

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



**Μοντελοποίηση Φωτοβολταϊκών Στοιχείων**

**Κώστας Δημητριάδης**

Εξεταστική επιτροπή:

Ε. Κουτρούλης (Αναπλ. Καθηγητής, επιβλέπων)

Κ. Καλαϊτζάκης (Καθηγητής)

Γ. Σταυρακάκης (Καθηγητής)

**Χανιά 2018**

## Περίληψη

Η μοντελοποίηση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ένα πεδίο που έχει προκαλέσει το επιστημονικό ενδιαφέρον. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα τόσο για φωτοβολταϊκά στοιχεία όσο και για φωτοβολταϊκά πλαίσια, που στόχο έχουν να περιγράψουν τη λειτουργία τους με λεπτομέρεια και όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν συστήματα εξισώσεων που εμπεριέχουν τις παραμέτρους λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου που παραθέτουν οι κατασκευαστές και υπολογίζουν μια σειρά άλλες που απαιτούνται για τη σύνθεση της χαρακτηριστικής εξίσωσης τάσεως-ρεύματος.

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, τέτοια μοντέλα αναζητήθηκαν και υλοποιήθηκαν στο Matlab σύμφωνα με τις υποδείξεις της σχετικής βιβλιογραφίας. Για την προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσεως-ρεύματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Newton-Raphson, μια μέθοδος διαδοχικών προσεγγίσεων για την προσεγγιστική εύρεση των ριζών μιας πραγματικής συνάρτησης. Ουσιαστικός σκοπός ήταν η εκτίμηση της ακρίβειας με την οποία μπορεί η κάθε μέθοδος μοντελοποίησης της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων/πλασίων να προσομοιώσει τη χαρακτηριστική τάσεως-ρεύματος.

Επίσης, λήφθηκαν πειραματικές μετρήσεις με τη βοήθεια δυο φωτοβολταϊκών πλαισίων διαφορετικών τεχνολογιών και με βάση αυτές συγκρίθηκαν οι τιμές της προσομοίωσης ως προς την ακρίβεια με την οποία τα εναλλακτικά μοντέλα περιγράφουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλαισίων.

## Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>6</b>
<b>2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....</b>	<b>9</b>
2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	10
2.3 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	11
2.4 Η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	17
2.5 Αρχές λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	17
2.6 Παραγωγή ρεύματος από το φως.....	19
2.6.1 Απορρόφηση του φωτός και δημιουργία των φορέων.....	19
2.6.2 Συλλογή του ρεύματος.....	20
2.7 ‘Σκοτεινό’ ρεύμα.....	22
2.8 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσεως (I-V) υπό φωτισμό .....	23
2.8.1 Ρεύμα βραχυκυκλώματος και τάση ανοικτοκύκλωσης.....	24
2.8.2 Μέγιστο σημείο ισχύος και παράγοντας συμπλήρωσης .....	25
2.9 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	27
2.9.1 Ισοδύναμο κύκλωμα της ιδανικής συσκευής .....	27
2.9.2 Αντιστάσεις σε σειρά και παράλληλα .....	28
2.10 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο .....	29
2.10.1 Πρότυπες συνθήκες δοκιμής.....	30
<b>3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ &amp; ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....</b>	<b>31</b>
3.1 Μοντέλα φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	31
3.2 Μοντέλα που ανταποκρίνονται σε διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πλαισίων .....	32
3.2.1 Το 1 <sup>ο</sup> Μοντέλο .....	32
3.2.2 Το 2 <sup>ο</sup> Μοντέλο .....	36
3.2.3 Το 3 <sup>ο</sup> Μοντέλο .....	38
3.2.4 Το 4 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	40
3.3 Μοντέλα που αναφέρονται σε αμιγώς κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια .	43
3.3.1 Το 5 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	43
3.3.2 Το 6 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	47
<b>4. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MATLAB .</b>	<b>50</b>
4.1 Υλοποίηση των μοντέλων για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με τη βοήθεια του MatLab .....	50
4.2 Αρχικοποίηση των παραμέτρων που απαιτούνται από το κάθε μοντέλο .....	51

4.3	Υπολογισμός των παραμέτρων που συνθέτουν την χαρακτηριστική I-V .....	52
4.3.1	Παράμετροι που υπολογίζονται από το 1 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	52
4.3.2	Παράμετροι που υπολογίζονται από το 2 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	52
4.3.3	Παράμετροι που υπολογίζονται από το 3 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	53
4.3.4	Παράμετροι που υπολογίζονται από το 4 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	53
4.3.5	Παράμετροι που υπολογίζονται από το 5 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	53
4.3.6	Παράμετροι που υπολογίζονται από το 6 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	54
4.4	Η μέθοδος Newton-Raphson .....	54
4.4.1	Χρήση της μεθόδου Newton-Raphson στα μοντέλα φωτοβολταϊκών στοιχείων .....	55
4.5	Έλεγχος των μοντέλων ως προς την προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V και P-V .....	56
4.5.1	Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 1 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	57
4.5.2	Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 2 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	71
4.5.3	Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 3 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	85
4.5.4	Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 4 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	99
4.5.5	Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 5 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	106
4.5.6	Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 6 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	113
<b>5.</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>121</b>
5.1	Πειραματική διαδικασία .....	121
5.2	Μετρήσεις και αποτελέσματα προσομοίωσης.....	123
5.2.1	Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ST 5 με το 1 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	125
5.2.2	Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ST 5 με το 2 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	129
5.2.3	Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ST 5 με το 3 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	133
5.2.4	Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ST 5 με το 4 <sup>ο</sup> μοντέλο .....	136
5.2.5	Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ET-M 53605 με το 1 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	140
5.2.6	Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ET-M 53605 με το 2 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	143
5.2.7	Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ET-M 53605 με το 3 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	146
5.2.8	Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ET-M 53605 με το 5 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	149
5.2.9	Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ET-M 53605 με το 6 <sup>ο</sup> μοντέλο.....	152
5.3	Σύγκριση των μοντέλων που προσομοιώνουν τη λειτουργία του πλαισίου ST 5 .....	155
5.4	Σύγκριση των μοντέλων που προσομοιώνουν τη λειτουργία του πλαισίου ET-M 53605 .....	158
<b>6.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>162</b>
6.1	Επίλογος.....	162
6.2	Πιθανές βελτιώσεις .....	163

## **7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ..... 164**

# 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί ιδιαίτερα το ενδιαφέρον σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Ο επιστημονικός αυτός κλάδος μελετά τους λεγόμενους ‘εναλλακτικούς’ τρόπους παραγωγής ενέργειας, που αφορούν την παραγωγή ενέργειας, δηλαδή, με λιγότερη επιβάρυνση στο φυσικό περιβάλλον. Στόχος είναι η αξιοποίηση μορφών ενέργειας που παρέχονται άφθονες στη φύση, χωρίς τη δημιουργία ρύπων και την καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος από τη διαδικασία παραγωγής ενέργειας [1]. Η παρούσα εργασία αναφέρεται σε μια από τις εφαρμογές των ΑΠΕ, τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι διατάξεις αυτές εκμεταλλεύονται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή.

Η έκθεση ορισμένων υλικών (που καλούνται ημιαγωγοί) στην ακτινοβολία του φωτός προκαλεί την πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων τους. Αυτή η διαδικασία συνιστά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η πρόσκρουση των φωτονίων σε ημιαγωγό έχει ως συνέπεια κάποια από αυτά να ανακλώνται από αυτόν, άλλα να τον διαπερνούν και ένα μέρος τους να απορροφάται από αυτόν. Η τελευταία κατηγορία φωτονίων είναι αυτά που μεταδίδουν την ενέργειά τους στα άτομα του ημιαγωγού. Αυτό συμβαίνει επειδή η πρόσκρουση κάποιου φωτονίου σε ηλεκτρόνιο του ημιαγωγού του μεταδίδει μέρος της ενέργειάς του, υποχρεώνοντας το να «μετακινηθεί» από τη θέση ηρεμίας του. Σε αυτό ακριβώς το φαινόμενο βασίζεται η τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ακτινοβολία του Ήλιου [1].

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι οι διατάξεις όπου συντελείται η παραπάνω διαδικασία. Δομούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία (photovoltaic/PV cell, solar cell), που δεν είναι άλλο από ημιαγωγοί, τα οποία συνδεδεμένα σε σειρά συγκροτούν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module). Ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια, μαζί με τις απαραίτητες συσκευές για την επεξεργασία και διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να συγκροτήσουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα [1].

Η μοντελοποίηση του τρόπου λειτουργίας ενός στοιχείου, ή ενός πλαισίου έχει γίνει αντικείμενο μελέτης, μιας και έτσι δίνεται η δυνατότητα πρόγνωσης της ισχύος που αυτά μπορούν να αποδώσουν και μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά τους για διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Έτσι, δίνεται, για παράδειγμα, η δυνατότητα μελέτης πριν την απόφαση για εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, της τεχνολογίας που πιθανόν είναι καταλληλότερη για κάποια περιοχή, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, το σκοπό που θα εξυπηρετήσει και τις απαιτήσεις που έχουμε από το σύστημα.

Αναπτύσσονται και μελετώνται διαρκώς μια πληθώρα μοντέλων που περιγράφουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλαισίων. Τα μοντέλα απλής και διπλής διόδου και οι παραλλαγές-βελτιώσεις τους που έχουν προκύψει από την επιστημονική έρευνα στηρίχθηκαν στην ισοδυναμία που παρατηρήθηκε ανάμεσα στον τρόπο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου/πλαισίου και ενός κυκλώματος διόδου και εξετάζουν τη σχέση τάσεως-ρεύματος που παράγει το στοιχείο ή πλαίσιο και τον τρόπο που αυτή επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους. Ένα μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου είναι ουσιαστικά ένα σύστημα εξισώσεων που εμπεριέχει τις παραμέτρους που συμβάλλουν ή επιδρούν στη χαρακτηριστική σχέση τάσεως-ρεύματος που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο/ πλαίσιο. Τέτοια μοντέλα είναι αυτά που εξετάζονται στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και συγκριτική εξέταση των μοντέλων ως προς την ακρίβεια με την οποία αυτά δύνανται να προσομοιώνουν τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου και να περιγράψουν τις σχέσεις ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) σε διάφορες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Για το σκοπό αυτό αναζητήθηκε και μελετήθηκε βιβλιογραφία που περιείχε περιγραφή μοντέλων προσομοίωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα μοντέλα αυτά υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια του εργαλείου Matlab ώστε με βάση τις παραμέτρους των κατασκευαστών και τις συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας να προσομοιώνουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες ενός πλαισίου. Πειραματικά μετρήθηκε η λειτουργία δυο πλαισίων σε διάφορες

συνθήκες, κυρίως ακτινοβολίας, μιας και εκ του αποτελέσματος δεν παρουσιάστηκαν μεγάλες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία. Κάθε μοντέλο προσομοίωσε στο Matlab τη λειτουργία του συγκεκριμένου πλαισίου. Οι προσομοιώσεις συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα με σκοπό να μετρηθεί η απόκλιση που παρουσιάζουν σε σχέση με αυτά και να εξαχθούν συμπεράσματα για την ακρίβεια του κάθε μοντέλου.

Η δομή αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

- Στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας γίνεται περιγραφή των φωτοβολταϊκών στοιχείων και πλαισίων, των τεχνολογιών τους που συναντώνται και των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους. Επίσης, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο η λειτουργία αυτή μπορεί να μοντελοποιηθεί.
- Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα μοντέλα που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Εξετάζεται λεπτομερώς το σύστημα εξισώσεων που υπολογίζει τις παραμέτρους που το μοντέλο απαιτεί και καταλήγει στην αποτύπωση χαρακτηριστικής σχέσης τάσεως-ρεύματος και τάσεως-ισχύος.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται πως, ακολουθώντας τη βιβλιογραφία, υλοποιήθηκε κάθε μοντέλο με τη βοήθεια του εργαλείου Matlab και πως χρησιμοποιήθηκε η μαθηματική μέθοδος Newton-Raphson για την προσομοίωση της χαρακτηριστικής εξίσωσης τάσεως-ρεύματος χρησιμοποιώντας κάθε μοντέλο που μελετήθηκε.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων των φωτοβολταϊκών πλαισίων και αντιπαραβάλλονται με τους αντίστοιχους υπολογισμούς της προσομοίωσης των πλαισίων αυτών για κάθε μοντέλο για τις εκάστοτε συνθήκες μέτρησης. Αναλύονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τιμών της προσομοίωσης με εκείνες που μετρήθηκαν πειραματικά και συγκρίνονται σε αυτή τη βάση τα μοντέλα μεταξύ τους ως προς την ακρίβειά τους.
- Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη συμβολή της παρούσας εργασίας και προτείνονται πιθανές βελτιώσεις και επεκτάσεις.



# 2.

## ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

---

## 2.1 Εισαγωγή

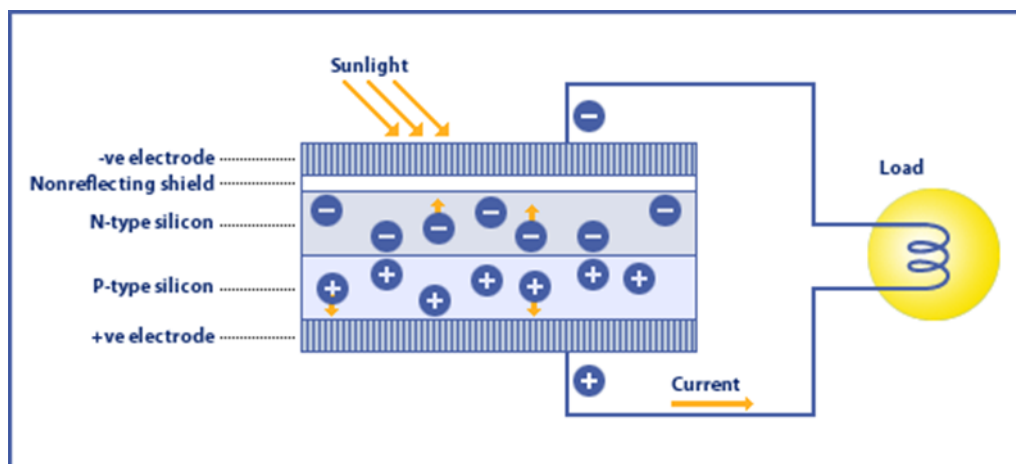
Η μετατροπή της ενέργειας που μεταφέρεται από την οπτική ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είναι ένα φυσικό φαινόμενο, γνωστό ως φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αυτό παρατηρείται στα φυσικά στοιχεία που ανήκουν στην κατηγορία των ημιαγωγών [2]. Για τη διεξαγωγή της μετατροπής αυτής ο καταλληλότερος τύπος διάταξης είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο (photovoltaic cell ή εν συντομία PV cell, ή solar cell). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία προσφέρουν μηδενικό κόστος λειτουργίας και η χρήση τους για παραγωγή ενέργειας αποκτά σήμερα αυξημένο ενδιαφέρον, ενώ αναδύονται ολοένα και περισσότερες πρακτικές εφαρμογές τους [2].

## 2.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Με την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία συγκεκριμένων υλικών (των ονομαζόμενων ημιαγωγών), παρατηρείται σε αυτά πόλωση ηλεκτρικών φορτίων, πράγμα που οδηγεί στην δημιουργία διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους πόλους που δημιουργούνται. Κατά συνέπεια, με τη διαδικασία αυτή σχηματίζεται μια στοιχειώδης ηλεκτρική γεννήτρια. Από τη γεννήτρια αυτή τα ηλεκτρόνια διέρχονται προς τη μια μόνο κατεύθυνση, μέσω ηλεκτρικού πεδίου [1].

Το φως του ήλιου μπορεί να κατανοηθεί τμηματικά ως «πακέτα» ενέργειας, τα γνωστά ως φωτόνια. Η ποσότητα ενέργειας που περιέχουν τα τελευταία ποικίλει ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος (λόγου χάρη το κυανό χρώμα ή το υπεριώδες περικλείουν περισσότερη ενέργεια έναντι του κόκκινου ή του υπέρυθρου) [1]. Από τα φωτόνια που θα προσκρούσουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, μια μερίδα τους ανακλάται, ενώ μια άλλη το διαπερνά. Μια τρίτη μερίδα φωτονίων πρόκειται να απορροφηθεί από το φωτοβολταϊκό και είναι αυτή που ευθύνεται για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Με την πρόσκρουση κάποιου από τα φωτόνια αυτά σε ηλεκτρόνιο του ημιαγωγού, μεταδίδεται τμήμα της ενέργειας του φωτονίου στο ηλεκτρόνιο υποχρεώνοντάς το σε «μετατόπιση» από τη θέση ηρεμίας. Αν η κατεύθυνση του ηλεκτρονίου συμπίπτει με τη φορά του πεδίου, τότε αυτό θα μετατοπιστεί σχετικά με τη θέση που είχε προηγουμένως και θα παγιδευτεί μιας και το πεδίο αποκλείει την επιστροφή στην αρχική θέση του. Συνέπεια της διαδικασίας αυτής είναι η εμφάνιση περίσσειας ενός ηλεκτρονίου στη μια πλευρά του υλικού (n-region) και ελλείμματος ηλεκτρονίου στην άλλη (p-region). Με τον τρόπο αυτό εμφανίζεται διαφορά δυναμικού [1]. Η απουσία ηλεκτρονίου, που παρατηρείται με το σπάσιμο των δεσμών από τα φωτόνια, χαρακτηρίζεται ως οπή. Οι οπές συμπεριφέρονται ως αυτόνομα σωμάτια, όμοια με τα ηλεκτρόνια, αλλά θετικά φορτισμένα. Το φορτίο που γεννάται από την αντιθετική κίνηση ηλεκτρονίων και οπών μπορεί

να διοχετευτεί σε εξωτερικό κύκλωμα επιτρέποντας την χρήσιμη αξιοποίησή του [2]. Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 2-1 σε ένα στοιχείο πυριτίου.



Σχήμα 2-1. Απεικόνιση του φωτοβολταϊκού φαινομένου που λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου.

Η ένταση του φαινομένου εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού,
- Την πιθανότητα να συγκρουστεί κάποιο φωτόνιο με ηλεκτρόνιο.
- Την ικανότητα με τη σύγκρουση να αποκτήσει το ηλεκτρόνιο κατάλληλη ταχύτητα και διεύθυνση, για να περάσει στην πλευρά παγίδευσης.

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι ένα μικρό ποσοστό της φωτεινής ακτινοβολίας συμμετέχει στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο [1].

## 2.3 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

Βασικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων που έχουν αναπτυχθεί είναι οι ακόλουθες [3]:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (single- ή mono- crystalline silicon, sc-Si) το πάχος των οποίων κυμαίνεται στα 0.3 χιλιοστά και η βιομηχανική απόδοση τους ποικίλει μεταξύ 15 και 18 % για το πλαίσιο. Εργαστηριακά επιτεύχθηκαν αποδόσεις που αγγίζουν το 24.7 %. Τα μονοκρυσταλλικά πλεονεκτούν όσον αφορά τη σχέση απόδοσης/επιφάνεια (ενεργειακή πυκνότητα). Συγκρινόμενα με τα πολυκρυσταλλικά έχουν υψηλότερο κατασκευαστικό κόστος. Κατά κύριο λόγο

παράγονται με τις μεθόδους CZ (Czochralski) και FZ (Float Zone), που στηρίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Στο Σχήμα 2-2 φαίνεται ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο τέτοιας τεχνολογίας.



*Σχήμα2-2. Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.*

- ii. Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (poly- ή multi-crystalline silicon , mc-Si) με πάχος επίσης γύρω στα 0.3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους έχει χαμηλότερο κόστος από αυτή των μονοκρυσταλλικών. Τεχνολογίες με τις οποίες παράγονται είναι η μέθοδος απευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου (χύτευση) και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση (EMC). Οπτικά θα μπορούσαν να εντοπιστούν οι μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο περισσότερη έκταση έχουν αυτές, τόσο τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία εμφανίζουν υψηλότερη απόδοση. Εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 20%, ενώ εμπορικά διατίθενται με αποδόσεις 13 – 15 % για το πλαίσιο. Στο Σχήμα 2-3 φαίνεται ένα πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.



*Σχήμα 2-3. Πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.*

- iii. Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (ribbon silicon). Ως τεχνολογία δίνει δυνατότητα μείωσης, ως και 50%, στη χρήση του πυριτίου αναλογικά με τις τεχνικές κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών κυψελών. Το πάχος και για τον τύπο αυτό είναι γύρω στα 0.3 χιλιοστά και η απόδοσή τους ποικίλει στο 12-13%. Εργαστηριακά παρατηρήθηκαν αποδόσεις περί το 18%. Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο τέτοιας τεχνολογίας φαίνεται στο Σχήμα 2-4.



*Σχήμα 2-4. Φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου.*

Μια ξεχωριστή κατηγορία φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι αυτά των λεπτών επιστρώσεων (thin film) που παρουσιάζονται παρακάτω:

- i. Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS, ή με προσθήκη γαλλίου CIGS), ο οποίος διακρίνεται για την εξαιρετική απορροφητικότητα στην προσπίπτουσα φωτεινή ακτινοβολία, εντούτοις η απόδοσή του κυμαίνεται στο 11% στο πλαίσιο με τις υπάρχουσες τεχνικές. Σε επίπεδο εργαστηρίου εμφάνισε απόδοση στο ύψος του 18.8% (η μεγαλύτερη που παρατηρήθηκε για τεχνολογίες λεπτής επίστρωσης). Η απόδοση δύναται να αυξηθεί με πρόσμιξη Γαλλίου, πρόβλημα όμως αποτελεί η σπανιότητα του Ινδίου στη φύση. Στο Σχήμα 2-5 απεικονίζεται ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο αυτής της τεχνολογίας .



Σχήμα 2-5. Φωτοβολταϊκό στοιχείο δισηληνοϊνδούχου χαλκού.

- ii. Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (amorphous ή thin film, a-Si). Τα στοιχεία αυτά διακρίνονται για τις χαμηλότερες αποδόσεις τους από τις προηγούμενες κατηγορίες. Αφορούν ταινίες λεπτών επιστρώσεων, η παραγωγή των οποίων γίνεται με εναπόθεση πυριτίου σε υπόστρωμα στήριξης (γυαλί ή αλουμίνιο). Η τυχαία διάταξη των ατόμων πυριτίου τους προσέδωσε το χαρακτηρισμό *άμορφο*. Η απόδοσή τους είναι ανάμεσα σε 6% έως 8%, ενώ εργαστηριακά παρατηρήθηκε απόδοση έως 14%. Τα στοιχεία αυτού του τύπου πλεονεκτούν στο ότι οι υψηλές θερμοκρασίες έχουν μικρή επίδραση επάνω τους. Ένα ακόμη θετικό είναι η αξιοποίηση της απόδοσής τους, συγκριτικά με τα κρυσταλλικά, σε περιπτώσεις διάχυτης ακτινοβολίας (συννεφιά). Μειονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί ότι χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια, σε σύγκριση με τα κρυσταλλικά, για παραγωγή ίσης ποσότητας ενέργειας (χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα). Το πάχος του πυριτίου κυμαίνεται γύρω στα 0.0001 χιλιοστά,

ενώ το υπόστρωμα ποικίλει από ένα ως τρία χιλιοστά. Στο Σχήμα 2-6 φαίνεται ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο της συγκεκριμένης τεχνολογίας.



Σχήμα 2-6. Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου.

- iii. Τελουριούχο Κάδμιο. Αυτό το φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί και απορροφά το 99% της ακτινοβολίας, εξαιτίας του ενεργειακού του διάκενου (1eV) που είναι πλησίον του ηλιακού φάσματος. Ωστόσο, οι σύγχρονες τεχνικές μας επιτρέπουν αποδόσεις πλαισίου περί το 6-8%, ενώ έχει φτάσει το 16% στο εργαστήριο. Ανασταλτικός παράγοντας στη χρήση του είναι το γεγονός ότι το κάδμιο, με βάση κάποιες έρευνες, αποδεικνύεται καρκινογόνο, ενώ προβληματισμό δημιουργεί και η έλλειψη διαθεσιμότητας Τελλουρίου. Φωτοβολταϊκό στοιχείο αυτής της τεχνολογίας φαίνεται στο Σχήμα 2-7.



Σχήμα 2-7. Φωτοβολταϊκό στοιχείο τελλουριούχου καδμίου.

- iv. Αρσενικούχο Γάλλιο. Το Γάλλιο είναι υποπροϊόν ρευστοποίησης άλλων μετάλλων (αλουμίνιο, ψευδάργυρος). Είναι σπανιότερο και από τον χρυσό. Το αρσενικό αν και δεν σπανίζει, είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο είναι εξαιρετικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, δεδομένου ότι το ενεργειακό του διάκενο είναι στα 1.43 eV. Η απόδοσή του στη μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) φτάνει το 29% (η υψηλότερη που έχει παρατηρηθεί). Η χρήση τέτοιου τύπου φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι επιβεβλημένη στα ηλιακά συγκεντρωτικά συστήματα (solar concentrators), εξαιτίας της ανθεκτικότητάς τους σε υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας. Ανθεκτικά είναι ακόμη και σε μεγάλες ποσότητες ακτινοβολίας και για το λόγο αυτό καθίστανται προτιμητέα για διαστημικές εφαρμογές. Σοβαρό, ωστόσο, μειονέκτημα των στοιχείων αυτού του τύπου είναι το κόστος του μονοκρυσταλλικού υποστρώματος αρσενικούχου γαλλίου. Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο αρσενικούχου γαλλίου απεικονίζεται στο Σχήμα 2-8.



Σχήμα 2-8. Φωτοβολταϊκό στοιχείο αρσενικούχου γαλλίου.

Μια κατηγορία που προσπαθεί να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα των κρυσταλλικών και των άμορφων φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τα γνωστότερα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δυο στρώσεις άμορφου πυριτίου (επάνω και κάτω), με μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου ανάμεσά τους. Πλεονέκτημά τους αποτελεί ο βαθμός απόδοσης (φτάνει σε πρακτικές εφαρμογές στο 17.2%). Επιπλέον, είναι αποδοτικά σε υψηλή θερμοκρασία και σε διάχυτη ακτινοβολία.



Ως τεχνολογία εξελισσόμενου ενδιαφέροντος, αυτή των φωτοβολταϊκών, παρουσιάζει ολοένα και περισσότερο καινούριους τύπους τεχνολογιών. Κάποιες που φαίνονται να ξεχωρίζουν και πιθανώς στο μέλλον η χρήση τους να διευρυνθεί, είναι τα νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου και τα οργανικά/πολυμερή στοιχεία.

## 2.4 Η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Στα συμβατικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται στη διασταύρωση ανάμεσα στις δυο περιοχές του ημιαγωγού (παγίδευσης-εκσφενδόνισης) με αντιτιθέμενο τύπο αγωγιμότητας. Αν ο ημιαγωγός είναι από πυρίτιο, τότε η μια από τις δυο περιοχές (παγίδευσης ή τύπου  $n$ ) ενισχύεται με φώσφορο, ο οποίος έχει πέντε ηλεκτρόνια σθένους (δηλαδή ένα περισσότερο από το πυρίτιο). Στην περιοχή αυτή εμφανίζεται πολύ υψηλότερη συγκέντρωση ηλεκτρονίων από ότι οπών. Η άλλη περιοχή (εκσφενδόνισης ή τύπου  $p$ ) ενισχύεται με βόριο, το οποίο έχει τρία ηλεκτρόνια σθένους (ένα λιγότερο από το πυρίτιο) και συνεπώς η περιοχή εμφανίζει υψηλότερη συγκέντρωση οπών. Η μεγάλη διαφορά συγκέντρωσης στις δυο περιοχές δημιουργεί ένα μόνιμο ηλεκτρικό πεδίο που κατευθύνεται από την  $n$  προς την  $p$  περιοχή. Το πεδίο αυτό ευθύνεται για το διαχωρισμό των πρόσθετων ηλεκτρονίων και οπών που παράγονται όταν φωτίζεται το στοιχείο [2].

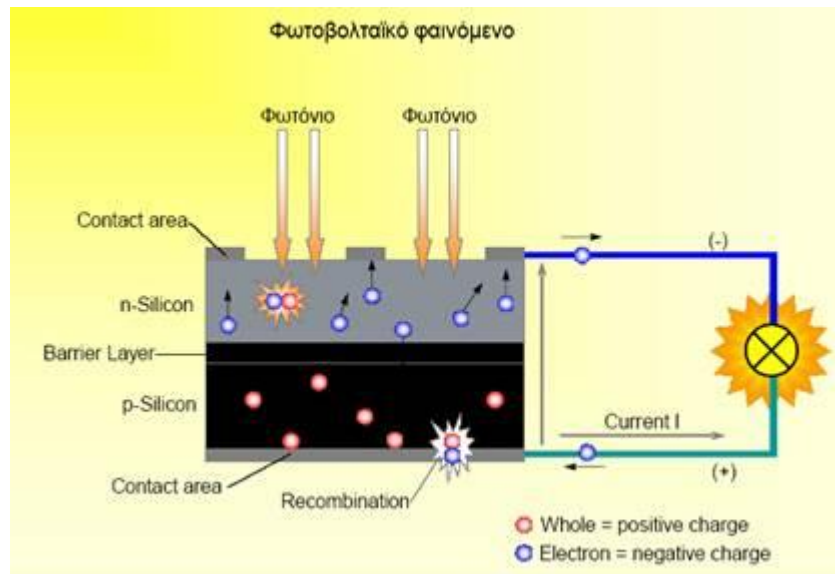
## 2.5 Αρχές λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Αν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο εκτίθεται σε ηλιακή ακτινοβολία και είναι συνδεδεμένο σε εξωτερικό κύκλωμα, τότε θα αναπτυχθεί στα άκρα του κυκλώματος μια διαφορά δυναμικού και κατά συνέπεια θα κυκλοφορήσει σε αυτό ρεύμα. Το ρεύμα, βάσει της συμβατικής φοράς, εκκινεί από το θετικό και επιστρέφει από το αρνητικό άκρο. Στις συνθήκες αυτές, το στοιχείο λειτουργεί ως γεννήτρια ενέργειας. Οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι οι ακόλουθες [2]:

1. Φωτόνια που φτάνουν στο εσωτερικό του στοιχείου και έχουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το διάκενο ζώνης (energy bandgap), απορροφώνται στο εσωτερικό του ημιαγωγού δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών, όπως περιγράφεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, που μπορούν να λειτουργήσουν ως φορείς του φορτίου.
2. Το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από τη συνένωση  $p$ - $n$  (όπως αναπαρίσταται στο Σχήμα 2-9) είναι υπεύθυνο για το διαχωρισμό των φορέων πριν αυτοί προλάβουν να

επανασυνδυαστούν. Αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση διαφοράς δυναμικού και ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα.

3. Η παρουσία διαφοράς δυναμικού στα άκρα της διάταξης παράγει το φαινόμενο του «σπασίματος» των δεσμών και επανασυνδυασμού των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών. Στο στοιχείο, η διαδικασία αυτή δημιουργεί απώλειες ισχύος, το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από αυτή τη διαφορά δυναμικού.



Σχήμα 2-9. Το εσωτερικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου κατά την εμφάνιση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Εξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα πως όταν φωτιζόμενο φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεθεί σε κύκλωμα, το ρεύμα που θα διαπεράσει το τελευταίο είναι καθαρό αποτέλεσμα δυο αντιδρώντων συνιστωσών εσωτερικού ρεύματος:

- I. Το παραγόμενο από το φως ρεύμα  $I_L$ , εξαιτίας της δημιουργίας φορέων από τα φωτόνια
- II. Το ρεύμα διόδου  $I_D$ , λόγω του ανασυνδυασμού των φορέων που οδηγούνται από την εξωτερική τάση. Αυτή η τάση δίνει ισχύ στο φορτίο.

Το ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα υπολογίζεται με τη διαφορά μεταξύ των δυο αυτών συνιστωσών. Θεωρώντας το, παραγόμενο από το φως, φορτίο θετικό, μπορεί αυτό να αποτυπωθεί ως εξής:

$$I = I_L - I_D(V) \quad (2.1)$$

Αυτή είναι η χαρακτηριστική εξίσωση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

## 2.6 Παραγωγή ρεύματος από το φως

Στα προηγούμενα αναφέρεται πως το ρεύμα παράγεται από τον ημιαγωγό με την πρόσπτωση των φωτονίων. Την παρούσα παράγραφο απασχολεί η διαδικασία με την οποία συντελείται η απορρόφηση του φωτός και η δημιουργία των φορέων, αλλά και η συλλογή του φωτοπαραγόμενου ρεύματος.

### 2.6.1 Απορρόφηση του φωτός και δημιουργία των φορέων

Ένα στοιχείο απαραίτητα περιέχει ημιαγωγίμο υλικό, το οποίο έχει συγκεκριμένο ενεργειακό διάκενο  $E_G$  και πάχος  $W$ . Η ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στον ημιαγωγό μπορεί να απορροφηθεί από τα ηλεκτρόνια σθένους, τα οποία θα περάσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Για αυτό δημιουργούνται οι φορείς από την απορρόφηση της ενέργειας των φωτονίων. Εντούτοις δεν απορροφώνται όλα τα φωτόνια από τον ημιαγωγό για τους εξής λόγους [2]:

- Φωτόνια με ενέργεια μικρότερη του διακενου ζώνης διαπερνούν τον ημιαγωγό χωρίς να απορροφηθούν.
- Λόγω της πεπερασμένης τιμής του συντελεστή απορρόφησης  $\alpha(E)$  και του πεπερασμένου πάχους  $W$  του ημιαγωγού, ένα μέρος από φωτόνια, με ενέργεια μεγαλύτερη του διακενου  $E_G$ , διαπερνά τη διάταξη χωρίς να απορροφάται. Δηλαδή η διαπερατότητα  $\tau(E, W)$  είναι πάντα μεγαλύτερη του μηδενός, παράγοντας συγκεκριμένες απώλειες κατά τη μεταφορά.
- Ένα μέρος των φωτονίων (όλων των ενεργειών) ανακλάται με την πρόσπτωση στην επιφάνεια του ημιαγωγού, λόγω της διαφοράς στο δείκτη διάθλασης. Έτσι υπάρχει ανάκλαση  $\rho(E, W)$  μεγαλύτερη του μηδενός που παράγει απώλειες ανάκλασης.

Μόνο ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής δημιουργείται για κάθε φωτόνιο που απορροφάται, ανεξάρτητα από την ενέργεια του φωτονίου. Έτσι ο αριθμός των ζευγών που δημιουργούνται ισούται με τον αριθμό των φωτονίων που απορροφώνται. Αν κάνουμε χρήση του  $\alpha(E, W)$  για να επισημάνουμε την φασματική απορρόφηση, το ρεύμα που γεννάται από το φως μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση [2]:

$$I_L = eA_C \int_{E_G}^{\infty} S(E)\alpha(E, W)dE \equiv eA_C \int_{E_G}^{\infty} S(E)[1 - \rho(E, W) - \tau(E, W)]dE \quad (2.2)$$

όπου:

$S(E)$  ο αριθμός των φωτονίων ενέργειας  $E$  που προσπίπτουν στο στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και

$A_C$  ( $m^2$ ) η φωτιζόμενη επιφάνεια του στοιχείου.

Οι απώλειες εξαιτίας της μη απορρόφησης είναι αναπόφευκτες και εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες του ημιαγωγού. Επίσης, οι απώλειες μεταφοράς και λόγω ανάκλασης μπορούν να εξαλειφθούν, με χρήση, για παράδειγμα, αντι-ανακλαστικής επίστρωσης και κατάλληλο σχεδιασμό της διάταξης. Το μέγιστο φωτοπαραγόμενο ρεύμα, που μπορεί να παραχθεί από ένα στοιχείο, μπορεί να εξασφαλιστεί απαλείφοντας τις απώλειες μεταφοράς και ανάκλασης, φτάνοντας θεωρητικά στη μέγιστη τιμή:

$$I_L \leq eA_C \int_{E_G}^{\infty} S(E) dE \quad (2.3)$$

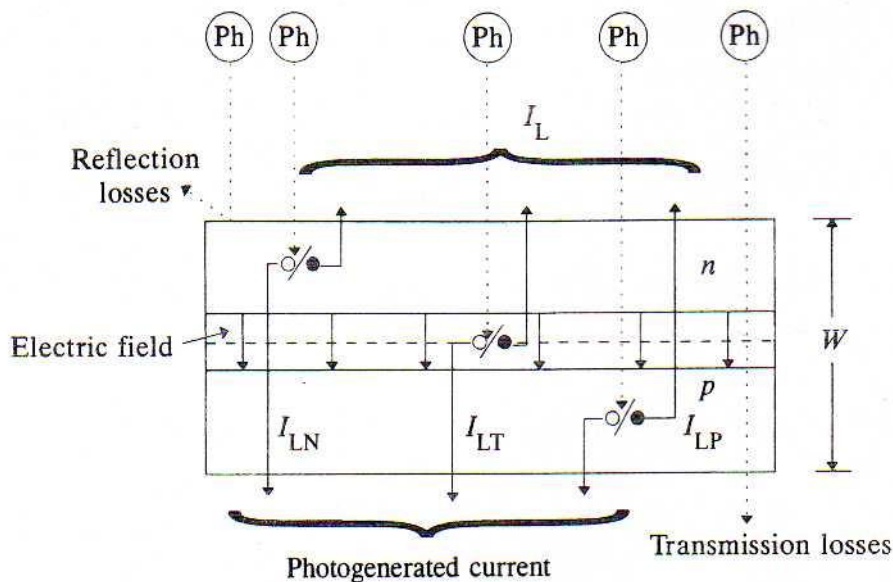
Το ρεύμα στην εξίσωση (2.3) εξαρτάται μόνο από το ενεργειακό διάκενο και το ηλιακό φάσμα. Το φωτοπαραγόμενο ρεύμα μειώνεται όσο αυξάνεται το  $E_G$  και για δυο σημαντικούς ημιαγωγούς - το πυρίτιο και το αρσενικούχο γάλλιο - οι τιμές που λαμβάνει διαφέρουν ανάλογα με την τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας..

### 2.6.2 Συλλογή του ρεύματος

Ωστόσο δεν ανταποκρίνονται όλοι οι φορείς που γεννιούνται από το φως στο εξωτερικό ρεύμα και δεν χρησιμεύουν όλοι στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Αυτό συμβαίνει επειδή, ακόμη και αν καμιά εξωτερική τάση δεν υπάρχει κατά μήκος της διάταξης (συνθήκες βραχυκυκλώματος), ένα μικρό μέρος των φορέων δημιουργούνται μακριά από την περιοχή του υψηλού ηλεκτρικού πεδίου. Πρέπει έπειτα να διασχίσουν μια απόσταση προς αυτό προτού διαχωριστούν και συλλεχθούν μέσω της ζεύξης. Το μέρος της ζεύξης που συλλέγεται ονομάζεται απόδοση συλλογής  $\eta_{col}(E)$  και εξαρτάται από τα ηλεκτρικά και οπτικά χαρακτηριστικά του υλικού, καθώς και τη δομή της συσκευής. Έτσι, το παραγόμενο ρεύμα υπολογίζεται από τη σχέση [2]:

$$I_L = eA_C \int_{E_G}^{\infty} S(E) \alpha(E) \eta_{col}(E) dE \quad (2.4)$$

Η απόδοση της συλλογής εξαρτάται από την περιοχή της διάταξης που εξετάζεται. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές που δημιουργούνται στη μεταβατική ζώνη χωρίζονται και έλκονται από το υψηλό ηλεκτρικό πεδίο στη ζώνη αυτή από τις οιονεί ουδέτερες ζώνες. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα ηλεκτρόνια έλκονται στη ζώνη τύπου p και οι οπές στη ζώνη τύπου n. Η συνιστώσα του, παραγόμενου από το φως, ρεύματος που εκκινεί από την περιοχή μετάβασης επισημαίνεται ως  $I_{LT}$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-10.



Σχήμα 2-10. Παραγωγή φορτίου από το φως σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Στις οιονεί ουδέτερες ζώνες τα ηλεκτρικά πεδία είναι αδύναμα και η κίνηση μιας μερίδας φορέων διέπεται από διάχυση. Οι φορείς που δημιουργούνται στις ζώνες αυτές διαχέονται προς τη ζώνη μετάβασης, προς τις επαφές και προς την επιφάνεια του κελιού. Στη ζώνη n τα ηλεκτρόνια απωθούνται, μέσω του ηλεκτρικού πεδίου, από τη ζώνη μετάβασης, την οποία εμποδίζονται να διασχίσουν. Έχουμε, δηλαδή, το σχηματισμό ενός φράγματος δυναμικού. Μπορούν όμως να κατευθυνθούν προς τις επαφές και την επιφάνεια. Αντίθετα, οι περισσότερες οπές που δημιουργούνται στη ζώνη n διαχέονται προς την άκρη της ζώνης μετάβασης. Εκεί συλλέγονται και έλκονται από το ηλεκτρικό πεδίο (κατέρχονται το φράγμα δυναμικού) για να εγχυθούν στην ζώνη p. Τότε πλειοψηφούν, αναδιανέμονται και μεταφέρονται με ολίσθηση. Το

πεδίο (φράγμα δυναμικού - barrier layer) της ζεύξης λειτουργεί και πάλι ως διαχωριστής των φορέων κάθε τύπου. Παράγει μια άλλη συνιστώσα  $I_{LN}$  του φωτοπαραγόμενου ρεύματος. Όμοια γίνεται με τα ηλεκτρόνια και τις οπές που δημιουργούνται στην ‘ουδέτερη’ ζώνη p, από όπου και παίρνουμε μια συνιστώσα  $I_{LP}$  του φωτοπαραγόμενου ρεύματος.

Έχει σημασία να αποσαφηνιστεί ότι οι διαδικασίες αυτές, της μεταφοράς και εξαγωγής ρεύματος, διέπονται από πεπερασμένες παραμέτρους (κινητικότητα, διάχυση, συντελεστές κλπ.). Για αυτό δεν διαχωρίζονται όλοι οι φορείς από το ηλεκτρικό πεδίο της ζεύξης και δε συνεισφέρουν όλοι στο ρεύμα που παράγεται. Ένα μέρος τους, που σε έναν καλό σχεδιασμό πρέπει να ελαττώνεται κατά το δυνατό, θα ανασυνδυαστεί στο κύριο μέρος και την επιφάνεια της συσκευής. Αυτός ο ανασυνδυασμός παράγει θερμότητα άχρηστη για τη δημιουργία ρεύματος και ισχύος στο φορτίο. Με άλλα λόγια ο βαθμός απόδοσης της συλλογής των ουδέτερων ζωνών είναι μικρότερος του 100%.

## 2.7 ‘Σκοτεινό’ ρεύμα

Η εξωτερική τάση που απαιτείται για να δώσει ενέργεια στο φορτίο παράγει ένα δυναμικό πόλωσης στο στοιχείο και ρεύματα, όπως εμφανίζονται σε κάθε p-n δίοδο, ακόμη και όταν το στοιχείο δεν εκτίθεται σε ακτινοβολία (π.χ. στο σκοτάδι). Μια θετικά πολωμένη τάση  $V$  (μετράται από την p προς τη n ζώνη) παράγει έγχυση μιας μειοψηφίας φορέων σε αμφότερες τις πλευρές της ζώνης μετάβασης. Ηλεκτρόνια από την n πλευρά περνούν στην p πλευρά, όπου γίνονται μειοψηφικοί φορείς και διαδίδονται μέχρι να ανασυνδυαστούν με οπές. Ο ανασυνδυασμός μπορεί να εμφανιστεί τόσο στο κύριο μέρος του υλικού, όσο και στην επιφάνεια της πλευράς p. Αυτή η κίνηση των φορέων αποτελεί μια συνιστώσα του ρεύματος στη δίοδο  $I_{DP}(V)$ . Με παρόμοιο τρόπο προκύπτουν δυο άλλες συνιστώσες του ρεύματος, η  $I_{DN}(V)$  από τον ανασυνδυασμό των οπών που διαδίδονται στον εκπομπό (π.χ. στην n πλευρά) και η  $I_{DT}(V)$  από τον ανασυνδυασμό των ηλεκτρονίων και οπών στη ζώνη μετάβασης [2]. Αν η τάση πόλωσης είναι αρνητική ( $V < 0$ ), τότε οι συγκεντρώσεις των φορέων και στις δυο πλευρές της ζώνης μετάβασης μειώνονται, ως συνέπεια της αύξησης στο φράγμα δυναμικού μέσω της ζεύξης. Εμφανίζεται θερμική παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίων-οπών και αυτά εξάγονται από το πεδίο στη ζεύξη, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν της συλλογής φωτοπαραγόμενων φορέων. Τα ρεύματα ανάστροφης πόλωσης, που σημειώνονται ως  $I_{0N}$ ,  $I_{0P}$ ,  $I_{0T}$ , περνούν μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα από την p προς την n πλευρά. Τα ρεύματα αυτά προστίθενται στο ρεύμα φωτός, όταν υπάρχει, αλλά οι τιμές τους συγκριτικά είναι πολύ μικρές και για αυτό μπορούν να αγνοηθούν.

Τα ρεύματα που ανταποκρίνονται στον ανασυνδυασμό ρεύματος στις ουδέτερες ζώνες (δηλαδή, τα ρεύματα διάχυσης) παίρνουν τιμές εκθετικά μεταβαλλόμενες σε σχέση με την τάση πόλωσης. Αυτή η σχέση είναι γνωστή και ως εξίσωση Shockley για μια ιδανική δίοδο [2]:

$$I_{DN}(V) + I_{DP}(V) = (I_{ON} + I_{OP}) \left[ \exp \frac{eV}{kT} - 1 \right] \equiv I_{01} \left[ \exp \frac{eV}{kT} - 1 \right] \quad (2.5)$$

όπου:

$T$  η απόλυτη θερμοκρασία (  $^{\circ}K$ ) και

$k$  η σταθερά Boltzmann.

Η παράμετρος που αντιστοιχεί στην παραγωγή και τον ανασυνδυασμό στη ζώνη μετάβασης ακολουθεί επίσης έναν εκθετικό νόμο, διαφορετικό από τον παραπάνω:

$$I_{DT}(V) = I_{0T} \left[ \exp \frac{eV}{2kT} - 1 \right] \equiv I_{02} \left[ \exp \frac{eV}{2kT} - 1 \right] \quad (2.6)$$

Τα  $I_{01}$  και  $I_{02}$  είναι τα ανάστροφα ρεύματα κορεσμού. Οι τιμές  $I_{01} \sim 10^{-12} Acm^2$  και  $I_{02} \sim 10^{-7} - 10^{-8} Acm^2$  είναι χαρακτηριστικές για μονοκρυσταλλικά στοιχεία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την αναπαράσταση του αθροίσματος των σχέσεων (2.5) και (2.6), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση:

$$I_D(V) = I_0 \left[ \exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right] \quad \text{με } 1 < m < 2 \quad (2.7)$$

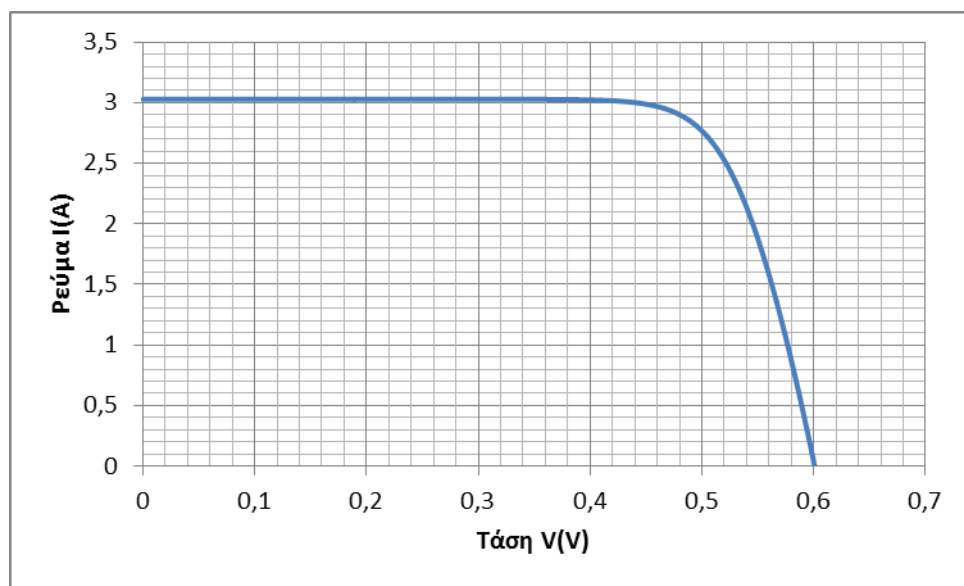
Σε χαμηλές τιμές τάσης ισχύει ότι  $m \rightarrow 2$  και  $I_0 \rightarrow I_{02}$ , ενώ σε υψηλές τάσεις  $m \rightarrow 1$  και  $I_0 \rightarrow I_{01}$ .

## 2.8 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσεως (I-V) υπό φωτισμό

Σύμφωνα με την (2.1) το ρεύμα που παρέχεται από ένα στοιχείο σε ένα φορτίο δίνεται από τη διαφορά μεταξύ του ρεύματος που παράγεται από το φως  $I_L$  και του ρεύματος ανασυνδυασμού  $I_D$ , όπου το τελευταίο οφείλεται στην πόλωση από την παραγόμενη τάση. Η χαρακτηριστική εξίσωση για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι [2]:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \frac{eV}{mkT} - 1 \right] \quad (2.8)$$

Η χαρακτηριστική καμπύλη που αντιπροσωπεύει την εξίσωση αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2-10. Αυτός ο τρόπος σχεδίασης της χαρακτηριστικής υιοθετεί τη σύμβαση που θέλει το παραγόμενο ρεύμα θετικό. Με τη συνθήκη αυτή, το πρώτο τεταρτημόριο του επιπέδου της χαρακτηριστικής I-V ανταποκρίνεται στο καθεστώς, όπου το στοιχείο παραδίδει ρεύμα στο φορτίο στο οποίο εφαρμόζεται θετική τάση. Με απλά λόγια το φωτοβολταϊκό στοιχείο λειτουργεί ως ενεργειακή γεννήτρια [2].



Σχήμα 2-10. Χαρακτηριστική καμπύλη τάσεως-ρεύματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

### 2.8.1 Ρεύμα βραχυκυκλώματος και τάση ανοικτοκύκλωσης

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-10, η υψηλότερη τιμή του ρεύματος, με το στοιχείο να λειτουργεί σαν γεννήτρια, παρατηρείται σε συνθήκες βραχυκυκλώματος, όταν  $V = 0$ . Σύμφωνα με την (2.8) το ρεύμα βραχυκυκλώματος δίνεται από την σχέση:

$$I_{SC} \equiv I(V = 0) = I_L \quad (2.9)$$

Αν το φωτοβολταϊκό στοιχείο κρατηθεί σε ανοικτοκύκλωση ώστε  $I = 0$ , τότε αυτοπολώνεται με τάση που είναι η μεγαλύτερη που μπορεί να φτάσει στο πρώτο τεταρτημόριο της χαρακτηριστικής I-V. Αυτή καλείται τάση ανοικτοκύκλωσης  $V_{OC}$ . Η τιμή της είναι τέτοια



ώστε το φωτοπαραγόμενο ρεύμα ακυρώνεται από το ρεύμα πόλωσης, δηλαδή σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος  $I_L = I_D(V_{OC})$ . Τότε από την (2.8) προκύπτει ότι [2]:

$$V_{OC} = m \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{I_L}{I_0} + 1 \right] \quad (2.10)$$

Ο ορισμός των δυο παραπάνω παραμέτρων επιτρέπει τον επαναπροσδιορισμό της χαρακτηριστικής εξίσωσης ως ακολούθως:

$$I = I_{SC} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{e(V_{OC} - V)}{mkT} \right) \right] \quad (2.11)$$

Ο τύπος αυτός είναι ακριβής σχετικά με το σημείο ανοικτοκύκλωσης, αλλά η ακρίβεια του για όλο το εύρος λειτουργίας της χαρακτηριστικής υποβαθμίζεται από το γεγονός ότι οι παράμετροι  $m$  και  $I_0$  εξαρτώνται, σε μια προέκταση, από τη θέση επάνω στην χαρακτηριστική.

## 2.8.2 Μέγιστο σημείο ισχύος και παράγοντας συμπλήρωσης

Όπως παρουσιάστηκε προηγούμενα, η περιοχή μεταξύ  $I_{SC}$ - $V_{OC}$  ανταποκρίνεται στη λειτουργία του στοιχείου ως γεννήτριας. Αν η παραγόμενη ενέργεια διοχετευτεί σε ωμικό φορτίο, τότε η ισχύς που παρέχεται δίνεται από το γινόμενο  $P = VI$ . Υπάρχει, τότε, ένα σημείο λειτουργίας στο οποίο η ισχύς που διοχετεύεται στο φορτίο είναι μέγιστη. Το σημείο αυτό είναι γνωστό ως σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point - MPP) [2]. Οι τιμές  $I_M$ ,  $V_M$  μπορούν να παρατηρηθούν από τη συνθήκη για το μέγιστο:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{ή} \quad 0 = d(IV)_M \equiv I_M dV + V_M dI \quad (2.12)$$

η οποία μπορεί να γραφεί και ως

$$\left[ \frac{dI}{dV} \right]_M = - \frac{I_M}{V_M} \quad (2.13)$$

Όταν αυτή η συνθήκη εφαρμοστεί σε ένα στοιχείο που περιγράφεται από την (2.10), το αποτέλεσμα είναι:

$$I_M = \frac{I_L + I_0}{1 + \frac{mkT}{eV_M}} \quad (2.14)$$

Η χαρακτηριστική εξίσωση του στοιχείου πρέπει επίσης να ικανοποιείται:

$$I_M = I_L - I_0 \left[ \exp \frac{eV_M}{mkT} - 1 \right] \quad (2.15)$$

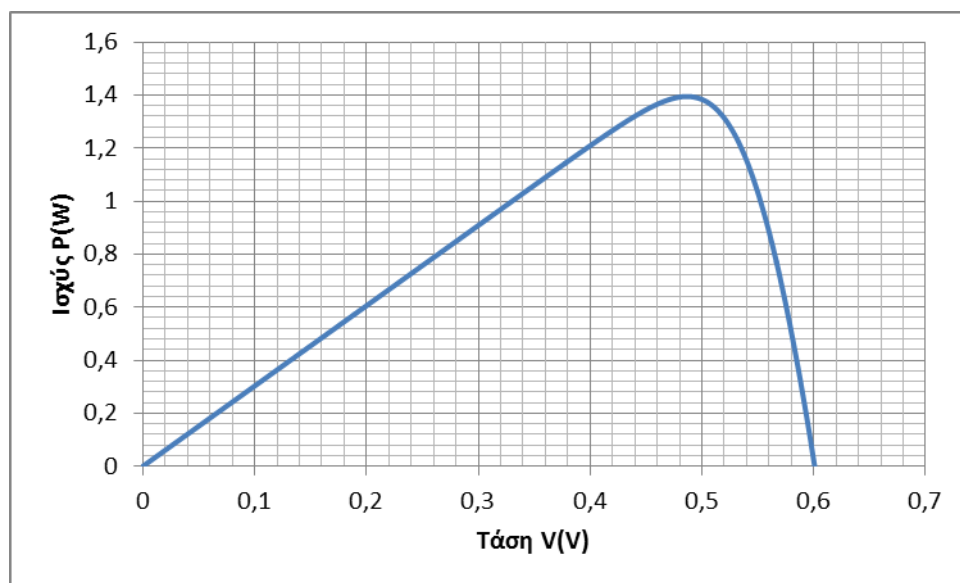
Από τις δυο αυτές εξισώσεις μπορούν να υπολογιστούν τα  $I_M$  και  $V_M$  [2]. Μια προσεγγιστική αναλυτική λύση είναι:

$$\frac{I_M}{I_L} = 1 - a^{-b} \quad (2.16)$$

όπου:

$$a = 1 + \ln \frac{I_L}{I_0}, \quad b = \frac{a}{a+1} \text{ και } \frac{V_M}{V_{OC}} \cong 1 - \frac{\ln a}{a} \quad (2.17)$$

Συμπερασματικά, το MPP βρίσκεται κοντά στο σημείο καμπής της χαρακτηριστικής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-11.



Σχήμα 2-11. Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 2-10 και 2-11 παρατηρούμε ότι το γινόμενο  $I_M \times V_M$ , που ανταποκρίνεται στο σημείο μέγιστης ισχύος, σχηματίζει μια ορθογώνια περιοχή, σαφώς μικρότερη από την περιοχή που σχηματίζει το γινόμενο  $I_{SC} \times V_{OC}$ . Τα δυο γινόμενα προσεγγίζουν το ένα το άλλο, όσο προχωρούμε προς το σημείο καμπής της χαρακτηριστικής. Το πηλίκο:

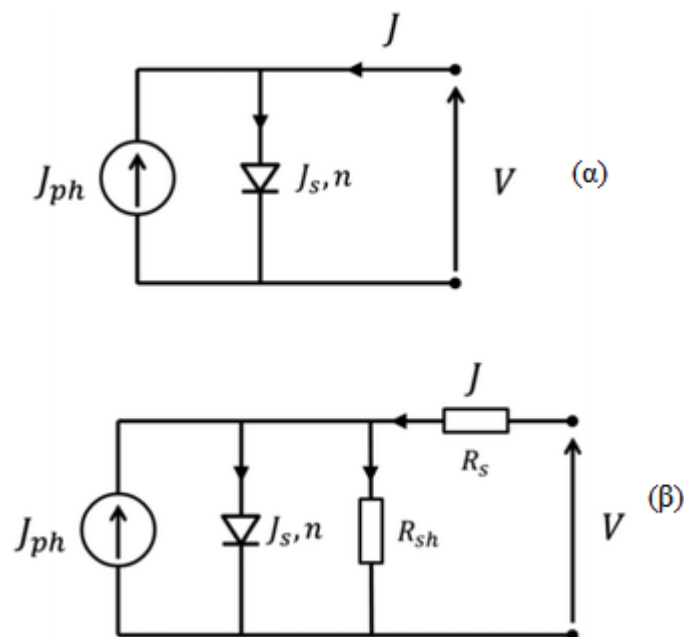
$$FF = \frac{I_M \times V_M}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (2.18)$$

καλείται παράγοντας συμπλήρωσης (fill factor) και αποτελεί ποσοτικό μέτρο του τύπου της χαρακτηριστικής. Έχει μεγάλη πρακτική σημασία και οι τιμές του παρουσιάζουν μικρή ποικιλία (0,7 – 0,8) για πολλά κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία [2].

## 2.9 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η εξίσωση (2.8) περιγράφει αναλυτικά τη συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Πρακτικά είναι γενικά βολικό να μπορεί να περιγραφεί η ίδια συμπεριφορά με τη χρήση στοιχείων ενός κυκλώματος. Αυτή η επιλογή έρχεται στο προσκήνιο, λαμβάνοντας υπόψιν ότι πολλά στοιχεία συνδέονται σειριακά ή παράλληλα σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο [2].

### 2.9.1 Ισοδύναμο κύκλωμα της ιδανικής συσκευής



Σχήμα 2-12. Ισοδύναμα κυκλώματα φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Το κύκλωμα του Σχήματος 2-12(α), που αποτελείται από μια ιδανική p-n δίοδο, που έχει ρεύμα κορεσμού  $I_0$ , παράγοντα ιδανικότητας  $m$  και μια ιδανική πηγή ρεύματος  $I_L$ , έχει την ίδια συμπεριφορά με αυτήν που περιγράφεται από την εξίσωση (2.8) και είναι το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου.

### 2.9.2 Αντιστάσεις σε σειρά και παράλληλα

Στην πραγματικότητα επηρεάζουν και άλλες παράμετροι που δεν περιλαμβάνονται στην (2.8). Αυτές επηρεάζουν την εξωτερική συμπεριφορά του στοιχείου. Εντοπίζονται τουλάχιστον δυο τέτοιες εξωγενείς επιδράσεις: η σειριακή αντίσταση και οι διαρροές ρεύματος ανάλογες με την τάση. Οι τελευταίες συμβολίζονται συνήθως με μια παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση. Οι επιδράσεις αυτές διανέμονται σε όλη τη συσκευή και δεν μπορούν πάντα να παρασταθούν με μια αντίσταση σταθερής τιμής. Ωστόσο, από μια πρακτική και λειτουργική οπτική γωνία, η χρήση συγκεντρωμένων αντιστάσεων για αναπαράσταση -όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-12- αποδεικνύεται αποδεκτή και χρήσιμη λύση.

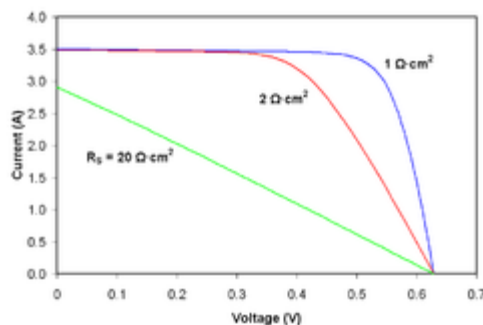
Η παράλληλη αντίσταση έχει τη μέγιστη επίδρασή της όταν η τάση ελαχιστοποιείται (π.χ. όταν το ρεύμα που περνά από τη δίοδο του ισοδύναμου κυκλώματος είναι πολύ μικρό). Σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις (συμπεριλαμβανομένων των σύγχρονων κρυσταλλικών στοιχείων πυριτίου) έχει μικρή επίδραση υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας.

Δε συμβαίνει, όμως, το ίδιο με τη σειριακή αντίσταση. Η τελευταία οφείλεται στην αντίσταση των μεταλλικών επαφών με τον ημιαγωγό και στην αντίσταση των στρωμάτων του ημιαγωγού.

