



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΑΣΩΝ Α. ΡΟΥΤΣΟΛΙΑΣ

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΑΣΩΝ Α. ΡΟΥΤΣΟΛΙΑΣ

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την2008.

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2008

.....
ΙΑΣΩΝ Α. ΡΟΥΤΣΟΛΙΑΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © ΙΑΣΩΝ Α. ΡΟΥΤΣΟΛΙΑΣ 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ορισμένων παραγόντων μείωσης της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών σταθμών, και συγκεκριμένα της σκίασης και της ρύπανσης. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, οι εν λόγω παράγοντες μοντελοποιήθηκαν και εν συνεχεία ενσωματώθηκαν σε ένα υπολογιστικό μοντέλο, μέσω της προγραμματιστικής γλώσσας Matlab. Το μοντέλο αυτό παρέχει μια εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης μιας φβ συστοιχίας, και κατ' επέκταση ενός φβ σταθμού, σε ετήσια βάση.

Αρχικά, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των παραγόντων μείωσης (derating factors) που επηρεάζουν τη διαθέσιμη από τα φβ πλαίσια ενέργεια. Στη συνέχεια προσδιορίζεται ένα γραμμικό μοντέλο για την πρόβλεψη των απωλειών ενέργειας που συντελούνται στα φβ συστήματα, εξαιτίας της συσσώρευσης ρύπων στην επιφάνεια των φβ πλαισίων. Το μοντέλο αυτό αποτελεί βελτίωση της κλασικής υπόθεσης ενός σταθερού παράγοντα απωλειών και προσεγγίζει τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας μειώνοντας τις απώλειες λόγω ρύπανσης στις βροχερές περιόδους και σταδιακά αυξάνοντας τις κατά τη διάρκεια άνυδρων περιόδων. Κατόπιν, παρατίθεται μια γεωμετρική ανάλυση του φαινομένου της σκίασης, στην οποία είναι πιθανό να υπόκεινται – σε μεγάλης κλίμακας φβ συστήματα όπως και σε άλλες περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης – οι διατεταγμένες σε σειρές φβ συστοιχίες από γειτονικές τους σειρές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για την πληρέστερη ποσοτικοποίηση του εν λόγω φαινομένου διερευνάται η ηλεκτρική απόκριση των φβ συστοιχιών υπό συνθήκες μερικής σκίασης μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων με το λογισμικό PSpice. Τα εξαγόμενα ποσοστά μείωσης της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου εφαρμόζονται κατάλληλα στον κώδικα του ενεργειακού μοντέλου για την αποτίμηση της τελικής ενεργειακής παραγωγής. Τέλος, γίνεται εφαρμογή σε ένα συγκεκριμένο τυπικό φβ σταθμό μεγέθους 1MW και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, προκύπτουν κάποια βασικά συμπεράσματα σχετικά με το μέγεθος της επίδρασης των υπό εξέταση παραγόντων στην ετήσια ενεργειακή απόδοση του φβ σταθμού.

Λέξεις Κλειδιά

Φωτοβολταϊκή Συστοιχία, Παράγοντας Μείωσης, Σκίαση, Ρύπανση, Ενεργειακή Απόδοση, Ηλεκτρική Απόκριση υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης

ABSTRACT

The objective of this diploma thesis is to study the effect of the derating factors on photovoltaic station performance, and especially that of shadow and soiling. Concerning this study, the aforementioned parameters have been modeled and incorporated in a programming model using the language of technical computing Matlab. This model estimates the energy yield produced by a PV array or a PV station on an annual basis.

Primarily, a brief description of the derating factors influencing the energy available from PV modules is made. Then a linear model for predicting energy losses due to the accumulation of dirt on PV module's surface is determined. This soiling rate model is an improvement upon the standard assumption that the soiling losses remain constant and approximates the actual operating conditions by eliminating the losses due to soiling during rainy periods and gradually increasing them during the dry ones. Afterwards, a geometric analysis of shading caused on one row by the adjacent – in large scale PV systems and in other cases with limited field area – during the day is given. In order to better quantify this effect, the electrical response of PV arrays under partially shaded conditions is investigated with the aid of appropriate simulations using the software PSpice. The derived power output reduction percentages are applied to the performance model code in order to evaluate the final energy production. Finally, the case study is applied on a typical 1MW PV station and, based on the respective results, some basic conclusions concerning the magnitude of influence of the investigated parameters on annual energy production are derived.

Key Words

Photovoltaic Array, Derating Factor, Shading, Soiling, Energy Yield, Electrical Response under Partially Shaded Conditions

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες στον Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Σταύρο Παπαθανασίου, επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για τη συνολική καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στην Υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Ευαγγελία Παρασκευαδάκη για την πολύτιμη βοήθεια και την αμέριστη συμπαράστασή της.

Πολλές ευχαριστίες στις φίλες και συναδέλφους Βασιλική Παπαγεωργίου και Μαρία-Αγγελική Σταθοπούλου καθώς και στο Νικόλαο Πέππα, η συμβολή των οποίων υπήρξε καθοριστική στην περάτωση της εργασίας αυτής.

Εγκάρδιες ευχαριστίες στη συνάδελφο Αλεξάνδρα Πέππα για την εξαιρετική συνεργασία και τη στήριξή της, η διπλωματική εργασία της οποίας εκπονήθηκε παράλληλα, διαθέτει συναφές αντικείμενο μελέτης και συμπληρωματικό περιεχόμενο με την παρούσα.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, στην οποία και αφιερώνεται η εργασία αυτή.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	v
Abstract	vii
Ευχαριστίες	ix
Πίνακας περιεχομένων	xi
Κεφάλαιο 1	
Εισαγωγή	
1.1 Γενικά	2
1.2 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	2
Κεφάλαιο 2	
Φωτοβολταϊκά Συστήματα	
2.1 Σύνοψη εξέλιξης	6
2.1.1 Εισαγωγή	6
2.1.2 Μια διαρκώς αναπτυσσόμενη αγορά	7
2.1.3 Ένα αρκετά υποσχόμενο μέλλον	8
2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	8
2.2.1 Εισαγωγή	8
2.2.2 Λειτουργία φβ στοιχείου	9
2.3 Ηλιακή Ενέργεια	11
2.3.1 Άμεση και διάχυτη ακτινοβολία	13
2.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φβ στοιχείων	15
2.4.1 Παράμετροι στοιχείων και I-V καμπύλες	17
2.5 ΦΒ Στοιχεία, Πλαίσια, Συστοιχίες	20
Κεφάλαιο 3	
Παράγοντες μείωσης ενεργειακής απόδοσης φβ συστημάτων	
3.1 Σύνοψη κυριότερων παραγόντων μείωσης	24
3.2 dc Ενέργεια διαθέσιμη από φβ πλαίσια	25
3.3 Παράγοντες επίδρασης dc ενεργειακής απόδοσης	26
3.4 ac Ενέργεια διαθέσιμη από φβ συστήματα	33
3.5 Συντελεστής απόδοσης	36

Κεφάλαιο 4**Επίδραση Ρύπανσης**

4.1	Ανάπτυξη μοντέλου πρόβλεψης απωλειών ρύπανσης	38
4.1.1	Προσέγγιση απωλειών με χρήση κατάλληλου μοντέλου	38
4.1.2	Ανάλυση ρυθμού ρύπανσης	40
4.2	Στοιχειώδης οικονομική ανάλυση	46
4.2.1	Παρουσίαση προβλήματος	46
4.2.2	Σχεδιασμός και αποτελέσματα έρευνας	47
4.2.3	Οικονομική αξιολόγηση	48
4.2.4	Επίλογος – Συμπέρασμα	49

Κεφάλαιο 5**Επίδραση Σκίασης**

5.1	Σκίαση συλλεκτών διατεταγμένων σε διαδοχικές σειρές	52
5.1.1	Γεωμετρία σκίασης	52
5.1.2	Μεταβολές σκίασης στην επιφάνεια φβ συλλεκτών	59
5.1.3	Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα	62
5.2	Επίδραση σκίασης στην ηλεκτρική απόκριση φβ στοιχείων	64
5.2.1	Ηλεκτρική απόκριση υπό συνθήκες μερικής σκίασης	64
5.2.2	Λειτουργία χωρίς δίοδο bypass	65
5.2.3	Επίδραση διόδου bypass	67
5.3	Μελέτη σκίασης με χρήση του λογισμικού PSpice	69
5.3.1	Ιδανικό ισοδύναμο κύκλωμα	69
5.3.2	Γενικευμένο μοντέλο φβ στοιχείου	72
5.3.3	Μοντέλο PSpice φβ πλαισίου	74
5.3.4	Μετάβαση σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας	76

Κεφάλαιο 6**Εφαρμογή, Αποτελέσματα Προσομοιώσεων**

6.1	Είσοδοι μοντέλου ενεργειακής απόδοσης	80
6.2	Περιγραφή φβ σταθμού	81
6.3	Μελέτη επίδρασης ρύπανσης μέσω προσομοιώσεων	84
6.4	Μελέτη επίδρασης σκίασης μέσω προσομοιώσεων	93
6.4.1	Γεωμετρία και μεταβολές σκίασης στην επιφάνεια φβ συλλεκτών	93
6.4.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τον προς εξέταση φβ σταθμό	103
6.4.3	Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση του λογισμικού PSpice	109

Κεφάλαιο 7**Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

7.1	Συμπεράσματα	124
7.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	125

Βιβλιογραφία	127
---------------------	-----

Παράρτημα Α	129
--------------------	-----

Παράρτημα Β	141
--------------------	-----

Κεφάλαιο **1**

Εισαγωγή

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στις μέρες μας, η αλόγιστη χρήση συμβατικών πηγών ενέργειας για την κάλυψη των σύγχρονων αναγκών έχει προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη ενεργειακή κρίση που συντελείται παγκοσμίως αλλά και τις δυνατότητες που παρέχονται με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστά αναγκαία την περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη του κλάδου των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Στο συγκεκριμένο κλάδο εντάσσεται και η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών με σημαντικές προοπτικές ανάπτυξης στον ελληνικό χώρο.

Τα τελευταία χρόνια, η ταχύτατη ανάπτυξη της βιομηχανίας έχει επεκτείνει το ενδιαφέρον και την ανάγκη για έρευνα στον τομέα της φωτοβολταϊκής επιστήμης. Επιστήμης πολυδιάστατης που έχει τις βάσεις της στην τεχνολογία των ημιαγωγών, στην οποία υπάγονται τα ηλιακά στοιχεία, στην ηλεκτρονική και τη θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων για τη σχεδίαση και ανάλυση των φβ συστημάτων.

Οι περισσότερες τεχνολογικές εφαρμογές φβ συστημάτων απαιτούν τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή για την πραγματοποίηση γρήγορων και ακριβών υπολογισμών ή προσομοιώσεων. Μια ανάλυση, επικεντρωμένη στην κατανόηση των επιδράσεων της σκίασης και της ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση φβ σταθμών επιχειρείται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με χρήση των υπολογιστικών πακέτων Matlab και PSpice.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως προαναφέρθηκε, είναι η διερεύνηση των επιδράσεων που επιφέρουν στην ενεργειακή απόδοση των φβ συστημάτων η σκίαση και η ρύπανση των πλαισίων. Η διάρθρωση της εργασίας έχει ως εξής:

Στο παρόν **1^ο κεφάλαιο** γίνεται μια αναφορά στην σύγχρονη ενεργειακή πραγματικότητα και στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών σε συνδυασμό με τις εξελίξεις που παρατηρούνται στον τομέα αυτό.

Το **2^ο κεφάλαιο** περιλαμβάνει μια γενική επισκόπηση των φωτοβολταϊκών (ιστορική αναδρομή, φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ηλιακή ενέργεια, φβ πλαίσια).

Στο **3^ο κεφάλαιο** γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των παραγόντων μείωσης (derating factors) που επηρεάζουν τη διαθέσιμη από τα φβ πλαίσια ενέργεια.

Στο **4^ο κεφάλαιο** παρουσιάζεται ένα γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης των απωλειών ενέργειας που οφείλονται στη ρύπανση των φβ συστημάτων και στη συνέχεια γίνεται μια εκτίμηση του οικονομικού αντίκτυπου που μπορεί να έχει το εν λόγω φαινόμενο.

Το **5^ο κεφάλαιο** περιλαμβάνει τη μελέτη του φαινομένου της σκίασης. Αρχικά παρατίθεται μια γεωμετρική ανάλυση της σκίασης, στη συνέχεια εξηγείται σε θεωρητικό επίπεδο η επίδρασή της στη λειτουργία των φβ πλαισίων και, τέλος,

διερευνάται η ηλεκτρική απόκριση των φβ συστοιχιών υπό συνθήκες μερικής σκίασης μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων με το λογισμικό PSpice.

Στο **6^ο κεφάλαιο** γίνεται εφαρμογή σε ένα συγκεκριμένο τυπικό φβ σταθμό μεγέθους 1MW και παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου της Matlab. Επίσης, δίνονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού PSpice και τα οποία καταδεικνύουν την ηλεκτρική συμπεριφορά των φβ στοιχείων κάτω από διαφορετικές συνθήκες σκίασης

Στο **7^ο κεφάλαιο**, τέλος, συνοψίζονται κάποια βασικά συμπεράσματα σε συνδυασμό με κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια γενική επισκόπηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αρχικά γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή και ακολούθως περιγράφεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Στη συνέχεια δίνονται κάποια στοιχεία για την λαμβανόμενη από τον ήλιο ενέργεια, περιγράφονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φβ στοιχείων και, τέλος, γίνεται αναγωγή στο φβ πλαίσιο και τη φβ συστοιχία.

2.1 ΣΥΝΟΨΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ

2.1.1 Εισαγωγή

Ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel περιέγραψε πρώτος το φωτοβολταϊκό φαινόμενο το 1839. Η ανακάλυψη στην οποία προέβη είχε να κάνει με το γεγονός ότι ορισμένα υλικά παρουσίαζαν την ικανότητα παραγωγής μικρών ποσοτήτων ηλεκτρικού ρεύματος όταν βρίσκονταν εκτεθειμένα σε ηλιακή ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό μελετήθηκε αρχικά σε στερεά υλικά, όπως το σελήνιο, από τον Heinrich Hertz τη δεκαετία του 1870. Σε σύντομο χρονικό διάστημα, φωτοβολταϊκά στοιχεία από σελήνιο μετέτρεπαν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια σε ποσοστό 1% με 2%. (Η ικανότητα μετατροπής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελεί το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική).

Τις δεκαετίες του '40 και του '50 πραγματοποιήθηκαν τα πρώτα βήματα προς την κατεύθυνση της εμπορικής αξιοποίησης των φωτοβολταϊκών (εν συντομία φβ) με την ανάπτυξη της μεθόδου Czochralski για την παραγωγή κρυσταλλικού πυριτίου υψηλής καθαρότητας. Το 1954, οι επιστήμονες των εργαστηρίων Bell βασιζόμενοι στη μέθοδο Czochralski κατασκεύασαν το πρώτο φωτοβολταϊκό (ή αλλιώς ηλιακό) στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου, με ικανότητα μετατροπής 4%.

Παρόλο που έγιναν αρκετές προσπάθειες τη δεκαετία του '50 για τη χρήση των στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου σε εμπορικές εφαρμογές, η πρώτη βασική εφαρμογή αποτελούσε μέρος ενός αεροδιαστημικού προγράμματος. Το 1958, ο δορυφόρος Vanguard περιελάμβανε μια μικρή φβ συστοιχία για την τροφοδότηση του ασυρμάτου ραδιοπομπού του. Τα φβ στοιχεία λειτούργησαν τόσο καλά που η φβ τεχνολογία αποτέλεσε σημαντικό τμήμα των διαστημικών προγραμμάτων από τότε και στο εξής. Στη σημερινή εποχή τα φβ τροφοδοτούν ουσιαστικά όλους τους δορυφόρους, συμπεριλαμβανομένων αυτών που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες, τα συστήματα άμυνας και την επιστημονική έρευνα. Ο διαστημικός στόλος των Ηνωμένων Πολιτειών χρησιμοποιεί φβ συστοιχίες για την παραγωγή μεγάλου τμήματος της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βιομηχανία των υπολογιστών και ιδιαίτερα η τεχνολογία των ημιαγωγικών τρανζίστορ, συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη των φβ στοιχείων. Τα τρανζίστορ και τα φβ στοιχεία κατασκευάζονται από συναφή υλικά και η λειτουργία τους διέπεται από αρχές παρόμοιων φυσικών μηχανισμών. Η πρόοδος, συνεπώς, στην έρευνα γύρω από τα τρανζίστορ αποτελεί σταθερή πηγή άντλησης πληροφοριών για την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στις ημέρες μας ωστόσο, αυτή η άντληση πληροφοριών λειτουργεί και αντίστροφα, δηλαδή τα επιτεύγματα στον τομέα των φβ πολλές φορές υιοθετούνται από τη βιομηχανία των ημιαγωγών.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα φωτοβολταϊκά τη δεκαετία του 1970 παρέμεναν πολύ ακριβά για τις περισσότερες επίγειες εφαρμογές. Στα μέσα της δεκαετίας του '70, η αύξηση του κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης, ανανέωσε το ενδιαφέρον για την προώθηση των φβ και τη μείωση του κόστους τους. Από τότε, οι κυβερνήσεις, η βιομηχανία και οι ερευνητικοί οργανισμοί έχουν επενδύσει τεράστια κεφάλαια στην έρευνα, την ανάπτυξη και την παραγωγή φβ. Μεγάλο τμήμα αυτής της προσπάθειας επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη

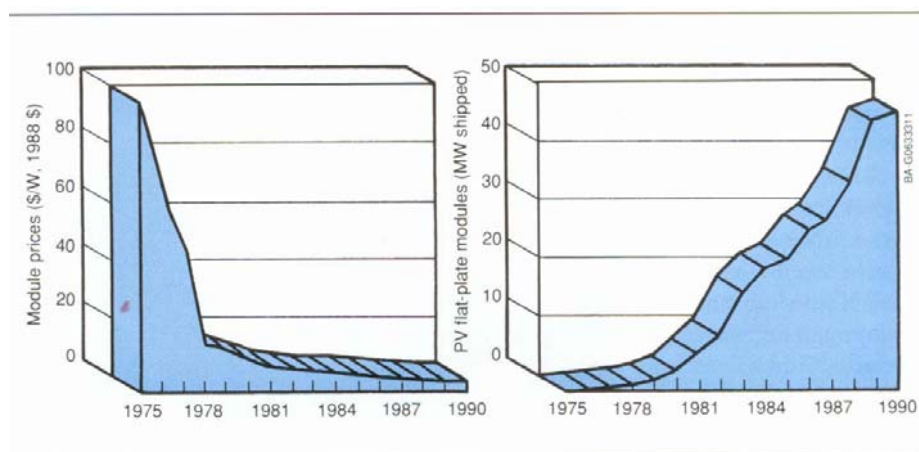
των ιδιοτήτων του πολυκρυσταλλικού πυριτίου, του υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των πρώτων φβ στοιχείων.

Σαν αποτέλεσμα, οι συσκευές κρυσταλλικού πυριτίου έχουν γίνει ολοένα και πιο αποδοτικές, αξιόπιστες και ανθεκτικές. Άλλα “υποσχόμενα” υλικά που μελετώνται είναι το μη κρυσταλλικό – άμορφο – πυρίτιο, τα πολυκρυσταλλικά τελουριούχο κάδμιο και σύμπλοκο δισεληνούχο χαλκού με ίνδιο (copper indium diselenide) και άλλα μονοκρυσταλλικά υλικά όπως το αρσενιούχο γάλλιο.

Στη σημερινή εποχή, τα φβ συστήματα του εμπορίου έχουν ικανότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική που κυμαίνεται από 5% έως 15%. Επίσης, διαθέτουν αρκετά υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και η διάρκεια ζωής τους είναι μεγαλύτερη από 20 χρόνια. Το κόστος της παραγόμενης από φβ συστήματα ενέργειας έχει μειωθεί πλέον σημαντικά (15 με 20 φορές σε σύγκριση με παλαιότερα) ενώ τα φβ πλαίσια στοιχίζουν γύρω στα 6\$ ανά Watt και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με περίπου 0.25\$ ανά kWh.

2.1.2 Μια διαρκώς αναπτυσσόμενη αγορά

Η μείωση των τιμών στη βιομηχανία των φβ έχει συμβάλλει στην ευρεία εξάπλωση της αγοράς τους. Τα τελευταία χρόνια, η παγκόσμια παραγωγή φβ πλαισίων έχει αυξηθεί κατά 60% πλησιάζοντας τα 47 MW. Πολλές χώρες της Ευρώπης, η Ιαπωνία, η Κίνα, η Ινδία έχουν θεσμοθετήσει νέα φβ προγράμματα ή επεκτείνει ήδη υπάρχοντα. Ο αριθμός των οργανισμών που σχετίζονται με την παραγωγή, έρευνα και ανάπτυξη των φβ, έχει αυξηθεί από περίπου 12 στις αρχές τις δεκαετίας του '70 σε περισσότερους από 200 στα τέλη της δεκαετίας του '90.



Σχήμα 2.1: Μεταβολή της τιμής και της παραγωγής των φωτοβολταϊκών

Η αγορά των φβ μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικές κατηγορίες: τα καταναλωτικά προϊόντα, τα αυτόνομα φβ συστήματα και τα διασυνδεδεμένα συστήματα. Εκατομμύρια μικρές φβ συστοιχίες (παραγωγής μερικών mWatt έως λίγων Watt) αποτελούν την κύρια πηγή τροφοδότησης για ρολόγια, υπολογιστές χειρός, ραδιόφωνα, φορητές τηλεοράσεις και άλλα μικρής κλίμακας καταναλωτικά αγαθά. Τα συστήματα αυτά τυπικά κατασκευάζονται από υλικά άμορφου πυριτίου (thin-film).

Το μεγαλύτερο τμήμα της αγοράς των φβ περιλαμβάνει μεσαίου μεγέθους, απομονωμένα συστήματα που έχουν ικανότητα παραγωγής από μερικά Watt (W) μέχρι μερικές χιλιάδες Watt (kW). Οι εφαρμογές αυτές χρησιμοποιούνται συχνά για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, οι οποίες δεν εξυπηρετούνται από το κεντρικό δίκτυο διανομής. Τα απομονωμένα συστήματα χρησιμοποιούνται σε αυτοματοποιημένες εφαρμογές όπως για παράδειγμα φωτισμούς δρόμων, φωτισμούς οικιών, σταθμούς αναμετάδοσης μικροκυμάτων, μετεωρολογικούς σταθμούς. Τα εν λόγω συστήματα έχουν αποδειχθεί αρκετά αξιόπιστα και οικονομικά συμφέροντα, χωρίς να απαιτούν κάποιο κόστος συντήρησης. Επιπλέον αρκετές οικιακές εφαρμογές βασίζονται μερικώς ή αποκλειστικά σε τέτοιου είδους συστήματα για την κάλυψη των αναγκών τους σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν, τέλος, τεράστιες προοπτικές ηλεκτρικής τροφοδότησης οικισμών, οι οποίοι στην παρούσα φάση δεν είναι διασυνδεδεμένοι σε κάποιο τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα φβ από τη άλλη δεν είναι σε θέση να ανταγωνιστούν τις συμβατικές πηγές ενέργειας σε επίπεδο διασυνδεδεμένου συστήματος. Ωστόσο αρκετά μεγάλα φβ συστήματα (παραγωγής μερικών εκατοντάδων χιλιάδων έως μερικών εκατομμυρίων Watt) παρέχουν συμπληρωματική ισχύ στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

2.1.3 Ένα αρκετά υποσχόμενο μέλλον

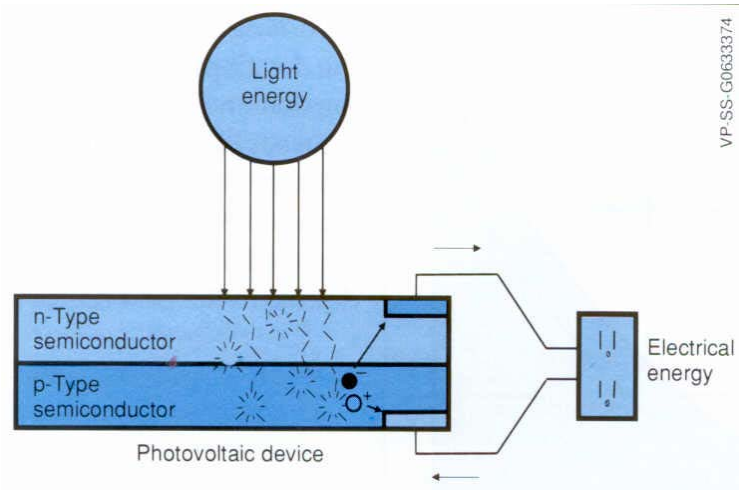
Για την περαιτέρω εξάπλωση της αγοράς των φωτοβολταϊκών απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η συνεχιζόμενη μείωση του κόστους τους. Η μείωση αυτή του κόστους μπορεί να επιτευχθεί κυρίως μέσω δύο κατευθύνσεων. Πρώτον, μέσω της μαζικής παραγωγής, οδός που ακολουθεί η βιομηχανία των φβ καθώς ωριμάζει και μεγενθύνεται. Δεύτερον, μέσω της έρευνας και ανάπτυξης της τεχνολογίας, οδός που τόσο η βιομηχανία όσο και η κρατική μηχανή επιδιώκουν. Τέλος, εκτιμάται ότι με την εξάπλωση της αγοράς των φβ είναι δυνατόν να διευρυνθεί η εφαρμογή τους σε όλα τα επίπεδα, από τα απομονωμένα συστήματα έως τα μεγάλα διασυνδεδεμένα.

2.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

2.2.1 Εισαγωγή

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποτελεί τη βασική φυσική διαδικασία μέσω της οποίας ένα φβ στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο, το αρσενιούχο γάλιο, το τελουριούχο κάδμιο ή το copper indium diselenide χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Το στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου, ωστόσο, παραμένει το ευρύτερα διαδεδομένο φβ στοιχείο.

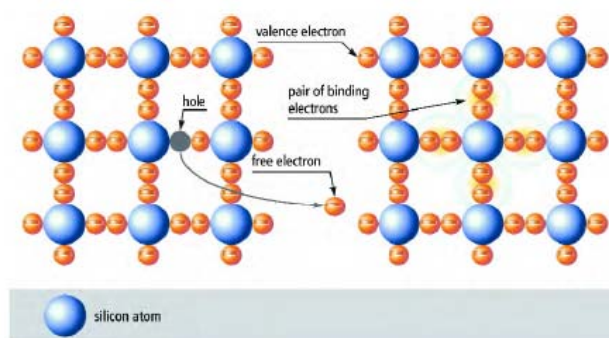
Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια – “πακέτα” ηλιακής ενέργειας. Τα φωτόνια αυτά περικλείουν διαφορετικά ποσά ενέργειας που αντιστοιχούν στα διάφορα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος. Όταν τα φωτόνια προσπίπτουν στην επιφάνεια ενός φβ στοιχείου, μπορεί να ανακλαστούν, να απορροφηθούν ή απλά να διαπεράσουν το στοιχείο. Τα φωτόνια που απορροφώνται είναι αυτά που παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 2.2: Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

2.2.2 Λειτουργία φβ στοιχείου

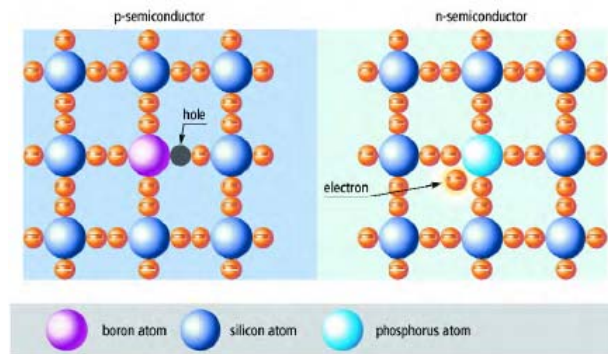
Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική αναφορά του τρόπου λειτουργίας των φβ στοιχείων, χρησιμοποιώντας σαν παράδειγμα το στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου, ωστόσο, και οι υπόλοιπες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών βασίζονται στις ίδιες αρχές λειτουργίας. Για να έχει το πυρίτιο, αλλά και κάθε άλλος κρυσταλλικός ημιαγωγός, ικανοποιητικές ιδιότητες για φωτοβολταϊκές και γενικότερα για ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό τους πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής. Τα άτομα πυριτίου σχηματίζουν μια σταθερή τετραεδρική κρυσταλλική δομή. Κάθε άτομο διαθέτει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους στην εξωτερική του στοιβάδα (τετρασθενές στοιχείο). Καθένα από αυτά σχηματίζει ένα ομοιοπολικό δεσμό με ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού ατόμου στο πλέγμα πυριτίου. Με τον τρόπο αυτό, κάθε άτομο συνδέεται με τέσσερα άτομα πυριτίου στην κρυσταλλική του δομή και “συμπληρώνει” την εξωτερική του στοιβάδα. Ένας ομοιοπολικός δεσμός είναι δυνατόν να σπάσει υπό την επίδραση ακτινοβολίας ή θερμότητας, οπότε και το διεγερμένο ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται και αφήνει στη θέση του μια οπή (κενή θέση).



Σχήμα 2.3: Επίδραση ακτινοβολίας

Η μετακίνηση όμως αυτή δεν είναι η αιτία που θα έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, εισάγονται προσμίξεις στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου (νόθευση του πυριτίου). Τα άτομα που προστίθενται διαθέτουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο (πχ. φώσφορος) ή ένα λιγότερο

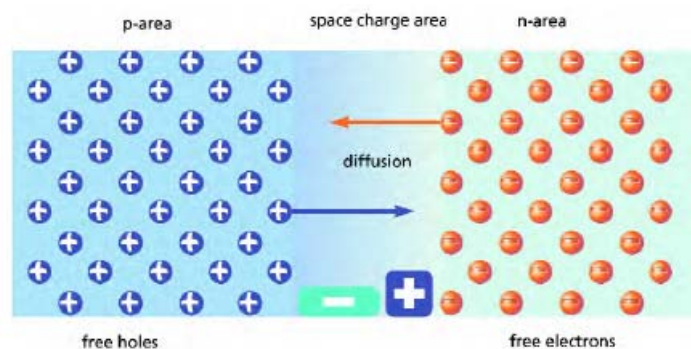
(πχ. βόριο), σε σχέση με το πυρίτιο, στην εξωτερική τους στοιβάδα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.4: Πρόσμιξη Βορίου ή Φωσφόρου στον κρύσταλλο του πυριτίου

Στην περίπτωση της πρόσμιξης με πεντασθενές άτομο, όπως ο φώσφορος (πρόσμιξη τύπου n), παρατηρείται πλεόνασμα ενός ηλεκτρονίου για κάθε άτομο φωσφόρου. Το ηλεκτρόνιο αυτό μπορεί με λίγη ενέργεια να κινείται ελεύθερα στον κρύσταλλο και να αποτελεί ουσιαστικά ηλεκτρικό φορτίο (φορέας αγωγιμότητας). Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενούς ατόμου, όπως το βόριο (πρόσμιξη τύπου p), παρατηρείται έλλειμα ηλεκτρονίου (κενή θέση – οπή) για κάθε άτομο βορίου. Τα ηλεκτρόνια των γειτονικών ατόμων με την απορρόφηση μικρής ποσότητας ενέργειας μπορούν να μετακινηθούν προς την κενή θέση και να καλύψουν αυτή την οπή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία οπής σε κάποιο άλλο σημείο του κρυστάλλου. Μπορεί να θεωρηθεί δηλαδή ότι σε αυτή την περίπτωση υφίσταται μεταφορά οπών και ως εκ τούτου, οι οπές αποτελούν αυτή τη φορά τους φορείς ηλεκτρικού ρεύματος (φορείς αγωγιμότητας). Στο υλικό που έχει προκύψει από την πρόσμιξη (είτε p είτε n) τα ελεύθερα φορτία που μόλις περιγράφηκαν δεν έχουν κάποια καθορισμένη κατεύθυνση στην κίνησή τους.

Εάν οι ημιαγωγοί τύπου p και τύπου n έρθουν σε επαφή μεταξύ τους, είναι δυνατόν να οδηγήσουν στο σχηματισμό μιας ένωσης p-n (positive-negative). Στην ένωση αυτή, τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου n διαχέονται προς την περιοχή του ημιαγωγού τύπου p. Δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο μια περιοχή στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς αγωγιμότητας, γνωστή ως ζώνη εξάντλησης φορέων. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα ωστόσο παραμένουν στην περιοχή n και τα αρνητικά στην p. Έτσι δημιουργείται ένα εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο το οποίο αντισταθμίζει την κίνηση των φορέων αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα η παραπάνω διάχυση να μη συνεχίζεται επ' άπειρον.



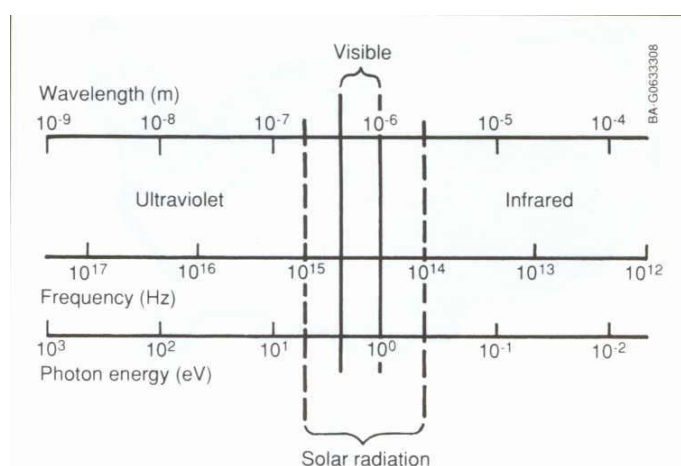
Σχήμα 2.5: Επαφή p-n

Εάν ο ημιαγωγός p-n (φωτοβολταϊκό στοιχείο) εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία, τα ηλεκτρόνια είναι δυνατόν να απορροφήσουν φωτόνια με επαρκή ποσότητα ενέργειας, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα το “σπάσιμο” των χημικών δεσμών και την απελευθέρωση ηλεκτρονίων στην περιοχή n. Παρόμοια συμπεριφορά εκδηλώνουν οι οπές στο τμήμα p του ημιαγώγιμου υλικού. Η εν λόγω διαδικασία, σαν σύνολο, καλείται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάχυση φορέων αγωγιμότητας στις ηλεκτρικές επαφές δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού στο στοιχείο, η οποία, με την εφαρμογή εξωτερικής πηγής τάσης, προκαλεί τη ροή ρεύματος. Εντούτοις, κάποιος αριθμός ηλεκτρονίων επανασυνδέονται με οπές προτού φτάσουν στις επαφές. Το μήκος διάχυσης αναφέρεται στο μέσο μήκος που διανύει ένα ηλεκτρόνιο μέχρι να επανασυνδεθεί με μια οπή. Το μήκος αυτό εξαρτάται από τη συγκέντρωση των προσμίξεων στον κρύσταλλο και θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο προκειμένου εύλογος αριθμός φορέων αγωγιμότητας να φτάνει απερίσπαστος στις ηλεκτρικές επαφές του στοιχείου.

2.3 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ύπαρξη ζωής στη Γη. Καθορίζει τη θερμοκρασία στην επιφάνειά της και παρέχει ουσιαστικά το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για τη λειτουργία όλων των φυσικών συστημάτων. Παρόλο που κάποια άλλα αστέρια αποτελούν τεράστιες πηγές ενέργειας υπό μορφή ακτίνων-X, ο ήλιος εκλύει ενέργεια που βρίσκεται σε ποσοστό 95% στο ορατό φάσμα. Το ορατό φάσμα συνιστά μόνο ένα κλάσμα του συνόλου του ηλιακού φάσματος (το υπέρυθρο και υπεριώδες φάσμα αποτελούν επίσης μέρη του συνολικού ηλιακού φάσματος).

Κάθε τμήμα του ηλιακού φάσματος σχετίζεται και με ένα διαφορετικό επίπεδο ενέργειας. Στο τμήμα του ορατού φάσματος, το ερυθρό αντιστοιχεί σε χαμηλή ενέργεια ενώ το ιώδες σε υψηλή. Τα φωτόνια που ανήκουν στην υπεριώδη περιοχή, στα οποία οφείλεται και το “μαύρισμα” του δέρματος, περικλείουν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με αυτά που βρίσκονται στο ιώδες τμήμα της ορατής περιοχής.



Σχήμα 2.6: Ηλιακό φάσμα

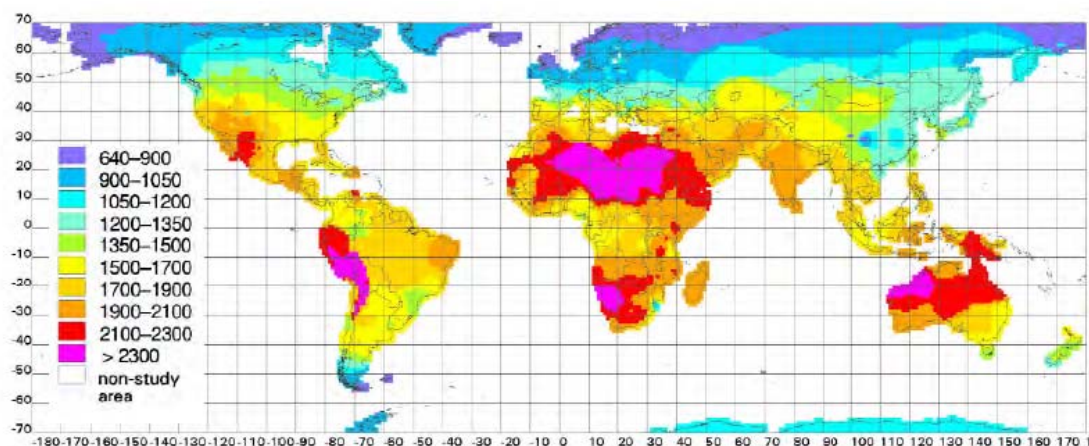
Από την άλλη τα φωτόνια της υπέρυθρης περιοχής, τα οποία γίνονται αντιληπτά ως θερμότητα, περιέχουν χαμηλότερη ενέργεια από τα φωτόνια που βρίσκονται στο ερυθρό τμήμα της ορατής περιοχής.

Η κίνηση των φωτονίων μπορεί να περιγραφεί καλύτερα σε μορφή κύματος και ως εκ τούτου, οι διαφορετικοί τύποι ακτινοβολίας χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματός τους. Το μήκος κύματος – η απόσταση από τη μία κορυφή του κύματος στην επόμενη – υποδηλώνει τύπους ακτινοβολίας με διαφορετικό ενεργειακό περιεχόμενο (μεγαλύτερο μήκος κύματος αντιστοιχεί σε μικρότερη ενέργεια). Η ερυθρή ακτινοβολία, για παράδειγμα, έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος και συνεπώς μικρότερη ενέργεια από την ιώδη.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα της γης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ ήλιου – γης. Στη διάρκεια ενός έτους η απόσταση αυτή μεταβάλλεται μεταξύ $1.47 \cdot 10^8$ km και $1.52 \cdot 10^8$ km και σαν αποτέλεσμα, η ένταση ακτινοβολίας κυμαίνεται μεταξύ 1325 W/m^2 και 1412 W/m^2 . Η μέση τιμή της έντασης ακτινοβολίας εκτός γήινης ατμόσφαιρας αναφέρεται ως ηλιακή σταθερά κι έχει τιμή

Ηλιακή σταθερά: $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$

Το συγκεκριμένο επίπεδο ακτινοβολίας δεν είναι δυνατόν να φτάσει στην επιφάνεια της γης. Η ατμόσφαιρα της γης μειώνει σημαντικά την ακτινοβολία με τους μηχανισμούς της ανάκλασης, απορρόφησης (από το όζον, τους υδρατμούς, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα) και σκέδασης (από μόρια αέρα, σκόνης ή ρύπους). Σε συνθήκες αίθριου καιρού, το μεσημέρι, η ακτινοβολία μπορεί να φτάσει τα 1000 W/m^2 στην επιφάνεια της γης. Η εν λόγω τιμή είναι σχετικά ανεξάρτητη της τοποθεσίας. Η μέγιστη ακτινοβολία παρατηρείται κυρίως σε ηλιόλουστες μέρες με μερικά σύννεφα: καθώς η ηλιακή ακτινοβολία ανακλάται από τα σύννεφα που διαπερνά, η τιμή της στην επιφάνεια της γης μπορεί να φτάσει τα 1400 W/m^2 για κάποια μικρά χρονικά διαστήματα. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια (συνήθως σε kWh/m^2). Η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

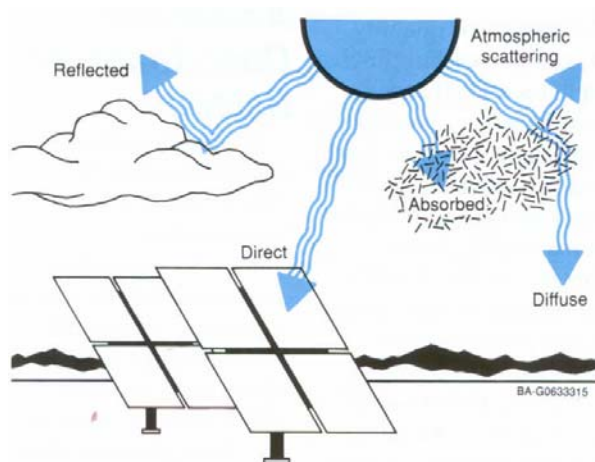


Σχήμα 2.7: Παγκόσμιος χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας

Κάποιες περιοχές του ισημερινού παρουσιάζουν ετήσια ηλιακή ενέργεια μεγαλύτερη από 2300 kWh/m^2 , ενώ η νότια Ευρώπη παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή της τάξης των 1700 kWh/m^2 [24]. Στην Ευρώπη παρατηρούνται σημαντικές εποχιακές διαφοροποιήσεις, που οφείλονται στα διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας μεταξύ καλοκαιριού και χειμώνα.

