0.8381	0.9496	1
31	975	25	0.0154	0.8472	0.9504	1
32	975	40	0.0320	0.8555	0.9533	1
<b>Ποσοστό επιτυχίας</b>						<b>87.50%</b>

Όσον αφορά το σφάλμα υποβιβασμού, δοκιμάστηκαν 15 διαφορετικές περιπτώσεις συνδυασμών αντιστάσεων. Η αξιοπιστία του αλγορίθμου έγκειται στο ότι η περίπτωση να υπάρχει σφάλμα υποβιβασμού στη λειτουργία της συστοιχίας εξετάζεται τελευταία. Δηλαδή, πρώτα θα εξεταστούν όλες οι άλλες περιπτώσεις (κανονική λειτουργία, σφάλμα ανοικτοκυκλώματος, σφάλμα

βραχυκυκλώματος, κατάσταση μερικής σκίασης), και αν η λειτουργία του συστήματος δεν χαρακτηρίζεται με καμία από τις παραπάνω, τότε ο αλγόριθμος θα αποφασίσει ότι πρόκειται για σφάλμα υποβιβασμού.

## 6. Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, γίνεται εύκολα αντιληπτή η συνδρομή του τομέα της μηχανικής μάθησης στη διαδικασία ανίχνευσης σφαλμάτων σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε για φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελούμενο από τρεις σειρές των πέντε πλαισίων, χωρίς όμως αυτό να βλάπτει τη γενικότητα. Συγκεκριμένα, οι τροποποιήσεις που χρειάζονται προκειμένου να λειτουργήσει ο αλγόριθμος για μια διαφορετική συστοιχία, περιλαμβάνουν τη σχεδίαση του νέου μοντέλου στο Simulink, την αλλαγή των παραμέτρων που ορίζουν το σύστημα εντός του λογισμικού (πχ. το πόσες παράλληλες σειρές πλαισίων έχει η συστοιχία), καθώς και την συλλογή των αντίστοιχων αποθηκευμένων δεδομένων για το νέο σύστημα, όπως έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 4. Η λειτουργία του αλγορίθμου βασίζεται στη σύγκριση της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος με προϋπάρχοντα αποθηκευμένα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, που αντιστοιχούν σε έναν μεγάλο αριθμό δυνατών καταστάσεων λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Οι ομάδες των αποθηκευμένων δεδομένων έχουν την ίδια μορφή με αυτήν που έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 4, ανεξαρτήτως της συνδεσμολογίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Η διαδικασία συλλογής τους είναι αυτοματοποιημένη, καθώς το μόνο που χρειάζεται να κάνει ο χρήστης για να λειτουργήσει ο αλγόριθμος σε μια νέα συνδεσμολογία είναι οι τροποποιήσεις που περιγράφηκαν παραπάνω. Ο αλγόριθμος αντιστοιχίζει την τρέχουσα κατάσταση με την αποθηκευμένη η οποία την προσεγγίζει περισσότερο.

Υπάρχουν και άλλες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση βλαβών σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, όπως για παράδειγμα ο έλεγχος των μετρούμενων τιμών με προκαθορισμένες τιμές κατωφλίου. Το πλεονέκτημα της μεθόδου που αναπτύχθηκε στην παρούσα

εργασία είναι ότι χρησιμοποιεί δεδομένα τα οποία αφορούν αποκλειστικά το φωτοβολταϊκό σύστημα ενδιαφέροντος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην χρειάζεται η επιλογή νέων προκαθορισμένων τιμών κατωφλίου κάθε φορά που χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος σε μια νέα συστοιχία. Κάτι τέτοιο θα ήταν εξαιρετικά επίπονη διαδικασία. Αντιθέτως, με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, το μόνο που πρέπει να γίνει είναι η εκτέλεση του λογισμικού για τη συλλογή των δεδομένων που θα αποθηκευτούν, ώστε να τα χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος για τον εντοπισμό των βλαβών της συστοιχίας.

Όσον αφορά την απόδοση της μεθόδου, αυτή είναι αρκετά ικανοποιητική, καθώς όπως φαίνεται και στο Κεφάλαιο 5, ο αλγόριθμος καταφέρνει να αποφασίσει σωστά για την πλειοψηφία των περιπτώσεων. Συγκεκριμένα, η επιτυχία του αλγορίθμου να εντοπίσει την κατάσταση της συστοιχίας για την προσομοίωση της λειτουργίας της χωρίς σφάλματα, καθώς και της λειτουργίας της με σφάλμα βραχυκυκλώματος και σφάλμα ανοικτοκυκλώματος, ανέρχεται στο 100%. Αντιθέτως, η ικανότητά του αλγορίθμου να εντοπίσει την κατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος, όταν λαμβάνει χώρα ένα σφάλμα υποβιβασμού ή η κατάσταση μερικής σκίασης, εμφανίζεται ελαφρώς μειωμένη. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε οριακές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα σε σφάλμα υποβιβασμού μικρής αντίστασης (πχ.  $2\Omega$ ) σε μια σειρά της συστοιχίας, ή σε κατάσταση μερικής σκίασης όπου το ένα πλαίσιο είναι σκιασμένο και λαμβάνει το 90% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

Ένας παράγοντας ο οποίος δύναται να μειώσει την αποδοτικότητα του αλγορίθμου, είναι η φθορά που επέρχεται με το χρόνο στα επιμέρους ηλεκτρικά στοιχεία της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (πχ. εξαρτήματα σύνδεσης, φωτοβολταϊκά πλαίσια κλπ.). Η γήρανση αυτή προκαλεί μεταβολή στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά λειτουργίας τους (πχ. μεταβάλλεται η τάση

ανοικτοκύκλωσης και το ρεύμα βραχυκύκλωσης των Φ/Β στοιχείων κλπ.). Όμως, λόγω της απρόβλεπτης φύσης του φαινομένου αυτού, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε σε αυτή την εργασία δεν είναι δυνατόν να λάβει υπόψη την παράμετρο της γήρανσης. Αυτό μπορεί να αποτελεί αντικείμενο μελλοντικής εργασίας.

## 7. Βιβλιογραφία

- [1] Zhicong Chen, Lijun Wu, Shuying Cheng, Peijie Lin, Yue Wu, Wencheng Lin, “Intelligent fault diagnosis of photovoltaic arrays based on optimized kernel extreme learning machine and I-V characteristics”, *Applied Energy*, Vol. 204, pages 912-931, 2017.
- [2] Elyes Garoudja, Aissa Chouder, Kamel kara, Santiago Silvestre, “An enhanced machine learning based approach for failures detection and diagnosis of PV systems”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 151, pages 496-513, 2017.
- [3] Siva Ramakrishna Madeti, S.N. Singh, “A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system”, *Solar Energy*, Vol. 158, pages 161-185, 2017.
- [4] Σταυρακάκης Γεώργιος, Σημειώσεις του μαθήματος ‘Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας’, Σχολή ΗΜΜΥ, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [5] Asma Triki-Lahiani, Afef Bennani-Ben Abdelghani, Ilhem Slama-Belkhodja “Fault detection and monitoring systems for photovoltaic installations: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, Part 3, pages 2680-2692, 2018.