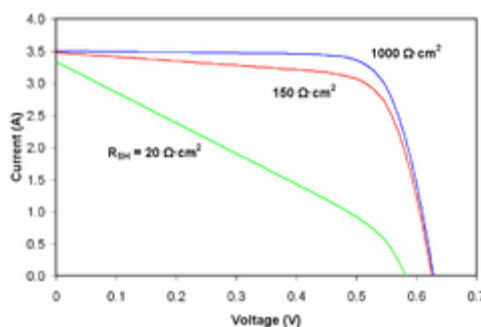
Αν συμπεριληφθούν οι  $R_s$  και  $R_{sh}$  στην εξίσωση που περιγράφει τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού κελιού, τότε αυτή παίρνει τη μορφή [2]:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \frac{e(V + IR_s)}{mkT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.19)$$

Η παραπάνω προκύπτει από την ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος του Σχήματος 2-12(β). Οι επιδράσεις των αντιστάσεων στην εξωγενή συμπεριφορά του κελιού φαίνονται στα Σχήματα 2-13 και 2-14. Από το Σχήμα 2-14 παρατηρούμε ότι η παράλληλη αντίσταση μειώνει την τάση ανοικτοκύκλωσης και τον παράγοντα συμπλήρωσης, ενώ η σειριακή αντίσταση μειώνει τον παράγοντα συμπλήρωσης και το ρεύμα βραχυκυκλώματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-13 [2].



Σχήμα 2-13. Επίδραση της σειριακής αντίστασης στην χαρακτηριστική I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 2-14. Επίδραση της παράλληλης αντίστασης στην χαρακτηριστική I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

## 2.10 Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Για την απλοποίηση της εγκατάστασης, οι κατασκευαστές συνήθως προμηθεύουν στοιχεία που είναι ήδη ηλεκτρικά συνδεδεμένα και συσκευασμένα σε φωτοβολταϊκά πλαίσια. Αυτά αποτελούν τα δομικά στοιχεία των φωτοβολταϊκών γεννητριών.

Υπό φυσιολογικές συνθήκες, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει χρόνο ζωής της τάξης των είκοσι ετών. Αυτός εξαρτάται και από την αντοχή της συσκευασίας να αποτρέπει την εισχώρηση υγρασίας και από την αντοχή στη θερμική καταπόνηση. Στο εμπόριο διατίθενται πολλοί τύποι πλαισίων. Οι συνηθισμένοι έχουν 30 ή 36 κρυσταλλικά κελιά πυριτίου. Όλα τα κελιά έχουν το ίδιο μέγεθος, συνδέονται σειριακά, επικαλύπτονται με ειδικές μεμβράνες και είναι εγκιβωτισμένα σε διάφανο μονωτικό με πλαίσιο από αλουμίνιο, έχοντας διάφορες τιμές ονομαστικής ισχύος. Έτσι, ένα πλαίσιο των 36 κυψελών μπορεί να φτάσει τα 70-85 W, ενώ μεγαλύτερα μπορεί να φτάσουν ως και τα 200 W [2]. Ανάλογα με το μέγεθος των στοιχείων, η επιφάνεια τους ποικίλει ανάμεσα στα 0.1 και 0.5 m<sup>2</sup>. Συνήθως διαθέτουν δίοδο παράκαμψης.

Πολλές χώρες έχουν διαμορφώσει πρότυπα για την αντοχή των πλαισίων (π.χ. στην ΕΕ υπάρχει το EEC-Spec 503). Τα πλαίσια μπορούν να δοκιμαστούν στις προδιαγραφές αυτές σε

διαπιστευμένα εργαστήρια. Αν και η διαπίστευση με αυτές τις προδιαγραφές δεν είναι γενικά υποχρεωτική, η χρήση εγκεκριμένων πλαισίων συνίσταται επειδή παρέχει εγγύηση της αντοχής τους.

### 2.10.1 Πρότυπες συνθήκες δοκιμής

Η ηλεκτρική συμπεριφορά ενός πλαισίου (η οποία είναι η χαρακτηριστική καμπύλη I-V σε συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας) μπορεί να προβλεφθεί από τις πληροφορίες που συνήθως παρέχουν οι κατασκευαστές μαζί με το πλαίσιο [2].

Οι πρότυπες συνθήκες δοκιμής (Standard Test Conditions, STC) για την αποτίμηση των πληροφοριών αυτών είναι:

- Ακτινοβολία :  $100 \text{ mW/cm}^2$  ( $1 \text{ kW/m}^2$ )
- Φάσμα : AM 1,5
- Θερμοκρασία στοιχείου  $25^\circ\text{C}$

Υπό τις συνθήκες αυτές μετρούνται οι ακόλουθες ποσότητες :

- Η μέγιστη ισχύς ( $P_{max}$ ) που αποδίδει το πλαίσιο
- Το ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$
- Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$

Ο χαρακτηρισμός του κελιού ολοκληρώνεται από την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του κελιού (Nominal Cell Operating Temperature, NCOT), η οποία ορίζεται ως η θερμοκρασία στην οποία φτάνει η κυψέλη όταν το πλαίσιο υποβληθεί στις παρακάτω συνθήκες [2]:

- Ακτινοβολία :  $80 \text{ mW/cm}^2$  ( $800 \text{ W/m}^2$ )
- Φάσμα : AM 1,5
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος  $20^\circ\text{C}$
- Ταχύτητα ανέμου  $1 \text{ m/s}$ .

# 3.

## ΜΟΝΤΕΛΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ & ΠΛΑΙΣΙΩΝ

---

### 3.1 Μοντέλα φωτοβολταϊκών πλαισίων

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, η χαρακτηριστική εξίσωση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να προσομοιωθεί με τη βοήθεια ενός συστήματος εξισώσεων που υπολογίζει τις παραμέτρους που απαιτούνται για τη διαδικασία αυτή. Έχει αναπτυχθεί μια πλειάδα από τέτοια μαθηματικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά χαρακτηρίζονται βάσει του ισοδύναμου κυκλώματος στο οποίο στηρίχτηκε η ανάπτυξή τους, ή του αριθμού των παραμέτρων που απαιτείται να υπολογιστούν.

Τα μοντέλα αυτά, στηριζόμενα στις παραμέτρους που έχουν μετρηθεί και παρέχονται από τους κατασκευαστές των πλαισίων, μπορούν να προσομοιώσουν τη χαρακτηριστική καμπύλη  $I-V$ , και κατά συνέπεια την καμπύλη  $P-V$ . Έτσι, με σταθερές τις παραμέτρους, μπορεί να παρατηρηθεί η διαφορετική συμπεριφορά της χαρακτηριστικής για διαφορετικές τιμές της ακτινοβολίας ( $G$ ) που προσπίπτει και της θερμοκρασίας ( $T$ ) του πλαισίου. Αποκτούν λοιπόν τα μοντέλα αυτά, καθώς και τα μοντέλα που αναφέρονται απλά στο στοιχείο (cell) ή ακόμη στη συστοιχία (array), μεγάλο ενδιαφέρον, μιας και δίνουν τη δυνατότητα να μπορεί να

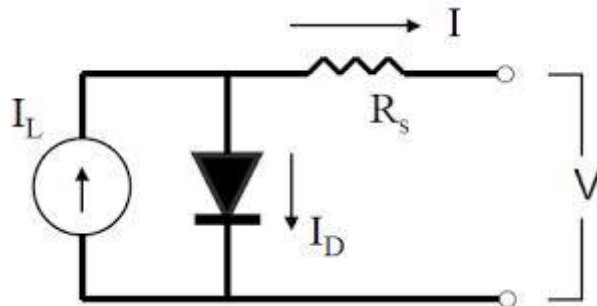
«προβλεφθεί» η συμπεριφορά του πλαισίου και να υπολογιστεί η ισχύς που αυτό μπορεί να αποδώσει σε οποιεσδήποτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσονται τα μοντέλα που συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία, για τους τύπους πλαισίων που αναφέρονται και αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων που απαιτούνται για τη σύνθεση της χαρακτηριστικής τους εξίσωσης με βάση τις παρεχόμενες, από τους κατασκευαστές, παραμέτρους. Ορίζοντας τιμές στην ακτινοβολία και στη θερμοκρασία, η χαρακτηριστική εξίσωση κάθε μοντέλου είναι σε θέση να αποτυπώσει την σχέση I-V για κάθε επιθυμητό πλαίσιο.

## 3.2 Μοντέλα που ανταποκρίνονται σε διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πλαισίων

### 3.2.1 Το 1<sup>ο</sup> Μοντέλο

Το πρώτο μοντέλο που αναλύεται είναι αυτό που προτείνεται στο [4]. Το μοντέλο αυτό αναφέρεται σε διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στο [4] μελετήθηκε για πλαίσια CIS λεπτού υμενίου, όπως επίσης για μονο- και πολύ-κρυσταλλικά. Πρόκειται για ένα μοντέλο απλής διόδου και τεσσάρων παραμέτρων. Στο Σχήμα 3-1 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα για το συγκεκριμένο μοντέλο.



Σχήμα 3-1. Ισοδύναμο κύκλωμα για το μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων.

Από τους νόμους του Kirchhoff το ρεύμα στους ακροδέκτες του στοιχείου εκφράζεται από τη σχέση:

$$I = I_L - I_D \quad (3.1)$$

όπου:

$I_L$  το ρεύμα φωτός



$I_D$  το ρεύμα της διόδου

Το ρεύμα φωτός εξαρτάται τόσο από την ακτινοβολία, όσο και από τη θερμοκρασία και έχει εξακριβωθεί κάτω από συνθήκες αναφοράς ότι υπολογίζεται από τη σχέση (3.2)

$$I_L = \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) (I_{L-ref} + \mu_{isc}(T - T_{ref})) \quad (3.2)$$

όπου:

$I_{L-ref}$  το ρεύμα φωτός σε συνθήκες αναφοράς (A) ,

$G$  και  $G_{ref}$  η ακτινοβολία  $\left( \frac{W}{m^2} \right)$  πραγματική και αναφοράς ( $1000 \frac{W}{m^2}$ ) αντίστοιχα,

$T, T_{ref}$  η θερμοκρασία ( $^{\circ}K$ ) πραγματική και αναφοράς ( $298^{\circ}K$ ) αντίστοιχα,

$\mu_{isc}$  ο συντελεστής θερμοκρασίας του ρεύματος βραχυκυκλώματος, που παρατίθεται από τους κατασκευαστές (A /  $^{\circ}K$ ).

Το ρεύμα της διόδου δίνεται από την εξίσωση:

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_S)}{\gamma kT} \right) - 1 \right] \quad (3.3)$$

όπου:

$I_0$  το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού (A),

$q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου ( $1.602 \cdot 10^{-19} C$ ),

$\gamma = A * N_s$ , με  $N_s$  τον αριθμό των στοιχείων που συνδέονται σε σειρά και  $A$  ο συντελεστής ποιότητας της διόδου,

$k$  η σταθερά του Boltzmann ( $1.381 \cdot \frac{10^{-23} J}{K}$ ),

$R_S$  η σειριακή αντίσταση ( $\Omega$ ).

Το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_0 = I_{0-ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left( \left( \frac{qEg}{kA} \right) \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (3.4)$$

όπου:

$E_g$  το ενεργειακό διάκενο ζώνης (1.12 eV για Si),

$I_{0\_ref}$  το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού σε συνθήκες αναφοράς.

Οι παράμετροι του μοντέλου καθορίζονται ως εξής:

$$I_{L\_ref} = I_{sc\_ref} \quad (3.5)$$

$$I_{0\_ref} = I_{sc\_ref} \exp\left(\frac{-qV_{oc\_ref}}{k\gamma T_{ref}}\right) \quad (3.6)$$

$$\gamma = \frac{q(V_{mp\_ref} + I_{mp\_ref}R_s - V_{oc\_ref})}{kT_{ref}\ln\left(1 - (I_{mp\_ref}/I_{sc\_ref})\right)} \quad (3.7)$$

όπου:

$I_{sc\_ref}$  το ρεύμα βραχυκυκλώματος σε συνθήκες αναφοράς που παρατίθεται από τους κατασκευαστές,

$V_{oc\_ref}$  η τάση ανοικτοκύκλωσης σε συνθήκες αναφοράς που παρατίθεται από τους κατασκευαστές,

$V_{mp\_ref}$ ,  $I_{mp\_ref}$  η τάση και το ρεύμα, αντίστοιχα, στο σημείο μέγιστης ισχύος σε STC, που οι τιμές τους παρατίθενται από τους κατασκευαστές.

Για τον προσδιορισμό του σειριακού αντιστάτη,  $R_s$  ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- Τίθεται ως ελάχιστη τιμή του  $R_s$  το 0
- Γίνεται υπολογισμός με βάση την αναλυτική έκφραση (3.8) του συντελεστή θερμοκρασίας τάσης ανοικτοκυκλώματος:

$$\mu_{voc} = \frac{\gamma k}{q} \left[ \ln \left( \frac{I_{sc\_ref}}{I_{0\_ref}} \right) + \frac{T_{ref} \mu_{isc}}{I_{sc\_ref}} - \left( 3 + \frac{q E_g}{A k T_{ref}} \right) \right] \quad (3.8)$$

όπου  $\mu_{isc}$  είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας του ρεύματος βραχυκυκλώματος που παρατίθεται από τους κατασκευαστές και οι αρχικές τιμές των  $\gamma$ ,  $I_{0\_ref}$  υπολογίζονται από τις (3.9), (3.10) αντίστοιχα:

$$\gamma_{low} = \frac{q(V_{mp\_ref} - V_{oc\_ref})}{k T_{ref} \ln \left( 1 - (I_{mp\_ref}/I_{sc\_ref}) \right)} \quad (3.9)$$

$$I_{0\_ref\_low} = I_{sc\_ref} \exp \left( \frac{-q V_{oc\_ref}}{k T_{ref} \gamma_{low}} \right) \quad (3.10)$$

Η μέγιστη τιμή για το  $R_s$  δίνεται από τη σχέση:

$$R_{s\_max} = \frac{1}{I_{mp\_ref}} \left[ \frac{k T_{ref} N_s}{q} \ln \left( 1 - (I_{mp\_ref}/I_{sc\_ref}) \right) + V_{oc\_ref} - V_{mp\_ref} \right] \quad (3.11)$$

- Υπολογίζεται το  $R_s$  ως

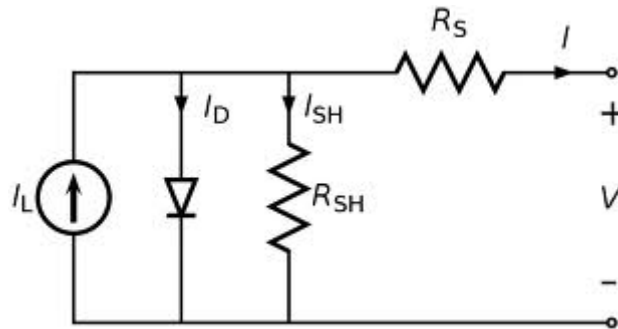
$$R_s = \frac{(R_{s\_max} + R_{s\_min})}{2} \quad (3.12)$$

- Ελέγχεται αν η τιμή του  $\mu_{voc}$  συγκλίνει με αυτή των κατασκευαστών και εάν όχι τίθεται την τιμή που υπολογίζει η (3.12) ως  $R_{s\_max}$  και ως  $R_{s\_min}$  και επαναλαμβάνεται ο υπολογισμός των  $I_{0\_ref}$  και  $\gamma$  από τις (3.6) και (3.7) και του νέου  $\mu_{voc}$  μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Πρόσθετη δικλείδα αποτελεί και ο υπολογισμός του σημείου μεγιστοποίησης της ισχύος και σύγκρισης του υπολογιζόμενου με αυτό που παραθέτουν οι κατασκευαστές.

Με τον υπολογισμό του  $R_s$  μπορούν εν συνεχεία να υπολογιστούν οι  $I_{0\_ref}$  και  $\gamma$  από τις (3.6) και (3.7) και έτσι αντικαθιστώντας τις (3.3) και (3.2) στην (3.1) προκύπτει η σχέση που δίνει τη χαρακτηριστική τάσεως-ρεύματος.

### 3.2.2 Το 2<sup>ο</sup> Μοντέλο

Το δεύτερο μοντέλο που εξετάζεται είναι αυτό που προτείνεται στο [5]. Αποτελεί, όπως και το μοντέλο που μελετάται στην παράγραφο 3.2.1, γενικό μοντέλο. Πρόκειται για ένα μοντέλο απλής διόδου και τεσσάρων παραμέτρων. Στο Σχήμα 3-2 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα για το συγκεκριμένο μοντέλο.



Σχήμα 3-2. Ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η εξίσωση (3.13) περιγράφει την χαρακτηριστική V-I.

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (3.13)$$

όπου τα  $I_L$ ,  $I_D$ ,  $I_{sh}$  περιγράφονται από τις εξισώσεις (3.14)-(3.16).

Το ρεύμα φωτός  $I_L$  υπολογίζεται ως εξής

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} \left( I_{L_{ref}} + \mu_{isc} (T - T_{ref}) \right) \quad (3.14)$$

όπου:

$I_{L_{ref}} = I_{sc_{ref}}$ , οπότε το ρεύμα φωτός σε συνθήκες αναφοράς ισούται με το ρεύμα βραχυκυκλώματος σε συνθήκες αναφοράς που παρέχουν οι κατασκευαστές,

$\mu_{isc}$  ο θερμικός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης,

$T, T_{ref}$  η θερμοκρασία, πραγματική και αναφοράς αντίστοιχα,

$G, G_{ref}$  η ακτινοβολία, πραγματική και αναφοράς αντίστοιχα.

Το ρεύμα της διόδου υπολογίζεται από τη σχέση

$$I_D = I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V + IR_S)}{N_S n k T} \right) - 1 \right) \quad (3.15)$$

όπου:

$I_0$  το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού,

$R_S$  η σειριακή αντίσταση,

$n$  ο συντελεστής ποιότητας της διόδου,

$N_S$  ο αριθμός των συνδεδεμένων σε σειρά στοιχείων.

Το ρεύμα που διαρρέει την παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$  δίνεται από την εξίσωση:

$$I_{sh} = \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (3.16)$$

Για τον υπολογισμό της (3.15) το  $I_0$  εξάγεται από τη σχέση:

$$I_0 = I_{0\_ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left( \frac{q}{k} \left( \frac{E_{g\_ref}}{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \right) \right) \quad (3.17)$$

όπου:

$I_{0\_ref}$  το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού σε συνθήκες αναφοράς,

$E_{g\_ref}, E_g$  το ενεργειακό διάκενο ζώνης σε συνθήκες αναφοράς και πραγματικές αντίστοιχα.

Η παράμετρος  $E_g$  υπολογίζεται με τη βοήθεια της:

$$E_g = E_{g0} - \frac{7.02 * 10^{-4} * T^2}{1108 + T} \quad (3.18)$$

με  $E_{g0}$  το ενεργειακό διάκενο ζώνης του ημιαγωγού του στοιχείου υπολογισμένο στους 0 °K (είναι ίσο με 1.16 για το Si).

Οι παράμετροι  $R_S$  και  $R_{sh}$  προτείνεται στο [4] να υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$R_S = 0.11175 \frac{V_{oc}}{I_{sc}}, R_{sh} = 34.49692 \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.19)$$

Μόλις καθοριστεί η αρχική τιμή για το  $R_S$  αντικαθίσταται στη σχέση:

$$n = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s - V_{oc}}{T} \left[ \ln \left( \frac{(I_{sc} - I_{mp})R_{sh} - (V_{mp} + I_{mp}R_s)}{I_{sc}R_{sh} - V_{oc}} \right) \right]^{-1} \quad (3.20)$$

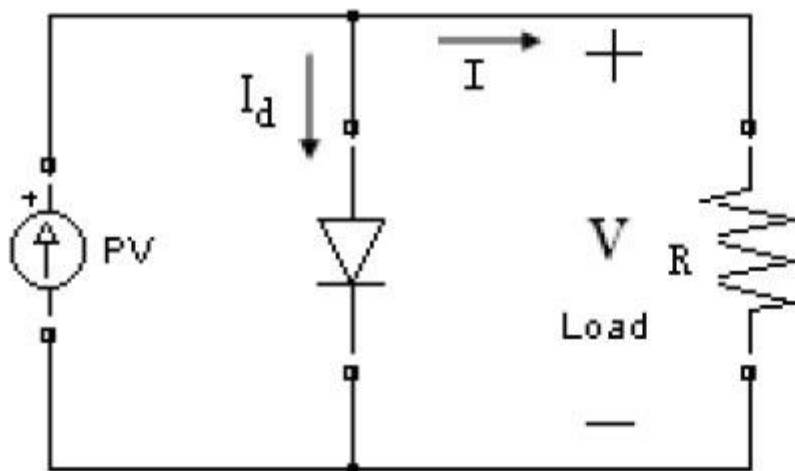
και αυτή με τη σειρά της στην:

$$I_{0\_ref} = \frac{I_{sc} - V_{oc}/R_{sh}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{nT}\right) - 1} \quad (3.21)$$

Αντί αυτού του τρόπου υπολογισμού, το  $I_{0\_ref}$  αντικαθίσταται από την 3.21 στην 3.17 κι αυτή με τη σειρά της αντικαθιστά το  $I_0$  στην 3.15. Οι σχέσεις 3.14 έως και 3.16 αντικαθίστανται στην χαρακτηριστική 3.13 για τις παραμέτρους  $I_L$ ,  $I_D$  και  $I_{sh}$  αντίστοιχα. Έπειτα λύνεται σύστημα δυο εξισώσεων με άγνωστες τις  $R_s$  και  $R_{sh}$  με χρήση της χαρακτηριστικής στο σημείο βραχυκυκλώματος και στο σημείο μέγιστης ισχύος με τη βοήθεια των στοιχείων που παραθέτουν οι κατασκευαστές σε STC. Με αυτές τις τιμές για τις αντιστάσεις υπολογίζονται οι παράμετροι  $n$  και  $I_{0\_ref}$  από τις σχέσεις 3.20 και 3.21 αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή ήταν απαραίτητη, για την ακριβέστερη προσομοίωση, από το μοντέλο αυτό, της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

### 3.2.3 Το 3<sup>ο</sup> Μοντέλο

Το 3<sup>ο</sup> μοντέλο είναι αυτό που συναντάται στο [6]. Αποτελεί μοντέλο μιας διόδου και το ισοδύναμο κύκλωμα του απεικονίζεται στο Σχήμα 3-3.



Σχήμα 3-3. Απλό ισοδύναμο κύκλωμα για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο [5].

Στο μοντέλο αυτό αρχικά υπολογίζονται οι παράμετροι  $C_1$ ,  $C_2$  που αποτελούν διορθωτικούς παράγοντες για την προσομοίωση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου:

$$C_2 = \left( \frac{V_{mp}}{V_{oc}} - 1 \right) / \ln \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \quad (3.22)$$

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \exp \left( - \frac{V_{mp}}{C_2 V_{oc}} \right) \quad (3.23)$$

όπου:

$V_{oc}$  η τάση ανοικτοκύκλωσης σε συνθήκες αναφοράς,

$V_{mp}$  η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος σε συνθήκες αναφοράς,

$I_{mp}$  το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος σε συνθήκες αναφοράς,

$I_{sc}$  το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε συνθήκες αναφοράς.

Οι τιμές και για τις τέσσερις παραπάνω παραμέτρους παρατίθενται από τους κατασκευαστές. Το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού δίνεται από τη σχέση:

$$I_0 = \alpha S (T - T_{ref}) + I_{sc} (S - 1) \quad (3.24)$$

όπου:

$\alpha (= 0,0012 \times I_{sc} \text{ για το παρόν μοντέλο})$  ο συντελεστής θερμοκρασίας βραχυκυκλώματος ( $A/^\circ K$ ),

$S, S_{ref}$  η ηλιακή ακτινοβολία, πραγματική και σε STC, σε  $kW/m^2$ ,

$T, T_{ref}$  η θερμοκρασία, πραγματική και σε STC αντίστοιχα ( $^\circ K$ ).

Με τη βοήθεια των παραμέτρων που δίνονται από τις σχέσεις (3.22), (3.23), (3.24) η εξίσωση που αποδίδει την χαρακτηριστική τάσεως-ρεύματος, για το μοντέλο αυτό, είναι η ακόλουθη:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ C_1 \left( \exp \left( \frac{V + \beta(T - T_{ref}) + R_s I_0}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right) - 1 \right] \quad (3.25)$$

όπου:

$I_{ph}(= I_{sc})$  το ρεύμα φωτός,

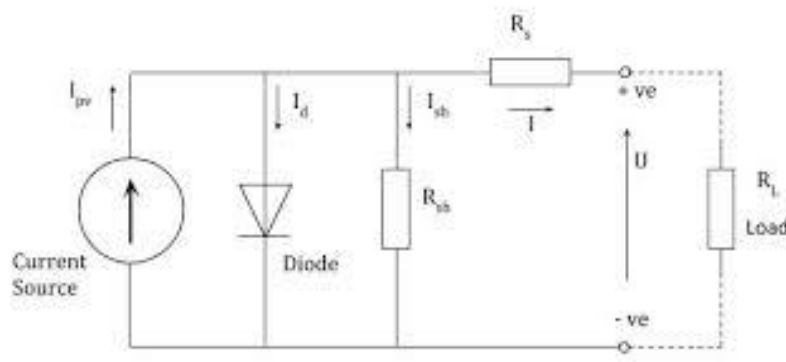
$\beta(= 0,005 \times V_{oc}$  για το παρόν μοντέλο) ο συντελεστής θερμοκρασίας της τάσης ανοικτοκύκλωσης,

$R_s$  η σειριακή αντίσταση.

Για τον προσδιορισμό της σειριακής αντίστασης η διαδικασία έχει ως εξής. Τίθεται ως αρχική τιμή η μηδενική και αυξάνεται σταδιακά. Για κάθε τιμή της αντίστασης εφαρμόζεται στην (3.25) η μέθοδος Newton-Raphson, η οποία εξετάζεται στην παράγραφο 4.4 της παρούσας εργασίας, με τιμές συνθηκών αναφοράς για την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία. Η τιμή της  $R_s$ , για την οποία το σημείο μέγιστης ισχύος που υπολογίζεται από τη μέθοδο και αυτό που παρατίθεται από τους κατασκευαστές συγκλίνουν, είναι αυτή η οποία τελικά επιλέγεται [6].

### 3.2.4 Το 4<sup>ο</sup> μοντέλο

Το τέταρτο μοντέλο που αναλύεται είναι αυτό που περιγράφεται στο [7]. Πρόκειται για ένα μοντέλο απλής διόδου τεσσάρων παραμέτρων. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για την προσομοίωση φωτοβολταϊκών πλαισίων τεχνολογίας thin-film. Στο σχήμα 3-4 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα για το συγκεκριμένο μοντέλο.



Σχήμα 3-4. Ισοδύναμο κύκλωμα για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Το μοντέλο στηρίζεται στην υπόθεση ότι η παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$  απειρίζεται και ως εκ τούτου η εξίσωση που περιγράφει τη χαρακτηριστική τάσεως-ρεύματος του μοντέλου δίνεται από τη σχέση:



$$I = I_L - I_0 \left( \frac{V + IR_s}{mV_T} \right) \quad (3.26)$$

όπου:

$I_L$  το ρεύμα φωτός (A),

$I_0$  το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού (A),

$R_s$  η σειριακή αντίσταση ( $\Omega$ ),

$m$  συντελεστής ποιότητας που αποτελεί το γινόμενο του συντελεστή ποιότητας της διόδου και του αριθμού των συνδεδεμένων σε σειρά στοιχείων  $n \times N_s$ ,

$V_T$  η θερμική τάση.

Το γινόμενο  $mV_T$  αντιμετωπίζεται στο [7] ως μια παράμετρος που στο εξής θα επισημαίνεται ως “ $a$ ”.

Οι παράμετροι του μοντέλου σε συνθήκες αναφοράς δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$I_{L\_ref} = I_{sc\_ref} \quad (3.27)$$

$$a_{ref} = \frac{\mu_{voc} T_{ref} - V_{oc\_ref} + E_g N_s}{\frac{T_{ref} \mu_{isc}}{I_{L\_ref}}} \quad (3.28)$$

$$I_{0ref} = \frac{I_{L\_ref}}{\exp\left(\frac{V_{oc\_ref}}{a_{ref}}\right) - 1} \quad (3.29)$$

$$R_{s\_ref} = \frac{a_{ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp\_ref}}{I_{L\_ref}}\right) - V_{mp\_ref} + V_{oc\_ref}}{I_{mp\_ref}} \quad (3.30)$$

όπου:

$I_{sc\_ref}$  το ρεύμα βραχυκυλώματος σε συνθήκες αναφοράς που παρέχεται από τους κατασκευαστές,

$\mu_{voc}, \mu_{isc}$  οι θερμικοί συντελεστές τάσης ανοικτοκύκλωσης και ρεύματος βραχυκύκλωσης αντίστοιχα που παρέχονται από τους κατασκευαστές,

$V_{oc\_ref}$  η τάση ανοικτοκύκλωσης σε συνθήκες αναφοράς που παρέχεται από τους κατασκευαστές,

$E_g$  το ενεργειακό διάκενο ζώνης,

$T_{ref}$  η θερμοκρασία αναφοράς 25°C,

$I_{mp\_ref}, V_{mp\_ref}$  το ρεύμα και η τάση αντίστοιχα στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Με γνωστές τις τιμές των παραμέτρων σε συνθήκες αναφοράς, οι τιμές τους σε διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας - από αυτές των συνθηκών αναφοράς- δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I_L = \frac{G}{G_{ref}} [I_{L\_ref} + \mu_{isc}(T - T_{ref})] \quad (3.31)$$

$$I_0 = I_{0ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \left( \frac{E_g N_s}{a} \right) \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T} \right) \right] \quad (3.32)$$

$$R_s = R_{s\_ref} \quad (3.33)$$

$$a = a_{ref} \frac{T}{T_{ref}} \quad (3.34)$$

όπου:

$G, G_{ref}$  η ακτινοβολία πραγματική και αναφοράς αντίστοιχα,

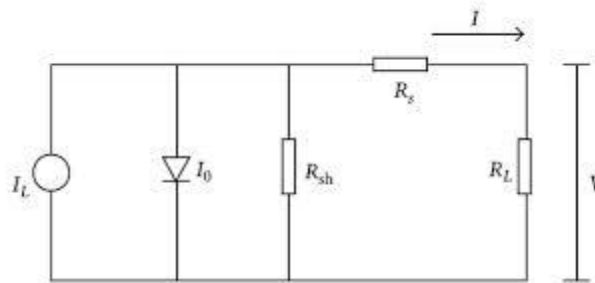
$T$  η θερμοκρασία.

Με τη βοήθεια των (3.31) – (3.34) μπορεί να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική I-V για ποικίλες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας μέσω της (3.26).

### 3.3 Μοντέλα που αναφέρονται σε αμιγώς κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια

#### 3.3.1 Το 5<sup>ο</sup> μοντέλο

Το 5<sup>ο</sup> κατά σειρά μοντέλο που μελετάται είναι αυτό που περιγράφεται στο [8]. Πρόκειται για ένα μοντέλο απλής διόδου πέντε παραμέτρων. Στο Σχήμα 3-5 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα για το συγκεκριμένο μοντέλο.



Σχήμα 3-5. Ισοδύναμο κύκλωμα μιας διόδου για φωτοβολταϊκό πάνελ.

Η χαρακτηριστική εξίσωση που περιγράφει τη σχέση τάσεως-ρεύματος συναρτήσει της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας είναι η ακόλουθη:

$$I = a_g I_L - I_0 \left( \exp \left( \frac{a_g [V + KI(T - T_{ref})] + IR_s}{a_g nT} \right) - 1 \right) - \frac{a_g [V + KI(T - T_{ref})] + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.35)$$

όπου:

$a_g = G/G_{ref}$  το πηλίκο πραγματικής ακτινοβολίας και αναφοράς,

$n$  ο συντελεστής ποιότητας της διόδου,

$I_L$  το ρεύμα φωτός (A),

$I_0$  το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού (A),

$K$  ένας συντελεστής θερμικής διόρθωσης,

$R_s$  η σειριακή αντίσταση ( $\Omega$ ),

$R_{sh}$  η παράλληλη αντίσταση ( $\Omega$ ).

Το ρεύμα φωτός υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_L = I_{sc} + \mu_{isc}(T - T_{ref}) \quad (3.36)$$

και το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού από την εξίσωση:

$$I_0 = a_g \left( \frac{I_L - \frac{V_{oc}}{R_{sho}}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{nT}\right) - 1} \right) \quad (3.37)$$

όπου  $R_{sho}$  το αντίστροφο της κλίσης της χαρακτηριστικής I-V για  $V=0$  και  $I=I_{sc}$ .

Στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρείται ότι  $R_{sh} \cong R_{sho}$ . Η τάση ανοικτοκυκλώματος  $V_{oc}$  που χρησιμοποιείται στην (3.37) δίνεται από τη σχέση:

$$V_{oc} = V_{oc\_ref} + nT \ln(a_g) + \mu_{voc}(T - T_{ref}) \quad (3.38)$$

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων  $n$  και  $R_s$  ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια. Απαραίτητα θεωρούνται τα στοιχεία  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ,  $R_{so}$  (αντίστροφο της κλίσης της χαρακτηριστικής για  $V = V_{oc}$ ,  $I = 0$ ) και  $R_{sho}$ . Τα δυο τελευταία συνήθως δεν διατίθενται από τους κατασκευαστές μπορούν όμως να υπολογιστούν από το γράφημα της χαρακτηριστικής I-V σε συνθήκες αναφοράς από τις σχέσεις:

$$R_{sho} = V_A / (I_{sc} - I_A) \quad (3.39)$$

$$R_{so} = (V_{oc} - V_B) / I_B \quad (3.40)$$

όπου  $V_A = 0.2V_{oc}$  και  $I_B = 0.2I_{sc}$ .

Στο [8] προτείνεται οι αντιστάσεις να υπολογίζονται με βάση τη σχέση:

$$R_{so} = 0.11175 \frac{V_{oc}}{I_{sc}}, R_{sho} = 34.49692 \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.41)$$

Η σχέση αυτή προτείνεται για συγκεκριμένες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Μόλις καθοριστεί η αρχική τιμή για το  $R_s$  αντικαθίσταται στη σχέση:

$$n = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s - V_{oc}}{T} \left[ \ln \left( \frac{(I_{sc} - I_{mp})R_{sho} - (V_{mp} + I_{mp}R_s)}{I_{sc}R_{sho} - V_{oc}} \right) \right]^{-1} \quad (3.42)$$

και αυτή με τη σειρά της στην εξίσωση:

$$I_0 = \frac{I_{sc} - V_{oc}/R_{sho}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{nT}\right) - 1} \quad (3.43)$$

Έπειτα αντικαθίστανται οι (3.42), (3.43) στην (3.44):

$$-\frac{\frac{I_0}{nT} \exp\left(\frac{V_{oc}}{nT}\right) + \frac{1}{R_{sho}}}{1 + R_s \left[ \frac{I_0}{nT} \exp\left(\frac{V_{oc}}{nT}\right) + \frac{1}{R_{sho}} \right]} = -\frac{1}{R_{so}} \quad (3.44)$$

και το  $R_s$  αυξάνεται διαδοχικά ωσότου το δεξί και αριστερό μέλος της (3.44) συγκλίνουν. Με την τιμή αυτή των  $R_s$  και  $n$  υπολογίζεται το  $I_0$  από την (3.37).

Ο συντελεστής  $K$  αποτελεί ένα συντελεστή θερμικής διόρθωσης για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του μοντέλου σε συνθήκες διαφορετικές από τις πρότυπες συνθήκες αναφοράς. Η επίδρασή του οφείλεται στο γεγονός ότι κανονικοποιεί τη χαρακτηριστική I-V για ακτινοβολία  $G_{ref}$ , ώστε να ταιριάζει στις χαρακτηριστικές που προκύπτουν από τα παρεχόμενα από τους κατασκευαστές στοιχεία για διαφορετικές θερμοκρασίες από την θερμοκρασία αναφοράς. Υπολογίζεται, σύμφωνα με το [8], με βάση την εξής διαδικασία:

Θεωρώντας συνθήκες  $G = G_{ref}$  και  $T^* \neq T_{ref}$ , η μέγιστη ισχύς για τις συνθήκες αυτές μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$P^* = V^*I^* = V_d I^* - I^{*2}R_s \quad (3.45)$$

όπου η τάση στη δίοδο δίνεται από τη σχέση:

$$V_d = V^* + KI^*(T^* - T_{ref}) + I^*R_s \quad (3.46)$$

Με τον αστερίσκο (\*) επισημαίνονται οι αντίστοιχοι παράμετροι που αναφέρονται στις συνθήκες  $G = G_{ref}$  και  $T^* \neq T_{ref}$ , η τιμή της θερμοκρασίας για μια μέτρηση με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Η μέγιστη τιμή για την  $V_d$ , για αυτές τις συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, δίνεται από τη σχέση:

$$V_{d,max} = nT^* \left\{ \ln \left[ \frac{R_{sho}(I_L^* + I_0^*) - 2(V_{d,max} - I^* R_s)}{R_{sho}(V_{d,max} - 2I^* R_s)} \right] - \ln \left[ I_0^* \left( \frac{1}{nT^*} + \frac{1}{V_{d,max} - 2I^* R_s} \right) \right] \right\} \quad (3.47)$$

και

$$V_{d,max} \cong -nT^* \ln \left( \frac{I_G^*}{nT^*} \right) \quad (3.48)$$

Η τιμή της (3.48) αντικαθίσταται στην (3.47), η οποία με τη σειρά της υπολογίζει μια νέα τιμή για το  $V_{d,max}$ . Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, ώσπου μετά από λίγες επαναλήψεις, να παρατηρηθεί σύγκλιση της  $V_{d,max}$  σε μια σταθερή τιμή.

Η τιμή του ρεύματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ για τις συνθήκες  $G_{ref}, T^*$  είναι:

$$I_{max}^* = I_L^* - I_0^* \left( e^{\frac{V_{d,max}}{nT^*}} - 1 \right) - \frac{V_{d,max}}{R_{sho}} \quad (3.49)$$

Η μέγιστη ισχύς για τις συνθήκες αυτές είναι:

$$P_{max}^* = V_{max}^* I_{max}^* = V_{d,max} - K I_{max}^* (T^* - T_{ref}) + I^* R_s \quad (3.50)$$

Κάνοντας χρήση της σχέσης:

$$P_{max}^* = P_{max} \left[ 1 + \frac{\mu_{P,max}}{100} (T^* - T_{ref}) \right] \quad (3.51)$$

το  $K$  αυξάνεται διαδοχικά μέχρι να παρατηρηθεί σύγκλιση για τις τιμές του  $P_{max}^*$  που προκύπτουν από τις εξισώσεις (3.50) και (3.51).

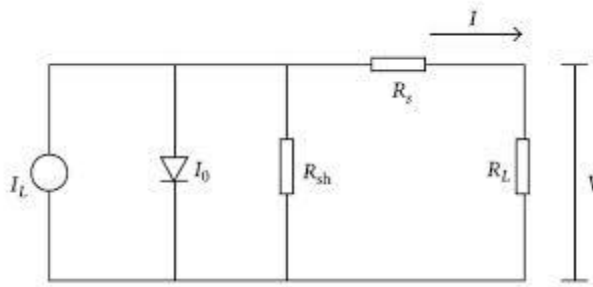
Ωστόσο, για την ακριβέστερη προσομοίωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία κι επειδή οι σχέσεις που προτείνονται για τις αντιστάσεις δεν

είναι ενδεδειγμένες για κάθε είδους φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ο υπολογισμός των παραμέτρων  $R_s$ ,  $R_{sh}$  και  $K$  έγινε με άλλη μέθοδο.

Η παράμετρος  $n$  από τη σχέση 3.42 αντικαθίσταται στις σχέσεις 3.38, 3.37 και 3.35. Η  $V_{oc}$ , από τη σχέση 3.38, επίσης αντικαθίσταται στην 3.37. Οι σχέσεις 3.37 και 3.36 αντικαθίστανται με τη σειρά τους στην χαρακτηριστική εξίσωση 3.35. Με χρήση της χαρακτηριστικής στα σημεία βραχυκυκλώματος, ανοικτοκύκλωσης και μέγιστης ισχύος (με τη βοήθεια των στοιχείων που προμηθεύουν οι κατασκευαστές για τα σημεία αυτά σε STC) λύνεται σύστημα τριών εξισώσεων με αγνώστους τις  $R_s$ ,  $R_{sh}$  και  $K$ .

### 3.3.2 Το 6<sup>ο</sup> μοντέλο

Έκτο κατά σειρά μοντέλο που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι αυτό που περιγράφεται στο [9]. Πρόκειται για μοντέλο μιας διόδου, πέντε παραμέτρων και αποτελεί παραλλαγή του μοντέλου που αναπτύσσεται στην παράγραφο 3.4.1 [8] της παρούσας εργασίας. Στο Σχήμα 3-6 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα για το μοντέλο αυτό.



Σχήμα 3-6. Ισοδύναμο κύκλωμα μιας διόδου για ένα φωτοβολταϊκό πάνελ.

Όπως και στο 5<sup>ο</sup> μοντέλο της παρούσας εργασίας, έτσι και εδώ η χαρακτηριστική τάσεως-ρεύματος συναρτήσει θερμοκρασίας-ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$I = a_g I_L - I_0 \left( \exp \left( \frac{a_g [V + KI(T - T_{ref})] + IR_s}{a_g nT} \right) - 1 \right) - \frac{a_g [V + KI(T - T_{ref})] + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.52)$$

όπου

$a_g = G/G_{ref}$  το ηλίκιο πραγματικής ακτινοβολίας και αναφοράς,

$n$  ο συντελεστής ποιότητας της διόδου,

$I_L$  το ρεύμα φωτός (A),

$I_0$  το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού (A),

$K$  ένας συντελεστής θερμικής διόρθωσης,

$R_s$  η σειριακή αντίσταση ( $\Omega$ ),

$R_{sh}$  η παράλληλη αντίσταση ( $\Omega$ ),

Το ρεύμα φωτός υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_L = I_{sc} + \mu_{isc}(T - T_{ref}) \quad (3.53)$$

Η διαφορά σε σχέση με το 5<sup>ο</sup> μοντέλο έγκειται στον υπολογισμό του ανάστροφου ρεύματος κορεσμού. Με βάση τη σχέση (3.54) υπολογίζεται μια τιμή  $I_{01}$  για  $G = G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$  ( $a_g = 1$ ). Από την ίδια σχέση υπολογίζουμε μια δεύτερη τιμή  $I_{02}$  για  $G = 200 \text{ W/m}^2$  ( $a_g = 0.2$ ). Οι  $I_{01}$  και  $I_{02}$  χρησιμεύουν στον υπολογισμό του ανάστροφου ρεύματος κορεσμού από τη σχέση (3.56):

$$I_0 = a_g \left( \frac{I_L - \frac{V_{oc}}{R_{sho}}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{nT}\right) - 1} \right) \quad (3.54)$$

όπου  $R_{sho}$  το αντίστροφο της κλίσης της χαρακτηριστικής I-V για  $V = 0$  και  $I = I_{sc}$ . Στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρείται ότι  $R_{sh} \cong R_{sho}$ .

Η τάση ανοικτοκυκλώματος  $V_{oc}$  που χρησιμοποιείται στην (3.54) δίνεται από τη σχέση:

$$V_{oc} = V_{oc\_ref} + nT \ln(a_g) + \mu_{voc}(T - T_{ref}) \quad (3.55)$$

Το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_0 = \exp \left[ \left( \frac{a_g - 0.2}{1 - 0.2} \right) \ln \left( \frac{I_{01}}{I_{02}} \right) + \ln(I_{02}) \right] \quad (3.56)$$

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων  $n$ ,  $R_s$  ακολουθείται η ίδια διαδικασία με αυτή του 5<sup>ου</sup> μοντέλου. Απαραίτητα θεωρούνται τα στοιχεία  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  και  $R_{so}$  (αντίστροφο της κλίσης της χαρακτηριστικής για  $V = V_{oc}$  και  $I = 0$ ) και  $R_{sho}$ . Τα δυο τελευταία συνήθως δεν διατίθενται από τους κατασκευαστές μπορούν όμως να υπολογιστούν, σε συνθήκες αναφοράς και για συγκεκριμένες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών, από τις σχέσεις:



$$R_{so} = 0.11175 \frac{V_{oc}}{I_{sc}}, R_{sho} = 34.49692 \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.57)$$

Τίθεται αρχική τιμή για το  $R_s$  ή  $R_{so}$ . Η τελευταία αντικαθίσταται στη σχέση:

$$n = \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s - V_{oc}}{T} \left[ \ln \left( \frac{(I_{sc} - I_{mp})R_{sho} - (V_{mp} + I_{mp}R_s)}{I_{sc}R_{sho} - V_{oc}} \right) \right]^{-1} \quad (3.58)$$

και αυτή με τη σειρά της στην εξίσωση:

$$I_0 = \frac{I_{sc} - V_{oc}/R_{sho}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{nT}\right) - 1} \quad (3.59)$$

Έπειτα οι (3.58), (3.59) αντικαθίστανται στην (3.60):

$$-\frac{\frac{I_0}{nT} \exp\left(\frac{V_{oc}}{nT}\right) + \frac{1}{R_{sho}}}{1 + R_s \left[ \frac{I_0}{nT} \exp\left(\frac{V_{oc}}{nT}\right) + \frac{1}{R_{sho}} \right]} = -\frac{1}{R_{so}} \quad (3.60)$$

και μεταβάλλεται η τιμή του  $R_s$  ωσότου το δεξί και το αριστερό μέλος της (3.60) συγκλίνουν. Με την τιμή αυτή των  $R_s$  υπολογίζεται εκ νέου το  $n$  από την (3.58). Με τη χρήση αυτών των  $R_s$  και  $n$  υπολογίζονται τα  $I_{01}, I_{02}$  από την (3.54).

Αντί της διαδικασίας αυτής επιλέχθηκε ο υπολογισμός των παραμέτρων  $R_s$ ,  $R_{sh}$  και  $K$  με τον τρόπο που αναφέρεται στην παράγραφο 3.4.2 για την ακριβέστερη προσομοίωση των πλαισίων που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.

# 4.

## ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ MATLAB

---

### 4.1 Υλοποίηση των μοντέλων για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με τη βοήθεια του MatLab

Για την υλοποίηση των μοντέλων και την προσομοίωση της λειτουργίας τους έγινε χρήση του εργαλείου MatLab. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση όλων των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο ήταν ως ένα σημαντικό βαθμό όμοια, μιας και οι παράμετροι που στοιχειοθετούσαν το κάθε μοντέλο και έπρεπε να υπολογιστούν ήταν κατά βάση οι ίδιοι και το διαφοροποιητικό στοιχείο τους ήταν ο ‘τρόπος’, ή η εξίσωση με την οποία γίνεται η εκτίμηση τους από το κάθε μοντέλο. Για κάθε μοντέλο δημιουργήθηκε ένα script στο περιβάλλον του MatLab. Το script αυτό περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους που αποτελούν το μοντέλο, αυτές που παρέχουν οι κατασκευαστές, αλλά υπολογίζει και αυτές που πρέπει με βάση τις αντίστοιχες εξισώσεις. Αφού υπολογιστούν όλες οι παράμετροι εφαρμόζεται στην χαρακτηριστική εξίσωση του κάθε μοντέλου η μέθοδος Newton-Raphson με την οποία γίνεται η

προσομοίωση της χαρακτηριστικής I-V από το μοντέλο για τις επιθυμητές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στο πλαίσιο.

## 4.2 Αρχικοποίηση των παραμέτρων που απαιτούνται από το κάθε μοντέλο

Κάθε μοντέλο έχει ως προαπαιτούμενο, έναν αριθμό παραμέτρων οι οποίες είναι σταθερές. Οι παράμετροι αυτοί ορίζονται και αρχικοποιούνται στην αρχή του script κάθε μοντέλου. Τέτοιες σταθερές αποτελούν τα στοιχεία που παρέχονται από τους κατασκευαστές πλαισίων, οι πρότυπες συνθήκες αναφοράς για τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία κλπ. Στον Πίνακα 4-1 φαίνονται οι παράμετροι που χρειάζεται να αρχικοποιηθούν στο κάθε μοντέλο.

Πίνακας 4-1 Σταθερές παράμετροι μοντέλων					
1 <sup>ο</sup> Μοντέλο	2 <sup>ο</sup> Μοντέλο	3 <sup>ο</sup> Μοντέλο	4 <sup>ο</sup> Μοντέλο	5 <sup>ο</sup> Μοντέλο	6 <sup>ο</sup> Μοντέλο
$V_{mp,ref}$	$V_{mp,ref}$	$V_{mp,ref}$	$V_{mp,ref}$	$V_{mp,ref}$	$V_{mp,ref}$
$I_{mp,ref}$	$I_{mp,ref}$	$I_{mp,ref}$	$I_{mp,ref}$	$I_{mp,ref}$	$I_{mp,ref}$
$I_{sc,ref}$	$I_{sc,ref}$	$I_{sc,ref}$	$I_{sc,ref}$	$I_{sc,ref}$	$I_{sc,ref}$
$V_{oc,ref}$	$V_{oc,ref}$	$V_{oc,ref}$	$V_{oc,ref}$	$V_{oc,ref}$	$V_{oc,ref}$
$G_{ref}$	$G_{ref}$	$G_{ref}$	$G_{ref}$	$G_{ref}$	$G_{ref}$
$T_{ref}$	$T_{ref}$	$T_{ref}$	$T_{ref}$	$T_{ref}$	$T_{ref}$
$\mu_{voc}$	$\mu_{voc}$	$q$	$\mu_{voc}$	$\mu_{voc}$	$\mu_{voc}$
$\mu_{isc}$	$q$	$k$	$\mu_{isc}$	$\mu_{isc}$	$\mu_{isc}$
$q$	$k$	-	$q$	-	-
$k$	$n$	-	$k$	-	-
$A$	$E_g$	-	$E_g$	-	-
$N_s$	$N_s$	-	$N_s$	-	-
$E_g$	-	-	-	-	-

### 4.3 Υπολογισμός των παραμέτρων που συνθέτουν την χαρακτηριστική I-V

Για την πλήρη σύνθεση της χαρακτηριστικής εξίσωσης, απαιτείται ο υπολογισμός μιας σειράς παραμέτρων, που διαφοροποιούνται από μοντέλο σε μοντέλο, από το σύστημα εξισώσεων που συγκροτούν το μοντέλο. Η μεταβλητότητα των συνιστωσών αυτών έγκειται στην εξάρτησή τους από τις τιμές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στις εξισώσεις κάθε μοντέλου στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

#### 4.3.1 Παράμετροι που υπολογίζονται από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο

Οι παράμετροι που πρέπει να υπολογίσει το μοντέλο με τα δεδομένα του Πίνακα 4-1 είναι οι  $\gamma$ ,  $I_{0,ref}$ ,  $I_{L,ref}$ ,  $I_0$ ,  $I_D$ ,  $I_L$ . Στο script του πρώτου μοντέλου εισάγονται οι εξισώσεις (3.2) – (3.7), όπως φαίνονται στην παράγραφο 3.2.1, ως εξής:

- Μέσω της (3.7) υπολογίζεται το  $\gamma$ ,
- Με γνωστό το  $\gamma$ , μέσω της (3.6) υπολογίζεται το  $I_{0,ref}$ ,
- Στο  $I_{L,ref}$  ανατίθεται μέσω της (3.5) η τιμή του  $I_{sc,ref}$ ,
- Έχοντας γνωστό το  $I_{0,ref}$ , μέσω της (3.4) υπολογίζεται το  $I_0$ ,
- Με την (3.3) υπολογίζεται το  $I_D$ ,
- Με την (3.2) υπολογίζεται το  $I_L$ .

#### 4.3.2 Παράμετροι που υπολογίζονται από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο

Οι παράμετροι που υπολογίζονται στο αντίστοιχο script για το δεύτερο μοντέλο με δεδομένα αυτά του Πίνακα 4-1 είναι οι εξής:

- Με γνωστές τις  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,
- Με τη βοήθεια των παραμέτρων αυτών και την (3.20) υπολογίζεται το  $n$ ,
- Κατόπιν υπολογίζεται το  $I_{0,ref}$  από την (3.21),
- Από την (3.18) καθορίζονται οι τιμές των  $E_{g,ref}$ ,  $E_g$ ,
- Η τιμή του  $I_0$  υπολογίζεται από την (3.17),
- Η τιμή του  $I_L$  υπολογίζεται από την (3.14) .

Οι εξισώσεις που περιλαμβάνει το script αυτό εξηγούνται στην παράγραφο 3.2.2.

### 4.3.3 Παράμετροι που υπολογίζονται από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο

Για το τρίτο μοντέλο ανατίθενται τιμές στις παραμέτρους  $\alpha, \beta, I_{ph}, R_s$  όπως εξηγείται στην παράγραφο 3.2.3. Με δεδομένα αυτά και τις σταθερές του Πίνακα 4-1, στο script υπολογίζονται τα εξής:

- η παράμετρος  $C_1$  από την (3.23),
- η παράμετρος  $C_2$  από την (3.22) και
- η παράμετρος  $I_0$  από την (3.24).

### 4.3.4 Παράμετροι που υπολογίζονται από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων που συνθέτουν τη χαρακτηριστική του τέταρτου μοντέλου ( $I_L, I_0, a, R_s$ ), το σύστημα εξισώσεων, που περιγράφεται στην παράγραφο 3.3, εισάγεται στο αντίστοιχο script, το οποίο πραγματοποιεί τους εξής υπολογισμούς:

- Το  $I_{L_{ref}}$  εξάγεται από την (3.27),
- Με το  $I_{L_{ref}}$  γνωστό, το  $a_{ref}$  εξάγεται από την (3.28),
- Το  $I_{0_{ref}}$ , με τη βοήθεια των δυο προηγούμενων παραμέτρων, προκύπτει από την (3.29),
- Με γνωστά τα  $I_{L_{ref}}$  και  $a_{ref}$ , επίσης προκύπτει το  $R_{s_{ref}}$  από την (3.30),
- Με τη βοήθεια της (3.34) υπολογίζεται το  $a$ ,
- Από την (3.31) με τη βοήθεια του  $I_{L_{ref}}$  υπολογίζεται η τιμή του  $I_L$ ,
- Από την (3.32) με γνωστά τα  $a, I_{0_{ref}}$  προκύπτει το  $I_0$ ,
- Από την (3.33) υπολογίζεται το  $R_s$ .

### 4.3.5 Παράμετροι που υπολογίζονται από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο

Μετά τον καθορισμό τιμών για τις παραμέτρους  $R_s, R_{sh}, K$ , μέσω των διαδικασιών που περιγράφονται στην παράγραφο 3.4.1, γίνεται επεξεργασία του συστήματος εξισώσεων που εισάγεται στο script ως εξής:

- Υπολογισμός του  $n$  από την (3.42),
- Υπολογισμός του  $I_L$  από την (3.36),
- Υπολογισμός του  $I_0$  από την (3.37),
- Υπολογισμός του  $V_{oc}$  από την (3.38).

#### 4.3.6 Παράμετροι που υπολογίζονται από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο

Αφού προσδιοριστούν οι παράμετροι  $R_s, R_{sh}, K$  με τις διαδικασίες που περιγράφονται στην παράγραφο 3.4.2, γίνεται επεξεργασία του συστήματος εξισώσεων που εισάγεται στο script σύμφωνα με τα ακόλουθα:

- Υπολογισμός του  $n$  από την (3.58),
- Υπολογισμός του  $I_L$  από την (3.53),
- Υπολογισμός του  $I_0$  από την (3.56),
- Υπολογισμός του  $V_{oc}$  από την (3.55).

### 4.4 Η μέθοδος Newton-Raphson

Με τον καθορισμό όλων των παραμέτρων που απαιτούνται από κάθε μοντέλο, μπορεί να προσομοιωθεί, με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής εξίσωσης καθενός από τα έξι μοντέλα, η χαρακτηριστική καμπύλη I-V. Η σχέση μεταξύ τάσεως και ρεύματος, όπως φαίνεται στις χαρακτηριστικές εξισώσεις του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου, δεν είναι γραμμική. Το ρεύμα εμφανίζεται και στα δυο σκέλη των χαρακτηριστικών εξισώσεων. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης στην παρούσα εργασία είναι η μέθοδος Newton-Raphson.

Η μέθοδος Newton-Raphson αποτελεί μια μέθοδο διαδοχικών προσεγγίσεων για τον υπολογισμό ριζών μιας πραγματικής συνάρτησης. Η μέθοδος συγκλίνει ικανοποιητικά γρήγορα, αν η επαναληπτική διαδικασία ξεκινήσει κατά το δυνατό πλησιέστερα στη λύση που αναζητείται. .

Η μέθοδος αυτή εκτυλίσσεται βάσει της ακόλουθης διαδικασίας:

με δεδομένη μια συνάρτηση  $f(x)$  και την παράγωγό της  $f'(x)$ , ξεκινώντας από μια τυχαία πρώτη προσέγγιση της ρίζας  $x_0$ , μια καλύτερη προσέγγιση  $x_1$  είναι η  $x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$ .

Η γενική αναδρομική σχέση της μεθόδου είναι  $x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$ , όπου  $x_{n+1}$  η προσεγγιστική τιμή της ρίζας μετά από  $n + 1$  επαναλήψεις. Όσο πλησιέστερα στη ζητούμενη λύση ξεκινά η πρώτη προσέγγιση της ρίζας  $x_0$ , τόσο γρηγορότερα θα συγκλίνει η μέθοδος [6].

#### 4.4.1 Χρήση της μεθόδου Newton-Raphson στα μοντέλα φωτοβολταϊκών στοιχείων

Κάθε μοντέλο καταλήγει στην χαρακτηριστική εξίσωση τάσεως-ρεύματος. Αυτή αποτελεί τη δεδομένη συνάρτηση που απαιτεί η μέθοδος Newton-Raphson. Το πεδίο ορισμού της τάσης εκτείνεται από το 0, στην περίπτωση βραχυκυκλώματος, ως την τιμή της τάσης ανοικτοκύκλωσης, η οποία είναι δεδομένη σε συνθήκες αναφοράς. Για κάθε τιμή της τάσης, το ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά, με τη βοήθεια της μεθόδου, ως εξής:

1. Η τάση αρχικοποιείται στην τιμή μηδέν, τιμή κατά την οποία το ρεύμα έχει τη μέγιστη τιμή του, αυτή του ρεύματος βραχυκυκλώματος ( $I_{SC}$ ). Το ρεύμα βραχυκυκλώματος σε συνθήκες αναφοράς που παρέχουν οι κατασκευαστές είναι και η τιμή εκκίνησης της μεθόδου για να υπολογίσει το  $I_{SC}$  για τις εκάστοτε συνθήκες προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.
2. Η τάση αυξάνεται σταδιακά μέχρι να επιτευχθεί ο μηδενισμός της τιμής του ρεύματος, οπότε η τάση θα έχει τη μέγιστη τιμή της, αυτή της τάσης ανοικτοκύκλωσης ( $V_{oc}$ ).
3. Θεωρούμε την χαρακτηριστική εξίσωση τάσης-ρεύματος ως τη δεδομένη συνάρτηση  $F(I)$ , που απαιτείται από τη μέθοδο, με άγνωστο το ρεύμα. Παραγωγίζοντας τη συνάρτηση αυτή ως προς το ρεύμα, έχουμε την  $F_d(I)$ . Η διαδικασία εκκινεί με αρχική τιμή για το ρεύμα το  $I_{sc0}$  που παραθέτουν οι κατασκευαστές. Μια καλύτερη προσέγγιση του  $I_{SC}$  για τις συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που επιθυμούμε είναι η:

$$I_{sc1} = I_{sc0} - \frac{F(I_{sc0})}{F_d(I_{sc0})}.$$

Ελέγχουμε το απόλυτο % σχετικό σφάλμα μεταξύ των τιμών  $I_{sc1}$  και  $I_{sc0}$ . Αν αυτό είναι μικρότερο ή ίσο του 0,01 κρατούμε το  $I_{sc1}$  ως ρίζα, αλλιώς επαναλαμβάνουμε n φορές,

$$I_{sc_{n+1}} = I_{sc_n} - \frac{F(I_{sc_n})}{F_d(I_{sc_n})},$$

μέχρι το απόλυτο % σχετικό σφάλμα των  $I_{sc_n}$  και  $I_{sc_{n+1}}$  να γίνει μικρότερο ίσο του 0,01.

4. Η τάση αυξάνεται κατά 0,01 V. Η τιμή για το ρεύμα βραχυκυκλώματος που έχει υπολογιστεί προηγουμένως αποτελεί την αρχική τιμή για τον υπολογισμό του ρεύματος για την νέα τιμή της τάσης.
5. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον υπολογισμό κάθε τιμής του ρεύματος για κάθε τιμή της τάσης. Αν το ρεύμα μηδενιστεί σημαίνει πως για τις συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που προσομοιώνουμε, έχουμε ολοκληρώσει την χαρακτηριστική καμπύλη και επομένως αποθηκεύουμε την συγκεκριμένη τιμή που έχει η τάση για μηδενικό ρεύμα ως τάση ανοικτοκύκλωσης και τερματίζουμε τη διαδικασία.

## 4.5 Έλεγχος των μοντέλων ως προς την προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V και P-V

Αρχικά για να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του κάθε script, προσομοιώθηκε η λειτουργία των εμπορικά διαθέσιμων φωτοβολταϊκών πλαισίων ST 5 και ET-M53605 με βάση τις χαρακτηριστικές καμπύλες που παραθέτουν οι κατασκευαστές. Οι αποκλίσεις που παρουσίασαν τα μοντέλα ήταν μικρότερες του 1 %. Ωστόσο οι κατασκευαστές παραθέτουν χαρακτηριστικές καμπύλες μόνο για θερμοκρασία ημιαγωγού στους 25 °C, ή NOCT, και όχι για περισσότερες από δυο ή τρεις τιμές ακτινοβολίας – και αυτές όχι μικρότερες των 600 W/m<sup>2</sup>. Για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα προσομοιώθηκε η λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων για ακτινοβολίες 100 - 1000 W/m<sup>2</sup> με βήμα 200 W/m<sup>2</sup> και για θερμοκρασίες -10 – 50 °C με βήμα 10 °C. Σκόπιμο ήταν να εξακριβωθεί η δυνατότητα του κάθε μοντέλου να υπολογίσει τις χαρακτηριστικές καμπύλες του πλαισίου του οποίου τη λειτουργία προορίζεται να προσομοιώσει.

Τη λειτουργία του πλαισίου ET-M53605 μπορούν να προσομοιώσουν το 1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup>, 5<sup>ο</sup> και το 6<sup>ο</sup> μοντέλο, ενώ του ST 5 τα μοντέλα 1, 2, 3 και 4. Ο υπολογισμός των παραμέτρων για κάθε μοντέλο και η προσομοίωση έγινε με βάση τον τρόπο που περιγράφεται παραπάνω. Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές I-V και P-V, για τις παραπάνω τιμές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.