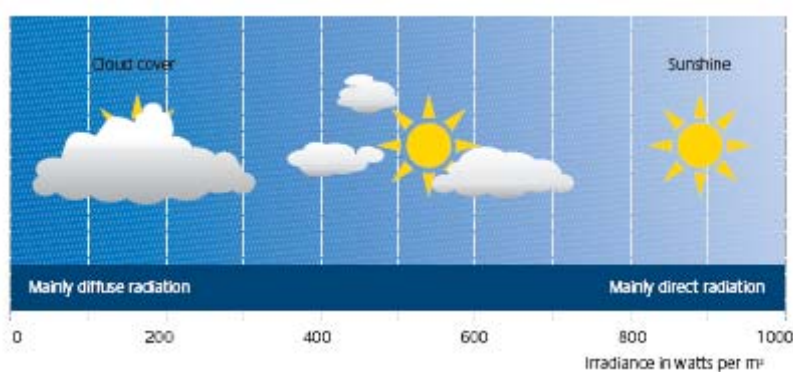
2.3.1 Άμεση και διαχυτή ακτινοβολία

Η ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης συνίσταται από ένα μέρος ακτινικής – άμεσης ακτινοβολίας (beam) και ένα μέρος διάχυτης (diffuse). Η ακτινική συνιστώσα της ακτινοβολίας προέρχεται από την κατεύθυνση του ήλιου σε αντίθεση με τη διάχυτη, η οποία σκεδάζεται από τον ουράνιο θόλο και δεν έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση. Επιπλέον, όταν οι φβ συλλέκτες εγκαθίστανται με κλίση προς το οριζόντιο επίπεδο, προστίθεται και ένα μικρό σχετικά ποσοστό προερχόμενο από ανάκλαση σε παρακείμενα αντικείμενα (albedo).



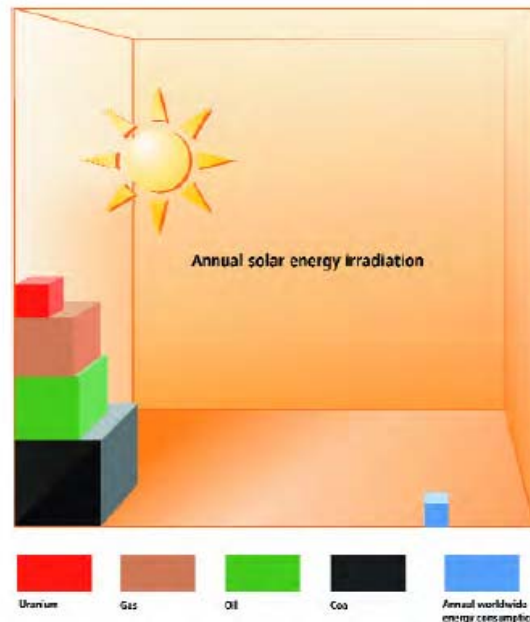
Σχήμα 2.8: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Ανάλογα με τις συνθήκες συννεφιάς και την ώρα της ημέρας (γωνίας ύψους του ήλιου), οι δύο αυτές συνιστώσες διαφοροποιούνται σημαντικά. Τις αίθριες ημέρες η ακτινική συνιστώσα είναι εκείνη που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ακτινοβολίας. Αντίθετα σε πολύ συννεφιασμένες μέρες (κυρίως το χειμώνα), η συνολική ακτινοβολία οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη της διάχυτης συνιστώσας.



Σχήμα 2.9: Συνιστώσες ακτινοβολίας σε αίθριες και συννεφιασμένες μέρες

Κάθε δευτερόλεπτο, ο ήλιος εκλύει ένα τεράστιο ποσό ενέργειας στο ηλιακό σύστημα ωστόσο η γη, λαμβάνει ένα πολύ μικρό κλάσμα αυτής. Η ατμόσφαιρα απορροφά και ανακλά μέρος αυτής της ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένων των ακτίνων-Χ και της υπεριώδους ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά, το ποσό της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης κάθε λεπτό είναι μεγαλύτερο από τη συνολική ενέργεια που καταναλώνει ολόκληρος ο πληθυσμός της γης στη διάρκεια ενός έτους.



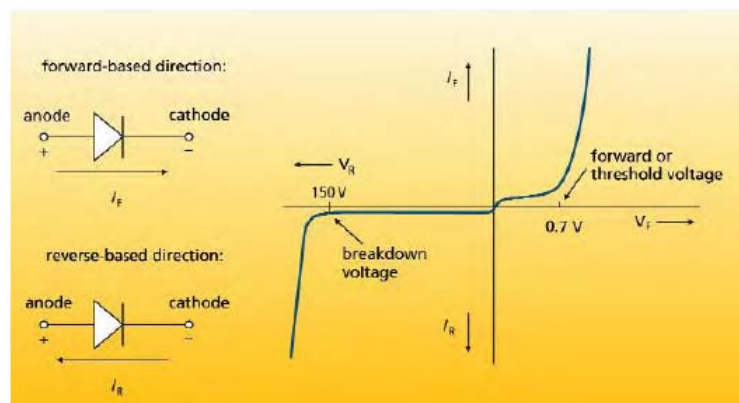
Σχήμα 2.10: Ηλιακή ενέργεια –κατανάλωση ενέργειας

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη γη, όπως αναφέρθηκε ήδη, κατανέμεται ανομοιόμορφα στις διάφορες περιοχές. Οι περιοχές κοντά στον ισημερινό λαμβάνουν περισσότερη ακτινοβολία από οποιεσδήποτε άλλες. Η ηλιακή ακτινοβολία διαφέρει επίσης σημαντικά ανάλογα με τις εποχές και εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, το κλίμα (ιδιαίτερα τα σύννεφα τα οποία σκεδάζουν τις ακτίνες του ήλιου) και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες καθορίζουν το ποσό της ηλιακής ενέργειας που διατίθεται για τα φβ συστήματα.

Το ποσό της ενέργειας που παράγει ένα φβ σύστημα δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία αλλά επηρεάζεται σημαντικά και από την ικανότητα μετατροπής των στοιχείων (της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια – conversion efficiency). Οι επιστήμονες έχουν επικεντρώσει τις προσπάθειες τους τα τελευταία χρόνια στη βελτίωση της ικανότητας μετατροπής των φβ στοιχείων με στόχο να γίνουν τα παραπάνω πιο ανταγωνιστικά σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες.

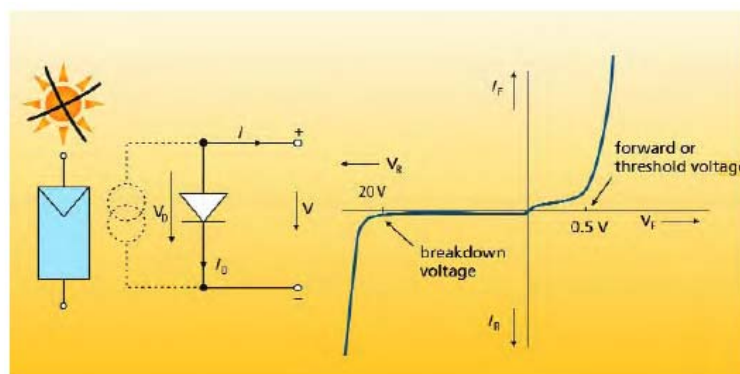
2.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελεί ουσιαστικά μια μεγάλης κλίμακας δίοδο. Η χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Αν το τμήμα p βρεθεί σε υψηλότερο δυναμικό από το τμήμα n, η δίοδος πολώνεται θετικά. Σε αυτή την περίπτωση, για τάσεις μεγαλύτερες από 0.7 V, (πρώτο τεταρτημόριο του διαγράμματος) το ρεύμα διαρέει το δίοδο. Αν η δίοδος πολωθεί ανάστροφα, δεν αναπτύσσεται ρεύμα (τρίτο τεταρτημόριο). Στην περίπτωση όμως που η δίοδος πολωθεί ανάστροφα υπό τάση μεγαλύτερη μιας καθορισμένης τιμής (τάση κατάρρευσης, στο παράδειγμα 150 V) τότε η δίοδος άγει, κάτι τέτοιο όμως μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή της.



Σχήμα 2.11: Χαρακτηριστική I-V φβ στοιχείου

Ένα φβ στοιχείο σε συνθήκες έλλειψης ακτινοβολίας περιγράφεται από το ισοδύναμο κύκλωμα μιας δίοδου. Για ένα μονοκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου μια τυπική τιμή τάσης υπό ορθή πόλωση είναι 0.5 V και τάσης κατάρρευσης 12V έως 50V (ανάλογα με την ποιότητα και το υλικό κατασκευής του στοιχείου).



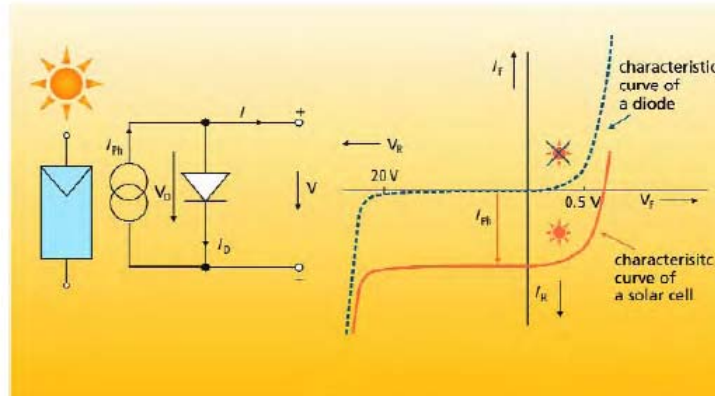
$$V = V_D$$

$$I = -I_D = -I_0 \times (e^{V/m \times VT} - 1)$$

Σχήμα 2.12: φβ στοιχείο υπό συνθήκες έλλειψης ακτινοβολίας

Όταν προσπίπτει ακτινοβολία στην επιφάνεια του στοιχείου, η ενέργεια των φωτονίων οδηγεί στην παραγωγή φορέων αγωγιμότητας. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, όπως δίνεται στη συνέχεια, αποτελείται από μια πηγή ρεύματος και μια

δίοδο. Η πηγή ρεύματος παράγει ρεύμα ίσο με το φωτόρευμα, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το επίπεδο της ακτινοβολίας.



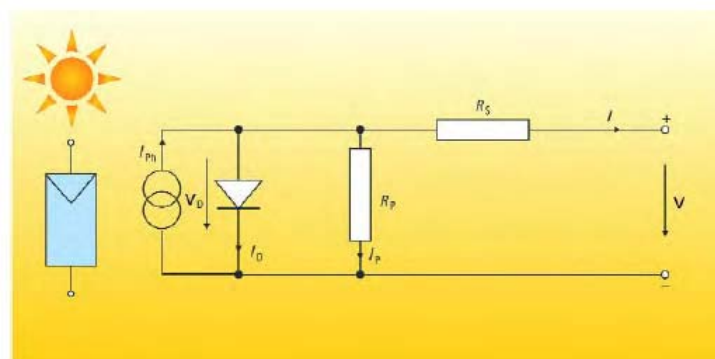
$$V = V_D$$

$$I_{ph} = c_0 \times E$$

$$I = I_{ph} - I_D$$

Σχήμα 2.13: φβ στοιχείο υπό συνθήκες ακτινοβολίας

Το ισοδύναμο κύκλωμα που ακολουθεί καλείται πλήρες μοντέλο μιας διόδου και είναι αυτό που χρησιμοποιείται τυπικά στη μελέτη των φωτοβολταϊκών. Στην πράξη, παρατηρείται μια πτώση τάσης κατά τη μετακίνηση των φορέων αγωγιμότητας από τον ημιαγωγό προς τις ηλεκτρικές επαφές, η οποία περιγράφεται από την εν σειρά αντίσταση R_s που είναι της τάξης των μερικών $m\Omega$. Επιπλέον, τα ρεύματα διαρροής που αναπτύσσονται περιγράφονται από μια παράλληλη με τη δίοδο αντίσταση, R_p (με τιμή πολύ μεγαλύτερη των 10Ω). Με τη βοήθεια αυτού του κυκλώματος είναι δυνατός ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών I - V καμπυλών για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας.



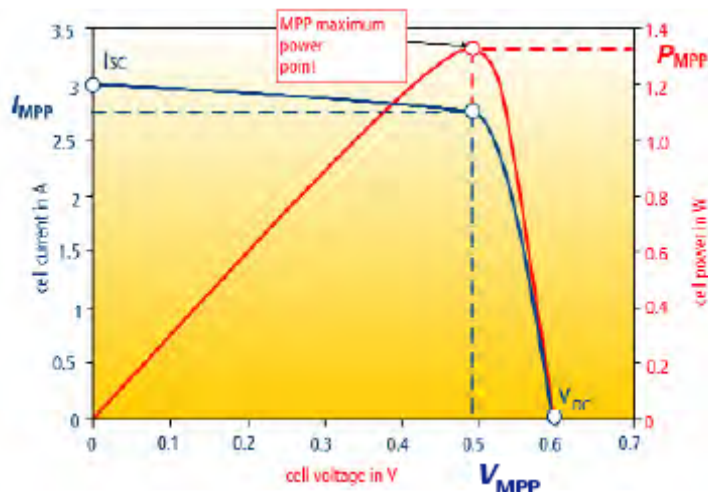
$$I = I_{ph} - I_D - I_p$$

$$I_p = V_D/R_p = V + R_s I / R_p$$

Σχήμα 2.14: Πλήρες ηλεκτρικό ισοδύναμο φβ στοιχείου

2.4.1 Παράμετροι στοιχείων και I-V καμπύλες

Στην τεχνική βιβλιογραφία δίνεται τις περισσότερες φορές η συμπεριφορά των φβ στοιχείων υπό συνθήκες ορθής πόλωσης. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται η καμπύλη του ρεύματος συναρτήσει της τάσης όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2.15: Καμπύλες I-V και P-V φβ στοιχείου

Συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions STC)

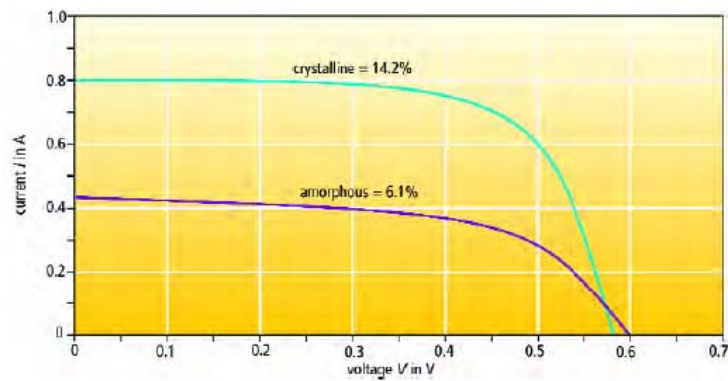
Για λόγους σύγκρισης των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν τα φβ στοιχεία ή πλαίσια, έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες αναφοράς κάτω από τις οποίες δίνονται οι χαρακτηριστικές I-V καμπύλες. Αυτές είναι οι εξής:

1. ακτινοβολία ίση με $E = 1000 \text{ W/m}^2$
2. θερμοκρασία στοιχείων ίση με $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
3. καθορισμένο ηλιακό φάσμα που χαρακτηρίζεται από $AM = 1.5$

Τα τρία βασικά σημεία μιας I-V χαρακτηριστικής είναι:

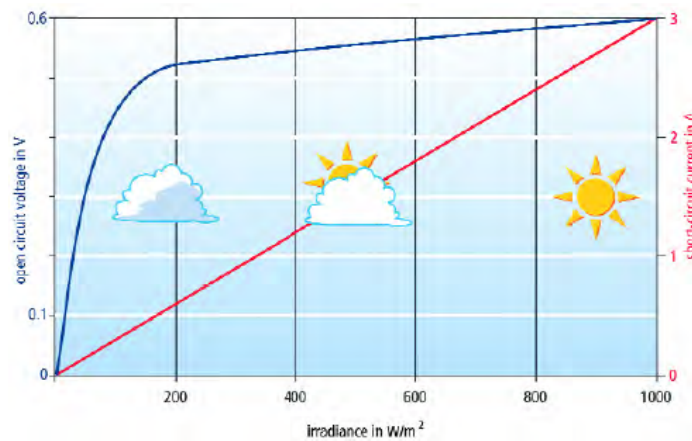
1. Το σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point, MPP) στο οποίο το Φβ στοιχείο λειτουργεί παράγοντας μέγιστη ισχύ. Στο σημείο αυτό η ισχύς συμβολίζεται με P_{mp} , το ρεύμα με I_{mp} και η τάση με V_{mp} .
2. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{sc} (το οποίο είναι 5% με 15% υψηλότερο από το ρεύμα μέγιστης ισχύος).
3. Η τάση ανοικτοκύκλωσης, V_{oc} (η οποία κυμαίνεται γύρω στα 0.6V)

Στη συνέχεια παρατίθενται δύο τυπικές χαρακτηριστικές για πολυκρυσταλλικό στοιχείο πυριτίου και για στοιχείο άμορφου πυριτίου (thin-film).



Σχήμα 2.16: Καμπύλες I-V φβ στοιχείου πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης μεταβάλλεται γραμμικά με την ακτινοβολία, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Αντίθετα η τάση ανοικτοκύκλωσης μένει πρακτικά σταθερή στις μεταβολές της ακτινοβολίας. Μαθηματικά, η εξάρτηση τάσης-ακτινοβολίας είναι λογαριθμική.

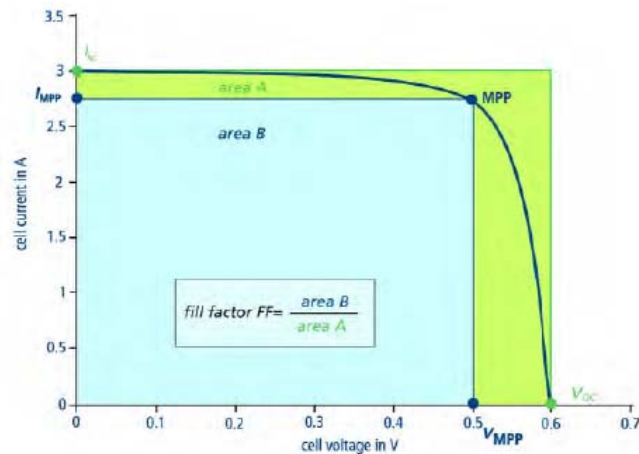


Σχήμα 2.17: Εξάρτηση ρεύματος και τάσης από την ακτινοβολία

Ο συντελεστής πλήρωσης (fill factor, FF) περιγράφει την ποιότητα των φβ στοιχείων. Ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος MPP προς το γινόμενο της τάσης ανοικτοκύκλωσης, V_{oc} , με το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{sc} .

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{P_{MPP}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Για στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου ο συντελεστής αυτός έχει τιμή 0.75 με 0.85, ενώ για στοιχεία άμορφου πυριτίου κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 0.7. Γραφικά ο συντελεστής αυτός μπορεί να προσδιοριστεί από το λόγο των εμβαδών B προς A όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.18: Συντελεστής Πλήρωσης

Τέλος, ο βαθμός ή συντελεστής απόδοσης ενός φβ στοιχείου (πλασιού) είναι ίσος με την αποδιδόμενη (εξερχόμενη) ηλεκτρική ισχύ προς την (εισερχόμενη) ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του φβ στοιχείου (πλασιού), δηλαδή:

$$n = \frac{P}{G \times S} = \frac{E}{E_t \times S}$$

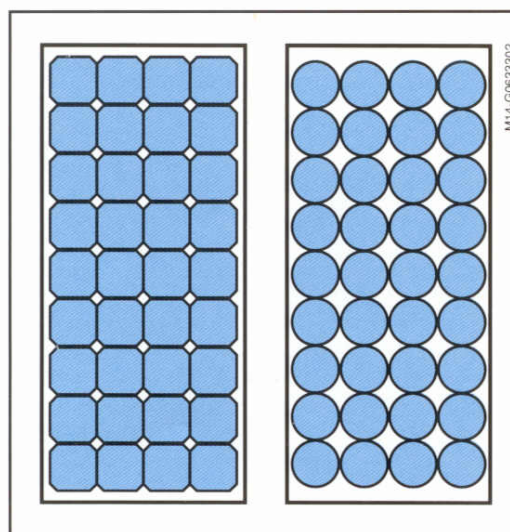
όπου P, η αποδιδόμενη ισχύς (W)

G, η ένταση (πυκνότητα) της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²)

E, η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)

E_t, η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας (kWh/m²)

Κατασκευαστικά επιδιώκεται ώστε τα φβ στοιχεία να καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη κατά το δυνατόν επιφάνεια του φβ πλασιού και για το λόγο αυτό, τα τελευταία ιδίως χρόνια, τα φβ στοιχεία διαμορφώνονται κατάλληλα (πχ. σε εξαγωνικό αντί κυκλικό σχήμα). Ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των φβ στοιχείων προς τη συνολική επιφάνεια του πλασιού, ονομάζεται συντελεστής κάλυψης.

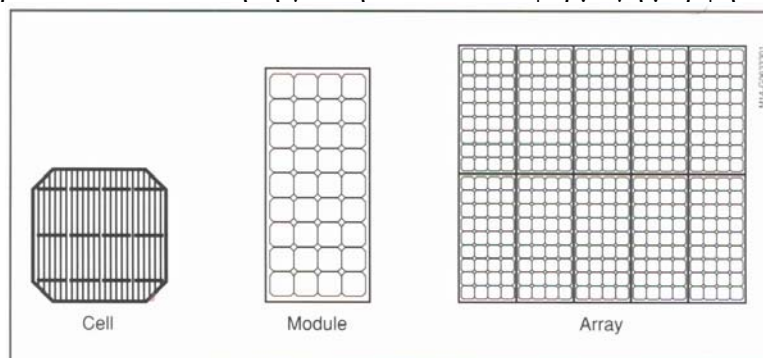


Σχήμα 2.18: Συντελεστής Κάλυψης

2.5 ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΠΛΑΙΣΙΑ, ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (cell) αποτελεί τη βασική μονάδα και το θεμελιώδες συστατικό ενός φβ συστήματος. Ένα μεμονωμένο στοιχείο παράγει τυπικά 1 με 2 Watt, ισχύς ανεπαρκής για την πλειοψηφία των σημερινών εφαρμογών. Για την αύξηση της παραγόμενης ισχύος είναι δυνατή η σύνδεση των στοιχείων (σειρά και παράλληλα) προς σχηματισμό μεγαλύτερων μονάδων, των επονομαζόμενων πλαισίων (modules), τα οποία μπορούν να συνδυαστούν στη συνέχεια σε ακόμα μεγαλύτερες μονάδες, γνωστές ως συστοιχίες (arrays). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να κλιμακωθεί ένα φβ σύστημα με τρόπο τέτοιο ώστε να καλύπτει σχεδόν οποιοσδήποτε απαιτήσεις μπορεί να εμφανιστούν, μικρές ή μεγάλες.

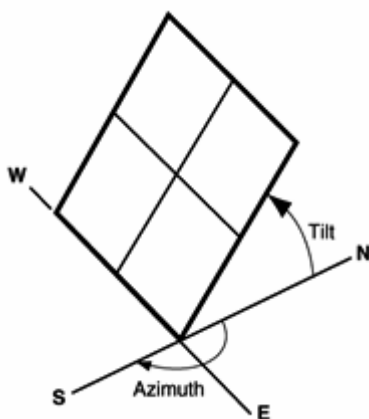
Τα μεμονωμένα πλαίσια ή ακόμη και οι συστοιχίες δεν αποτελούν από μόνα τους ένα φβ σύστημα. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητες κάποιες κατασκευές στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν τα πλαίσια και να προσανατολιστούν προς τον ήλιο και κάποιες συσκευές οι οποίες δέχονται την dc-ενέργεια που παράγεται από τα πλαίσια και τη μετατρέπουν σε κατάλληλη για την εκάστοτε εφαρμογή μορφή.



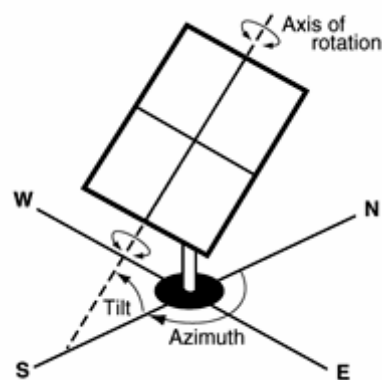
Σχήμα 2.19: ΦΒ στοιχείο, πλαίσιο, συστοιχία

Τύποι Συστοιχιών

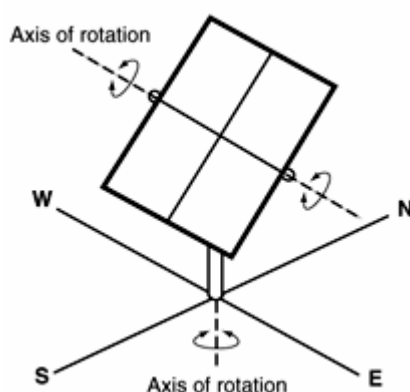
Οι φβ συστοιχίες διακρίνονται σε τρεις διαφορετικούς τύπους με βάση τη διάταξη τοποθέτησής τους ως προς το έδαφος και τη σχετική τους θέση ως προς τον ήλιο. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να έχουν σταθερή κλίση – είναι σταθερά τοποθετημένοι ως προς το έδαφος (σχήμα 2.20) είτε να διαθέτουν σύστημα ανίχνευσης του ήλιου ενός άξονα (σχήμα 2.21) ή δύο αξόνων (σχήμα 2.22).



Σχήμα 2.20: φβ συστοιχία με σταθερή κλίση άξονα



Σχήμα 2.21: Σύστημα ανίχνευσης ηλίου ενός άξονα



Σχήμα 2.22: Σύστημα ανίχνευσης ηλίου δύο αξόνων

Ειδικότερα, στο πρώτο σχήμα φαίνεται μια φβ συστοιχία με σταθερή κλίση ως προς το έδαφος, προσανατολισμένη προς το νότο. Στο δεύτερο απεικονίζεται μια φβ συστοιχία με στρεφόμενη βάση ανίχνευσης ηλίου ενός άξονα στραμμένου προς νότο. Η συστοιχία αυτή ιχνηλατεί τον ήλιο από ανατολή προς δύση πάνω στον άξονα περιστροφής της. Τέλος, το τρίτο σχήμα δείχνει μια φβ συστοιχία με σύστημα ανίχνευσης ηλίου δύο αξόνων. Η συστοιχία αυτή ιχνηλατεί τον ήλιο από ανατολές προς δυσμάς καθώς επίσης αλλάζει και τη γωνία κλίσης της από το έδαφος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κάτι τέτοιο επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της κίνησης του ήλιου επί αδιάλειπτης βάσης.

Κλίση φβ συστοιχίας (γωνία κλίσης)

Στην περίπτωση σταθερά τοποθετημένης φβ συστοιχίας, η γωνία κλίσης είναι η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια της συστοιχίας με το οριζόντιο επίπεδο (0° = οριζόντια τοποθέτηση, 90° = κάθετη τοποθέτηση). Για φβ συστοιχία με σύστημα ανίχνευσης ηλίου ενός άξονα περιστροφής, η γωνία κλίσης είναι η γωνία που σχηματίζει ο άξονας περιστροφής με το οριζόντιο επίπεδο. Η έννοια της γωνίας κλίσης δεν έχει νόημα στην περίπτωση φβ συστοιχίας με στρεφόμενη βάση ανίχνευσης ηλίου δύο αξόνων.

Αποτελεί συνήθης πρακτική η τοποθέτηση φβ συστοιχιών σταθερά τοποθετημένων ως προς το έδαφος με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που γίνεται η εγκατάσταση. Με την πρακτική αυτή επιτυγχάνεται κατά κανόνα μέγιστη ηλιακή απολαβή και ως εκ τούτου μέγιστη ενεργειακή παραγωγή. Αύξηση της γωνίας κλίσης ευνοεί την ενεργειακή παραγωγή στη διάρκεια του χειμώνα, και αντίστοιχα μείωση στη διάρκεια του καλοκαιριού.

Προσανατολισμός φβ συστοιχίας (αζιμούθια γωνία)

Στην περίπτωση σταθερά τοποθετημένης φβ συστοιχίας, η γωνία αζιμούθιου (ή αζιμούθια γωνία) είναι η γωνία προσανατολισμού της συστοιχίας ως προς το νότο. Για φβ συστοιχία με σύστημα ανίχνευσης ηλίου ενός άξονα περιστροφής, η αζιμούθια γωνία είναι η γωνία προσανατολισμού που σχηματίζει ο άξονας περιστροφής με το νότο. Η έννοια της αζιμούθιας γωνίας δεν έχει νόημα στην περίπτωση φβ συστοιχίας με στρεφόμενη βάση ανίχνευσης ηλίου δύο αξόνων.

Αποτελεί συνήθης πρακτική ο προσανατολισμός ως προς το νότο φβ συστοιχιών (σταθερά τοποθετημένων ως προς το έδαφος) με αζιμούθια γωνία ίση με 0° (δηλαδή προς νότο) για τοποθεσίες στο βόρειο ημισφαίριο και 180° (δηλαδή προς βορρά) για τοποθεσίες στο νότιο ημισφαίριο. Με την πρακτική αυτή επιτυγχάνεται κατά κανόνα μέγιστη ηλιακή απολαβή και ως εκ τούτου μέγιστη ενεργειακή παραγωγή. Για τοποθεσίες στο βόρειο ημισφαίριο, αύξηση της αζιμούθιας γωνίας ευνοεί την ενεργειακή παραγωγή τις απογευματινές ώρες, και αντίστοιχα μείωση τις πρωινές ώρες. Το αντίστροφο ισχύει για τοποθεσίες στο νότιο ημισφαίριο.

Κεφάλαιο 3

Παράγοντες Μείωσης Ενεργειακής Απόδοσης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης της επίδρασης των κυριότερων παραγόντων (derating factors) που επηρεάζουν τη διαθέσιμη από τα φβ πλαίσια dc-ενέργεια. Οι εν λόγω παράγοντες συγκρίνονται με κάποιους άλλους επιπέδου συστήματος, οι οποίοι συχνά συντελούν σε σημαντική μείωση της ac-ενέργειας που αποδίδεται στο φορτίο σε σχέση με αυτή που δύναται να διαθέσει μια φβ συστοιχία. Με την ανάλυση αυτή εισάγονται οι έννοιες των παραγόντων μείωσης που πρόκειται να αναλυθούν διεξοδικά στη συνέχεια.

3.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φβ πλαισίου ή ενός φβ σταθμού δε λαμβάνει υπόψη μια σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Ως γνωστόν, η ισχύς που παράγεται από ένα ΦΒ σύστημα εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων (derating factors), οι οποίοι θα πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετάζονται κατά τη φάση σχεδιασμού του συστήματος. Η ανάλυση που επιχειρείται στο παρόν κεφάλαιο διευκολύνεται σημαντικά εξετάζοντας την ετήσια ενεργειακή απόδοση των φβ συστημάτων. Η ετήσια ενεργειακή απόδοση αποτελεί την πιο κατάλληλη παράμετρο στο σχεδιασμό ΦΒ συστημάτων καθώς επίσης και το καλύτερο μέτρο για την παρακολούθηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς τους.

Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου σχολιάζονται αναλυτικότερα αναγκαίες προσαρμογές και διορθώσεις, προκειμένου ο υπολογισμός των εν λόγω παραγόντων να καταστεί ρεαλιστικότερος. Πέρα από τους παράγοντες που αναφέρονται, θα πρέπει επίσης να εκτιμάται η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με τη χρήση απλοποιημένων διαδικασιών στις οποίες δε λαμβάνονται υπόψη τέτοιοι παράγοντες με τόσο σημαντική επίπτωση (αν και όχι υποχρεωτικά προς την κατεύθυνση μείωσης της απόδοσης). Μια σύντομη σύνοψη των κυριότερων από τους παράγοντες αυτούς ακολουθεί παρακάτω:

- *Αθροιστική ηλιακή ακτινοβολία.* Χρονοσειρές ηλιακής ακτινοβολίας μακράς διάρκειας σχετίζονται άμεσα με τον προσανατολισμό της επιφάνειας των συλλεκτών και ενδεχομένως με τη διάταξη ανίχνευσης του ήλιου. Ο συγκεκριμένος παράγοντας εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης και κυμαίνεται ανάμεσα σε 25% μείωση περίπου για κάθετη επιφάνεια και πάνω από 30% αύξηση για σύστημα ανίχνευσης ήλιου δύο αξόνων, συγκριτικά με μια σταθερή τοποθέτηση συλλέκτη, κλίσης ίσης με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.
- *Ισχύς πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions, STC).* Ανάλυση αρκετών φβ τεχνολογιών έχει αποδείξει ότι για την ίδια περίπου ονομαστική ισχύ, όλες οι τεχνολογίες είναι ισοδύναμες αναφορικά με την αναμενόμενη ετήσια ενεργειακή τους απόδοση, με σφάλμα υπολογισμού μέχρι και 5%.
- *Θερμοκρασία λειτουργίας.* Ανάλυση αρκετών φβ τεχνολογιών και γεωγραφικών θέσεων εγκατάστασης έχει αποδείξει ότι η ετήσια ενεργειακή απόδοση είναι δυνατόν να μειωθεί κατά έναν παράγοντα της τάξης του 2 με 5% εξαιτίας της πραγματικής θερμοκρασίας λειτουργίας. Ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από το σχεδιασμό του πλαισίου, την ταχύτητα του ανέμου, την τεχνική τοποθέτησης και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- *Εξάρτηση τάσης μέγιστης ισχύος (V_{mp}) από το επίπεδο ακτινοβολίας.* Πλαίσια τύπου a-Si και CdTe τείνουν να έχουν για χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας τιμές τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος υψηλότερες από ότι στην πρότυπη ακτινοβολία ενός ήλιου (1 Sun). Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση μέχρι και 10% της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής.

- *Μεταβολές ηλιακού φάσματος.* Έχει βρεθεί ότι οι ωριαίες μεταβολές του ηλιακού φάσματος εξαλείφονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Η τεχνολογία άμορφου πυριτίου έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στο συγκεκριμένο φαινόμενο, ωστόσο οι μετρηθείσες επιπτώσεις δεν ξεπερνούν συνήθως το ποσοστό των 3%
- *Οπτικές απώλειες σε υψηλές τιμές γωνίας πρόσπτωσης (AOI).* Τέτοιες απώλειες οφείλονται στα αυξημένα επίπεδα ανάκλασης της γυάλινης επιφάνειας που καλύπτει το φβ πλαίσιο, για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60°. Εντούτοις, η εν λόγω επίδραση είναι σχετικά μικρή σε μακροχρόνια βάση (τυπικά κάτω από 5%) παρόλο που μπορεί να έχει μεγαλύτερη επίδραση σε μηνιαία (εποχιακή) βάση (γύρω στα 10% για κάθετη τοποθέτηση).
- *Ρύπανση πλαισίων.* Ο παράγοντας της ρύπανσης, που εξετάζεται διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο, μπορεί να προκαλέσει μείωση στην ετήσια ενεργειακή απόδοση σε ποσοστό μέχρι και 10% περίπου.
- *Σκίαση.* Η επίδραση της σκίασης στην ενεργειακή απόδοση φβ συστημάτων εξετάζεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο και είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες μείωσης, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας φβ συστήματα και σε άλλες περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης.
- *Παράγοντες επιπέδου συστήματος.* Περιλαμβάνουν μια πληθώρα παραγόντων που επιδρούν στη διαδικασία μετατροπής της παραγόμενης dc-ενέργειας σε ac και αναλύονται στη συνέχεια λεπτομερέστερα. Διαφορετικοί παράγοντες συναντώνται σε διασυνδεδεμένα και σε αυτόνομα φβ συστήματα.

3.2 DC ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

Με σκοπό τον προσδιορισμό της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φβ συστήματος απαιτείται σε πρώτη φάση μια ορθή εκτίμηση της dc-ενέργειας που παρέχει η φβ συστοιχία, ανάλογα με την εκάστοτε τοποθεσία και διάταξη του συστήματος. Ένα μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, σαν αυτό που αναπτύχθηκε στα εργαστήρια της Sandia, λαμβάνει υπόψη ηλεκτρικές παραμέτρους φωτοβολταϊκού πλαισίου, θερμοκρασιακούς συντελεστές, θερμοκρασία λειτουργίας σε συνάρτηση με περιβαλλοντικές συνθήκες, οπτικές απώλειες για μεγάλες τιμές γωνίας πρόσπτωσης, μεταβολές του ηλιακού φάσματος κατά τη διάρκεια της ημέρας και προσανατολισμό των πλαισίων. Με βάση ένα τέτοιο μοντέλο, και σε συνδυασμό με δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και μετεωρολογικά δεδομένα, διεξάγεται ακολούθως μια λεπτομερής ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαθέσιμη από φβ πλαίσια του εμπορίου ενέργεια.

Από τη συγκεκριμένη ανάλυση προκύπτει ένα χρήσιμο συμπέρασμα συγκρίνοντας την ετήσια ενεργειακή απόδοση διαφορετικών τεχνολογιών φβ πλαισίων που διατίθενται στο εμπόριο. Ο πίνακας 3.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για πλαίσια 14 τεχνολογιών του εμπορίου, στραμμένα με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος σε τρεις διαφορετικές θέσεις εγκατάστασης, και με δείκτη την αναμενόμενη μέση ετήσια dc-ενέργεια που παράγεται ανά ημέρα (kWh / d). Τα εν λόγω αποτελέσματα έχουν αναχθεί σε ισοδύναμη 1-kWp συστοιχία για την κάθε τεχνολογία. Για λόγους αμεσότερης σύγκρισης, στον πίνακα δίνονται επίσης (σε παρένθεση)

κανονικοποιημένες τιμές ενέργειας ως προς το πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si).

Όπως παρατηρείται, με δεδομένη την αναγωγή σε ισοδύναμα μεγέθη ισχύος στις πρότυπες συνθήκες αναφοράς (STC), όλες οι τεχνολογίες είναι ισοδύναμες σε σχέση με την αναμενόμενη ετήσια ενεργειακή απόδοση, με απόκλιση μικρότερη του 5%. Οι δύο εξαιρέσεις που απαντώνται στον πίνακα οφείλονται σε ιδιάζοντα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που καθορίζονται από τον κατασκευαστή των πλαισίων (πιο συγκεκριμένα η απόδοση στις συνθήκες STC επηρεάζεται σημαντικά από αντιστάσεις σειράς) και μπορούν να τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να καταστούν συνεπή με τα χαρακτηριστικά των υπόλοιπων πλαισίων.