Για κάθε μοντέλο προσομοίωσης οι τιμές των αντιστάσεων (σειριακών και παράλληλων όπου υπάρχουν) υπολογίστηκαν με βάση τις τιμές ρεύματος και τάσης που παρατίθενται από τους κατασκευαστές σε STC:

- Για τα μοντέλα που προσομοιώνουν τη λειτουργία του ST 5: Για το 1<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> μοντέλο που περιλαμβάνουν μόνο σειριακή αντίσταση, ο υπολογισμός της έγινε με χρήση της χαρακτηριστικής εξίσωσης στο σημείο μέγιστης ισχύος. Για το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, που περιλαμβάνει και παράλληλη αντίσταση, με χρήση της χαρακτηριστικής στο σημείο μέγιστης ισχύος και στο σημείο βραχυκυκλώματος, λύθηκε σύστημα δυο εξισώσεων.
- Για τα μοντέλα που προσομοιώνουν τη λειτουργία του ET-M53605: Για το 1<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> μοντέλο η σειριακή αντίσταση υπολογίστηκε από την χαρακτηριστική στο σημείο μέγιστης ισχύος, ενώ για το 2<sup>ο</sup>, 5<sup>ο</sup> και 6<sup>ο</sup> μοντέλο οι αντιστάσεις υπολογίστηκαν από σύστημα εξισώσεων, με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής, στο σημείο μέγιστης ισχύος και στο σημείο βραχυκυκλώματος.

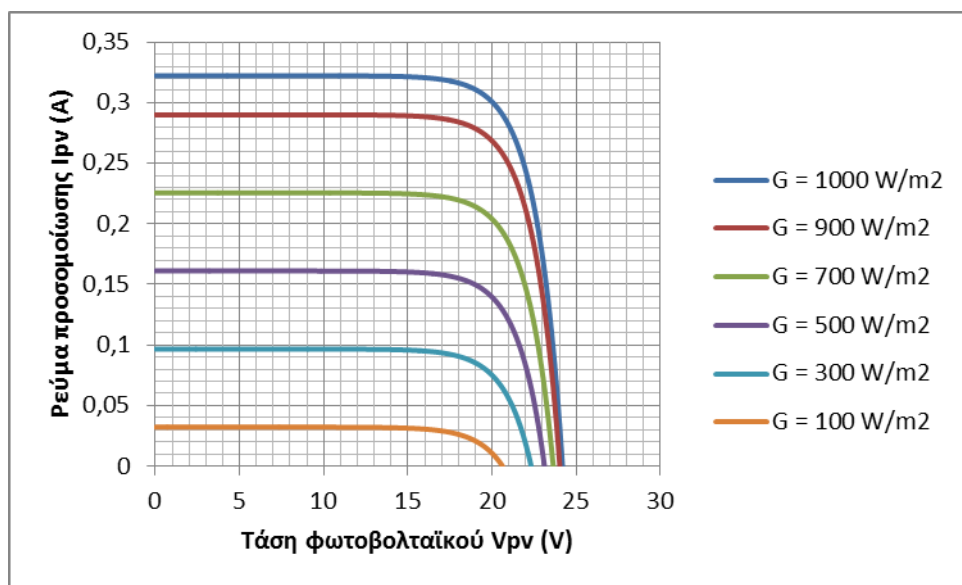


- Για το 5<sup>ο</sup> και το 6<sup>ο</sup> μοντέλο εκτός των αντιστάσεων απαιτείται και ο υπολογισμός της παραμέτρου  $K$ . Ως εκ τούτου, λύνεται σύστημα τριών εξισώσεων με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής και στο σημείο ανοικτοκυκλώματος.

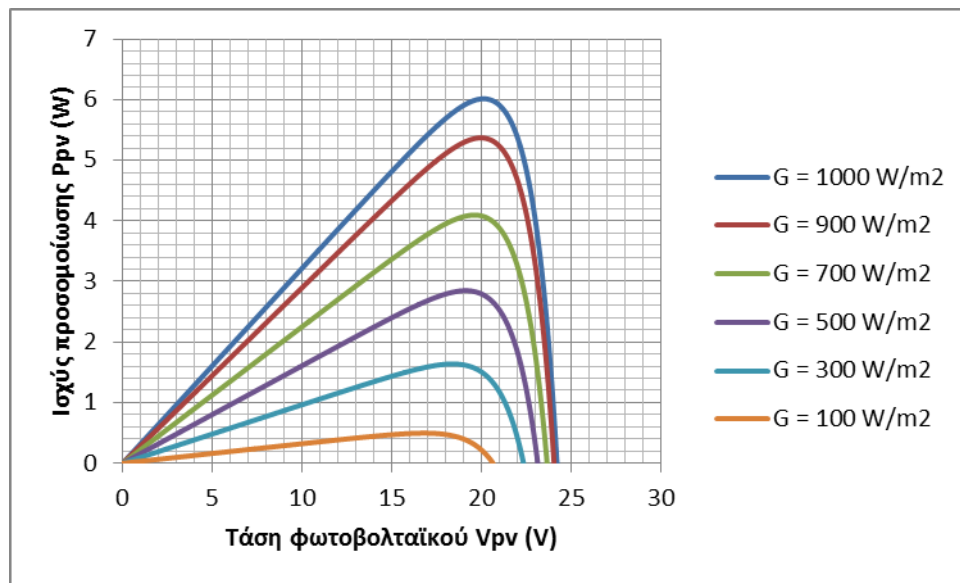
Η διαδικασία αυτή έγινε για την ακριβέστερη προσομοίωση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και για να γίνει εφικτή η σύγκριση των μοντέλων προσομοίωσης μεταξύ τους.

#### 4.5.1 Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο

Για το 1<sup>ο</sup> μοντέλο, για θερμοκρασία  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και τιμές ακτινοβολίας  $100 - 1000\text{ W/m}^2$ , τα αποτελέσματα της προσομοίωσης λειτουργίας του πλαισίου ET-M53605 φαίνονται στα Σχήματα 4-1 και 4-2. Στο Σχήμα 4-1 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για τις αντίστοιχες τιμές ακτινοβολίας, ενώ στο Σχήμα 4-2 οι χαρακτηριστικές καμπύλες P-V.

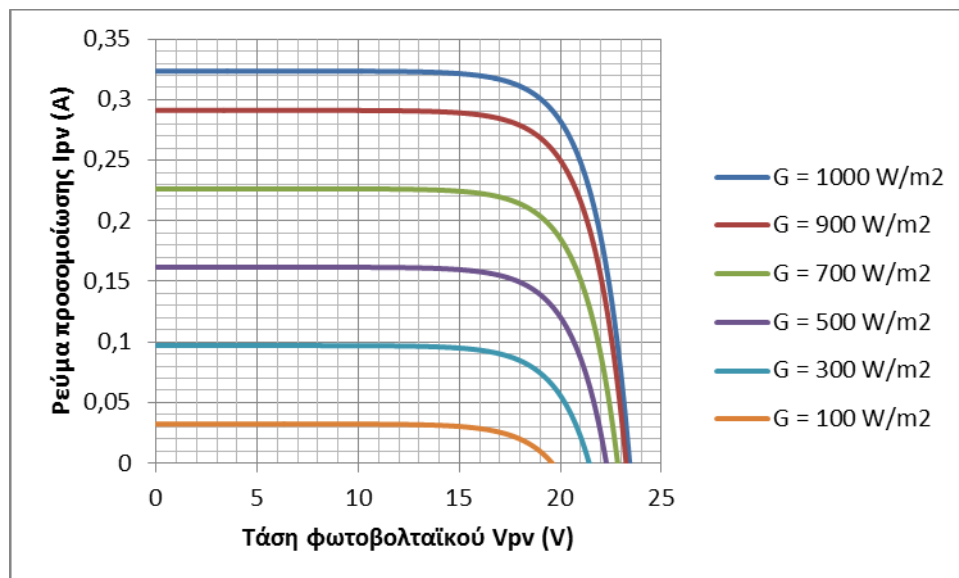


Σχήμα 4-1. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από  $100$  έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

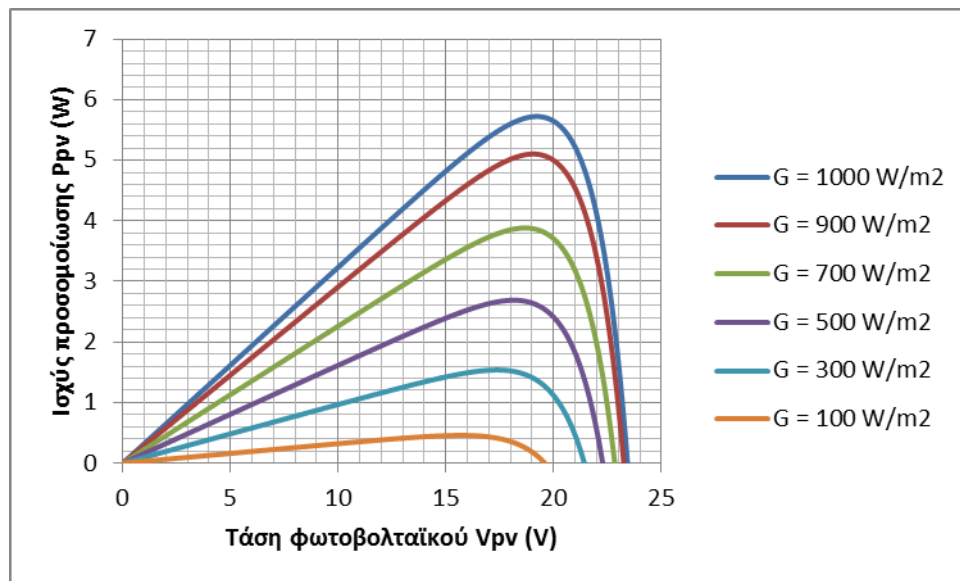


Σχήμα 4-2. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το  $I^0$  μοντέλο για  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  η προσομοίωση του ίδιου πλαισίου από το  $I^0$  μοντέλο και για τις ίδιες τιμές ακτινοβολίας φαίνεται στα Σχήματα 4-3 και 4-4, όπου απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές I-V και P-V αντίστοιχα.

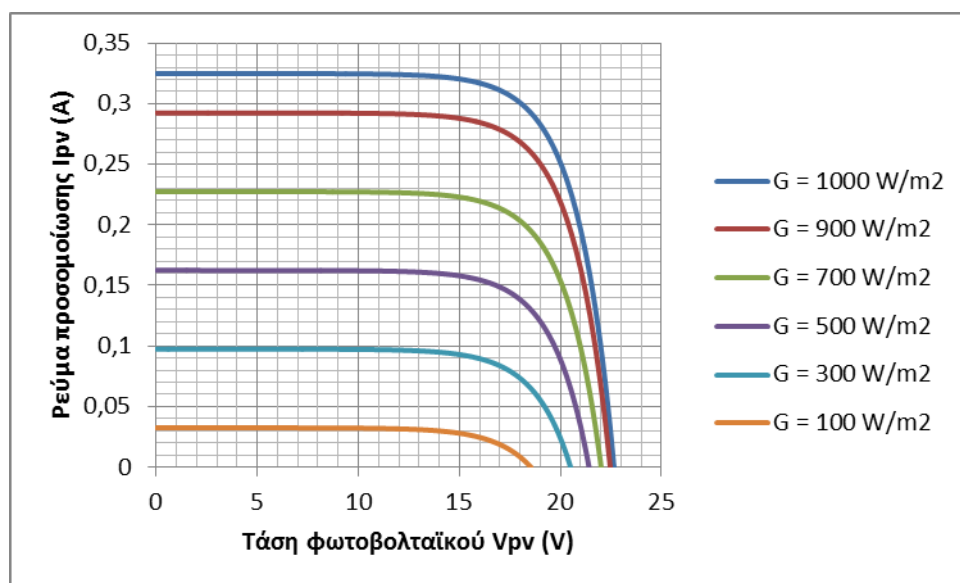


Σχήμα 4-3. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το  $I^0$  μοντέλο για  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

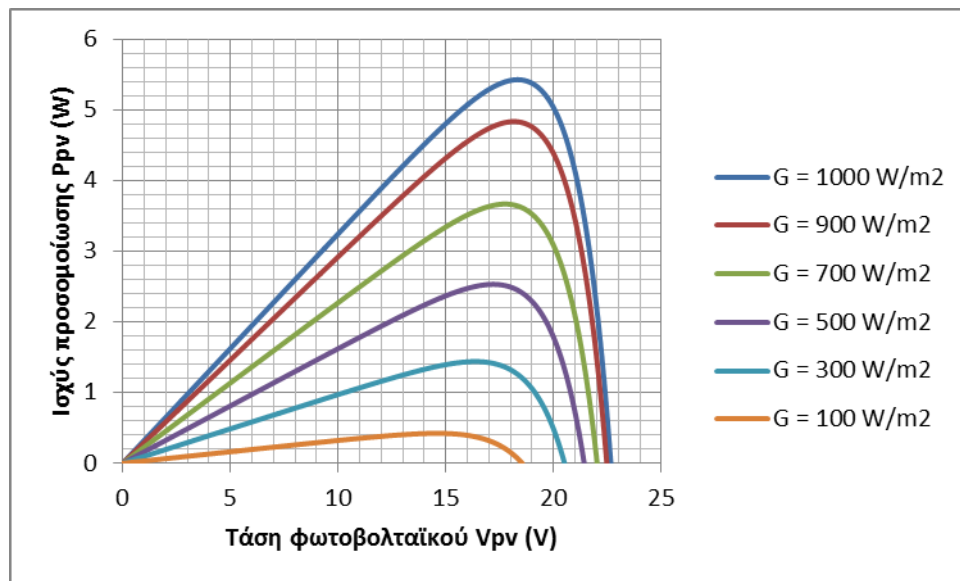


Σχήμα 4-4. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $10^{\circ}\text{C}$  οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που υπολογίζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το ET-M53605 φαίνονται στα Σχήματα 4-5 και 4-6 αντίστοιχως.

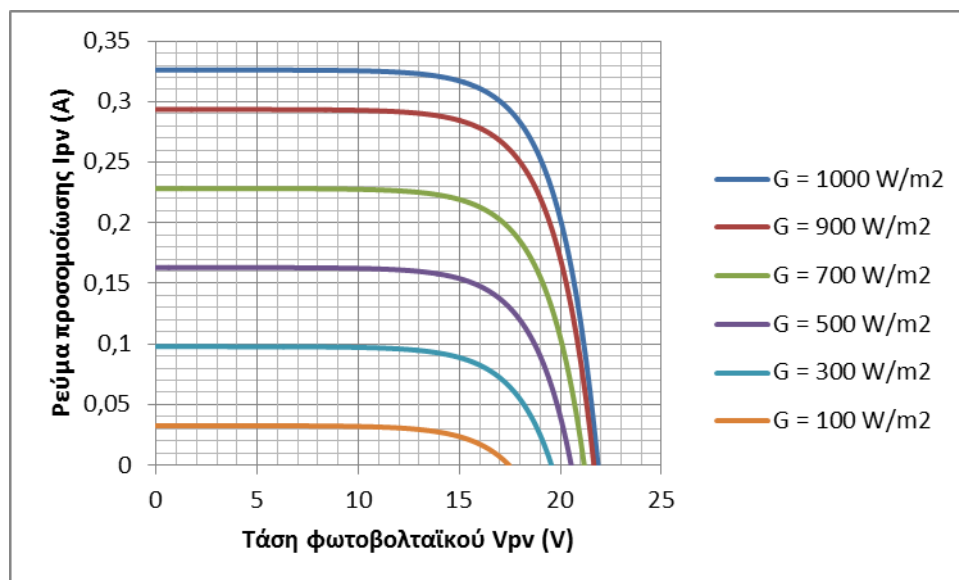


Σχήμα 4-5. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

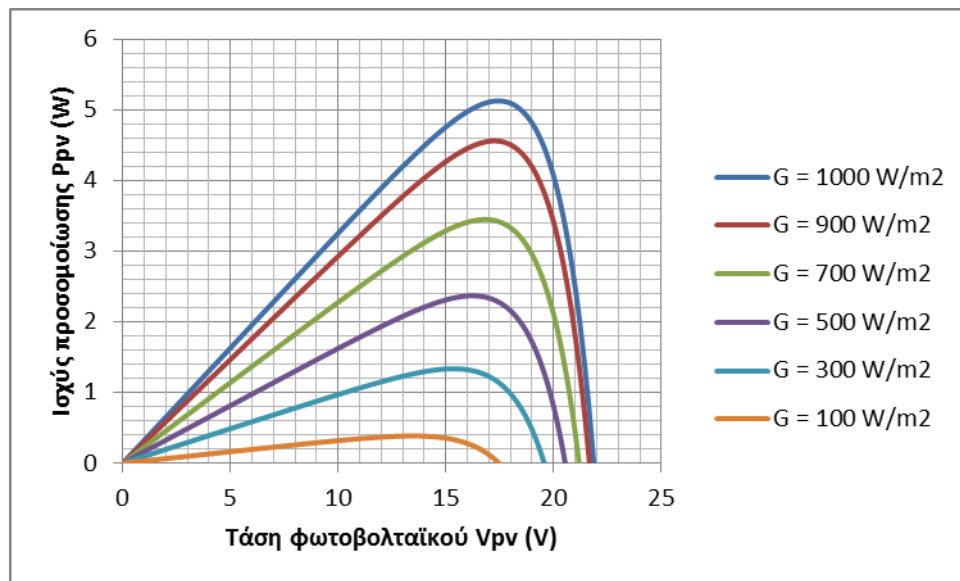


Σχήμα 4-6. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V, που υπολογίζονται από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το πλαίσιο ET-M53605 με τιμή θερμοκρασίας  $20^{\circ}\text{C}$  και ακτινοβολία 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ , απεικονίζονται στα Σχήματα 4-7 και 4-8 αντίστοιχα.

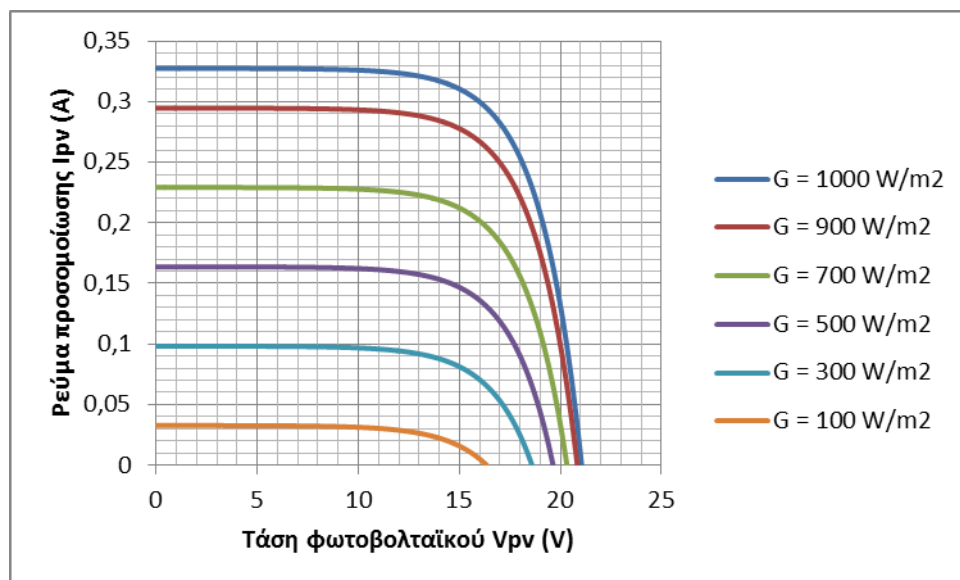


Σχήμα 4-7. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

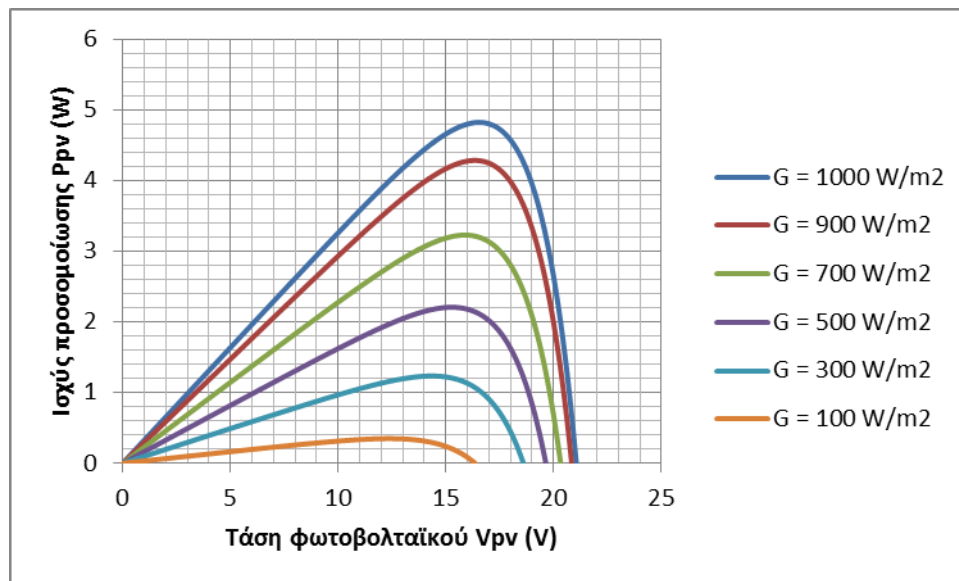


Σχήμα 4-8. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στο Σχήμα 4-9 φαίνονται οι χαρακτηριστικές I-V του ET-M53605 όπως υπολογίζονται από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για θερμοκρασία  $30^{\circ}\text{C}$  και ακτινοβολία 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ . Η χαρακτηριστικές για την ισχύ σε αυτές τις συνθήκες φαίνονται στο Σχήμα 4-10.

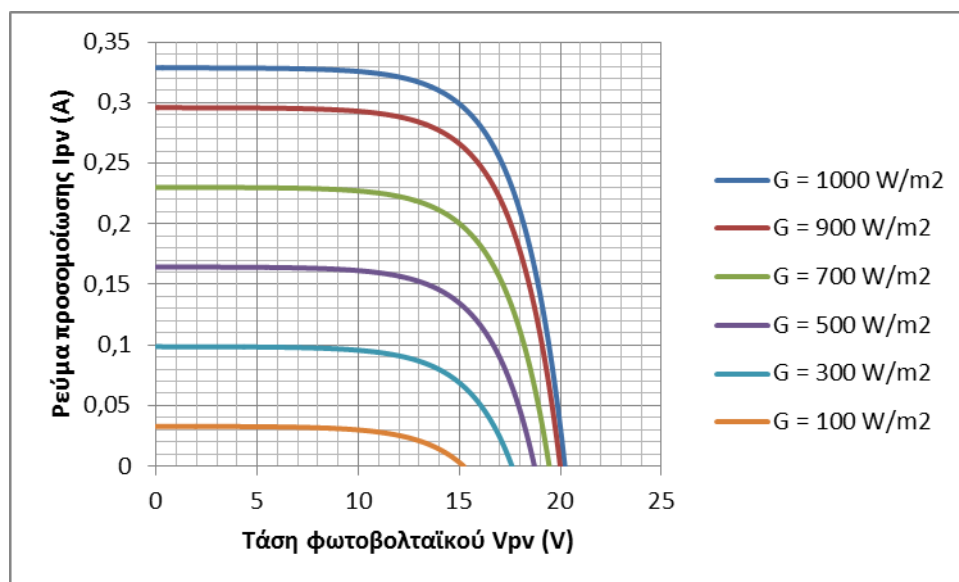


Σχήμα 4-9. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

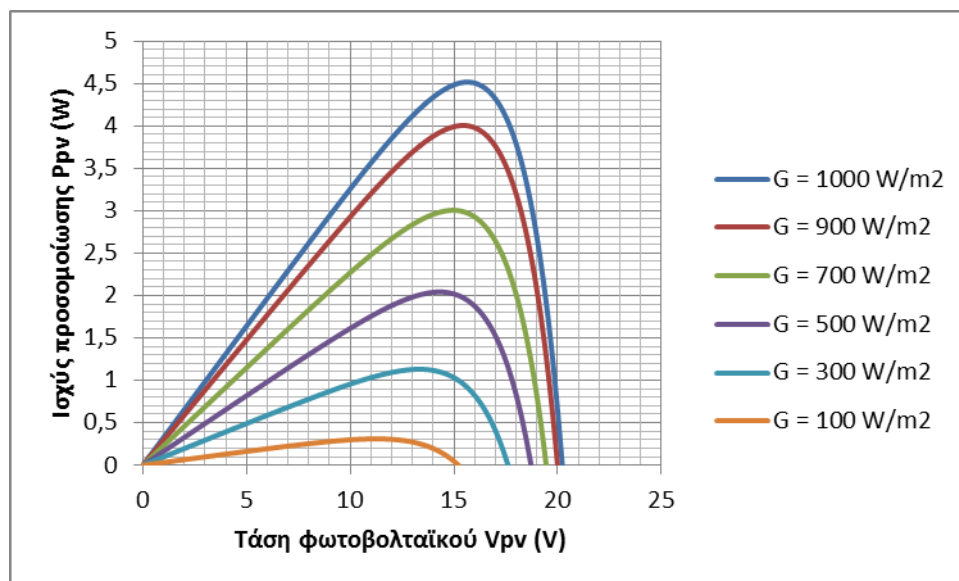


Σχήμα 4-10. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στο Σχήμα 4-11 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές I-V του ET-M53605 όπως υπολογίζονται από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για θερμοκρασία  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και ακτινοβολία 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ . Η χαρακτηριστικές για την ισχύ σε αυτές τις συνθήκες απεικονίζονται στο Σχήμα 4-12.

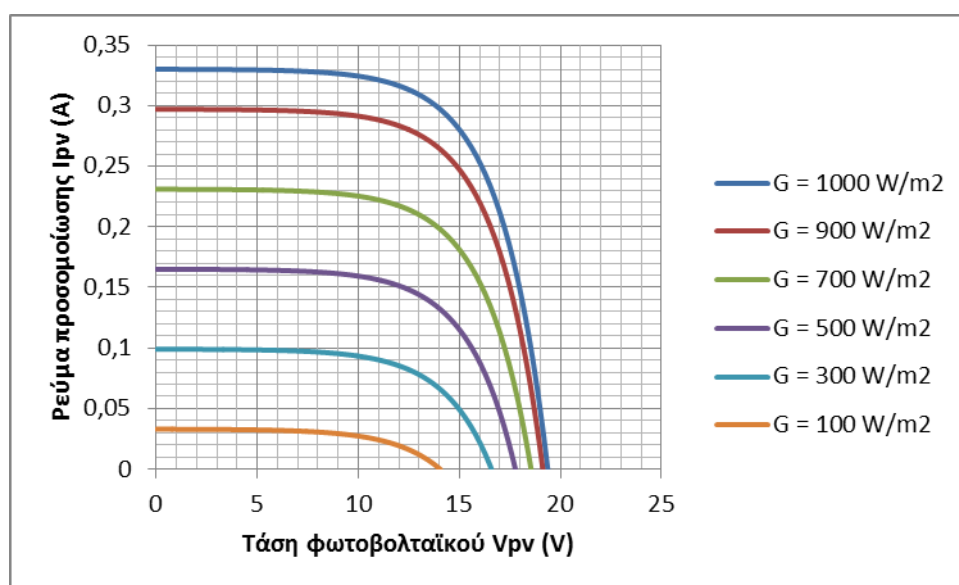


Σχήμα 4-11. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

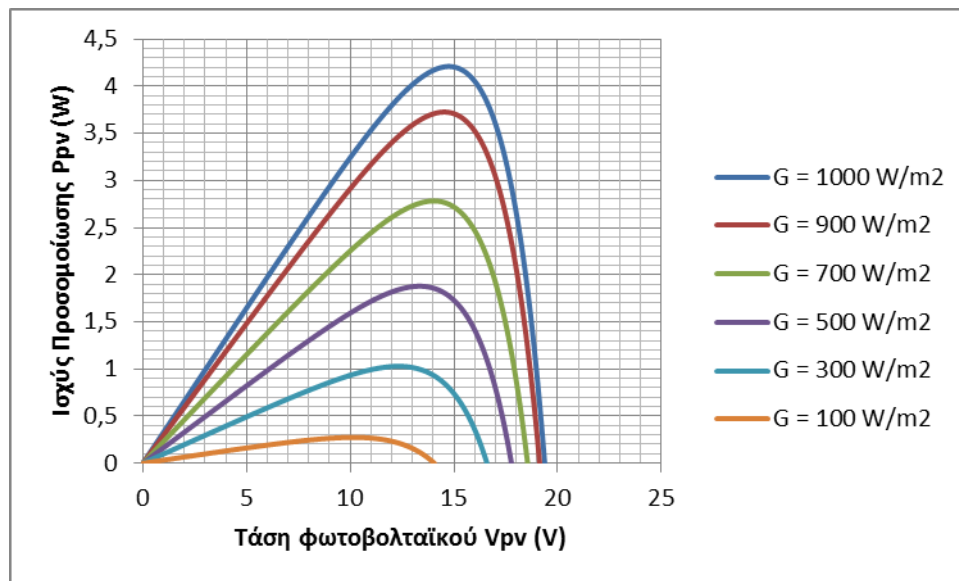


Σχήμα 4-12. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το  $I^0$  μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Τα Σχήματα 4-13 και 4-14 δείχνουν τις προσομοιώσεις των χαρακτηριστικών I-V, P-V αντίστοιχα, του  $I^0$  μοντέλου για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

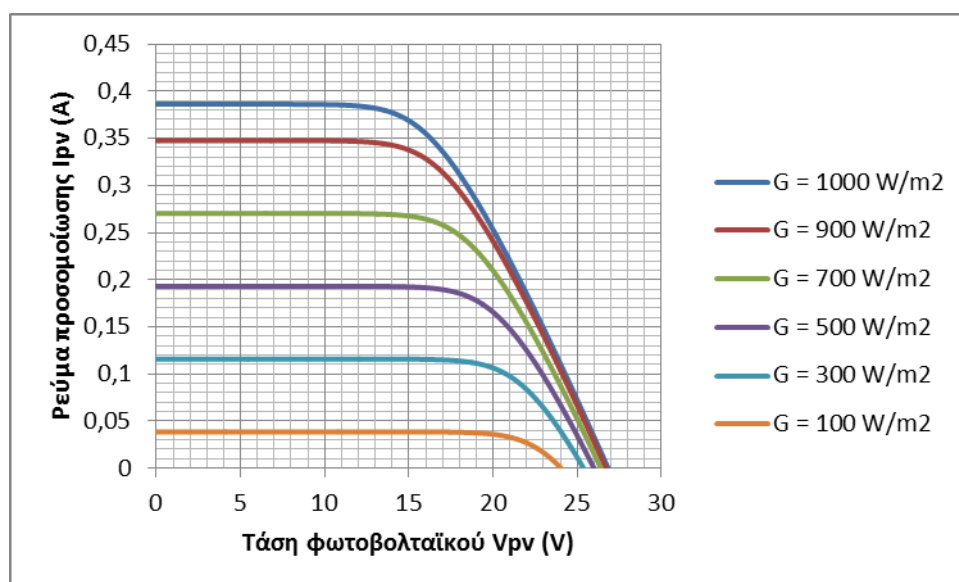


Σχήμα 4-13. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το  $I^0$  μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



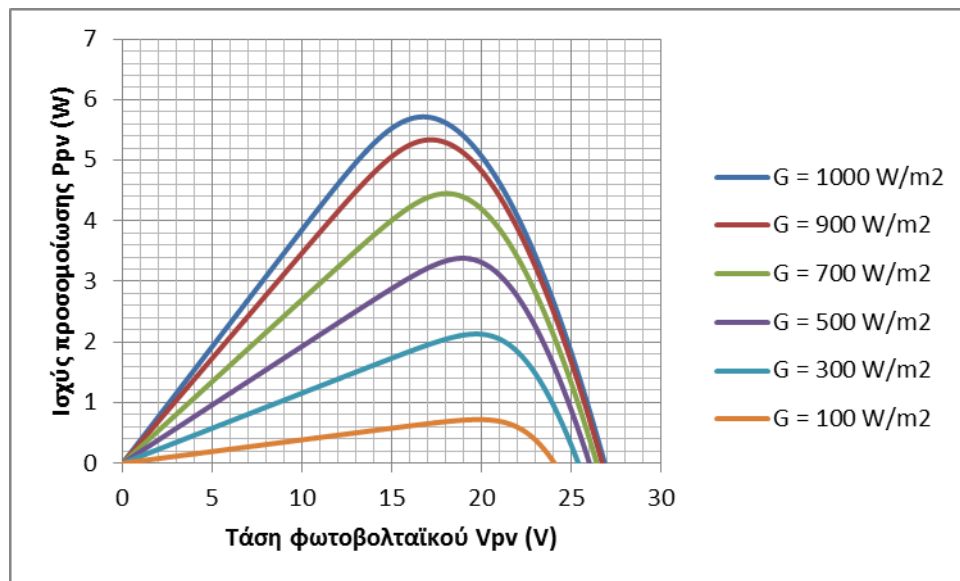
Σχήμα 4-14. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Το πρώτο μοντέλο χρησιμοποιείται και για την προσομοίωση της λειτουργίας του πλαισίου ST 5 Προσομοιώθηκε η λειτουργία για τιμές θερμοκρασίας από  $-10$  έως  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Για κάθε τιμή της θερμοκρασίας προσομοιώθηκαν οι χαρακτηριστικές I-V και P-V για τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ . Τα Σχήματα 4-15 και 4-16 απεικονίζουν τις προσομοιώσεις αυτές για  $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



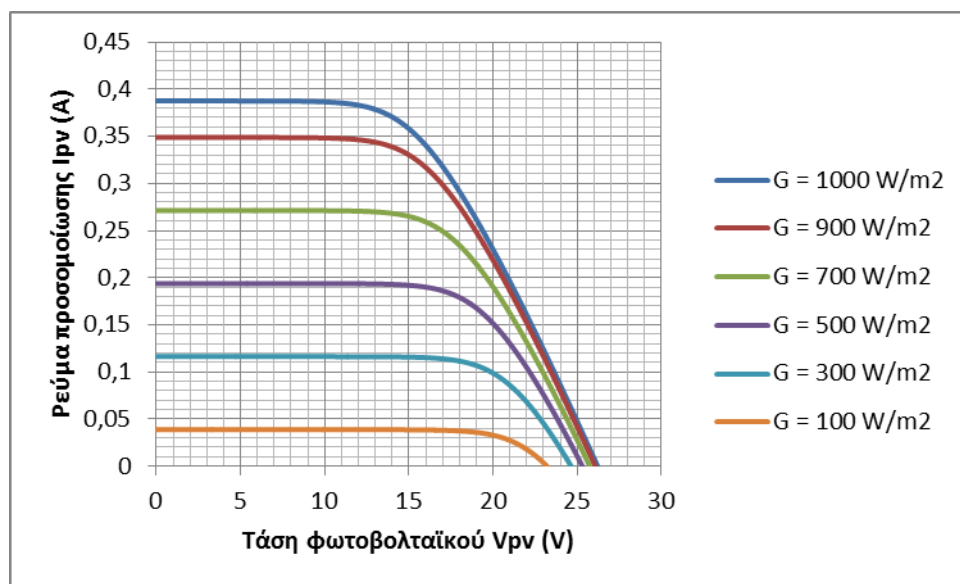
Σχήμα 4-15. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



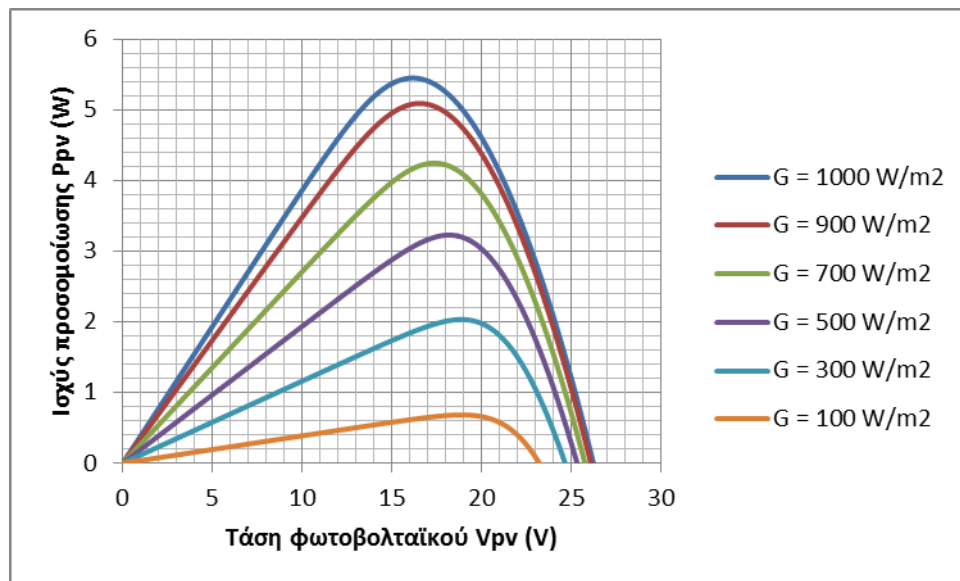


Σχήμα 4-16. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Για θερμοκρασία στους  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , οι προσομοιώσεις I-V και P-V, του 1<sup>ου</sup> μοντέλου για το ST 5, φαίνονται αντίστοιχα στα Σχήματα 4-17, 4-18 για ακτινοβολίες 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

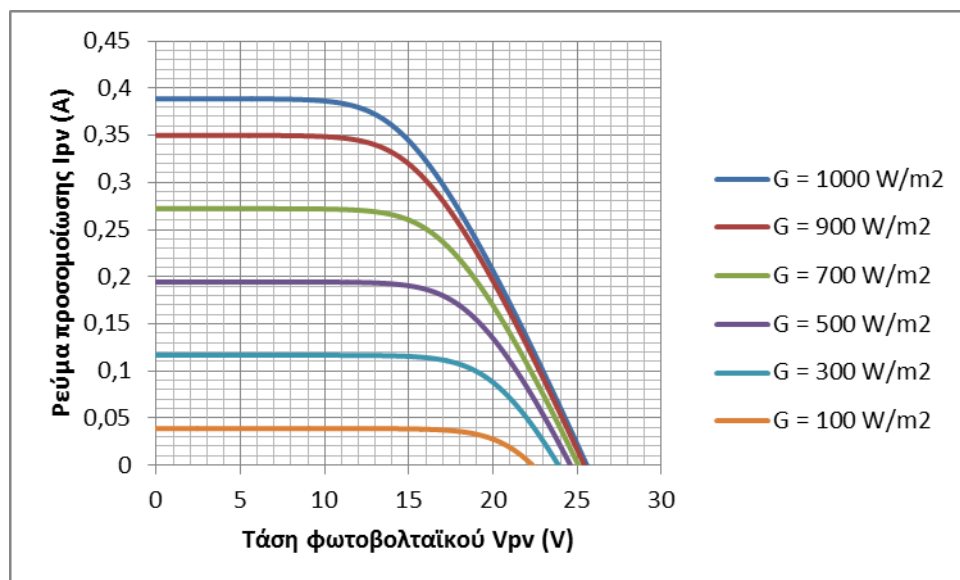


Σχήμα 4-17. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

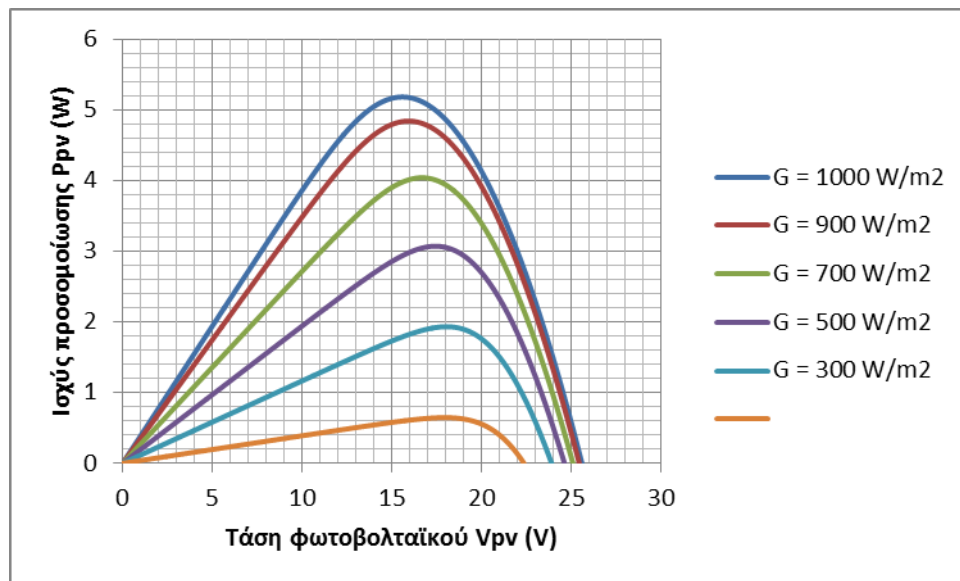


Σχήμα 4-18. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το  $I^0$  μοντέλο για  $T=0^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V που υπολογίζει το μοντέλο αυτό για το ST 5 για συνθήκες  $T=10^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  απεικονίζονται στο Σχήμα 4-19. Οι χαρακτηριστικές P-V του μοντέλου αυτού για τις ίδιες συνθήκες φαίνονται στο Σχήμα 4-20.

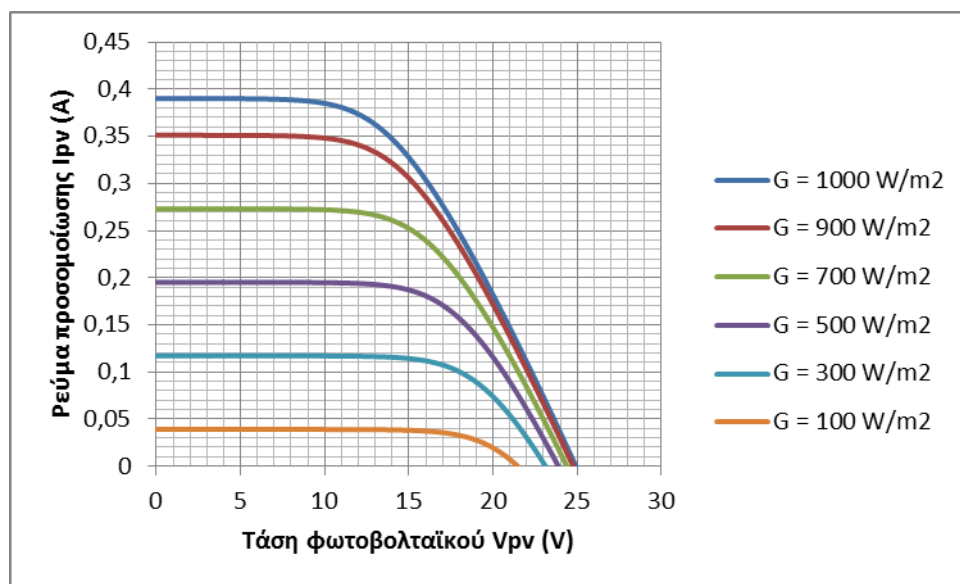


Σχήμα 4-19. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το  $I^0$  μοντέλο για  $T=10^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

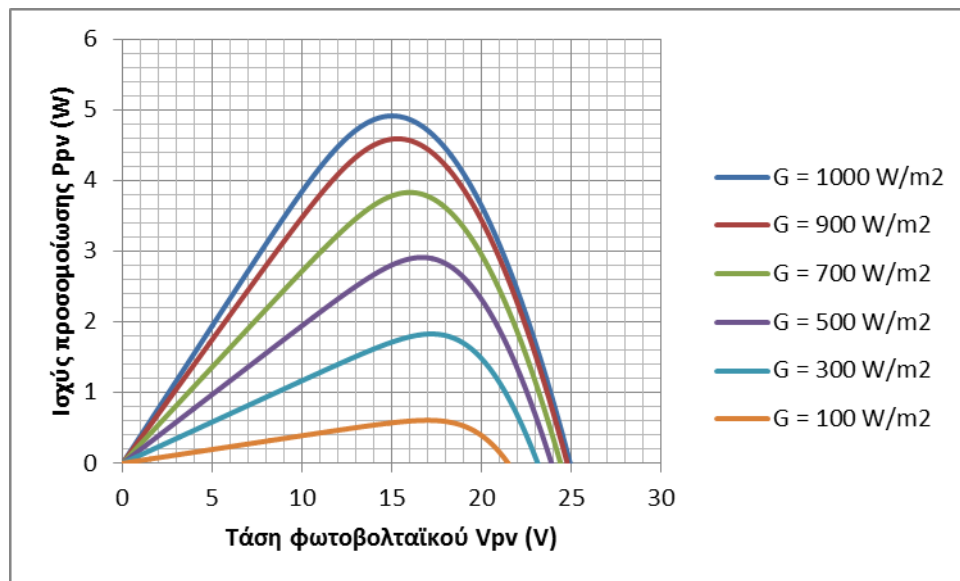


Σχήμα 4-20. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το  $I^0$  μοντέλο για  $T=10^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Για  $T=20^\circ\text{C}$  οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που μας δίνει το  $I^0$  μοντέλο για  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  αποτυπώνονται αντίστοιχα στα Σχήματα 4-21 και 4-22.

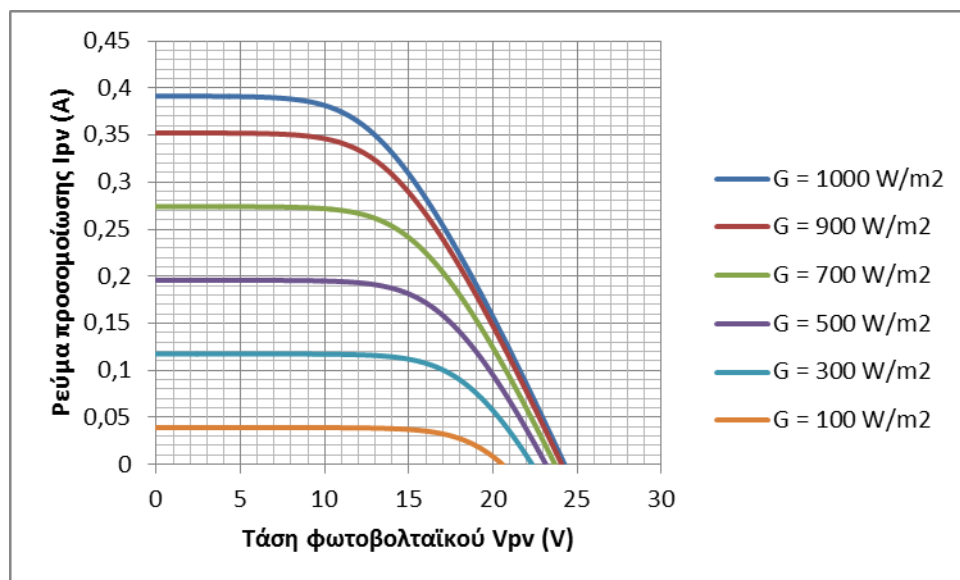


Σχήμα 4-21. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το  $I^0$  μοντέλο για  $T=20^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

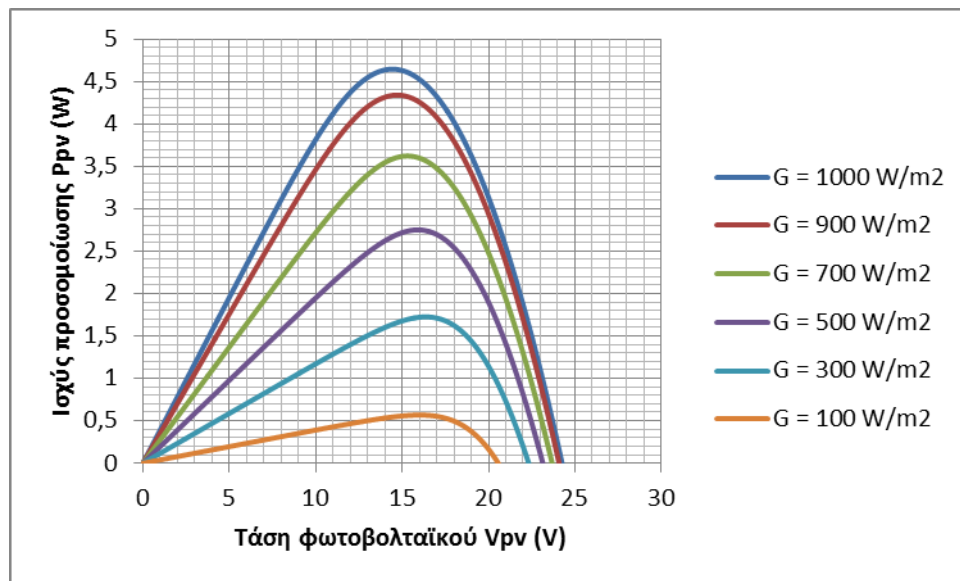


Σχήμα 4-22. Χαρακτηριστικές  $P$ - $V$  για το ST 5 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Τα Σχήματα 4-23 και 4-24 απεικονίζουν τις χαρακτηριστικές ρεύματος και ισχύος για το ST 5 αντίστοιχα, όπως υπολογίζονται από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για τιμή θερμοκρασίας  $30^\circ\text{C}$  και τιμές ακτινοβολίας 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

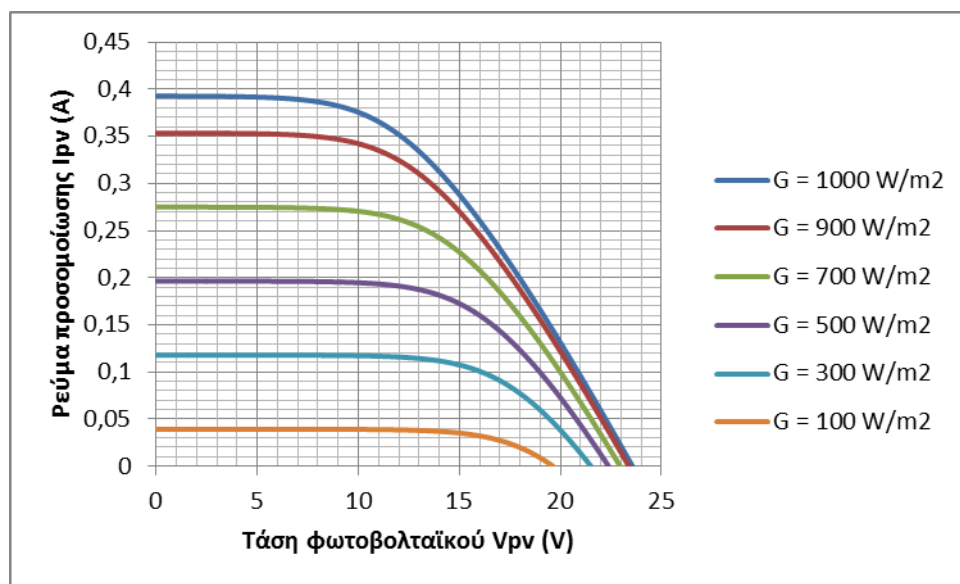


Σχήμα 4-23. Χαρακτηριστικές  $I$ - $V$  για το ST 5 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

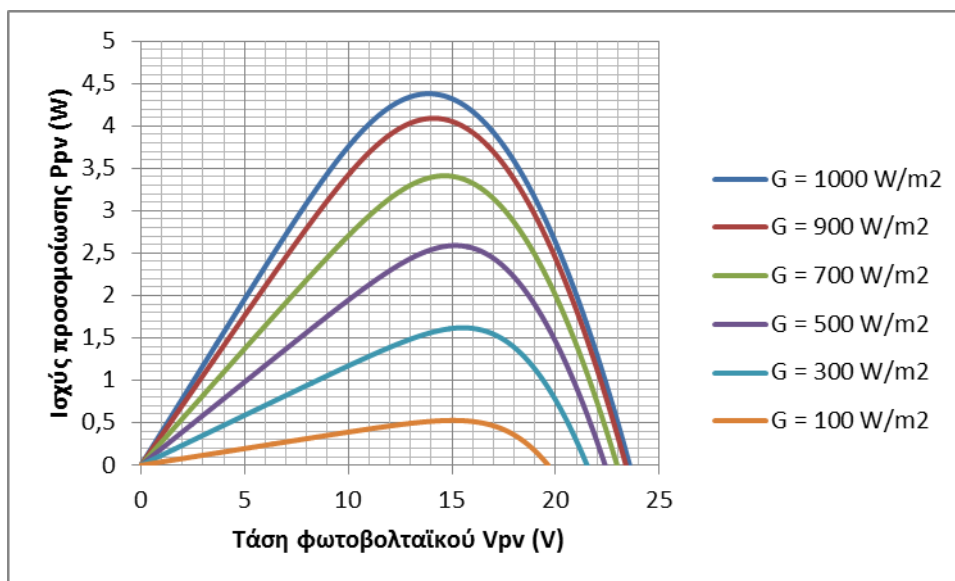


Σχήμα 4-24. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , το 1<sup>ο</sup> μοντέλο υπολογίζει τις χαρακτηριστικές ρεύματος και ισχύος για το ST 5 και για  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  όπως φαίνεται στα Σχήματα 4-25 και 4-26.

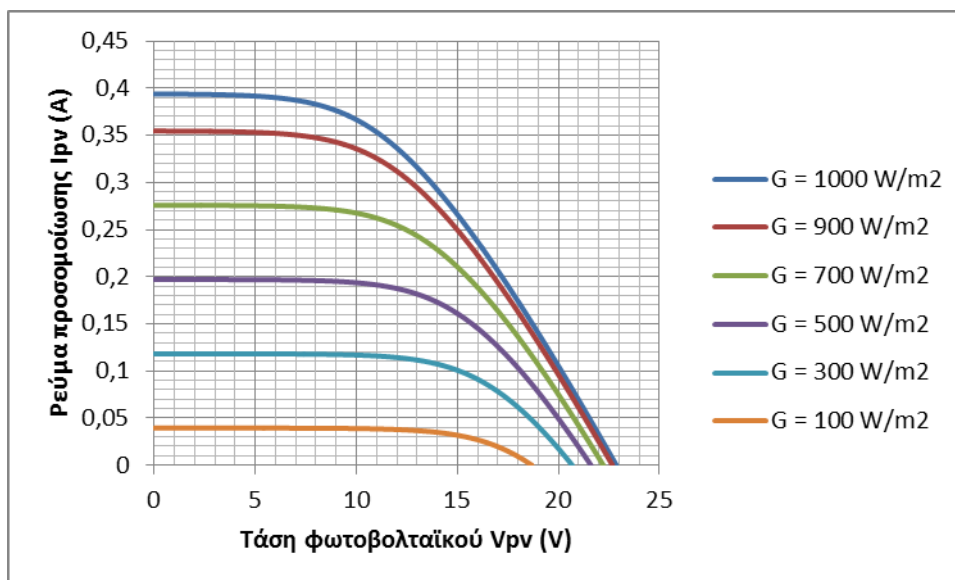


Σχήμα 4-25. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

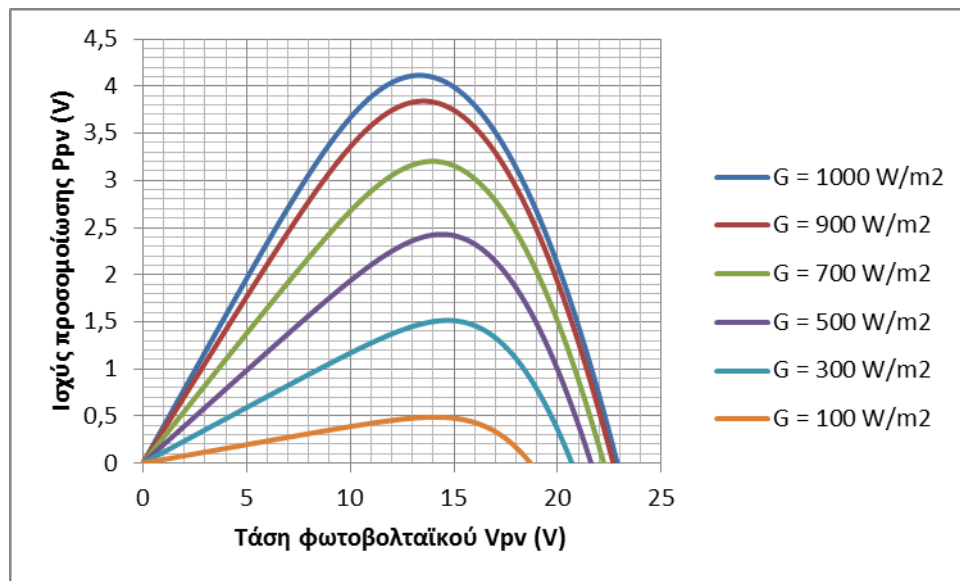


Σχήμα 4-26. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι προσομοιώσεις των χαρακτηριστικών I-V, P-V του 1<sup>ου</sup> μοντέλου για το πλαίσιο ST 5 και για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  φαίνονται αντίστοιχα στα Σχήματα 4-27 και 4-28.



Σχήμα 4-27. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

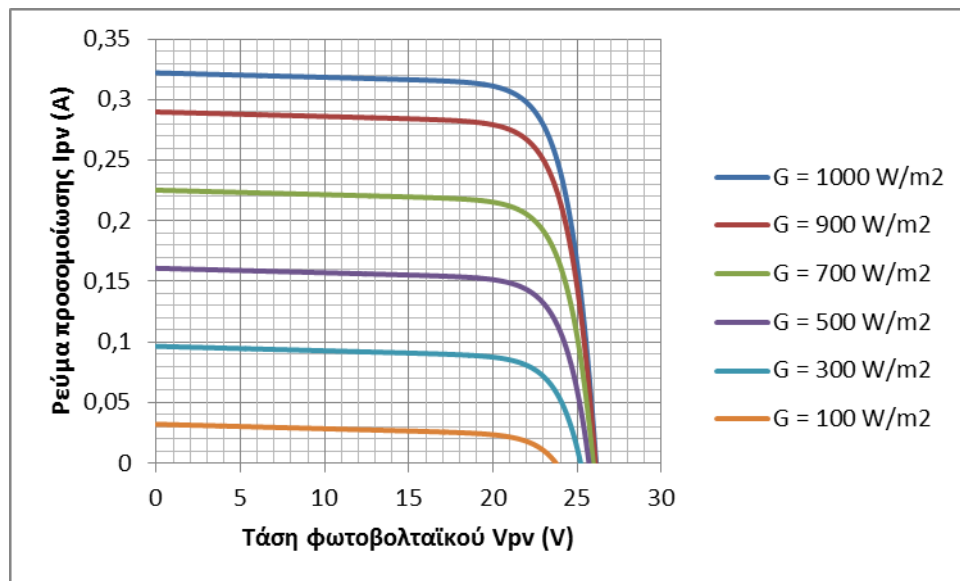


Σχήμα 4-28. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

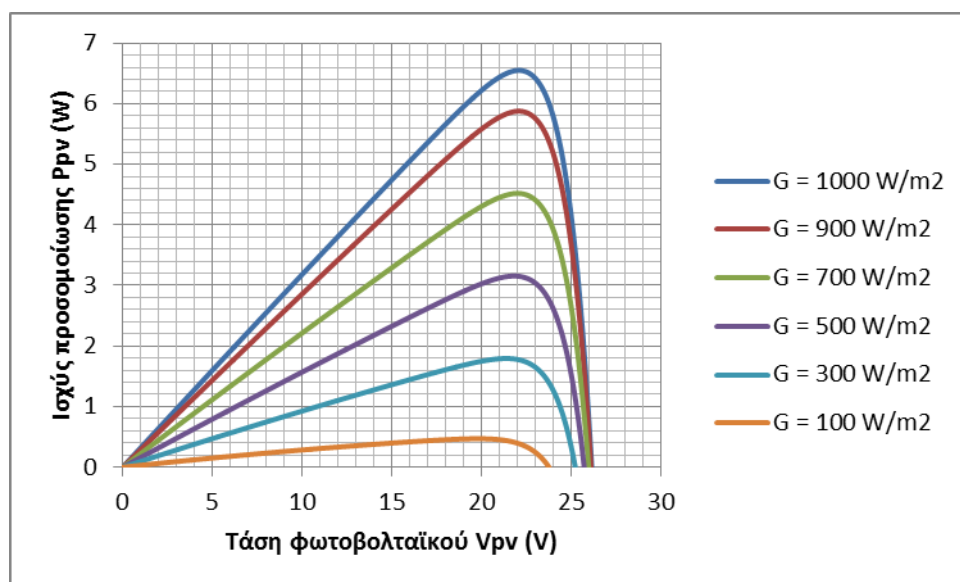
#### 4.5.2 Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο

Αντίστοιχος έλεγχος έγινε και στον τρόπο που λειτουργεί το δεύτερο μοντέλο. Το μοντέλο αυτό, επίσης, χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για την προσομοίωση της λειτουργίας τόσο του πλαισίου ET-M53605, όσο και του ST 5.

Ομοίως για την προσομοίωση της λειτουργίας του ET-M53605 έγινε εξαγωγή των χαρακτηριστικών I-V και P-V με τη βοήθεια του 2<sup>ου</sup> μοντέλου για θερμοκρασίες από  $-10$  έως  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ανά  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , και τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  ανά  $100\text{ W/m}^2$ . Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για  $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  φαίνονται στο Σχήμα 4-29. Απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές I-V για τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  με βήμα  $100\text{ W/m}^2$ . Στο Σχήμα 4-30 απεικονίζονται για τις ίδιες συνθήκες οι χαρακτηριστικές P-V.