Τύπος πλαισίου	mc-Si	mc-Si#2	mc-Si#3	mc-Si#4	mc-Si#5	c-Si	HIP-Si
<i>Albuquerque</i>	5.82(1.00)	5.87(1.01)	5.81(1.00)	5.78(0.99)	5.79(0.99)	5.88(1.01)	5.95(1.02)
<i>Sacramento</i>	4.90(1.00)	4.95(1.01)	4.87(0.99)	4.84(0.99)	4.86(0.99)	4.95(1.01)	5.01(1.02)
<i>Buffalo</i>	3.87(1.00)	3.89(1.01)	3.85(0.99)	3.81(0.98)	3.83(0.99)	3.97(1.02)	3.85(0.99)
Τύπος πλαισίου	p-Si	a-Si	a-Si#2	CIS	CdTe	CdTe#2	CdTe#3
<i>Albuquerque</i>	5.67(0.97)	6.46(1.11)	5.80(1.00)	6.07(1.04)	5.73(0.99)	6.56(1.13)	5.74(0.99)
<i>Sacramento</i>	4.72(0.96)	5.43(1.11)	4.83(0.99)	5.03(1.03)	4.83(0.99)	5.65(1.15)	4.78(0.98)
<i>Buffalo</i>	3.74(0.96)	4.24(1.09)	3.80(0.98)	3.92(1.01)	3.87(1.00)	4.25(1.10)	3.71(0.96)

Πίνακας 3.1: Μέση ετήσια dc παραγόμενη ενέργεια ανά ημέρα (kWh/day) διαθέσιμη από διαφορετικούς τύπους φβ τεχνολογιών του εμπορίου, ανηγμένοι όλοι σε ισοδύναμη ισχύ 1-kWp σε STC.

3.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ DC ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η ετήσια dc-ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο επηρεάζεται από έναν αριθμό αλληλεπιδρώντων παραγόντων, κάποιοι από τους οποίους σχετίζονται με το ίδιο το πλαίσιο και άλλοι οι οποίοι εξαρτώνται από τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς δόθηκαν συνοπτικά στην αρχή του κεφαλαίου και αναλύονται εκτενέστερα ακολούθως.

- *Επίδραση Ηλιακής Ακτινοβολίας*

Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ετήσια βάση είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και, ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια πχ στο Buffalo, NY, αποτελεί ποσοστό 60% και στο Sacramento, CA, 85% αυτής που προσπίπτει στην Albuquerque, NM [10]. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι με τη σειρά της ευθέως εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Για τη μεγιστοποίηση της ηλιακής απολαβής και επομένως της παραγόμενης ενέργειας, το πλαίσιο μπορεί να τοποθετηθεί σε στρεφόμενη βάση ανίχνευσης δύο αξόνων (2-axis solar tracker) έτσι ώστε να δέχεται συνεχώς κάθετα τις ακτίνες του ηλίου. Σε άλλες περιπτώσεις, μπορεί να είναι επιθυμητή μια οριζόντια ή κατακόρυφη τοποθέτηση των πλαισίων, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Εν γένει, η συνήθης πρακτική προστάζει τα πλαίσια να τοποθετούνται υπό κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της

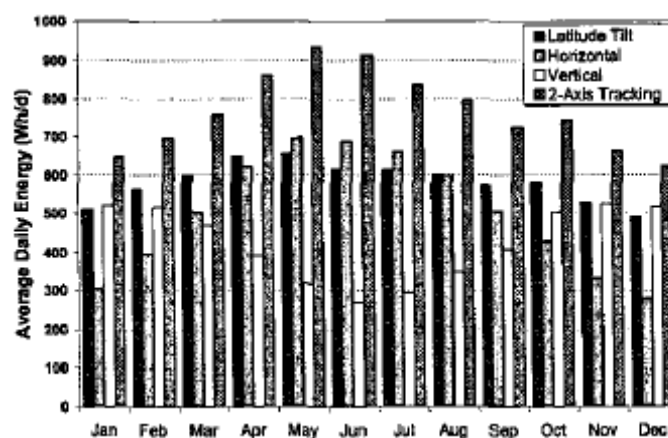
θέσης εγκατάστασης και η οποία αποτελεί έναν ικανοποιητικό συμβιβασμό μεταξύ της ετήσιας ηλιακής απολαβής και του υψηλού κόστους μιας στρεφόμενης βάσης.

Ο πίνακας 3.2 δίνει την ετήσια ενεργειακή παραγωγή ενός τυπικού πλαισίου πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si) με βάση αναφοράς την περίπτωση πλαισίου υπό κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος, για διαφορετικούς προσανατολισμούς και διατάξεις ανίχνευσης. Όπως προκύπτει, το κέρδος της ανίχνευσης του ήλιου εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης με μέγιστή τιμή για περιοχές με υψηλά ποσοστά ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας, όπως στην Albuquerque.

	<i>Albuquerque</i>	<i>Sacramento</i>	<i>Buffalo</i>
Κλίση ίση με γεωγραφικό πλάτος	1.00	1.00	1.00
Οριζόντια	0.86	0.90	0.90
Κατακόρυφη	0.73	0.71	0.83
Ανίχνευση σε 1 άξονα	1.21	1.23	1.15
Ανίχνευση σε 2 άξονες	1.32	1.31	1.23

Πίνακας 3.2: Επίδραση της κλίσης και του συστήματος ανίχνευσης του ήλιου στην ετήσια dc-ενέργεια διαθέσιμη από ένα mc-Si πλαίσιο, ως προς περίπτωση κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος.

Επίσης, ο προσανατολισμός του πλαισίου επηρεάζει σημαντικά τόσο την ημερήσια όσο και την ετήσια κατανομή της παραγόμενης ενέργειας, καθιστώντας δυνατή για τους σχεδιαστές την εναρμόνιση της παραγωγής με τις εποχιακές απαιτήσεις ενέργειας. Η εποχιακή κατανομή της διαθέσιμης dc-ενέργειας για διαφορετικούς προσανατολισμούς στην Albuquerque φαίνεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Παραγόμενη dc-ενέργεια από ένα 100-Wp mc-Si πλαίσιο ανά μήνα και για διαφορετικούς προσανατολισμούς στην Albuquerque.

- *Θερμοκρασία Λειτουργίας*

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία λειτουργίας του, σε βαθμό που καθορίζεται από τους θερμοκρασιακούς συντελεστές του. Τόσο το παραγόμενο από το πλαίσιο ηλεκτρικό ρεύμα όσο και η τάση επηρεάζονται ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η τάση τυπικά μειώνεται ενώ το ρεύμα αυξάνεται, με σημαντικότερη επίδραση αυτήν στην τάση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι πρότυπες συνθήκες (ASTM Standard Reporting Conditions) χρησιμοποιούνται ως συνθήκες αναφοράς για τη μέτρηση της απόδοσης των πλαισίων, με τη θερμοκρασία των

στοιχείων να καθορίζεται στους 25 °C. Συνεπώς, η σχετική απόδοση ενός πλαισίου και αντίστοιχα η παραγωγή του θα είναι μειωμένες σε συνθήκες λειτουργίας στις οποίες η θερμοκρασία των στοιχείων είναι υψηλότερη από 25°C. Η θερμοκρασία λειτουργίας των φβ στοιχείων επηρεάζεται από έναν αριθμό παραγόντων: το σχεδιασμό του πλαισίου (επίπεδο ή συγκεντρωτικό), την τεχνική τοποθέτησής του (ανοιχτή βάση στήριξης, προσαρτημένα σε στέγη), το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, την ταχύτητα του ανέμου και σε μικρότερο βαθμό από την κατεύθυνση του ανέμου. Το εμπειρικό θερμοκρασιακό μοντέλο που αναπτύχθηκε στα εργαστήρια της Sandia λαμβάνει υπόψη του τις παραπάνω επιδράσεις και σχετίζει τη θερμοκρασία των στοιχείων με περιβαλλοντικές παραμέτρους (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου). Στην παρούσα ανάλυση, η εξάρτηση της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής από τους θερμοκρασιακούς συντελεστές ερευνάται με τον υπολογισμό του λόγου της ετήσιας ενέργειας με εφαρμογή των θερμοκρασιακών συντελεστών, προς την ενέργεια θεωρώντας ότι η απόδοση του πλαισίου δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία (δηλαδή χωρίς την εφαρμογή των θερμοκρασιακών συντελεστών).

Ο πίνακας 3.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων υπολογισμών, για τρεις διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες. Οι θερμοκρασιακοί συντελεστές της μέγιστης ισχύος, P_{mp} , για τα τρία διαφορετικά πλαίσια είναι περίπου -0,5%/ °C για το mc-Si, -0,25%/ °C για το a-Si και -0,4%/ °C για το συγκεντρωτικό πλαίσιο. Όπως φαίνεται, η επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας στην ετήσια απόδοση εξαρτάται τόσο από την τεχνολογία του πλαισίου όσο και από τις επικρατούσες συνθήκες περιβάλλοντος. Επισημαίνεται ωστόσο ότι το μέγεθος της επίδρασης στην ετήσια ενεργειακή απόδοση μπορεί να είναι μικρότερο από ότι συνήθως θεωρείται.

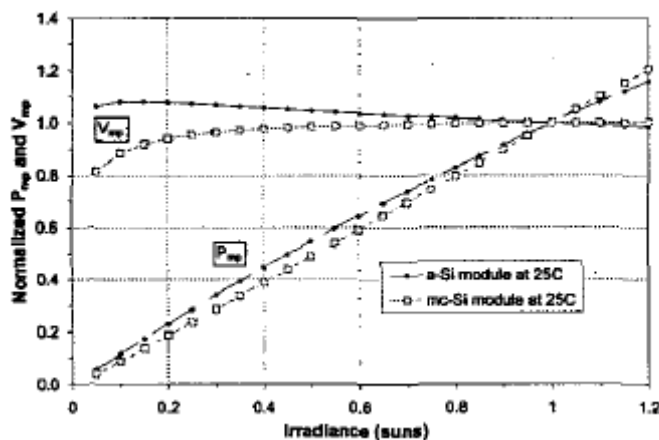
	mc-Si	a-Si	Concentrator
Albuquerque	0.94	0.98	0.91
Sacramento	0.93	0.97	0.91
Buffalo	0.99	1.00	0.96

Πίνακας 3.3: Θερμοκρασιακή επίδραση στην ετήσια απόδοση ΦΒ πλαισίου για τρεις διαφορετικές τοποθεσίες.

- *Εξάρτηση τάσης μέγιστης ισχύος (V_{mp}) από το επίπεδο ακτινοβολίας*

Η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας στην τάση μέγιστης ισχύος (V_{mp}), αποτελεί έναν παράγοντα που σχετίζεται μεν με το ίδιο το πλαίσιο, δεν καθορίζεται ούτε μετράται όμως από τους κατασκευαστές των πλαισίων. Ο παράγοντας αυτός, ο οποίος μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή, ουσιαστικά περιγράφει πόσο καλά συμπεριφέρεται το πλαίσιο σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Το σχήμα 3.2 απεικονίζει την εξάρτηση της τάσης V_{mp} από την ακτινοβολία, όπως μετρήθηκε για δύο διαφορετικά πλαίσια. Στην περίπτωση του πλαισίου άμορφου πυριτίου (a-Si), η τάση V_{mp} αυξάνεται καθώς μειώνεται η ακτινοβολία, με αποτέλεσμα η τάση λειτουργίας του να είναι υψηλότερη σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς (ακτινοβολία 1 ήλιου). Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδειχθεί σημαντική ιδιαίτερα σε τοποθεσίες με υψηλό ποσοστό συννεφιασμένων ημερών, καθώς είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αυξημένη ετήσια παραγωγή μέχρι και 10%. Σημειώνεται ότι τα πλαίσια a-Si και CdTe#2 του πίνακα 1 εμφανίζουν μια αξιοσημείωτα υψηλή ετήσια απόδοση κυρίως εξαιτίας αυτής της επίδρασης της ακτινοβολίας στην τάση V_{mp} . Δευτερευόντως η

αυξημένη παραγωγή των παραπάνω πλαισίων οφείλεται και στους σχετικά μικρούς θερμοκρασιακούς συντελεστές (κατά 2% περίπου).



Σχήμα 3.2: Μεταβολή V_{mp} και P_{mp} συναρτήσει της ακτινοβολίας όπως μετράται για δύο διαφορετικά πλαίσια, a-Si και mc-Si.

- *Μεταβολές Ηλιακού Φάσματος*

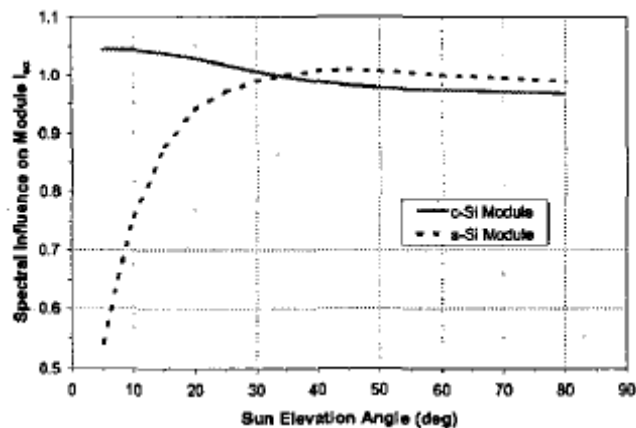
Ο προσδιορισμός της επίδρασης της ωριαίας μεταβολής του ηλιακού φάσματος στην ενεργειακή παραγωγή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου συνιστά μια αρκετά σύνθετη διαδικασία. Καθώς το AM=1,5 ηλιακό φάσμα, όπως έχει καθοριστεί από την ASTM, χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις προδιαγραφές απόδοσης των πλαισίων, η ετήσια παραγωγή του πλαισίου θεωρείται σχετικά ανεξάρτητη από τις μεταβολές του ηλιακού φάσματος. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας και με την πάροδο των εποχών εξαλείφονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση. Ο πίνακας 3.4 δείχνει την ευαισθησία της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής στο ηλιακό φάσμα υπολογίζοντας το λόγο της ετήσιας ενέργειας συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων του ηλιακού φάσματος, προς την ενέργεια θεωρώντας ότι η απόδοση του πλαισίου δεν επηρεάζεται από μεταβολές στο ηλιακό φάσμα. Το προς εξέταση πλαίσιο a-Si, παρατηρείται ότι έχει τη μεγαλύτερη ευαισθησία, ωστόσο η επίδραση στην ετήσια απόδοση δεν είναι μεγαλύτερη από 3%. Η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, στην οποία αποκρίνεται ένα συγκεντρωτικό πλαίσιο, παρουσιάζει σχετικά μικρότερη διακύμανση στη φασματική κατανομή, σε σύγκριση με την ολική (global) ακτινοβολία στην οποία αποκρίνονται τα επίπεδα πλαίσια. Ως εκ τούτου, η ετήσια ενέργεια που παράγεται από ένα συγκεντρωτικό πλαίσιο παρουσιάζει μικρότερη ευαισθησία στο ηλιακό φάσμα σε σχέση με τα επίπεδα πλαίσια.

	mc-Si	a-Si	Concentrator
<i>Albuquerque</i>	0.993	0.992	0.996
<i>Sacramento</i>	1.002	0.978	1.001
<i>Buffalo</i>	1.004	0.973	1.001

Πίνακας 3.4: Επίδραση μεταβολής ηλιακού φάσματος στην ετήσια απόδοση ΦΒ πλαισίου για τρεις διαφορετικές τοποθεσίες.

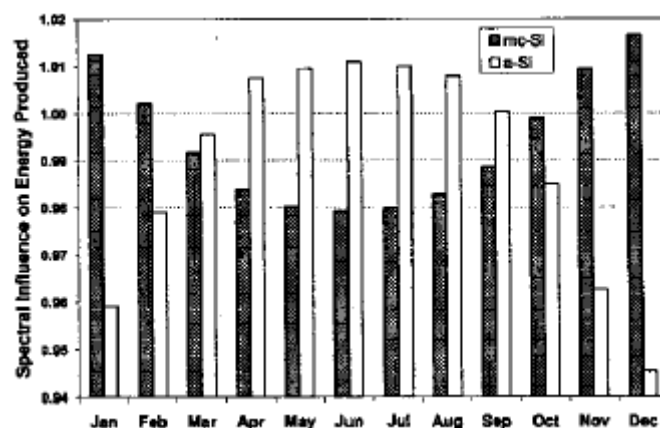
Παρόλο που η μέση ετήσια επίδραση στην ενέργεια μπορεί να είναι μικρή, η κατανόηση της ημερήσιας και εποχιακής επίδρασης που έχει το μεταβαλλόμενο ηλιακό φάσμα στην απόδοση ενός φβ πλαισίου είναι άκρως σημαντική. Το σχήμα 3.3

απεικονίζει την επίδραση της μεταβολής του ηλιακού φάσματος στο κανονικοποιημένο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, καθώς η γωνία ανύψωσης του ήλιου αυξάνεται προχωρώντας προς το μεσημέρι. Η συμπεριφορά που αποτυπώνεται στο σχήμα αυτό για ένα mc-Si και ένα a-Si πλαίσιο εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της φασματικής απόκρισης των μεμονωμένων στοιχείων του πλαισίου.



Σχήμα 3.3: Επίδραση του μεταβαλλόμενου ηλιακού φάσματος στο ρεύμα πλαισίου I_{sc} συναρτήσει της γωνίας ανύψωσης του ήλιου κατά τη διάρκεια μιας ημέρας.

Η φασματική αυτή επίδραση στην ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχει επίσης μια εποχιακή διαφοροποίηση, καθώς το καλοκαίρι ο ήλιος παραμένει σε υψηλές γωνίες ανύψωσης (χαμηλές τιμές αέριας μάζας) για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με το χειμώνα, όπου παρατηρούνται μικρότερες γωνίες ανύψωσης (υψηλές τιμές αέριας μάζας). Για να γίνει εμφανές αυτό το εποχιακό φαινόμενο, υπολογίζεται η μέση ημερήσια παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του ηλιακού φάσματος, και οι τιμές που προκύπτουν διαιρούνται με την αντίστοιχη παραγόμενη ενέργεια θεωρώντας την αυτή τη φορά ανεξάρτητη από τις μεταβολές του ηλιακού φάσματος. Το σχήμα 3.4 δείχνει τις προκύπτουσες αναλογίες για δύο πλαίσια, ένα mc-Si κι ένα a-Si, και τα δύο με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης εγκατάστασης. Όπως προκύπτει, η φασματική επίδραση έχει σαν αποτέλεσμα μια εποχιακή διακύμανση και για τις δύο τεχνολογίες, με σημαντικότερη όμως αυτή για το a-Si πλαίσιο. Η ιδιάζουσα αυτή εποχιακή συμπεριφορά για τα a-Si πλαίσια έχει παρατηρηθεί σε μακροχρόνιες παρακολουθήσεις απόδοσης a-Si φβ συστημάτων.



Σχήμα 3.4: Εποχιακή (μηνιαία) μεταβολή της επίδρασης του μεταβαλλόμενου ηλιακού φάσματος στην ενέργεια που διατίθεται από ένα mc-Si και ένα a-Si φβ πλαίσιο.

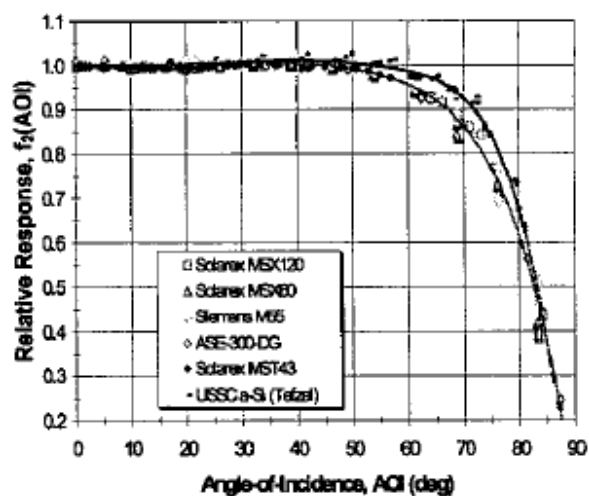
- *Επίδραση Γωνίας Πρόσπτωσης Ηλιακής Ακτινοβολίας*

Ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει την παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια dc-ενέργεια είναι οι οπτικές απώλειες που μεταβάλλονται με την γωνία πρόσπτωσης (AOI), υπό την οποία οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν στο πλαίσιο. Η επίδραση των απωλειών αυτών σχετίζεται κυρίως με την ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς η απόκριση του πλαισίου στη διάχυτη ακτινοβολία είναι κατά κύριο λόγο ανεξάρτητη του προσανατολισμού του. Στην περίπτωση επιπέδων πλαισίων, οι οπτικές απώλειες σχετίζονται με τις απώλειες ανάκλασης της εμπρόσθιας γυάλινης επιφάνειας. Η ανάκλαση της γυάλινης επιφάνειας αυξάνεται σημαντικά για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60° περίπου. Αποτέλεσμα αυτού είναι μικρότερη ποσότητα ακτινοβολίας να φτάνει στα στοιχεία στο εσωτερικού του πλαισίου και ως εκ τούτου η παραγόμενη ενέργεια να μειώνεται σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Όπως και η επίδραση των μεταβολών του ηλιακού φάσματος, έτσι και η επίδραση από αυτή την οπτική απώλεια στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή είναι σχετικά μικρή. Παρ' όλα αυτά μπορεί να έχει μια σημαντική εποχιακή διακύμανση, ανάλογα με τον προσανατολισμό του πλαισίου. Ο πίνακας 3.5 συνοψίζει την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή ενός mc-Si πλαισίου για διαφορετικούς προσανατολισμούς και θέσεις εγκατάστασης. Στην περίπτωση πλαισίου τοποθετημένου σε στρεφόμενη βάση ανίχνευσης δύο αξόνων (AOI = 0°), η απώλεια στην ενέργεια εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης είναι μηδενική. Όπως φαίνεται στον πίνακα, η μέγιστη επίδραση στην ετήσια ενέργεια είναι σχετικά μικρή, περίπου 4%, για την περίπτωση κατακόρυφα τοποθετημένου πλαισίου, ενώ για την τυπική περίπτωση πλαισίου τοποθετημένου υπό κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος η ετήσια απώλεια είναι μόνο 1% περίπου.

	Ανίχνευση σε 2 άξονες	Κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος	Οριζόντια	Κατακόρυφη
<i>Albuquerque</i>	1	0.989	0.976	0.960
<i>Sacramento</i>	1	0.989	0.981	0.957
<i>Buffalo</i>	1	0.993	0.985	0.975

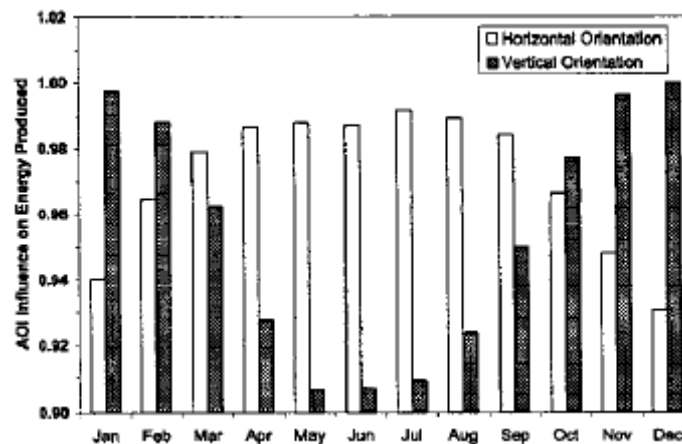
Πίνακας 3.5: Επίδραση οπτικών απωλειών εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης (AOI) στην ετήσια απόδοση ΦΒ πλαισίου για διαφορετικούς προσανατολισμούς.

Στο σχήμα 3.5 φαίνεται η μετρούμενη επίδραση στην απόδοση πλαισίου εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης για ένα πλήθος πλαισίων του εμπορίου.



Σχήμα 3.5: Παράγοντας οπτικών απωλειών στο ρεύμα I_{sc} συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης AOI για διαφορετικούς τύπους πλαισίων.

Η εποχιακή (μηνιαία) επίδραση στην ενεργειακή παραγωγή απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6 για ένα mc-Si πλαίσιο τοποθετημένο οριζόντια ή κάθετα στην Albuquerque. Τέλος, σημειώνεται ότι στην ιδιαίτερη περίπτωση φβ συστημάτων ενσωματωμένων σε κτίρια, η επίδραση αυτή της γωνίας πρόσπτωσης στη μηνιαία ενεργειακή παραγωγή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη φάση του σχεδιασμού του συστήματος.



Σχήμα 3.6: Εποχιακή (μηνιαία) μεταβολή της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης στην παραγόμενη ενέργεια από ένα mc-Si πλαίσιο με εμπρόσθια γυάλινη επιφάνεια.

- *Ρύπανση*

Ο παράγοντας ρύπανσης περιλαμβάνει ρύπους (σκόνη), χιόνι και άλλα “ξένα” προς το φβ πλαίσιο στοιχεία που εμποδίζουν την ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στην επιφάνεια των ηλιακών στοιχείων. Συντελούν δηλαδή στη μείωση της ενεργού ακτινοβολίας, της ακτινοβολίας στην οποία τα στοιχεία ουσιαστικά αποκρίνονται, με αποτέλεσμα να μειώνεται τελικά η παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύς.

Η συσσώρευση ρύπων στην επιφάνεια των πλαισίων εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης και τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Το χιόνι μειώνει την παραγόμενη ενέργεια κατά ένα ποσό το οποίο εξαρτάται από την ποσότητα του χιονιού και τη διάρκεια παραμονής του στην επιφάνεια των φβ πλαισίων. Σε περιοχές με έντονη κινητικότητα και υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπου επίσης υπάρχουν περίοδοι με αισθητά μειωμένη βροχόπτωση για κάποιους μήνες, οι απώλειες εξαιτίας της ρύπανσης έχουν σημαντική επίπτωση στην τελική διαθέσιμη από τα φβ πλαίσια ενέργεια. Κατά συνέπεια, ιδιαίτερα σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητο οι εν λόγω απώλειες να λαμβάνονται υπόψη σε ένα μοντέλο ενεργειακής απόδοσης. Αποτελεί συνηθισμένη πρακτική να λαμβάνουν οι απώλειες αυτές μια σταθερή τιμή καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους, ωστόσο, κάτι τέτοιο μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση του βαθμού επίπτωσής τους. Για μια ορθότερη προσέγγιση και πιο αναλυτική μοντελοποίηση των απωλειών λόγω ρύπανσης εξετάζεται το φαινόμενο της ρύπανσης διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο.

- *Σκίαση*

Ένας τελευταίος παράγοντας επίδρασης της dc-ενεργειακής απόδοσης των φβ πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων (όπως παρακείμενα κτίρια,

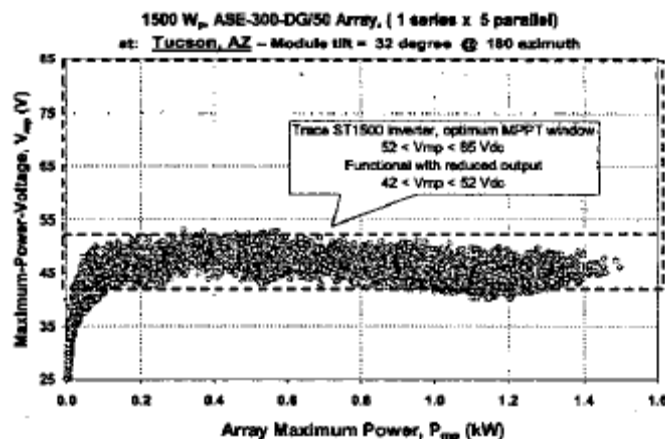
βλάβηση κλπ) είτε σε περιπτώσεις μεγάλων φβ σταθμών οι οποίοι αποτελούνται από πολλές διαδοχικές σειρές συστοιχιών, όπως και σε άλλες περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης (για παράδειγμα στις στέγες των κτιρίων), και στις οποίες προκαλείται σκίαση από τη μια σειρά στην επόμενη. Ιδιαίτερα στην δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι σημαντικές και για το λόγο αυτό είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που προκαλούν. Μια αναλυτική προσέγγιση του φαινομένου της σκίασης καθώς και των επιδράσεων στη ηλεκτρική συμπεριφορά των φβ πλαισίων μελετάται σε επόμενο κεφάλαιο.

3.4 AC ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η κατανόηση όλων των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και κλονίζουν την αξιοπιστία τους είναι άκρως σημαντική. Η ανάλυση των βασικών παραγόντων που επιδρούν στην dc-ενεργειακή παραγωγή μεμονωμένων πλαισίων, αποτελεί βασικό βήμα προς αυτή την κατεύθυνση. Ωστόσο, οι παράγοντες επιπέδου πλαισίου που συζητήθηκαν προηγουμένως, θα πρέπει να εξεταστούν σε σχέση με τους παράγοντες επιπέδου συστήματος, οι οποίοι είναι δυνατόν να τους υπερκεράσουν.

Οι παράγοντες σε επίπεδο συστήματος εισάγουν ενεργειακές απώλειες εξαιτίας διαφοροποιήσεων (mismatch) στα πλαίσια εντός της συστοιχίας, ρύπανσης, καλωδιακών και τερματικών αντιστάσεων, φθοράς (degradation) λόγω ηλικίας (μείωση απόδοσης συστοιχίας) και ασυμβατότητας των μερών του συστήματος. Επιπροσθέτως, τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν απώλειες που σχετίζονται με την απόδοση του μετατροπέα συναρτήσεως του φορτίου και της θερμοκρασίας, κυκλωματικές απώλειες μετατροπέα, ικανότητα παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (maximum-power-point-tracking, MPPT), μόνωση μετασχηματιστών κλπ. Από την άλλη, τα αυτόνομα συστήματα παρουσιάζουν επιπλέον απώλειες και περιορισμούς στο σχεδιασμό τους που σχετίζονται με την ικανότητα του ρυθμιστή φορτίου (charge controller) (αξιοποίηση της dc ενέργειας που διατίθεται από τη συστοιχία), τη χωρητικότητα του συσσωρευτή, την ικανότητα φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή. Σε περιπτώσεις ελλειπών σχεδιασμένων συστημάτων, συνδυασμοί των παραπάνω παραγόντων μπορεί να έχουν σαν συνέπεια αδυναμία οδήγησης του φορτίου, προκαλώντας την απώλειά του.

Η επιλογή των διαφόρων μερών του συστήματος, με στόχο την αξιοποίηση της dc-ενέργειας που διατίθεται από τη συστοιχία και συνεπώς τη μέγιστη δυνατή προκύπτουσα ετήσια ac-ενέργεια, είναι πολύ σημαντική. Παράδειγμα μιας τέτοιας λανθασμένης επιλογής αποτελεί το διάγραμμα του σχήματος 3.7. Το διάγραμμα αυτό απεικονίζει τις ωριαίες τιμές της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_{mp}) συναρτήσεως του επιπέδου μέγιστης ισχύος της συστοιχίας. Επιπλέον, υπερτίθεται σε αυτό το “παράθυρο τάσης εισόδου” του μετατροπέα που χρησιμοποιείται στο ΦΒ σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση, οι απαιτήσεις του μετατροπέα δεν ταιριάζουν με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της συστοιχίας, ή με άλλα λόγια, το αποτέλεσμα είναι σημαντική μείωση στην ενέργεια εξαιτίας της μειωμένης απόδοσης του μετατροπέα.



Σχήμα 3.7: Ωριμές τιμές V_{mp} συναρτήσει της P_{mp} ενός ΦΒ συστήματος 1.5kWp

Συνοψίζοντας, είναι πλέον ξεκάθαρο ότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στην ac ενεργειακή παραγωγή και την αξιοπιστία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η όσο το δυνατόν καλύτερη κατανόησή τους με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των φβ πλαισίων.

Παρόλο που τα εκάστοτε αποτελέσματα εξαρτώνται κατά κάποιο τρόπο από το είδος και την τοποθεσία του πλαισίου, ο πίνακας 3.6 παρουσιάζει μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης των διαφορετικών παραγόντων που επιδρούν στην ac παραγωγή του συστήματος, δίνοντας παράλληλα και το εύρος της πιθανής μεταβολής που προκαλούν.

Είδος Απώλειας	Τυπική τιμή	Εύρος
Ισχύς πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς	0,97	0,85 – 1,05
Φθορά λόγω πρωτογενούς έκθεσης στον ήλιο	0,98	0,90 – 0,99
dc καλωδιώσεις	0,98	0,97 – 0,99
Δίοδοι και διασυνδέσεις	0,995	0,99 – 0,997
Διαφοροποιήσεις πλαισίων	0,98	0,97 – 0,985
Μετατροπέας	0,97	0,93 – 0,98
Μετασχηματιστές	0,97	0,96 – 0,98
ac καλωδιώσεις	0,99	0,98 – 0,993
Ανίχνευση ήλιου	1,00	0,98–1,00
Διαθεσιμότητα συστήματος	0,98	0,00 – 0,995
Γήρανση	1,00	0,70 – 1,00
Σύνολο	0,83	

Πίνακας 3.6: Παράγοντες επίδρασης ac παραγωγής ΦΒ συστήματος

Για λόγους συνοχής παρακάτω περιγράφονται οι παράγοντες μείωσης του πίνακα αυτού, στον οποίο επίσης φαίνονται και οι τυπικές τιμές τους που λαμβάνονται υπόψη για τις διάφορες προσομοιώσεις σε επόμενο κεφάλαιο.

- *Ισχύς πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions, STC)*
Ο εν λόγω παράγοντας παρέχει μια εκτίμηση της απόκλισης από τις ονομαστικές προδιαγραφές που παρέχονται από τους κατασκευαστές των πλαισίων. Πραγματικές μετρήσεις απόδοσης έχουν αποδείξει ότι τα φβ πλαίσια παρουσιάζουν διαφορές από τις παραπάνω προδιαγραφές είτε υπόκεινται σε φθορά λόγω πρωτογενούς έκθεσης στον ήλιο.

- *Φθορά λόγω πρωτογενούς έκθεσης στον ήλιο (initial light – induced degradation)*
Ο παράγοντας αυτός λαμβάνει υπόψη την αρχική υποβάθμιση – φθορά του πλαισίου όταν αυτό υπόκειται για πρώτη φορά σε έκθεση ηλιακής ακτινοβολίας.
- *dc καλωδιώσεις*
Ο παράγοντας μείωσης για τις dc καλωδιώσεις περιλαμβάνει τις ωμικές απώλειες των καλωδιώσεων για τη σύνδεση μεταξύ των πλαισίων καθώς και μεταξύ φβ συστοιχίας και μετατροπέα.
- *Δίοδοι και συνδέσεις*
Ο συγκεκριμένος παράγοντας μείωσης υπεισέρχεται για να συμπεριλάβει τις απώλειες λόγω πτώσης τάσης κατά μήκος διόδων που χρησιμοποιούνται για την παρεμπόδιση των ανάστροφων ρευμάτων καθώς και τις ωμικές απώλειες στις ηλεκτρικές συνδέσεις.
- *Διαφοροποιήσεις πλαισίων*
Ο εν λόγω παράγοντας εκτιμά τις απώλειες που οφείλονται σε μικρές αποκλίσεις των χαρακτηριστικών των πλαισίων. Ως εκ τούτου, όταν συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους δεν λειτουργούν σε μέγιστη απόδοση.
- *Μετατροπέας και Μετασχηματιστής*
Ο παράγοντας αυτός αντανακλά τις ικανότητες των συγκεκριμένων μερών του συστήματος στην μετατροπή της dc ισχύος σε ac. Η ικανότητα των μετατροπέων περιλαμβάνει απώλειες μετασχηματιστών όταν οι τελευταίοι απαιτούνται από τους κατασκευαστές.
- *ac καλωδιώσεις*
Ο παράγοντας μείωσης για τις ac καλωδιώσεις περιλαμβάνει τις ωμικές απώλειες των καλωδιώσεων για τη σύνδεση μεταξύ του μετατροπέα και του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.
- *Ρύπανση*
Ο παράγοντας της ρύπανσης αναφέρεται στη συσσώρευση ρύπων, χιονιού και άλλων “ξένων” προς το φβ πλαίσιο στοιχείων που εμποδίζουν την ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στην επιφάνεια των ηλιακών στοιχείων.
- *Σκίαση*
Ο παράγοντας της σκίασης σχετίζεται με τις απώλειες που προκαλούνται στην απόδοση των φβ συστοιχιών λόγω σκίασης από παρακείμενα αντικείμενα, κτίρια, βλάστηση κλπ καθώς και από μια σειρά συλλεκτών στην επόμενη σε περίπτωση ύπαρξης διαδοχικών σειρών.
- *Ανίχνευση ήλιου*
Ο συγκεκριμένος παράγοντας μείωσης υπεισέρχεται για να συμπεριλάβει τις απώλειες στις περιπτώσεις συστημάτων ανίχνευσης ήλιου ενός και δύο αξόνων όταν οι μηχανισμοί ανίχνευσης (στρεφόμενες βάσεις) δε διατηρούν το βέλτιστο προσανατολισμό των φβ συστοιχιών.

- *Διαθεσιμότητα συστήματος*

Ο παράγοντας μείωσης για τη διαθεσιμότητα του συστήματος περιλαμβάνει τις περιπτώσεις κατά τις οποίες το σύστημα βρίσκεται εκτός λειτουργίας για λόγους συντήρησης είτε λόγω πτώσης του δικτύου ή βλάβης του μετατροπέα.

- *Γήρανση*

Ο εν λόγω παράγοντας ενσωματώνει τις απώλειες στην απόδοση των πλαισίων με την πάροδο του χρόνου, λόγω γήρανσης. Η απώλεια αυτή είναι τυπικά περίπου 1%, ωστόσο, με τη θεώρηση μοναδιαίας τιμής υποτίθεται ότι το φβ σύστημα διανύει τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του.

3.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (PERFORMANCE RATIO)

Η απόδοση των ΦΒ συστημάτων προσδιορίζεται από διάφορους συντελεστές, ένας από τους οποίους επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και χρησιμοποιείται συχνά στην πράξη, ο επονομαζόμενος συντελεστής απόδοσης (Performance Ratio, PR) [8]. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r}$$

όπου, Y_f είναι η τελική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα διαιρεμένη με την ονομαστική ισχύ του συστήματος, δηλαδή $Y_f = \frac{E}{P_0}$ σε μονάδες (kWh/kW) ή (ώρες).

Με τον δείκτη αυτό κανονικοποιείται η παραγόμενη ενέργεια ως προς την εγκατεστημένη ισχύ και ως εκ τούτου είναι δυνατή η σύγκριση συστημάτων διαφορετικών μεγεθών.

Y_r είναι η συνολική λαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια διαιρεμένη με την ακτινοβολία αναφοράς (συνήθως $1000\text{W}/\text{m}^2$), δηλ. $Y_r = \frac{H}{G}$ σε ίδιες μονάδες (ώρες). Ο δείκτης αυτός εκφράζει τη διαθέσιμη στο σύστημα ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια εξαρτάται από τη θέση εγκατάστασης και τον προσανατολισμό, και διαφοροποιείται σημαντικά από μήνα σε μήνα και από έτος σε έτος.

Ο συντελεστής απόδοσης PR ποσοτικοποιεί τη συνολική επίδραση των απωλειών στην τελική ενέργεια που λαμβάνεται από ένα φβ σύστημα. Οι απώλειες αυτές περιλαμβάνουν χαμηλή απόδοση μετατροπέα, καλωδιώσεις, διαφοροποιήσεις πλαισίων, θερμοκρασία λειτουργίας, απώλειες λόγω ανάκλασης στην επιφάνεια των συλλεκτών, ρύπανση κ.ά. Η τιμή του δίνεται συνήθως σε μηνιαία ή ετήσια βάση. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι εξαιτίας των απωλειών που οφείλονται στη θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων οι τιμές του συντελεστή αυτού παρουσιάζονται αυξημένες κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι.

Κεφάλαιο 4

Επίδραση Ρύπανσης

Εισαγωγή

Η συσσώρευση ρύπων στην επιφάνεια των φβ πλαισίων (“soiling” – ρύπανση) μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε περιοχές όπου επικρατεί ξηρό κλίμα και υπάρχουν περίοδοι κατά τη διάρκεια του έτους με αισθητά μειωμένη βροχόπτωση (dry seasons) για κάποιους μήνες. Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά σημαντικό και εντείνεται σε εκείνες τις περιοχές που παρατηρείται πλήρης απουσία βροχόπτωσης τους καλοκαιρινούς μήνες. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης των απωλειών ενέργειας που οφείλονται στη ρύπανση των φβ συστημάτων και στη συνέχεια γίνεται μια εκτίμηση του οικονομικού αντίκτυπου που μπορεί να έχει το εν λόγω φαινόμενο.

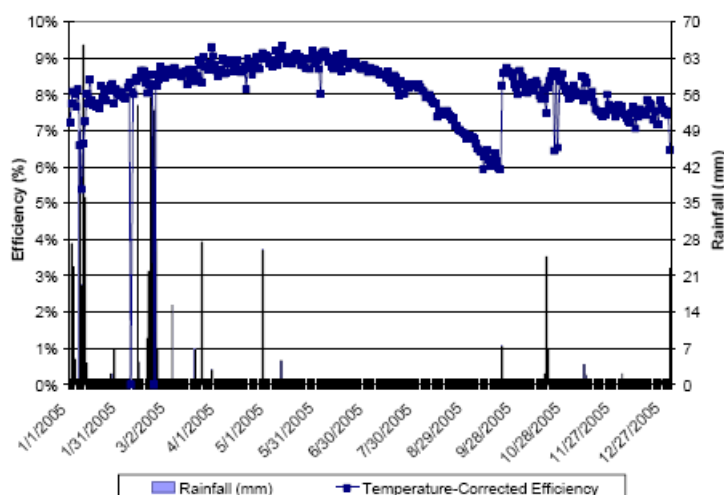
4.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Παρά το γεγονός ότι οι απώλειες ενέργειας που παρατηρούνται στα φβ συστήματα εξαιτίας της ρύπανσης είναι μεγάλης σημασίας για τους ιδιοκτήτες και τους διαχειριστές τους, δεν υπάρχουν μέχρι στιγμής αρκετές διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με το θέμα αυτό. Μεγάλο μέρος χρήσιμων πληροφοριών έχει εφαρμογή μόνο στη συγκεκριμένη τοποθεσία όπου διεξάγονται οι πειραματικές δοκιμές, και εγείρεται η ανάγκη για μια γενικότερη προσέγγιση της επίδρασης της ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση των φβ συστημάτων. Μια τέτοια ευρύτερη μελέτη απαιτεί την εξέταση της απόδοσης πληθώρας φβ συστημάτων εγκατεστημένων σε διαφορετικές περιοχές με διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Στην παρούσα ενότητα δίνεται μια αναλυτική περιγραφή του φαινομένου της ρύπανσης και της επίδρασης που έχει στην ενεργειακή παραγωγή μεγάλων διασυνδεδεμένων φβ συστημάτων, βασισμένη στη λεπτομερή έρευνα που διεξήχθη το 2006 σε διάφορες περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών με ξηρό κλίμα [11].

4.1.1 Προσέγγιση απωλειών με χρήση κατάλληλου μοντέλου

Το φαινόμενο της ρύπανσης γίνεται έντονα αισθητό και αποκτά ιδιαίτερη σημασία στη λειτουργία των φβ συστημάτων, εγκατεστημένων σε περιοχές με πολύ ξηρά κλίματα και πλήρη απουσία βροχής κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Για τη μοντελοποίηση του φαινομένου αυτού, όπως περιγράφεται στην προαναφερθείσα μελέτη (Mitchell *et al*), χρησιμοποιούνται στοιχεία από αρκετές περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών, για παράδειγμα της California και των νοτιοδυτικών περιοχών. Η μετρούμενη απόδοση των ΦΒ συστημάτων τείνει να έχει μια σταδιακή αλλά αξιοσημείωτη μείωση κατά την διάρκεια άνδρων περιόδων, οι οποίες εμφανίζονται σε περιοχές με ξηρά κλίματα. Η απόδοσή των συστημάτων αυτών επιστρέφει σε φυσιολογικά επίπεδα ύστερα από κάποιο συμβάν βροχόπτωσης που ακολουθεί την περίοδο ξηρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, για ένα τυπικό σύστημα εγκατεστημένο σε στέγη στη νότια California. Με τον όρο “συμβάν βροχόπτωσης” υποδηλώνεται το φαινόμενο της αδιάλειπτης βροχόπτωσης που συντελείται κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, ανεξαρτήτου μεγέθους (είτε είναι δηλαδή μία ώρα είτε μια ημέρα). Οποιαδήποτε παύση της βροχόπτωσης συνεπάγεται άμεσα και τη λήξη του συμβάντος.



Σχήμα 4.1: Απόδοση φβ συστήματος σε συνδυασμό με τη βροχόπτωση

Τα περισσότερα διαθέσιμα προγράμματα προσομοίωσης ΦΒ συστημάτων υιοθετούν την ύπαρξη ενός σταθερού παράγοντα απωλειών ρύπανσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, από την παρατήρηση των πειραματικών δεδομένων, συμπεραίνεται ότι οι απώλειες ενέργειας που οφείλονται στη ρύπανση του συστήματος δεν είναι σταθερές με την πάροδο του χρόνου, αλλά εξαρτώνται από την ποσότητα και τη συχνότητα της βροχής που πέφτει σε ένα σύστημα. Σκοπό της προαναφερθείσας μελέτης αποτελεί η ανάπτυξη ενός κατάλληλου μοντέλου που προσεγγίζει ορθότερα την επίδραση της ρύπανσης. Ερωτήσεις κρίσιμες για την ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου είναι για παράδειγμα:

1. Για πόσο χρόνο μετά από μια βροχόπτωση τα πλαίσια παραμένουν σχετικά καθαρά;
2. Πόσο γρήγορα συσσωρεύονται ρύποι στην επιφάνεια των φβ πλαισίων; Πόσο διαφέρει αυτός ο ρυθμός μεταξύ διαφορετικών περιοχών και περιβαλλοντικών συνθηκών;
3. Πόση ποσότητα βροχής απαιτείται για τον πλήρη καθαρισμό των συστοιχιών ενός φβ συστήματος;

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, η παρατηρούμενη μείωση στην απόδοση του συστήματος εμφανίζεται σχεδόν γραμμική κατά τη διάρκεια της περιόδου ξηρασίας. Ωστόσο, ο ρυθμός μείωσης κατά τη διάρκεια της περιόδου ξηρασίας δεν είναι ίδιος για όλα τα συστήματα και εξαρτάται από το επίπεδο δραστηριότητας στο άμεσο περιβάλλον του συστήματος. Με τα δεδομένα αυτά και με στόχο την ακριβέστερη πρόβλεψη της επίδρασης της ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση των φβ συστημάτων, συνίσταται η εφαρμογή ενός γραμμικού μοντέλου μείωσης της απόδοσης. Το μοντέλο αυτό θα εφαρμόζεται στο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο κύριων συμβάντων βροχόπτωσης (επαρκών για τον πλήρη καθαρισμό του συστήματος), πιθανόν με κάποια καθυστέρηση μεταξύ του συμβάντος και της στιγμής που αρχίζει να επενεργεί ο παράγοντας ρύπανσης. Επιπλέον, διαφορετικοί ρυθμοί μείωσης αντιστοιχούν σε διαφορετικές θέσεις εγκατάστασης.

“Περίοδος Χάριτος” και Μη Αναμενόμενη Συμπεριφορά

Από την εν λόγω μελέτη προκύπτει ότι κάποια φβ συστήματα παρουσιάζουν μία “περίοδο χάριτος” που ακολουθεί μετά την τελευταία ανοιξιάτικη βροχή. Πιο συγκεκριμένα, στην περίοδο αυτή η ρύπανση είναι αμελητέα ή με άλλα λόγια, ο ρυθμός μείωσης της απόδοσης λόγω ρύπανσης είναι σημαντικά μικρότερος σε σχέση με το μεταγενέστερο τμήμα της περιόδου ξηρασίας. Στο σχήμα 4.1, που δόθηκε ήδη, απεικονίζεται το εν λόγω φαινόμενο. Η τελευταία αξιοσημείωτη βροχόπτωση την άνοιξη συνέβη στα τέλη Απριλίου, αλλά ο ρυθμός μείωσης της απόδοσης δεν αρχίζει να αυξάνεται αισθητά μέχρι και τα μέσα Ιουνίου. Οι παρατηρούμενες περίοδοι χάριτος για περιοχές που εκδήλωσαν μια τέτοια συμπεριφορά είναι, όπως αναφέρεται, 20-50 ημέρες. Ωστόσο, άλλες τόσες περιοχές δεν παρουσίασαν την εν λόγω περίοδο χάριτος. Ένα άλλο παράδειγμα μη ομοιόμορφης συμπεριφοράς συνιστά η απρόβλεπτη συμπεριφορά της απόδοσης του συστήματος που εκδηλώνεται έπειτα από μία ασθενή βροχόπτωση στα τέλη της άνυδρης περιόδου. Σε ορισμένες περιπτώσεις μια τέτοια βροχόπτωση μπορεί να προκαλέσει την απότομη μείωση της απόδοσης του συστήματος.

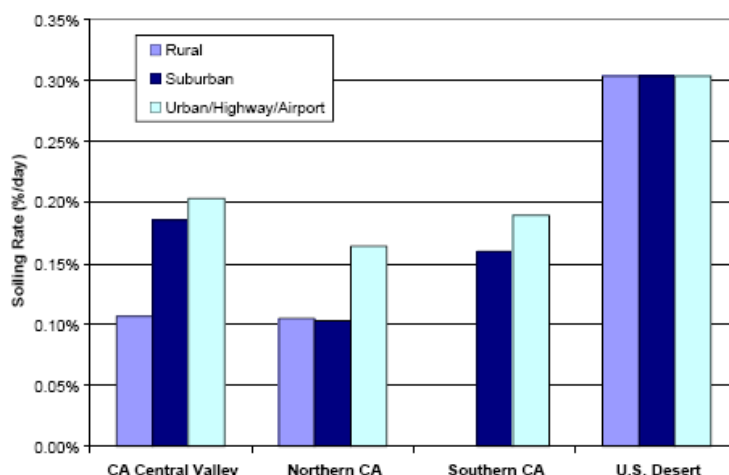
Οι ανώμαλες συμπεριφορές που μόλις περιγράφηκαν, υποδεικνύουν ότι είναι απαραίτητη περαιτέρω έρευνα σχετικά με την ποσότητα της βροχής που απαιτείται για τον πλήρη καθαρισμό ενός ΦΒ συστήματος, καθώς και προσεκτικότερη επιλογή της έναρξης και λήξης της καθορισμένης περιόδου ρύπανσης (άνυδρης περιόδου), προκειμένου να αποφευχθεί η απρόβλεπτη συμπεριφορά στο τέλος της περιόδου αυτής.

4.1.2 Ανάλυση Ρυθμού Ρύπανσης

Για τον προσδιορισμό των κατάλληλων ρυθμών ρύπανσης σε τοποθεσίες με διαφορετικές κλιματολογικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, διενεργήθηκε μια πειραματική ανάλυση για ένα μεγάλο αριθμό φβ συστημάτων. Σε κάθε ένα από τα συστήματα αυτά εκχωρήθηκε ένας συγκεκριμένος συνδυασμός γεωγραφικής περιοχής και τύπου περιβάλλοντος. Σε καθεμία γεωγραφική περιοχή, η περίοδος ξηρασίας καθορίζεται με βάση την τελευταία βροχόπτωση της βροχερής περιόδου και την πρώτη μετά την περίοδο ξηρασίας.

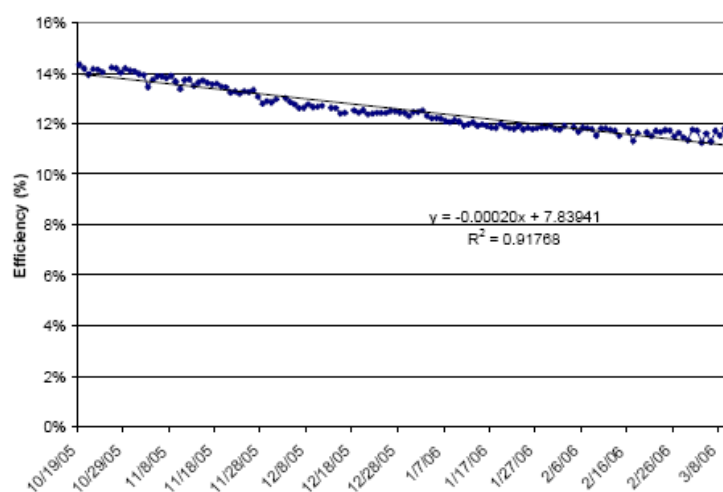
Για όλες τις περιοχές που παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα βροχόπτωσης (τουλάχιστον μια φορά το μήνα) δεν παρατηρείται αισθητή μείωση της απόδοσης χρησιμοποιώντας την προαναφερθείσα γραμμική μέθοδο. Τα επίπεδα απόδοσης για συστήματα εγκατεστημένα σε τέτοιες περιοχές παραμένουν σχετικά σταθερά καθόλη τη διάρκεια του έτους, επιβεβαιώνοντας έτσι ότι η ρύπανση σε ΦΒ συστήματα αυτών των περιοχών δεν επηρεάζει σημαντικά την ενεργειακή τους παραγωγή.

Ωστόσο, κάποια άλλα συστήματα παρουσιάζουν τη χαρακτηριστική σταδιακή μείωση στην απόδοση που περιγράφεται παραπάνω. Για κάθε συνδυασμό περιοχής και τύπου περιβάλλοντος υπολογίζεται ο μέσος όρος του ρυθμού απωλειών λόγω ρύπανσης. Το παρακάτω σχήμα συνοψίζει τη μέση ημερήσια απώλεια στην απόδοση κάθε συστήματος για συγκεκριμένο συνδυασμό περιοχής – τύπου περιβάλλοντος. Οι μέσοι ρυθμοί απωλειών, όπως προκύπτει, κυμαίνονται μεταξύ 0.1 – 0.3% ανά ημέρα.



Σχήμα 4.2: Μέση ημερήσια τιμή απωλειών ρύπανσης για διαφορετικές τοποθεσίες και τύπους περιβάλλοντος

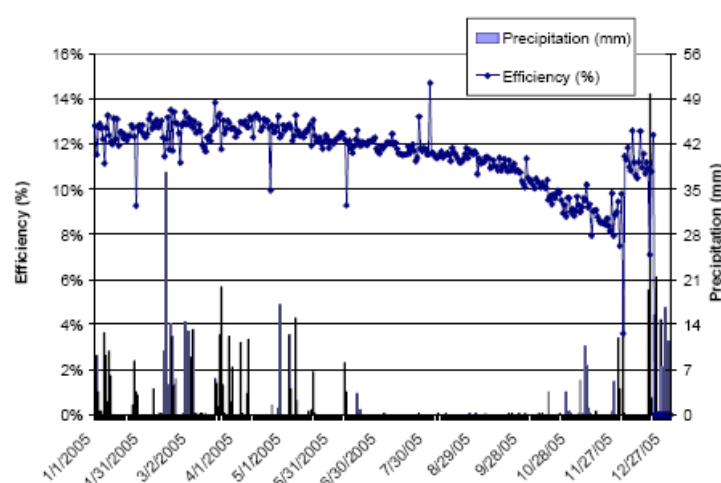
Ο προσανατολισμός του συστήματος διερευνάται ως πιθανός παράγοντας που επηρεάζει τους ρυθμούς απωλειών που οφείλονται στη ρύπανση. Ωστόσο τα δεδομένα που εξήχθησαν υποδηλώνουν ότι ο προσανατολισμός του συστήματος δεν επηρεάζει αισθητά τους ρυθμούς αυτούς. Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τη γραμμική προσέγγιση για ένα φβ σύστημα με στρεφόμενη βάση ανίχνευσης ενός άξονα στην νοτιοδυτική έρημο των ΗΠΑ.



Σχήμα 4.3: Απόδοση κατά τη διάρκεια της άνοιξης περιόδου φβ συστήματος με στρεφόμενη βάση ανίχνευσης

Ποσότητα Βροχής Απαιτούμενη για τον Καθαρισμό των Πλαισίων

Σε προηγούμενες μελέτες υποστηρίζεται ότι 5mm (0.2in) βροχής αποτελούν επαρκή ποσότητα για τον πλήρη καθαρισμό των φβ συστημάτων. Παρ' όλα αυτά, η ανάλυση που περιγράφεται εδώ, συμπεραίνει ότι σε κάποια συστήματα απαιτείται σημαντικά μεγαλύτερη ποσότητα βροχόπτωσης για τον πλήρη καθαρισμό των πλαισίων τους. Για παράδειγμα, το σχήμα 4.4 παρουσιάζει τις μετρηθείσες τιμές απόδοσης και βροχόπτωσης ενός φβ συστήματος στη βόρεια California για το έτος 2005. Αρκετά συμβάντα βροχόπτωσης το φθινόπωρο, πάνω από 5 mm (0.2in), απέτυχαν να καθαρίσουν πλήρως το σύστημα. Η απόδοση του συστήματος συνέχισε να μειώνεται έως ότου ένα συμβάν βροχόπτωσης 20mm (0.82in) την 1^η Δεκεμβρίου καθάρισε πλήρως τα πλαίσια. Το γεγονός αυτό είχε σαν συνέπεια την άμεση αύξηση της απόδοσης του συστήματος από 7.5% σε 12.5%, αύξηση της τάξης του 40%.



Σχήμα 4.4: Απόδοση φβ συστήματος σε συνδυασμό με τη βροχόπτωση

Για την ορθότερη ποσοτικοποίηση αυτού του φαινομένου (διαφορετική ποσότητα βροχής απαιτούμενη για τον πλήρη καθαρισμό), εξετάστηκε η αύξηση της απόδοσης όλων των συστημάτων από κάθε περιοχή, συναρτήσει της ποσότητας βροχής. Ο πίνακας 4.1 παραθέτει τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης. Όπως υποδηλώνεται από τη μεγάλη τυπική απόκλιση και διαφορά τιμών ανάμεσα στην ελάχιστη και τη μέγιστη ποσοστιαία αύξηση της απόδοσης που ακολουθείται ύστερα από τα συμβάντα βροχόπτωσης, δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη ποσότητα βροχής ικανή να καθαρίσει όλα τα συστήματα. Στην πραγματικότητα, τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν περαιτέρω το γεγονός ότι η απόδοση του συστήματος είναι δυνατόν να μειωθεί μετά από μία ασθενή βροχόπτωση, αντίθετα με ότι αναμένεται. Επίσης, εκτιμάται ότι και η ένταση της βροχής είναι πιθανό να επιδρά στον επαρκή καθαρισμό ή μη του συστήματος.

Rainfall Level (mm)	7-day Average Efficiency Increase (%)			
	Avg	Max	Min	Stdev
<i>Southern California</i>				
5-7.5	6	44	-23	18
7.5-10	3	17	-8	6
>10	5	27	-7	7
<i>Northern California</i>				
5-7.5	6	77	-46	38
7.5-10	10	45	-8	12
>10	7	80	-79	36
<i>California Central Valley</i>				
5-7.5	3	41	-47	12
7.5-10	10	34	-24	15
>10	0	40	-61	18
<i>U.S. Desert / SouthWest</i>				
5-7.5	6	56	-8	14

Πίνακας 4.1: Αύξηση της απόδοσης συγκριτικά με τη βροχόπτωση

Για το σκοπό της μελέτης που περιγράφεται, το κατώφλι της ποσότητας βροχής που απαιτείται για να καθαριστεί πλήρως το σύστημα επιλέγεται ως το διάστημα βροχόπτωσης εκείνο που αντιστοιχεί στη μέγιστη μέση ποσοστιαία αύξηση (γκρίζες τιμές στον παραπάνω πίνακα).

Ανάπτυξη Μοντέλου

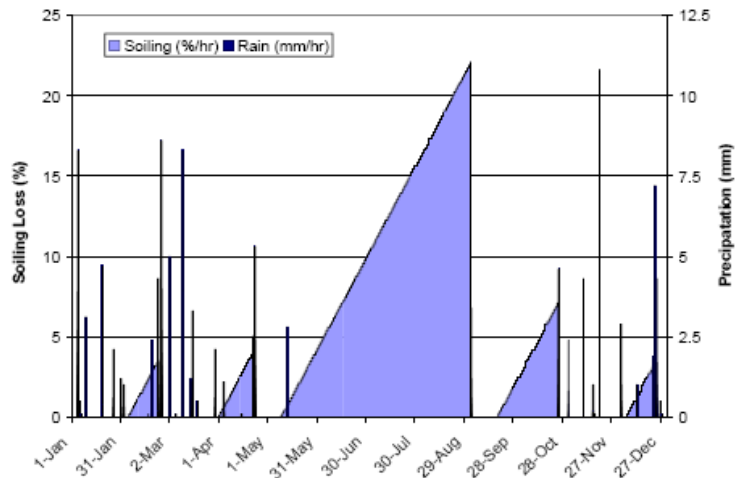
Με βάση τα αποτελέσματα της προηγούμενης μελέτης αναπτύχθηκε ένα εμπειρικό μοντέλο για την εκτίμηση των απωλειών ενέργειας του συστήματος εξαιτίας της ρύπανσης των πλαισίων. Το μοντέλο αυτό προσεγγίζει τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας μειώνοντας τις απώλειες λόγω ρύπανσης στις βροχερές περιόδους και σταδιακά αυξάνοντας τες κατά τη διάρκεια των περιόδων ξηρασίας.

Το μοντέλο περιλαμβάνει τρία θεμελιώδη στοιχεία:

1. Ρυθμός ρύπανσης (Soiling Rate). Εμπειρικός παράγοντας που περιγράφει το ρυθμό μείωσης της απόδοσης εξαιτίας της ρύπανσης των συστοιχιών του συστήματος. Αποτελεί χαρακτηριστικό της εκάστοτε θέσης εγκατάστασης.
2. Κατώφλι καθαρισμού (Cleaning Threshold). Η ποσότητα της βροχής που απαιτείται σε μία ημέρα για τον πλήρη καθαρισμό των συστοιχιών του φβ συστήματος.
3. Διάρκεια Περιόδου Χάριτος (Grace Period length). Ο αριθμός των ημερών κατά τη διάρκεια των οποίων οι συστοιχίες του συστήματος παραμένουν σχετικά καθαρές, μετά το τελευταίο συμβάν βροχόπτωσης που οδηγεί στον πλήρη καθαρισμό των συστοιχιών του φβ συστήματος.

Για την εφαρμογή του μοντέλου αυτού στο ενεργειακό μοντέλο απόδοσης, απαιτείται η εισαγωγή δεδομένων βροχόπτωσης σε συνδυασμό με τα συνήθη δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας. Το πλήρες μοντέλο – συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης της ρύπανσης – υπολογίζει τον “παράγοντα ρύπανσης” (Soiling Factor, SF) ανά ώρα. Το

σχήμα 4.6 δίνει ένα παράδειγμα του ωριαίου παράγοντα SF, που εφαρμόζεται στο μοντέλο για ένα τυπικό έτος στο San Diego, CA.

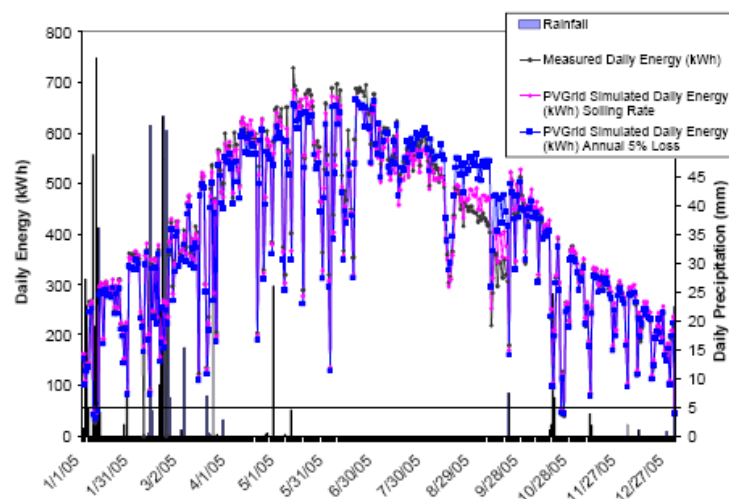


Σχήμα 4.6: Ωριαίες τιμές του παράγοντα ρύπανσης κατά τη διάρκεια ενός έτους

Επικύρωση Μοντέλου

Το μοντέλο που προκύπτει με την εφαρμογή της γραμμικής μεθόδου μείωσης των απωλειών λόγω ρύπανσης συγκρίθηκε με την περίπτωση στην οποία υποτίθεται σταθερός παράγοντας ρύπανσης SF, ίσο με 5% για όλο το έτος. Η απόκλιση που υπολογίζεται στις δύο περιπτώσεις από τις μετρηθείσες τιμές απόδοσης παρέχει μια εκτίμηση για την καταλληλότητα ή μη της χρήσης του νέου μοντέλου.

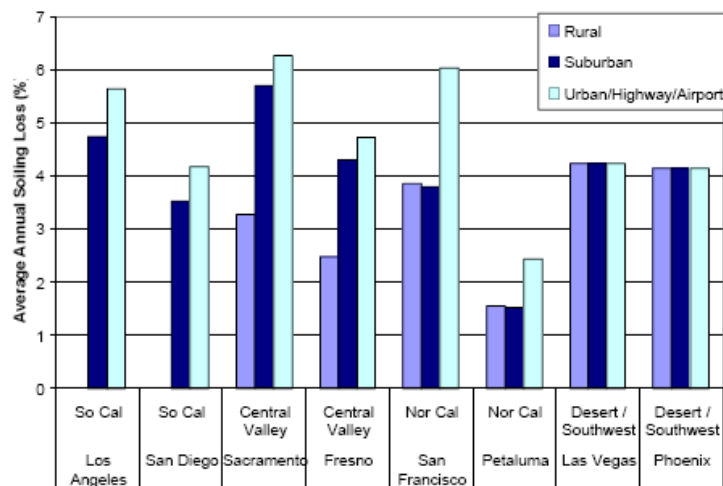
Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τις ημερήσιες μετρηθείσες και προβλεπόμενες τιμές ενέργειας για μια από τις υπό εξέταση τοποθεσίες όπου γίνεται σαφής η υπεροχή του βελτιωμένου μοντέλου.



Σχήμα 4.7: Ημερήσιες τιμές παραγόμενης ενέργειας

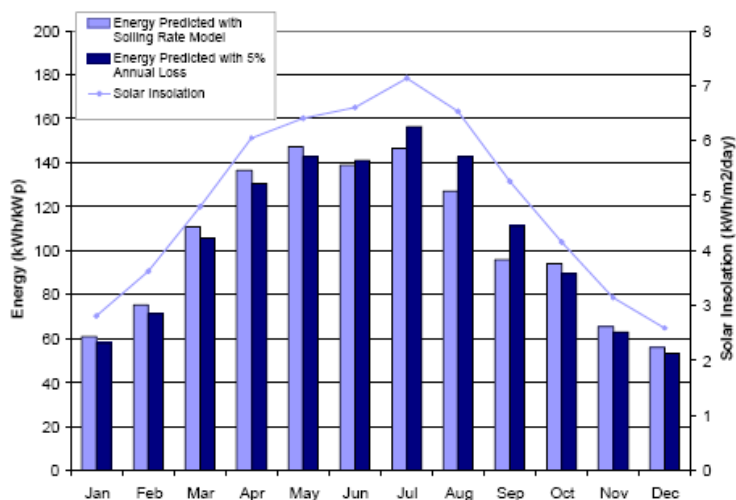
Αποτελέσματα Μοντέλου

Το βελτιωμένο μοντέλο απόδοσης που μόλις αναλύθηκε χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ετήσιας απώλειας στην ενέργεια λόγω ρύπανσης, για ένα τυπικό φβ σύστημα, ίδιο για κάθε συνδυασμό γεωγραφικής περιοχής και τύπου περιβάλλοντος. Το σχήμα 4.8 δείχνει ότι η μέση ετήσια απώλεια ενέργειας που οφείλεται στη ρύπανση κυμαίνεται μεταξύ 1.5% και 6.2%.



Σχήμα 4.8: Μέσες ετήσιες απώλειες λόγω ρύπανσης

Το σχήμα 4.9 παρουσιάζει τις εκτιμήσεις της μηνιαίας ενεργειακής απόδοσης ενός έτους, για ένα τυπικό φβ σύστημα εγκατεστημένο στο Los Angeles, CA, όπως προκύπτουν από τα δύο μοντέλα: το μοντέλο που προκύπτει με την εφαρμογή της γραμμικής μεθόδου μείωσης των απωλειών λόγω ρύπανσης (πλήρες μοντέλο) και αυτό που λαμβάνει ένα σταθερό παράγοντα ρύπανσης SF ίσο με 5% ετησίως.



Σχήμα 4.9: Μηνιαία προβλεπόμενη απόδοση από δύο μοντέλα

Από την ανάλυση που επιχειρείται στην παρούσα ενότητα προκύπτει ένα βελτιωμένο μοντέλο για την πρόβλεψη των απωλειών ενέργειας που συντελούνται στα φβ συστήματα, εξαιτίας της συσσώρευσης ρύπων και λοιπών αντικειμένων στην επιφάνεια των φβ πλαισίων. Το μοντέλο αυτό είναι εμπειρικά προσδιορισμένο και ενσωματώνεται σε ένα μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, το οποίο χειρίζεται ωριαίες

τιμές μετεωρολογικών δεδομένων και βροχόπτωσης για την πρόβλεψη της παραγωγής. Έχει διαπιστωθεί ότι η απόδοση των φβ συστημάτων μειώνεται κατά μέσο όρο 0.2% την ημέρα απουσία βροχής, σε ξηρά κλίματα. Η ημερήσια αυτή μείωση ισοδυναμεί με μια ετήσια ενεργειακή απώλεια της τάξεως του 1.5% – 6.2% ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης.

Τα περισσότερα διαθέσιμα προγράμματα προσομοίωσης ΦΒ συστημάτων υιοθετούν την ύπαρξη ενός σταθερού παράγοντα απωλειών ρύπανσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το πλήρες μοντέλο που περιγράφεται στην ενότητα αυτή αποτελεί βελτίωση της κλασικής υπόθεσης ενός σταθερού παράγοντα και ενσωματώνει τις απώλειες λόγω ρύπανσης που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας. Σε επόμενο κεφάλαιο δίνονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για δεδομένη χρονοσειρά βροχόπτωσης, για ένα φβ σταθμό εγκατεστημένο στην Ελλάδα.

4.2 ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Το φαινόμενο της ρύπανσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι αρκετά σημαντικό ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονα ξηρό κλίμα. Για την εκτίμηση του οικονομικού αντίκτυπου που μπορεί να έχει η ρύπανση και για τον προσδιορισμό του οικονομικά βέλτιστου χρόνου για τον χειροκίνητο καθαρισμό ενός φβ συστήματος, είναι απαραίτητη η κατανόηση της επίδρασης της ρύπανσης – ρυθμός και δριμύτητα – στη μείωση της απόδοσης. Η ενότητα αυτή αποτελεί ουσιαστικά επέκταση της προηγούμενης, στην οποία παρουσιάστηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης των απωλειών ενέργειας εξαιτίας της ρύπανσης στα φβ συστήματα.

4.2.1 Παρουσίαση προβλήματος

Η ρύπανση των φβ συστημάτων αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες απωλειών υπό τον έλεγχο του διαχειριστή του συστήματος. Εντούτοις, ο καθαρισμός των φβ συστοιχιών, ιδιαίτερα συστημάτων μεγάλης κλίμακας -διασυνδεδεμένων ή μη-, μπορεί να στοιχίσει ένα σημαντικό χρηματικό ποσό σε εργατικό δυναμικό και πρώτες ύλες. Συνεπώς, είναι σημαντικός ο χαρακτηρισμός και η πρόβλεψη του ρυθμού και της δριμύτητας της ρύπανσης για την εξεύρεση μιας οικονομικά βέλτιστης λύσης αναφορικά με τη συχνότητα καθαρισμού.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το 2006 διεξήχθη μια λεπτομερής έρευνα σχετικά με τη μείωση της απόδοσης των φβ συστημάτων εξαιτίας της ρύπανσης, για περισσότερα από 250 μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα (συμπεριλαμβανομένων επίπεδων, κεκλιμένων και συστημάτων με διατάξεις ανίχνευσης) σε διάφορες περιοχές των ΗΠΑ με ξηρό κλίμα. Πιο συγκεκριμένα, αποτιμάται η απόδοση των συστημάτων κατά τη διάρκεια του έτους 2005 σε σχέση με μετρηθείσες τιμές βροχόπτωσης στις αντίστοιχες θέσεις εγκατάστασης. Ο ρυθμός ρύπανσης, ή ισοδύναμα ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η ισχύς εξόδου του συστήματος σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς (STC) ανά ημέρα, εξαιτίας της συσσώρευσης ρύπων στις συστοιχίες, θεωρείται προσεγγιστικά γραμμικός συναρτήσει του χρόνου, στις εκάστοτε περιόδους ξηρασίας. Τα συστήματα υπό εξέταση κατατάσσονται σε ομάδες βάσει της γεωγραφικής περιοχής και του τύπου περιβάλλοντος, προκειμένου να μελετηθούν οι διαφοροποιήσεις στους ρυθμούς

ρύπανσης μεταξύ των τοποθεσιών. Μέσοι ρυθμοί ρύπανσης προσδιορίζονται για κάθε συνδυασμό γεωγραφικής περιοχής – τύπου περιβάλλοντος και χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης των ετήσιων απωλειών ενέργειας λόγω ρύπανσης των φβ συστημάτων.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης και το μοντέλο πρόβλεψης υποδηλώνουν ότι η μέση μείωση της απόδοσης, εξαιτίας της ρύπανσης σε ξηρά κλίματα, συντελείται σε βαθμό 0.002 kWh/kWp/ημέρα απουσία βροχής. Κάτι τέτοιο, ισοδυναμεί με ετήσια ενεργειακή απώλεια της τάξης του 2-6% περίπου, ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή και τον τύπο περιβάλλοντος (σχήμα 4.9). Το μοντέλο πρόβλεψης επικυρώνεται μέσω μετρηθέντων τιμών απόδοσης του συστήματος για το έτος 2005 και, όπως προκύπτει, επιτυγχάνεται βελτίωση της ακρίβειας της τάξης του 3.5% ανάλογα με την περιοχή και τον τύπο περιβάλλοντος (συγκριτικά με μια παραδοσιακή προσέγγιση που θεωρεί σταθερές απώλειες λόγω ρύπανσης κατά τη διάρκεια του έτους ίσες με 5%). Κατά μέσο όρο, η ακρίβεια του μοντέλου, ή ισοδύναμα ο βαθμός στον οποίο η προβλεπόμενη απόδοση προσεγγίζει την πραγματική-μετρηθείσα βελτιώνεται κατά 1.5%.

Για την περαιτέρω επικύρωση του μοντέλου, διεξήχθη εξειδικευμένη έρευνα των απωλειών λόγω ρύπανσης σε μια κατάλληλη τοποθεσία στην περιοχή του Los Angeles της νότιας California [12]. Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η συγκεκριμένη έρευνα και τα αποτελέσματά της.

4.2.2 Σχεδιασμός και Αποτελέσματα Έρευνας

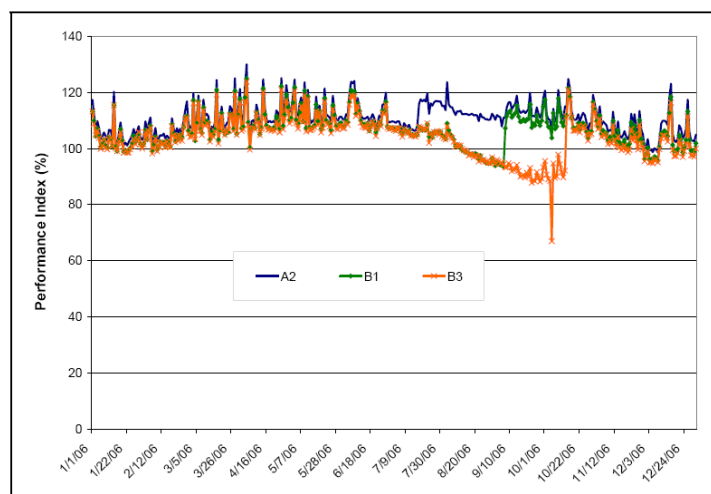
Διαδικασία Έρευνας

Επιδίωξη της εν λόγω έρευνας αποτελεί ο υπολογισμός της διαφοράς στην ετήσια ενέργεια που παράγεται από τρία πανομοιότυπα συστήματα, κάτω από διαφορετικές συχνότητες καθαρισμού. Όπως σημειώνεται στην προηγούμενη ενότητα, η απόδοση των φβ συστημάτων διατηρείται σχετικά σταθερή κατά τη διάρκεια βροχερών περιόδων σε περιοχές με ξηρό κλίμα, υποδηλώνοντας ότι στο διάστημα αυτό οι απώλειες λόγω ρύπανσης παραμένουν σε μια ελάχιστη τιμή (στη συγκεκριμένη μελέτη, οι απώλειες αυτές θεωρούνται αμελητέες). Αναφέρεται επίσης μια σύντομη “περίοδος χάριτος” κατά τη διάρκεια της οποίας ο ρυθμός ρύπανσης είναι αμελητέος αμέσως μετά την τελευταία βροχόπτωση. Η περιγραφείσα μελέτη κάνει χρήση των παρατηρήσεων αυτών προκειμένου να καταρτίσει ένα πρόγραμμα καθαρισμού για καθένα από τα τρία συστήματα (το σύστημα A2 καθαρίζεται δύο φορές, το B1 μία και το B3 καμία κατά τη διάρκεια των άνυδρων θερινών μηνών).

Αποτελέσματα Έρευνας

Στα πλαίσια της έρευνας αυτής, ως βάση αναφοράς θεωρείται το σύστημα A2, το οποίο καθαρίζεται δύο φορές. Οι απώλειες ενέργειας εξαιτίας της ρύπανσης για το συγκεκριμένο σύστημα δεν μπορούν να προσδιοριστούν σαφώς, αλλά για τους σκοπούς της μελέτης θεωρούνται πολύ μικρές. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή του ημερήσιου δείκτη απόδοσης του συστήματος για τα τρία υπό εξέταση συστήματα, όπου ο δείκτης απόδοσης υπολογίζεται από το λόγο της μετρηθείσας ac-ενέργειας που παρέχει το σύστημα προς την αναμενόμενη ενέργεια για το σύστημα αυτό (οι υπολογισμοί της αναμενόμενης ενέργειας λαμβάνουν υπόψη μετρηθείσες

τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας αλλά όχι την επίδραση της ρύπανσης). Η αποτελεσματικότητα των καθαρισμών των συστοιχιών είναι προφανής από το παρακάτω διάγραμμα, καθώς ο δείκτης απόδοσης για το σύστημα A2 παραμένει σχετικά σταθερός.



Σχήμα 4.10: Μεταβολή του ημερήσιου δείκτη απόδοσης συστήματος

Στον πίνακα 4.2 συνοψίζονται οι τιμές της μετρηθείσας ενέργειας καθενός από τα τρία συστήματα και συγκρίνονται με αυτή που παράγεται από το σύστημα A2 (δύο καθαρισμοί). Τα συστήματα B1 και B3 παράγουν 3.3% και 5.1% λιγότερη ενέργεια από το A2, αντίστοιχα. Με την υπόθεση ότι οι απώλειες ενέργειας λόγω ρύπανσης για το σύστημα A2 είναι ασήμαντες, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ετήσια απώλεια ενέργειας που οφείλεται σε ρύπανση των πλαισίων είναι 5.1% στη συγκεκριμένη τοποθεσία για το έτος 2006.

System	Number of Cleanings in 2006	Measured 2006 Energy (kWh)	Estimated Energy Lost to Soiling (kWh)	Estimated Annual Soiling Loss (%)
A2	2	157,405	0	0.0%
B1	1	152,188	5,217	3.3%
B3	0	149,451	7,954	5.1%

Πίνακας 4.2: Μετρηθείσες τιμές ενέργειας και απώλειες λόγω ρύπανσης

Με βάση τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας, προκύπτει ότι η ρύπανση είναι δυνατόν διαφοροποιείται ακόμη και στην ίδια τοποθεσία, από χρόνο σε χρόνο. Ως εκ τούτου, για την πληρέστερη ποσοτικοποίηση των παραπάνω επιδράσεων, απαιτείται εξέταση των συστημάτων για εκτενέστερες χρονικές περιόδους.