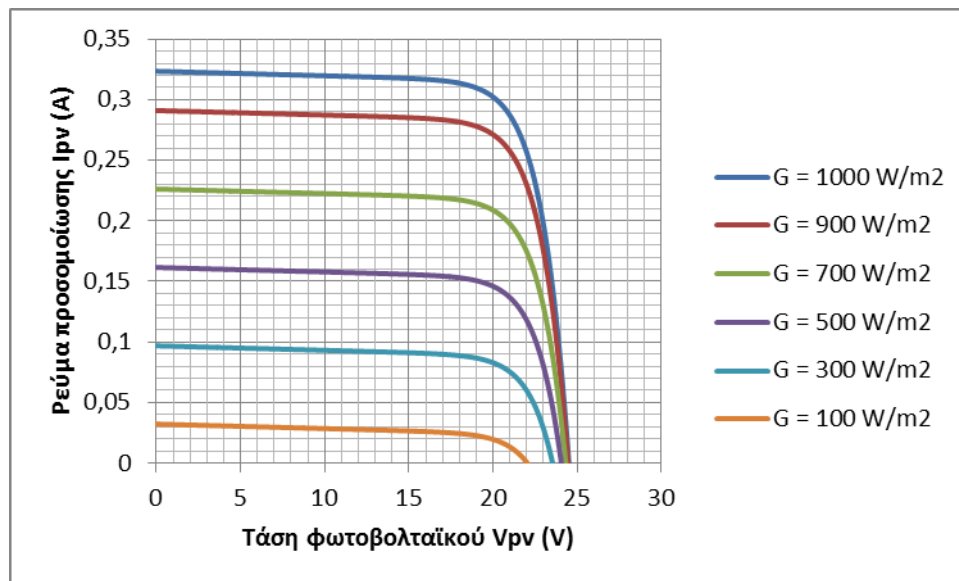
Σχήμα 4-29. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



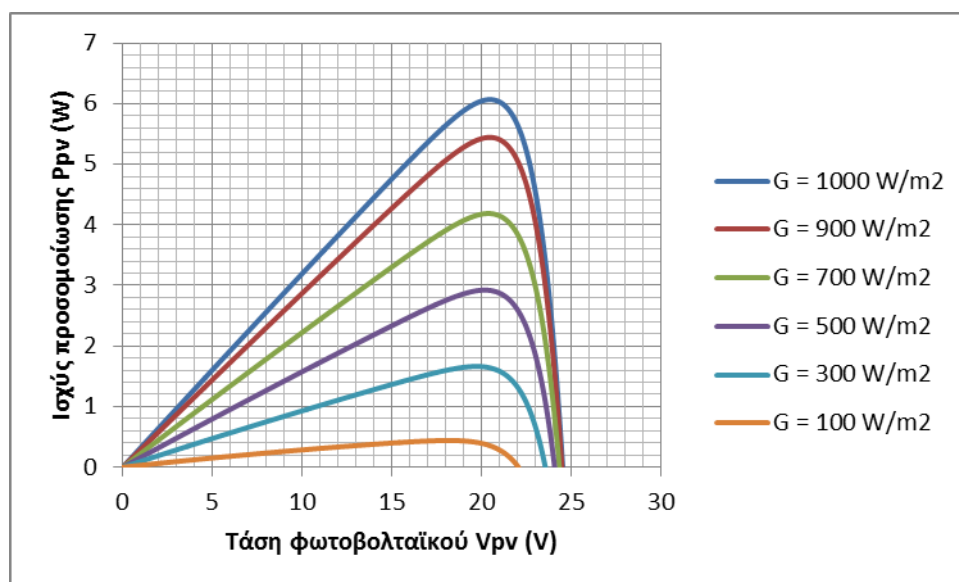
Σχήμα 4-30. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στα Σχήματα 4-31 και 4-32 φαίνονται οι προσομοιώσεις του 2<sup>ου</sup> μοντέλου για το ET-M53605 για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ . Στο Σχήμα 4-31 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές του ρεύματος, ενώ στο Σχήμα 4-32 αυτές της ισχύος.



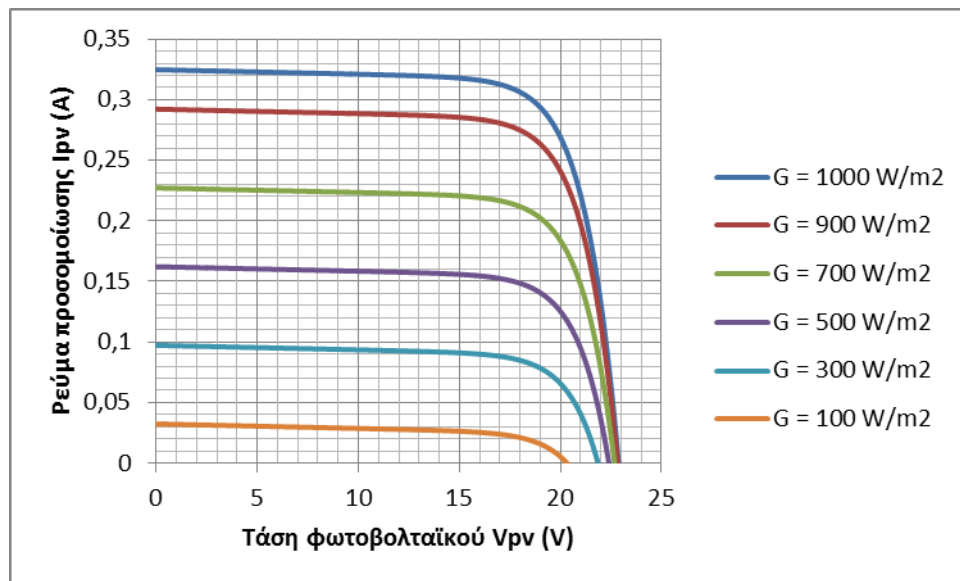


Σχήμα 4-31. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

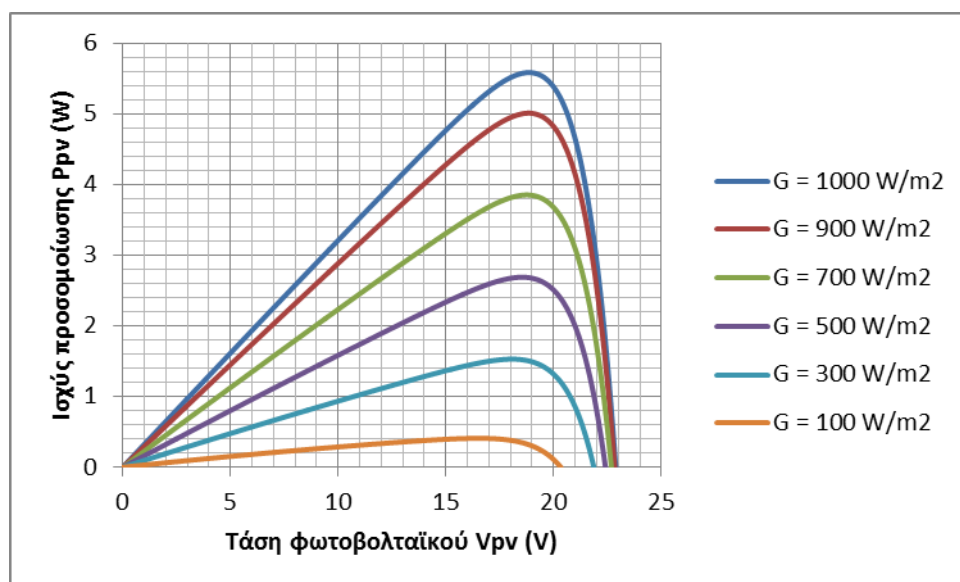


Σχήμα 4-32. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V, P-V στα Σχήματα 4-33 και 4-34 αντίστοιχα, απεικονίζουν τα αποτελέσματα του 2<sup>ου</sup> μοντέλου για το πλαίσιο ET-M53605 σε συνθήκες θερμοκρασίας  $10^\circ\text{C}$  κι ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

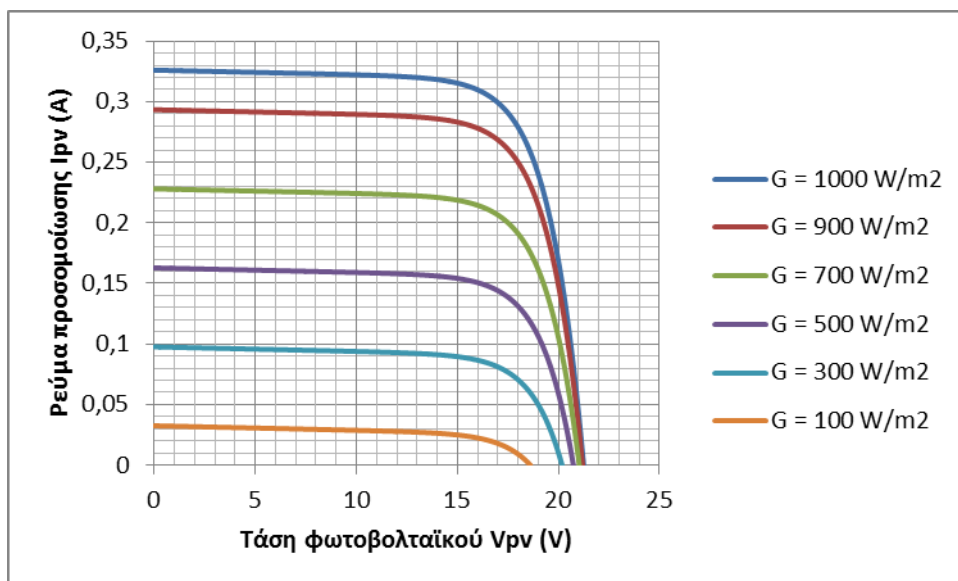


Σχήμα 4-33. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

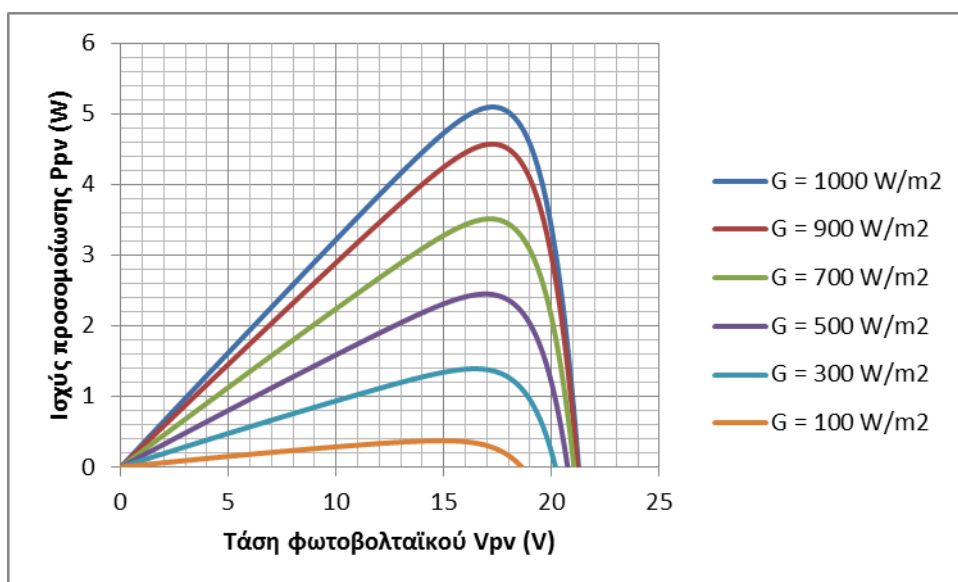


Σχήμα 4-34. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για τιμές ακτινοβολίας 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ , οι προσομοιώσεις του δεύτερου μοντέλου για το πλαίσιο αυτό απεικονίζονται στο Σχήμα 4-35 για τις χαρακτηριστικές I-V, και στο Σχήμα 4-36 για τις χαρακτηριστικές P-V.

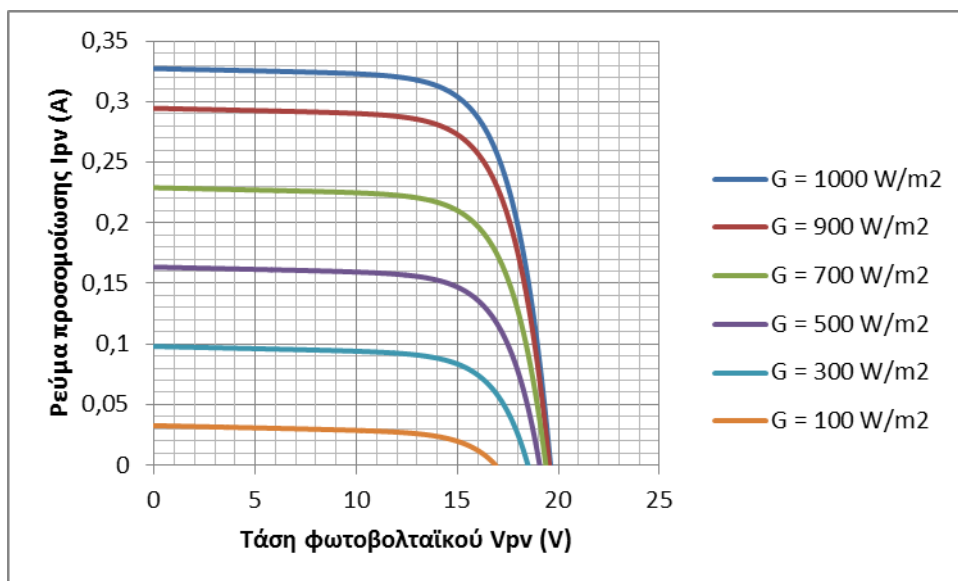


Σχήμα 4-35. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

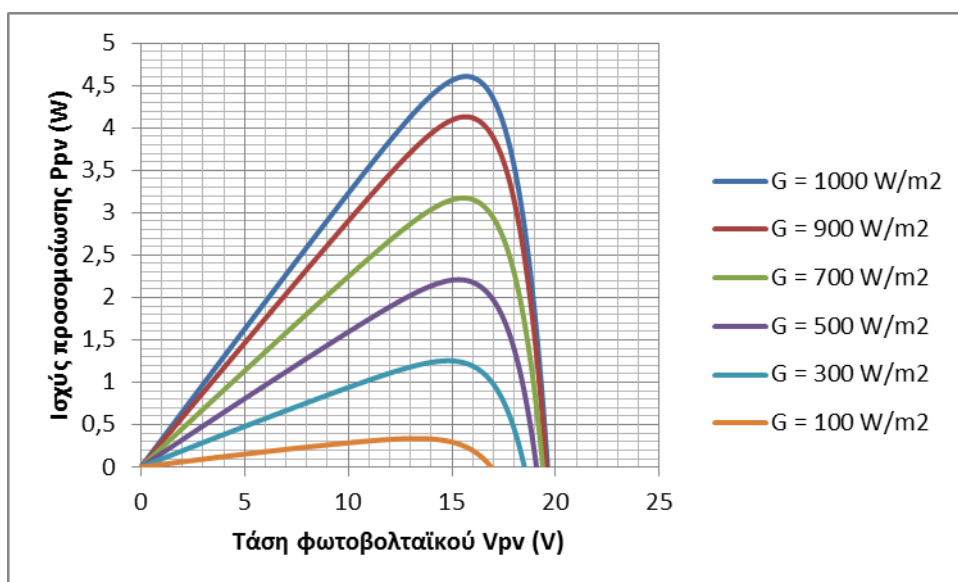


Σχήμα 4-36. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για ακτινοβολία από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  το 2<sup>ο</sup> μοντέλο υπολογίζει τις χαρακτηριστικές I-V και P-V για το πλαίσιο ET-M53605 όπως αυτές απεικονίζονται στα Σχήματα 4-37 και 4-38, αντίστοιχα.

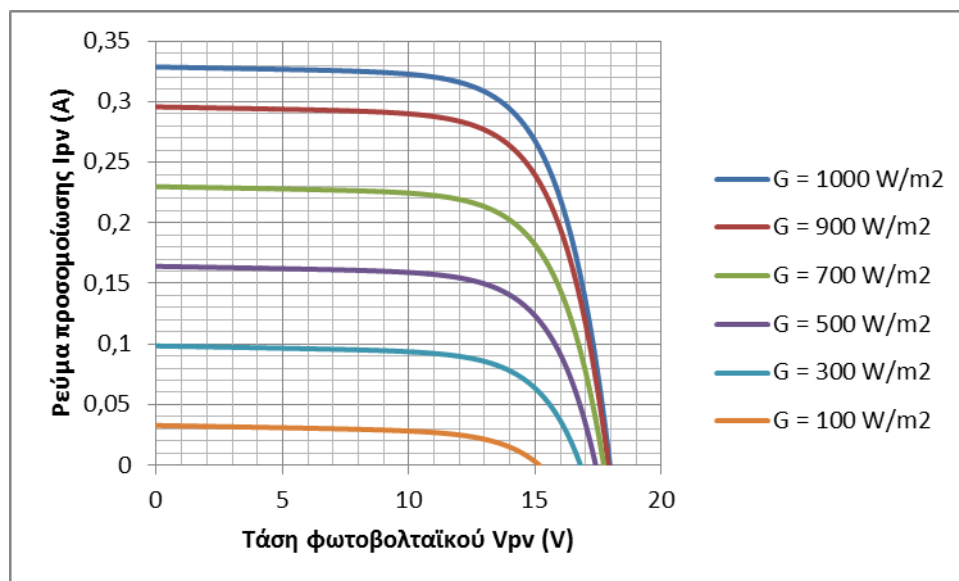


Σχήμα 4-37. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

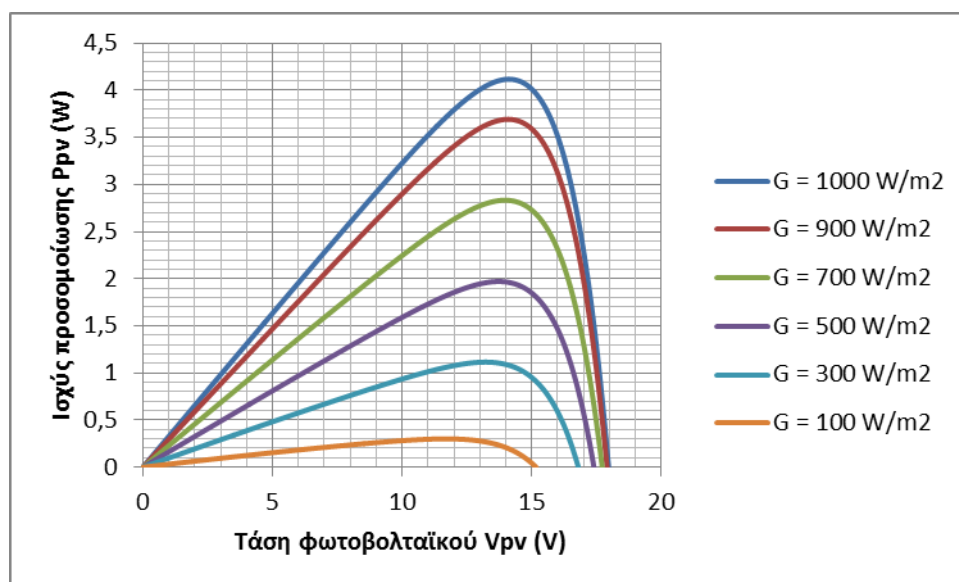


Σχήμα 4-38. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για ακτινοβολία από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  το 2<sup>ο</sup> μοντέλο προσομοιώνει τις χαρακτηριστικές I-V και P-V για το πλαίσιο ET-M53605 όπως αυτές απεικονίζονται στα Σχήματα 4-39 και 4-40 αντίστοιχα.

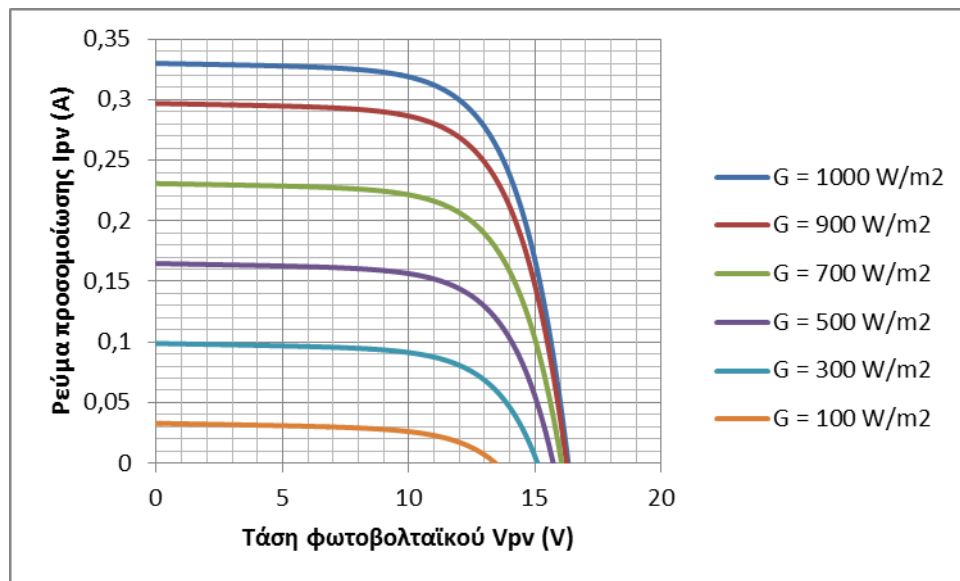


Σχήμα 4-39. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

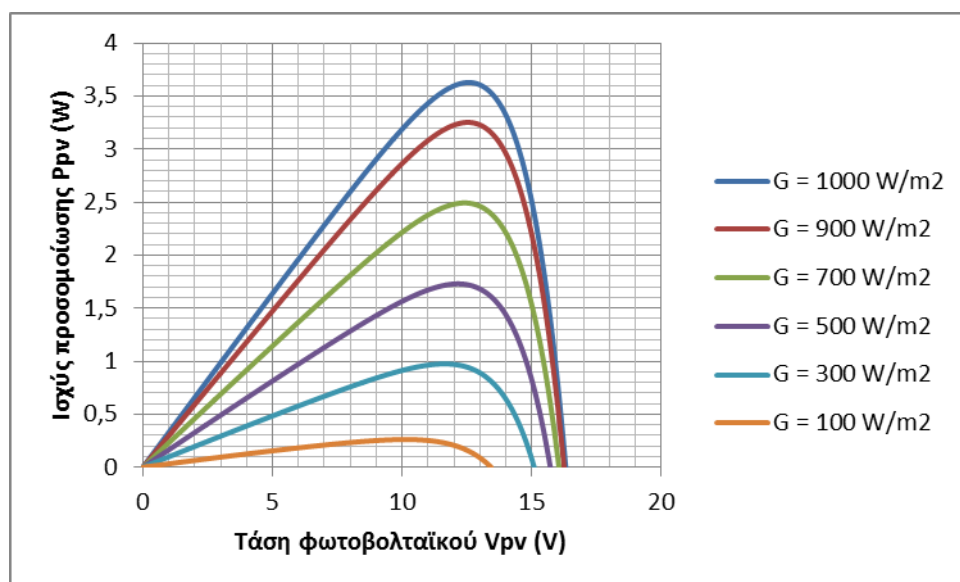


Σχήμα 4-40. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για ακτινοβολία από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  οι προσομοιώσεις των χαρακτηριστικών I-V και P-V για το πλαίσιο ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο απεικονίζονται στα Σχήματα 4-41 και 4-42 αντίστοιχα.

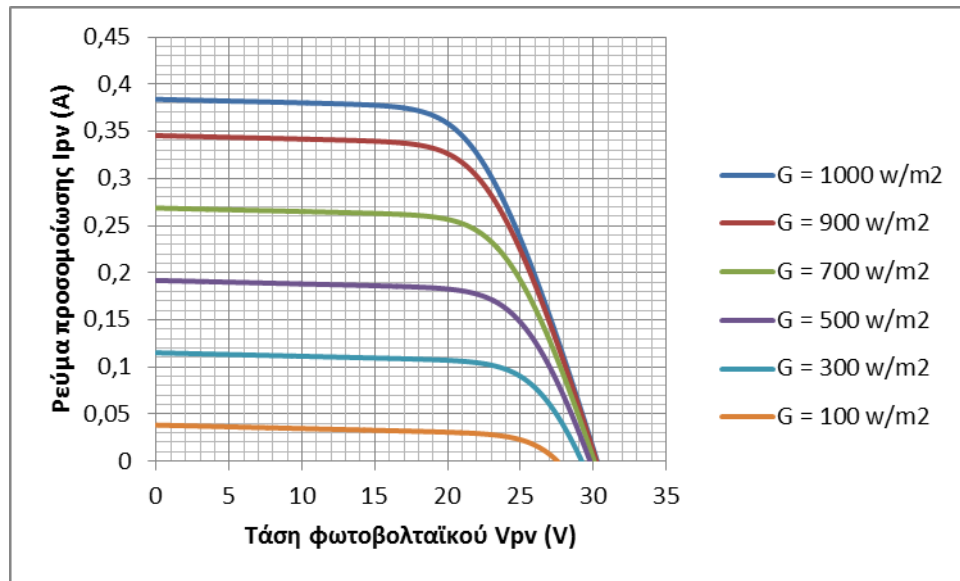


Σχήμα 4-41. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

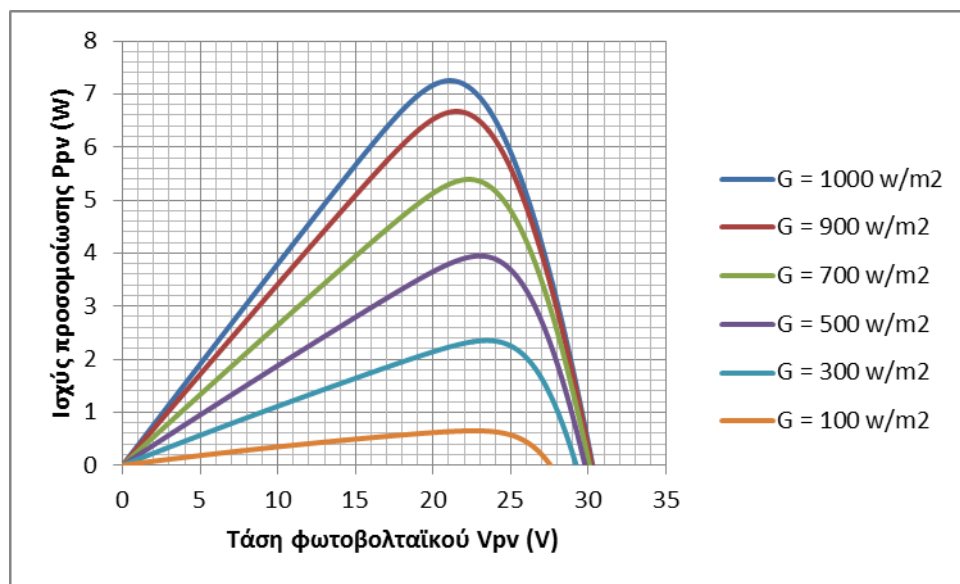


Σχήμα 4-42. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Το 2<sup>ο</sup> μοντέλο χρησιμοποιείται, όπως και το 1<sup>ο</sup>, και για την προσομοίωση της λειτουργίας του πλαισίου ST 5. Στους  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  για τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  φαίνεται πως εργάζεται το μοντέλο αυτό για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών ρεύματος και ισχύος στα Σχήματα 4-43 και 4-44 αντίστοιχα.

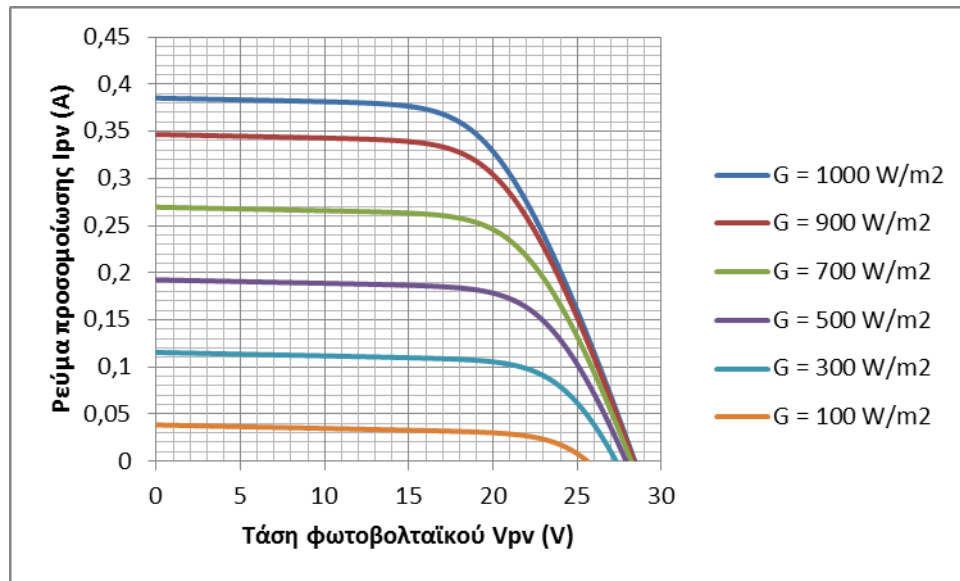


Σχήμα 4-43. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

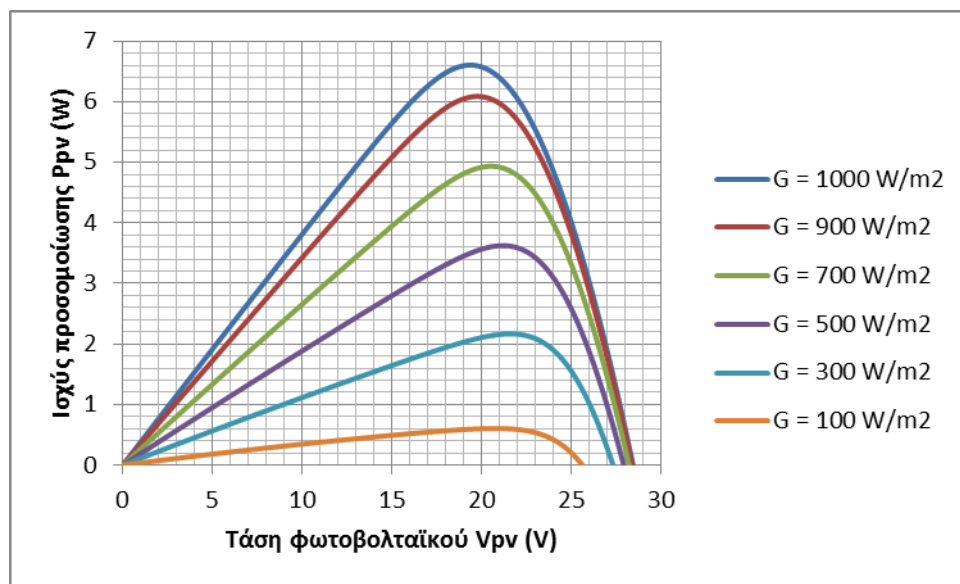


Σχήμα 4-44. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στο Σχήμα 4-45 φαίνονται οι χαρακτηριστικές I-V, ενώ στο Σχήμα 4-46 οι χαρακτηριστικές P-V του πλαισίου ST 5 που υπολογίζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  σε θερμοκρασία  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



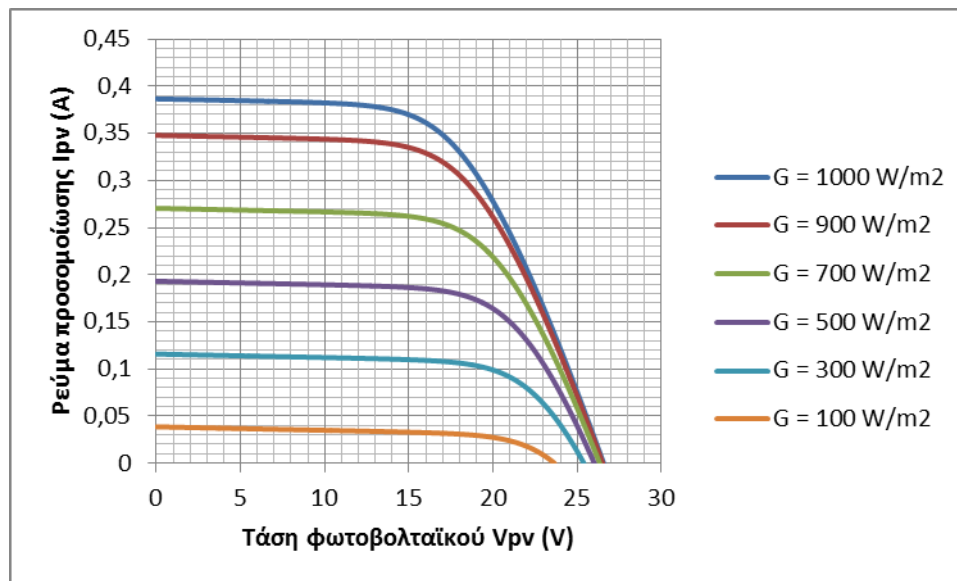
Σχήμα 4-45. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



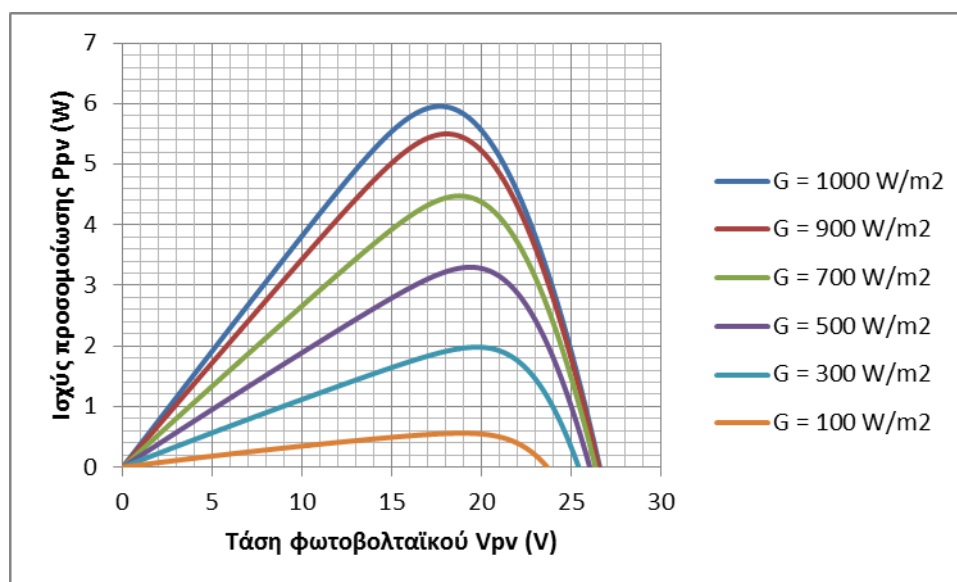
Σχήμα 4-46. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στο Σχήμα 4-47 φαίνονται οι χαρακτηριστικές I-V, ενώ στο Σχήμα 4-48 οι χαρακτηριστικές P-V του πλαισίου ST 5 που υπολογίζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  σε θερμοκρασία  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



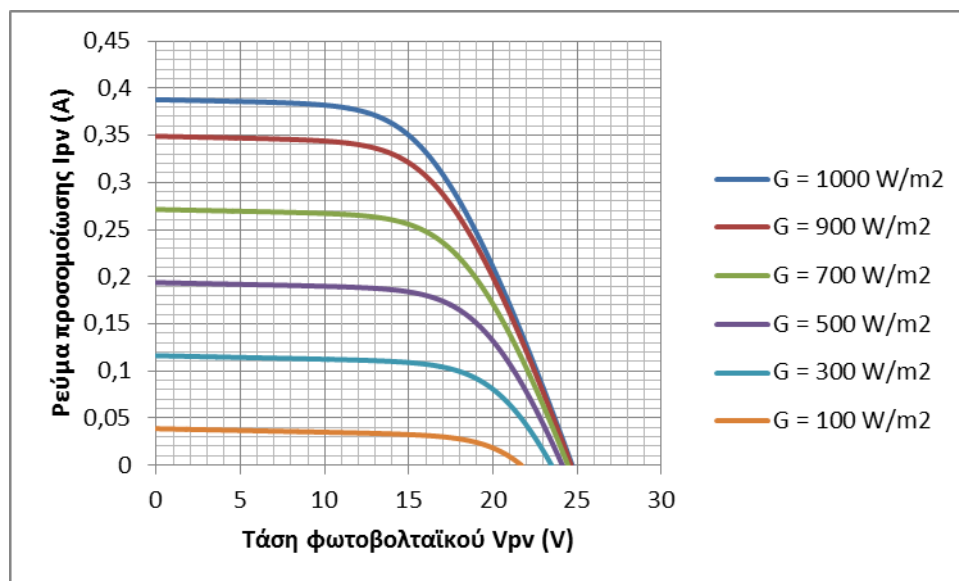


Σχήμα 4-47. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

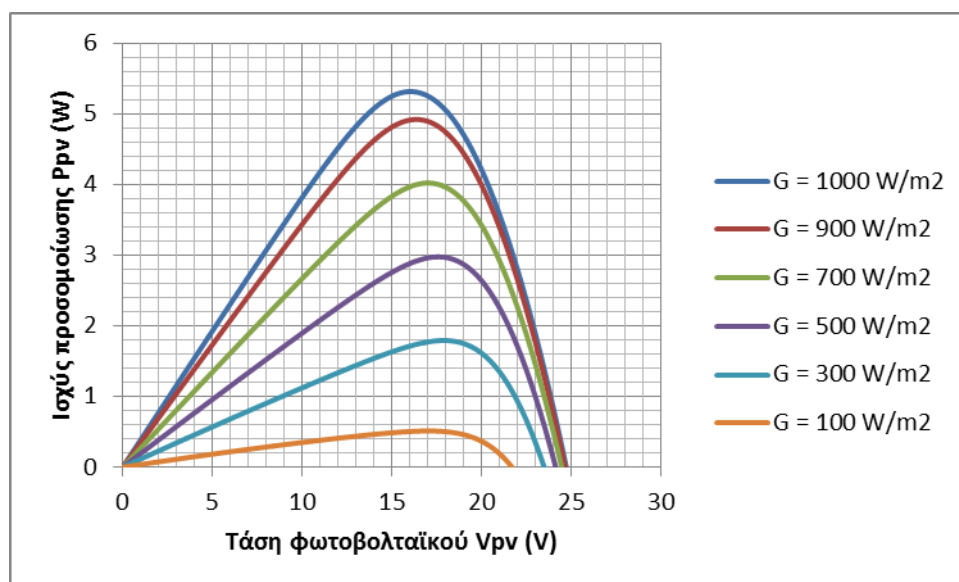


Σχήμα 4-48. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που φαίνονται στα Σχήματα 4-49 και 4-50 απεικονίζουν τις προσομοιώσεις του ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

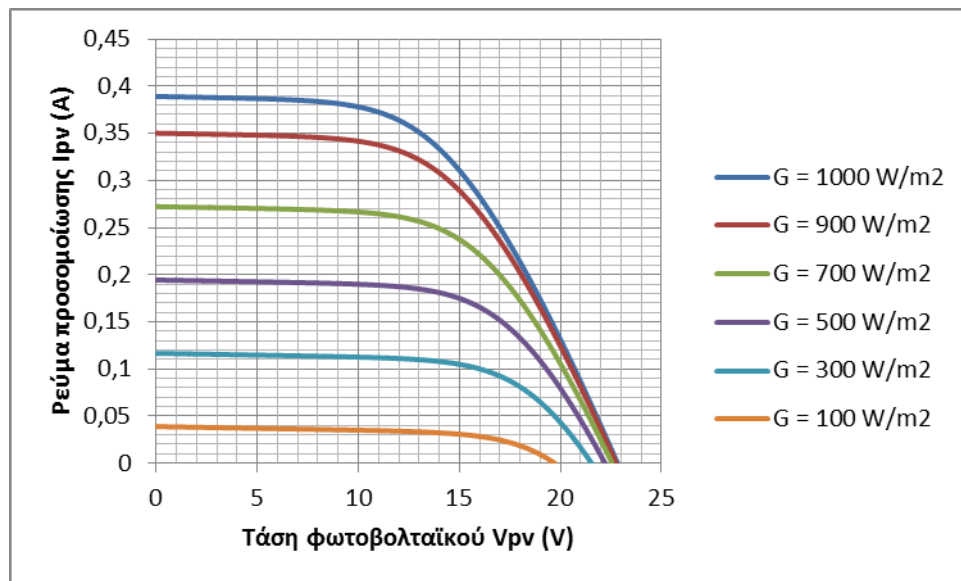


Σχήμα 4-49. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

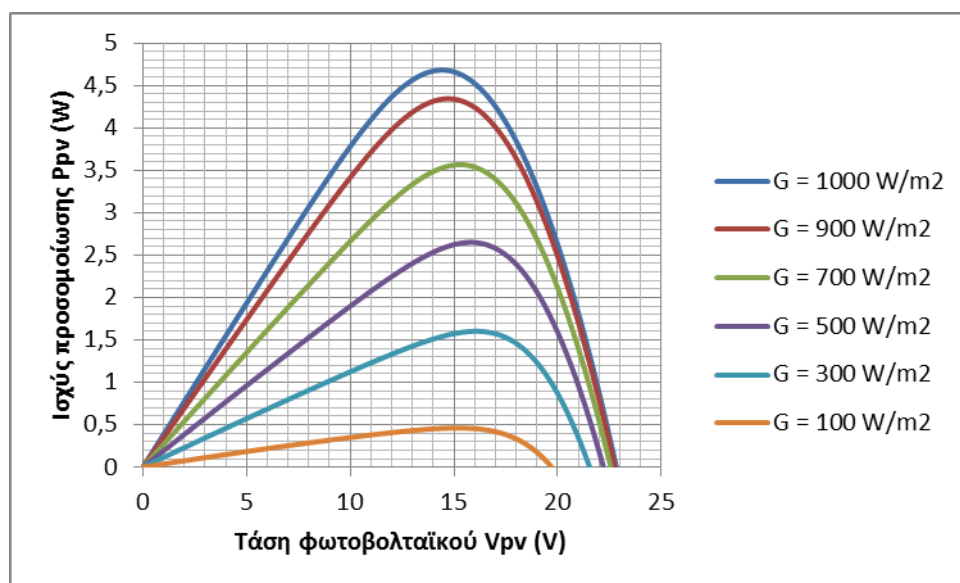


Σχήμα 4-50. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που φαίνονται στα Σχήματα 4-51 και 4-52 απεικονίζουν τις προσομοιώσεις του ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

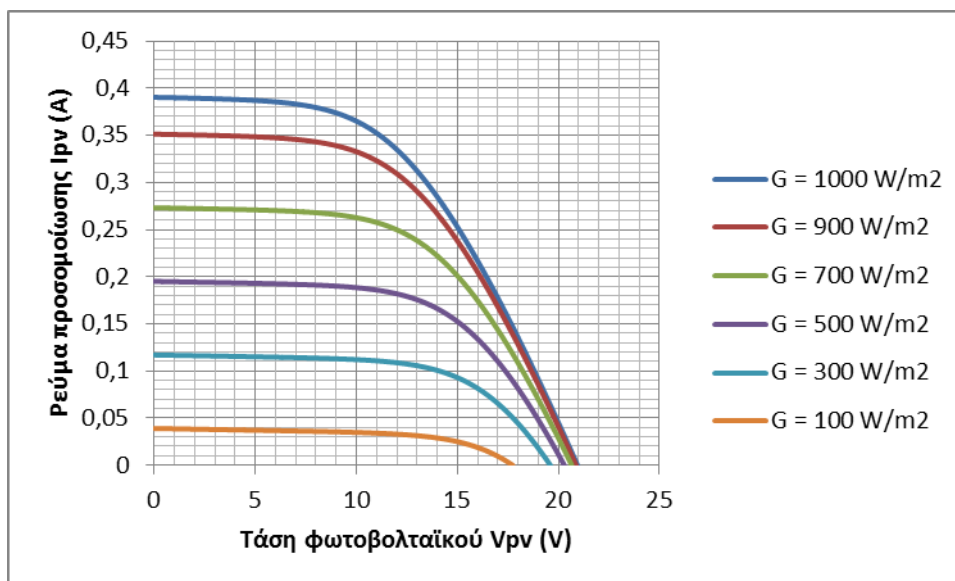


Σχήμα 4-51. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

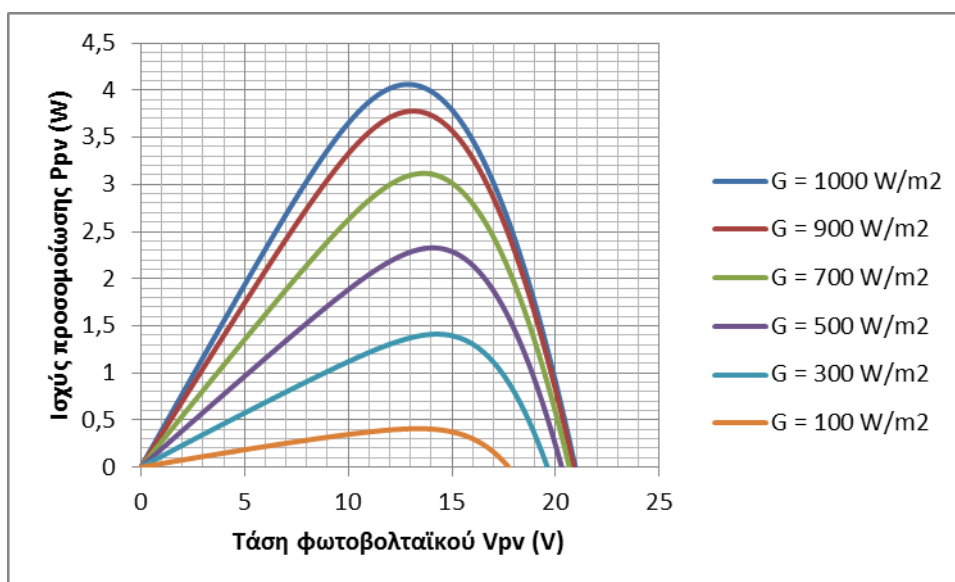


Σχήμα 4-52. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  το 2<sup>ο</sup> μοντέλο προσομοιώνει τις χαρακτηριστικές I-V και P-V του πλαισίου αυτού για τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  όπως αποτυπώνονται στα Σχήματα 4-53 και 4-54 αντίστοιχα.

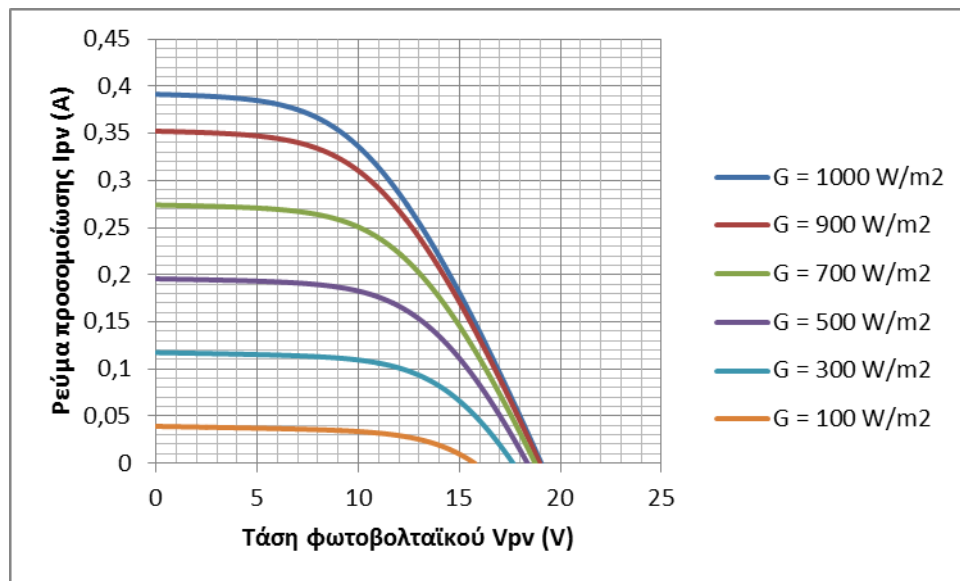


Σχήμα 4-53. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .

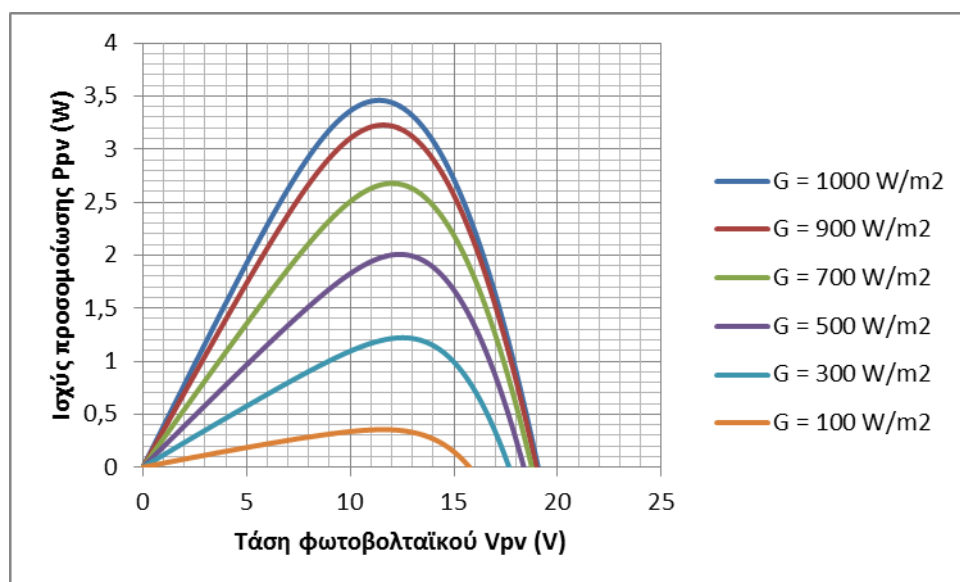


Σχήμα 4-54. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V, που φαίνονται στα Σχήματα 4-55 και 4-56 αντίστοιχα, δείχνουν τις προσομοιώσεις του 2<sup>ου</sup> μοντέλου για το πλαίσιο ST 5 για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .



Σχήμα 4-55. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

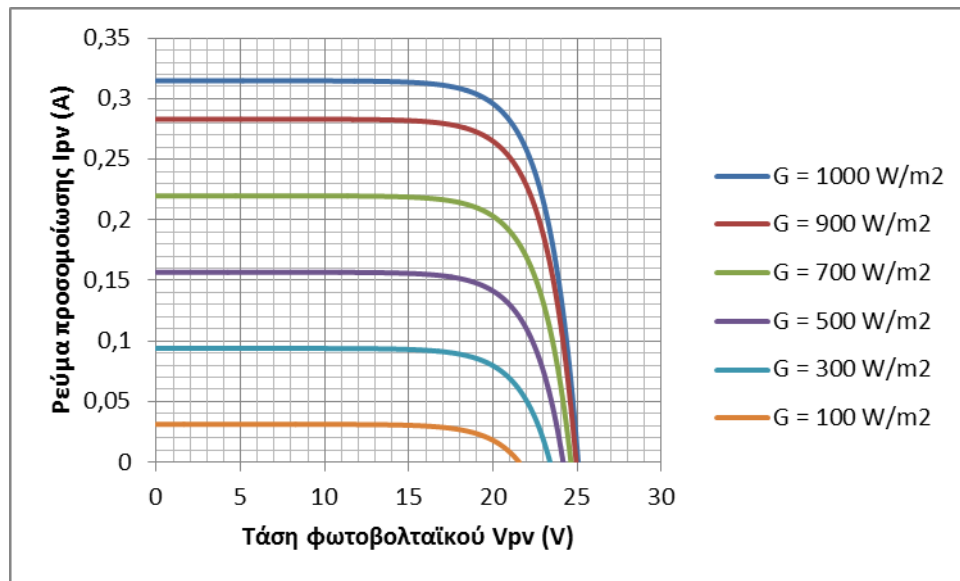


Σχήμα 4-56. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

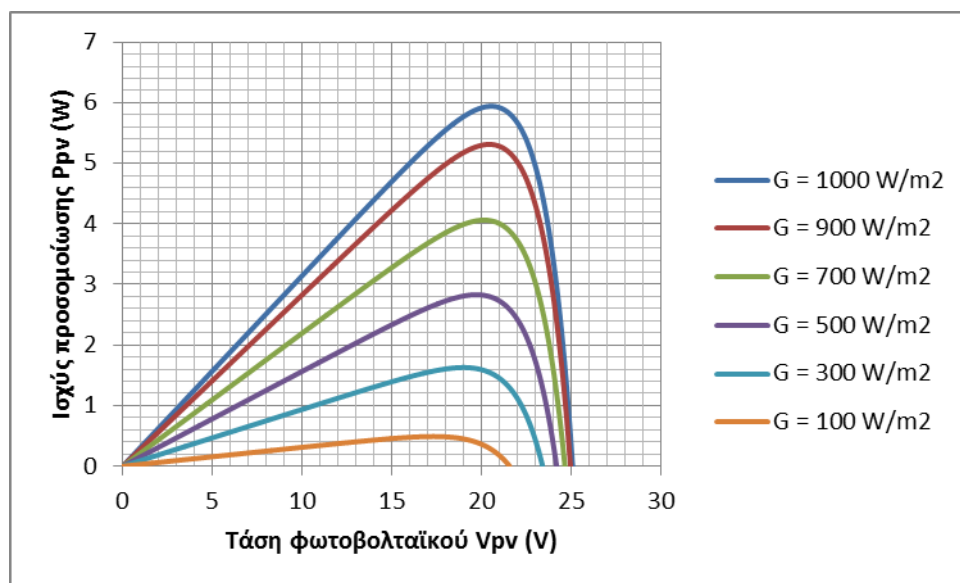
#### 4.5.3 Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο

Το 3<sup>ο</sup> μοντέλο χρησιμοποιείται, όπως και τα προηγούμενα δύο, για την προσομοίωση της λειτουργίας τόσο του πλαισίου ET-M53605, όσο και του ST 5. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.

Για το πλαίσιο ET-M53605 το 3<sup>ο</sup> μοντέλο υπολογίζει τις χαρακτηριστικές I-V και P-V, για  $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ , όπως φαίνεται στα Σχήματα 4-57 και 4-58 αντίστοιχα.

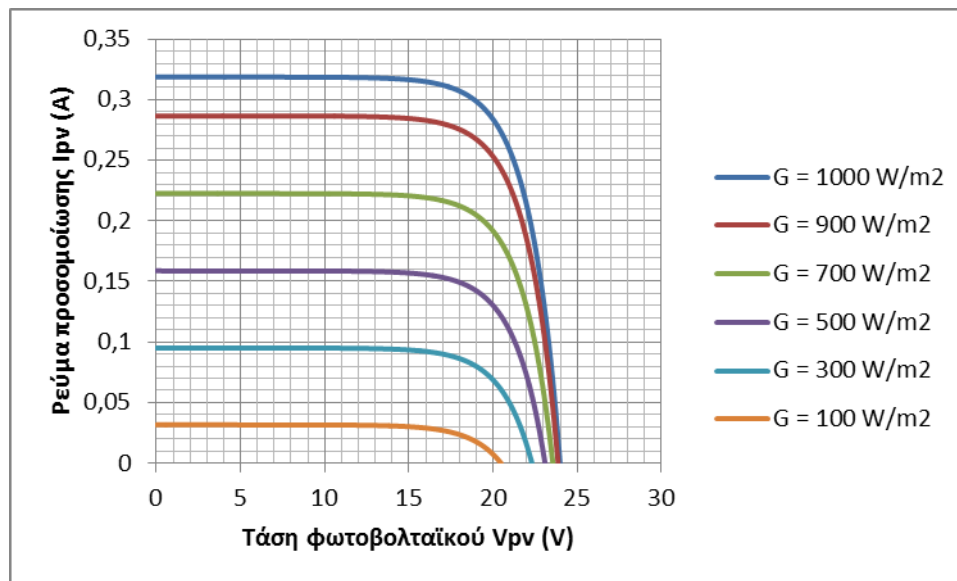


Σχήμα 4-57. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

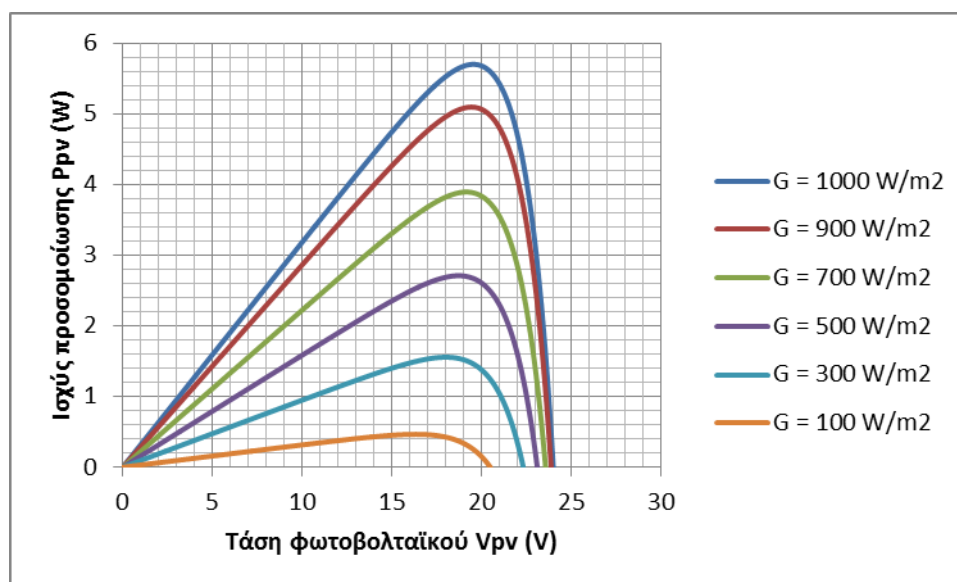


Σχήμα 4-58. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Τα Σχήματα 4-59 και 4-60 απεικονίζουν αντίστοιχα τις χαρακτηριστικές ρεύματος και ισχύος, σε σχέση με την τάση, για το πλαίσιο ET-M53605 όπως υπολογίζονται από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για θερμοκρασία  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και τιμές ακτινοβολίας  $100-1000\text{ W/m}^2$ .

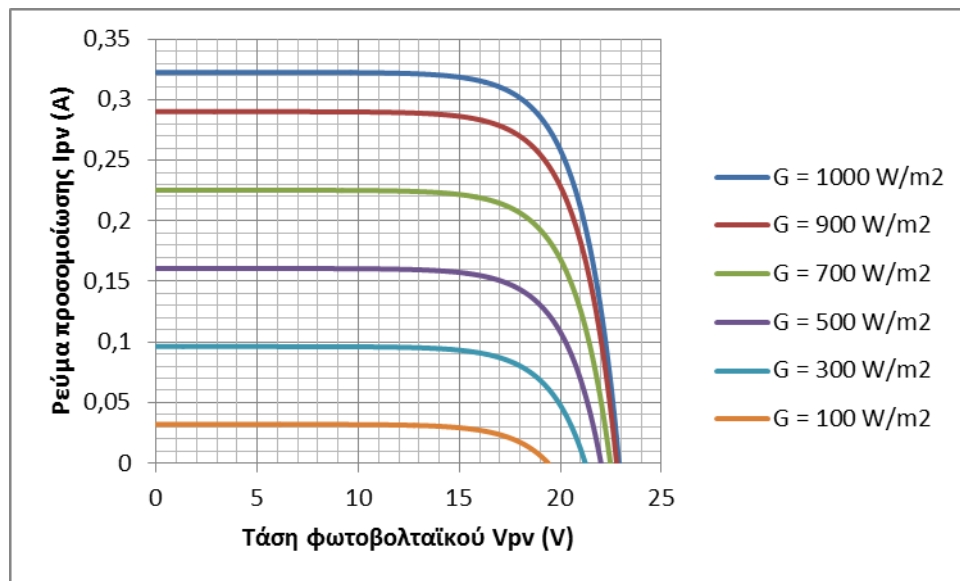


Σχήμα 4-59. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

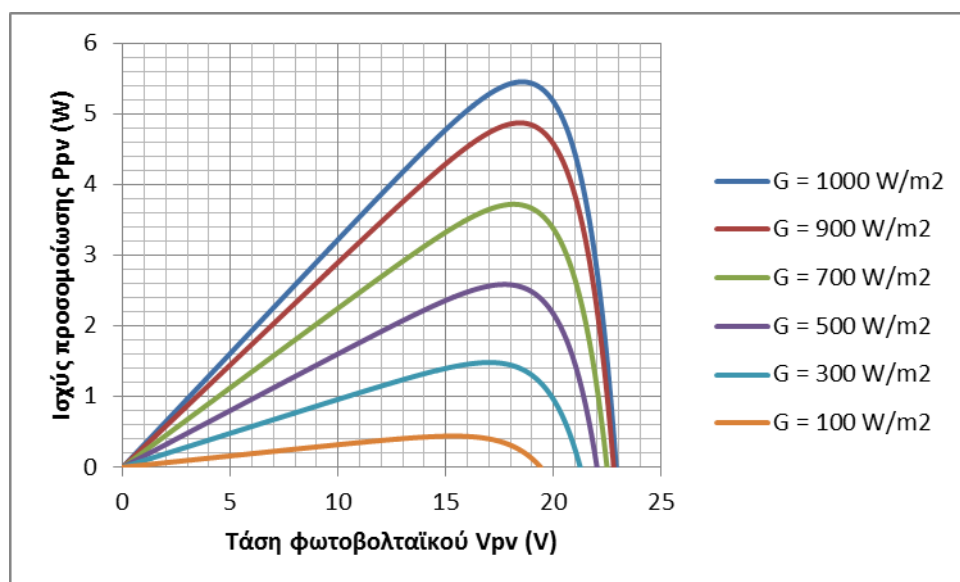


Σχήμα 4-60. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  για το πλαίσιο αυτό οι προσομοιώσεις των χαρακτηριστικών I-V και P-V από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο απεικονίζονται στα Σχήματα 4-61 και 4-62 για  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



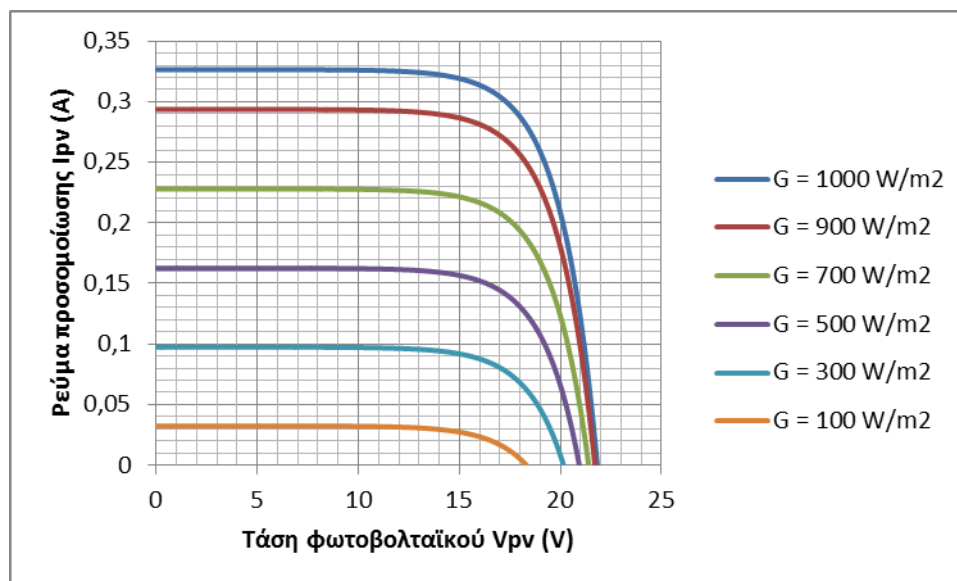
Σχήμα 4-61. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



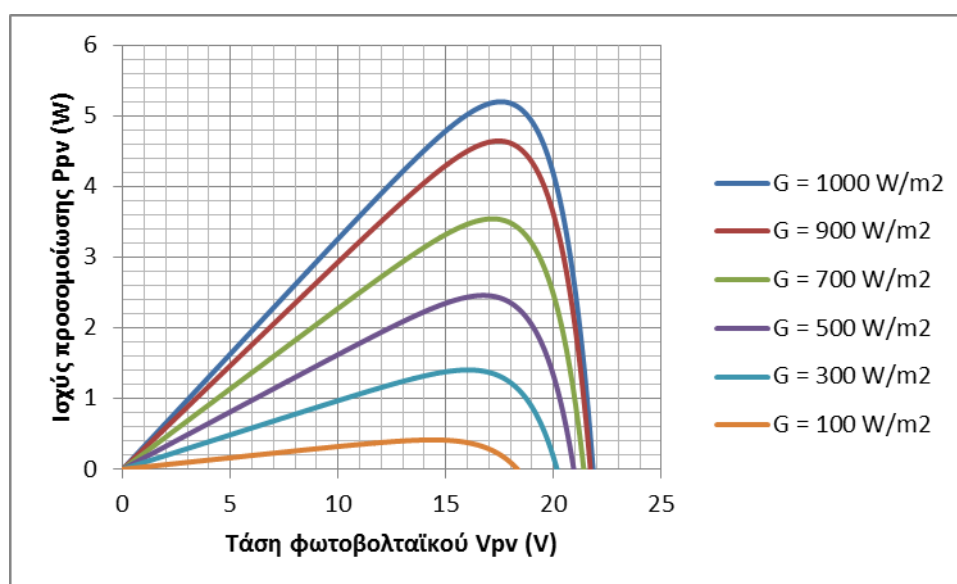
Σχήμα 4-62. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Η λειτουργία του ET-M53605 σε θερμοκρασία  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και τιμές ακτινοβολίας 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  φαίνεται, όπως προσομοιώθηκε από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο, στα Σχήματα 4-63 και 4-64, όπου απεικονίζονται αντίστοιχα οι υπολογισμοί του μοντέλου για τις χαρακτηριστικές I-V και P-V.