4.2.3 Οικονομική Αξιολόγηση

Ο πίνακας 4.3 συνοψίζει μια απλή οικονομική ανάλυση της έρευνας που περιγράφεται παραπάνω (όλες οι τιμές εκφράζονται σε δολάρια Αμερικής). Το κόστος για τον καθαρισμό ενός τέτοιου συστήματος 100 kWp ανέρχεται σε 800\$ περίπου ανά καθαρισμό. Όπως φαίνεται και στον πίνακα, το σύστημα A2, το οποίο καθαρίστηκε δύο φορές, αποδίδει σχεδόν 8000 kWh περισσότερες από το B3 που δεν υπόκειται σε κανένα καθαρισμό. Αντίστοιχα, το σύστημα B1, που καθαρίστηκε μία φορά, αποδίδει περίπου 2700 kWh περισσότερες από το B3. Με βάση το συγκεκριμένο κόστος καθαρισμού και ενεργειακό κέρδος, συμπεραίνεται ότι δεν είναι

οικονομικά συμφέρων ο καθαρισμός των φβ συστημάτων σε αυτή την περιοχή, όταν το κόστος αυτό είναι μεγαλύτερο από το κέρδος που προκύπτει από την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται. Ωστόσο, για φβ συστήματα που υπάγονται σε επιδοτούμενα προγράμματα για την εγκατάσταση νέων φβ σταθμών στη California, πραγματοποιώντας δύο καθαρισμούς κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου ξηρασίας, προκύπτει από την εν λόγω έρευνα κέρδος 1500\$ ανά 100 kWp, εγκατεστημένων στο Los Angeles, CA. Τέλος, στην προσοδοφόρα σε πολλές περιπτώσεις ευρωπαϊκή αγορά, ο καθαρισμός των φβ συστημάτων είναι περισσότερο επικερδής. Πιο συγκεκριμένα, το κέρδος σε ένα σύστημα στο οποίο διενεργούνται δύο καθαρισμοί ανέρχεται σε 3000\$ ανά 100 kWp (στο Los Angeles ή σε άλλη τοποθεσία με παρόμοια ηλιακή απολαβή).

			Economic Benefit/(Cost) of Cleaning Regimen		
Number of Cleanings in 2006	Cost to Clean (USD)	Additional Energy Generated Due to Cleaning (kWh)	At Typical Avoided Energy Cost in CA (\$0.13/kWh)	At California Solar Initiative Incentive Rate (\$0.39/kWh)	At Spanish Feed-In Tariff (~\$0.59/kWh)
2	\$ 1,600	7,954	(565.92)	\$ 1,502	\$ 3,093
1	\$ 800	2,738	(444.09)	\$ 268	\$ 815
0	\$ -	0	-	\$ -	\$ -

Πίνακας 4.3: Σύνοψη οικονομικής ανάλυσης

4.2.4 Επίλογος-Συμπέρασμα

Κύριος σκοπός της έρευνας που περιγράφηκε παραπάνω είναι η επικύρωση του μοντέλου εκτίμησης των απωλειών εξαιτίας της ρύπανσης, το οποίο αναπτύχθηκε σε προηγούμενη μελέτη (Mitchell et al). Όπως προκύπτει από το σχήμα 4.8, η προβλεπόμενη ετήσια, από το μοντέλο αυτό, απώλεια ενέργειας λόγω ρύπανσης -για ένα φβ σύστημα εγκατεστημένο στο Los Angeles- για ένα τυπικό έτος, κυμαίνεται μεταξύ 4.8 – 5.5%. Η μετρηθείσα τιμή απώλειας στην υπό εξέταση περιοχή του Los Angeles το 2006 είναι 5.1%, σε πλήρη συμφωνία με τις προβλέψεις του μοντέλου.

Καθώς η μείωση της απόδοσης των φβ συστημάτων που οφείλεται στη ρύπανση μπορεί να είναι σημαντική σε σύγκριση με άλλους παράγοντες μείωσης, είναι καίρια η μελέτη και η ακριβής μοντελοποίηση του συγκεκριμένου φαινομένου, προκειμένου να επιτευχθεί μια κατά το δυνατόν ορθότερη εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης. Η έρευνα που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη ενότητα, εκτιμά ότι οι ετήσιες απώλειες του συστήματος εξαιτίας της ρύπανσης είναι περίπου 5%, αποτέλεσμα που συμφωνεί πλήρως με το μοντέλο που αναπτύσσεται στην προηγούμενη ενότητα. Το κόστος καθαρισμού, όπως και η τιμή της kWh, διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία και τον τύπο περιβάλλοντος. Στα πλαίσια της έρευνας που μόλις περιγράφηκε, ο καθαρισμός των συστημάτων γίνεται οικονομικά συμφέρων για τιμές ενέργειας περίπου 0.25\$/kWh και άνω, σε μια τυπική περιοχή της νότιας California. Καθώς οι απώλειες λόγω ρύπανσης ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με την περιοχή και τον τύπο περιβάλλοντος, θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία των φβ συστημάτων, ιδιαίτερα δε όταν ξεπερνούν κάποιο όριο και είναι πλέον οικονομικά συμφέρουσα η επιλογή του καθαρισμού. Σε επόμενο κεφάλαιο δίνονται τα αποτελέσματα από μια στοιχειώδη οικονομική ανάλυση που πραγματοποιείται για δεδομένη χρονοσειρά βροχόπτωσης, για ένα τυπικό φβ σταθμό μεγέθους 1MW εγκατεστημένο στην Ελλάδα.

Κεφάλαιο 5

Επίδραση Σκίασης

Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τη μελέτη του φαινομένου της σκίασης. Αρχικά παρατίθεται μια γεωμετρική ανάλυση της σκίασης και στη συνέχεια εξηγείται σε θεωρητικό επίπεδο η επίδρασή της στη λειτουργία των φβ πλαισίων. Τέλος, μελετάται η ηλεκτρική απόκριση των φβ συστοιχιών υπό συνθήκες μερικής σκίασης μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων με το λογισμικό PSpice.

5.1 ΣΚΙΑΣΗ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ ΔΙΑΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΣΕ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ

Σε μεγάλης κλίμακας φβ συστήματα όπως και σε άλλες περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης, οι διατεταγμένοι σε σειρές φβ συλλέκτες είναι πιθανό να υπόκεινται σε σκιάσεις από γειτονικές τους σειρές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η συγκεκριμένη κατάσταση δημιουργεί την ανάγκη για μια βέλτιστη λύση στο ζήτημα της διάταξης των συλλεκτών σε μια δοσμένη έκταση, λαμβάνοντας υπόψη κυρίως ότι το ποσοστό της σκίασης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σειρών.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται αρχικά η γεωμετρική ανάλυση της σκίασης που προκαλείται από κατακορυφους και κεκλιμένους στύλους και κατ' επέκταση συλλέκτες και κατόπιν διερευνώνται οι μεταβολές της σκίασης στην επιφάνεια ενός φβ συλλέκτη με στόχο την αποτίμηση της παραγόμενης από τα πλαίσια ηλεκτρικής ενέργειας.

5.1.1 Γεωμετρία Σκίασης

Ο ρυθμός σχεδίασης μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι διαρκώς αυξανόμενος και η σκίαση των συστοιχιών από παρακείμενές τους μπορεί να είναι αναπόφευκτη σε τέτοιου είδους συστήματα. Το ζήτημα της περιορισμένης έκτασης για την εγκατάσταση φβ συστοιχιών γίνεται έντονο, σε περιπτώσεις όπως για παράδειγμα στις στέγες των κτιρίων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όπου η μεγιστοποίηση ή ένα συγκεκριμένο ποσό λαμβανόμενης ενέργειας είναι επιθυμητό, οι συλλέκτες που διατάσσονται σε σειρές σκιάζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η απλοϊκή λύση ενός μόνο συλλέκτη κεκλιμένου υπό βέλτιστη κλίση δεν είναι πάντα εφαρμόσιμη εξαιτίας αρκετών τεχνικών ή πρακτικών λόγων, είτε άλλοτε, υφίσταται περιορισμός στο μέγιστο επιτρεπόμενο ύψος του συλλέκτη. Κατά συνέπεια, οι συλλέκτες διατάσσονται σε σειρές με κάποια απόσταση μεταξύ τους, κυρίως για λόγους συντήρησης. Με αυτή τη διάταξη, οι συλλέκτες της μίας σειράς είναι δυνατόν να προκαλέσουν σκίαση σε αυτούς της επόμενης, κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα τη μείωση της ηλιακής ενέργειας που λαμβάνεται (ενεργειακής ή ηλιακής απολαβής). Η εκδήλωση του φαινομένου της σκίασης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σειρών συλλεκτών, το ύψος τους, το μήκος της σειράς, τη γωνία κλίσης και το γεωγραφικό πλάτος. Η ύπαρξη πολλών σειρών, από τη μία, αυξάνει τη συνολική επιφάνεια των συλλεκτών (μικρή απόσταση μεταξύ των σειρών), από την άλλη όμως, εντείνει το φαινόμενο της σκίασης. Υπάρχει, επομένως, μια βέλτιστη λύση στη διάρθρωση των συλλεκτών σε μια δοσμένη έκταση, από τη σκοπιά της ηλιακής απολαβής καθώς και του οικονομικού ζητήματος.

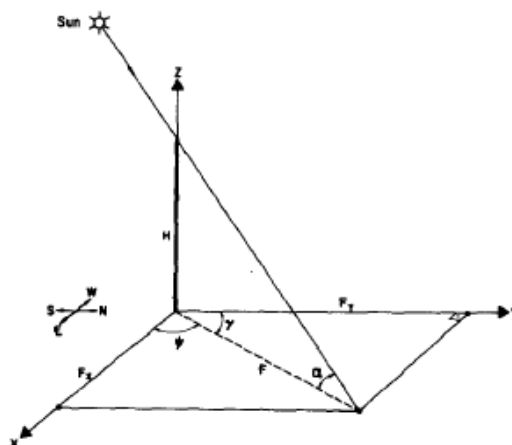
Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά ο υπολογισμός της γεωμετρίας σκιάς που προκαλούν κατακόρυφοι και επικλινείς στύλοι, και κατ' επέκταση συλλέκτες. Συγκεκριμένα, δίνονται οι αναλυτικές εκφράσεις των συνιστωσών της σκιάς (για συλλέκτη προσανατολισμένο στο νότο), του ύψους της και του εμβαδού της. Τα σχήματα που παρατίθενται, απεικονίζουν το φαινόμενο της σκίασης για διαφορετικούς μήνες του έτους.

Σκίαση από Κατακόρυφο Στόλο

Το σχήμα 5.1 απεικονίζει τις συνιστώσες της σκιάς που προκαλεί ένας στόλος, ύψους H , τοποθετημένος στην αρχή των αξόνων. Ο ήλιος βρίσκεται σε γωνία ανύψωσης α (την ωριαία ηλιακή γωνία ω) με αζιμούθια γωνία γ . Οι εξισώσεις υπολογισμού των συνιστωσών αυτών συναρτήσει του χρόνου (ωριαία γωνία ω που σχετίζεται με την ώρα στη διάρκεια της ημέρας και ηλιακή απόκλιση δ με την ημέρα του έτους) και της τοποθεσίας (γεωγραφικό πλάτος ϕ) προκύπτουν έπειτα από κάποιους χειρισμούς [13]

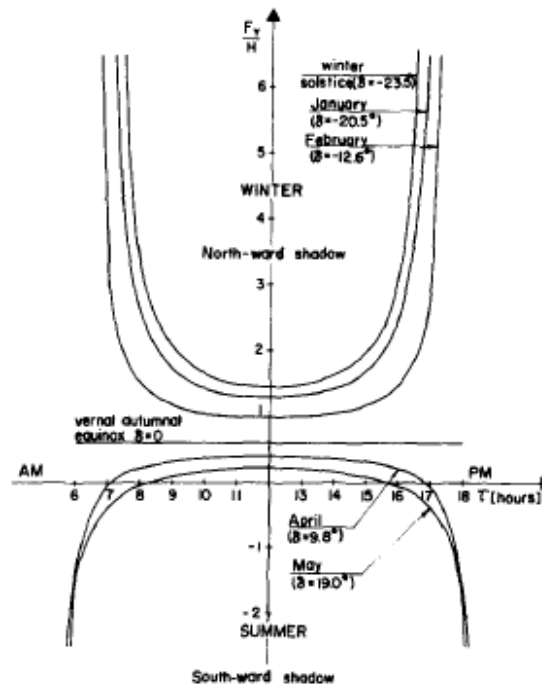
$$F_x = H \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega} \quad (5.1)$$

$$F_y = H \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega} \quad (5.2)$$



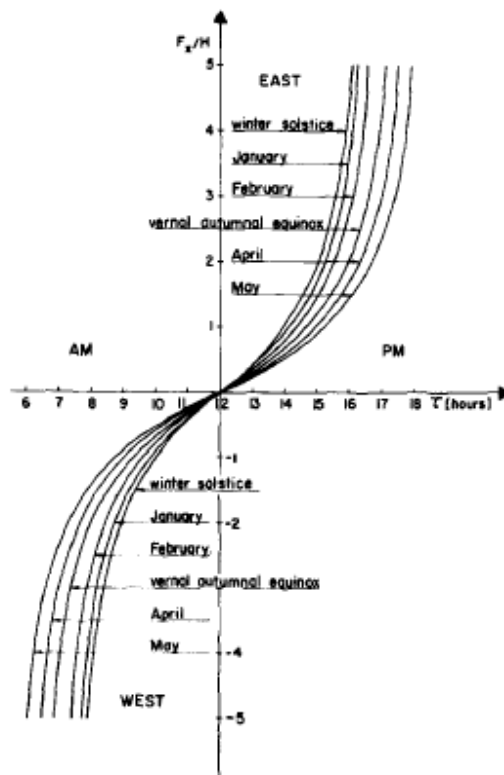
Σχήμα 5.1: Συνιστώσες σκιάς κατακόρυφου στόλου

Τα σχήματα 5.2 και 5.3 απεικονίζουν τις συνιστώσες της σκιάς F_y/H και F_x/H , αντίστοιχα για την περίπτωση ενός στόλου τοποθετημένου στην αρχή των αξόνων, O , και για ορισμένους τυπικούς μήνες. Ειδικότερα, οι συνιστώσες της σκιάς έχουν υπολογιστεί για τις μέσες ημέρες των χειμερινών μηνών Ιανουάριο ($\delta = -20,5^\circ$), Φεβρουάριο ($\delta = -12,6^\circ$) και για το χειμερινό ηλιοστάσιο, καθώς και για τις μέσες ημέρες των θερινών μηνών Απρίλιο ($\delta = +9,8^\circ$), Μάιο ($\delta = +19,0^\circ$) και για την εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία ($\delta = 0^\circ$).



Σχήμα 5.2: Συνιστώσες σκιάς κατακόρυφου στύλου κατά τον άξονα Βορρά-Νότου συναρτήσεως της ώρας

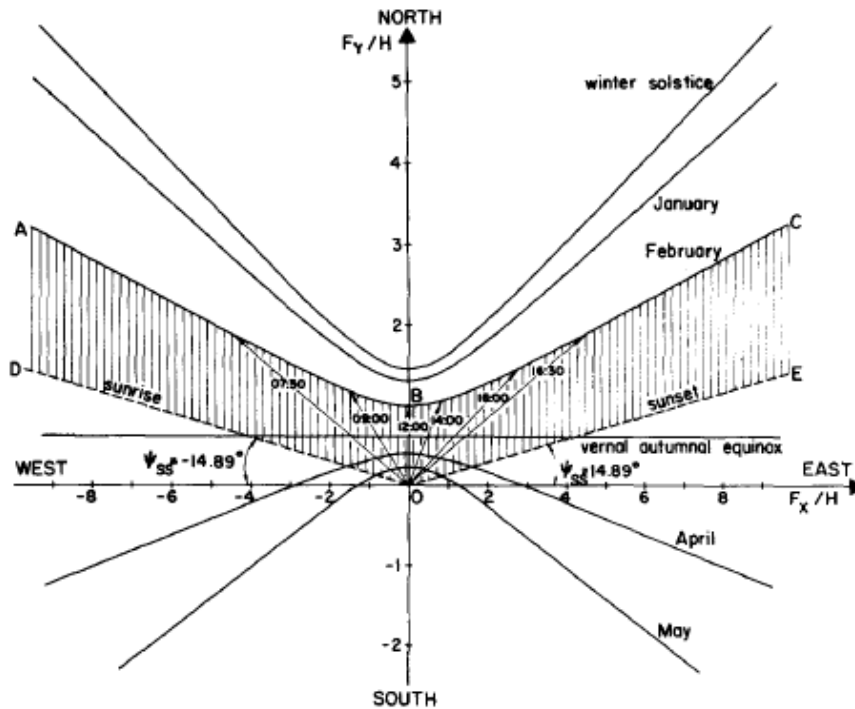
Όπως φαίνεται από το σχήμα 5.1, κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι συνιστώσες Β-Ν της σκιάς έχουν μεγάλο μήκος και κείνται στη βόρεια κατεύθυνση. Το μεσημέρι, η συνιστώσα έχει μικρό μήκος, το οποίο αυξάνει και τείνει στο άπειρο τις ώρες ανατολής και δύσης του ηλίου. Το μεγαλύτερο μήκος σκιάς συναντάται στο χειμερινό ηλιοστάσιο και η ελάχιστη τιμή του, το μεσημέρι, είναι $F_y/H = 1.45$. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ($\delta > 0^\circ$), οι συνιστώσες έχουν μικρό μήκος και τις περισσότερες ώρες της ημέρας βρίσκονται στη βόρεια κατεύθυνση. Τα χρονικά διαστήματα πλησίον της ανατολής και δύσης του ηλίου, στα οποία $90^\circ < \gamma < -90^\circ$ ή $|\gamma| > 90^\circ$, οι σκιές κείνται στη νότια κατεύθυνση. Τον Απρίλιο, για $\tau = 07:06$ και $\tau = 16:54$, όπου $|\gamma| = 90^\circ$, οι συνιστώσες βρίσκονται ακριβώς στη δύση και ανατολή, αντίστοιχα. Μια ιδιαίτερη περίπτωση παρατηρείται στην εαρινή και φθινοπωρινή ισημερία ($\delta = 0^\circ$). Η συνιστώσα Β-Ν της σκιάς παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και ίση με $F_y/H = 0.62$. Το καλοκαίρι, οι συνιστώσες της σκιάς προς νότο, είναι μικρής σημασίας καθώς η ηλιακή ακτινοβολία στα αντίστοιχα διαστήματα είναι χαμηλή και οι συλλέκτες είναι στραμμένοι προς το νότο. Το σχήμα 5.3 παρουσιάζει τις συνιστώσες Α-Δ της σκιάς για τους ίδιους, με το σχήμα 5.2, μήνες.



Σχήμα 5.3: Συνιστώσες σκιάς κατακόρυφου στύλου κατά τον άξονα Ανατολής-Δύσης συναρτήσει της ώρας

Το σχήμα 5.4 περιγράφει τη σχέση μεταξύ των συνιστωσών της σκιάς $F_y = f(F_x)$ για τους ίδιους μήνες που εξετάστηκαν και παραπάνω, για ένα στύλο τοποθετημένο στην αρχή των αξόνων. Το σχήμα αυτό περιλαμβάνει το μήκος της σκιάς και την κατεύθυνση της, μεγέθη που αναπαριστώνται από τις ακτίνες (με κέντρο την αρχή των αξόνων O), για διαφορετικές χρονικές στιγμές στη διάρκεια της ημέρας, πχ. 7:30 κλπ, για το μήνα Φεβρουάριο. Το επίπεδο $F_y - F_x$ διαιρείται σε δύο περιοχές, τη γραμμοσκιασμένη $ABCDOE$ και το υπόλοιπο επίπεδο. Παρόμοιες περιοχές παρατηρούνται για όλους τους άλλους μήνες. *Οποιοσδήποτε άλλος στύλος βρεθεί στην περιοχή $ABCDOE$ θα σκιαστεί μία φορά στη διάρκεια της ημέρας.*

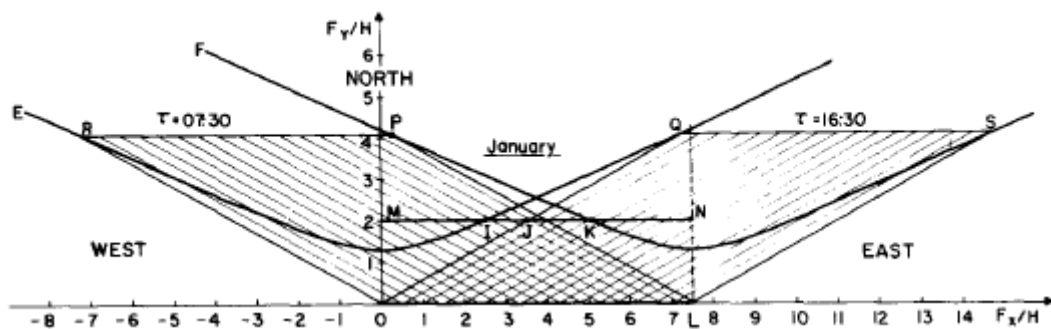
Τις ημέρες της εαρινής και φθινοπωρινής ισημερίας, ο ήλιος ανατέλλει ακριβώς στην ανατολή ($\gamma = -90^\circ$). Το χειμώνα ($\delta < 0^\circ$), ο ήλιος ανατέλλει νοτιοανατολικά, όπου $|\gamma| < 90^\circ$, και επομένως η σκιά έχει κατεύθυνση βορειοδυτική. Το καλοκαίρι ($\delta > 0^\circ$), ο ήλιος ανατέλλει βορειοανατολικά, όπου $|\gamma| > 90^\circ$, και η σκιά έχει κατεύθυνση νοτιοδυτική.



Σχήμα 5.4: Μεταβολές της σκιάσης κατακόρυφου στύλου

Σκίαση από Κατακόρυφο Συλλέκτη

Ένα επίπεδο (επιφάνεια συλλέκτη) μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τη σύνθεση άπειρου αριθμού στύλων. Ένας συλλέκτης μήκους $OL = L/H = 7.5$ και η σκίαση που προκαλεί φαίνονται στο σχήμα 5.5. Οι δύο καμπύλες E και F (έντονες γραμμές) αντιστοιχούν στις σκιάσεις που προκαλούν τα άκρα του συλλέκτη, O και L αντίστοιχα, για το μήνα Ιανουάριο. Οι επιμέρους σκιές του συλλέκτη τις χρονικές στιγμές $\tau = 07:30$ (αριστερά) και $\tau = 16:30$ (δεξιά) δίνονται από τις αντίστοιχες γραμμοσκιασμένες περιοχές. Στις 7:30, το άκρο O προκαλεί τη σκιά OR, και το άκρο L την LP. Συνεπώς, ολόκληρος ο συλλέκτης μήκους OL προκαλεί τη σκιά εμβαδού ORPL. Παρομοίως, στις 16:30, ο συλλέκτης προκαλεί τη σκιά εμβαδού OQSL, προς την ανατολική πλευρά.



Σχήμα 5.5: Σκίαση κατακόρυφου συλλέκτη κατά το μήνα Ιανουάριο

Με την τοποθέτηση ενός δεύτερου συλλέκτη MN του ίδιου μήκους και ύψους με τον OL, σε απόσταση $D/H = 2.0$, το τμήμα JN αυτού θα είναι σκιασμένο στις 16:30. Το μεγαλύτερο σκιασμένο τμήμα που παρατηρείται το απόγευμα είναι το $IN = 5.0$ στις 15:30, και συμμετρικά, πριν το μεσημέρι το $MK = 5.0$ στις 08:30. Ο συλλέκτης MN

είναι ασκίαστος το χρονικό διάστημα 08:30 με 15:30, αφού η συνιστώσα της σκιάς F_y / H είναι μικρότερη από την απόσταση $D/H = 2$ στο διάστημα αυτό.

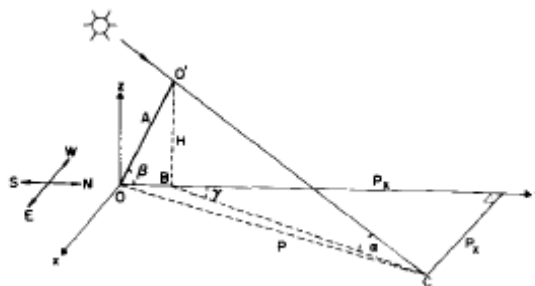
Σκίαση από Κεκλιμένο Στύλο

Ένας στύλος μήκους A , στο επίπεδο ZY , με κλίση στο βορρά υπό γωνία β , αναπαριστάται στο σχήμα 5.6. Το μήκος της σκιάς που προκαλεί ισούται με $P = OC$ και οι επιμέρους συνιστώσες είναι

$$P_x = A \sin \beta \frac{\sin \gamma}{\tan a} = F_x \quad (5.3)$$

$$P_y = A \left(\cos \beta + \frac{\cos \gamma}{\tan a} \sin \beta \right) = A \cos \beta + F_y \quad (5.4)$$

όπου F_x και F_y δίνονται από τις εξισώσεις (5.1) και (5.2) αντίστοιχα, και $H = A \sin \beta$. Το άκρο C της σκιάς, που προκαλείται από τον επικλινή στύλο OO' στην αρχή των αξόνων, είναι ίδιο ακριβώς με το άκρο της σκιάς ενός κατακόρυφου στύλου $O'B$, ύψους $H = A \sin \beta$, μετατοπισμένου κατά $A \cos \beta$. Κατά συνέπεια, τα σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4 εφαρμόζονται εξίσου κατάλληλα στην περίπτωση κεκλιμένου στύλου με πραγματικό ύψος, $A \sin \beta$, ενώ η αρχή των αξόνων είναι μετατοπισμένη προς την κατεύθυνση $-y$ κατά $A \cos \beta$.

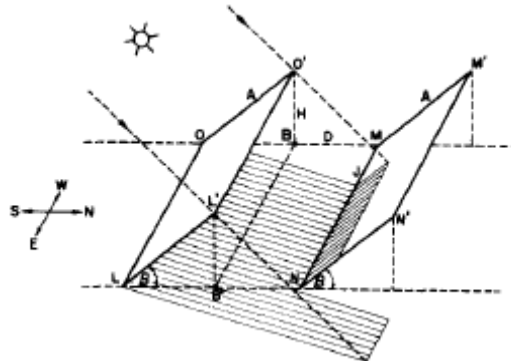


Σχήμα 5.6: Συνιστώσες σκιάς κεκλιμένου στύλου

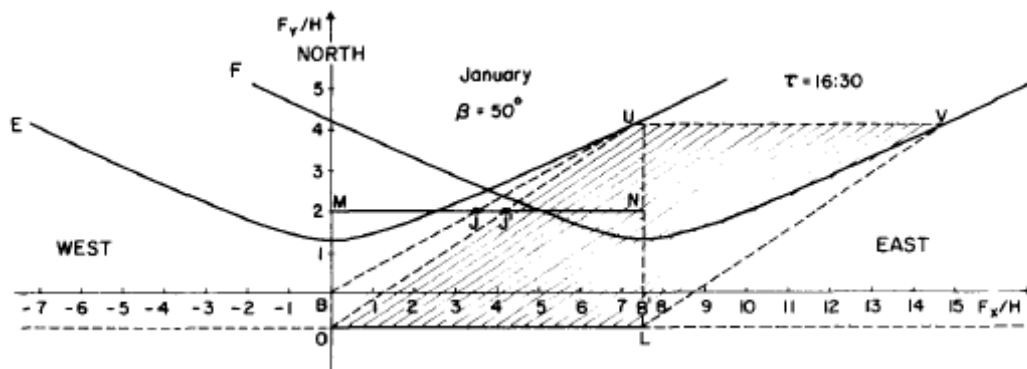
Σκίαση από Κεκλιμένο Συλλέκτη

Το σχήμα 5.7 περιγράφει τη θέση δύο κεκλιμένων συλλεκτών ($OLO'L'$ και $MNM'N'$) και το σχήμα της σκιάς που προκαλεί ο πρώτος στο δεύτερο. Το σχήμα 5.8 παρουσιάζει τη σκίαση (γραμμοσκιασμένη περιοχή) που προκαλείται από τον κεκλιμένο συλλέκτη του προηγούμενου σχήματος, κλίσης $\beta = 50^\circ$ για το μήνα Ιανουάριο τη χρονική στιγμή $\tau = 16:30$. Οι δύο καμπύλες E και F αντιστοιχούν στις σκιάσεις που προκαλούν τα άκρα του συλλέκτη, OO' και LL' αντίστοιχα, στη διάρκεια της ημέρας. Οι καμπύλες αυτές είναι πανομοιότυπες με αυτές του σχήματος 5.5 για έναν κατακόρυφο συλλέκτη $B'BO'L'$ (σχήμα 5.7), ύψους $O'B = H$ και βάσης BB' . Καθώς η βάση του κεκλιμένου συλλέκτη είναι OL και απέχει απόσταση $A \cos \beta$ από τη βάση BB' του κατακόρυφου, η σκιά που προκαλεί το άκρο OO' του συλλέκτη δίνεται από την OU και όχι από την BU που αντιστοιχεί σε κατακόρυφο συλλέκτη στη θέση B . Η απόσταση OB ισούται με $\cot \beta = 0.84$. Τοποθετώντας το συλλέκτη $MNM'N'$ σε απόσταση $BM/H = D/H = 2.0$, η σκιά σε αυτόν δίνεται από το ευθύγραμμο τμήμα NJ' το οποίο είναι μικρότερο από το NJ που θα προκαλούσε ένας

κατακόρυφος συλλέκτης του ίδιου ύψους ($NJ' < NJ$). Συμπερασματικά, ένας κεκλιμένος συλλέκτης προκαλεί λιγότερη σκίαση σε σχέση με έναν κατακόρυφο με αντίστοιχο ύψος. Τέλος, είναι προφανές, ότι μέρος των σκιάσεων κείται κάτωθεν του συλλέκτη.



Σχήμα 5.7: Σχετική θέση δύο κεκλιμένων συλλεκτών



Σχήμα 5.8: Σκίαση κεκλιμένου συλλέκτη

Υψος και Εμβαδό Σκίασης

Ο υπολογισμός των σχετικών μεγεθών της σκίασης που προκαλείται από έναν κεκλιμένο συλλέκτη σε κάποιον άλλο γειτονικά παρακείμενο δίνεται συνοπτικά ακολούθως.

Το σχετικό ύψος σκιάς $h_s = \frac{H_s}{A}$ (σε μονάδες ύψους του συλλέκτη, A) στην κατεύθυνση MM' (σχήμα 5.7), ως συνάρτηση του χρόνου ισούται με

$$h_s = 1 - \frac{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta}{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta} \times (d \sin \beta + \cos \beta) \quad (5.5\alpha)$$

ενώ συναρτήσει των γωνιών α και γ του ηλίου:

$$h_s = 1 - \frac{d \sin \beta + \cos \beta}{\cos \beta + \left[\frac{\sin \beta \cos \gamma}{\tan \alpha} \right]} \quad (5.5\beta)$$

με $a \geq 0$, $|\gamma| \leq 90^\circ$ ενώ και στις δύο περιπτώσεις ισχύει $0 \leq h_s \leq 1$

Το σχετικό μήκος σκιάς $l_s = \frac{L_s}{L}$ (σε μονάδες μήκους του συλλέκτη, L) δίνεται από τη σχέση:

$$l_s = 1 - \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta} \times \left(\frac{d \sin \beta + \cos \beta}{l} \right) \quad (5.6a)$$

ή ισοδύναμα, συναρτήσει των γωνιών α και γ ,

$$l_s = \frac{L_s}{L} = 1 - \frac{d \sin \beta + \cos \beta}{\lambda} \times \frac{|\sin \gamma|}{\cos \beta \tan \alpha + \sin \beta \cos \gamma} \quad (5.6b)$$

με $\alpha \geq 0$, $|\gamma| \leq 90^\circ$ ενώ και στις δύο περιπτώσεις ισχύει $0 \leq l_s \leq 1$

Τα σχετικά (κανονικοποιημένα) μεγέθη της απόστασης d και του μήκους σειράς l ορίζονται ως εξής:

$$d = \frac{D}{H}, \quad l = \frac{L}{H} \quad (5.7)$$

Τέλος, το σχετικό εμβαδό, ξ , της σκιασμένης επιφάνειας ισούται με το γινόμενο του σχετικού ύψους με του σχετικού μήκους της σκιάς.

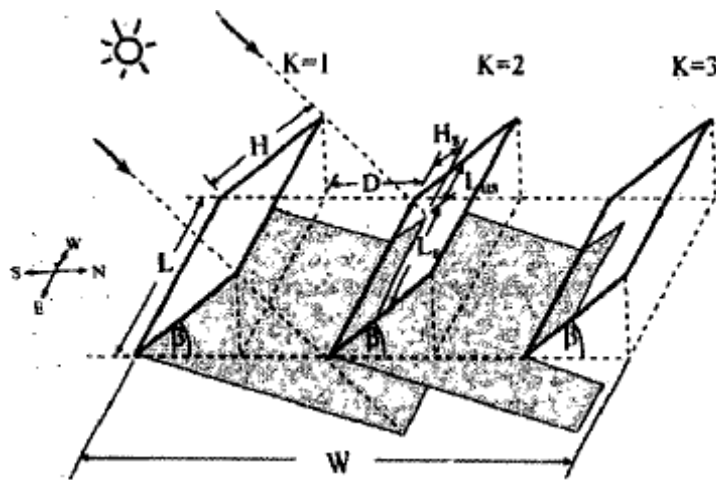
5.1.2 Μεταβολές Σκίασης στην Επιφάνεια φβ Συλλεκτών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σταθερά τοποθετημένοι συλλέκτες διατεταγμένοι σε σειρές μιας φβ εγκατάστασης είναι πιθανό να υπόκεινται σε σκιάσεις από γειτονικές τους σειρές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το ποσοστό της σκίασης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σειρών και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο βέλτιστο σχεδιασμό του φβ συστήματος. Οι μεταβολές της σκίασης στην επιφάνεια ενός φβ συλλέκτη διερευνώνται με στόχο την αποτίμηση της παραγόμενης από τα πλαίσια ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση που ακολουθεί παρέχει πληροφορίες για την κατάλληλη διάταξη και διασύνδεση των φβ πλαισίων προς σχηματισμό της φβ συστοιχίας.

Παρουσίαση του προβλήματος

Στο σχήμα 5.9 φαίνεται ένα σύνολο φβ συλλεκτών, προσανατολισμένων στο νότο ($\gamma=0^\circ$), σε οριζόντιο επίπεδο και δεδομένου μήκους L (που ισούται επίσης με το μήκος του κάθε συλλέκτη). Η απόσταση μεταξύ των συλλεκτών είναι D , το ύψος είναι H και η γωνία κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο είναι β . Το ποσό της σκίασης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σειρών των συλλεκτών. Το Israeli Institute of Standards (IIS) συνιστά η τοποθέτηση των φβ συλλεκτών που έχουν γωνία κλίσης μεταξύ $31^\circ < \beta < 50^\circ$ να γίνεται σε απόσταση ίση με $D = 1.35H \sin \beta$ μεταξύ των σειρών, όπου H το ύψος του συλλέκτη (σχήμα 5.9). Η πρόταση αυτή προκύπτει από την απαίτηση για περιορισμό της σκίασης που προκαλείται από τη μια σειρά συλλεκτών στην επόμενη. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει περιορισμός χώρου ή κάποιος άλλος λόγος, η απόσταση μεταξύ των σειρών μπορεί να είναι μεγάλη.

Ωστόσο, όταν η διαθέσιμη έκταση είναι περιορισμένη ή συντρέχουν οικονομικοί λόγοι, οι συστοιχίες διατάσσονται με μικρότερη απόσταση μεταξύ τους, η οποία καθορίζεται από τις εκάστοτε απαιτήσεις.



Σχήμα 5.9: Σκίαση από παρακείμενους συλλέκτες

Σκιασμένη Επιφάνεια ΦΒ Συλλέκτη

Στην παράγραφο αυτή μελετάται η σκιασμένη επιφάνεια ενός φβ συλλέκτη. Ο συγκεκριμένος συλλέκτης αποτελείται από φβ πλαίσια διατεταγμένα σε σειρές, με αριθμό πλαισίων ίσο με $m = L/L_m$ ανά σειρά, και αριθμό σειρών $n = H/H_m$, όπου L_m και H_m είναι το μήκος και ύψος των πλαισίων αντίστοιχα. Εξετάζεται η διαβάθμιση της σκίασης στα διάφορα πλαίσια για την 21^η Δεκεμβρίου. Ένα πλαίσιο μπορεί να σκιάζεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, για ένα τμήμα της ημέρας ή καθόλου.

Το πλαίσιο έχει μήκος $L_m = 1\text{m}$ και πλάτος $W_m = 0.4\text{m}$ και ο αριθμός των πλαισίων στη συστοιχία είναι 50. Δύο διαφορετικές διαμορφώσεις εφαρμόζονται:

- (α) Οριζόντια διαμόρφωση, σε 5 σειρές των 10 πλαισίων η κάθε μία.
- (β) Κατακόρυφη διαμόρφωση, σε 2 σειρές των 25 πλαισίων η κάθε μία.

Το μήκος και το ύψος της συστοιχίας είναι $L = 10\text{m}$ και $H = 2\text{m}$, αντίστοιχα, και για τις δύο διαμορφώσεις. Τα σκιασμένα πλαίσια φαίνονται στο σχήμα 5.10, όπως υπολογίζεται για τη μικρότερης διάρκειας ημέρα, 21 Δεκεμβρίου, σε γεωγραφικό μήκος 32°N από την ανατολή του ήλιου στις 07:03 έως το μεσημέρι (συμμετρικά για το απόγευμα, από το μεσημέρι μέχρι τις 16:57), για κλίση $\beta = 32^\circ$ και απόσταση μεταξύ των σειρών $D = 0.8\text{m}$. Τα πλαίσια που σκιάζονται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας σημειώνονται με βαθύ γκρι, αυτά που σκιάζονται μέρος της ημέρας με ανοιχτό γκρι και αυτά που δεν σκιάζονται καθόλου με λευκό. Ένα πλαίσιο χαρακτηρίζεται “σκιασμένο” ακόμα και όταν η σκιά καλύπτει μικρό μόνο μέρος του. Η ισχύς εξόδου του συγκεκριμένου πλαισίου θεωρείται μηδενική για όσο χρονικό διάστημα παρατηρείται σκιά στην επιφάνειά του. Πρόκειται φυσικά για την ακραία περίπτωση, καθώς κάποιο ποσό ισχύος είναι δυνατόν να παράγεται από το πλαίσιο όταν σκιάζεται μερικώς.

Σχήμα 5.10: Σκίαση πλαισίων κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Δεκεμβρίου

94	94	94	94	94	94	98	100	100	100
86	86	86	86	86	86	90	97	100	100
69	69	69	69	69	69	73	80	93	100
0	0	0	0	0	0	4	11	24	50
0	0	0	0	0	0	4	11	24	50

79	79	79	79	79	79	79	79	81	83	85	88	92	97	100	100	100	100	100	100	100
0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	6	9	13	18	24	32	43	58	77	77	77

Σχήμα 5.11: Ποσοστά του χρόνου κατά τη διάρκεια της 21^{ης} Δεκεμβρίου στα όποια το πλαίσιο ήταν εντελώς ασκίαστο

1.1162	1.1162	1.1162	1.1162	1.1162	1.1162	1.1179	1.1190	1.1190	1.1190
1.0986	1.0986	1.0986	1.0986	1.0986	1.0986	1.1004	1.1091	1.1190	1.1190
1.0187	1.0187	1.0187	1.0187	1.0187	1.0187	1.0205	1.0293	1.0777	1.1190
0	0	0	0	0	0	0.0018	0.0106	0.0590	0.3099
0	0	0	0	0	0	0.0018	0.0106	0.0590	0.3099

1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0725	1.0733	1.0743	1.0753	1.0770	1.0895	1.1072	1.1190	1.1190	1.1190	1.1190	1.1190	1.1190
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0008	0.0018	0.0028	0.0045	0.0170	0.0348	0.0590	0.1099	0.2254	0.4303	0.7438	0.7438

Σχήμα 5.12: Άμεση προσπίπτουσα σε ένα πλαίσιο ακτινοβολία σε kWh κατά την 21^η Δεκεμβρίου

Ο πίνακας 5.1 συνοψίζει τα αποτελέσματα του σχήματος 5.10 συγκρίνοντας τις δύο διαμορφώσεις των πλαισίων στη συστοιχία, οριζόντια και κατακόρυφη, και δίνει τον αριθμό και το ποσοστό των πλαισίων που υπόκεινται σε σκίαση καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, τμήμα της ή καθόλου.

Διαμόρφωση	Πλαίσια ασκίαστα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας		Πλαίσια σκιασμένα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας		Πλαίσια σκιασμένα τμήμα της ημέρας	
	Αριθμός	%	Αριθμός	%	Αριθμός	%
A	6	12	12	24	32	64
B	5	10	14	28	31	62

Πίνακας 5.1: Σύγκριση πλαισίων που υπόκεινται σε σκίαση για τις δύο διαμορφώσεις

Το συμπέρασμα σχετικά με το ποια διαμόρφωση οδηγεί σε υψηλότερη παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από την εσωτερική διασύνδεση των μεμονωμένων ηλιακών στοιχείων του πλαισίου. Εντούτοις, τα διαφορετικά αποτελέσματα που παρατηρούνται στον πίνακα, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο λόγος του μήκους προς το ύψος του πλαισίου είναι δυνατόν να επηρεάζει την παραγόμενη ενέργεια.

Το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια της ημέρας κατά το οποίο ένα πλαίσιο είναι εντελώς ασκίαστο έχει σημασία στον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής. Κάτι τέτοιο απεικονίζεται στο σχήμα 5.11 και για τις δύο διαμορφώσεις, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την ακτινική συνιστώσα της ακτινοβολίας.

Αξίζει να σημειωθεί τέλος ότι όλα τα πλαίσια λαμβάνουν διάχυτη ακτινοβολία. Με παρατήρηση του σχήματος 5.11, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μία διαμόρφωση (A) οδηγεί σε υψηλότερη παραγωγή από την άλλη (B), ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, η παραγόμενη από το πλαίσιο ενέργεια εξαρτάται και από τη διασύνδεση των στοιχείων στο πλαίσιο, όπως αναφέρθηκε ήδη. Με βάση την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των πλαισίων είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η κατάλληλη διασύνδεση μεταξύ τους για το σχηματισμό της συστοιχίας. Πλαίσια που λαμβάνουν παρόμοια επίπεδα προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε αντίστοιχα χρονικά διαστήματα, είναι και υποψήφια για σύνδεση σε σειρά. Η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, σε kWh, που προσπίπτει στην επιφάνεια των πλαισίων φαίνεται στο σχήμα 5.12.

5.1.3 Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα

Η σκίαση των συλλεκτών θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό μεγάλης κλίμακας φβ συστημάτων, σε ορισμένες δε περιπτώσεις αρκετά σοβαρά. Το κόστος της έκτασης της θέσης εγκατάστασης, η ύπαρξη περιορισμένων διαθέσιμων εκτάσεων ή η επιθυμία για ένα συγκεκριμένο σχεδιασμό τόσο από τη σκοπιά του οικονομικού όσο και του ενεργειακού ζητήματος, μπορεί κάποιες φορές να οδηγήσουν σε μια λύση όπου η σκίαση είναι αναπόφευκτη. Με την αύξηση του αριθμού των σειρών των συλλεκτών σε μια δοσμένη έκταση (ή ισοδύναμα, τη μείωση της απόστασης μεταξύ των συλλεκτών), η συνολική επιφάνεια τους αυξάνεται. Κάτι τέτοιο, όμως, θα είχε σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη σκίαση. Συνεπώς υπάρχει μια βέλτιστη λύση στην περίπτωση που η μεγιστοποίηση ή ένα συγκεκριμένο ποσό λαμβανόμενης ενέργειας είναι επιθυμητό.

Εφόσον ο βέλτιστος σχεδιασμός του συστήματος περιλαμβάνει το κόστος αυτού, η μέγιστη λαμβανόμενη ενέργεια αποτελεί μόνο το ένα μέρος στην εξεύρεση μιας βέλτιστης λύσης. Το άλλο μέρος περιγράφεται από τη μέση μέγιστη λαμβανόμενη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας του συλλέκτη. Η συνολική λοιπόν βέλτιστη λύση προκύπτει από τη σύνθεση – συμβιβασμό μεταξύ – των δύο αυτών μεγεθών. Το πρώτο σκέλος, δηλαδή η μέγιστη ενέργεια αποκλειστικά, θα είχε σαν αποτέλεσμα ένα μεγάλο αριθμό σειρών με ιδιαίτερα έντονο το φαινόμενο της σκίασης. Το δεύτερο σκέλος από την άλλη, υποδηλώνει απουσία του φαινομένου της σκίασης. Κατά συνέπεια, ο βέλτιστος αριθμός των σειρών από συλλέκτες σε ένα σύστημα καθορίζεται από το σημείο εκείνο, πέρα από το οποίο η αύξηση της ενεργειακής απολαβής με παράλληλη αύξηση του αριθμού των σειρών είναι μικρή.

Οι παράμετροι σχεδίασης του συστήματος περιλαμβάνουν: δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, θέση εγκατάστασης (γεωγραφικό πλάτος), ύψος συλλέκτη H , γωνία κλίσης β , ελάχιστη απόσταση ανάμεσα στους συλλέκτες D_{min} , διαστάσεις διαθέσιμης έκτασης και απόσταση συλλέκτη από το έδαφος. Καθεμία παράμετρος συνεισφέρει με διαφορετικό τρόπο στη βέλτιστη λύση (για παράδειγμα η απόσταση d επηρεάζει σημαντικά τη λύση, εν αντιθέσει με το μήκος σειράς l που έχει μικρή μόνο επίδραση). Πρέπει να σημειωθεί βέβαια ότι εκτός από τις παραμέτρους αυτές, ο εκάστοτε σχεδιασμός καθορίζεται σημαντικά από τις συγκεκριμένες σε κάθε περίπτωση απαιτήσεις.

Η μεταβολή της σκίασης κατά τη διάρκεια της ημέρας στην επιφάνεια ενός φβ συλλέκτη, σκίαση που προκαλείται όπως έχει επισημανθεί και προηγουμένως από τη μια σειρά συλλεκτών στην επόμενη, δίνει στο σχεδιαστή του συστήματος πληροφορίες για τον επιθυμητό τρόπο διασύνδεσης των πλαισίων προς σχηματισμό της φβ συστοιχίας. Στην ενότητα αυτή παρατίθεται αρχικά μια ανάλυση της γεωμετρίας της σκίασης (συνιστώσες σκιάς, ύψος και εμβαδό) και η επίδρασή της στο σχεδιασμό μεγάλων φβ συστημάτων. Στη συνέχεια, εξετάζονται τα φβ πλαίσια που υπόκεινται σε σκίαση και υπολογίζεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε καθένα από αυτά. Η πληροφορία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του τρόπου διασύνδεσης των πλαισίων της συστοιχίας. Σημειώνεται, τέλος, ότι παρά την ανάλυση που προηγήθηκε, μια συνολικά βέλτιστη λύση στο σχεδιασμό ενός φβ συστήματος δεν αναλύθηκε πλήρως στην παρούσα ενότητα.

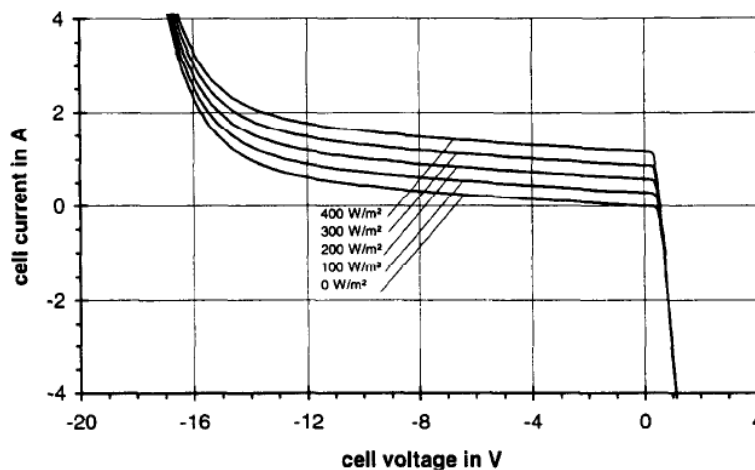
5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, ένα φβ πλαίσιο αποτελείται από 36 ηλιακά στοιχεία που συνδέονται σε σειρά και περισσότερα τέτοια πλαίσια συνθέτουν μια συστοιχία, συνδεδεμένα είτε σε σειρά είτε παράλληλα, για την ανάπτυξη κατάλληλης τάσης ή/και ρεύματος. Η ισχύς εξόδου μιας φβ συστοιχίας περιορίζεται σημαντικά όταν οι χαρακτηριστικές I-V των ηλιακών στοιχείων δεν είναι πανομοιότυπες εξαιτίας ρύπανσης, ανομοιόμορφης ακτινοβολίας, διακυμάνσεων στη θερμοκρασία, σκίασης κλπ.

Το φαινόμενο της μερικής σκίασης έχει γίνει αντικείμενο εκτενούς μελέτης τα τελευταία χρόνια. Μια τέτοια προσπάθεια ανάλυσης – επεξήγησης του φαινομένου αυτού ακολουθεί στη συνέχεια.

5.2.1 Ηλεκτρική Απόκριση υπό Συνθήκες Μερικής Σκίασης

Όταν ένα τμήμα ενός φβ πλαισίου σκιάζεται, τα στοιχεία που υφίστανται σκίαση δεν είναι ικανά να παράγουν το ίδιο ρεύμα με εκείνα που δέχονται ομοιόμορφη ακτινοβολία. Από τη στιγμή όμως που όλα τα στοιχεία ενός πλαισίου είναι συνδεδεμένα εν σειρά, ίδια ποσότητα ρεύματος διαρρέει το σύνολο των στοιχείων. Τα ασκίαστα στοιχεία “αναγκάζουν” τα σκιασμένα να παράγουν μεγαλύτερο ρεύμα από αυτό που αντιστοιχεί στην ακτινοβολία τους. Ο μόνος τρόπος με τον οποίο τα σκιασμένα στοιχεία μπορούν να λειτουργήσουν σε ρεύμα μεγαλύτερο από το ρεύμα βραχυκύκλωσής τους είναι στην περιοχή των αρνητικών τάσεων, όπως προκύπτει από την ολική χαρακτηριστική ρεύματος τάσης που φαίνεται παρακάτω.



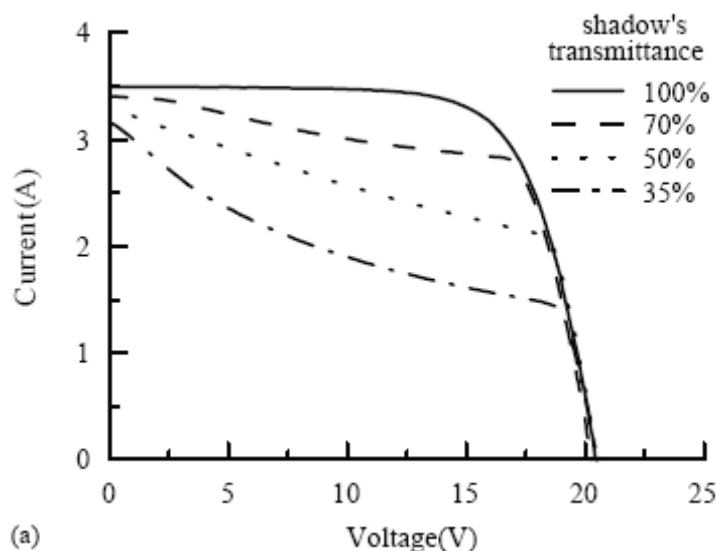
Σχήμα 5.13: Ολική χαρακτηριστική ρεύματος τάσης

Το εν λόγω γεγονός προκαλεί μια απώλεια τάσης στο σύστημα. Τα σκιασμένα στοιχεία απορροφούν ισχύ και αρχίζουν να λειτουργούν ως φορτία. Με άλλα λόγια, τα σκιασμένα στοιχεία δαπανούν ισχύ υπό μορφή θερμότητας προκαλώντας έτσι τα λεγόμενα *hot spots*. Για την πρόληψη της εκδήλωσης του φαινομένου αυτού, γίνεται χρήση παρακαμπτηρίων διόδων (*bypass diodes*). Όταν ένα φβ στοιχείο σκιάζεται, η αντίστοιχη bypass διάδος πολώνεται ορθά και όλο το πλεονάζον ρεύμα σε σχέση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του σκιασμένου στοιχείου διοχετεύεται διαμέσου της διόδου. Έτσι, η bypass διάδος μειώνει δραματικά το μέγεθος της θέρμανσης που προκαλείται τοπικά στη σκιασμένη περιοχή. Από την άλλη μεριά, η bypass διάδος

διατηρεί την τάση της ομάδας των σκιασμένων στοιχείων στην οποία συνδέεται σε περίπου $-0,6V$, περιορίζοντας με τον τρόπο αυτό τη μείωση της ισχύος εξόδου της συστοιχίας. Εκτός από τη μείωση της ισχύος, τα σκιασμένα στοιχεία αλλάζουν σημαντικά τη συνολική I-V καμπύλη του φβ πλαισίου εξαιτίας των bypass διόδων. Για το λόγο αυτό, είναι δυνατόν να σχηματιστούν αρκετά τοπικά σημεία μέγιστης ισχύος (MPP) στην καμπύλη P-V ενός φβ πλαισίου ή μιας συστοιχίας. Το φαινόμενο αυτό δημιουργεί αρκετά προβλήματα στον έλεγχο της ανίχνευσης σημείων μέγιστης ισχύος (MPP tracking control) του συστήματος.

5.2.2 Λειτουργία χωρίς δίοδο *bypass*

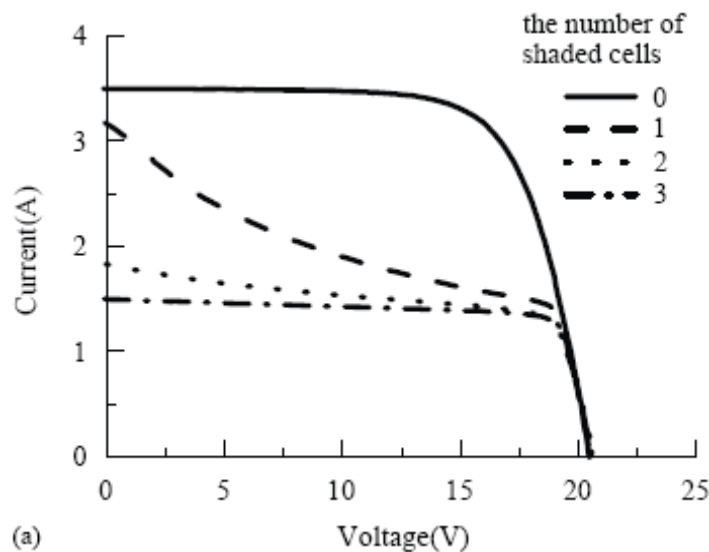
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συμπεριφορά – καμπύλη I-V – ενός φ/β πλαισίου *χωρίς* τη χρήση bypass διόδων σε σχέση με δύο παραμέτρους: το επίπεδο της ακτινοβολίας που δέχονται τα σκιασμένα στοιχεία ενός πλαισίου και τον αριθμό των σκιασμένων στοιχείων.



Σχήμα 5.14: I-V χαρακτηριστική για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας

Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει την I-V χαρακτηριστική για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας των σκιασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, μόνο το ένα στοιχείο του πλαισίου καλύπτεται από σκιά θεωρώντας διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας (κάθε πλαίσιο αποτελείται από 36 φβ στοιχεία). Σε αυτή την περίπτωση, τα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι σχεδόν ίδια παρόλο που το επίπεδο ακτινοβολίας είναι διαφορετικό. Ωστόσο, σε χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας, το ρεύμα μειώνεται ταχύτατα με αύξηση της τάσης. Από την άλλη μεριά, η τάση ανοικτοκύκλωσης είναι ίδια.

Στο σχήμα 5.15 φαίνονται οι μεταβολές της I-V χαρακτηριστικής σαν συνάρτηση του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων (το επίπεδο της ακτινοβολίας λαμβάνεται σταθερό και ίσο με 35%). Καθώς ο αριθμός των σκιασμένων στοιχείων αυξάνεται, το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται αισθητά. Η τάση ανοικτοκύκλωσης ωστόσο παραμένει σχεδόν ίδια.



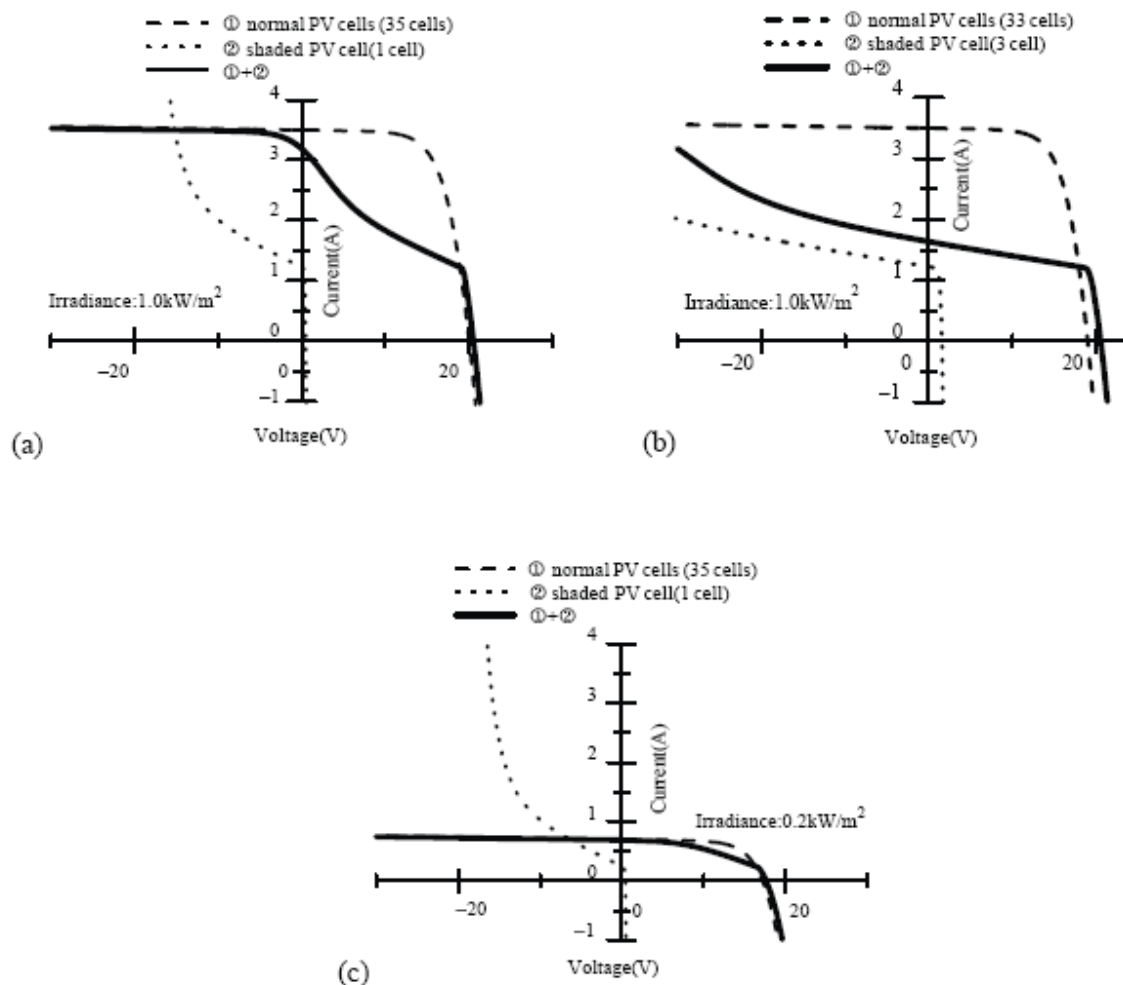
Σχήμα 5.15: I-V χαρακτηριστική για διάφορο αριθμό σκιασμένων στοιχείων

Όπως είναι φανερό από τις εικόνες 5.14 και 5.15, οι I-V χαρακτηριστικές μεταβάλλονται σημαντικά από τις συνθήκες ακτινοβολίας, τη σκίαση και τον αριθμό των σκιασμένων στοιχείων σε ένα πλαίσιο. Η αιτία των μεταβολών αυτών μελετάται στη συνέχεια.

Το σχήμα 5.16(α) απεικονίζει τις I-V χαρακτηριστικές ενός φβ πλαισίου με ένα σκιασμένο στοιχείο. Για την I-V χαρακτηριστική ενός σκιασμένου στοιχείου, το ρεύμα αυξάνεται απότομα με την τάση στο δεύτερο τεταρτημόριο εξαιτίας του φαινομένου της χιονοστιβάδας. Για την I-V χαρακτηριστική των υπολοίπων 35 στοιχείων η αύξηση του ρεύματος εξαιτίας του φαινομένου της χιονοστιβάδας δεν εμφανίζεται στο σχήμα καθώς η αύξηση αυτή συντελείται σε πολύ αρνητικές τάσεις. Η I-V χαρακτηριστική ενός πλαισίου με ένα σκιασμένο στοιχείο αποτελεί την σύνθεση των δύο προηγούμενων χαρακτηριστικών. Έχει αποδειχθεί ότι η μείωση του ρεύματος στην περιοχή κοντά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 5.14 προκύπτει από την επίδραση του φαινομένου της χιονοστιβάδας (τάσης κατάρρευσης) του σκιασμένου στοιχείου.

Το σχήμα 5.16(β) απεικονίζει τις I-V χαρακτηριστικές ενός φβ πλαισίου με τρία σκιασμένα στοιχεία. Καθώς ο αριθμός των σκιασμένων στοιχείων αυξάνεται, η τάση κατάρρευσης των σκιασμένων στοιχείων μετατοπίζεται προς τα αριστερά και η μείωση του ρεύματος κοντά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης όπως δείχνει το σχήμα 5.16(β) μετατοπίζεται σε υψηλές αρνητικές τιμές τάσης. Έτσι, η I-V χαρακτηριστική ενός φβ πλαισίου με τρία σκιασμένα στοιχεία, η οποία εμφανίζεται στο πρώτο τεταρτημόριο, αλλάζει σημαντικά σε σύγκριση με το σχήμα 5.16(α).

Η I-V χαρακτηριστική ενός πλαισίου με ένα σκιασμένο στοιχείο και για χαμηλότερο επίπεδο ακτινοβολίας, δίνεται στο σχήμα 5.16(γ). Καθώς το επίπεδο ακτινοβολίας μειώνεται, τόσο το ρεύμα βραχυκύκλωσης των ασκίαστων στοιχείων όσο και του σκιασμένου μειώνονται. Τα εν λόγω ρεύματα βραχυκύκλωσης έχουν αμελητέα διαφορά, σε σύγκριση με τις εικόνες 5.16(α) και 5.16(β). Ως εκ τούτου, η I-V χαρακτηριστική συντίθεται από μικρές μεταβολές του ρεύματος: η επίδραση της μείωσης του ρεύματος από την τάση κατάρρευσης είναι μικρή.

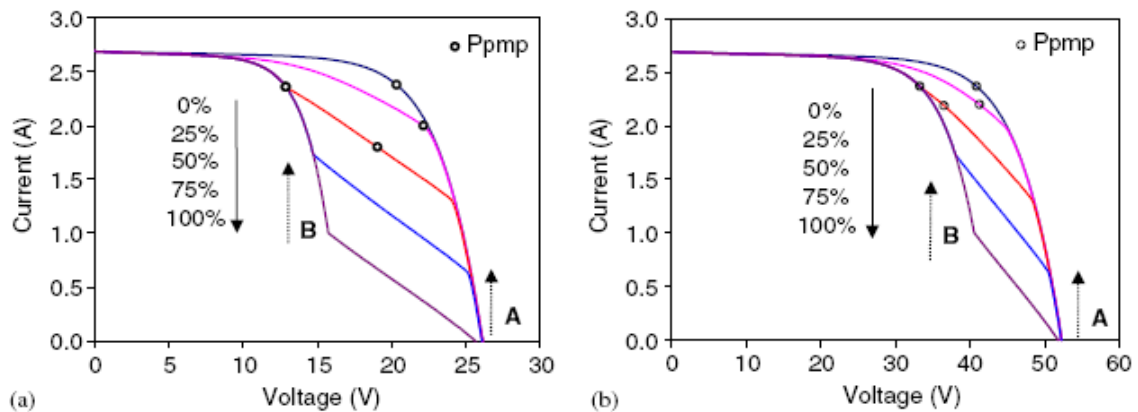


Σχήμα 5.16: I-V χαρακτηριστικές ασκίαστων και σκιασμένων στοιχείων συνδεδεμένων εν σειρά: (α) 1 σκιασμένο στοιχείο (1000W/m²) (β) 3 σκιασμένα στοιχεία (1000W/m²) (γ) 1 σκιασμένο στοιχείο (200W/m²)

5.2.3 Επίδραση διόδου *bypass*

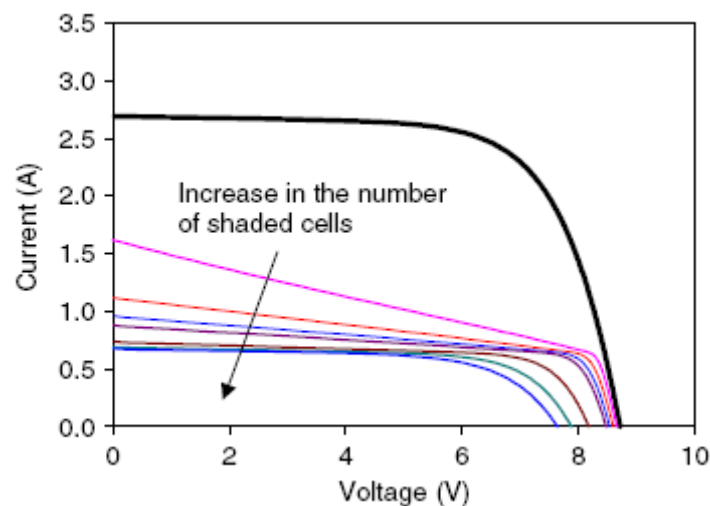
Στη συνέχεια μελετώνται οι αντίστοιχες με τις προαναφερθείσες επιδράσεις στην περίπτωση *ύπαρξης* *bypass* διόδου.

Θεωρείται μια ακολουθία 18 σειριακά συνδεδεμένων στοιχείων, με την υπόθεση ότι ένα από τα στοιχεία σκιάζεται σε ποσοστό 25%, 50%, 75% ή 100%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 5.17(α,β). Η μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης του σκιασμένου στοιχείου είναι φανερό στο σημείο που οι επιδράσεις σκίασης αρχίζουν να ενεργούν (σημείο A) και στο σημείο στο οποίο ενεργοποιείται η *bypass* διάδος (σημείο B).



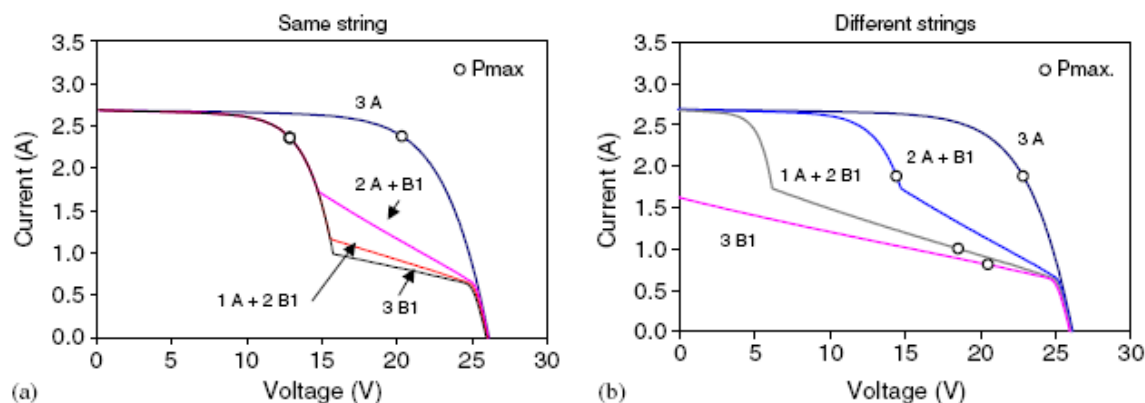
Σχήμα 5.17: Σκίαση ενός στοιχείου με διαφορετικά ποσοστά

Ένα άλλο επακόλουθο της σκίασης είναι η μετατόπιση του σημείου μέγιστης ισχύος σε τάσεις χαμηλότερες από τις αναμενόμενες για τις εκάστοτε διατάξεις. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη σε περιπτώσεις συστημάτων συνδεδεμένων σε μετατροπείς που ανιχνεύουν το σημείο μέγιστης ισχύος (MPPT), καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε κακή λειτουργία και αύξηση των απωλειών.



Σχήμα 5.18: Επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία 18 στοιχείων

Το σχήμα 5.18 παρουσιάζει την επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία 18 σειριακά συνδεδεμένων στοιχείων. Η επίδραση αυτή απεικονίζεται στην περίπτωση που συνδέονται περισσότερες ακολουθίες, όπως εκτιμάται στο σχήμα 5.19. Το σχήμα αυτό δείχνει ένα σύστημα που αποτελείται από τρεις ακολουθίες των 18 στοιχείων, σε κάθε μια από τις οποίες δύο ή τρία στοιχεία από κάθε ακολουθία σκιάζονται κατά 75%. Η παραμόρφωση της I-V χαρακτηριστικής αυξάνεται με τον αριθμό των σκιασμένων στοιχείων, κάτι που οφείλεται στη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης της ακολουθίας, όταν ο αριθμός των σκιασμένων στοιχείων αυξάνεται. Στην περίπτωση ενός συστήματος που λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, η αύξηση του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία δεν έχει καμιά επίδραση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.19, όπου το σημείο μέγιστης ισχύος είναι το ίδιο και για τις τρεις χαρακτηριστικές.



Σχήμα 5.19: Επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε ένα σύστημα με 3 ακολουθίες των 18 στοιχείων (α) σκιασμένα στοιχεία στην ίδια ακολουθία (β) σκιασμένα στοιχεία σε διαφορετικές ακολουθίες

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι εντελώς διαφορετικά όταν τα στοιχεία που σκιάζονται ανήκουν σε διαφορετικές ακολουθίες, καθώς σε αυτή την περίπτωση η αύξηση του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων προκαλεί μια σημαντική μείωση στο MPP. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 5.19(β), όπου η μείωση της ισχύος είναι της τάξης του 61% για την περίπτωση στην οποία ίδια επίπεδα σκίασης εμφανίζονται σε όλες τις ακολουθίες της συστοιχίας. Μια τέτοια η περίπτωση θα πρέπει να αποφεύγεται, καθώς προκαλεί σημαντική μείωση στην παραγόμενη ισχύ.

5.3 ΜΕΛΕΤΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PSpICE

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια προσπάθεια κατανόησης της λειτουργίας των φβ συστημάτων, υπό συνθήκες μερικής σκίασης, με εφαρμογή των ανάλογων μοντέλων στο λογισμικό PSpice. Το PSpice είναι το πιο διαδεδομένο υπολογιστικό εργαλείο για την προσομοίωση τόσο αναλογικών όσο και διακριτών κυκλωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα ισοδύναμα φωτοβολταϊκά μοντέλα, τόσο σε επίπεδο στοιχείου όσο και σε επίπεδο πλαισίου, που χρησιμοποιήθηκαν για τις απαραίτητες προσομοιώσεις με το PSpice. Δίνονται οι βασικές εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός φβ στοιχείου με βάση τις οποίες προκύπτουν οι $I(V)$ χαρακτηριστικές κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Αρχικά παρουσιάζεται το βασικό μοντέλο ενός φβ στοιχείου, το οποίο στη συνέχεια επεκτείνεται για να συμπεριλάβει κάποιες πρόσθετες απώλειες. Κατόπιν, γίνεται αναγωγή σε επίπεδο πλαισίου, με τις αντίστοιχες εξισώσεις και, τέλος, προτείνεται ένα βελτιωμένο μοντέλο για εφαρμογή σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας (ακτινοβολία, θερμοκρασία).

5.3.1 Ιδανικό Ισοδύναμο Κύκλωμα

Η τιμή του ρεύματος που παράγεται από ένα φβ στοιχείο δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (5.8)$$

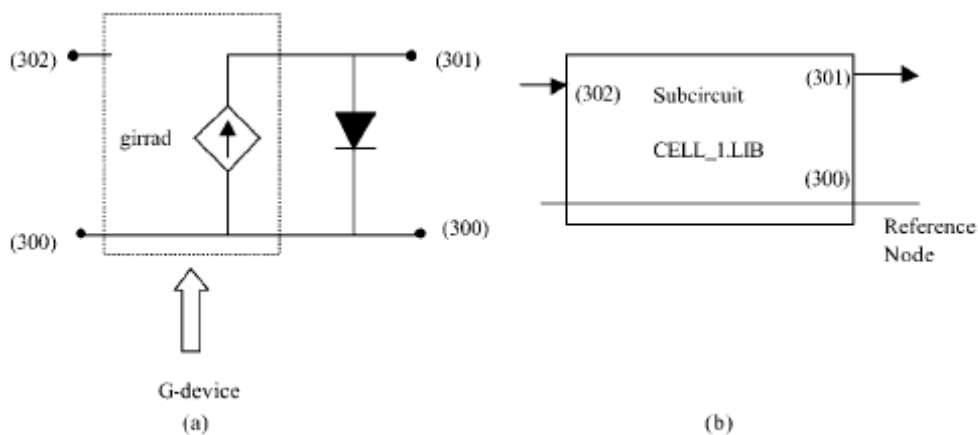
Όπως είναι γνωστό, τόσο το ρεύμα βραχυκύκλωσης όσο και το ανάστροφο ρεύμα κόρου μεταβάλλονται ανάλογα με την επιφάνεια του φβ στοιχείου, γεγονός σημαντικό καθώς διευκολύνεται η κλιμάκωση των φβ συστημάτων ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Το μοντέλο αυτό, αν και το απλούστερο, είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές και μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε κώδικα του PSpice με τη χρήση μιας πηγής ρεύματος τιμής ίσης με I_{sc} και μιας διόδου.

Μοντέλο PSpice Ιδανικού φβ Στοιχείου

Ένας βολικός τρόπος για το χειρισμό των κυκλωμάτων σε PSpice είναι ο καθορισμός υποκυκλωμάτων (subcircuits) στα κύρια κυκλώματα. Κάτι τέτοιο ισχύει και στην περίπτωση των φβ στοιχείων όπου η δημιουργία υποκυκλώματος εξυπηρετεί τη διαδικασία της σύνδεσης δύο ή περισσότερων στοιχείων σε σειρά ή παράλληλα

Το διάγραμμα του μοντέλου ενός ιδανικού φβ στοιχείου, που χρησιμοποιείται, δίνεται στο σχήμα 5.20, το οποίο αποτελεί ουσιαστικά υλοποίηση της εξίσωσης (5.8). Η βασική ιδέα στην παρούσα ανάλυση είναι ότι τα φβ στοιχεία δέχονται μια συγκεκριμένη ακτινοβολία και το ρεύμα βραχυκύκλωσης που παράγουν είναι ανάλογο προς αυτήν. Για την εφαρμογή αυτού στο PSpice, η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ανατίθεται σε μια πηγή ρεύματος εξαρτώμενη από τάση (g-device), όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.20(α).



Σχήμα 5.20: Αναπαράσταση υποκυκλώματος φβ στοιχείου και αντίστοιχο μπλοκ διάγραμμα

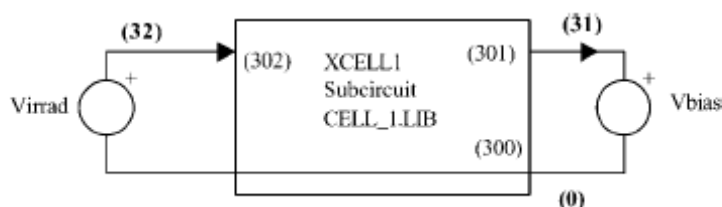
Η τιμή της πηγής ρεύματος, με ονομασία “girrad”, δίνεται από τη σχέση:

$$girrad = \frac{J_{sc} A}{1000} G \quad (5.9)$$

όπου G η ακτινοβολία σε W/m^2 . Η εξίσωση (5.20) υποθέτει ότι η τιμή του J_{sc} δίνεται σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς ($AM = 1.5$, $1000W/m^2$, $T_{cell} = 25^\circ C$), που είναι και οι συνθήκες στις οποίες διεξάγονται συνήθως οι πειραματικές μετρήσεις. Οι τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης προκύπτουν από τα φύλλα προδιαγραφών (datasheets) που παρέχουν οι κατασκευαστές. Η εξίσωση (5.20) υπολογίζει την τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για κάθε επίπεδο ακτινοβολίας G , με δεδομένη την ισχύ της

αναλογικής σχέσης μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών. Το μπλοκ διάγραμμα του υποκυκλώματος δίνεται στο σχήμα 5.20(β) στο οποίο φαίνεται ένας κόμβος αναφοράς (300), ένας κόμβος εισόδου (302) για την είσοδο μιας τάσης αριθμητικά ίσης με την τιμή της ακτινοβολίας και ένας κόμβος εξόδου (301) για τη σύνδεση του στοιχείου στο κύκλωμα.

Το φβ στοιχείο συνδέεται σε ένα κύκλωμα μέτρησης για την εξαγωγή της $I(V)$ χαρακτηριστικής, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.21.



Σχήμα 5.21: Κύκλωμα μέτρησης I-V χαρακτηριστικής φβ στοιχείου

- *Τάση ανοικτοκύκλωσης*

Εκτός από το ρεύμα βραχυκύκλωσης, ένα δεύτερο χαρακτηριστικό σημείο της καμπύλης $I(V)$ ενός φβ στοιχείου αποτελεί το σημείο τομής της με τον άξονα των τάσεων, ή αλλιώς η τάση ανοικτοκύκλωσης, V_{oc} , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$V_{oc} = V_T \ln \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (5.10)$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι η τάση ανοικτοκύκλωσης εξαρτάται λογαριθμικά από το λόγο I_{sc}/I_0 . Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι υπό σταθερή θερμοκρασία, η τιμή της V_{oc} μεταβάλλεται λογαριθμικά με το ρεύμα I_{sc} , το οποίο με τη σειρά του μεταβάλλεται ανάλογα με την ακτινοβολία, κάτι που συνεπάγεται λογαριθμική εξάρτηση μεταξύ τάσεως ανοικτοκύκλωσης και ακτινοβολίας. Τα παραπάνω οδηγούν στο σημαντικό συμπέρασμα ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης επηρεάζεται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από την ακτινοβολία σε σχέση με την τάση ανοικτοκύκλωσης. Η τάση αυτή επιπλέον είναι ανεξάρτητη της επιφάνειας του κελιού, γεγονός σημαντικό καθώς ανεξαρτήτως μεγέθους επιφάνειας, η εν λόγω τάση παραμένει πάντα ίδια κάτω από ίδιες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

- *Σημείο Μέγιστης Ισχύος*

Η ισχύς εξόδου ενός φβ στοιχείου ισούται με το γινόμενο του ρεύματος που διανέμεται στο φορτίο επί την τάση στα άκρα του στοιχείου. Θετικό πρόσημο υποδηλώνει παραγωγή ισχύος από το στοιχείο – διανομή στο φορτίο, ενώ αρνητικό κατανάλωση ισχύος από το στοιχείο. Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω σύμβαση προσήμου, η ισχύς σε κάθε σημείο της χαρακτηριστικής δίνεται από τη σχέση

$$P = V \times I = V \left[I_L - I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \right] \quad (5.11)$$

Προφανώς, η τιμή της ισχύος στο σημείο βραχυκύκλωσης είναι μηδενική, αφού η τάση στο σημείο αυτό ισούται με μηδέν, όπως και στο σημείο ανοικτοκύκλωσης όπου το ρεύμα ισούται με μηδέν. Η ισχύς που παράγεται από το φβ στοιχείο είναι θετική στο διάστημα μεταξύ των δύο αυτών σημείων. Επίσης, υπάρχει ένα σημείο εντός αυτού του διαστήματος στο οποίο η ισχύς μεγιστοποιείται, το επονομαζόμενο σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point, MPP), με συντεταγμένες $V=V_m$ και $I=I_m$. Η σχέση μεταξύ των V_m και I_m προκύπτει από το γεγονός ότι η παράγωγος της ισχύος στο σημείο αυτό είναι μηδενική:

$$\frac{dP}{dV} = 0 = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_m}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_m}{V_T} I_0 e^{\frac{V_m}{V_T}} \quad (5.12)$$

στο MPP, από όπου

$$I_m = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_m}{V_T}} - 1 \right) \quad (5.13)$$

και

$$V_m = V_{oc} - V_T \ln \left(1 + \frac{V_m}{V_T} \right) \quad (5.14)$$

Με τη χρήση του PSpice οι συντεταγμένες του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) προσδιορίζονται εύκολα από τη γραφική παράσταση $I(V)$ που προκύπτει.