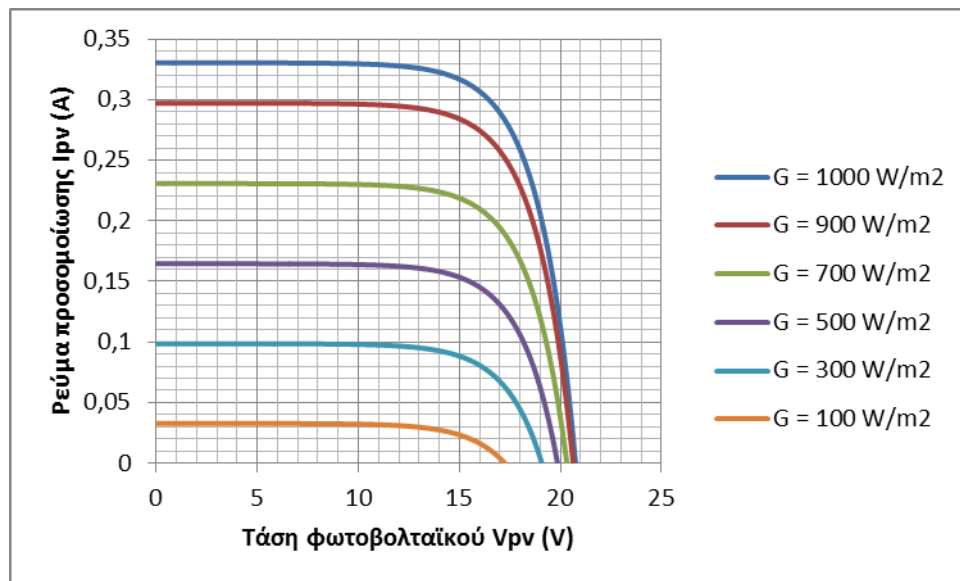


Σχήμα 4-63. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

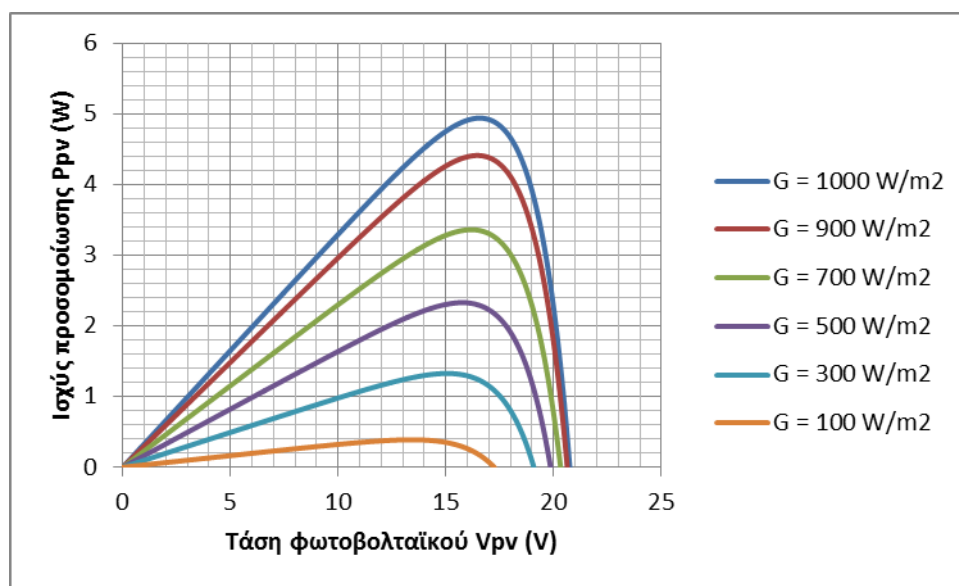


Σχήμα 4-64. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι προσομοιώσεις των χαρακτηριστικών I-V και P-V που απεικονίζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 4-65 και 4-66, αφορούν στο πλαίσιο ET-M53605 όπως τις υπολογίζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο σε συνθήκες  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  για ακτινοβολίες από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

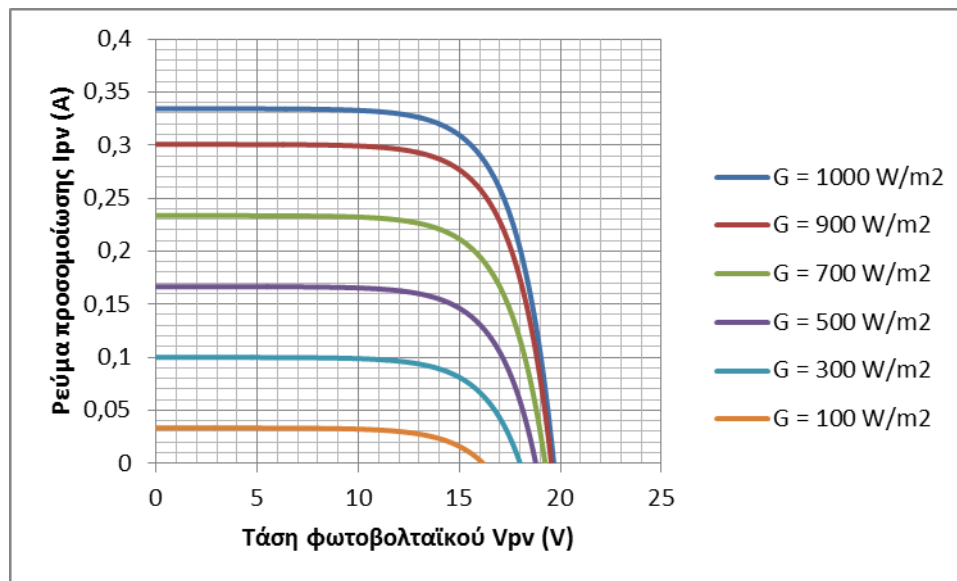


Σχήμα 4-65. Χαρακτηριστικές  $I$ - $V$  για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

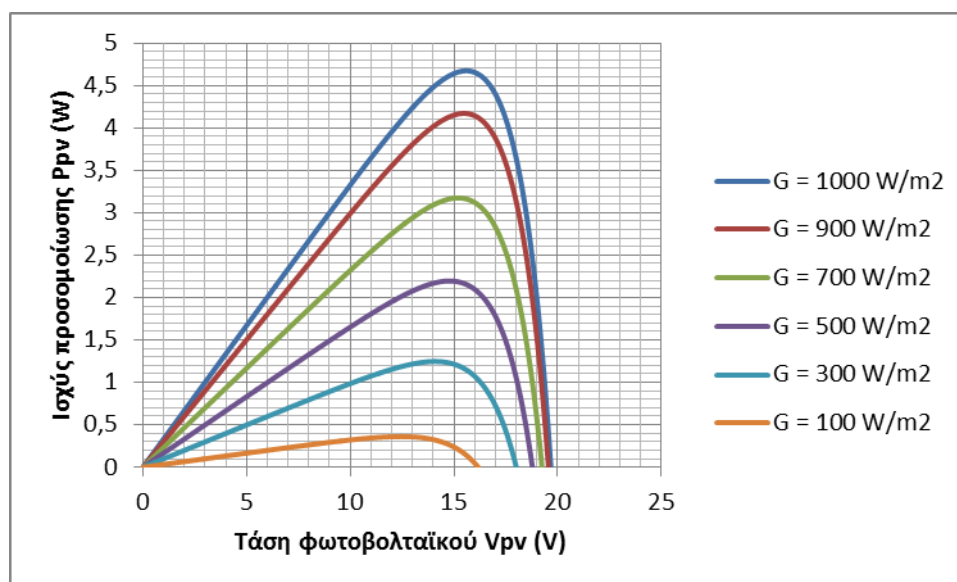


Σχήμα 4-66. Χαρακτηριστικές  $P$ - $V$  για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Η λειτουργία του πλαισίου αυτού προσομοιώθηκε από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο και στους  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσεως και ισχύος τάσεως που εξήγαγε το μοντέλο για  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  φαίνονται στα Σχήματα 4-67 και 4-68.

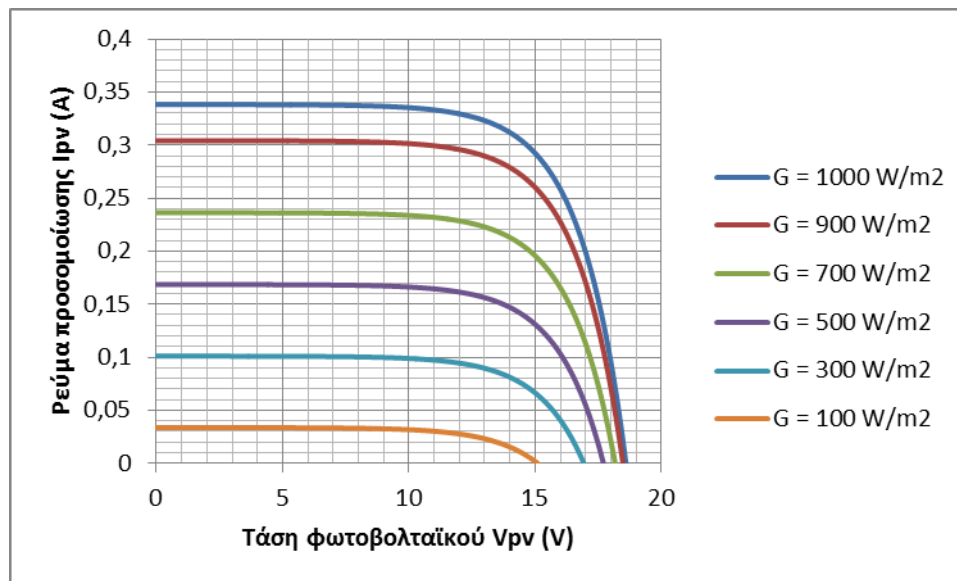


Σχήμα 4-67. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

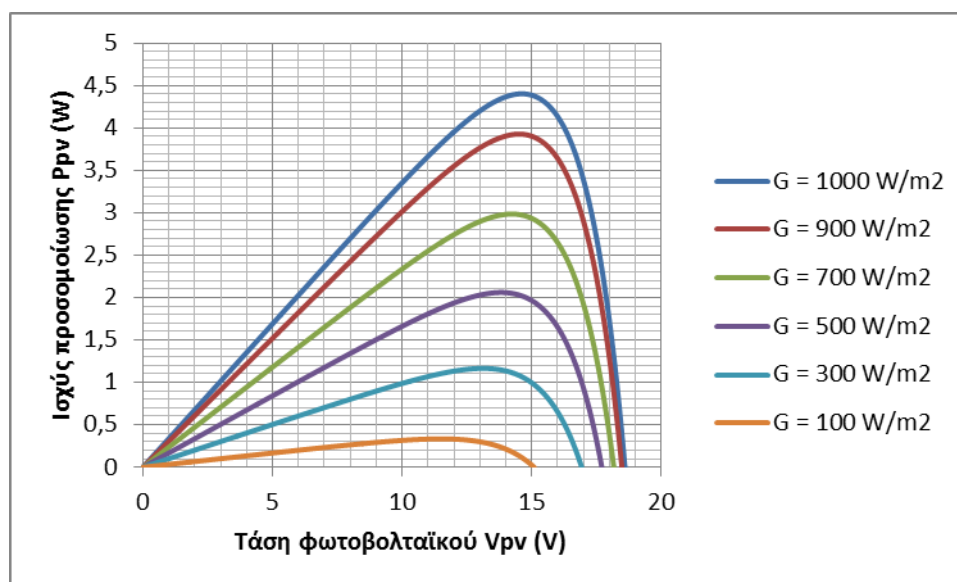


Σχήμα 4-68. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Το 3<sup>ο</sup> μοντέλο υπολογίζει τις χαρακτηριστικές I-V και P-V για το ET-M53605 στους  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  για τιμές ακτινοβολίας από 100 ως  $1000\text{ W/m}^2$  όπως φαίνονται στα Σχήματα 4-69 και 4-70 αντίστοιχα.

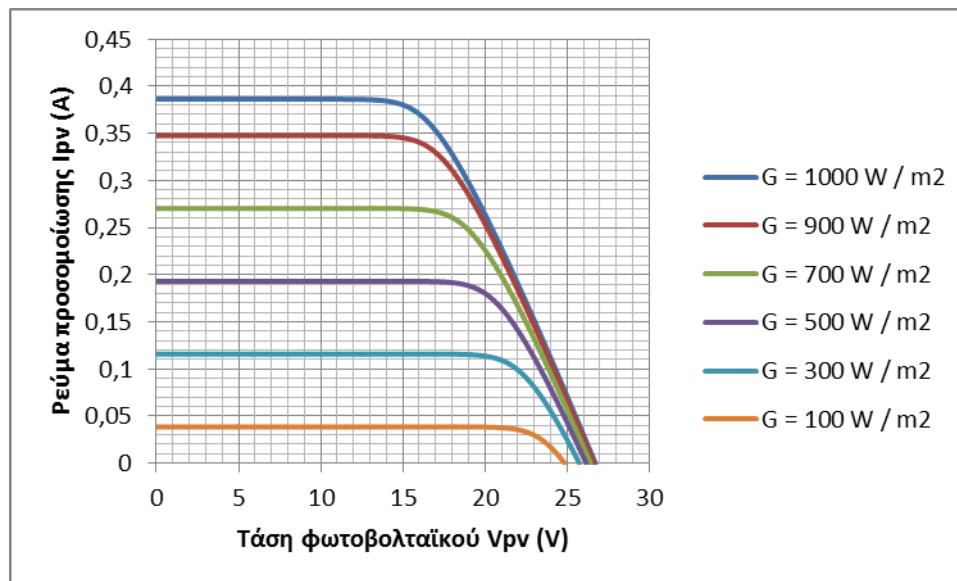


Σχήμα 4-69. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

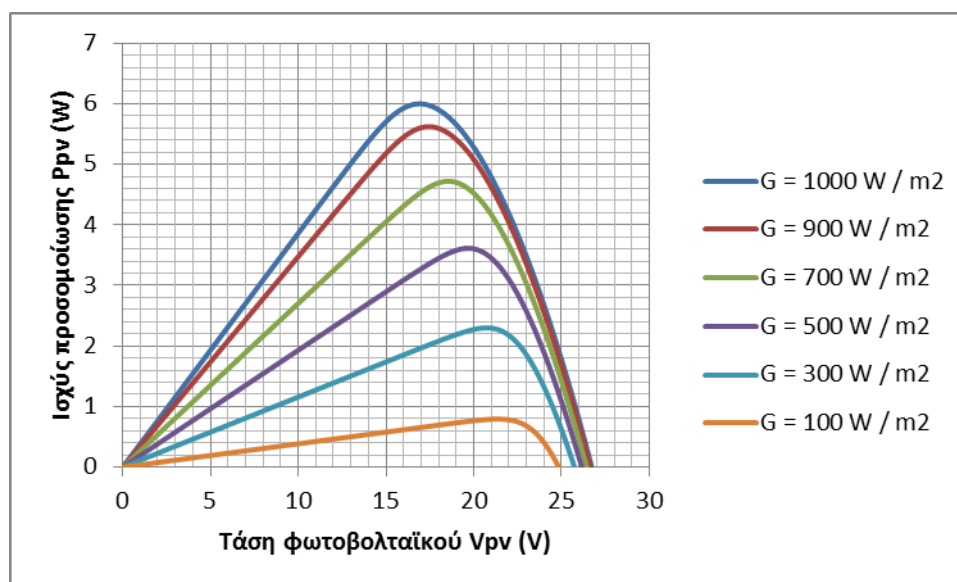


Σχήμα 4-70. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Το τρίτο μοντέλο, όπως και τα δυο που προηγήθηκαν, χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία και για την προσομοίωση λειτουργίας του πλαισίου ST 5. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Στο Σχήμα 4-71 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές I-V όπως υπολογίζονται από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το ST 5 σε θερμοκρασία  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ , ανά  $200\text{ W/m}^2$ . Οι χαρακτηριστικές P-V για τις συνθήκες αυτές φαίνονται στο Σχήμα 4-72.

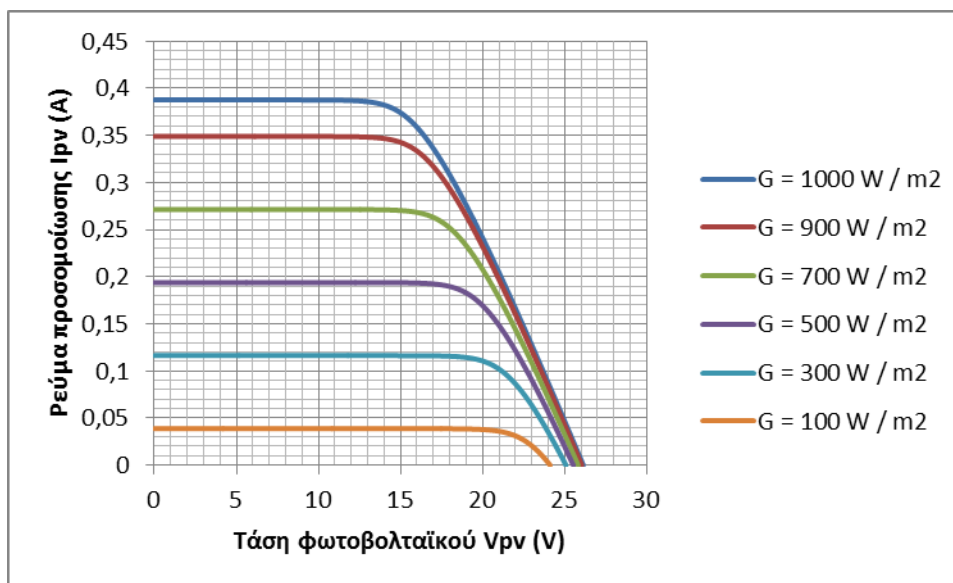


Σχήμα 4-71. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

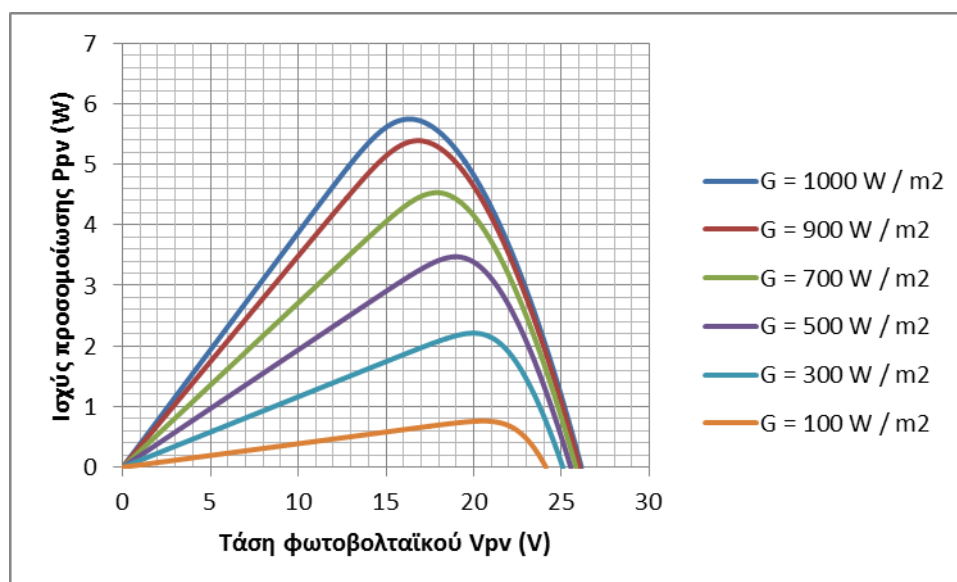


Σχήμα 4-72. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Σε θερμοκρασία  $0^\circ\text{C}$ , για  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ , το 3<sup>ο</sup> μοντέλο προσομοιώνει τη λειτουργία του ST 5 υπολογίζοντας τις χαρακτηριστικές I-V και P-V με τον τρόπο που απεικονίζονται στα Σχήματα 4-73 και 4-74 αντίστοιχα.

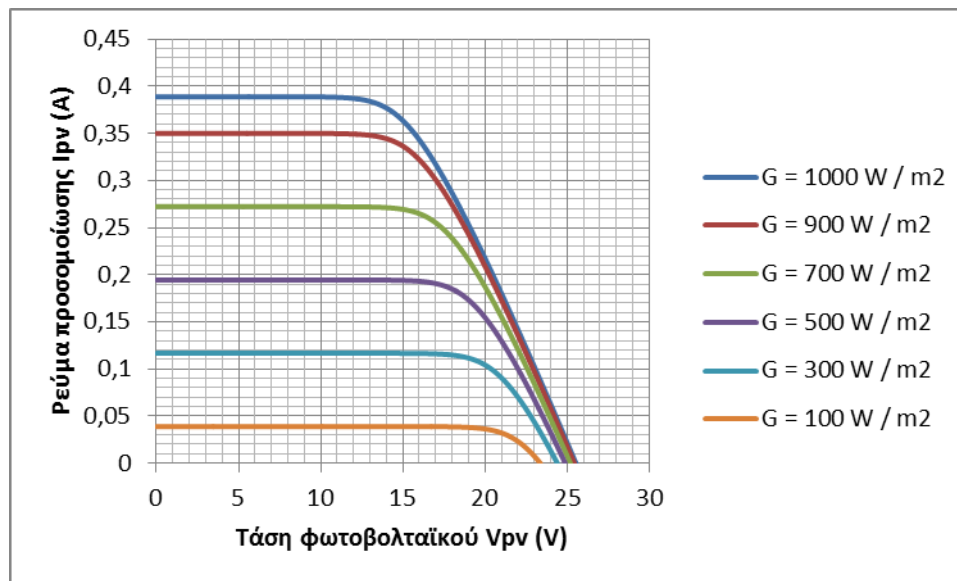


Σχήμα 4-73. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .

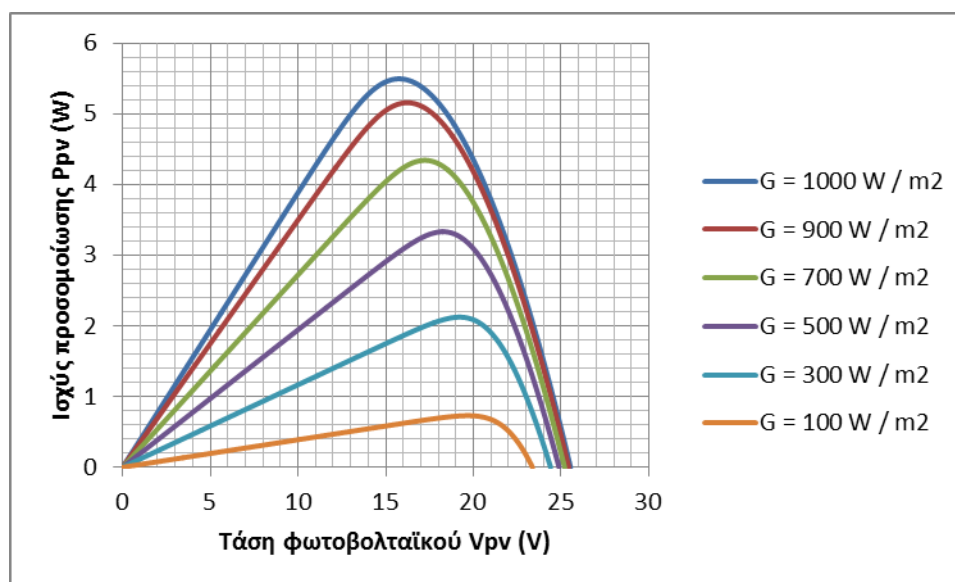


Σχήμα 4-74. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .

Στο Σχήμα 4-75 φαίνονται οι προσομοιώσεις των χαρακτηριστικών I-V για το πλαίσιο ST 5, όπως τις υπολογίζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και ακτινοβολίες από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ . Στο Σχήμα 4-76 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές P-V για αυτές τις συνθήκες.

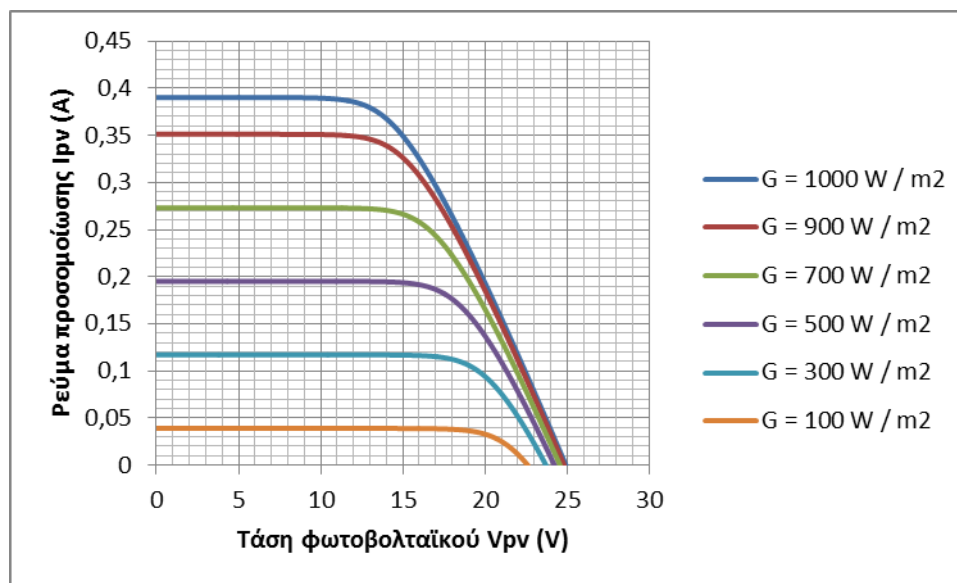


Σχήμα 4-75. Χαρακτηριστικές  $I-V$  για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

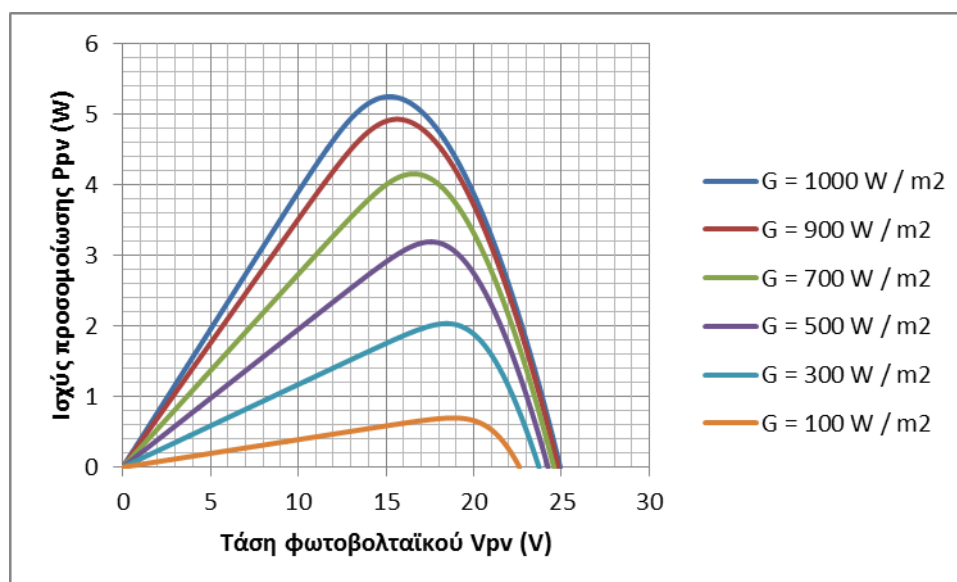


Σχήμα 4-76. Χαρακτηριστικές  $P-V$  για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στα Σχήματα 4-77 και 4-78 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές  $I-V$  και  $P-V$  αντίστοιχα, για θερμοκρασία  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και ακτινοβολίες από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ , όπως αυτές προσομοιώνονται από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το πλαίσιο ST 5.



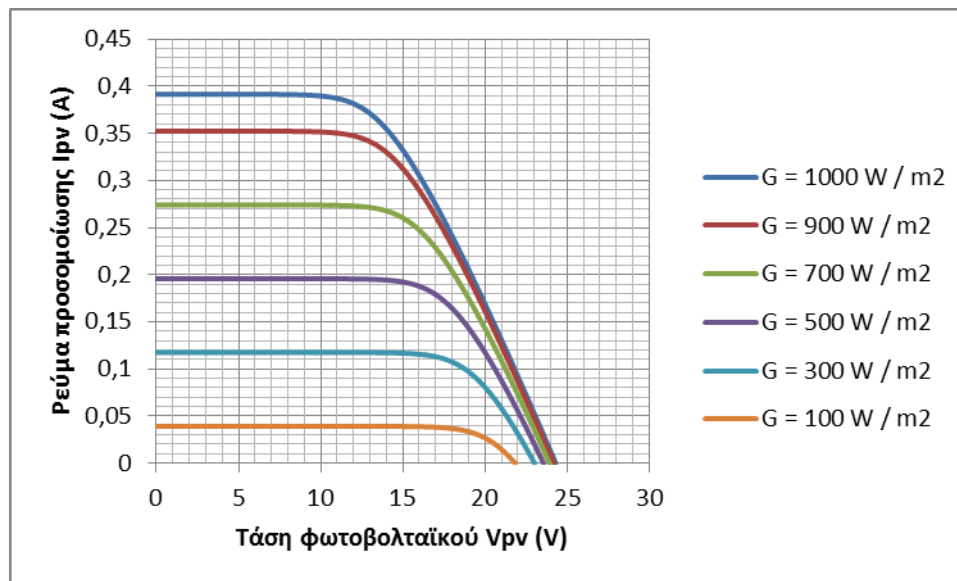
Σχήμα 4-77. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



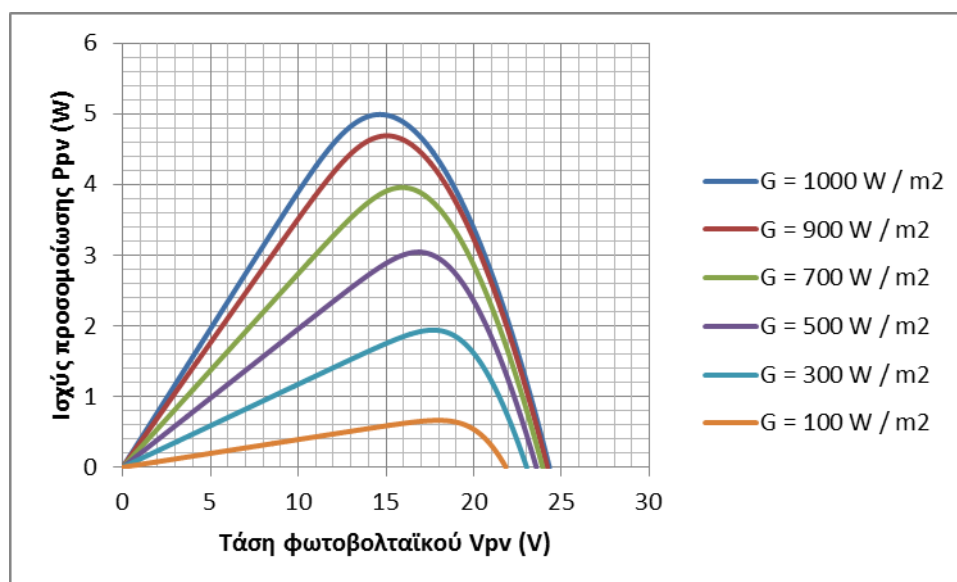
Σχήμα 4-78. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι προσομοιώσεις του μοντέλου αυτού για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  για το πλαίσιο ST 5 φαίνονται στα Σχήματα 4-79 και 4-80. Στα σχήματα αυτά απεικονίζονται αντίστοιχα οι χαρακτηριστικές I-V και P-V για  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



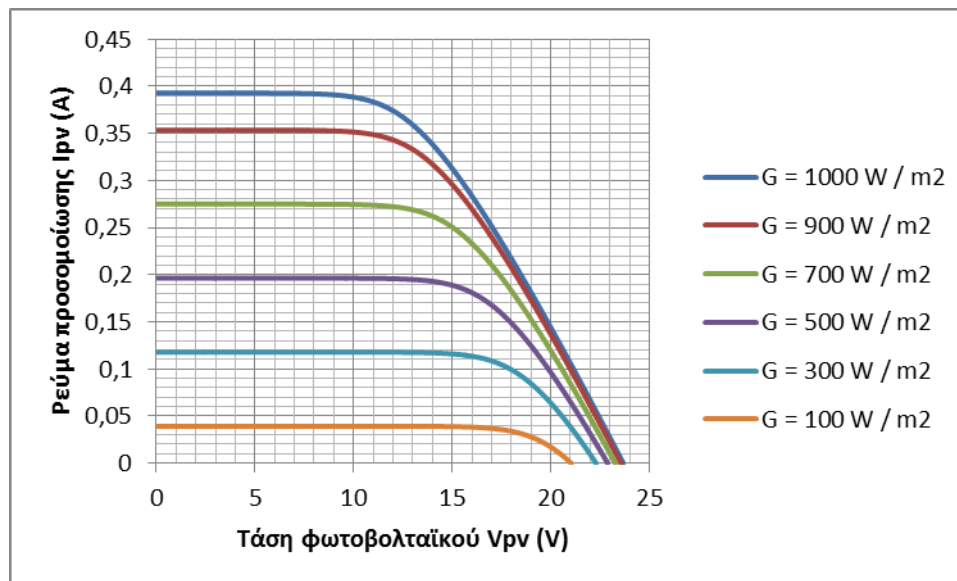


Σχήμα 4-79. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

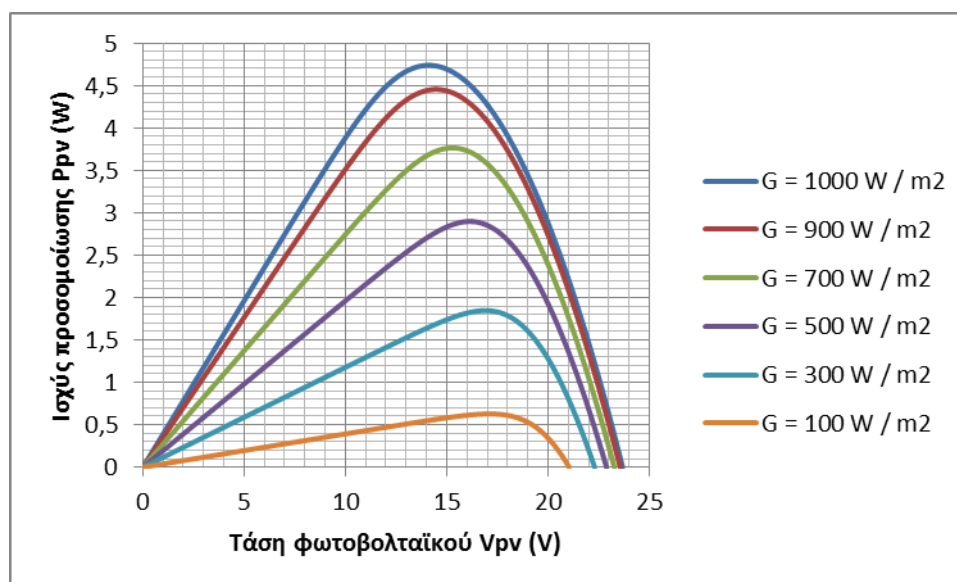


Σχήμα 4-80. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Το 3<sup>ο</sup> μοντέλο υπολογίζει τις χαρακτηριστικές I-V και P-V για το ST 5 στους  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , για τιμές ακτινοβολίας  $100\text{--}1000\text{ W/m}^2$ , όπως φαίνονται αντίστοιχα στα Σχήματα 4-81 και 4-82.

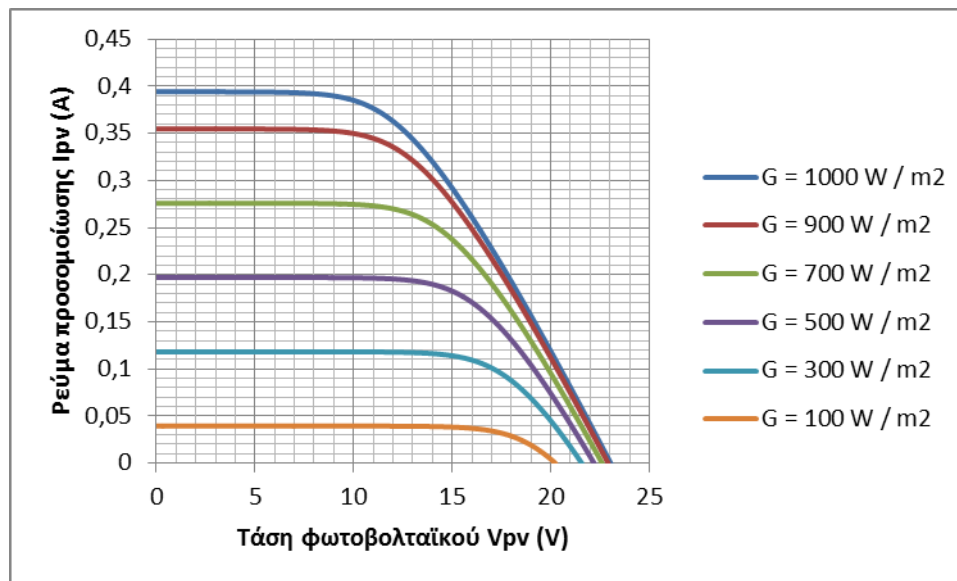


Σχήμα 4-81. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

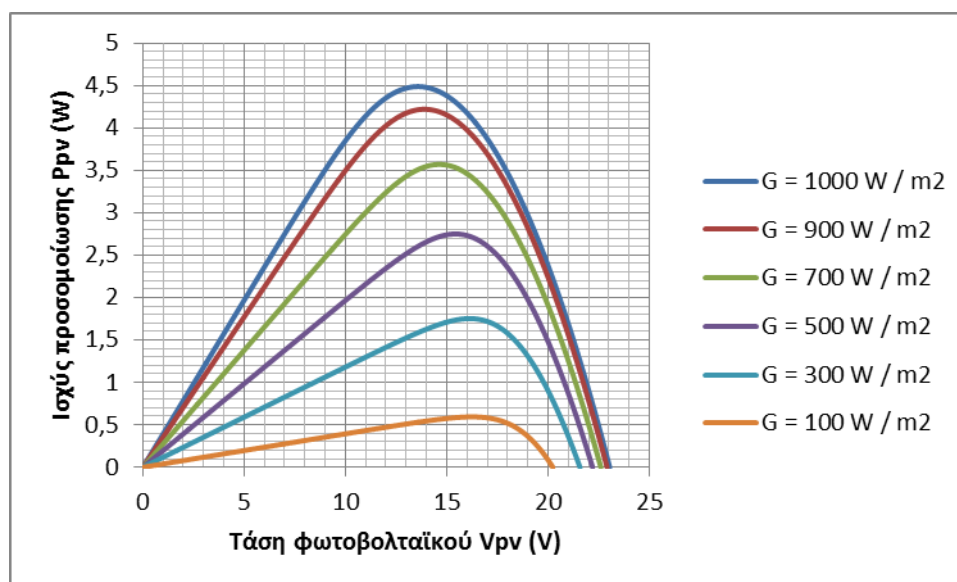


Σχήμα 4-82. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Η τελευταία τιμή θερμοκρασίας για την οποία έγινε προσομοίωση της λειτουργίας του πλαισίου ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο είναι οι  $50^\circ\text{C}$ . Για ακτινοβολίες από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ , οι χαρακτηριστικές I-V και P-V απεικονίζονται στα Σχήματα 4-83 και 4-84 αντίστοιχα.



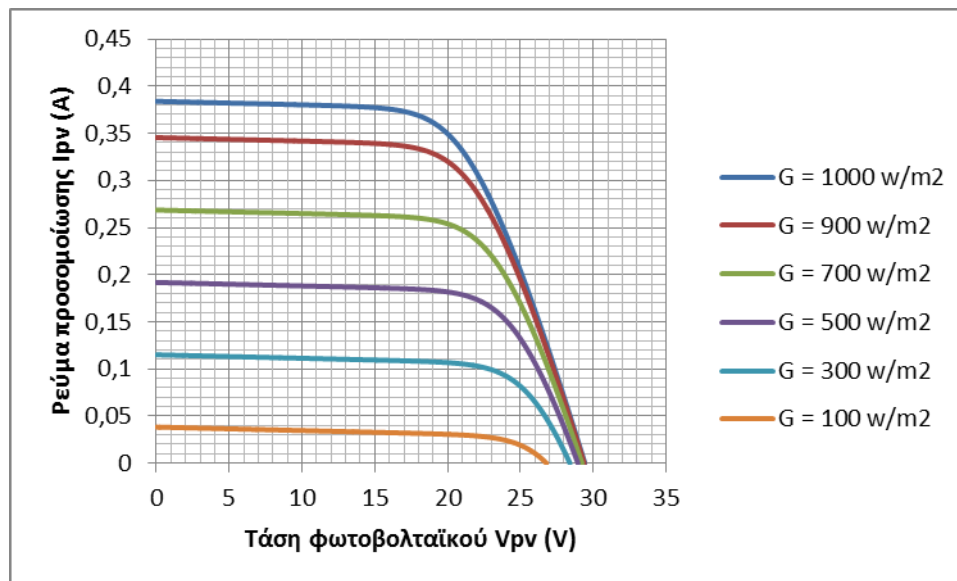
Σχήμα 4-83. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



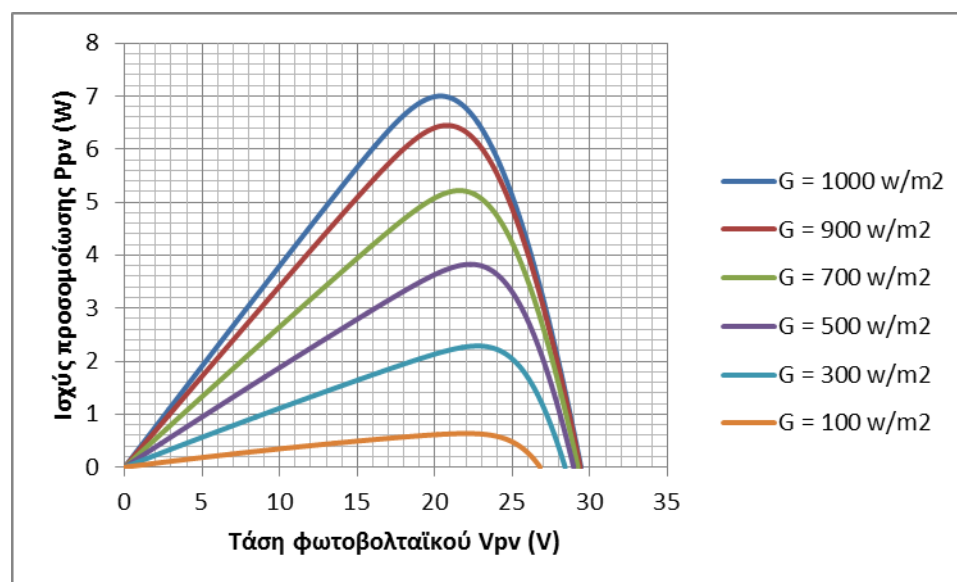
Σχήμα 4-84. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

#### 4.5.4 Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο

Το επόμενο μοντέλο που ελέγχθηκε είναι το 4<sup>ο</sup>. Πρόκειται για μοντέλο που χρησιμοποιείται για προσομοίωση λειτουργίας πλαισίων τεχνολογίας thin-film. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει τη λειτουργία του πλαισίου ST 5. Όπως και με κάθε μοντέλο, ο έλεγχος έγινε για θερμοκρασίες από  $-10$  έως  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ανά  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , και για ακτινοβολίες από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ , ανά  $200\text{ W/m}^2$ . Στους  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που υπολογίζει το μοντέλο αυτό για το ST 5 απεικονίζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 4-85 και 4-86.

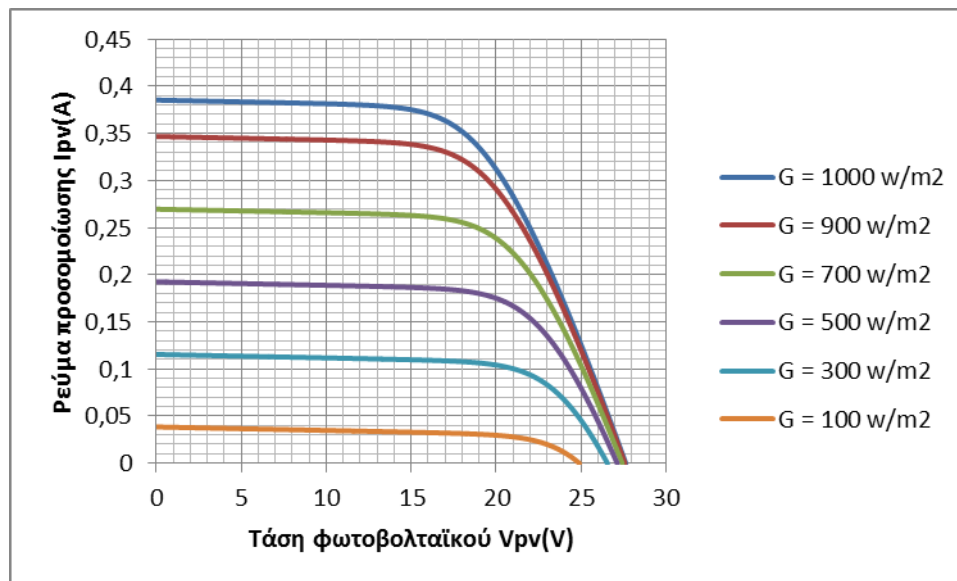


Σχήμα 4-85. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

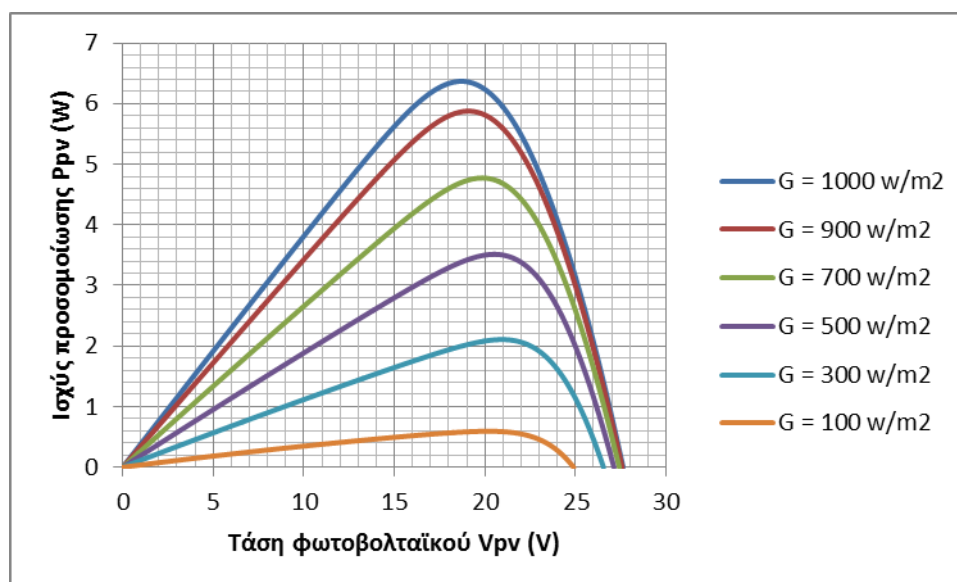


Σχήμα 4-86. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στο Σχήμα 4-87 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές I-V, ενώ στο Σχήμα 4-88 οι χαρακτηριστικές P-V που υπολογίζει το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για το ST 5 για συνθήκες  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

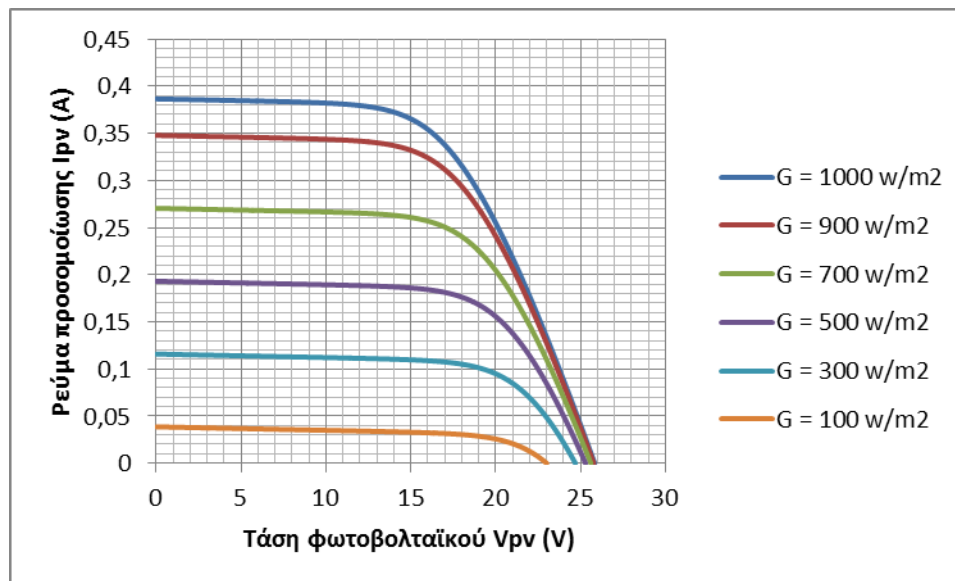


Σχήμα 4-87. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

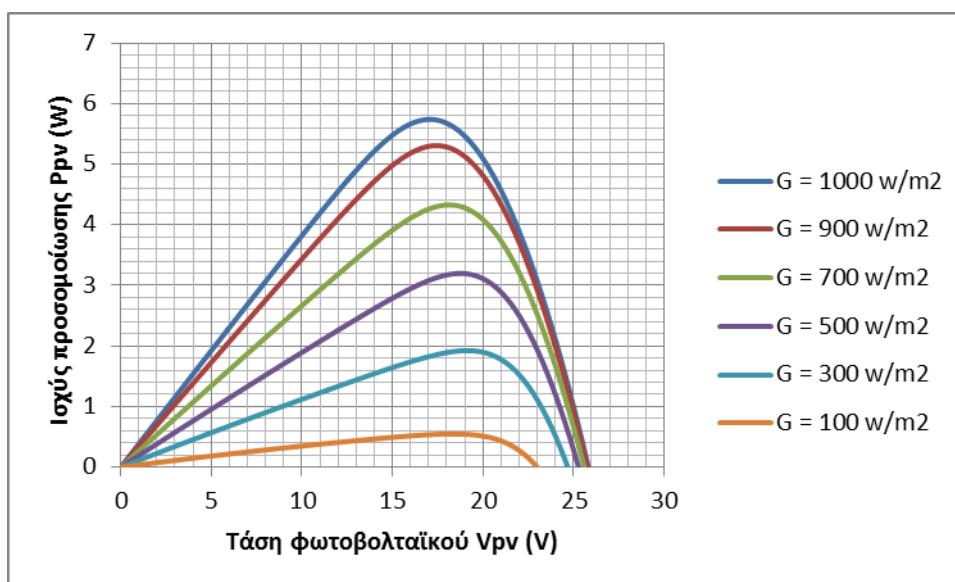


Σχήμα 4-88. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στα Σχήματα 4-89 και 4-90 φαίνονται αντίστοιχα οι χαρακτηριστικές I-V και P-V του πλαισίου ST 5, υπολογισμένες από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

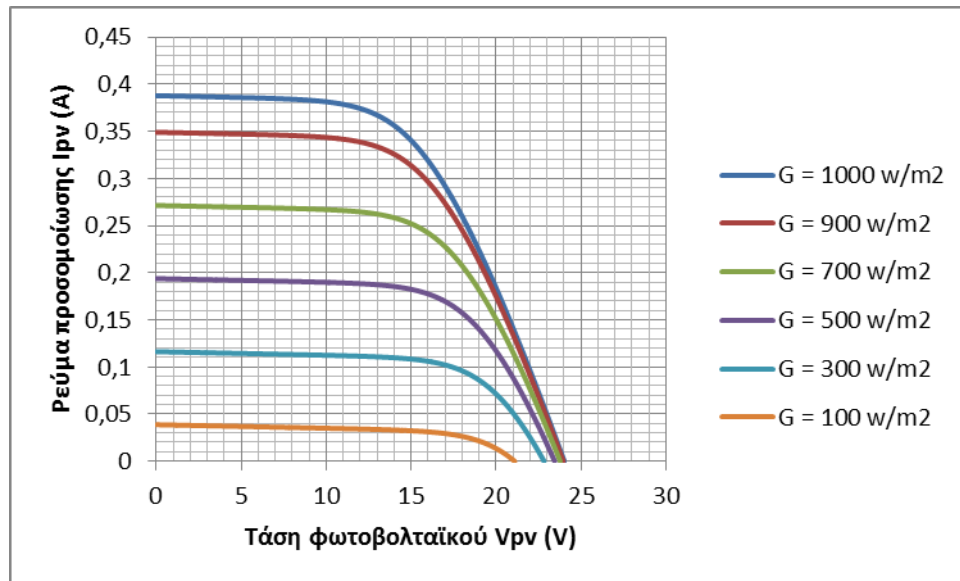


Σχήμα 4-89. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

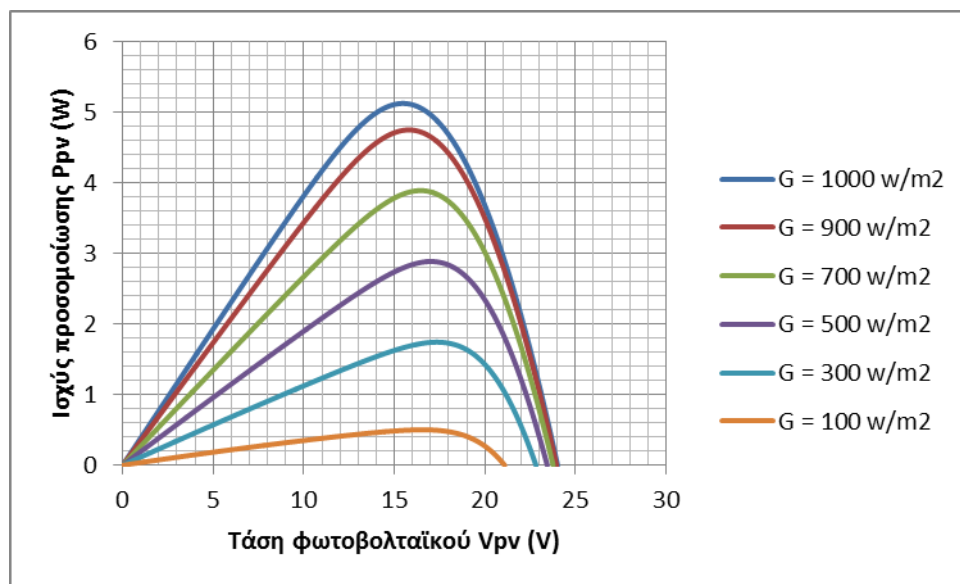


Σχήμα 4-90. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  οι χαρακτηριστικές I-V που υπολογίζει το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για το ST 5 από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-91. Στο Σχήμα 4-92 φαίνονται οι χαρακτηριστικές P-V για τις συνθήκες αυτές.

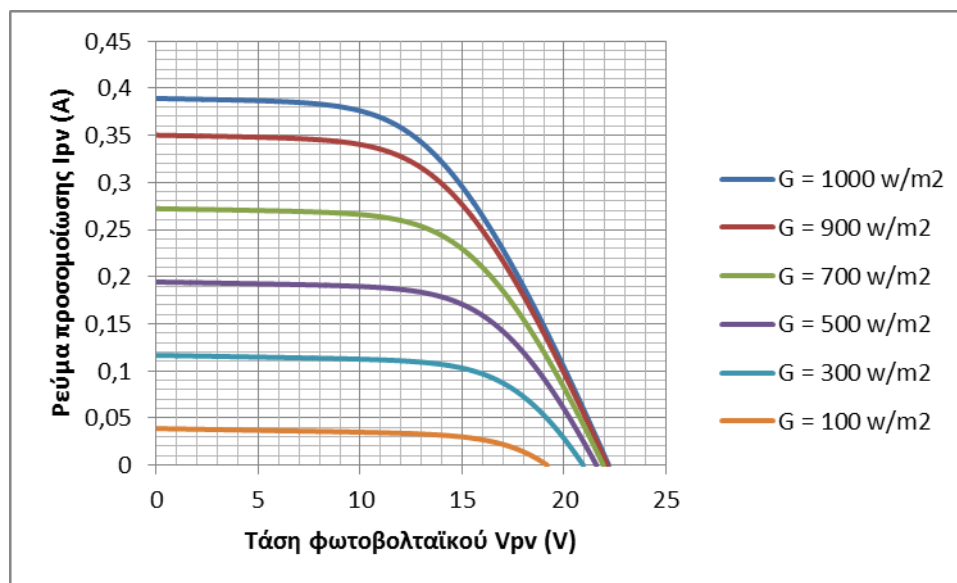


Σχήμα 4-91. Χαρακτηριστικές  $I-V$  για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .

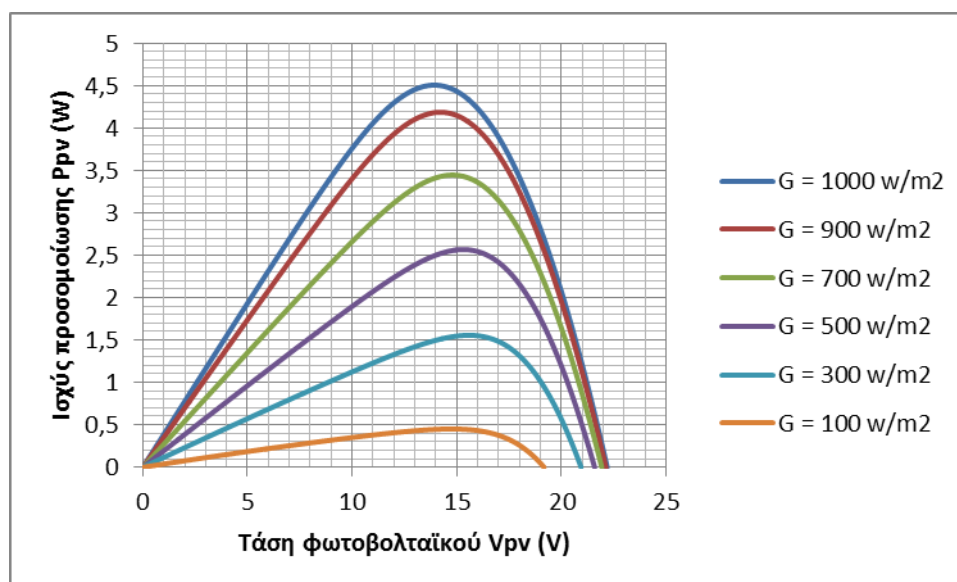


Σχήμα 4-92. Χαρακτηριστικές  $P-V$  για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .

Οι χαρακτηριστικές  $I-V$  και  $P-V$  που απεικονίζονται στα Σχήματα 4-93 και 4-94 αντίστοιχα απεικονίζουν τις προσομοιώσεις του 4<sup>ου</sup> μοντέλου για το ST 5 για τιμή θερμοκρασίας  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .



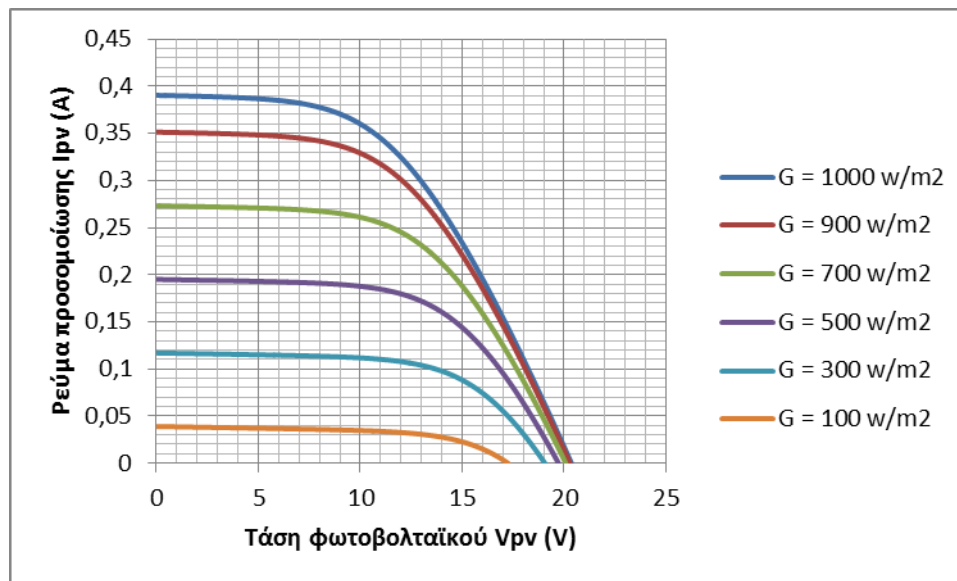
Σχήμα 4-93. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



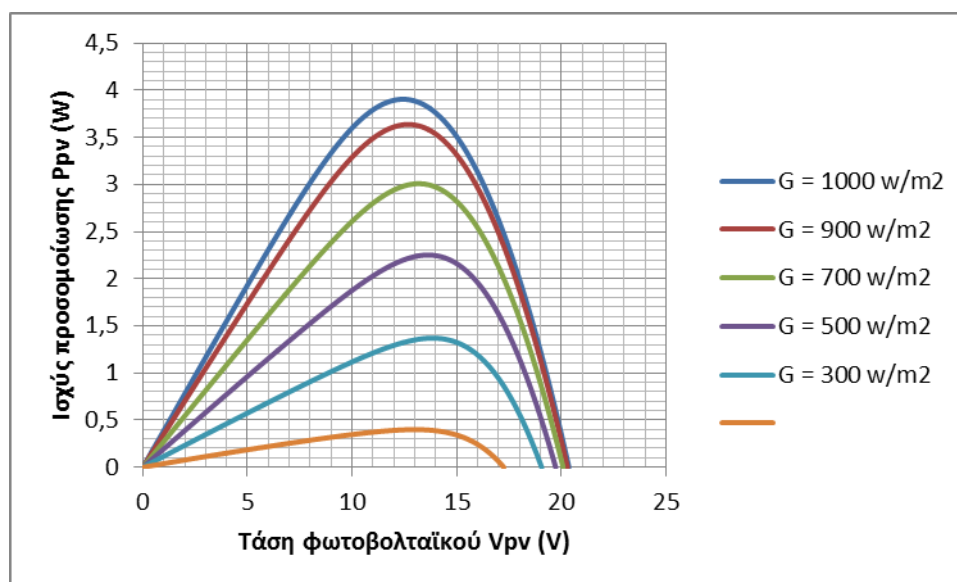
Σχήμα 4-94. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι υπολογισμοί των χαρακτηριστικών I-V και P-V, του 4<sup>ου</sup> μοντέλου για το πλαίσιο ST 5, απεικονίζονται αντίστοιχα στα Σχήματα 4-95 και 4-96 για συνθήκες  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



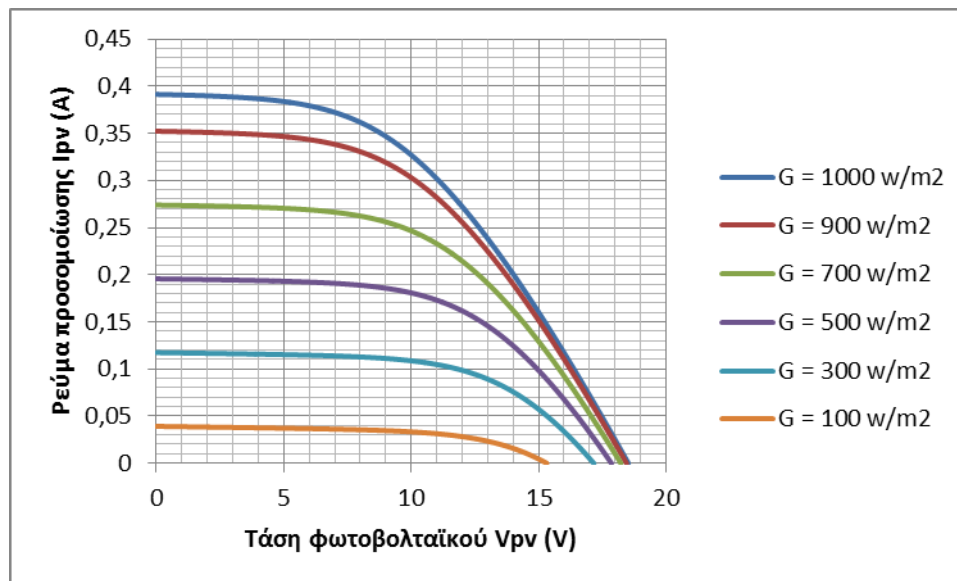


Σχήμα 4-95. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

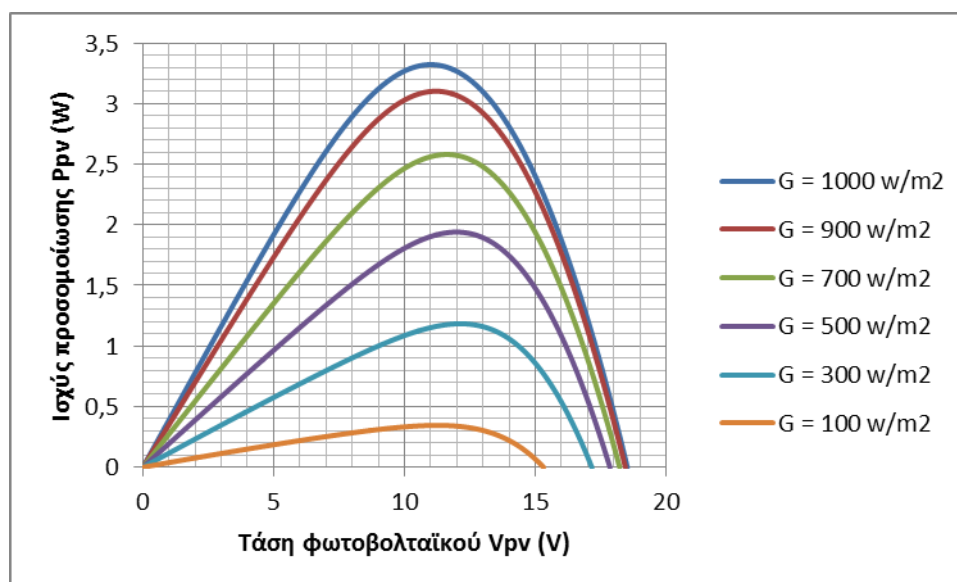


Σχήμα 4-96. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Ο τελευταίος έλεγχος που έγινε για το 4<sup>ο</sup> μοντέλο αφορά τη θερμοκρασία των  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που εξήγαγε το μοντέλο για το πλαίσιο αυτό και για ακτινοβολίες 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  απεικονίζονται στα Σχήματα 4-97 και 4-98 αντίστοιχα.



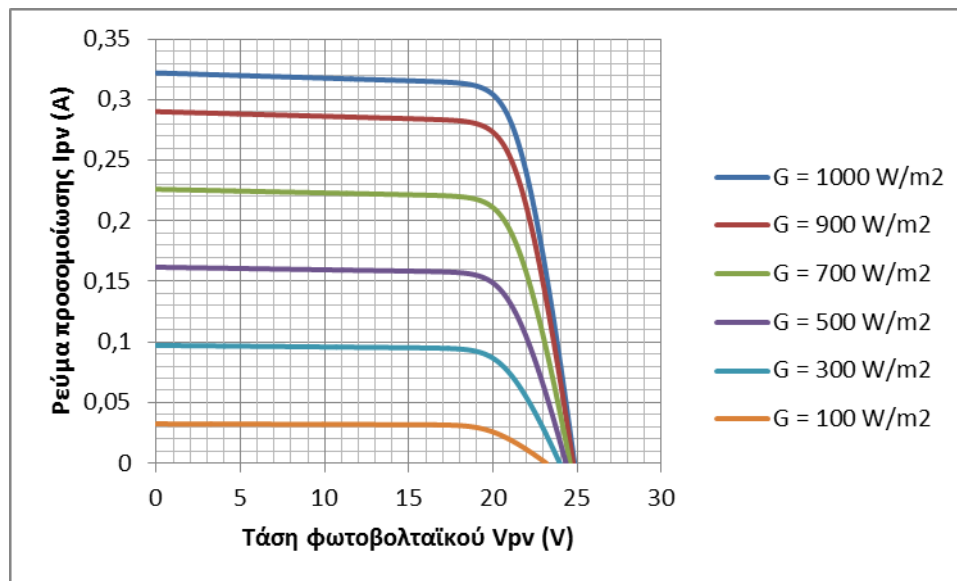
Σχήμα 4-97. Χαρακτηριστικές I-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



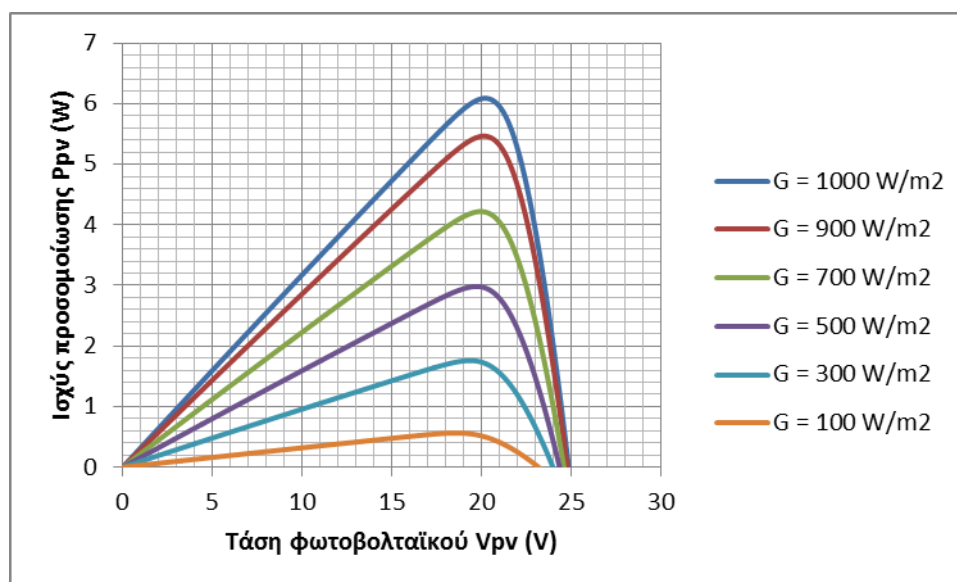
Σχήμα 4-98. Χαρακτηριστικές P-V για το ST 5 από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

#### 4.5.5 Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο

Το 5<sup>ο</sup> μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας του πλαισίου ET-M53605. Για να ελεγχθεί η ικανότητα του μοντέλου, όσον αφορά την προσομοίωση, ελέγχθηκαν οι χαρακτηριστικές που υπολογίζει για τιμές θερμοκρασίας από  $-10$  έως και  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ανά  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και σε συνθήκες ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  ανά  $200\text{ W/m}^2$ , όπως κάθε μοντέλο. Στα Σχήματα 4-99 και 4-100 αντίστοιχα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές I-V και P-V για  $T=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

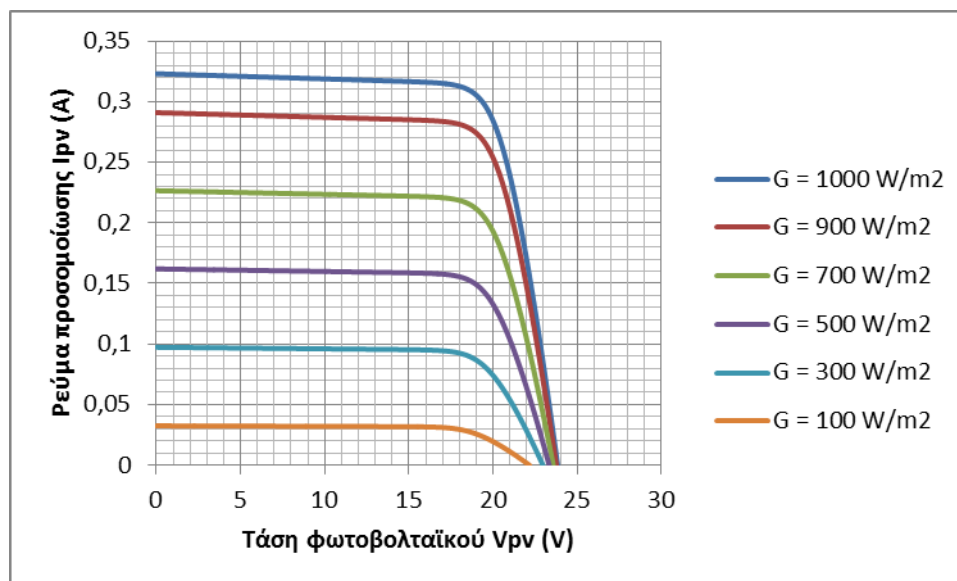


Σχήμα 4-99. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

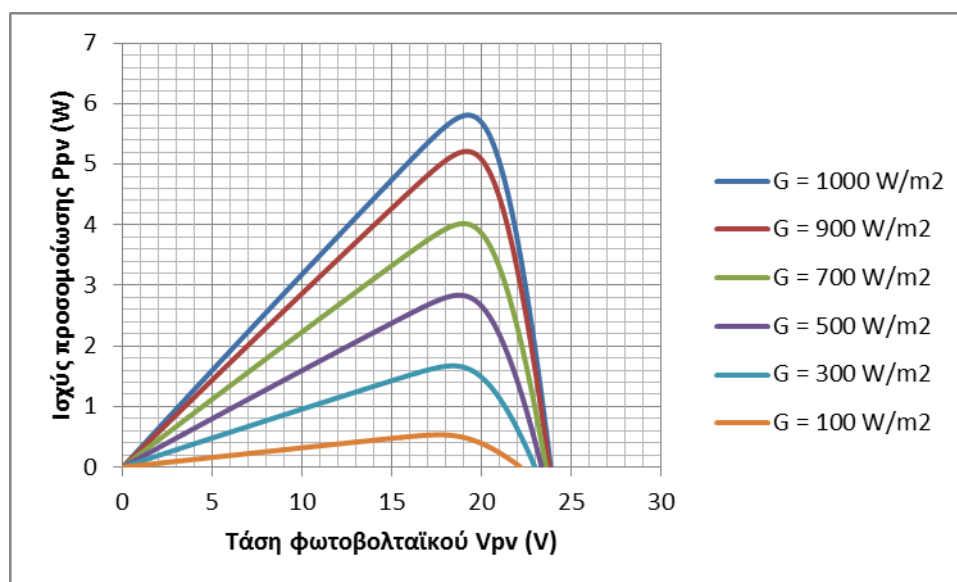


Σχήμα 4-100. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  το 5<sup>ο</sup> μοντέλο υπολογίζει τις χαρακτηριστικές ρεύματος και ισχύος ως προς την τάση όπως φαίνεται στα Σχήματα 4-101 και 4-102 αντίστοιχα, για τιμές ακτινοβολίας 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

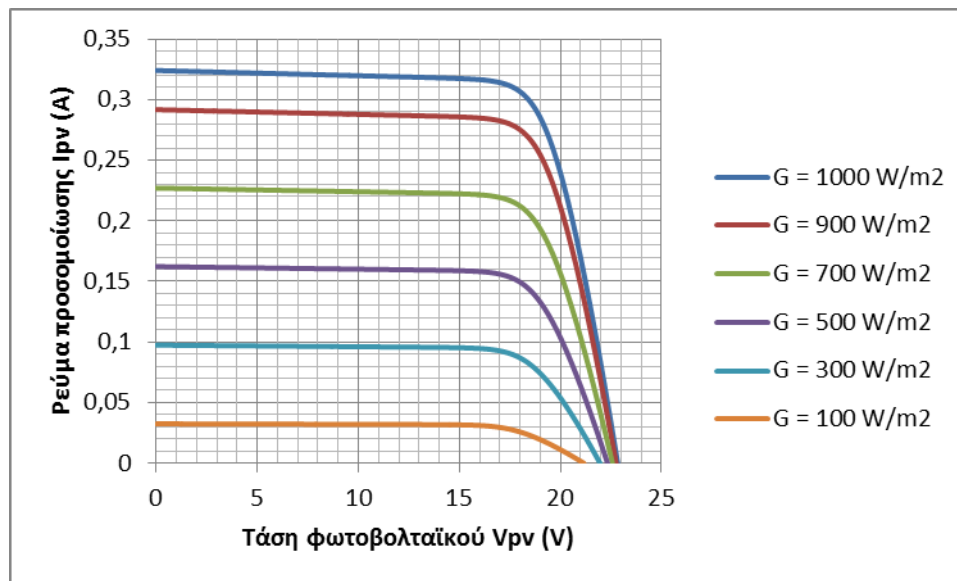


Σχήμα 4-101. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ .

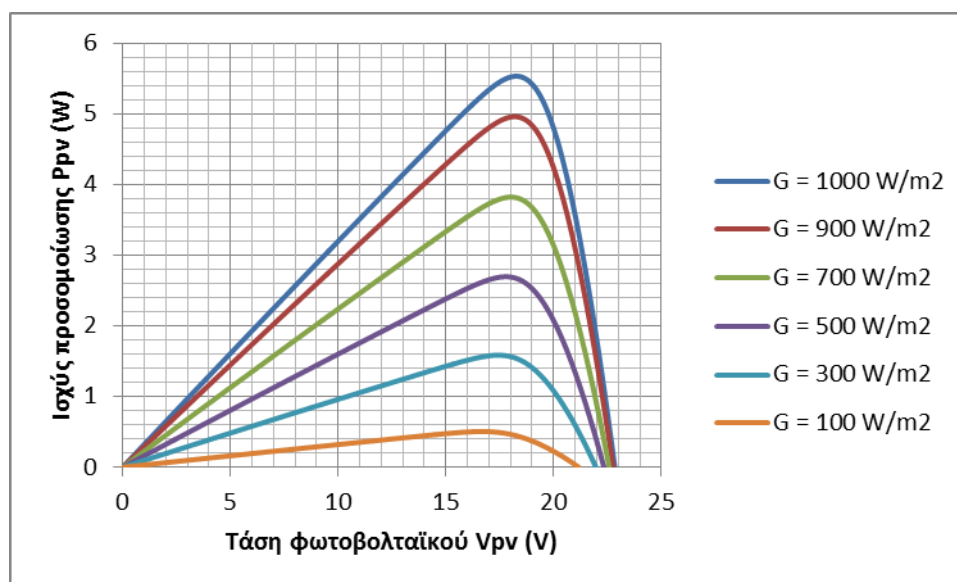


Σχήμα 4-102. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τις χαρακτηριστικές I-V και P-V του πλαισίου ET-M53605 στους 10  $^{\circ}\text{C}$  όπως αυτές απεικονίζονται στα Σχήματα 4-103 και 4-104 για  $G$  από 100 έως 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ .

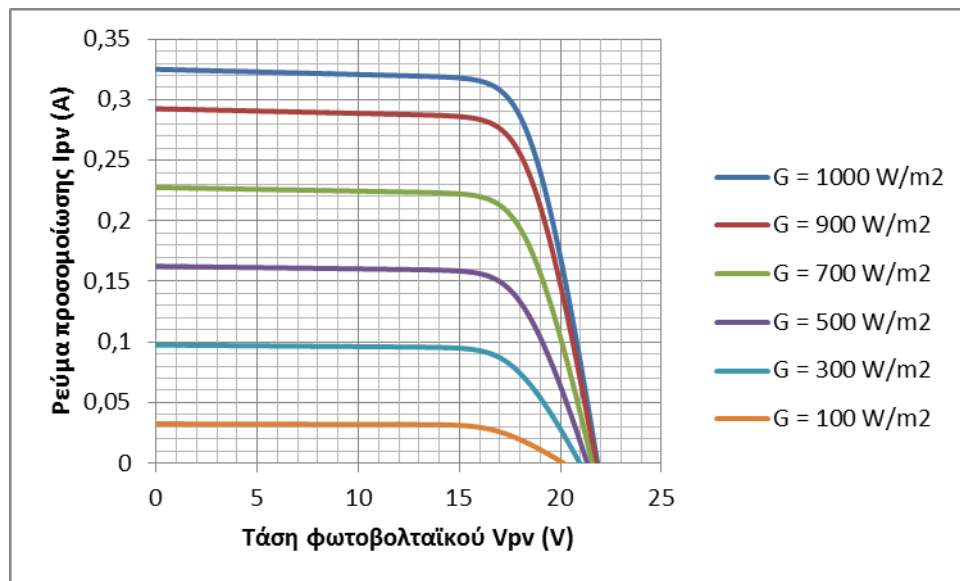


Σχήμα 4-103. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

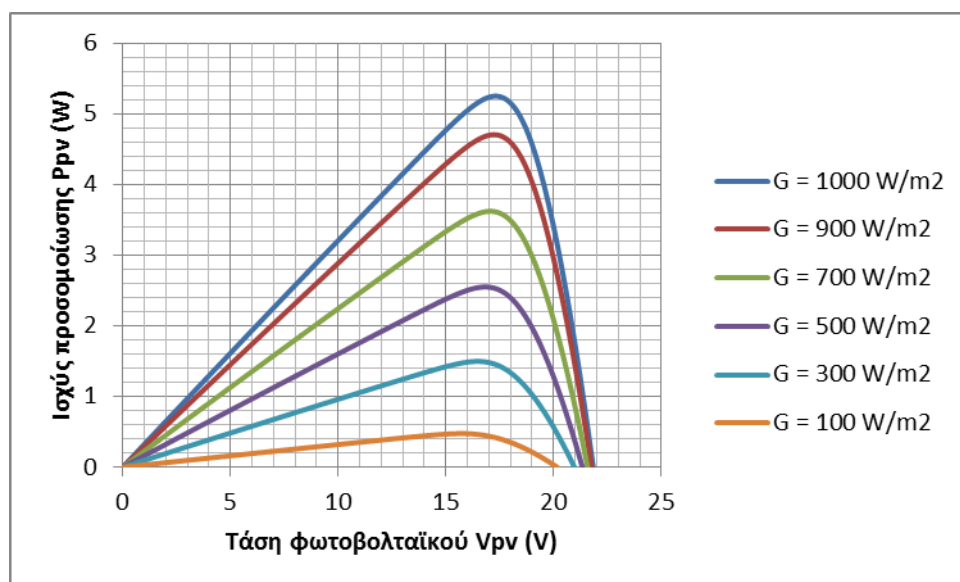


Σχήμα 4-104. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Τα Σχήματα 4-105 και 4-106 απεικονίζουν τις χαρακτηριστικές I-V και P-V αντίστοιχα, που υπολογίζει το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για το πλαίσιο ET-M53605 για θερμοκρασία  $20^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

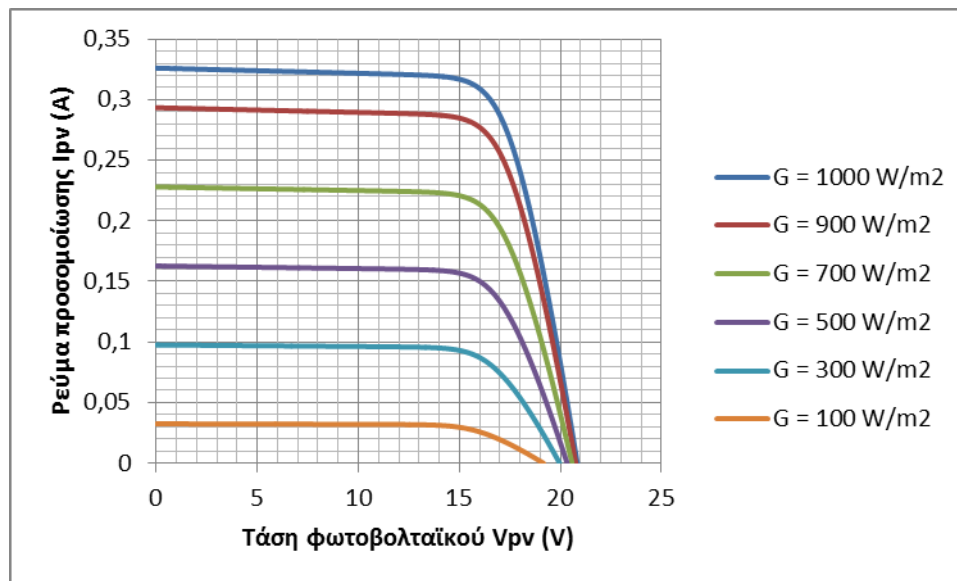


Σχήμα 4-105. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .

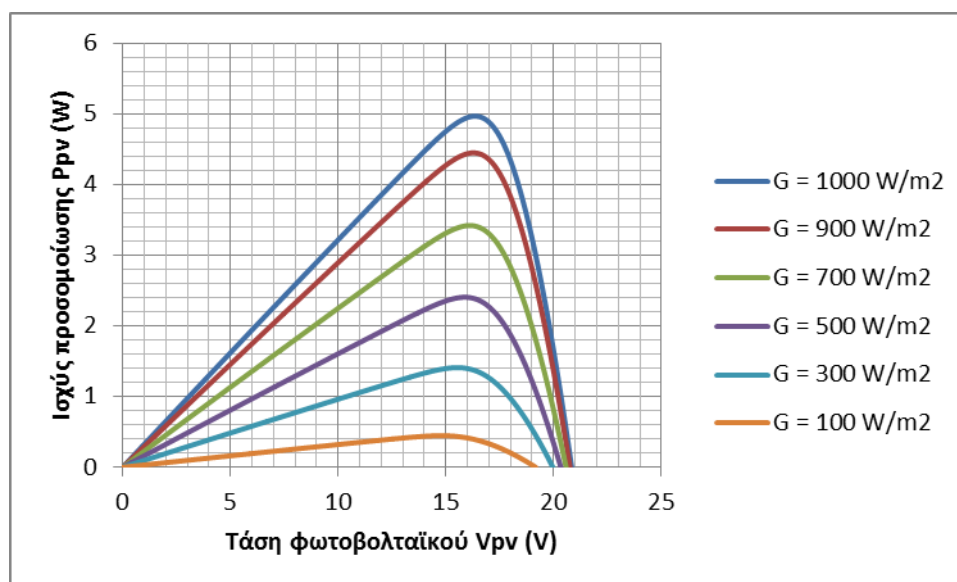


Σχήμα 4-106. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .

Στο Σχήμα 4-107 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές I-V, ενώ στο Σχήμα 4-108 οι χαρακτηριστικές P-V, που υπολογίζονται από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για το ET-M53605 και σε συνθήκες  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W}/\text{m}^2$ .

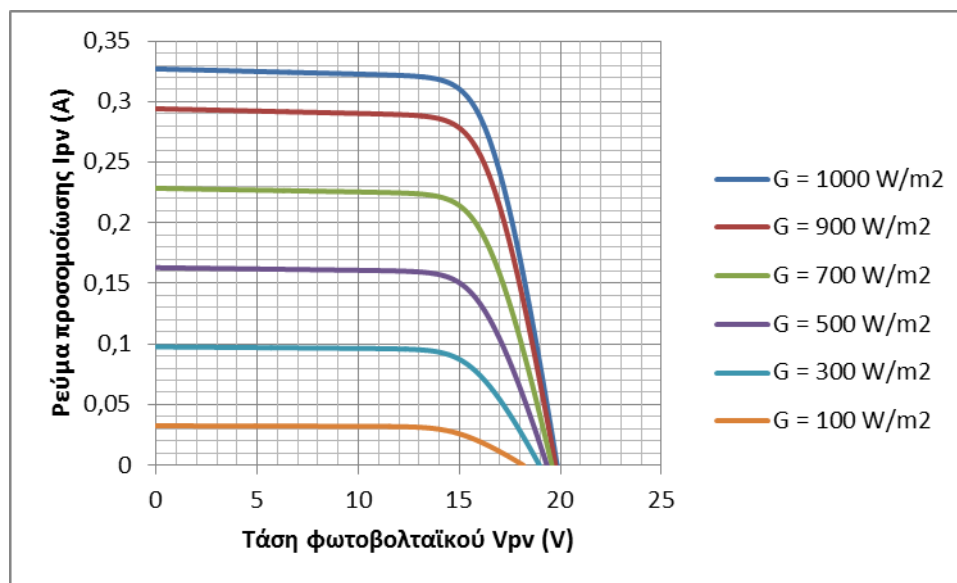


Σχήμα 4-107. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

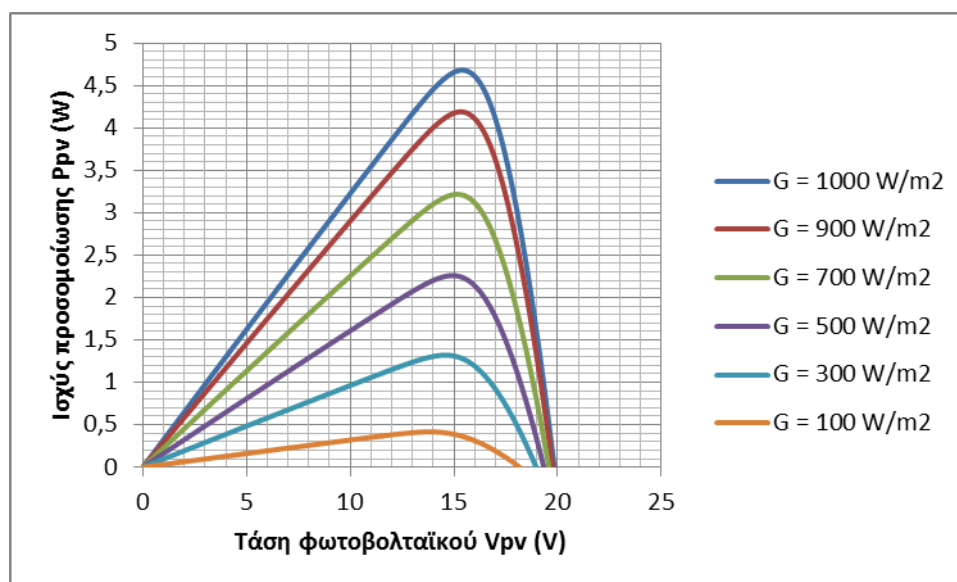


Σχήμα 4-108. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στους  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και για τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ , το μοντέλο αυτό υπολογίζει, για το ET-M53605, τις χαρακτηριστικές I-V και P-V όπως αυτές απεικονίζονται στα Σχήματα 4-109 και 4-110 αντίστοιχα.



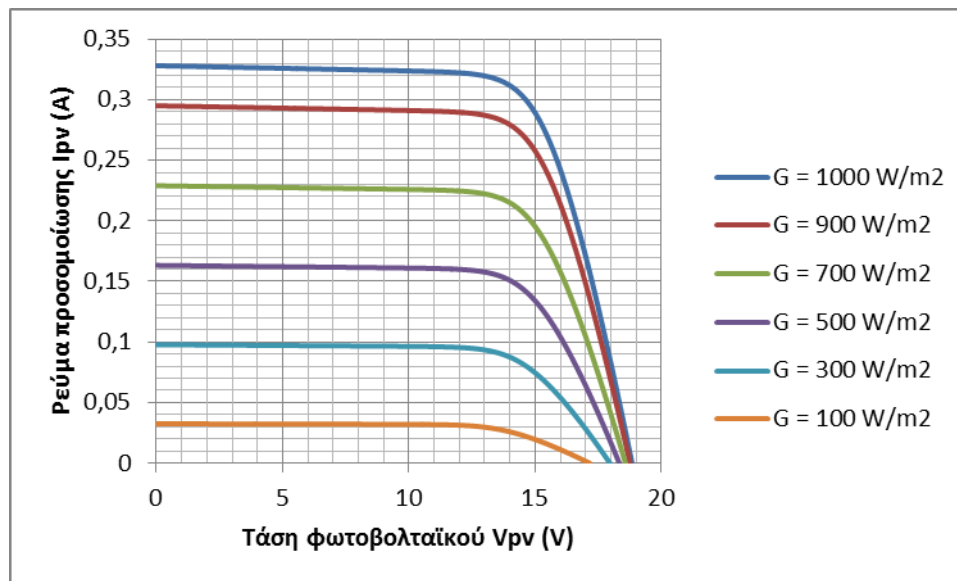
Σχήμα 4-109. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .



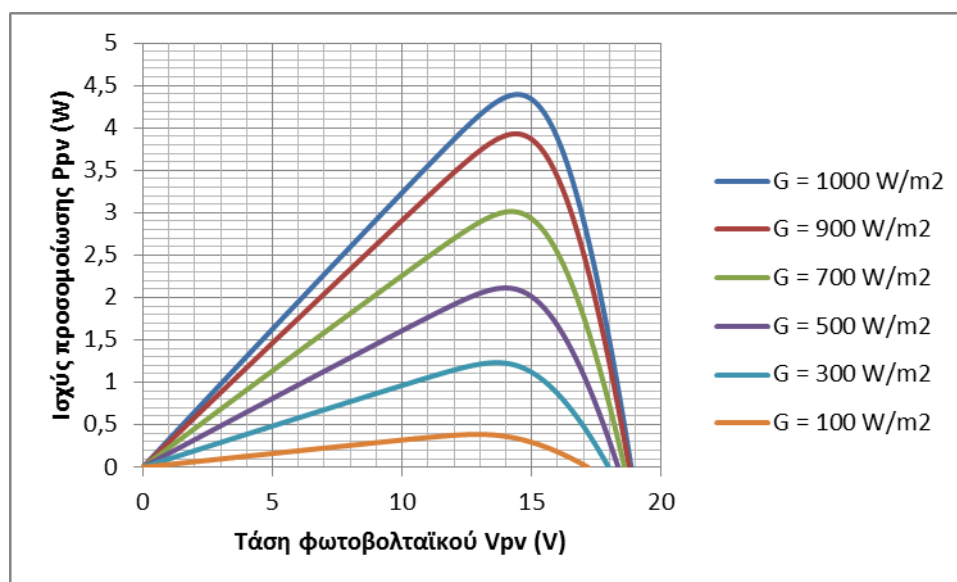
Σχήμα 4-110. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Η τελευταία θερμοκρασία για την οποία ελέγχεται το μοντέλο είναι οι  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Για ακτινοβολίες από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  οι προσομοιώσεις των χαρακτηριστικών I-V και P-V του ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο φαίνονται αντίστοιχα στα Σχήματα 4-111 και 4-112.





Σχήμα 4-111. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

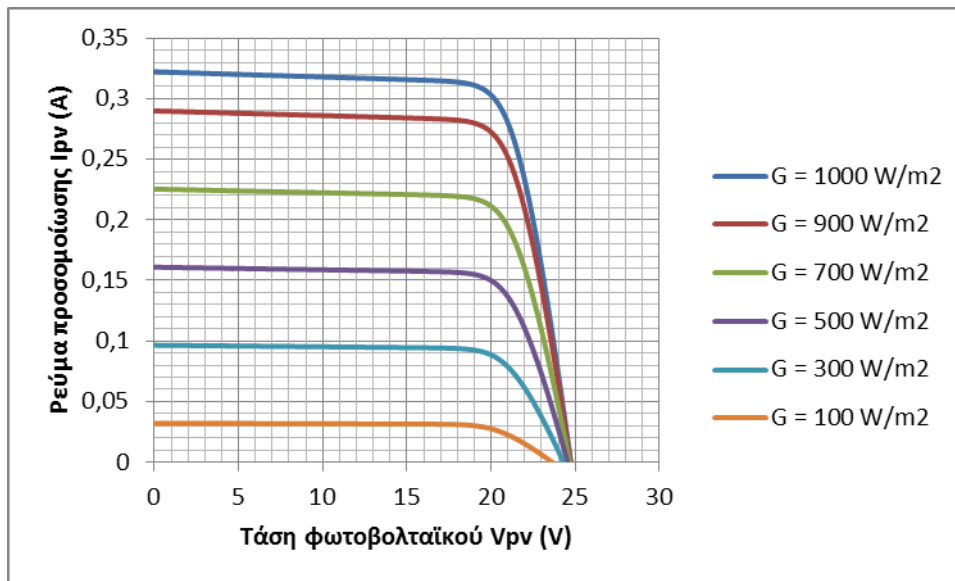


Σχήμα 4-112. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

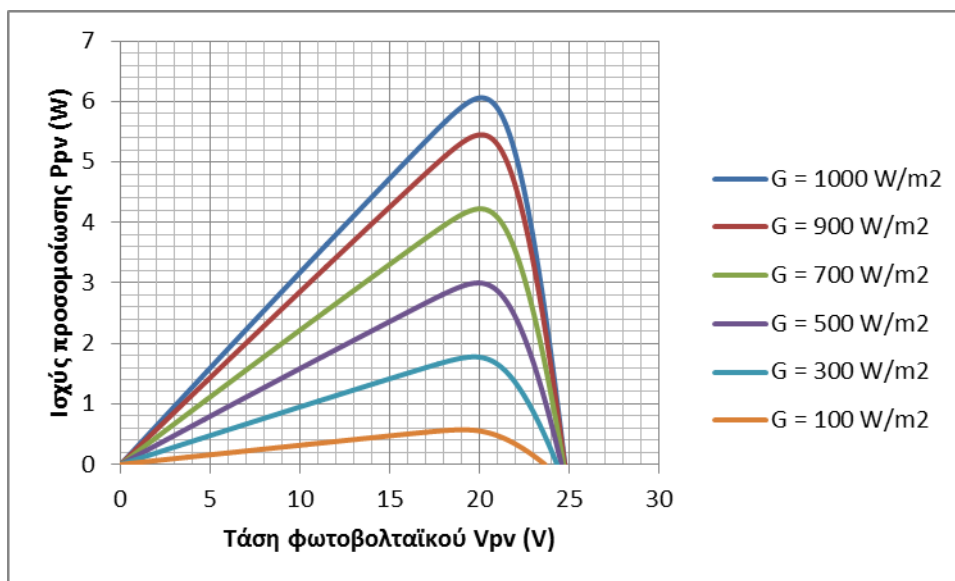
#### 4.5.6 Προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο

Το 6<sup>ο</sup> μοντέλο είναι και το τελευταίο που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Όπως και το προηγούμενο, έτσι και αυτό ελέγχεται ως προς την ικανότητά του να προσομοιώνει τη λειτουργία του πλαισίου ET-M53605. Ο έλεγχος αφορά τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών ρεύματος και ισχύος σε σχέση με την τάση. Η ικανότητα του μοντέλου να υπολογίσει τις χαρακτηριστικές εξετάζεται για τιμές θερμοκρασίας από  $-10$  έως  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ανά  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  με βήμα  $200\text{ W/m}^2$ . Στο Σχήμα 4-113 φαίνονται οι

χαρακτηριστικές I-V με τα δεδομένα αυτά για τιμή θερμοκρασίας  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Οι χαρακτηριστικές P-V φαίνονται στο Σχήμα 4-114.

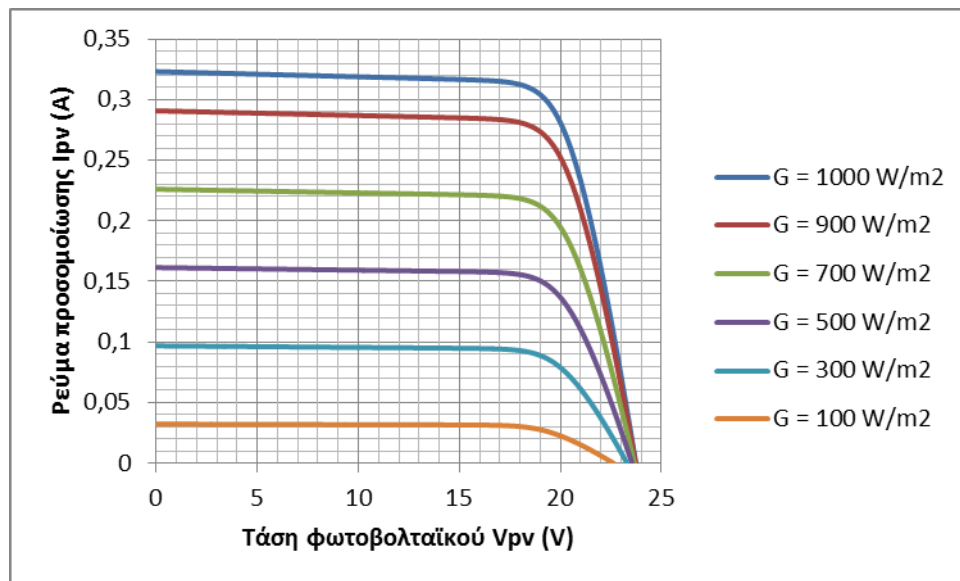


Σχήμα 4-113. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

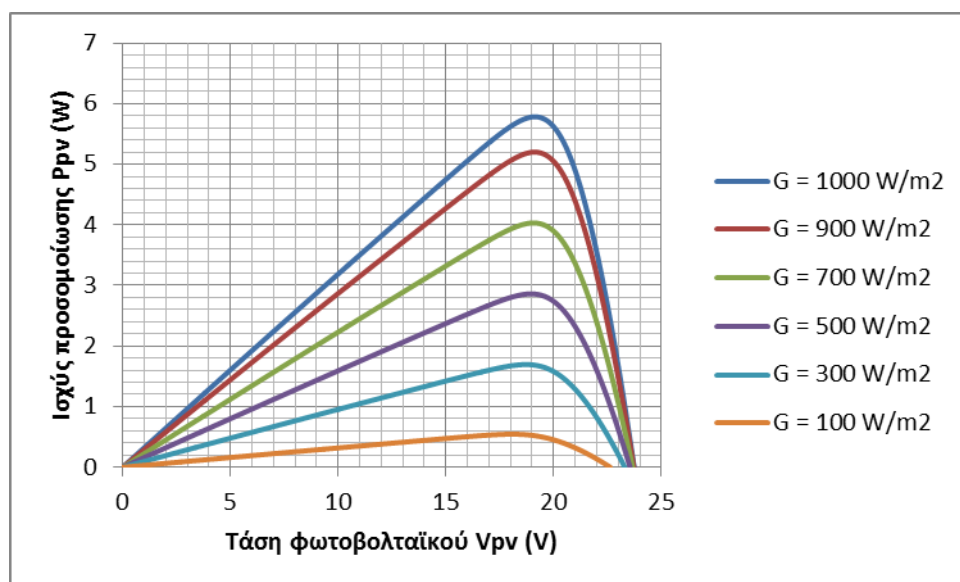


Σχήμα 4-114. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Στα Σχήματα 4-115 και 4-116, αντίστοιχα, απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που υπολογίζει το μοντέλο αυτό για το ET-M53605 σε συνθήκες  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

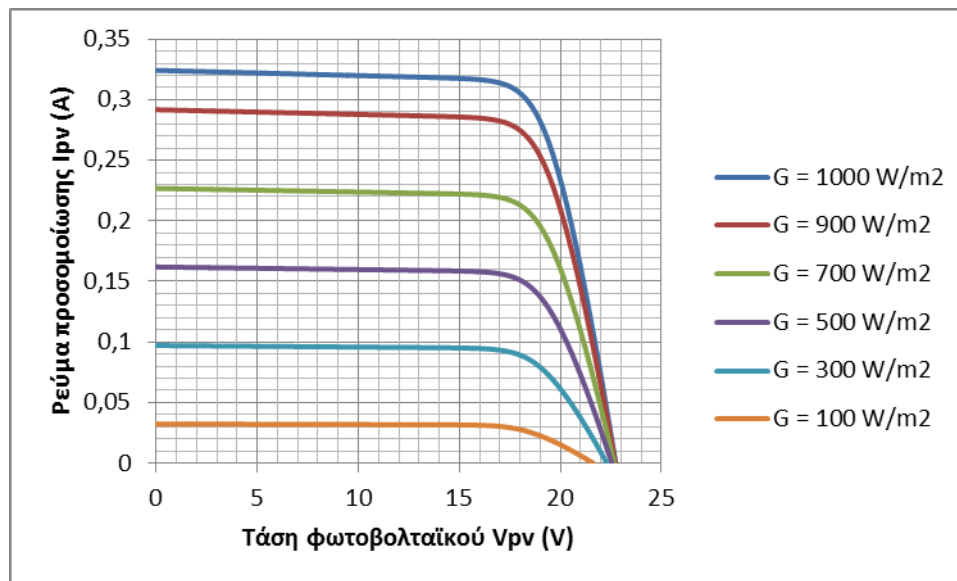


Σχήμα 4-115. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

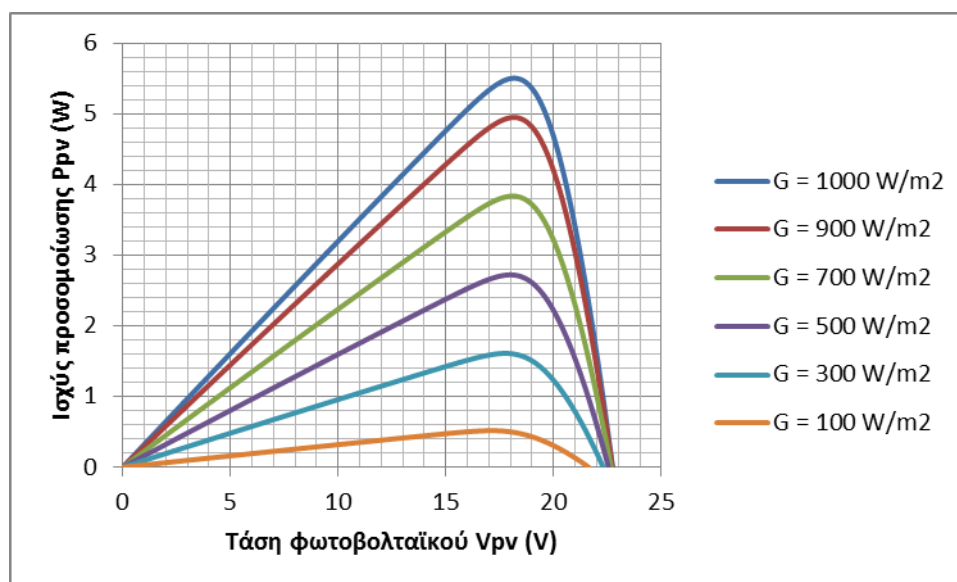


Σχήμα 4-116. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V που φαίνονται στο Σχήμα 4-117, όπως και οι χαρακτηριστικές P-V στο Σχήμα 4-118, υπολογίζονται από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για το πλαίσιο ET-M53605 για τιμή θερμοκρασίας  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

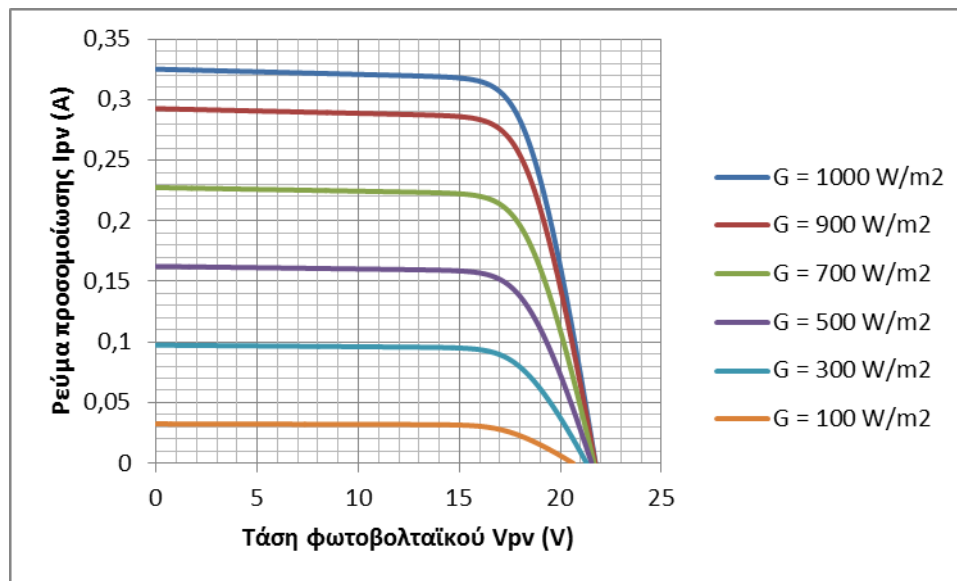


Σχήμα 4-117. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

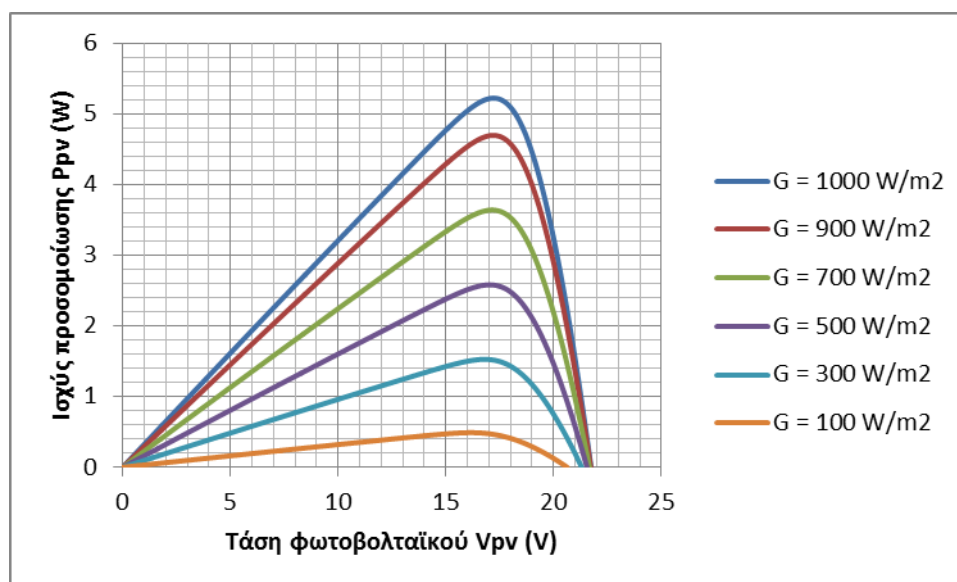


Σχήμα 4-118. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Το 6<sup>ο</sup> μοντέλο υπολογίζει τις χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσεως και ισχύος-τάσεως για το ET-M53605, όπως αυτές παρουσιάζονται στα Σχήματα 4-119 και 4-120, για συνθήκες  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

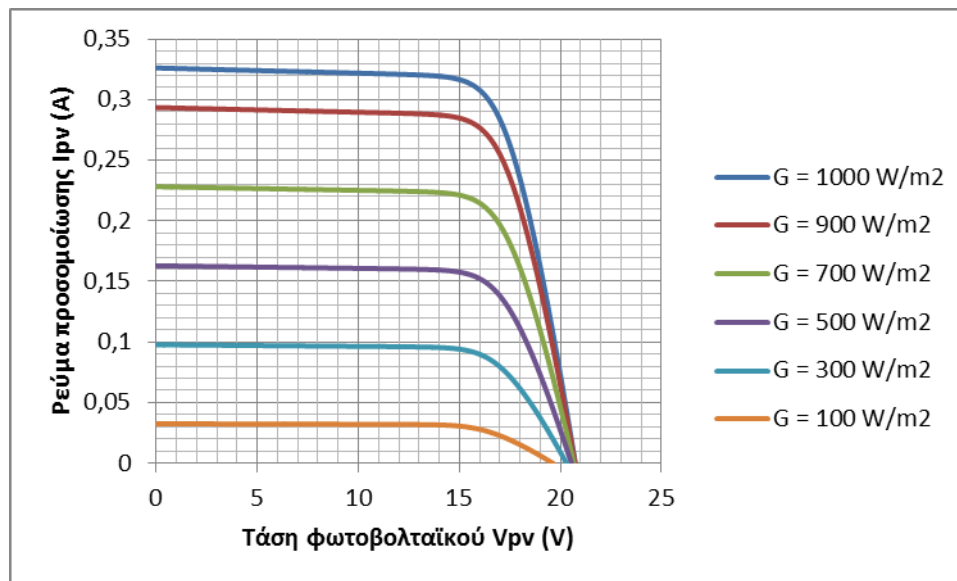


Σχήμα 4-119. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

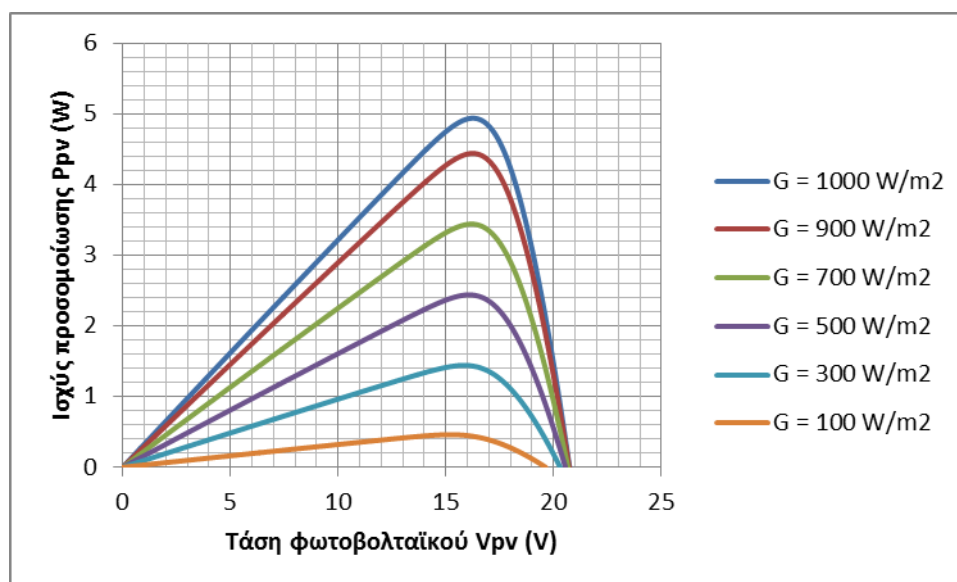


Σχήμα 4-120. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=20^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V, στα Σχήματα 4-121 και 4-122 αντίστοιχα, είναι οι προσομοιώσεις του 6<sup>ου</sup> μοντέλου για το ET-M53605 για θερμοκρασία  $30^\circ\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000 \text{ W/m}^2$ .

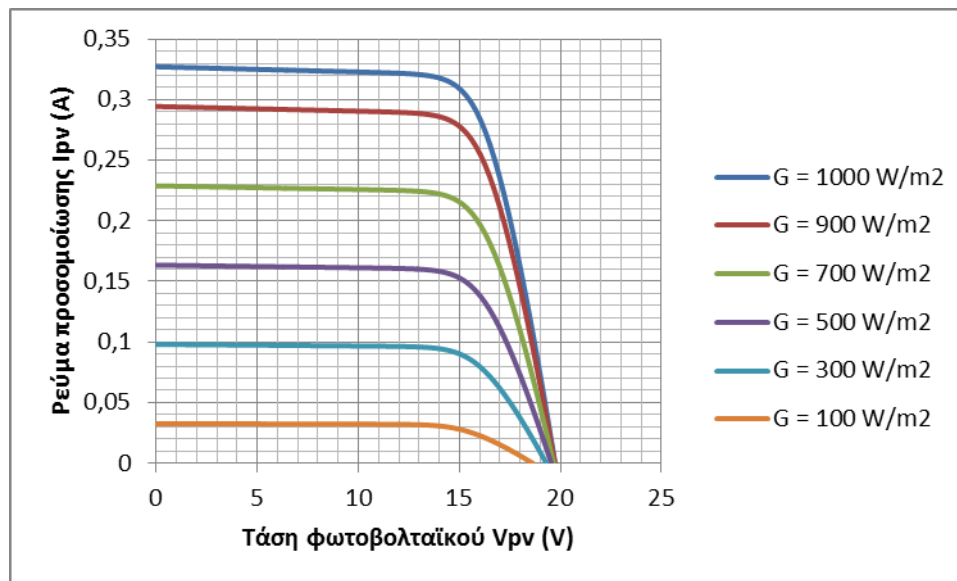


Σχήμα 4-121. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

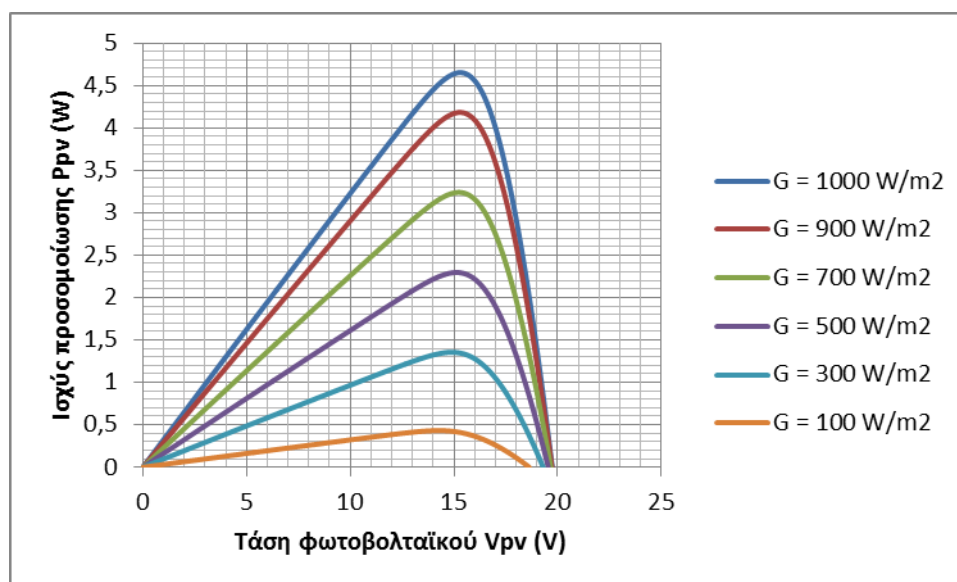


Σχήμα 4-122. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Οι υπολογισμοί του 6<sup>ου</sup> μοντέλου για το ET-M53605, σε συνθήκες  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $G$  από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ , φαίνονται στα Σχήματα 4-123 και 4-124. Το Σχήμα 4-123 απεικονίζει τις χαρακτηριστικές I-V, ενώ στο Σχήμα 4-124 φαίνονται οι χαρακτηριστικές P-V.

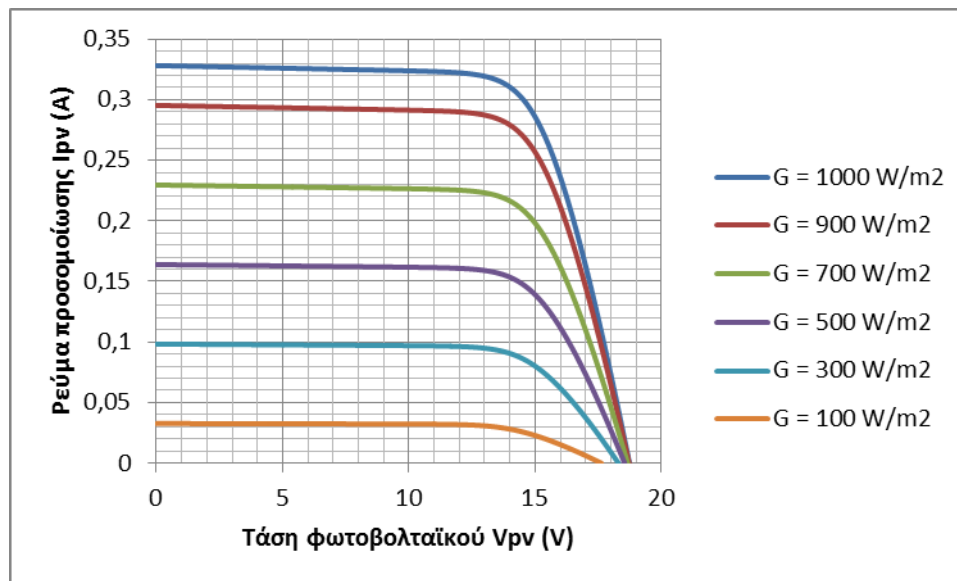


Σχήμα 4-123. Χαρακτηριστικές I-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

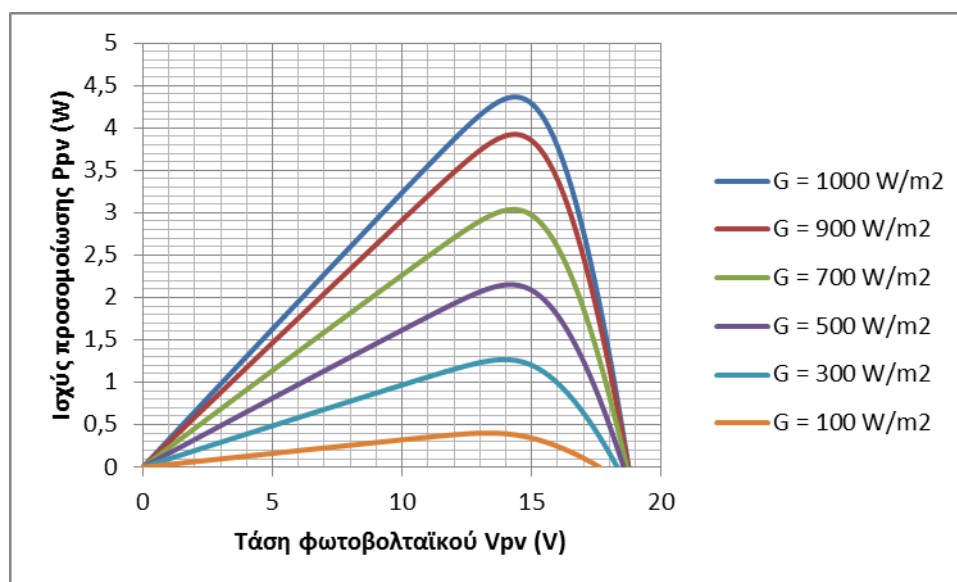


Σχήμα 4-124. Χαρακτηριστικές P-V για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  και από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$ .

Ο τελευταίος έλεγχος του 6<sup>ου</sup> μοντέλου για το ET-M53605 αφορά τη θερμοκρασία  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που υπολογίζει το μοντέλο για τη θερμοκρασία αυτή, για τιμές ακτινοβολίας από 100 έως  $1000\text{ W/m}^2$  απεικονίζονται στα Σχήματα 4-125 και 4-126 αντίστοιχα.



Σχήμα 4-125. Χαρακτηριστικές  $I$ - $V$  για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50$  °C και  $G$  από 100 έως 1000  $W/m^2$ .



Σχήμα 4-126. Χαρακτηριστικές  $P$ - $V$  για το ET-M53605 από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για  $T=50$  °C και  $G$  από 100 έως 1000  $W/m^2$ .



# 5.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

### 5.1 Πειραματική διαδικασία

Για την αξιολόγηση των μοντέλων ως προς την ακρίβεια προσομοίωσης της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις σε ανοικτό χώρο. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα χρονική περίοδο επικρατούσε μια σχετικά σταθερή ηλιοφάνεια στο Ακρωτήρι Χανίων, στην Πολυτεχνειούπολη. Σε συνθήκες ηλιοφάνειας το φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνδεόταν μέσω της διάταξης με δυο πολύμετρα, ένα για τη μέτρηση της τάσεως και ένα για τη μέτρηση του ρεύματος που παρήγαγε το πλαίσιο. Πυρανόμετρο συνδεδεμένο σε πολύμετρο χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το πυρανόμετρο προσαρμόστηκε επί του πλαισίου με τρόπο που να μην προκαλεί σκίαση και οι μετρήσεις για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας λήφθηκαν με προσαρμογή της κλίσης του πλαισίου σε σχέση με τη θέση του ήλιου. Επίσης προσαρμόστηκε στο πλαίσιο θερμόμετρο, με τρόπο ώστε να βρίσκεται υπό σκιά, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

Η θερμοκρασία του υλικού στο πλαίσιο προκύπτει σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος από την εξίσωση [10]:

$$T = T_{amb} + (NOCT - T_{amb\_ref}) \frac{G}{G_{ref}} \quad (5.1)$$

όπου:

$T$  η θερμοκρασία του υλικού στο πλαίσιο ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_{amb}$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος που μετρήθηκε ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$NOCT$  η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου που παραθέτουν οι κατασκευαστές ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_{amb\_ref}$  η θερμοκρασία αναφοράς για τη θερμοκρασία  $NOCT$  που παραθέτουν οι κατασκευαστές ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$G$  η ακτινοβολία που μετρήθηκε ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),

$G_{ref}$  η ακτινοβολία αναφοράς για θερμοκρασία  $NOCT$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Για την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν δυο τύποι πλαισίων. Το πλαίσιο SIEMENS ST 5 τεχνολογίας λεπτού υμενίου (thin-film) και το πλαίσιο ET-SOLAR ET-M 53605 το οποίο είναι μονοκρυσταλλικό. Στον Πίνακα 5-1 φαίνονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των παραπάνω πλαισίων όπως παρατίθενται από τους κατασκευαστές.

<b>Πίνακας 5-1. Χαρακτηριστικά λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων</b>		
	SIEMENS ST 5	ET-SOLAR ET-M53605
Μέγιστη τιμή της ισχύος σε STC	$P_{max} = 5 \text{ W}$	$P_{max} = 5 \text{ W}$
Τάση ανοικτοκύκλωσης σε STC	$V_{oc_{ref}} = 25 \text{ V}$	$V_{oc_{ref}} = 21.96 \text{ V}$
Ρεύμα βραχυκυκλώματος σε STC	$I_{sc_{ref}} = 0.37 \text{ A}$	$I_{sc_{ref}} = 0.326 \text{ A}$
Τάση στο MPP σε STC	$V_{mp_{ref}} = 15.6 \text{ V}$	$V_{mp_{ref}} = 18 \text{ V}$
Ρεύμα στο MPP σε STC	$I_{mp_{ref}} = 0.32 \text{ A}$	$I_{mp_{ref}} = 0.29 \text{ A}$
Συντελεστής θερμοκρασίας για την τάση ανοικτοκύκλωσης	$\mu_{voc} = -0.1 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$	$\mu_{voc} = -0.33 \text{ }^{\circ}\text{V}/^{\circ}\text{K}$
Συντελεστής θερμοκρασίας για το ρεύμα βραχυκυκλώματος	$\mu_{isc} = 0.13 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$	$\mu_{isc} = 0.08 \text{ }^{\circ}\text{mA}/^{\circ}\text{K}$
Αριθμός στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά στο πλαίσιο		$N_s = 36$

## 5.2 Μετρήσεις και αποτελέσματα προσομοίωσης

Στον Πίνακα 5-2 απεικονίζονται τα ζεύγη τιμών ακτινοβολίας και θερμοκρασίας ημιαγωγού στο στοιχείο, για τα οποία λήφθηκαν μετρήσεις τάσεως-ρεύματος των φωτοβολταϊκών πλαισίων ST 5 και ET-M53605.

Για κάθε μοντέλο προσομοίωσης, οι παράμετροι των αντιστάσεων (σειριακών και παραλλήλων, όπου υπάρχουν) υπολογίστηκαν με βάση τις τιμές ρεύματος και τάσεως από συγκεκριμένες μετρήσεις που λήφθηκαν με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια:

- Για τα μοντέλα που προσομοιώνουν τη λειτουργία του πλαισίου ST 5 (δηλαδή τα μοντέλα 1, 2, 3 και 4) χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της μέτρησης για ακτινοβολία  $640 \text{ W}/\text{m}^2$  και θερμοκρασία  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Για τα ζεύγη τιμών τάσης-ρεύματος στις συνθήκες αυτές, στο σημείο μέγιστης ισχύος υπολογίστηκε, με χρήση της χαρακτηριστικής

εξίσωσης, η τιμή της σειριακής αντίστασης για το 1<sup>ο</sup>, το 3<sup>ο</sup> και το 4<sup>ο</sup> μοντέλο που περιλαμβάνουν μόνο σειριακή αντίσταση.

- Για το 2<sup>ο</sup> μοντέλο που περιλαμβάνει και παράλληλη αντίσταση, με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής εξίσωσης, λύθηκε σύστημα δυο εξισώσεων, με άγνωστες τη σειριακή και την παράλληλη αντίσταση, στο σημείο βραχυκυκλώματος και στο σημείο μέγιστης ισχύος.
- Για τα μοντέλα που προσομοιώνουν τη λειτουργία του πλαισίου ET-M53605 (δηλαδή τα μοντέλα 1, 2, 3, 5 και 6) χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της μέτρησης για ακτινοβολία  $760 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασία 35 °C. Για το 1<sup>ο</sup> και το 3<sup>ο</sup> μοντέλο έγινε υπολογισμός με βάση τη χαρακτηριστική εξίσωση του κάθε μοντέλου στο σημείο μέγιστης ισχύος. Για τα άλλα μοντέλα που χρειάζονται και παράλληλη αντίσταση λύθηκε σύστημα των χαρακτηριστικών τους εξισώσεων στο σημείο μέγιστης ισχύος και στο σημείο βραχυκυκλώματος.
- Για το 5<sup>ο</sup> και το 6<sup>ο</sup> μοντέλο εκτός των αντιστάσεων απαιτείται και ο υπολογισμός της παραμέτρου  $K$ . Ως εκ τούτου λύνεται σύστημα τριών εξισώσεων με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής και στο σημείο ανοικτοκυκλώματος.

**Πίνακας 5-2. Ζεύγη τιμών ακτινοβολίας-θερμοκρασίας ημιαγωγού για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.**

ST 5			ET-M53605		
Ακτινοβολία $G \text{ (W/m}^2\text{)}$	Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{amb} \text{ (}^\circ\text{C)}$	Θερμοκρασία ημιαγωγού $T \text{ (}^\circ\text{C)}$	Ακτινοβολία $G \text{ (W/m}^2\text{)}$	Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{amb} \text{ (}^\circ\text{C)}$	Θερμοκρασία ημιαγωγού $T \text{ (}^\circ\text{C)}$
370	14	26	570	17	34
610	10	30	760	13	35
640	14	35	920	14	41
930	13	44	1000	16	46

### 5.2.1 Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ST 5 με το 1<sup>ο</sup> μοντέλο

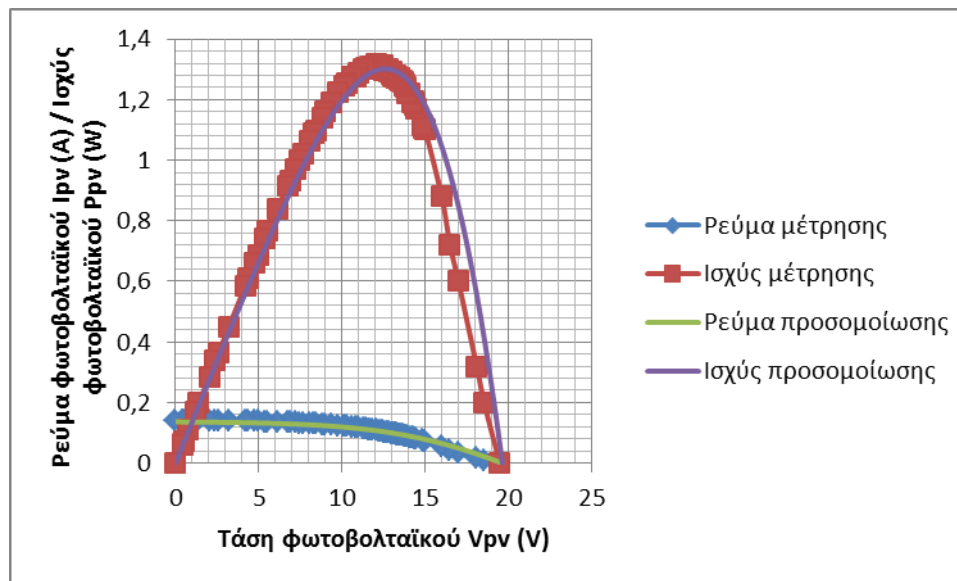
Στο Σχήμα 5-1 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, μέσω του Matlab, της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V και της καμπύλης P-V του ST 5 για ακτινοβολία  $370 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασία  $26 \text{ }^\circ\text{C}$  από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο, συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές καμπύλες που προκύπτουν από τις μετρήσεις της πειραματικής διαδικασίας. Στις συνθήκες αυτές, το % σχετικό σφάλμα για την τιμή της ισχύος στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) διαμορφώνεται στο -1.1 % όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5-3. Ο Πίνακας 5-3 δείχνει, για κάθε ζεύγος μέτρησης θερμοκρασίας και ακτινοβολίας που λήφθηκε, την τιμή της ισχύος στο MPP, που προέκυψε από τα στοιχεία της μέτρησης, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που προέκυψε από την προσομοίωση με το μοντέλο και το % σχετικό σφάλμα των δυο τιμών. Περιλαμβάνει ακόμη τα % σχετικά σφάλματα μεταξύ των τιμών μέτρησης και προσομοίωσης για τις εξής τιμές:

- την τιμή προσομοίωσης του ρεύματος βραχυκυκλώματος σε σχέση με αυτήν της μέτρησης,
- την τιμή προσομοίωσης της τάσης ανοικτοκύκλωσης σε σχέση με αυτήν της μέτρησης,
- τις τιμές της τάσης και ρεύματος προσομοίωσης στο MPP σε σχέση με αυτές τις μέτρησης,
- την μέση τιμή του απόλυτου % σχετικού σφάλματος της τιμής του ρεύματος προσομοίωσης για όλη την χαρακτηριστική I-V,
- την μέση τιμή του απόλυτου % σχετικού σφάλματος της τιμής της ισχύος προσομοίωσης σε σχέση με αυτή της μέτρησης για όλη την χαρακτηριστική P-V.

Τα ίδια στοιχεία φαίνονται και στους Πίνακες 5-4 έως 5-11 για το εκάστοτε μοντέλο.

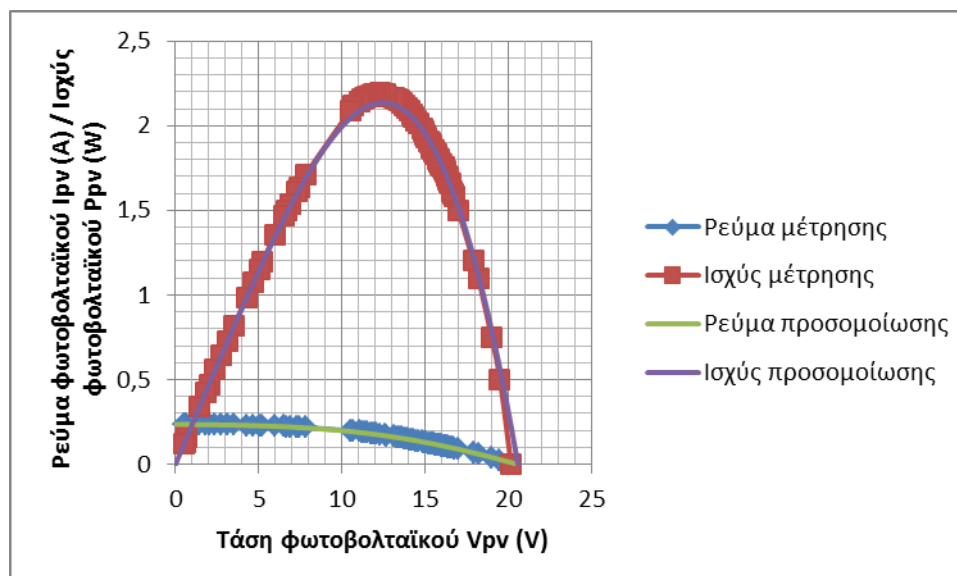
Το % σχετικό σφάλμα υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$\% \text{Σχετικό σφάλμα} = \frac{\text{Τιμή προσομοίωσης} - \text{Τιμή μέτρησης}}{\text{Τιμή μέτρησης}} \times 100 \% \quad (5.2)$$



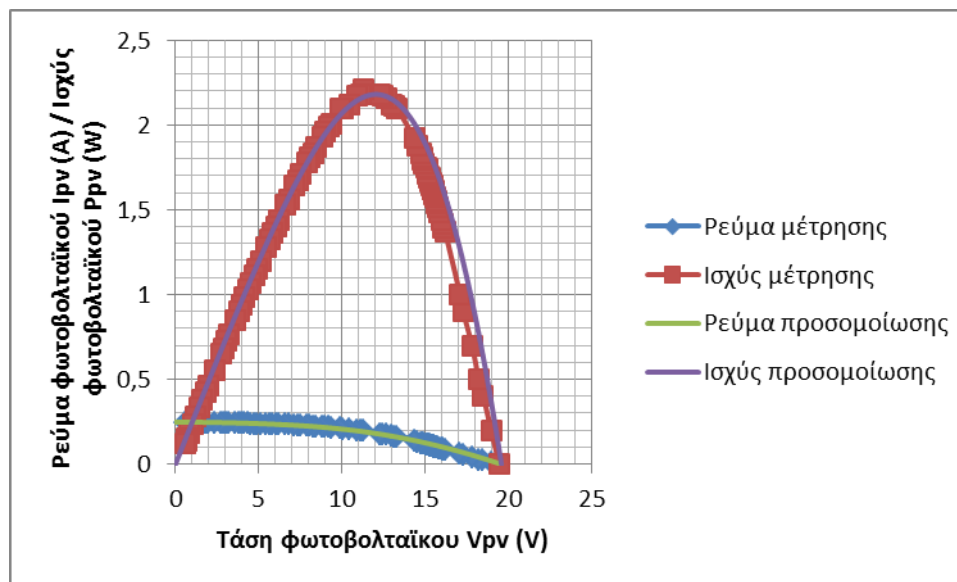
Σχήμα 5-1. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 370 \text{ W/m}^2$  και  $T = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το ζεύγος μέτρησης  $G = 610 \text{ W/m}^2$  και  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  η σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V που υπολογίζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το πλαίσιο ST 5, σε σχέση με τις μετρήσεις φαίνονται στο Σχήμα 5-2. Το σχετικό σφάλμα για το σημείο μέγιστης ισχύος(MPP), για αυτό το ζεύγος μέτρησης, είναι -2.5% όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5-3.



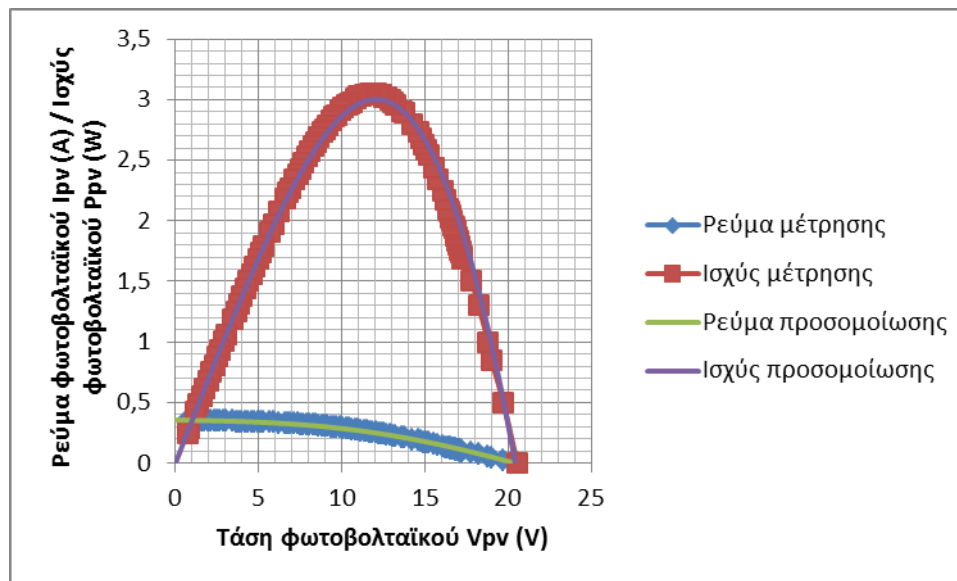
Σχήμα 5-2. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 610 \text{ W/m}^2$  και  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Το Σχήμα 5-3 παρουσιάζει τις διαφορές ανάμεσα στην προσομοίωση των χαρακτηριστικών I-V και P-V, από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το ST 5, και αυτών που προκύπτουν από τις μετρήσεις της πειραματικής διαδικασίας για το ζεύγος  $G = 640 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Στον Πίνακα 5-3 φαίνεται πως το σχετικό σφάλμα για το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) είναι -0.2%.



Σχήμα 5-3. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 640 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που προσομοιώνει το μοντέλο, καθώς και αυτές της μέτρησης, για το μετρούμενο ζεύγος  $G = 930 \text{ W/m}^2$  και  $T = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ , φαίνονται στο Σχήμα 5-4. Στις συνθήκες αυτές το σχετικό σφάλμα για το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) διαμορφώνεται στο 0.06 %, όπως γίνεται φανερό από τα στοιχεία του Πίνακα 5-3.



Σχήμα 5-4. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 930 \text{ W/m}^2$  και  $T = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Πίνακας 5-3. Σύγκριση μέτρησης-προσομοίωσης από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το ST 5.

$G$ ( $\text{W/m}^2$ )	$T$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P$ στο MPP (W)	$P'$ στο MPP (W)	% $RE_{P_{MPP}}$	% $RE_{V_{oc}}$	% $RE_{I_{isc}}$	% των $RE_{I_{mpp}}$ και $RE_{V_{mpp}}$	Μ.τ. % $ RE_{I-V} $	Μ.τ. % $ RE_{P-V} $
370	26	1.316	1.301	-1.1	-0.8	-4.2	-4.6 / 4.2	2.8	2.8
610	30	2.191	2.136	-2.5	2	0.4	-3.9 / 1.6	0.9	0.9
640	35	2.208	2.203	-0.2	0.6	1.2	-8.6 / 6.8	3.3	3.3
930	44	3.050	3.052	0.06	-0.5	1.4	-3.1 / 1.5	2.3	2.3

όπου:

$G$  η τιμή της ακτινοβολίας που μετρήθηκε ( $\text{W/m}^2$ ),



$T$  η τιμή της θερμοκρασίας που υπολογίστηκε για το πλαίσιο με βάση τη μετρούμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$P$  η τιμή της μετρούμενης ισχύος στο MPP ( $W$ ),

$P'$  η τιμή της ισχύος προσομοίωσης στο MPP ( $W$ ),

$\%RE_{P_{MPP}}$  το % σχετικό σφάλμα μεταξύ των τιμών μέτρησης και προσομοίωσης της ισχύος στο MPP,

$\%RE_{V_{oc}}$  το % σχετικό σφάλμα μεταξύ των τιμών μέτρησης και προσομοίωσης της τάσης στο σημείο ανοικτοκυκλώματος,

$\%RE_{I_{isc}}$  το % σχετικό σφάλμα μεταξύ των τιμών μέτρησης και προσομοίωσης του ρεύματος στο σημείο βραχυκυκλώματος,

$\%RE_{I_{mpp}}$  το % σχετικό σφάλμα μεταξύ των τιμών μέτρησης και προσομοίωσης του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος,

$\%RE_{V_{mpp}}$  το σχετικό σφάλμα μεταξύ των τιμών μέτρησης και προσομοίωσης της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος,

Μ.τ.  $\% |RE_{I-V}|$  η μέση τιμή του απόλυτου σχετικού σφάλματος σε όλη τη χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης,

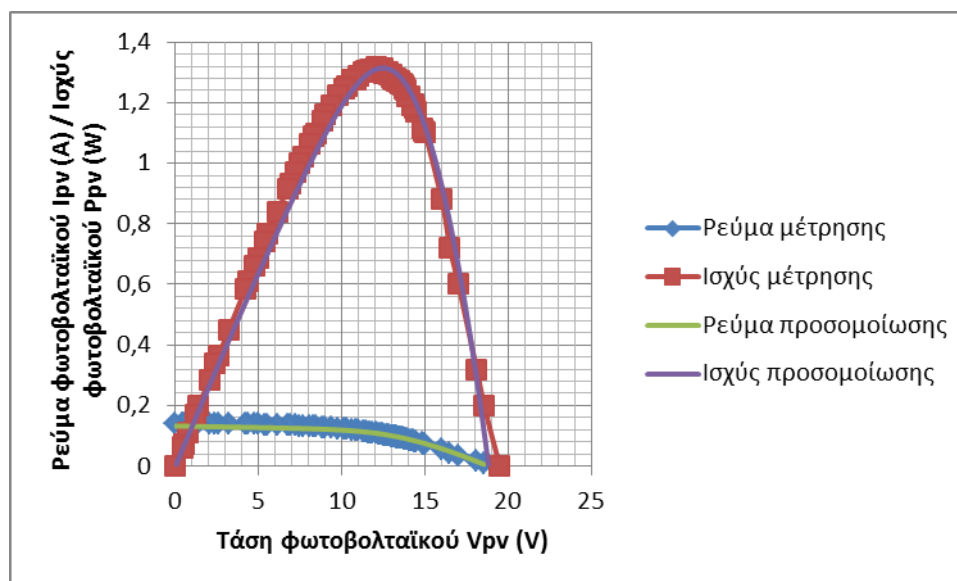
Μ.τ  $\% |RE_{P-V}|$  η μέση τιμή του απόλυτου σχετικού σφάλματος σε όλη τη χαρακτηριστική ισχύος – τάσης.

Τα ίδια στοιχεία παρουσιάζονται και στους Πίνακες 5-4 έως 5-11 για κάθε μοντέλο.

### **5.2.2 Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ST 5 με το 2<sup>ο</sup> μοντέλο**

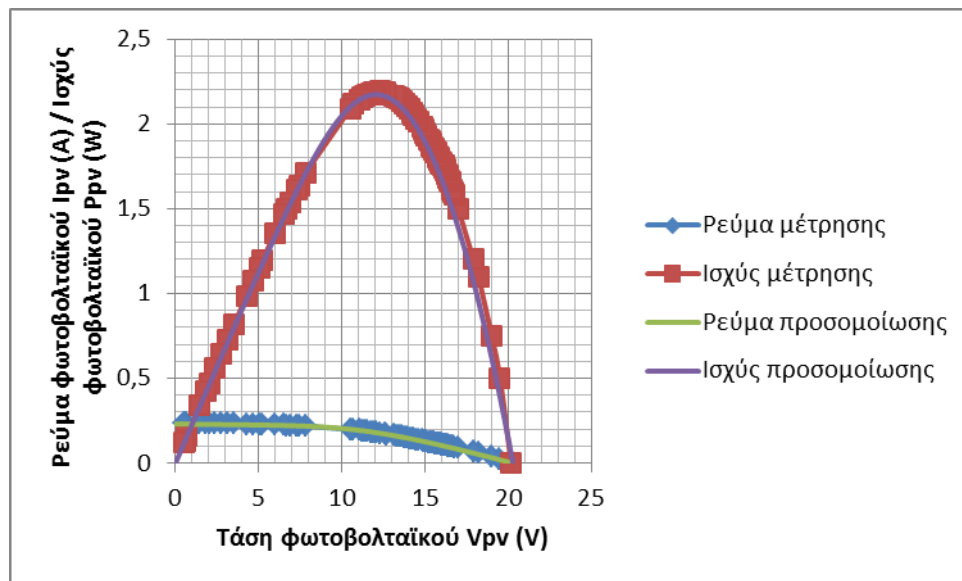
Η σύγκριση των χαρακτηριστικών ρεύματος και ισχύος, σχετικά με την τάση, που υπολογίζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το πλαίσιο ST 5 και αυτών που προκύπτουν από τις μετρήσεις, για τις συνθήκες  $370 \text{ W/m}^2$  και  $26^{\circ}\text{C}$  απεικονίζονται στο Σχήμα 5-5. Στον Πίνακα 5-4 φαίνεται ότι

η απόκλιση μεταξύ μέτρησης και προσομοίωσης για το MPP είναι 0.8 % για αυτό το ζεύγος μέτρησης.



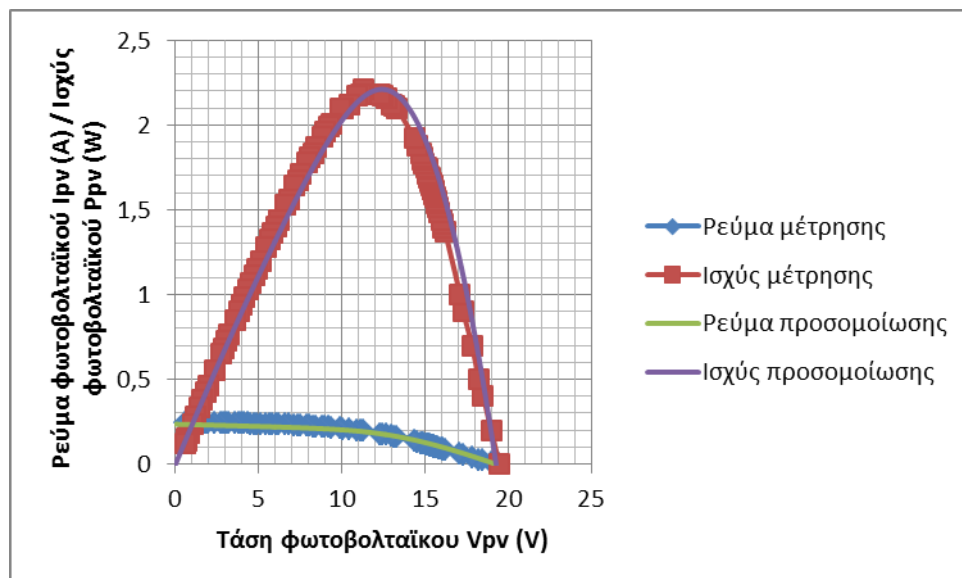
Σχήμα 5-5. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 370 \text{ W/m}^2$  και  $T = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που προσομοιώνει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο και η σύγκρισή τους με τις μετρήσεις, που φαίνονται στο Σχήμα 5-6, αναφέρονται στο ζεύγος  $G = 610 \text{ W/m}^2$  -  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Το σχετικό σφάλμα για το MPP στις συνθήκες αυτές είναι -0.8 %, όπως φαίνεται και από τα στοιχεία του Πίνακα 5-4.



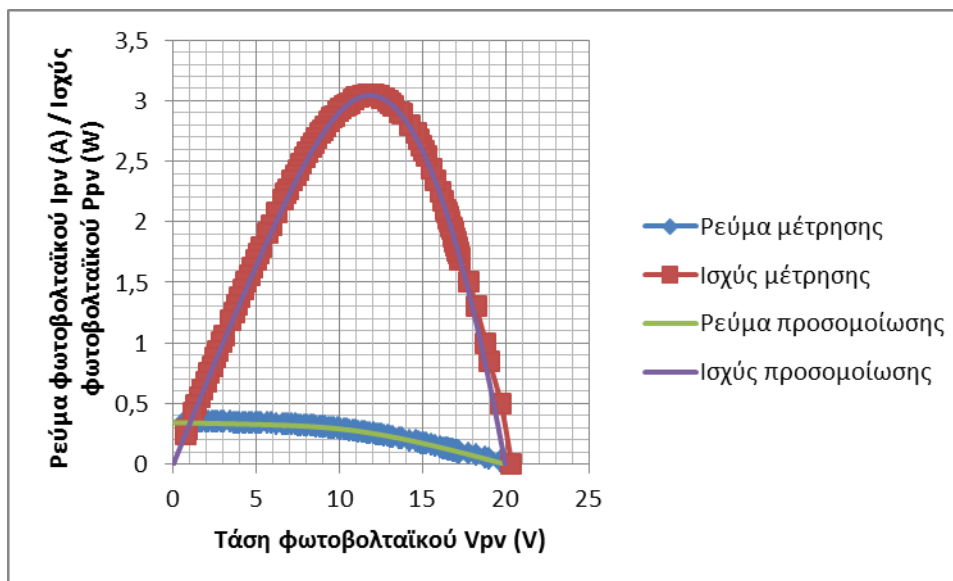
Σχήμα 5-6. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 610 \text{ W/m}^2$  και  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το ζεύγος  $G = 640 \text{ W/m}^2$  -  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  η σύγκριση μέτρησης – προσομοίωσης, από το μοντέλο αυτό, των χαρακτηριστικών I-V και P-V απεικονίζεται στο Σχήμα 5-7. Για το ζεύγος αυτό η απόκλιση μέτρησης – προσομοίωσης για το σημείο μέγιστης ισχύος, όπως αποτυπώνεται και στον Πίνακα 5-4, υπολογίζεται σε 0.04 %.



Σχήμα 5-7. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 640 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το ζεύγος  $G = 930 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 44 \text{ }^\circ\text{C}$  απεικονίζεται στο Σχήμα 5-8 η σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπυλών (I-V και P-V) που προσομοιώνει το μοντέλο σε σχέση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Το σχετικό σφάλμα ανάμεσα στο σημείο μέγιστης ισχύος που υπολογίζει το μοντέλο και αυτό που προκύπτει από τη μέτρηση, φαίνεται από τα στοιχεία που παρατίθενται στον Πίνακα 5-4, για αυτό το ζεύγος ακτινοβολίας – θερμοκρασίας, ότι είναι - 0.2 %.



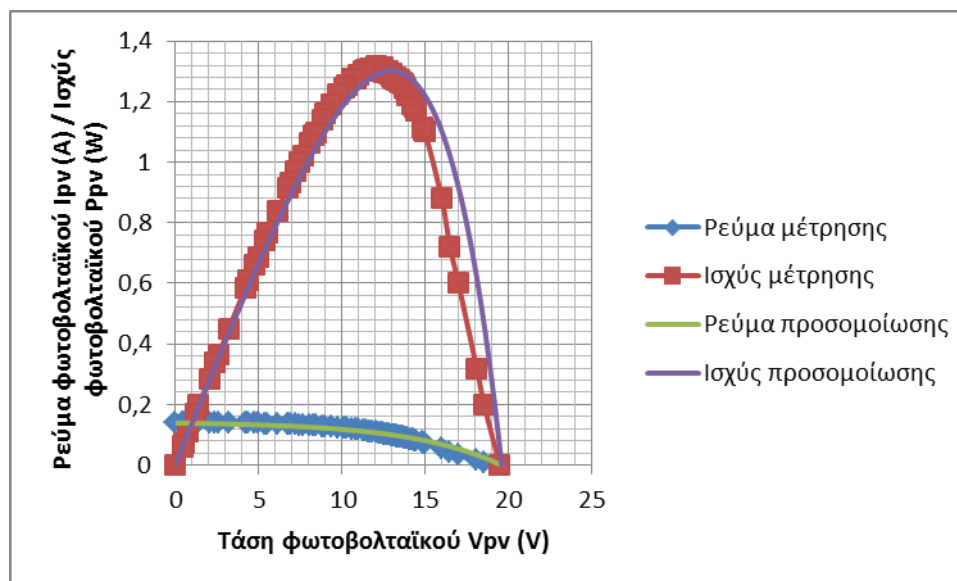
Σχήμα 5-8. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 930 \text{ W/m}^2$  και  $T = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Πίνακας 5-4. Σύγκριση μέτρησης-προσομοίωσης από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το ST 5.**

$G$ ( $W/m^2$ )	$T$ ( $^{\circ}C$ )	$P$ στο MPP ( $W$ )	$P'$ στο MPP ( $W$ )	% $RE_{P_{MPP}}$	% $RE_{V_{oc}}$	% $RE_{I_{isc}}$	% των $RE_{I_{mpp}}$ και $RE_{V_{mpp}}$	Μ.τ. % $ RE_{I-V} $	Μ.τ. % $ RE_{P-V} $
370	26	1.316	1.327	0.8	-3.4	-6.9	-2.7 / 3.1	2.2	2.2
610	30	2.191	2.172	-0.8	0,5	-2.1	1.1 / -1.7	0.5	0.5
640	35	2.208	2.209	0.04	-0.9	-3.9	-9.6 / 10.1	6.7	6.7
930	44	3.050	3.043	-0.2	-1.9	-2.5	0.001 / -0.4	1.4	1.4

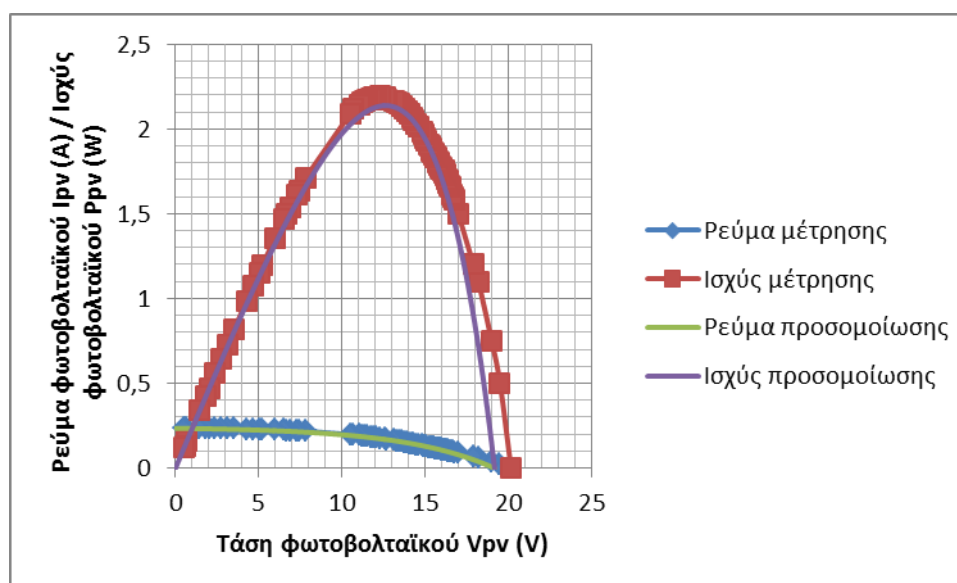
### 5.2.3 Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ST 5 με το 3<sup>ο</sup> μοντέλο

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των μετρήσεων με τις προσομοιώσεις που πραγματοποιεί το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το πλαίσιο ST 5. Αρχικά για το ζεύγος μέτρησης  $G = 370 \text{ } W/m^2$ ,  $T = 26 \text{ } ^{\circ}C$  οι χαρακτηριστικές I-V και P-V -τόσο αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση, όσο και από τις μετρήσεις- αντιπαραβάλλονται στο Σχήμα 5-9. Από τα στοιχεία του Πίνακα 5-5 φαίνεται πως η απόκλιση μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης, για τις συνθήκες αυτές, στο σημείο μέγιστης ισχύος είναι -1.06 %.



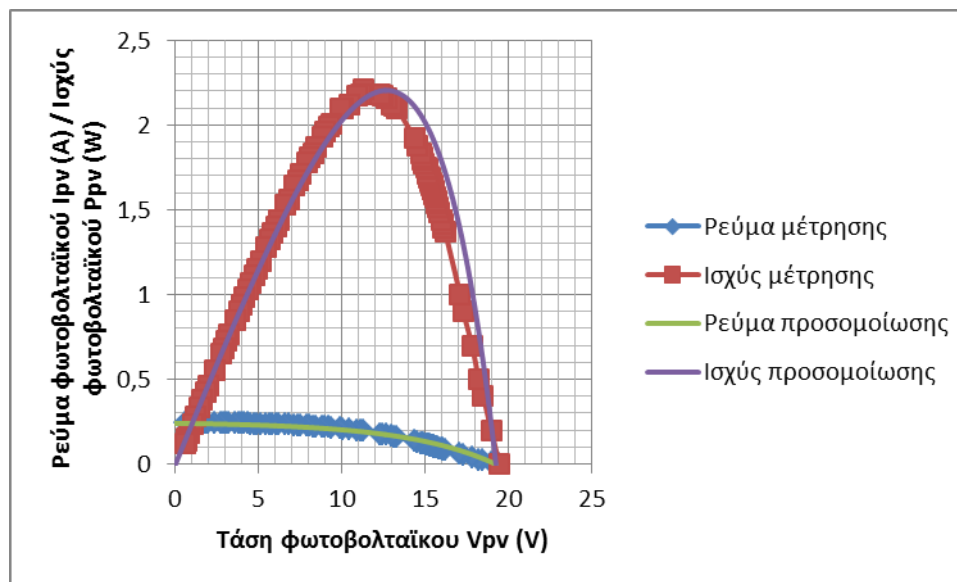
Σχήμα 5-9. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 370 \text{ W/m}^2$  και  $T = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V, μέτρησης και προσομοίωσης από αυτό το μοντέλο, που φαίνονται στο Σχήμα 5-10 αφορούν σε συνθήκες ακτινοβολίας  $610 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασίας στους  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Για αυτό το ζεύγος μέτρησης το σχετικό σφάλμα για το σημείο μέγιστης ισχύος υπολογίζεται στο  $-2.5 \%$ . Τα στοιχεία που προκύπτουν από τη σύγκριση μέτρησης – προσομοίωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-5.



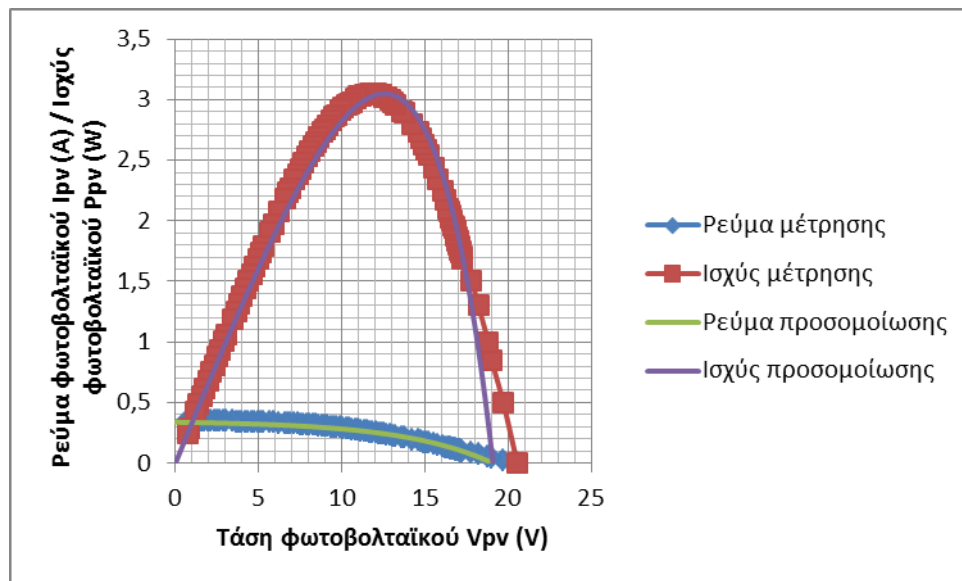
Σχήμα 5-10. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 610 \text{ W/m}^2$  και  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το μετρούμενο ζεύγος  $G = 640 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  οι διαφορές της μέτρησης και της προσομοίωσης, από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο, των χαρακτηριστικών ρεύματος και ισχύος, σε σχέση με την τάση, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-11. Ο Πίνακας 5-5 φανερώνει πως η απόκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος, μεταξύ μέτρησης και προσομοίωσης, είναι -0.2 % στις συνθήκες αυτές.



Σχήμα 5-11. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 640 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Η σύγκριση μεταξύ της προσομοίωσης και της μέτρησης, των χαρακτηριστικών I-V και P-V, για το ζεύγος τιμών  $G = 930 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ , φαίνεται στο Σχήμα 5-12. Η απόκλιση ανάμεσα στο σημείο μέγιστης ισχύος που υπολογίζει το μοντέλο και αυτό που προκύπτει από τη μέτρηση διαμορφώνεται σε 0.8 %, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5-5.



Σχήμα 5-12. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 930 \text{ W/m}^2$  και  $T = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Πίνακας 5-5. Σύγκριση μέτρησης-προσομοίωσης από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το ST 5.

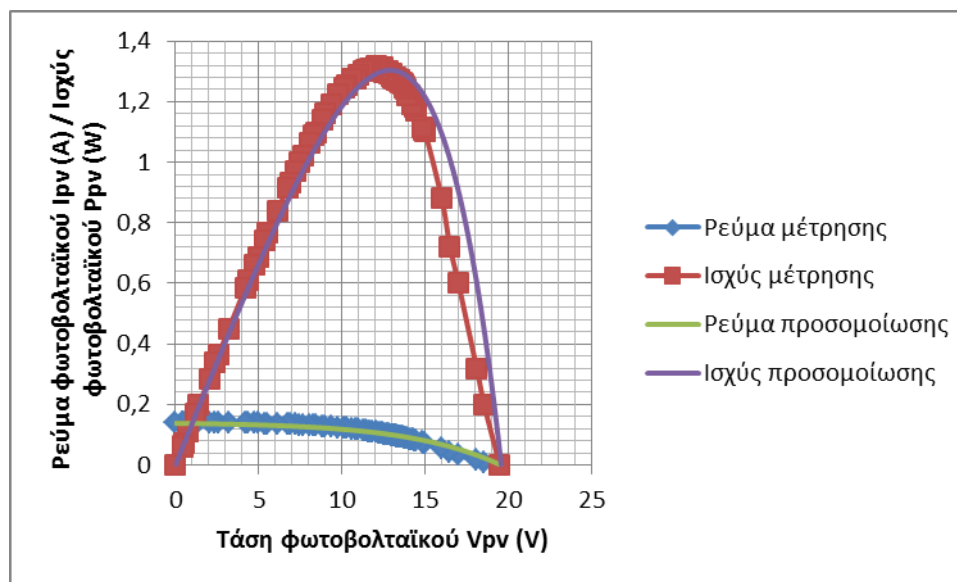
$G$ ( $\text{W/m}^2$ )	$T$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P$ στο MPP (W)	$P'$ στο MPP (W)	% $RE_{P_{MPP}}$	% $RE_{V_{oc}}$	% $RE_{I_{isc}}$	% των $RE_{I_{mpp}}$ και $RE_{V_{mpp}}$	Μ.τ. % $ RE_{I-V} $	Μ.τ. % $ RE_{P-V} $
370	26	1.316	1.302	-1.06	0.5	-2.1	-7.4 / 7.02	4.8	4.8
610	30	2.191	2.137	-2.5	-4.8	0.4	-5.06 / 2.9	3.7	3.7
640	35	2.208	2.203	-0.2	-1.2	-1.6	-12.2 / 12.5	8.4	8.4
930	44	3.050	3.074	0.8	7.1	-3.7	-5.8 / 5.5	3.8	3.8

#### 5.2.4 Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ST 5 με το 4<sup>ο</sup> μοντέλο

Το 4<sup>ο</sup> μοντέλο, σε αντίθεση με τα τρία προηγούμενα, χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την προσομοίωση της λειτουργίας του πλαισίου ST 5, ως μοντέλο που αναφέρεται σε φωτοβολταϊκά πλαίσια τεχνολογίας thin-film. Στο Σχήμα 5-13 φαίνεται η αντιπαραβολή των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V και P-V, που προκύπτουν από τις μετρήσεις και την προσομοίωση, για το ζεύγος

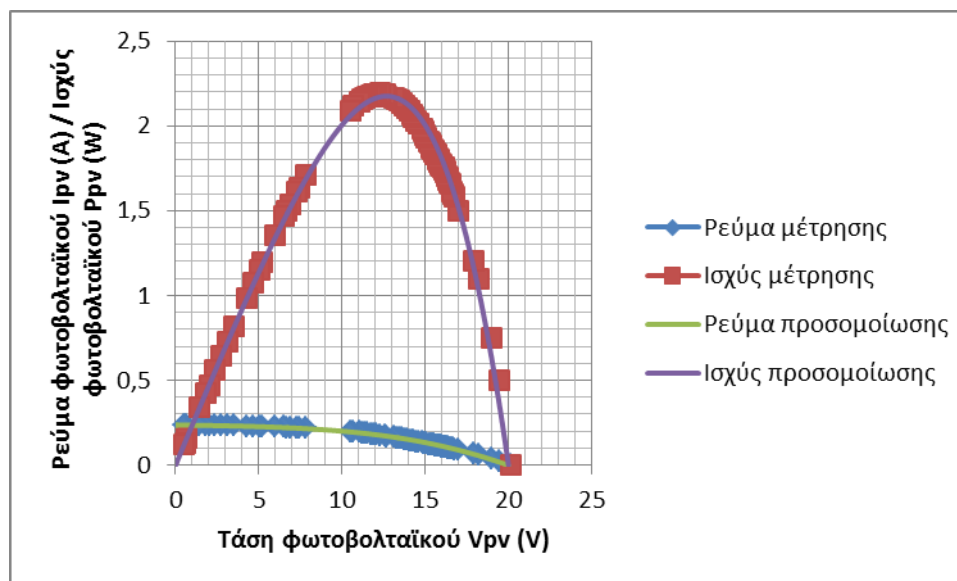


συνθηκών  $G = 370 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ . Για το ζεύγος αυτό, το σχετικό σφάλμα μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης όσον αφορά το σημείο μέγιστης ισχύος είναι -0.9 %, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-6.



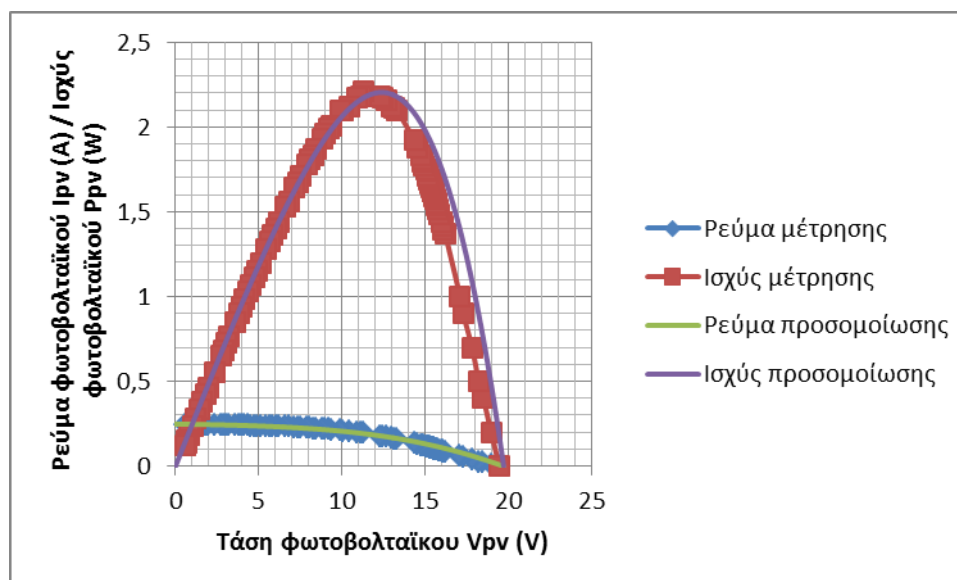
Σχήμα 5-13. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 370 \text{ W/m}^2$  και  $T = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το ζεύγος μέτρησης  $610 \text{ W/m}^2 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , η σύγκριση προσομοίωσης – μέτρησης των χαρακτηριστικών I-V και P-V απεικονίζεται στο Σχήμα 5-14. Από τα στοιχεία του Πίνακα 5-6 προκύπτει πως το σχετικό σφάλμα μεταξύ μέτρησης – προσομοίωσης για το σημείο μέγιστης ισχύος, στις συνθήκες αυτές, είναι -0.8 %.



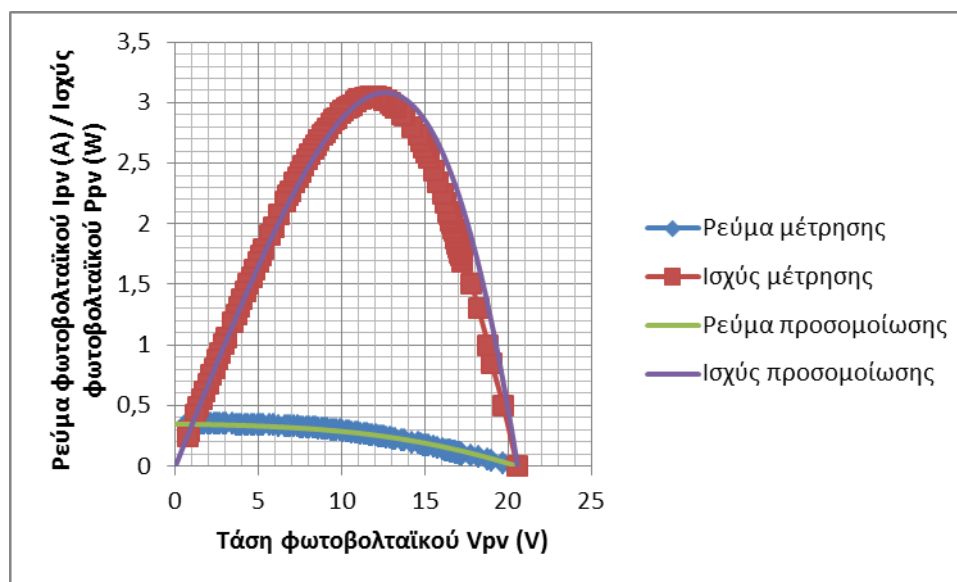
Σχήμα 5-14. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 610 \text{ W/m}^2$  και  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V, μέτρησης και προσομοίωσης από το μοντέλο, που φαίνονται στο Σχήμα 5-15, αναφέρονται στις συνθήκες μέτρησης  $G = 640 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Για αυτές τις συνθήκες η απόκλιση μέτρησης – προσομοίωσης για το σημείο μέγιστης ισχύος, όπως προκύπτει από τα δεδομένα του Πίνακα 5-6, είναι -0.04 %.



Σχήμα 5-15. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 640 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το ζεύγος  $G = 930 \text{ W/m}^2$  και  $T = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ , φαίνεται στο Σχήμα 5-16 η σύγκριση ανάμεσα στις τιμές της μέτρησης και την προσομοίωση, από το μοντέλο, των χαρακτηριστικών I-V και P-V. Σε αυτές τις συνθήκες προκύπτει από τα στοιχεία του Πίνακα 5-6 ότι το σχετικό σφάλμα μεταξύ μέτρησης – προσομοίωσης, για το σημείο μέγιστης ισχύος, είναι -0.4 %.



Σχήμα 5-16. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5 για  $G = 930 \text{ W/m}^2$  και  $T = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ .

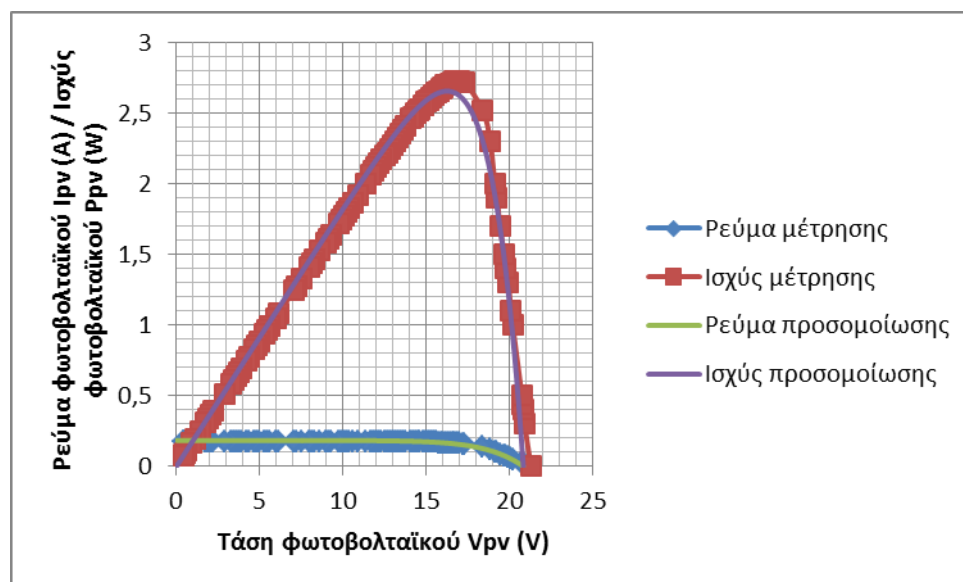
Πίνακας 5-6. Σύγκριση μέτρησης-προσομοίωσης από το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για το ST 5.

$G$ ( $\text{W/m}^2$ )	$T$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P$ στο MPP (W)	$P'$ στο MPP (W)	% $RE_{P_{MPP}}$	% $RE_{V_{oc}}$	% $RE_{I_{isc}}$	% των $RE_{I_{mpp}}$ και $RE_{V_{mpp}}$	Μ.τ. % $ RE_{I-V} $	Μ.τ. % $ RE_{P-V} $
370	26	1.316	1.303	-0.9	0.4	2.8	-7.4 / 6.7	4.6	4.6
610	30	2.191	2.174	-0.8	-0.7	0.4	-3.9 / 3.3	0.5	0.5
640	35	2.208	2.207	-0.04	1.3	1.2	-6.8 / 9.8	6.4	6.4
930	44	3.050	3.037	-0.4	0.09	-0.8	-5.1 / 6.1	6.5	6.5

### 5.2.5 Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ET-M 53605 με το 1<sup>ο</sup> μοντέλο

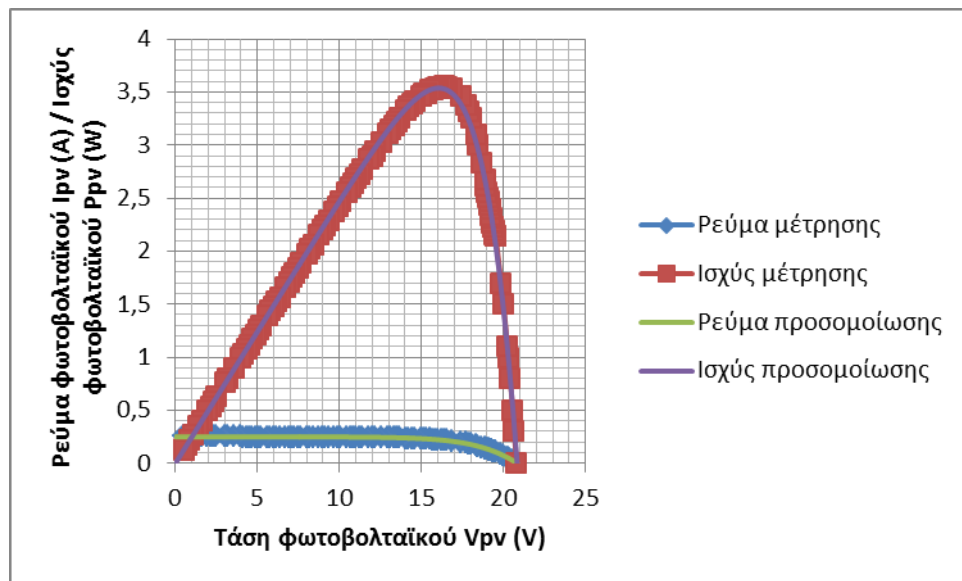
Το 1<sup>ο</sup> μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την προσομοίωση της λειτουργίας κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα του μοντέλου να προσομοιώσει τη λειτουργία του πλαισίου ET-M53605.

Σε συνθήκες  $570 \text{ W/m}^2$  και  $34 \text{ }^\circ\text{C}$  η αντιπαραβολή των χαρακτηριστικών καμπυλών, μέτρησης και προσομοίωσης από το μοντέλο, απεικονίζεται στο Σχήμα 5-17. Ο Πίνακας 5-7 παρουσιάζει ότι το σχετικό σφάλμα (ανάμεσα στις τιμές μέτρησης - προσομοίωσης) στο σημείο μέγιστης ισχύος είναι  $-2.7 \%$ .



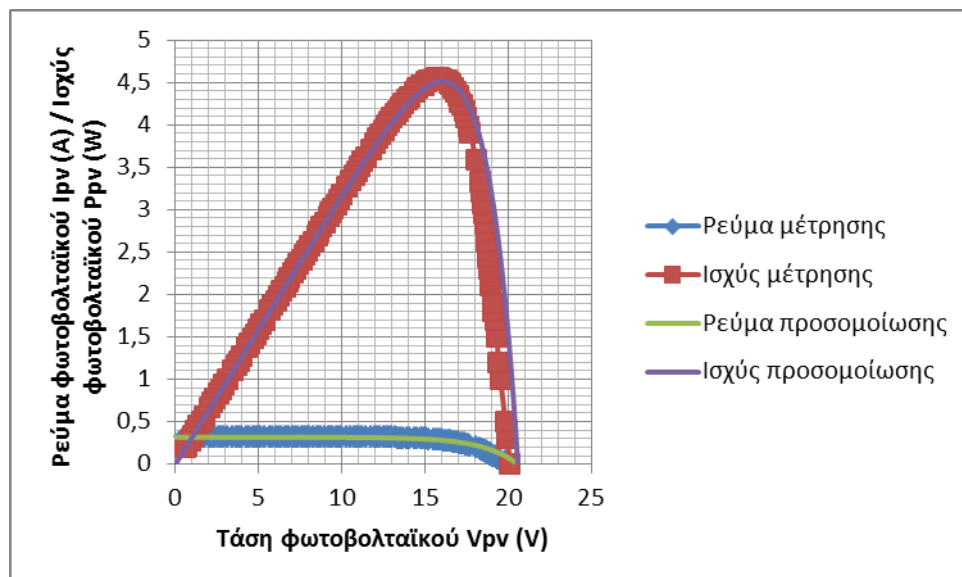
Σχήμα 5-17. Σύγκριση των χαρακτηριστικών  $I-V$  και  $P-V$  προσομοίωσης-μέτρησης, από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 570 \text{ W/m}^2$  και  $T = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για τιμή ακτινοβολίας  $760 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασίας  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , οι χαρακτηριστικές καμπύλες που προκύπτουν από τις μετρήσεις και εκείνες που υπολογίζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο φαίνονται στο Σχήμα 5-18. Το σημείο μέγιστης ισχύος που υπολογίζει το μοντέλο και αυτό που προκύπτει από τη μέτρηση αποκλίνουν μεταξύ τους κατά  $-0.4 \%$ , όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-7.



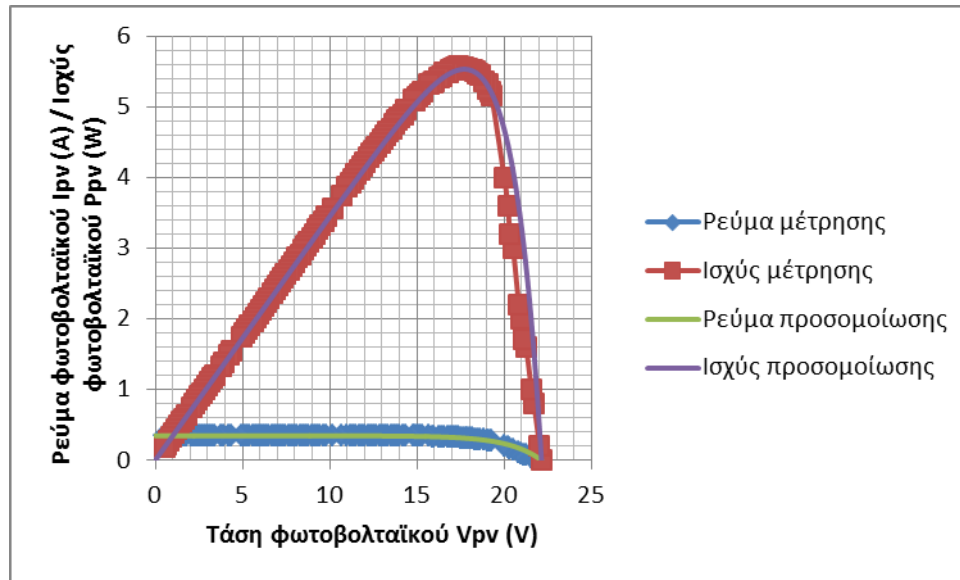
Σχήμα 5-18. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το  $I^o$  μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 760 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V του Σχήματος 5-19, τόσο αυτές που προκύπτουν από τη μέτρηση, όσο και αυτές που υπολογίζονται από το μοντέλο, αφορούν τις συνθήκες  $G = 920 \text{ W/m}^2$  και  $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ο Πίνακας 5-7 δείχνει ότι το σχετικό σφάλμα μέτρησης – προσομοίωσης στο σημείο μέγιστης ισχύος είναι -0.9 %, για αυτό το ζεύγος μέτρησης.



Σχήμα 5-19. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το  $I^o$  μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 920 \text{ W/m}^2$  και  $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το ζεύγος μέτρησης  $1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 46^\circ\text{C}$  φαίνεται στο Σχήμα 5-20 η σύγκριση μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Από τα στοιχεία του Πίνακα 5-7 φαίνεται πως η απόκλιση για την τιμή της ισχύος στο MPP -0.4 %.