5.3.2 Γενικευμένο Μοντέλο φβ Στοιχείου

Το ισοδύναμο κύκλωμα του φβ στοιχείου μέχρι στιγμής, και η αντίστοιχη υλοποίηση του στο PSpice, λαμβάνει υπόψη μια ιδανική συμπεριφορά του κελιού βασισμένη σε μια ιδανική δίοδο και μια ιδανική πηγή ρεύματος. Το μοντέλο όμως αυτό, εξαιτίας των απλοποιήσεων που περικλείει, δεν είναι ικανό να επεξηγήσει ή να μοντελοποιήσει επαρκώς τη συμπεριφορά των φβ στοιχείων και, ως εκ τούτου, κρίνεται ανεπαρκές στον προσδιορισμό της μέγιστης παραγόμενης ισχύος.

Ένα πιο πλήρες μοντέλο, που περιλαμβάνει σε πρώτη φάση ωμικές αντιστάσεις, είναι απαραίτητο για την ορθότερη προσομοίωση της λειτουργίας των φβ συστημάτων. Η ανάγκη για χρήση ωμικών αντιστάσεων πηγάζει από τα εξής δύο φαινόμενα.

- *Αντίσταση σειράς*

Ένας από τους κυριότερους περιορισμούς του ιδανικού μοντέλου προέρχεται από τις ωμικές απώλειες σειράς, οι οποίες εμφανίζονται στα πραγματικά φβ στοιχεία. Στην πράξη, το ρεύμα που παράγεται στο εσωτερικό του στοιχείου φτάνει στους ακροδέκτες αφού διαπεράσει το πάχος του ημιαγωγίμου υλικού, το οποίο παρουσιάζει κάποια ειδική αντίσταση. Επιπλέον, η αντίσταση των αγωγών και των ηλεκτροδίων που περιέχονται στη συσκευασία του φβ στοιχείου συμβάλλουν στις ολικές απώλειες σειράς. Συνήθως, οι αναπόφευκτες αυτές σειριακές απώλειες μπορούν να ενσωματωθούν σε μια μόνο αντίσταση, R_s , που ονομάζεται αντίσταση σειράς του φβ στοιχείου.

- *Αντίσταση εκτροπής*

Στη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών η μαζική παραγωγή έχει ως αποτέλεσμα αναπόφευκτα κατασκευαστικά ελαττώματα, μεταξύ των οποίων τοπικές βραχυκυκλώσεις και διαρροές ρεύματος είναι από τα πλέον συνηθισμένα. Οι συγκεκριμένες απώλειες, που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αρκετά υψηλές ώστε να μην αγνοηθούν, εκφράζονται γενικά μέσω μιας αντίστασης, R_{sh} , παράλληλης προς τη δίοδο.

Ωστόσο, μερικές φορές η απλή θεώρηση των παραπάνω αντιστάσεων ως τα μοναδικά επιπλέον συστατικά του ισοδύναμου κυκλώματος δεν είναι και πάλι επαρκής για την ακριβή μοντελοποίηση των $I(V)$ χαρακτηριστικών ενός φβ στοιχείου. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στα ακόλουθα φαινόμενα.

- *Επανασύνδεση*

Η επανασύνδεση των φορέων στην περιοχή αραίωσης της ένωσης p-n των φβ στοιχείων εξηγεί τις μη ωμικές διαδρομές ρεύματος στο εσωτερικό του στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε χαμηλές τάσεις πόλωσης και μπορεί να ποσοτικοποιηθεί από μια δεύτερη δίοδο με ανάστροφο ρεύμα κόρου J_{02} και με συντελεστή ποιότητας δίοδου συνήθως ίσο με 2, παράμετροι διαφορετικές από αυτές της ιδανικής δίοδου. Η δίοδος αυτή προστίθεται στο υποκύκλωμα του στοιχείου, παράλληλα στην αρχική – ιδανική.

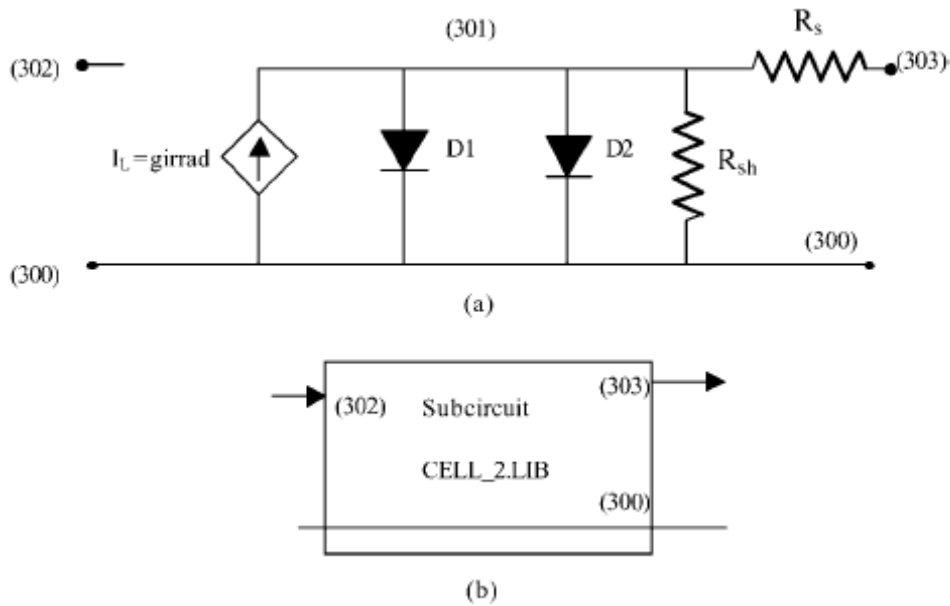
- *Μη ιδανικότητα δίοδου*

Στην πράξη πολύ λίγα στοιχεία εκδηλώνουν μια εντελώς ιδανική συμπεριφορά και έχουν συντελεστή ποιότητας δίοδου ίσο με τη μονάδα. Για το λόγο αυτό αποτελεί κοινή πρακτική η πρόσθεση ενός παράγοντα “ n ”, ο οποίος ενσωματώνει αυτές τις μη ιδανικότητες. Το αρχικό μοντέλο συνεπώς τροποποιείται για να συμπεριλάβει αυτή την επίδραση.

Συνοψίζοντας, μπορεί να γραφεί μια νέα σχέση μεταξύ ρεύματος – τάσης που λαμβάνει υπόψη τις προαναφερθείσες επιδράσεις:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{2V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (5.15)$$

Το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα δίνεται στο σχήμα 5.22, όπου η δίοδος D1 αντιστοιχεί στον πρώτο εκθετικό όρο, ενώ η D2 στο δεύτερο.



Σχήμα 5.22: Υποκύκλωμα δύο διόδων και αντιστάσεων εν σειρά και παράλληλης

5.3.3 Μοντέλο PSpice φβ Πλαισίου

Μεμονωμένα ηλιακά στοιχεία διαθέτουν περιορισμένη ικανότητα παραγωγής ισχύος σε υψηλά επίπεδα τάσης καθώς η τάση ανοικτοκύκλωσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ανεξάρτητη της επιφάνειας των φβ στοιχείων και περιορίζεται από τις ιδιοτητες των ημιαγωγών. Στις περισσότερες φβ εφαρμογές, απαιτούνται επίπεδα τάσης μεγαλύτερα από μερικές δεκάδες Volt, ενώ ακόμα και για τυπικές ηλεκτρονικές εφαρμογές ένα ελάχιστο όριο ενός Volt περίπου συνηθίζεται στην πράξη. Για το λόγο αυτό είναι υποχρεωτική η εν σειρά σύνδεση των φβ στοιχείων προκειμένου να αυξηθεί η παραγόμενη τάση.

Οι φωτοβολταϊκές εφαρμογές ποικίλουν από μερικά Watt μέχρι αρκετά MW στις φβ εγκαταστάσεις. Κατά συνέπεια, δεν απαιτείται μόνο αύξηση της τάσης αλλά και του ρεύματος, καθώς η μέγιστη επιφάνεια των φβ στοιχείων περιορίζεται λόγω κατασκευαστικών παραγόντων. Κάτι τέτοιο, σημαίνει ότι η παράλληλη σύνδεση φβ στοιχείων και πλαισίων είναι η πλέον συνήθης προσέγγιση προς αύξηση του ρεύματος εξόδου μιας δεδομένης φβ εγκατάστασης.

Ισοδύναμο Κύκλωμα φβ Πλαισίου

Η χαρακτηριστική $I(V)$ ενός φβ πλαισίου προκύπτει από τη σύνθεση των $I(V)$ χαρακτηριστικών των μεμονωμένων στοιχείων που συνδυάζονται για τη δημιουργία ενός πλαισίου. Με τη χρήση του PSpice δεν είναι δύσκολη η επέκταση μιας απλής σύνδεσης στοιχείων προς σχηματισμό ενός ισοδύναμου μοντέλου πλαισίου.

Υπάρχουν ωστόσο δύο κύριοι λόγοι για τους οποίους είναι προτιμότερη μια πιο συμπαγής διατύπωση ενός μοντέλου για φβ πλαίσια. Πρώτον, καθώς ο αριθμός των συνδεδεμένων στοιχείων εντός του πλαισίου αυξάνεται, το ίδιο συμβαίνει και με τον αριθμό των κόμβων που απαιτούνται στο κύκλωμα (και ισοδύναμα στο κώδικα PSpice), γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα άσκοπη πολυπλοκότητα και δυσκολία στο χειρισμό. Δεύτερον, εφόσον είναι γνωστοί οι γενικοί κανόνες αναγωγής που διέπουν

τη σχέση μεταξύ των ηλεκτρικών μεγεθών (ρεύματος και τάσης) στοιχείων και πλαισίου, είναι απλή και βολική η ανάπτυξη ενός πιο συμπαγούς μοντέλου για ένα φβ πλαίσιο και κατ' επέκταση μια φβ εγκατάσταση. Στην εξίσωση της $I(V)$ χαρακτηριστικής ενός μεμονωμένου φβ στοιχείου

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{2V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (5.16)$$

γίνονται ορισμένες απλοποιητικές παραδοχές. Πιο συγκεκριμένα η αντίσταση εκτροπής ενός φβ στοιχείου είναι συνήθως πολύ μεγάλη (ιδανικά άπειρη) και οι επιδράσεις της μπορούν να αγνοηθούν, όπως και αυτές της δεύτερης διόδου (D2). Έτσι, θεωρώντας $I_{02}=0$ και $R_{sh}=\infty$, η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) \quad (5.17)$$

όπου έχει υποθεθεί επίσης ότι $I_{sc}=IL$.

Οι κανόνες των τάσεων, ρευμάτων και αντιστάσεων στην περίπτωση ενός πίνακα (που αντιστοιχεί σε ένα φβ πλαίσιο) διαστάσεων $N_s \times N_p$ στοιχείων έχουν ως εξής:

$$I_M = N_p I \quad (5.18)$$

$$I_{scM} = N_p I_{sc} \quad (5.19)$$

$$V_M = N_s V \quad (5.20)$$

$$V_{ocM} = N_s V_{oc} \quad (5.21)$$

$$R_{sM} = \frac{N_s}{N_p} R_s \quad (5.22)$$

όπου ο δείκτης M αναφέρεται σε πλαίσιο ενώ η απουσία του αναφέρεται σε μεμονωμένο στοιχείο.

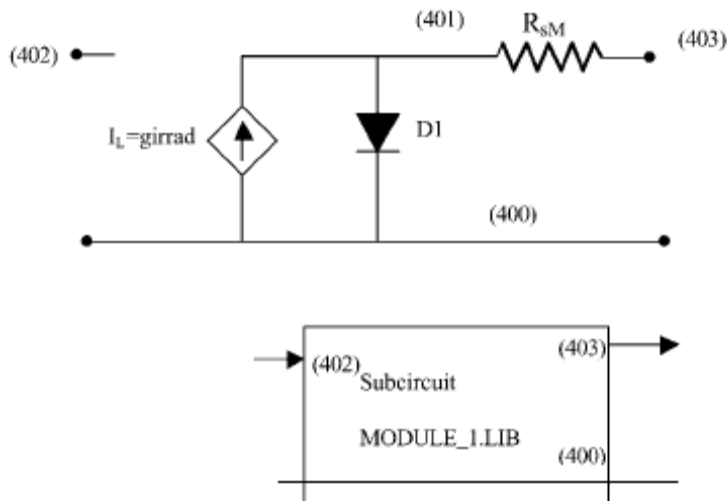
Έπειτα από κάποιους υπολογισμούς [1] προκύπτει ότι

$$R_{sM} = \frac{V_{ocM}}{I_{scM}} - \frac{P_{\max M}}{FF_{0M} I_{scM}^2} \quad (5.23)$$

όπου

$$FF_{0M} = \frac{J_{mM} V_{mM}}{J_{scM} V_{ocM}} = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}} = FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \quad (5.24)$$

Το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα του φβ πλαισίου δίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 5.23: Μοντέλο PSpice για το κύκλωμα φβ πλαισίου

Το μοντέλο που περιγράφηκε σε αυτή την παράγραφο, είναι ικανό να αποδώσει τις $I(V)$ χαρακτηριστικές των φβ πλαισίων σε πρότυπες συνθήκες, χρησιμοποιώντας τιμές των κύριων ηλεκτρικών μεγεθών ενός πλαισίου του εμπορίου: ρεύμα βραχυκύκλωσης, τάση ανοιχτοκύκλωσης, ισχύς αιχμής και αριθμός των συνδεδεμένων στοιχείων. Το πρόβλημα που ανακύπτει ωστόσο αφορά την αναγωγή της συμπεριφοράς των πλαισίων σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας (ακτινοβολία, θερμοκρασία). Η παράγραφος που ακολουθεί αφιερώνεται στο ζήτημα αυτό.

5.3.4 Μετάβαση σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φβ πλαισίων προσδιορίζονται από τους κατασκευαστές για πρότυπες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Οι πρότυπες συνθήκες καθορίζονται ως $AM=1.5$, 1000 W/m^2 σε θερμοκρασία κελιού 25°C , ενώ $AM0$ (1353 W/m^2) στους 25°C είναι οι αντίστοιχες πρότυπες συνθήκες εκτός ατμόσφαιρας. Ως εκ τούτου, τα μόνα γνωστά δεδομένα για ένα φβ πλαίσιο είναι οι ονομαστικές τιμές των ηλεκτρικών του παραμέτρων, οι οποίες διαφέρουν από τις τιμές των ίδιων αυτών παραμέτρων όταν οι συνθήκες λειτουργίας μεταβάλλονται. Η μετατροπή των χαρακτηριστικών από ένα σύνολο συνθηκών σε ένα άλλο αποτελεί κύριο ζήτημα, καθώς απαιτείται ο προσδιορισμός της παραγόμενης ενέργειας μιας φβ εγκατάστασης σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, και όχι σε πρότυπες ή σε συνθήκες που επιτυγχάνονται σε εξειδικευμένα εργαστήρια.

Οι περισσότερες μέθοδοι μετατροπής σε αυθαίρετες συνθήκες βασίζονται στους ακόλουθους γενικούς κανόνες:

- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας και έχει μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία (χαμηλός θερμοκρασιακός συντελεστής).
- Η τάση ανοιχτοκύκλωσης έχει αρνητική εξάρτηση από τη θερμοκρασία και εξαρτάται λογαριθμικά από την ακτινοβολία.

Επιπλέον, μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη θερμοκρασία λειτουργίας ενός φβ στοιχείου, υφίσταται εξαιτίας της συσκευασίας στην οποία περιέχονται, της μεταγωγής θερμότητας και της ακτινοβολίας.

Το μοντέλο PSpice που χρησιμοποιείται για τις απαραίτητες προσομοιώσεις είναι βασισμένο στη μέθοδο μετατροπής του προτάθηκε από τον G. Blaesser, ύστερα από μακρά παρακολούθηση της συμπεριφοράς φβ συστημάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος μετασχηματίζει κάθε ζεύγος συντεταγμένων (I, V) σε ένα άλλο (I_r, V_r) σε πρότυπες συνθήκες και αντίστροφα, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις

$$I_r = I \frac{G}{G_r} \quad (5.25)$$

και

$$V_r = V + DV \quad (5.26)$$

Ο θερμοκρασιακός συντελεστής του ρεύματος αγνοείται και οι επιδράσεις της θερμοκρασίας ενσωματώνονται σε μια παράμετρο DV , που ορίζεται ως εξής:

$$DV = V_{ocr} + V_{oc} \quad (5.27)$$

Οι τιμές των ρευμάτων και των τάσεων κανονικοποιούνται με βάση τις

$$i_r = \frac{I_r}{I_{scr}} \quad i = \frac{I}{I_{sc}} \quad (5.28)$$

και

$$v_r = \frac{V_r}{V_{ocr}} \quad v = \frac{V}{V_{oc}} \quad (5.29)$$

Οι σχέσεις μεταξύ των κανονικοποιημένων αυτών τιμών είναι

$$i_r = i \quad (5.30)$$

και

$$v = \frac{v_r - DV}{1 - DV} \quad (5.31)$$

όπου

$$DV = \frac{DV}{V_{ocr}} \quad (5.32)$$

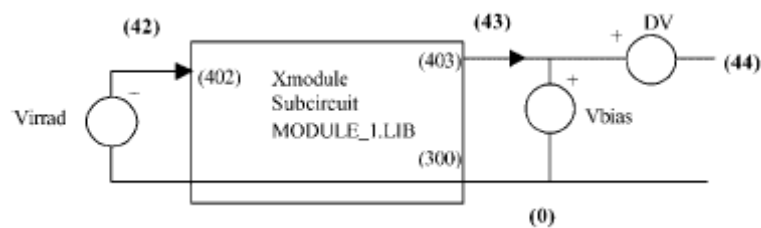
Οι εξισώσεις (5.30) και (5.31) αποτελούν τις εξισώσεις μετατροπής του ρεύματος και της τάσης αντίστοιχα. Επίσης, είναι απαραίτητη η μετατροπή του συντελεστή πλήρωσης, ο οποίος με βάση τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ως

$$FF = FF_r \frac{v_{mr} - Dv}{v_{mr}(1 - Dv)} \quad (5.33)$$

Η παράμετρος D_v έχει προκύψει από πληθώρα πειραματικών μετρήσεων για φβ πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου και προσεγγίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$D_v = 0.06 \ln \frac{G_r}{G} + 0.004(T_\alpha - T_r) + 0.12 \times 10^{-3} G \quad (5.34)$$

όπου T_α η θερμοκρασία περιβάλλοντος και T_r η θερμοκρασία λειτουργίας των φβ στοιχείων υπό πρότυπες συνθήκες (25°C). Το κυκλωματικό διάγραμμα που προκύπτει για τη μετατροπή σε αυθαίρετες συνθήκες όπως και το κύκλωμα μέτρησης δίνονται στο σχήμα 5.24. Στο σχήμα αυτό μια πηγή τάσης εξαρτώμενη από τάση συμπεριλαμβάνεται στο υπάρχον κύκλωμα υπολογισμού σε πρότυπες συνθήκες, προκειμένου να επιτευχθεί η μετατόπιση της τάσης που υπαγορεύεται από την εξίσωση (5.26), και η οποία απαιτείται για την επιδιωκόμενη μετάβαση σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας.



Σχήμα 5.24: Κύκλωμα μετατροπής σε αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογή, Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Εισαγωγή

Στα δύο προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν αναλυτικά και σε θεωρητικό κυρίως επίπεδο οι επιδράσεις της σκίασης και της ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκών σταθμών. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή σε ένα συγκεκριμένο τυπικό φβ σταθμό μεγέθους 1MW και παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου της Matlab.

6.1 ΕΙΣΟΔΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

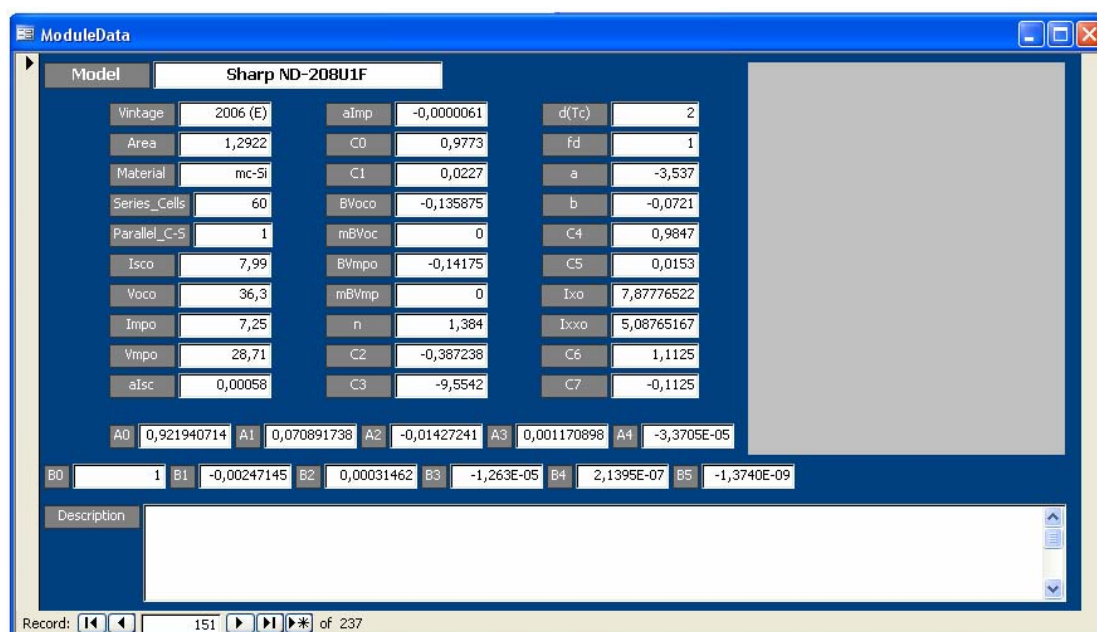
Για τη μελέτη και την παραμετρική διερεύνηση των επιδράσεων της σκίασης και της ρύπανσης γίνεται εφαρμογή του αναπτυχθέντος μοντέλου ενεργειακής απόδοσης [21] σε μια υποθετική περίπτωση ενός τυπικού φβ σταθμού μεγέθους 1MW. Ως δεδομένα εισόδου στο εν λόγω μοντέλο χρησιμοποιούνται:

- Μετρηθείσες διαθέσιμες χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων ωριαίων τιμών.
 - Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (σε kW/m^2)
 - Θερμοκρασία περιβάλλοντος (σε $^{\circ}\text{C}$)
 - Ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 m από το έδαφος (σε m/s)
 - Ατμοσφαιρική πίεση (σε mm Hg)
 - Βροχόπτωση (σε mm)
- Κατάλληλες γωνίες για τον προσδιορισμό των:
 - Γεωγραφική τοποθεσία της περιοχής που βρίσκεται ο φβ σταθμός.
Γεωγραφικό πλάτος φ (στη συγκεκριμένη περίπτωση, $\varphi = 37.42^{\circ}$)
Γεωγραφικό μήκος L_{loc} (στη συγκεκριμένη περίπτωση, $L_{loc} = 22.11^{\circ}$)
 - Θέση του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο.
Γωνία κλίσης β (στη συγκεκριμένη περίπτωση, $\beta = 30^{\circ}$)
Γωνία αζιμουθίου γ (στη συγκεκριμένη περίπτωση, $\gamma = 0^{\circ}$)
- Παράμετροι απόδοσης πλαισίου που περιέχονται στη βάση δεδομένων της Sandia [19] (για τις απαραίτητες προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το πλαίσιο με αύξοντα αριθμό 151, της εταιρίας Sharp τύπου ND-208U1F. Αναλυτικότερες πληροφορίες δίνονται στη συνέχεια).
- Λοιπά απαραίτητα στοιχεία.
 - Τοπική ωρολογιακή ζώνη αριστερά / δεξιά του GMT (για την Ελλάδα + 2 ώρες)
 - Συντελεστής ανάκλασης επιφάνειας τοποθέτησης των συλλεκτών ρ_g (στη συγκεκριμένη περίπτωση, $\rho_g = 0.24$)
- Συγκρότηση των φβ συστοιχιών και σύνθεση του φβ σταθμού.
 - Φβ συστοιχία: M_p παράλληλες ακολουθίες (στη συγκεκριμένη περίπτωση $M_p=4$)
 M_s πλαίσια σε σειρά ανά ακολουθία (στη συγκεκριμένη περίπτωση, $M_s = 21$)
 - Φβ σταθμός: N_{row} σειρές συστοιχιών (στη συγκεκριμένη περίπτωση, $N_{row} = 9$)
 N_{array} συστοιχίες ανά σειρά (στη συγκεκριμένη περίπτωση, $N_{array} = 7$)

6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ

Για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης λαμβάνεται η υποθετική περίπτωση ενός τυπικού φβ σταθμού μεγέθους 1MW, η σύνθεση του οποίου περιγράφεται με κλιμακωτό τρόπο ακολούθως.

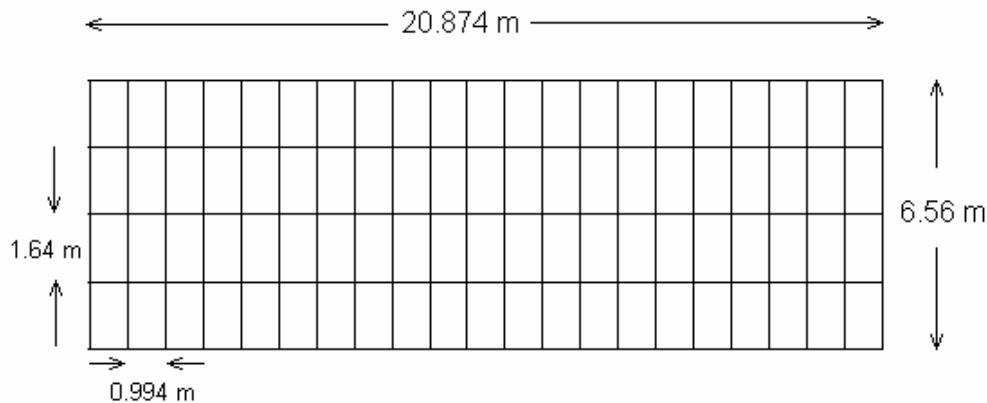
Όπως προαναφέρθηκε, θεωρείται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων τύπου Sharp ND-208U1F, ονομαστικής ισχύος 208 Wp. Το συγκεκριμένο φβ πλαίσιο αποτελείται από 60 ηλιακά στοιχεία σε σειρά, τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Si). Έχει διαστάσεις 1640mm×994mm×46mm και διαθέτει μία δίοδο bypass προστασίας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά καθώς και όλοι οι απαραίτητοι συντελεστές – παράμετροι απόδοσης του εν λόγω πλαισίου που χρησιμοποιούνται από το ενεργειακό μοντέλο για την εκτέλεση των απαραίτητων προσομοιώσεων, φαίνονται παρακάτω (όπως δίνεται στην αντίστοιχη καταχώρηση με αύξοντα αριθμό 151 στη βάση δεδομένων της Sandia).



Σχήμα 6.1: Καταχώριση φβ πλαισίου τύπου Sharp ND-208U1F στη βάση δεδομένων της Sandia

Στην εν λόγω βάση δεδομένων, που περιέχει το παραπάνω σύνολο συντελεστών, οι τέσσερις βασικές παράμετροι απόδοσης στις πρότυπες συνθήκες αναφοράς (STC) είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοιχτοκύκλωσης, το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος και η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος, οι οποίες συμβολίζονται I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} και V_{mp} αντίστοιχα. Η ύπαρξη του συμβόλου “(E)” στη στήλη “Vintage” της συγκεκριμένης καταχώρησης υποδηλώνει ότι οι τιμές για τις παραπάνω τέσσερις παραμέτρους προέρχονται από το αντίστοιχο φύλλο προδιαγραφών (datasheet) του κατασκευαστή. Οι υπόλοιποι, εκτός αυτών των τεσσάρων παραμέτρων, συντελεστές έχουν βασιστεί σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών της Sandia, όπως θερμοκρασιακοί συντελεστές, συντελεστές ρεύματος και τάσης συναρτήσεως της ακτινοβολίας, συντελεστές φάσματος και συντελεστές γωνίας πρόσπτωσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υποτίθεται η ανάπτυξη φβ συστοιχιών, οι οποίες διαθέτουν 4 σειρές των 21 πλαισίων ανά σειρά. Τα πλαίσια σε καθμία συστοιχία είναι διατεταγμένα με κάθετο προσανατολισμό (“portrait”), έχουν δηλαδή τη μικρή τους διάσταση παράλληλα προς το έδαφος (Σχήμα 6.2). Προκύπτουν λοιπόν συστοιχίες με συνολικό αριθμό πλαισίων $4 \times 21 = 84$ και διαστάσεις $20874\text{mm} \times 6560\text{mm}$, όπως φαίνεται παραστατικά και στο ακόλουθο σχήμα.



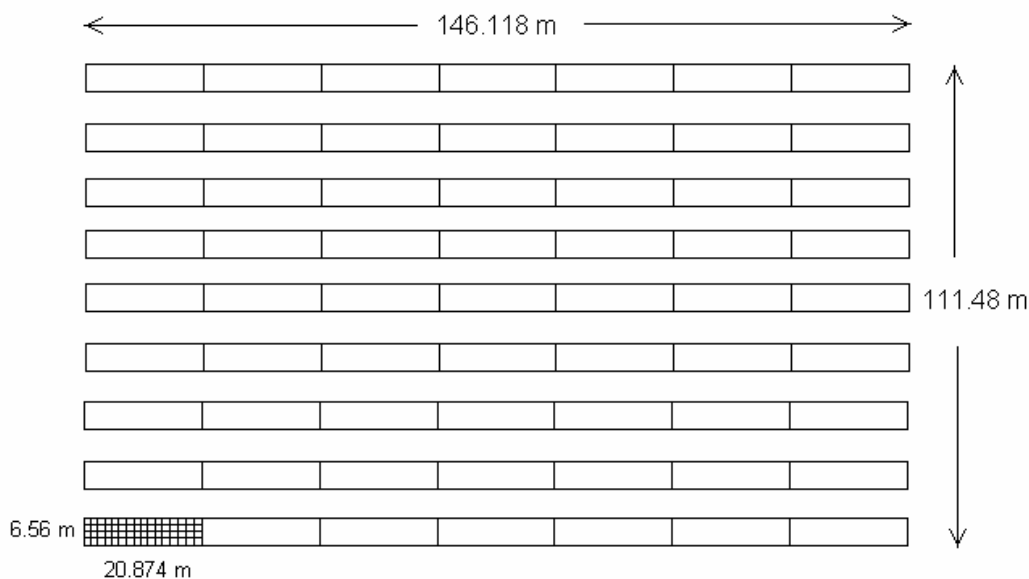
Σχήμα 6.2: Διαστάσεις φ/β συστοιχίας

Επιπλέον, οι συστοιχίες τοποθετούνται στη διαθέσιμη προς εγκατάσταση έκταση με νότιο γεωγραφικό προσανατολισμό (μηδενική γωνία αζιμουθίου) και κλίση 30° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, όπως σημειώνεται και στην προηγούμενη ενότητα. Μια τέτοια διάταξη εξασφαλίζει, ως γνωστόν, τη βέλτιστη ηλιακή απολαβή και κατά συνέπεια τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση σε ετήσια βάση για τη γεωγραφική θέση του συγκεκριμένου σταθμού. Η κατακόρυφη απόσταση (ύψος H στο σχήμα 5.7) του προηγούμενου κεφαλαίου) μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου σημείου της συστοιχίας ισούται με $6.56 \times \sin 30^\circ = 3.28$ m, ενώ η κατάληψη χώρου κατά τον άξονα B-N ανέρχεται σε $6.56 \times \cos 30^\circ = 5.681$ m.

Η απόσταση D μεταξύ των διαδοχικών σειρών φβ συστοιχιών στον άξονα B-N, η οποία καθορίζεται άμεσα από το (κάθετο) ύψος H της συστοιχίας, επιλέγεται τέτοια ώστε να αποφεύγονται σκιάσεις στις επιφάνειες των φβ πλαισίων κατά το δυνατόν περισσότερο στη διάρκεια της ημέρας. Σαν μια πρώτη εκτίμηση αυτής της απόστασης λαμβάνεται ενδεικτικά η εμπειρική σχέση $D = 2.3 \times H \Rightarrow D = 7.544$ m. Βέβαια, όπως προκύπτει από προηγηθείσα ανάλυση και πρόκειται να φανεί στη συνέχεια, η σκίαση των φβ συστοιχιών δεν είναι δυνατό να αποφευχθεί πλήρως, ιδιαίτερα σε ακραίες τιμές της ζενιθιακής και της αζιμουθιακής γωνίας του ήλιου (π.χ. σε πρωινές και απογευματινές ώρες του χειμώνα). Έτσι, η επιλογή μιας κατάλληλης απόστασης αποτελεί έναν συμβιβασμό μεταξύ των απαιτήσεων για ελαχιστοποίηση των σκιάσεων από τη μια πλευρά, και της κατάληψης χώρου από την άλλη. Προσομοιώσεις που ακολουθούν έχουν σαν στόχο την περαιτέρω διερεύνηση του εν λόγω φαινομένου για την ορθότερη επιλογή μιας τέτοιας απόστασης.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η διάταξη του προς εξέταση φβ σταθμού (σε κάτοψη), ο οποίος συντίθεται από 9 διαδοχικές σειρές φβ συστοιχιών, με 7 συστοιχίες ανά σειρά. Για τη σύνδεση με το τοπικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται αντιστροφέας του 1 MW της εταιρίας SMA τύπου SunnyCentral SC1000MV, με “παράθυρο λειτουργίας MPPT” που καθορίζεται από ένα ανώτατο όριο dc ισχύος εισόδου, ίσο με 1.160 kWp, και εύρος τάσεων 450V έως 820V, όπως

δίνετα από το φύλλο προδιαγραφών (datasheet) του κατασκευαστή. Ο αντιστροφέας αυτός εξυπηρετεί λοιπόν συνολικά $9 \times 7 = 63$ φβ συστοιχίες, ή ισοδύναμα $63 \times 84 = 5292$ πλαίσια, ολικής εγκατεστημένης ισχύος $5292 \times 0.208 = 1100.736$ kWp και συνολικής επιφάνειας φβ συλλεκτών $5292 \times (1.64 \times 0.994) = 8626.8$ m². Οι ακολουθίες (strings) των 21 εν σειρά πλαισίων είναι παράλληλα συνδεδεμένες ανά 4 στο εσωτερικό μιας φ/β συστοιχίας (ονομαστικής ισχύος $84 \times 0.208 = 17.472$ kWp) καθώς επίσης και παράλληλα προς τις ακολουθίες όλων των συστοιχιών. Τέλος, οι φβ συστοιχίες διατάσσονται σε σειρές κατά τον άξονα Α-Δ ενώ για λόγους απλούστευσης, όπως μπορεί να διαπιστωθεί ακολούθως, δεν έχει συμπεριληφθεί ο αντιστροφέας του 1 MW (δε λαμβάνεται υπόψη τυχόν σκίαση των φβ συλλεκτών που μπορεί να οφείλεται σε αυτόν).



Σχήμα 6.3: Κάτοψη φ/β σταθμού

6.3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

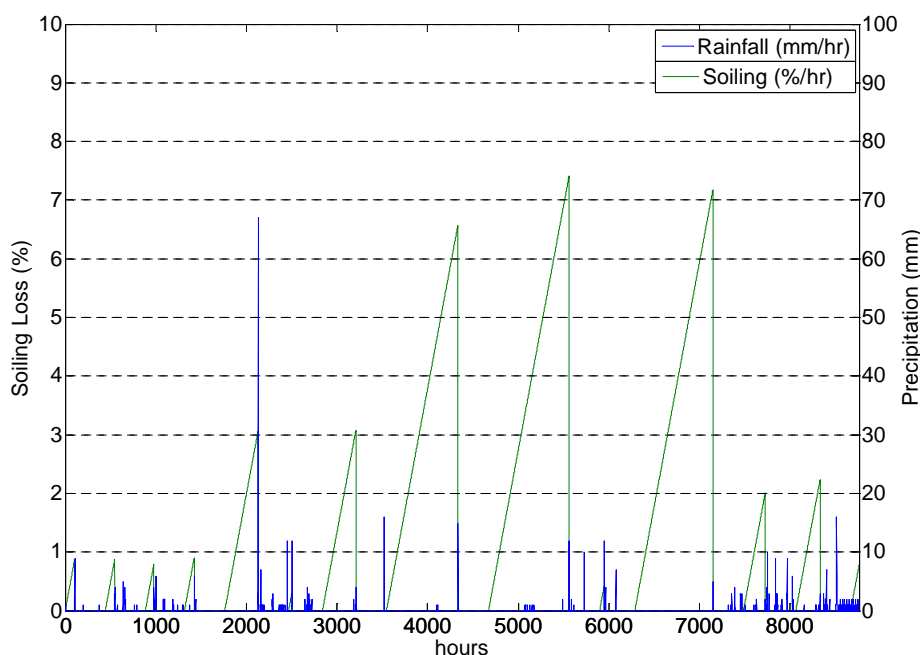
Με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης που προηγήθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο και το γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης των απωλειών ενέργειας ενός φβ σταθμού – εξαιτίας της ρύπανσης – που αναπτύχθηκε σε αυτό, εκτελείται μια σειρά προσομοιώσεων με τη βοήθεια του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, η λογική ενός τέτοιου γραμμικού μοντέλου, σύμφωνα με την οποία οι απώλειες λόγω ρύπανσης μειώνονται γραμμικά στις βροχερές περιόδους και αυξάνονται σταδιακά κατά τη διάρκεια των περιόδων ξηρασίας, ενσωματώνεται στον αρχικό κώδικα (σε Matlab) του κύριου προγράμματος του ενεργειακού μοντέλου. Αρχικά, λαμβάνονται οι εξής τιμές για τα τρία θεμελιώδη στοιχεία του γραμμικού μοντέλου:

1. Ο ρυθμός ρύπανσης (soiling rate) τίθεται ίσος με 0.2% ανά ημέρα απουσία βροχής, τιμή που, όπως διαπιστώνεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, ισχύει ικανοποιητικά κατά μέσο όρο για περιοχές όπου επικρατεί ξηρό κλίμα και υπάρχουν περίοδοι κατά τη διάρκεια του έτους με αισθητά μειωμένη βροχόπτωση (dry seasons) για κάποιους μήνες.
2. Το κατώφλι καθαρισμού (cleaning threshold) λαμβάνει τη συμβατική τιμή των 5 mm, επαρκή ποσότητα για τον πλήρη καθαρισμό των φβ συστημάτων, όπως έχει άλλωστε υποστηριχθεί κατά κόρον και σε προηγούμενες μελέτες.
3. Η περίοδος χάριτος (grace period length) τίθεται ίση με 14 ημέρες, με την υπόθεση ότι το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται ο προς εξέταση φ/β σταθμός χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Βέβαια, όπως έχει ήδη γίνει σαφές σε προηγηθείσα ανάλυση, η ρύπανση είναι δυνατόν να διαφοροποιείται ακόμη και στην ίδια τοποθεσία, από χρόνο σε χρόνο. Με άλλα λόγια, οι τιμές που λαμβάνουν τα τρία παραπάνω θεμελιώδη συστατικά του γραμμικού μοντέλου μεταβάλλονται συναρτήσει των κλιματολογικών συνθηκών και των ιδιαιτεροτήτων χαρακτηριστικών της εκάστοτε θέσης εγκατάστασης. Οι συγκεκριμένες τιμές που έχουν δοθεί είναι καθαρά ενδεικτικές και συνεπώς, μια παραμετρική διερεύνηση των εν λόγω παραγόντων που ακολουθεί στη συνέχεια, βοηθάει στην κατανόηση της επίδρασής τους στην ενεργειακή απόδοση του φβ σταθμού.