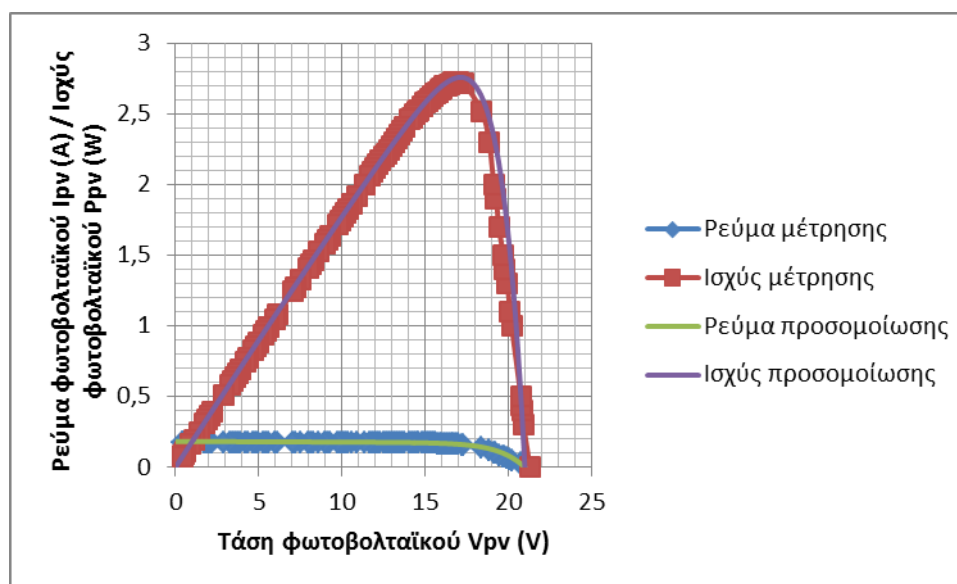
Σχήμα 5-20. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 46^\circ\text{C}$ .

Πίνακας 5-7. Σύγκριση μέτρησης-προσομοίωσης από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το ET-M53605

$G$ ( $\text{W/m}^2$ )	$T$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P$ στο MPP (W)	$P'$ στο MPP (W)	% $RE_{P_{MPP}}$	% $RE_{V_{oc}}$	% $RE_{I_{isc}}$	% των $RE_{I_{mpp}}$ και $RE_{V_{mpp}}$	Μ.τ. % $ RE_{I-V} $	Μ.τ. % $ RE_{P-V} $
570	34	2.726	2.653	-2.7	-2.1	3.4	1.2 / -3.5	2.8	2.8
760	35	3.554	3.538	-0.4	0.2	-1.5	1.3 / -2	0.8	0.8
920	41	4.555	4.511	-0.9	2.3	-1.2	-3.1 / 2.1	4.6	4.6
1000	46	5.569	5.544	-0.4	-0.1	-2.8	-2.8 / 2.1	2.6	2.6

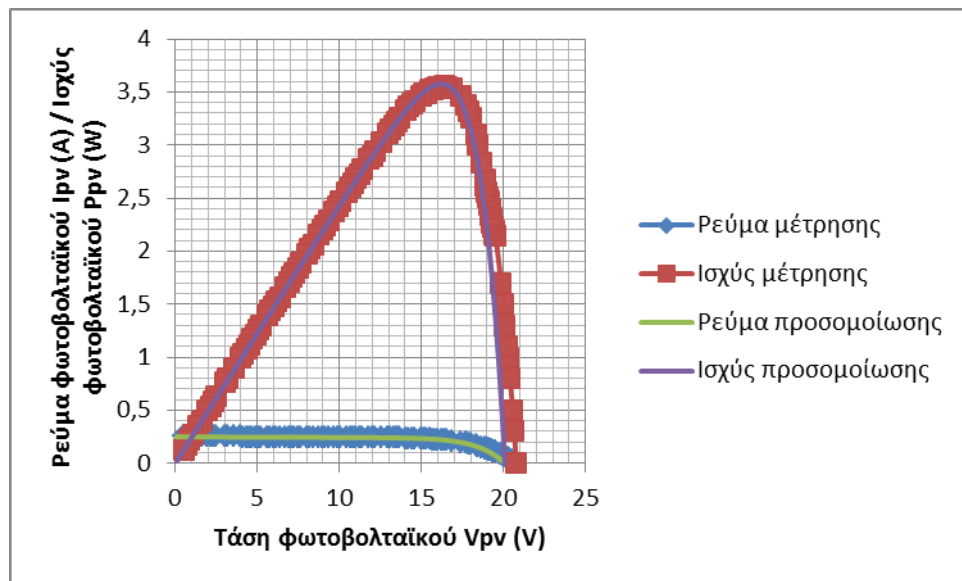
### 5.2.6 Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ET-M 53605 με το 2<sup>ο</sup> μοντέλο

Το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, όπως και το 1<sup>ο</sup>, προσομοιώνει επίσης και τη λειτουργία του κρυσταλλικού πλαισίου ET-M53605. Για συνθήκες μέτρησης  $G = 570 \text{ W/m}^2$  και  $T = 34 \text{ }^\circ\text{C}$  η σύγκριση μεταξύ μέτρησης και προσομοίωσης, από το μοντέλο, των χαρακτηριστικών I-V και P-V απεικονίζεται στο Σχήμα 5-21. Στον Πίνακα 5-8 φαίνεται ότι το σχετικό σφάλμα για το σημείο μέγιστης ισχύος, μεταξύ μέτρησης – προσομοίωσης, είναι 1.1 % στις συνθήκες αυτές.



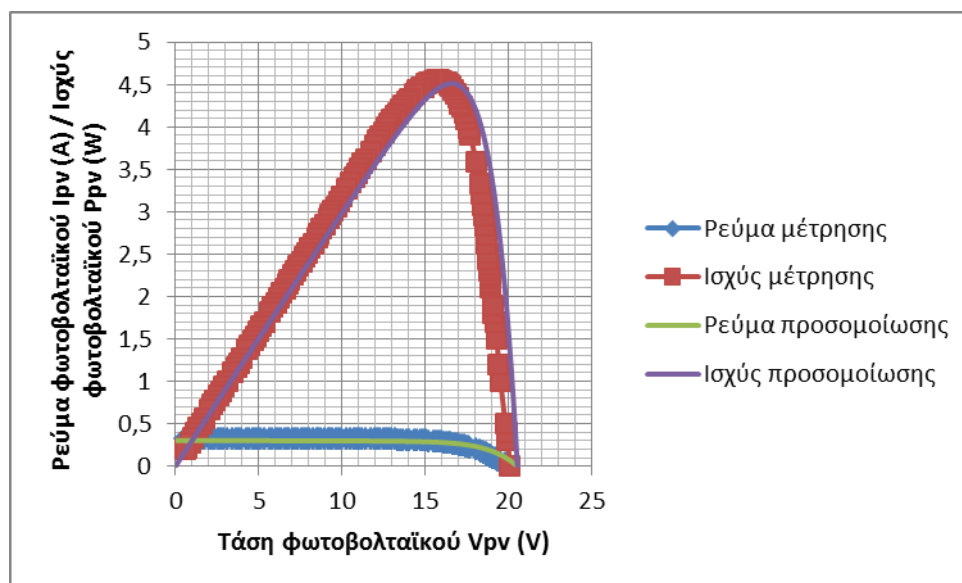
Σχήμα 5-21. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 570 \text{ W/m}^2$  και  $T = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Στους  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  και για τιμή ακτινοβολίας  $760 \text{ W/m}^2$ , οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V που προκύπτουν από τη μέτρηση συγκρίνονται με εκείνες που υπολογίζει το μοντέλο στο Σχήμα 5-22. Για το ζεύγος μέτρησης αυτό η απόκλιση, ανάμεσα στο σημείο μέγιστης ισχύος που υπολογίζει το μοντέλο και αυτό που μετρήθηκε με το πλαίσιο είναι 0.6 %, όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Πίνακα 5-8.



Σχήμα 5-22. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 760 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

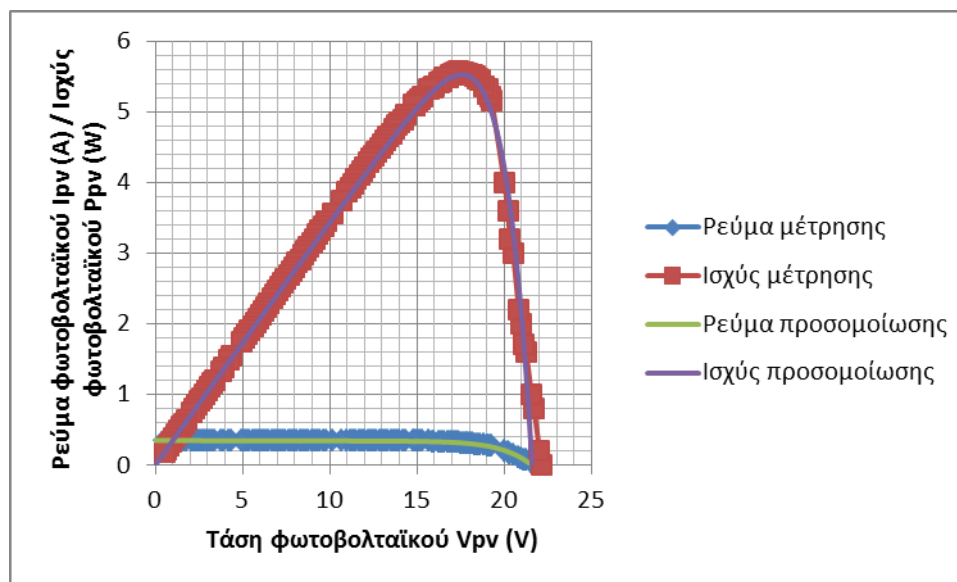
Οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V του Σχήματος 5-23 απεικονίζουν τη σύγκριση της μέτρησης με χρήση του πλαισίου και της προσομοίωσης από το μοντέλο, για συνθήκες  $G = 920 \text{ W/m}^2$  –  $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ . Στον Πίνακα 5-8 παρατηρείται πως η απόκλιση μέτρησης – προσομοίωσης για το σημείο μέγιστης ισχύος είναι -0.9 %.



Σχήμα 5-23. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 920 \text{ W/m}^2$  και  $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Για το ζεύγος μέτρησης  $1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 46^\circ\text{C}$  φαίνεται στο Σχήμα 5-24 η σύγκριση μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Από τα στοιχεία του Πίνακα 5-8 φαίνεται πως η απόκλιση για την τιμή της ισχύος στο MPP -0.4 %.



Σχήμα 5-24. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 46^\circ\text{C}$ .

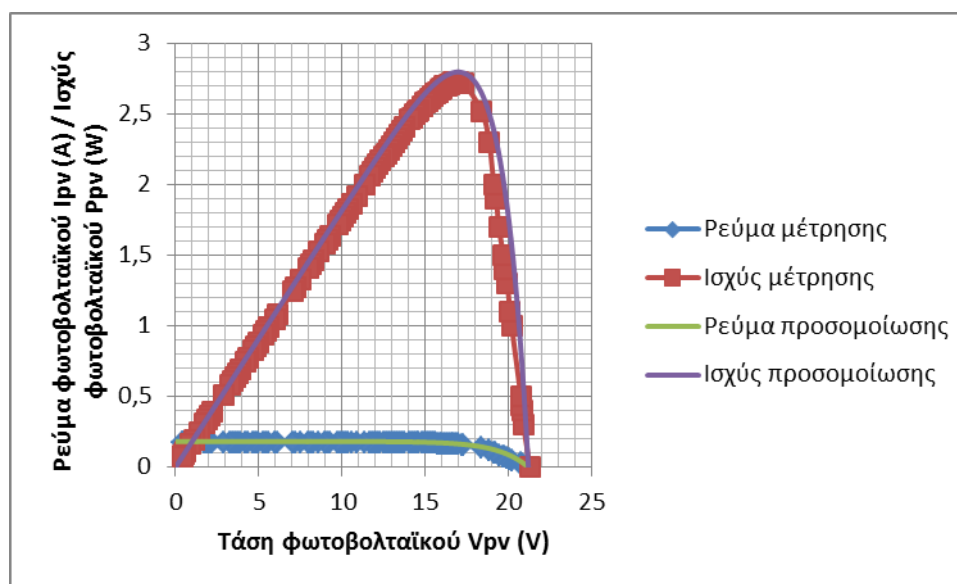
Πίνακας 5-8. Σύγκριση μέτρησης-προσομοίωσης από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το ET-M53605.

$G$ ( $\text{W/m}^2$ )	$T$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P$ στο MPP (W)	$P'$ στο MPP (W)	% $RE_{P_{MPP}}$	% $RE_{V_{oc}}$	% $RE_{I_{isc}}$	% των $RE_{I_{mpp}}$ και $RE_{V_{mpp}}$	Μ.τ. % $ RE_{I-V} $	Μ.τ. % $ RE_{P-V} $
570	34	2.726	2.758	1.1	-1.4	3.4	-0.6 / 1.7	1.3	1.3
760	35	3.554	3.576	0.6	-3.3	-1.5	1.4 / -1	2.3	2.3
920	41	4.555	4.511	-0.9	2.1	-5.9	-6.5 / 5.6	10.7	10.7
1000	46	5.569	5.544	-0.4	-2.5	-1.9	-2.1 / 1.2	1.8	1.8

### 5.2.7 Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ET-M 53605 με το 3<sup>ο</sup> μοντέλο

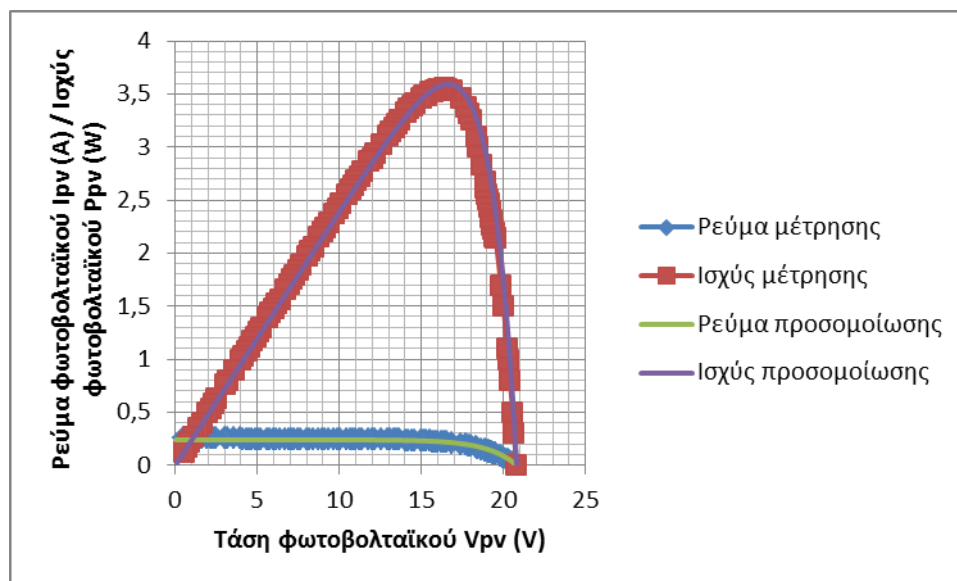
Το τρίτο μοντέλο είναι (όπως και το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup>) γενικό, δηλαδή μπορεί να προσομοιώσει τη λειτουργία διάφορων τύπων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στην παρούσα παράγραφο συγκρίνονται οι υπολογισμοί των χαρακτηριστικών καμπυλών του μοντέλου για το πλαίσιο ET-M 53605.

Η σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V, που προκύπτουν από τη μέτρηση και αυτών που υπολογίζει το μοντέλο για τις συνθήκες  $570 \text{ W/m}^2$  και  $34^\circ\text{C}$ , απεικονίζονται στο Σχήμα 5-25. Για αυτό το ζεύγος μέτρησης η απόκλιση μεταξύ του σημείου μέγιστης ισχύος, που υπολογίζει το μοντέλο και αυτού που προκύπτει από τη μέτρηση είναι 2.5 %, όπως δείχνουν τα δεδομένα του Πίνακα 5-9.



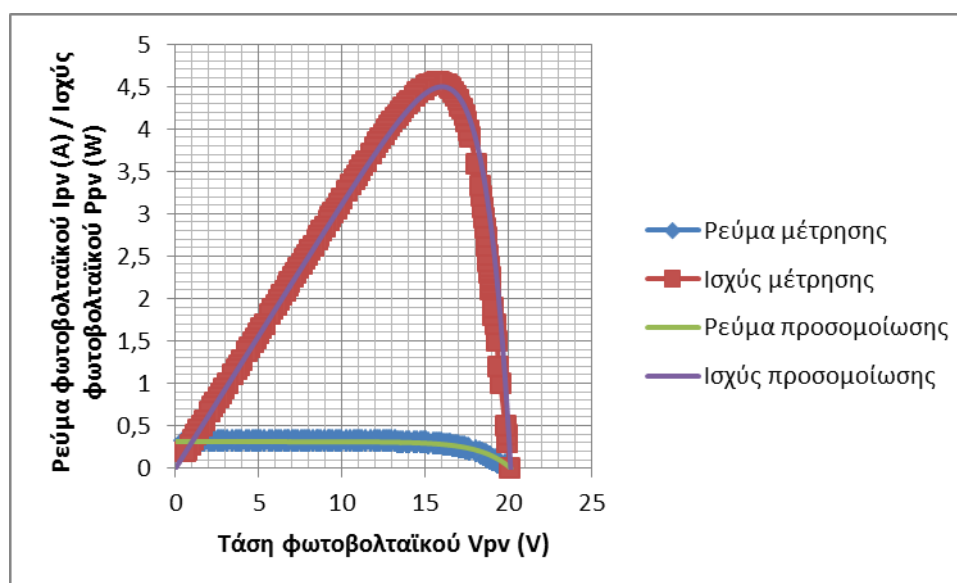
Σχήμα 5-25. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 570 \text{ W/m}^2$  και  $T = 34^\circ\text{C}$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V για  $G = 760 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35^\circ\text{C}$  φαίνονται στο Σχήμα 5-26. Στον Πίνακα 5-9 παρουσιάζεται πως σε αυτές τις συνθήκες το σχετικό σφάλμα για το σημείο μέγιστης ισχύος που υπολογίζει το μοντέλο και αυτό που μετρήθηκε πειραματικά με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι 1.1 %.



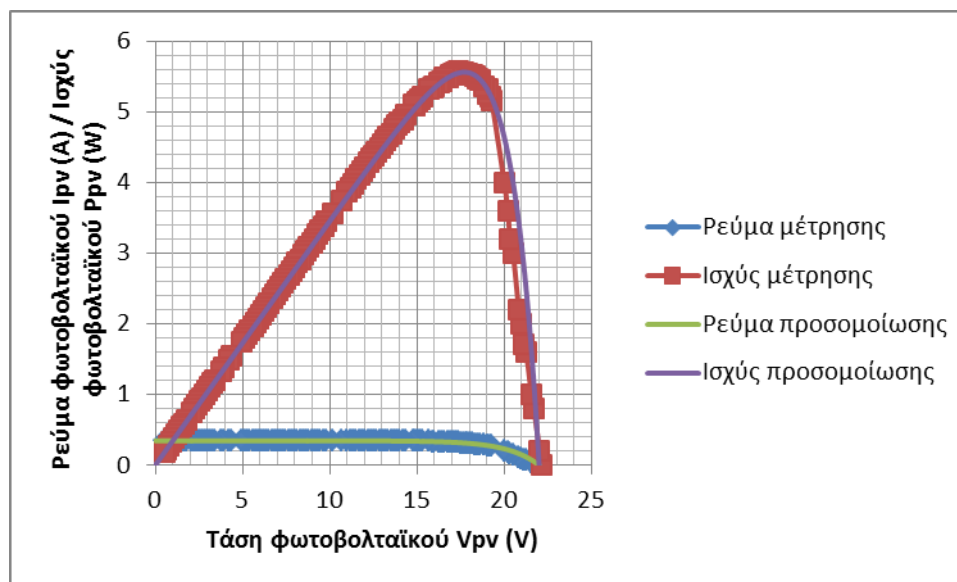
Σχήμα 5-26. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 760 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Η σύγκριση μεταξύ της μέτρησης και του υπολογισμού από το μοντέλο των χαρακτηριστικών I-V και P-V, για συνθήκες ακτινοβολίας – θερμοκρασίας  $920 \text{ W/m}^2$  και  $41 \text{ }^\circ\text{C}$  αντίστοιχα, απεικονίζεται στο Σχήμα 5-27. Η απόκλιση μέτρησης – προσομοίωσης για το σημείο μέγιστης ισχύος στις συνθήκες αυτές είναι -1.3 %, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-9.



Σχήμα 5-27. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 920 \text{ W/m}^2$  και  $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το ζεύγος μέτρησης  $1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 46^\circ\text{C}$  φαίνεται στο Σχήμα 5-28 η σύγκριση μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Από τα στοιχεία του Πίνακα 5-9 φαίνεται πως η απόκλιση για την τιμή της ισχύος στο MPP -0.2 %.



Σχήμα 5-28. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 46^\circ\text{C}$ .

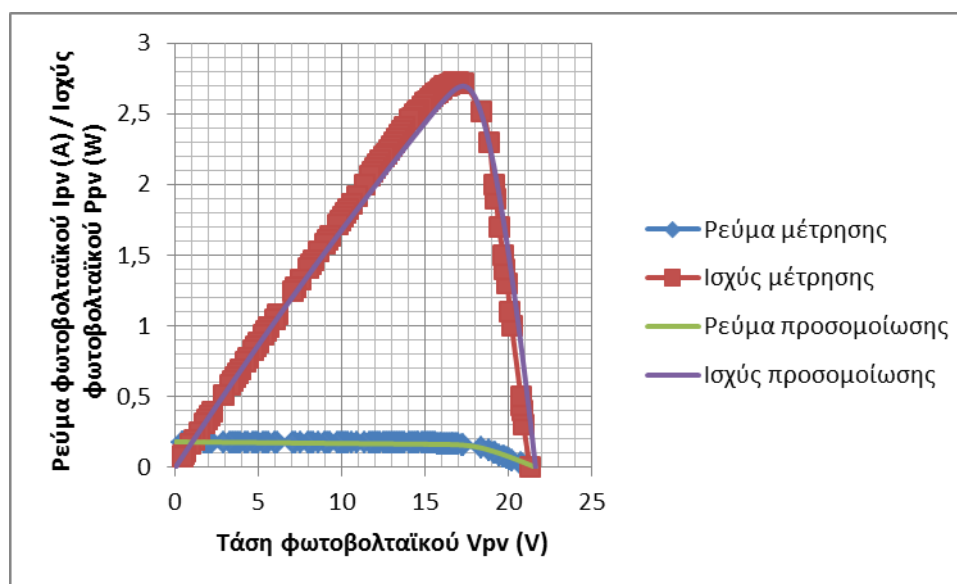
Πίνακας 5-9. Σύγκριση μέτρησης-προσομοίωσης από το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το ET-M53605.

$G$ ( $\text{W/m}^2$ )	$T$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P$ στο MPP (W)	$P'$ στο MPP (W)	% $RE_{P_{MPP}}$	% $RE_{V_{oc}}$	% $RE_{I_{isc}}$	% των $RE_{I_{mpp}}$ και $RE_{V_{mpp}}$	Μ.τ. % $ RE_{I-V} $	Μ.τ. % $ RE_{P-V} $
570	34	2.726	2.795	2.5	-0.4	3.4	1.8 / 0.7	2.9	2.9
760	35	3.554	3.593	1.1	0.09	5.1	-0.4 / 1.4	1.5	1.5
920	41	4.555	4.497	-1.3	0.1	-3.1	-3.1 / 1.9	2.7	2.7
1000	46	5.569	5.560	-0.2	-0.7	-2.8	-2.4 / 2.1	1.5	1.5

### 5.2.8 Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ET-M 53605 με το 5<sup>ο</sup> μοντέλο

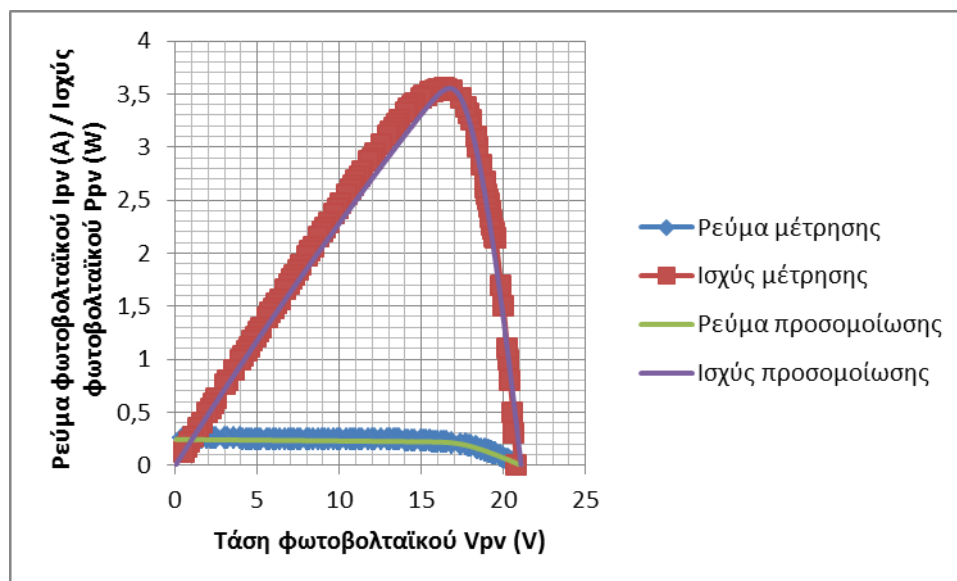
Το 5<sup>ο</sup> μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί σε κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δοκιμάστηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου ET-M 53605. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται στην παρούσα παράγραφο με τις μετρήσεις που έγιναν με το εν λόγω φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Για συνθήκες ακτινοβολίας – θερμοκρασίας  $570 \text{ W/m}^2$  και  $34 \text{ }^\circ\text{C}$  αντίστοιχα, οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που υπολογίζει το μοντέλο και εκείνες που προκύπτουν από τη μέτρηση απεικονίζονται στο Σχήμα 5-29. Στον Πίνακα 5-10 φαίνεται ότι το σχετικό σφάλμα μεταξύ προσομοίωσης – μέτρησης, αναφορικά με το σημείο μέγιστης ισχύος, είναι -1.1 % για τις συνθήκες αυτές.



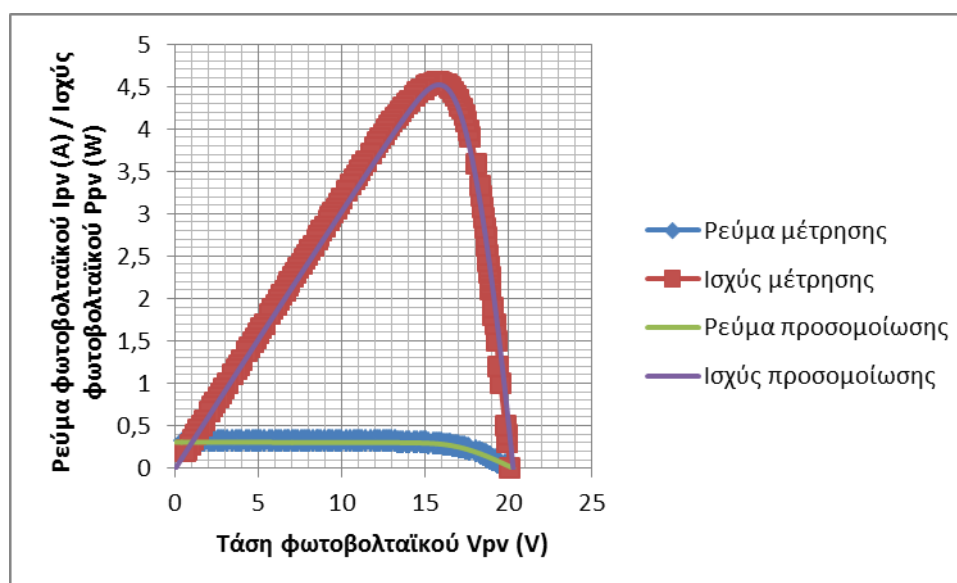
Σχήμα 5-29. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 570 \text{ W/m}^2$  και  $T = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το ζεύγος  $G = 760 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ , η σύγκριση μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης, των χαρακτηριστικών I-V και P-V απεικονίζεται στο Σχήμα 5-30. Η απόκλιση του σημείου μέγιστης ισχύος που υπολογίζει το μοντέλο και εκείνου που προκύπτει από τη μέτρηση, για αυτό το ζεύγος μέτρησης, είναι 0.03 %, με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 5-10.



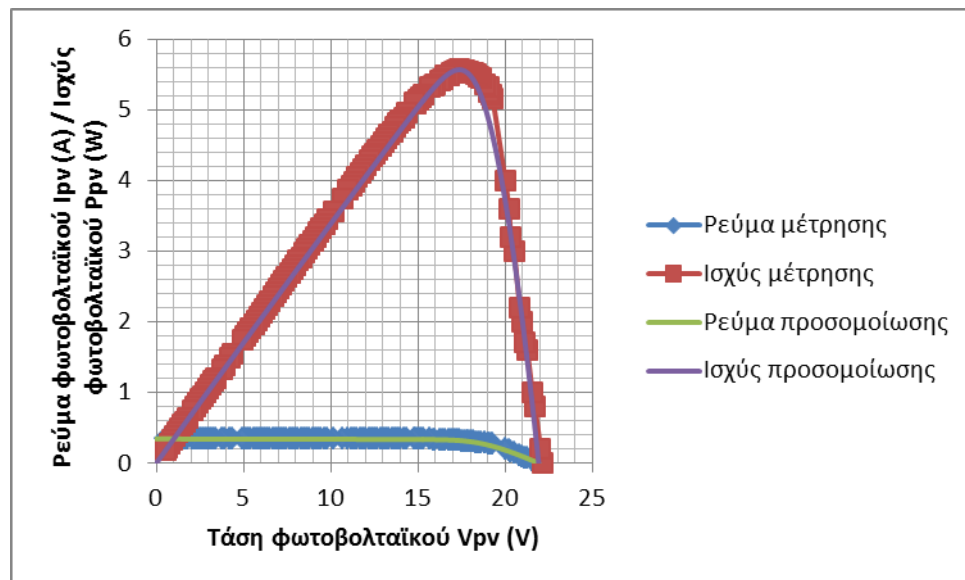
Σχήμα 5-30. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 760 \text{ W/m}^2$ , και  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που υπολογίζει το μοντέλο αντιπαραβάλλονται με εκείνες που προκύπτουν από τα δεδομένα των μετρήσεων στο Σχήμα 5-31 για το ζεύγος μέτρησης  $920 \text{ W/m}^2 - 41 \text{ }^\circ\text{C}$ . Στον Πίνακα 5-10 φαίνεται πως η απόκλιση μεταξύ μέτρησης – προσομοίωσης είναι -0.9 % για τις συνθήκες αυτές.



Σχήμα 5-31. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο, του πλαισίου ET-M53605 για  $G = 920 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το ζεύγος μέτρησης  $1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 46^\circ\text{C}$  φαίνεται στο Σχήμα 5-32 η σύγκριση μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Από τα στοιχεία του Πίνακα 5-10 φαίνεται πως η απόκλιση για την τιμή της ισχύος στο MPP  $-0.05\%$ .



Σχήμα 5-32. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο, του πλαισίου ET-M53605 για  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 46^\circ\text{C}$ .

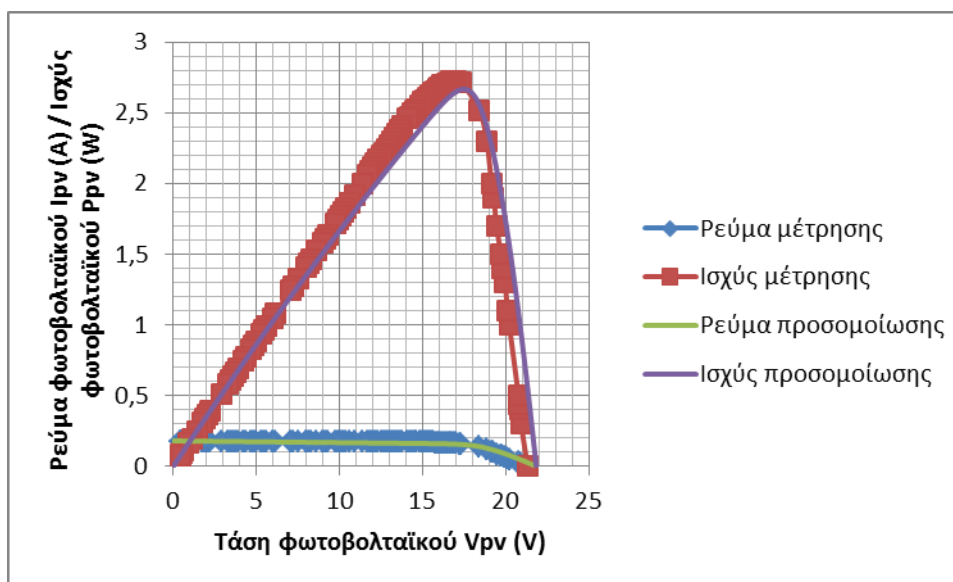
Πίνακας 5-10. Σύγκριση μέτρησης-προσομοίωσης από το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για το ET-M53605.

$G$ ( $\text{W/m}^2$ )	$T$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P$ στο MPP ( $\text{W}$ )	$P'$ στο MPP ( $\text{W}$ )	% $RE_{P_{MPP}}$	% $RE_{V_{oc}}$	% $RE_{I_{isc}}$	% των $RE_{I_{mpp}}$ και $RE_{V_{mpp}}$	Μ.τ. % $ RE_{I-V} $	Μ.τ. % $ RE_{P-V} $
570	34	2.726	2.695	-1.1	1.5	1.1	3.7 / 2.4	2.7	2.7
760	35	3.554	3.555	0.03	1.3	-3.5	-2.3 / 2.1	4.7	4.7
920	41	4.555	4.511	-0.9	0.9	-4.9	-1.7 / 0.7	2.7	2.7
1000	46	5.569	5.566	-0.05	-0.9	-1.4	-0.1 / 0.1	1.8	1.8

### 5.2.9 Μετρήσεις και προσομοίωση λειτουργίας του ET-M 53605 με το 6<sup>ο</sup> μοντέλο

Τελευταίο μοντέλο που μελετάται στην παρούσα εργασία είναι το 6<sup>ο</sup> μοντέλο, που όπως και το 5<sup>ο</sup>, αναφέρεται σε κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών του πλαισίου ET-M 53605 σε διάφορες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

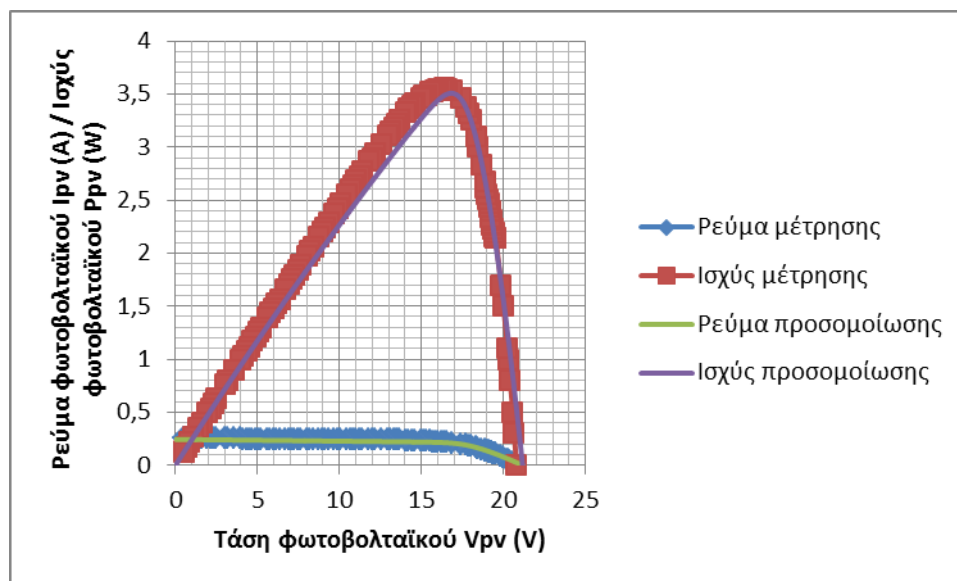
Η σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V, μέτρησης και προσομοίωσης, για συνθήκες ακτινοβολίας – θερμοκρασίας  $570 \text{ W/m}^2$  -  $34^\circ\text{C}$  αντίστοιχα, απεικονίζονται στο Σχήμα 5-33. Το σημείο μέγιστης ισχύος που υπολογίζει το μοντέλο αποκλίνει από τη μέτρηση κατά -2.2 % για αυτό το ζεύγος μέτρησης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5-11.



Σχήμα 5-33. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 570 \text{ W/m}^2$  και  $T = 34^\circ\text{C}$ .

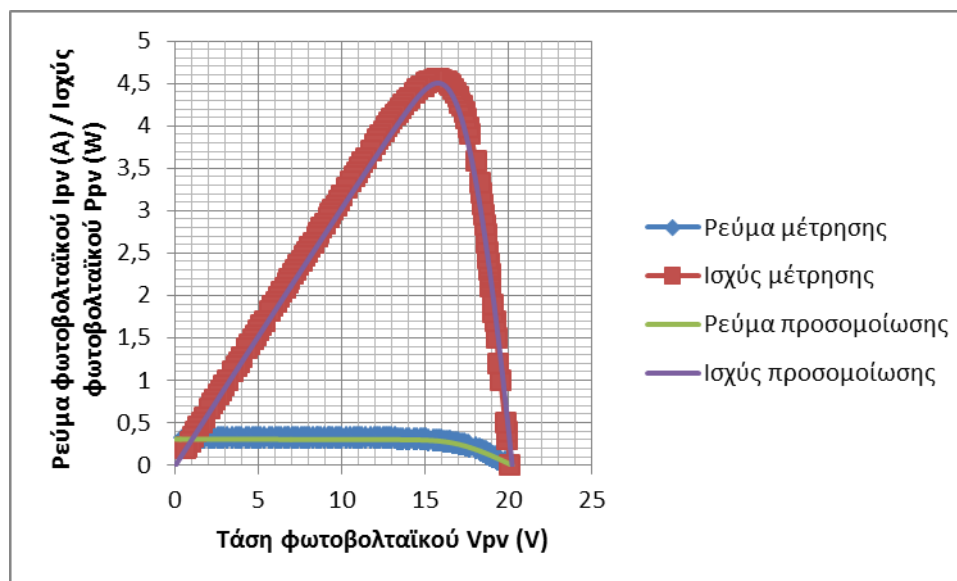
Η σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V που προσομοιώνει το μοντέλο, καθώς και εκείνων που προκύπτουν από τις μετρήσεις, για τις συνθήκες  $G = 760 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35^\circ\text{C}$  φαίνεται στο Σχήμα 5-34. Για αυτό το ζεύγος μέτρησης φαίνεται στον Πίνακα 5-11, πως το σημείο μέγιστης ισχύος της προσομοίωσης αποκλίνει από το αντίστοιχο της μέτρησης κατά -1.3 %.





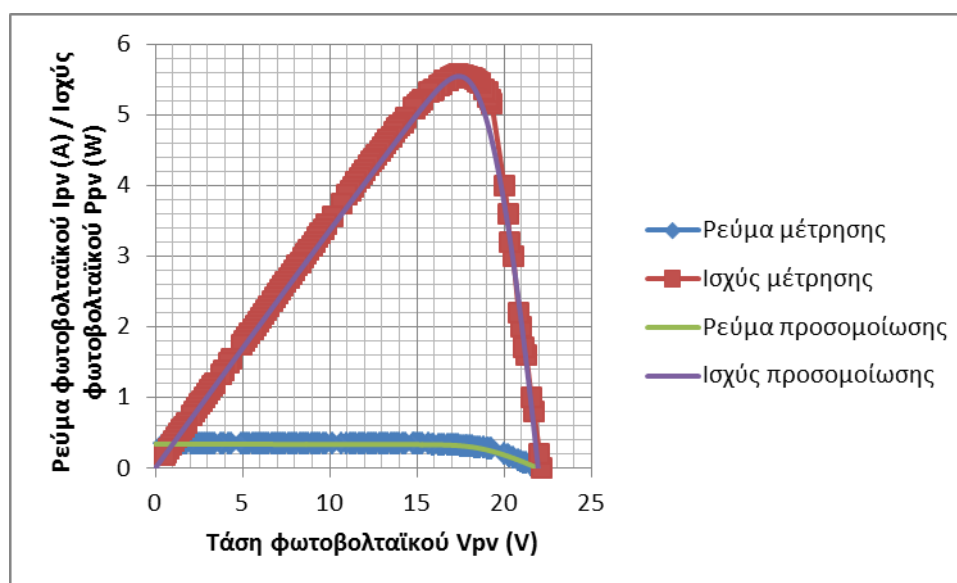
Σχήμα 5-34. Σύγκριση των χαρακτηριστικών I-V και P-V προσομοίωσης-μέτρησης, από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 760 \text{ W/m}^2$  και  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που φαίνονται στο Σχήμα 5-35, τόσο αυτές που προκύπτουν από τη μέτρηση, όσο και αυτές που υπολογίζει το μοντέλο, αναφέρονται στο ζεύγος  $G = 920 \text{ W/m}^2$  και  $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ . Στις συνθήκες αυτές ο Πίνακας 5-11 φανερώνει πως το σχετικό σφάλμα για το σημείο μέγιστης ισχύος που υπολογίζει το μοντέλο και αυτό που προκύπτει από τη μέτρηση είναι -1.1 %.



Σχήμα 5-35. Σύγκριση των χαρακτηριστικών  $I$ - $V$  και  $P$ - $V$  προσομοίωσης-μέτρησης, από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 920 \text{ W/m}^2$  και  $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Για το ζεύγος μέτρησης  $1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 46 \text{ }^\circ\text{C}$  φαίνεται στο Σχήμα 5-36 η σύγκριση μεταξύ προσομοίωσης και μέτρησης. Από τα στοιχεία του Πίνακα 5-11 φαίνεται πως η απόκλιση για την τιμή της ισχύος στο MPP -0.4 %.



Σχήμα 5-36. Σύγκριση των χαρακτηριστικών  $I$ - $V$  και  $P$ - $V$  προσομοίωσης-μέτρησης, από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο, για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ET-M53605 για  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 46 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Πίνακας 5-11. Σύγκριση μέτρησης-προσομοίωσης από το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για το ET-M53605.**

$G$ ( $W/m^2$ )	$T$ ( $^{\circ}C$ )	$P$ στο MPP ( $W$ )	$P'$ στο MPP ( $W$ )	% $RE_{P_{MPP}}$	% $RE_{V_{oc}}$	% $RE_{I_{isc}}$	% των $RE_{I_{mpp}}$ και $RE_{V_{mpp}}$	Μ.τ. % $ RE_{I-V} $	Μ.τ. % $ RE_{P-V} $
570	34	2.726	2.666	-2.2	2.4	1.1	5.5 / 3.6	3.9	3.9
760	35	3.554	3.508	-1.3	1.8	-3.5	-4.1 / 2.6	4.6	4.6
920	41	4.555	4.505	-1.1	0.5	-4.6	-1.7 / 0.7	2.7	2.7
1000	46	5.569	5.544	-0.4	-0.9	-3.9	-0.9 / 0.3	2.2	2.2

### 5.3 Σύγκριση των μοντέλων που προσομοιώνουν τη λειτουργία του πλαισίου ST 5

Το 1<sup>ο</sup>, 2<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> μοντέλο χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου ST 5, το οποίο είναι τεχνολογίας λεπτού υμενίου. Οι τιμές θερμοκρασίας του υλικού στο πλαίσιο δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη ποικιλία (26 – 44  $^{\circ}C$ ), ωστόσο οι τιμές της ακτινοβολίας μπορούν να βοηθήσουν περισσότερο στην σύγκριση των υπολογισμών των μοντέλων μεταξύ τους, αναφορικά με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

Όσον αφορά χαμηλές τιμές ακτινοβολίας ( $G = 370 \text{ } W/m^2$ ,  $T = 26 \text{ } ^{\circ}C$ ), με τη βοήθεια των στοιχείων των Πινάκων 5-3, 5-4, 5-5 και 5-6 μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής:

- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -4.2 %, για το  $V_{oc}$  είναι -0.8 %, ενώ για το MPP -1.1%. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.8 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -6.9 %, για το  $V_{oc}$  είναι -3.4 %, ενώ για το MPP 0.8 %. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.2 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -2.1 %, για το  $V_{oc}$  είναι 0.5 %, ενώ για το MPP -1.06 %. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 4.8 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 2.8 %, για το  $V_{oc}$  είναι 0.4 %, ενώ για το MPP -0.9 %. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 4.6 %.

Με βάση τα παραπάνω και παίρνοντας υπόψη τη σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπυλών, όπως φαίνονται στα Σχήματα 5-1, 5-5, 5-9, 5-13, το 2<sup>ο</sup> μοντέλο παρουσιάζει καλύτερη μέση ακρίβεια. Στο  $V_{oc}$  εμφανίζει μεγαλύτερη ακρίβεια το 4<sup>ο</sup> μοντέλο, ενώ στο  $I_{sc}$  το

3<sup>ο</sup>. Ωστόσο μεγαλύτερη ακρίβεια στο MPP, που είναι και καθοριστικός παράγοντας, εμφανίζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο. Άρα σε αυτές τις συνθήκες η λειτουργία του πλαισίου ST 5 αποδίδεται καλύτερα από το 2<sup>ο</sup> μοντέλο.

Για μεσαίες τιμές ακτινοβολίας ( $G = 610 \text{ W/m}^2$  -  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $G = 640 \text{ W/m}^2$  -  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ) η συμπεριφορά των μοντέλων συγκρίνεται παρακάτω αναλυτικά.

Για το ζεύγος μέτρησης  $G = 610 \text{ W/m}^2$  -  $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  παρατηρούνται για κάθε μοντέλο τα εξής:

- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 0.4 %, για το  $V_{oc}$  είναι 2 %, ενώ για το MPP -2.5 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-3. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 0.9 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -2.1 %, για το  $V_{oc}$  είναι 0.5 %, ενώ για το MPP -0.8 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-4. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 0.5 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 0.4 %, για το  $V_{oc}$  είναι -4.8 %, ενώ για το MPP -2.5 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-5. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 3.7 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 0.4 %, για το  $V_{oc}$  είναι -0.7 %, ενώ για το MPP -0.8 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-6. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 0.5 %.

Με βάση τα παραπάνω και παίρνοντας υπόψη τα Σχήματα 5-2, 5-6, 5-10 και 5-14, μεγαλύτερη ακρίβεια στο  $V_{oc}$  παρουσιάζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο κι έπεται το 2<sup>ο</sup>. Στο  $I_{sc}$  ακριβέστερο μοντέλο είναι το 4<sup>ο</sup>. Ωστόσο το 2<sup>ο</sup> μοντέλο υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια το MPP και για το λόγο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι αποδίδει καλύτερα τη λειτουργία του πλαισίου στις συνθήκες αυτές, μιας και μαζί με το 4<sup>ο</sup> παρουσιάζουν, επιπλέον, την καλύτερη μέση ακρίβεια.

Για το ζεύγος μέτρησης  $G = 640 \text{ W/m}^2$  -  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  παρατηρούνται για κάθε μοντέλο τα εξής:

- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 1.2 %, για το  $V_{oc}$  είναι 0.6 %, ενώ για το MPP -0.2 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-3. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 3.3 %.

- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -3.9 %, για το  $V_{oc}$  είναι -0.9 %, ενώ για το MPP 0.04 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-4. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 6.7 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -1.6 %, για το  $V_{oc}$  είναι -1.2 %, ενώ για το MPP -0.2 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-5. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 8.4 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 1.2 %, για το  $V_{oc}$  είναι 1.3 %, ενώ για το MPP -0.04 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-6. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 6.4 %.

Σε αυτές τις συνθήκες το 1<sup>ο</sup> μοντέλο παρουσιάζει την καλύτερη ακρίβεια για το σύνολο των στοιχείων που συγκρίνονται, παρά το γεγονός ότι τη μικρότερη απόκλιση για το MPP παρουσιάζουν το 2<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> μοντέλο, όπως μαρτυρά και η σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπυλών του κάθε μοντέλου που φαίνονται στα Σχήματα 5-3, 5-7, 5-11 και 5-15.

Σε συνθήκες υψηλών τιμών ακτινοβολίας συγκρίνεται παρακάτω η συμπεριφορά των μοντέλων συγκριτικά με τις μετρήσεις που λήφθηκαν με το πλαίσιο ST 5.

Για το ζεύγος μέτρησης  $G = 930 \text{ W/m}^2$  -  $T = 44 \text{ }^\circ\text{C}$  παρατηρούνται για κάθε μοντέλο τα εξής:

- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 1.4 %, για το  $V_{oc}$  είναι -0.5 %, ενώ για το MPP 0.06 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-3. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.3 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -2.5 %, για το  $V_{oc}$  είναι -1.9 %, ενώ για το MPP -0.2 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-4. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 1.4 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -3.7 %, για το  $V_{oc}$  είναι 7.1 %, ενώ για το MPP 0.8 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-5. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 3.8 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 4<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -0.8 %, για το  $V_{oc}$  είναι 0.09 %, ενώ για το MPP -0.4 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-6. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 6.5 %.

Σε αυτές τις συνθήκες ακριβέστερη προσομοίωση της λειτουργίας του πλαισίου γίνεται από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο, όπως φαίνεται από τη σύγκριση της ακρίβειας σε όλα τα σημεία και επιβεβαιώνεται από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπυλών του κάθε μοντέλου που φαίνονται στα Σχήματα 5-4, 5-8, 5-12 και 5-16. Συμπερασματικά όλα τα μοντέλα εμφανίζουν μικρές αποκλίσεις όσον αφορά το MPP. Το 2<sup>ο</sup> μοντέλο είναι αυτό που εμφάνισε τα καλύτερα αποτελέσματα για τα περισσότερα από τα ζεύγη μέτρησης. Το 1<sup>ο</sup> μοντέλο μπορεί να μην εμφανίζει τόσο μεγάλη ακρίβεια στο MPP όσο το 2<sup>ο</sup>, αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι εμφανίζει τη μικρότερη ποικιλία στη μέση ακρίβεια σε όλη τη χαρακτηριστική για το σύνολο των μετρήσεων. Τα δυο αυτά μοντέλα μπορούν να θεωρηθούν ακριβέστερα στην προσομοίωση της λειτουργίας του πλαισίου ST 5.

## **5.4 Σύγκριση των μοντέλων που προσομοιώνουν τη λειτουργία του πλαισίου ET-M 53605**

Τα μοντέλα που είναι ικανά να προσομοιώσουν τη λειτουργία του μονοκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου ET-M 53605 είναι το 1<sup>ο</sup>, το 2<sup>ο</sup>, το 3<sup>ο</sup>, το 5<sup>ο</sup> και το 6<sup>ο</sup>. Για κάθε ζεύγος μέτρησης ακτινοβολίας – θερμοκρασίας συγκρίνεται η ακρίβεια των προσομοιώσεων των μοντέλων με την αντίστοιχη πειραματική μέτρηση για τα σημεία  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  και MPP, όπως ακριβώς γίνεται στην παράγραφο 5.3 για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST 5.

Για το ζεύγος μέτρησης  $G = 570 \text{ W/m}^2$  -  $T = 34 \text{ }^\circ\text{C}$  παρατηρούνται για κάθε μοντέλο τα εξής:

- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 3.4 %, για το  $V_{oc}$  είναι -2.1 %, ενώ για το MPP -2.7 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-7. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.8 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 3.4 %, για το  $V_{oc}$  είναι -1.4 %, ενώ για το MPP 1.1 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-8. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 1.3 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 3.4 %, για το  $V_{oc}$  είναι -0.4 %, ενώ για το MPP 2.5 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-9. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.9 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 1.1 %, για το  $V_{oc}$  είναι 1.5 %, ενώ για το MPP -1.1 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-10. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.7 %.

- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 1.1 %, για το  $V_{oc}$  είναι 2.4 %, ενώ για το MPP -2.2 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-11. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 3.9 %.

Στις συνθήκες αυτές, με εξαίρεση τη μέση απόκλιση για το σύνολο της χαρακτηριστικής, ακριβέστερο μοντέλο είναι το 5<sup>ο</sup> . Το 2<sup>ο</sup> μοντέλο παρουσιάζει κι αυτό μικρές αποκλίσεις κι επιπλέον εμφανίζει τη μικρότερη μέση απόκλιση σε σχέση με τα υπόλοιπα, όπως φαίνεται και από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπυλών του κάθε μοντέλου που φαίνονται στα Σχήματα 5-17, 5-21, 5-25, 5-29 και 5-33.

Για το ζεύγος  $G = 760 \text{ W/m}^2$  -  $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  εξάγονται τα εξής για κάθε μοντέλο:

- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -1.5 %, για το  $V_{oc}$  είναι 0.2 %, ενώ για το MPP -0.4 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-7. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 0.8 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -1.5 %, για το  $V_{oc}$  είναι -3.3 %, ενώ για το MPP 0.6 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-8. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.3 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι 5.1 %, για το  $V_{oc}$  είναι 0.09 %, ενώ για το MPP 1.1 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-9. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 1.5 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -3.5 %, για το  $V_{oc}$  είναι 1.3 %, ενώ για το MPP 0.03 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-10. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 4.7 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -3.5 %, για το  $V_{oc}$  είναι 1.8 %, ενώ για το MPP -1.3 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-11. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 4.6 %.

Το 5<sup>ο</sup> μοντέλο εμφανίζει τη μεγαλύτερη ακρίβεια στο MPP. Ακριβέστερο για όλα τα σημεία σύγκρισης είναι το 1<sup>ο</sup> και άρα τις συνθήκες αυτές ακριβέστερη προσομοίωση της λειτουργίας του πλαισίου γίνεται από το 1<sup>ο</sup> μοντέλο, όπως φαίνεται και από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών καμπυλών του κάθε μοντέλου που φαίνονται στα Σχήματα 5-18, 5-22, 5-26, 5-30 και 5-34.

Για το ζεύγος  $G = 920 \text{ W/m}^2$  -  $T = 41 \text{ }^\circ\text{C}$  εξάγονται τα εξής για κάθε μοντέλο:

- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -1.2 %, για το  $V_{oc}$  είναι 2.3 %, ενώ για το MPP -0.9 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-7. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 4.6 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -5.9 %, για το  $V_{oc}$  είναι 2.1 %, ενώ για το MPP 0.9 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-8. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 10.7 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -3.1 %, για το  $V_{oc}$  είναι 0.1 %, ενώ για το MPP -1.3 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-9. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.7 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -4.9 %, για το  $V_{oc}$  είναι 0.9 %, ενώ για το MPP -0.9 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-10. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.7 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -4.6 %, για το  $V_{oc}$  είναι 0.5 %, ενώ για το MPP -1.1 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-11. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.7 %.

Στις συνθήκες αυτές το 3<sup>ο</sup>, 5<sup>ο</sup> και 6<sup>ο</sup> εμφανίζουν παρόμοιες αποκλίσεις στις προσομοιώσεις τους όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.19, 5.23, 5.27, 5.31 και 5.35. Το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> μοντέλο, αν και τα ανταγωνίζονται όσον αφορά τα σημεία σύγκρισης, παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση στη μέση ακρίβεια για το σύνολο της χαρακτηριστικής.

Για το ζεύγος  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  -  $T = 46 \text{ }^\circ\text{C}$  εξάγονται τα εξής για κάθε μοντέλο:

- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 1<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -2.8 %, για το  $V_{oc}$  είναι -0.1 %, ενώ για το MPP -0.4 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-7. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.6 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 2<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -1.9 %, για το  $V_{oc}$  είναι -2.5 %, ενώ για το MPP -0.4 %, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5-8. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 1.8 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 3<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -2.8 %, για το  $V_{oc}$  είναι -0.7 %, ενώ για το MPP -0.2 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-9. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 1.5 %.



- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 5<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -1.4 %, για το  $V_{oc}$  είναι -0.9 %, ενώ για το MPP -0.05 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-10. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 1.8 %.
- Το σχετικό σφάλμα που παρουσιάζει το 6<sup>ο</sup> μοντέλο για το  $I_{sc}$  είναι -3.9 %, για το  $V_{oc}$  είναι -0.9 %, ενώ για το MPP -0.4 %, με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 5-11. Η μέση ακρίβεια σε όλη την χαρακτηριστική είναι 2.2 %.

Για το ζεύγος αυτό οι αποκλίσεις των μοντέλων κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Ένα προβάδισμα έχουν το 3<sup>ο</sup> και 5<sup>ο</sup> μοντέλο.

Συμπερασματικά οι αποκλίσεις του 3<sup>ου</sup>, 5<sup>ου</sup> και 6<sup>ου</sup> μοντέλου στο σύνολο των μετρήσεων είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους. Το 5<sup>ο</sup> μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί πιο αξιόπιστο για τις προσομοιώσεις του, λόγω της ακρίβειας που εμφανίζει στο MPP για το σύνολο των συνθηκών μέτρησης, αλλά και της μικρής διακύμανσης των τιμών που υπολογίζει στο σημείο αυτό.

# 6.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

### 6.1 Επίλογος

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των μοντέλων ως προς την ακρίβεια με την οποία προσομοιώνουν τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων, στην παρούσα εργασία μελετάται η συμπεριφορά των προσομοιώσεων, σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις, στις περιοχές γύρω από το σημείο του ρεύματος βραχυκυκλώματος ( $I_{sc}$ ), του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) και του σημείου της τάσης ανοικτοκύκλωσης ( $V_{oc}$ ). Τα μοντέλα συγκρίνονται ακόμη σχετικά με τη μέση ακρίβεια τους για το σύνολο της προσομοίωσης της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίδεται στο σημείο μέγιστης ισχύος και την ακρίβεια με την οποία αυτό προσομοιώνεται από κάθε μοντέλο για την μεταξύ τους σύγκριση.

Τα μοντέλα 1, 2 και 3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την προσομοίωση κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πλαισίων, όσο και για την προσομοίωση φωτοβολταϊκών πλαισίων λεπτού υμενίου. Το 4<sup>ο</sup> μοντέλο ενδείκνεται για πλαίσια λεπτού υμενίου, ενώ τα 5 και 6 για κρυσταλλικά. Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα μοντέλα 1, 2, 3 και 4 χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του φωτοβολταϊκού πλαισίου ST 5 το οποίο είναι πλαίσιο τεχνολογίας CIS-thin film. Για την προσομοίωση του μονοκρυσταλλικού πλαισίου ET-M 53605 χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα 1, 2, 3, 5 και 6.

Με βάση έναν αριθμό πειραματικών μετρήσεων που λήφθηκαν με κάθε πλαίσιο ελέγχθηκαν τα μοντέλα για την προσομοίωση των μετρήσεων αυτών. Διαπιστώθηκε ότι ανάμεσα στα

μοντέλα που προσομοίωσαν τη λειτουργία του ST 5 υπερτερούν το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> ενώ ανάμεσα στα μοντέλα που προσομοίωσαν τη λειτουργία του ET-M 53605, υπερτερεί το 5<sup>ο</sup>.

## 6.2 Πιθανές βελτιώσεις

Στην παρούσα παράγραφο προτείνονται ορισμένες πιθανές βελτιώσεις σχετικά με την παρούσα εργασία και τα μοντέλα που αυτή είχε ως αντικείμενο.

Μια πρώτη επέκταση θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη συλλογή μετρήσεων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, σε ένα μεγάλο εύρος τιμών για τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία. Μια τέτοια σύγκριση των προσομοιώσεων που εξάγουν τα μοντέλα θα μπορούσε στατιστικά να εξάγει ασφαλέστερα συμπεράσματα για την ακρίβειά με την οποία αυτά μπορούν να κάνουν πρόβλεψη, μιας και οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών πλαισίων προορίζονται για καθημερινή χρήση σε όλη τη διάρκεια του έτους.

Πεδίο μελέτης μπορεί επίσης να αποτελέσει η λεπτομερέστερη βελτίωση του κάθε μοντέλου. Μια πιο συγκεκριμένη μελέτη της συμπεριφοράς κάθε παραμέτρου, που επηρεάζει τον τρόπο που υπολογίζει κάθε μοντέλο τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου, ή ακόμη στην ανάπτυξη νέων και πιο εξειδικευμένων μοντέλων για κάθε τύπο φωτοβολταϊκού στοιχείου (ή πλαισίου).

Τέλος θα μπορούσε να επεκταθεί η μελέτη σε τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων που δεν εξετάζει η παρούσα εργασία, όπως τα πολυκρυσταλλικά, τα άμορφου πυριτίου κλπ.

# 7.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Ι. Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά συστήματα, 2<sup>η</sup> έκδοση Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 2007.
- [2] E. Lorenzo, Solar Electricity-Engineering of Photovoltaic Systems, 1<sup>st</sup> ed. Sevilla, Spain: Progensa, 1994
- [3] Παπαδόπουλος Αθανάσιος (2011, Ιούνιος) Τεχνοοικονομική μελέτη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά για τροφοδοσία γεωργικής μονάδας, κεφάλαιο 2.5. Ανακτήθηκε από το Ιδρυματικό Αποθετήριο του Πανεπιστημίου Πατρών: <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/>
- [4] Chenni, R., Makhlouf, M., Kerbache, T., Bouzid, A. (2007, September) A detailed modeling method for photovoltaic cells, Energy, Volume 32, Issue 9, pp. 1724 – 1730.
- [5] Tina, G.M., Scrofani, S. (2008) Electrical and thermal model for PV module temperature evaluation, MELECON 2008 – The 4<sup>th</sup> IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, pp. 585 – 590.
- [6] Jiang, Yuncong, Abu Qahouq, Jaber A., Batarseh, I. (2010) Improved solar PV cell Matlab simulation model and comparison, Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp. 2770 – 2773.

- [7] Celik, Ali Naci, Acikgoz, Nasir. (2007, January) Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models, *Applied Energy*, Volume 84, Issue 1, pp. 1 – 15.
- [8] Orioli, Aldo, Di Gangi, Alessandra. (2013, February) A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data, *Applied Energy*, Volume 102, pp. 1160 – 1177.
- [9] Lo Brano, Valerio, Orioli, Aldo, Ciulla, Giuseppina. (2012, October) On the experimental validation of an improved five-parameter model for silicon photovoltaic modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 105, pp. 27-39.
- [10] G.M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.