Με την ανάθεση των παραπάνω τιμών, το προκύπτον γραμμικό μοντέλο απωλειών ρύπανσης εφαρμόζεται στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης, το οποίο, ως γνωστόν, χειρίζεται ωριαίες τιμές μετεωρολογικών δεδομένων και βροχόπτωσης για την πρόβλεψη της παραγωγής. Έτσι το πλήρες μοντέλο – συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης της ρύπανσης – υπολογίζει τον “παράγοντα ρύπανσης” (Soiling Factor, SF) ανά ώρα και επί τοις εκατό. Ο παράγοντας αυτός υπεισέρχεται στον υπολογισμό της (ολικής) ενεργού ακτινοβολίας, δηλαδή της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πλαισίου και στην οποία τα φβ στοιχεία ουσιαστικά αποκρίνονται, αφού έχουν ληφθεί υπόψη, εκτός της ρύπανσης των πλαισίων, οι επιδράσεις του ηλιακού φάσματος και οι οπτικές απώλειες εξαιτίας της γωνίας πρόσπτωσης. Με αποτέλεσμα η ηλιακή απολαβή να μειώνεται και λιγότερη παραγόμενη ισχύς να καταλήγει στην έξοδο των φβ συστοιχιών.

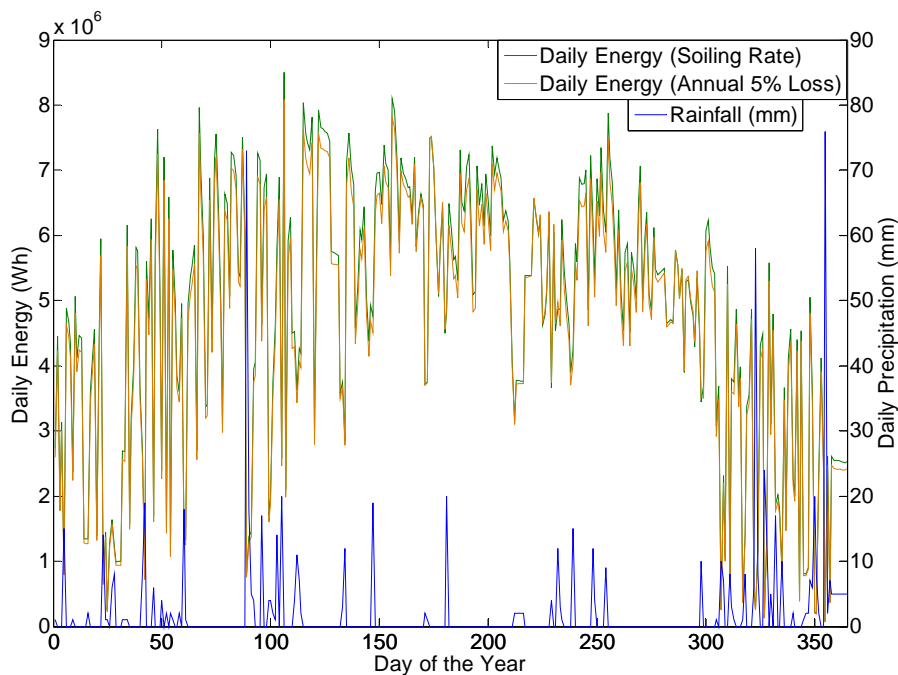
Στο σχήμα 6.4 φαίνεται η υλοποίηση του γραμμικού μοντέλου απωλειών ρύπανσης για τα συγκεκριμένα διαθέσιμα δεδομένα βροχόπτωσης και η ωριαία μεταβολή του παράγοντα SF κατά τη διάρκεια ενός έτους, όπως προκύπτουν με τη βοήθεια του ενεργειακού μοντέλου.



Σχήμα 6.4: Ωριαίος παράγοντας ρύπανσης SF (%) για ένα τυπικό έτος

Για το συγκεκριμένο έτος υπό μελέτη (2001), η περίοδος ξηρασίας με τη μεγαλύτερη διάρκεια εμφανίζεται το καλοκαίρι (συγκεκριμένα από 14/7 μέχρι 20/8, δηλαδή συνολικά 37 ημέρες) και η μέγιστη τιμή που λαμβάνει ο παράγοντας SF για όλο το έτος και για τη συγκεκριμένη περίοδο ισούται με 7.4%.

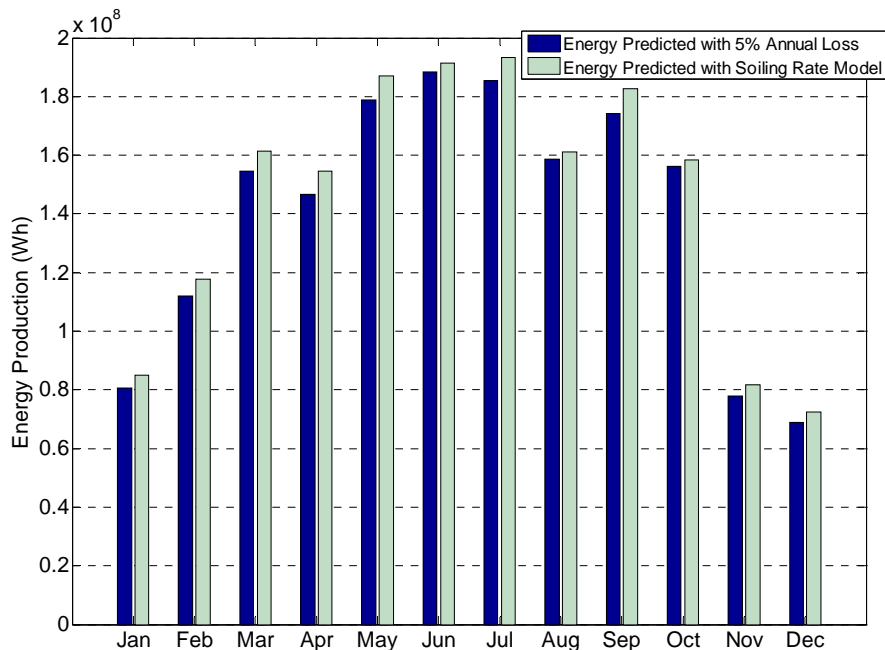
Προσομοίωση του εν λόγω μοντέλου σε ημερήσια βάση δίνει μια συνοπτικότερη εικόνα της συμπεριφοράς του συστήματος και διευκολύνει την επόπτευση των επιδράσεων της ρύπανσης στην απόδοση του φβ σταθμού, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα, όπως προκύπτει και από το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 6.5: Ημερήσια ενεργειακή παραγωγή φβ σταθμού για ένα τυπικό έτος

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα ενεργειακής παραγωγής είναι εμφανής η τάση γραμμικής μείωσης της απόδοσης σε κάποια χρονικά διαστήματα χαμηλής βροχόπτωσης ή πλήρους απουσίας της. Κάτι τέτοιο έρχεται σε συμφωνία με τη θεώρηση ενός γραμμικού μοντέλου μείωσης των απωλειών λόγω ρύπανσης, όπως ισχύει και στην παρούσα μελέτη. Βέβαια, για λόγους σύγκρισης δίνεται και η ημερήσια μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας στην περίπτωση θεώρησης σταθερού παράγοντα ρύπανσης SF καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ίσου με 5%. Πρόκειται για μια κλασική θεώρηση, η οποία υιοθετείται συχνά στην πράξη. Σε αυτήν την περίπτωση, όπως μπορεί να φανεί, οι προβλεπόμενες ημερήσιες τιμές που υπολογίζονται από το μοντέλο είναι κατά κανόνα υψηλότερες σε σχέση με τη θεώρηση μιας γραμμικής προσέγγισης.

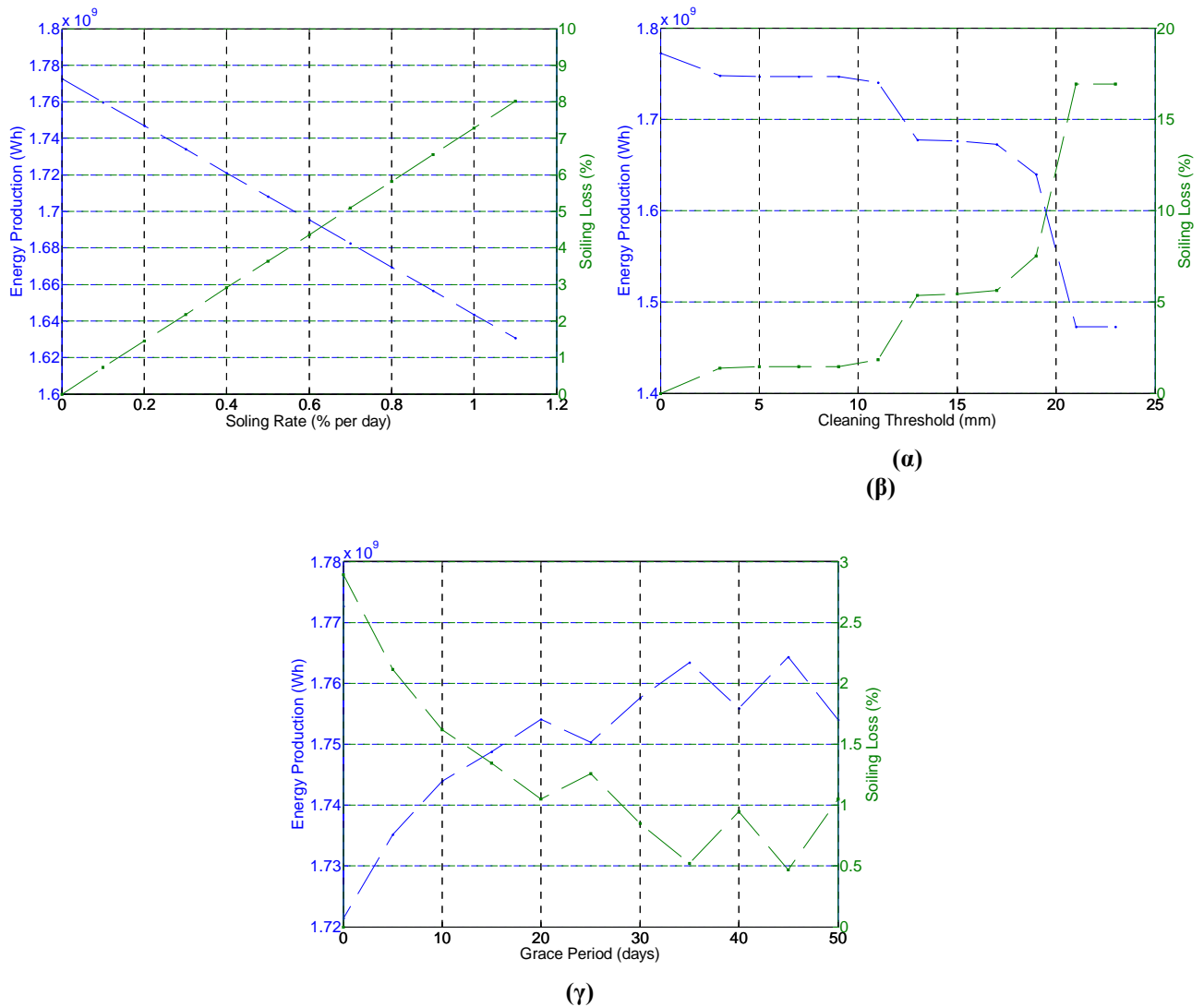
Η σαφώς μειωμένη παραγωγή ή ισοδύναμα οι αυξημένες απώλειες εξαιτίας τη ρύπανσης που προκύπτουν στην περίπτωση σταθερού παράγοντα SF (ίσου με 5% ετησίως), σε σύγκριση με ένα γραμμικό μοντέλο απωλειών, φαίνονται πιο εύκολα στο ιστόγραμμα που ακολουθεί, το οποίο δίνει τις εκτιμήσεις της μηνιαίας ενεργειακής απόδοσης, για ένα τυπικό φβ σταθμό μεγέθους 1 MW,



Σχήμα 6.6: Μηνιαία ενεργειακή παραγωγή με χρήση μοντέλου γραμμικής προσέγγισης απωλειών ρύπανσης ή σταθερού παράγοντα SF (ίσου με 5% ετησίως)

Όπως φαίνεται, η παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα με βάση το σταθερό ετήσιο παράγοντα ρύπανσης είναι πάντα μικρότερη από αυτή που προκύπτει με χρήση γραμμικής προσέγγισης απωλειών. Από τα προηγούμενα δύο σχήματα συμπεραίνεται λοιπόν ότι η απλοϊκή θεώρηση ενός παράγοντα απωλειών ρύπανσης SF, σταθερού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, έχει σαν αποτέλεσμα στη συγκεκριμένη περίπτωση και για τη δεδομένη χρονοσειρά βροχόπτωσης αρκετά αυξημένες απώλειες, που μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές συνθήκες. Ειδικότερα, με την εφαρμογή του γραμμικού μοντέλου υπολογίζεται μια απώλεια στην παραγόμενη ενέργεια ίση με 1.5% περίπου ετησίως, τιμή αρκετά χαμηλότερη από αυτή της κλασικής θεώρησης.

Στη συνέχεια εξετάζονται παραμετρικά οι μεταβολές της παραγόμενης ενέργειας και των απωλειών αυτής λόγω ρύπανσης των φβ συστοιχιών συναρτήσει των τριών θεμελιωδών στοιχείων του γραμμικού μοντέλου (ρυθμός ρύπανσης, κατώφλι καθαρισμού και περίοδος χάριτος), προκειμένου να καταστεί σαφής η επίδραση του καθενός παράγοντα ξεχωριστά στην απόδοση του φβ σταθμού.



Σχήμα 6.7: Απώλειες ρύπανσης συναρτήσει (α) ρυθμού ρύπανσης, (β) κατώφλιου καθαρισμού και (γ) περιόδου χάριτος

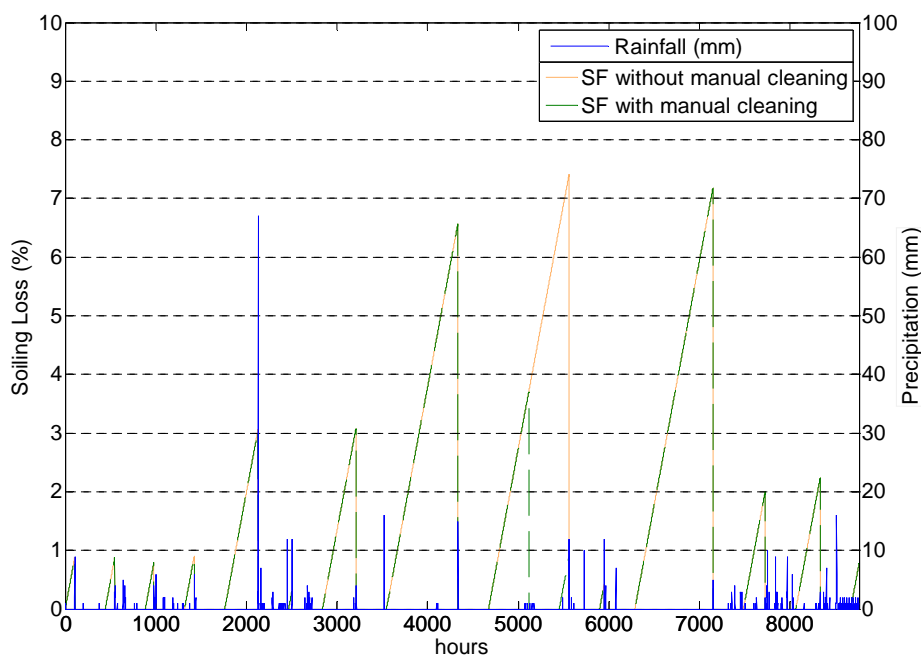
α) Αύξηση του ρυθμού ρύπανσης έχει σαν αποτέλεσμα μείωση της παραγόμενης από το φβ σταθμό ενέργειας και, αντίστοιχα, αύξηση των ετήσιων απωλειών λόγω ρύπανσης. Η αύξηση του ρυθμού ρύπανσης ισοδυναμεί με αύξηση της κλίσεως του ωριαίου παράγοντα SF (σχήμα 6.4) και, όπως είναι αναμενόμενο, οι μεταβολές που προκαλούνται είναι εντελώς ανάλογες. Για ημερήσιο ρυθμό ρύπανσης κοντά στο 1% οι απώλειες στην ενέργεια φτάνουν μέχρι και 8% ετησίως.

β) Αυξάνοντας την τιμή του κατώφλιου καθαρισμού περισσότερη ποσότητα βροχής απαιτείται κάθε φορά για τον πλήρη καθαρισμό των συστοιχιών του φβ σταθμού, με αποτέλεσμα να αυξάνονται σε γενικές γραμμές οι απώλειες λόγω ρύπανσης και, αντίστοιχα, να μειώνεται η παραγόμενη ενέργεια. Η συμπεριφορά που παρατηρείται εξαρτάται κυρίως από την υπάρχουσα χρονοσειρά δεδομένων βροχόπτωσης.

γ) Αύξηση της περιόδου χάριτος αντιστοιχεί σε αύξηση του αριθμού των ημερών κατά τη διάρκεια των οποίων οι συστοιχίες του φβ σταθμού παραμένουν σχετικά καθαρές, μετά το τελευταίο συμβάν βροχόπτωσης που οδηγεί στον πλήρη καθαρισμό των συστοιχιών. Η ιδιάζουσα συμπεριφορά που παρατηρείται σε αυτήν την περίπτωση (αυξομείωση απωλειών και, αντίστοιχα, ενέργειας) εξαρτάται και πάλι από τη διαθέσιμη χρονοσειρά βροχόπτωσης. Μια τέτοια συμπεριφορά εξηγείται λαμβάνοντας υπόψη τη λογική με την οποία υλοποιείται το γραμμικό μοντέλο απωλειών, βασισμένη στην έννοια του συμβάντος βροχόπτωσης. Σύμφωνα με αυτή, καθαρισμός των φβ συστοιχιών επέρχεται τη χρονική στιγμή στην οποία συγκεντρώνεται η απαιτούμενη ποσότητα βροχής (κατώφλι) εντός διαστημάτων συνεχούς βροχόπτωσης. Η εκάστοτε χρονική στιγμή μεταβάλλεται συναρτήσει της μεταβολής της περιόδου χάριτος.

Τέλος, με βάση τα παραπάνω, διεξάγεται μια στοιχειώδης οικονομική ανάλυση για μια πρώτη εκτίμηση του οικονομικού αντίκτυπου που μπορεί να έχει η ρύπανση των συστοιχιών του εξεταζόμενου φβ σταθμού. Επιδίωξη της εν λόγω ανάλυσης αποτελεί ο υπολογισμός της διαφοράς στην ετήσια ενέργεια που παράγεται από το συγκεκριμένο φβ σταθμό κάτω από δύο διαφορετικές συνθήκες καθαρισμού των φβ συστοιχιών: είτε χειροκίνητα (μέσω κάποιου συνεργείου καθαρισμού) είτε όχι.

Προκειμένου να καταστεί εμφανής κατά το δυνατόν περισσότερο η παραπάνω διαφορά, επιλέγεται η περίοδος ξηρασίας με τη μεγαλύτερη διάρκεια (από 14/7 μέχρι 20/8 όπως έχει ήδη αναφερθεί), όπου ο παράγοντας SF λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του και υποτίθεται ότι επέρχεται χειροκίνητος καθαρισμός των συστοιχιών στο μέσο αυτής της περιόδου (γύρω στις 2/8). Καθαρισμός των συστοιχιών του φβ σταθμού (χειροκίνητος ή μη) ισοδυναμεί με ταυτόχρονο μηδενισμό του παράγοντα ρύπανσης SF και, ως εκ τούτου, θεωρείται σε αυτή την περίπτωση ότι ο παράγοντας SF μηδενίζεται στο μέσο (ιδανικά) του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Κάτι τέτοιο φαίνεται και σχηματικά στο ακόλουθο διάγραμμα, όπου δίνεται η ωριαία μεταβολή του παράγοντα ρύπανσης για τις δύο προαναφερθείσες συνθήκες καθαρισμού.



Σχήμα 6.8: Ωριαίος παράγοντας ρύπανσης SF (%) για δύο διαφορετικές συνθήκες καθαρισμού (χειροκίνητος ή μη)

Η μεταβολή του παράγοντα SF και στις δύο περιπτώσεις είναι παρόμοια, με εξαίρεση βέβαια το χρονικό διάστημα εντός του οποίου διενεργείται χειροκίνητος καθαρισμός των φβ συστοιχιών. Έτσι η διαφορά στην παραγόμενη ενέργεια θα οφείλεται στη διαφορετική παραγωγή που συντελείται στο παραπάνω διάστημα. Με αναφορά την ιδανική περίπτωση όπου δεν υφίσταται η επίδραση της ρύπανσης (μηδενικός παράγοντας SF), στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι τιμές της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής και των απωλειών εξαιτίας της ρύπανσης για τον υποτιθέμενο φβ σταθμό, όπως υπολογίζονται και για τις τρεις προαναφερθείσες περιπτώσεις.

Καθαρισμός	Παραγόμενη Ενέργεια (MWh)	Απώλεια Ενέργειας λόγω Ρύπανσης (MWh)	Απώλεια Ενέργειας λόγω Ρύπανσης (%)
–	1467.8	0	0.0%
Ναι	1451.2	16.6	1.1%
Όχι	1446.4	21.4	1.5%

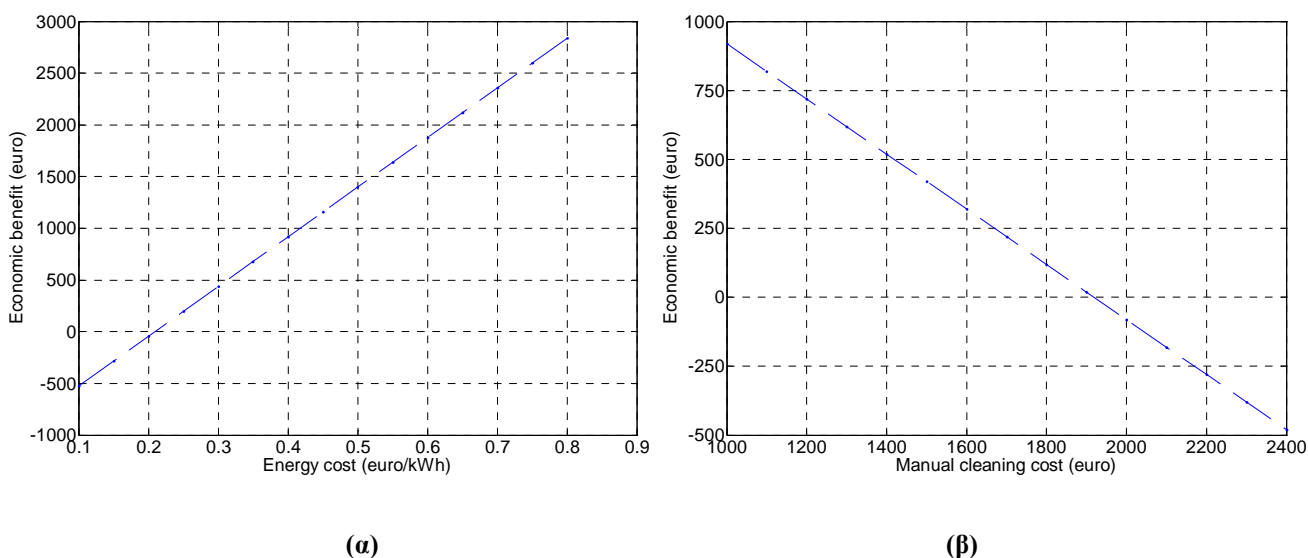
Πίνακας 6.1: Παραγόμενη ενέργεια και απώλειες λόγω ρύπανσης

Με το χειροκίνητο καθαρισμό των συστοιχιών, ο φβ σταθμός αποδίδει, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, σχεδόν 4.8 MWh περισσότερες σε σχέση με την περίπτωση που δεν υφίσταται κανένας καθαρισμός.

Για τον υπολογισμό του οικονομικού κέρδους που είναι δυνατόν να προκύψει με τη διενέργεια χειροκίνητου καθαρισμού, είναι απαραίτητη η γνώση του κόστους ενέργειας (δηλαδή της τιμής της kWh) και του κόστους καθαρισμού στη συγκεκριμένη περιοχή. Για παράδειγμα, θεωρώντας ενδεικτικά ότι το κόστος καθαρισμού ενός τέτοιου σταθμού ανέρχεται σε 1000 €, για κόστος ενέργειας 0.4€/kWh προκύπτει κέρδος της τάξης των 900 € περίπου. Με βάση λοιπόν το συγκεκριμένο κόστος καθαρισμού και ενεργειακό κέρδος, συμπεραίνεται ότι είναι οικονομικά συμφέρων ο καθαρισμός των φβ συστημάτων σε αυτή την περιοχή, όταν το κόστος αυτό δεν είναι μεγαλύτερο από το κέρδος που προκύπτει από την πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται (στη συγκεκριμένη περίπτωση 4.8 MWh περισσότερες, όπως προαναφέρθηκε).

Για την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης του κόστους ενέργειας και καθαρισμού στο οικονομικό κέρδος μελετάται η μεταβολή αυτού με:

- αύξηση της τιμής της kWh για κόστος καθαρισμού ίσο με 1000 €
- αύξηση του κόστους καθαρισμού για κόστος ενέργειας ίσο με 0.4 €/kWh



Σχήμα 6.9: Οικονομικό κέρδος συναρτήσει (α) κόστους ενέργειας – τιμή kWh και (β) κόστος καθαρισμού

Οι ακριβείς τιμές που προκύπτουν βάσει των δύο αυτών διαγραμμάτων δίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.

Τιμή kWh (€/kWh)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
Οικονομικό Κέρδος (€)	-520.23	-280.35	-40.47	199.41	439.30	679.18	919.06
	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
(α)	1158.94	1398.83	1638.71	1878.59	2118.48	2358.36	2598.24

Κόστος καθαρισμού (€)	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
Οικονομικό Κέρδος (€)	919.06	819.06	719.06	619.06	519.06	419.06	319.06
	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
(β)	219.06	119.06	19.06	-80.94	-180.94	-280.94	-380.94

Πίνακας 6.2: Οικονομικό κέρδος συναρτήσει (α) κόστους ενέργειας-τιμή kWh και (β) κόστος καθαρισμού

Όπως μπορεί να φανεί, ο καθαρισμός του φβ σταθμού γίνεται οικονομικά συμφέρων για:

- α) μια τιμή ενέργειας που κείται εντός του διαστήματος 0.2 με 0.25 €/kWh και άνω
- β) ένα κόστος καθαρισμού που κείται εντός του διαστήματος 2000 με 1900 € και κάτω

Βέβαια, όπως τονίζεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, το κόστος καθαρισμού, αλλά και η τιμή της kWh, διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία και τον τύπο περιβάλλοντος. Ωστόσο, στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, μια τέτοια οικονομικής φύσεως ανάλυση, σαν αυτή που προηγήθηκε, σκοπό έχει να παρουσιάσει τα πιθανά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την επιλογή ενός χειροκίνητου καθαρισμού, ιδιαίτερα δε όταν οι απώλειες λόγω ρύπανσης ξεπερνούν κάποιο συγκεκριμένο όριο και είναι πλέον οικονομικά συμφέρουσα αυτή η επιλογή.

6.4 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Για τη μελέτη του φαινομένου της σκίασης στην υποθετική περίπτωση ενός τυπικού φβ σταθμού μεγέθους 1MW, εκτελείται μια σειρά προσομοιώσεων με τη βοήθεια του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης.

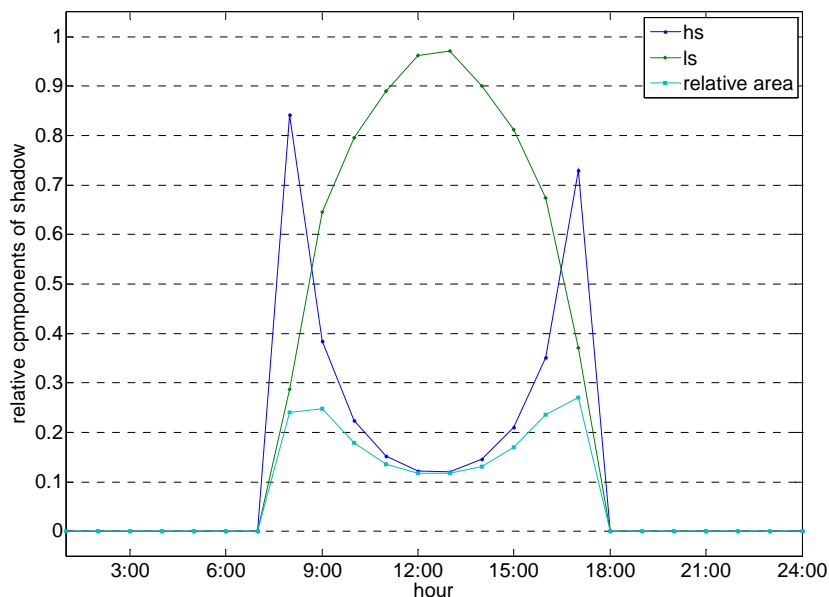
Αρχικά, παρατίθεται μια γεωμετρική ανάλυση της σκίασης που προκαλείται στις επιφάνειες των φβ συλλεκτών διατεταγμένων σε διαδοχικές σειρές και διερευνώνται οι επιδράσεις της απόστασης μεταξύ των σειρών και του αριθμού αυτών στην ενεργειακή ηλιακή απολαβή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν για την ετήσια ενεργειακή απόδοση του προς εξέταση φβ σταθμού, τα όποια εξάγονται με τη βοήθεια των ποσοστών μείωσης της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου των φβ συστοιχιών. Τα εν λόγω ποσοστά υπολογίζονται έπειτα από εκτέλεση των απαραίτητων προσομοιώσεων με το λογισμικό PSpice και τα αποτελέσματα μιας τέτοιας ανάλυσης ακολουθούν στο τελευταίο μέρος της παρούσας ενότητας.

6.4.1 Γεωμετρία και Μεταβολές Σκίασης στην Επιφάνεια φβ Συλλεκτών

Με βάση τη γεωμετρική ανάλυση που προηγήθηκε στο πέμπτο κεφάλαιο, στην οποία εξήχθησαν αναλυτικές εκφράσεις των συνιστωσών της σκιάς, μελετώνται σε πρώτη φάση οι μεταβολές της σκίασης στην επιφάνεια των φβ συλλεκτών. Σκίαση, στην οποία όπως αναφέρθηκε στο εν λόγω κεφάλαιο, είναι πιθανό να υπόκεινται – σε μεγάλης κλίμακας φβ συστήματα όπως και σε άλλες περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης – οι διατεταγμένοι σε σειρές φβ συλλέκτες από γειτονικές τους σειρές κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις προσδιορισμού του σχετικού ύψους, μήκους και εμβαδού της σκιάς (για ένα συλλέκτη προσανατολισμένο στο νότο), συμπεριλαμβάνονται στον αρχικό κώδικα (σε Matlab) του κύριου προγράμματος του ενεργειακού μοντέλου. Για τη δεδομένη σύνθεση του προς εξέταση φβ σταθμού, όπως περιγράφεται σε προηγούμενη ενότητα, και για απόσταση D μεταξύ των διαδοχικών σειρών συλλεκτών, που καθορίζεται με βάση την εμπειρική σχέση [14] $D = 1.35 \times H \Rightarrow D = 4.45$ m, οι μεταβολές των σχετικών μεγεθών της σκιάς κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του έτους (συγκεκριμένα την 1/1/2001) έχουν ως εξής:

(Σημειώνεται ότι η επιλογή της συγκεκριμένης απόστασης μεταξύ των σειρών καθώς και της κατάδειξης του φαινομένου της σκίασης στη διάρκεια μιας τυπικής χειμωνιάτικης ημέρας έχει γίνει σκόπιμα, προκειμένου να καταστεί πιο εύκολα εμφανής η επίδραση της σκίασης)

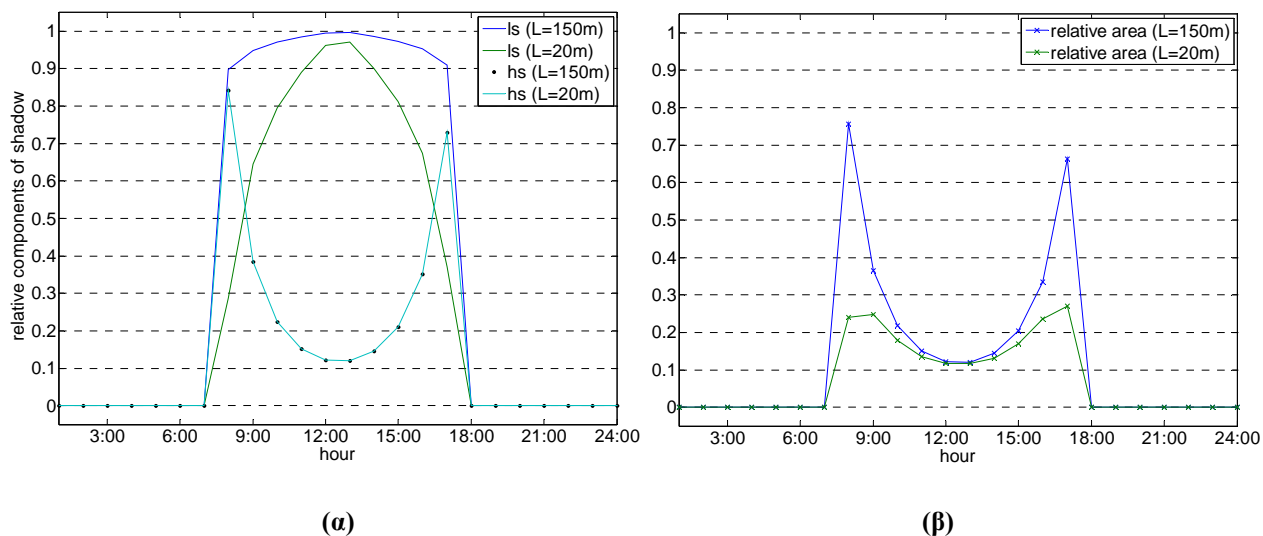


Σχήμα 6.10: Μεταβολή συνιστωσών σκιάς μια τυπική ημέρα του έτους

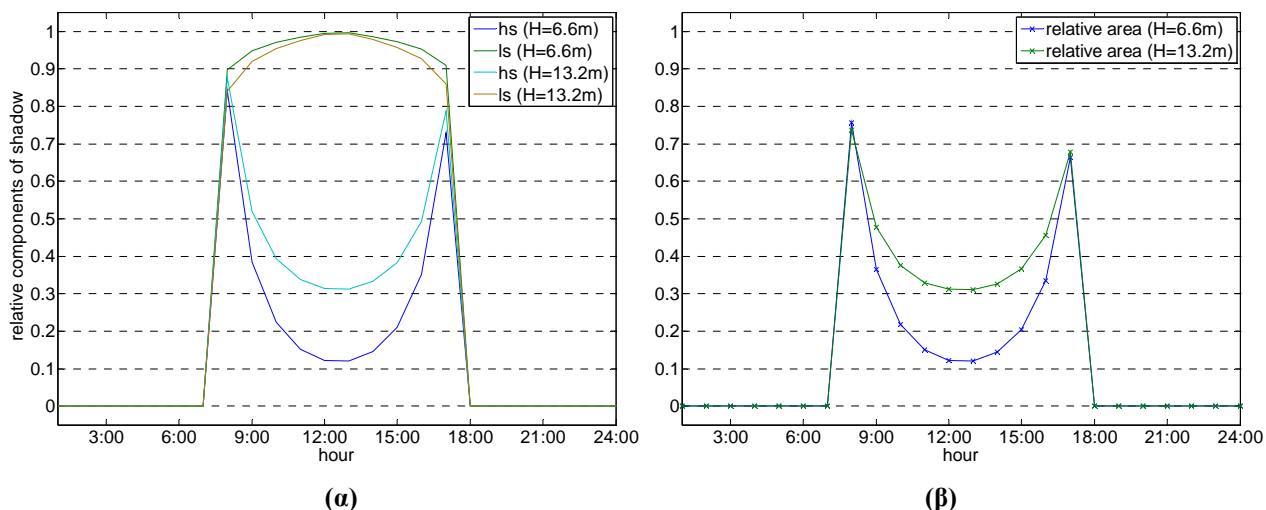
Το παραπάνω διάγραμμα αντικατοπτρίζει τη γενικότερη συμπεριφορά των συνιστωσών της σκιάς κατά τη διάρκεια μιας ημέρας στην επιφάνεια ενός φβ συλλέκτη: το ύψος και εμβαδόν εμφανίζουν παρόμοια μεταβολή ενώ το μήκος αντίθετη. Πιο συγκεκριμένα, το σχετικό ύψος της σκιάς (όπως και το εμβαδόν) είναι μέγιστο τις ώρες κοντά στην ανατολή του ήλιου και μειώνεται καθώς πλησιάζει το ηλιακό μεσημέρι, όπου αγγίζει μια ελάχιστη τιμή (συμμετρική συμπεριφορά παρατηρείται για τις απογευματινές ώρες). Από την άλλη, το μήκος της σκιάς μεταβάλλεται με πιο γρήγορο ρυθμό, ξεκινώντας από χαμηλές τιμές στην ανατολή του ήλιου και αυξάνοντας μέχρι μια μέγιστη τιμή το μεσημέρι (συμμετρικά, όπως και προηγουμένως, για το απόγευμα).

Στη συνέχεια μελετάται η επίδραση της μεταβολής των διαστάσεων του φβ συλλέκτη (α) στο σχετικό ύψος και μήκος της σκιάς και (β) στο σχετικό εμβαδόν της, και συγκεκριμένα για:

1. αύξηση του μήκους του συλλέκτη (ή ισοδύναμα της σειράς συλλεκτών)
2. αύξηση του ύψους του συλλέκτη



Σχήμα 6.11: Επίδραση αύξησης μήκους σειράς συλλεκτών (α) στο σχετικό ύψος και μήκος της σιάς και (β) στο σχετικό εμβαδόν της



Σχήμα 6.12: Επίδραση αύξησης ύψους συλλέκτη στις συνιστώσες σιάς (α) στο σχετικό ύψος και μήκος της σιάς και (β) στο σχετικό εμβαδόν της

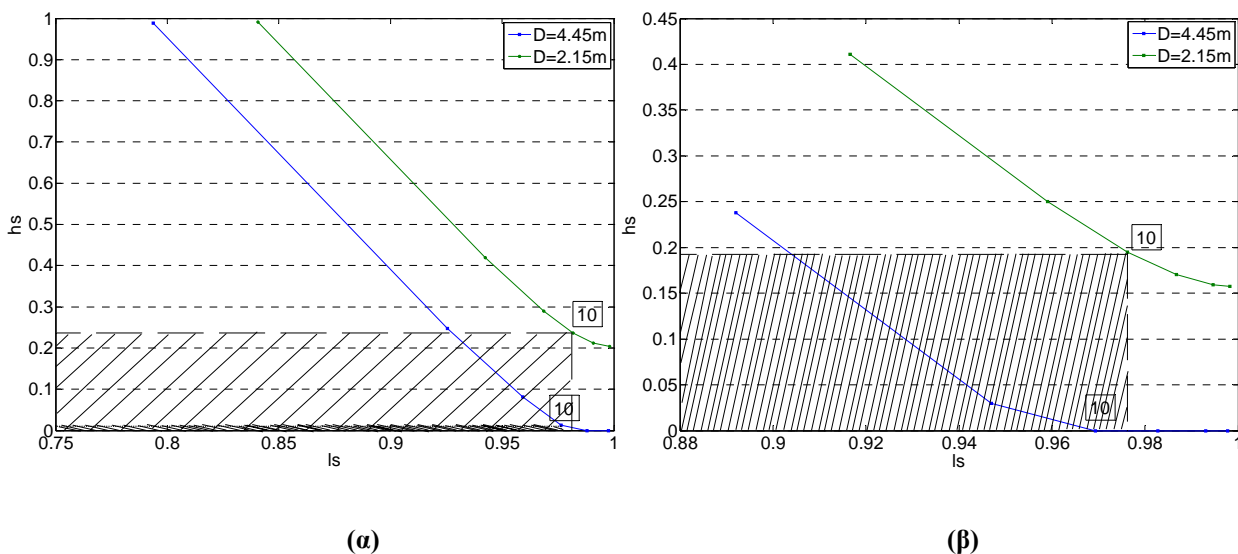
1. Για αύξηση του μήκους της σειράς των συλλεκτών από 20 σε 150 m, το σχετικό μήκος της σιάς αυξάνεται αισθητά σε αντίθεση με το ύψος της που παραμένει ακριβώς το ίδιο, ενώ αντίστοιχη μεταβολή με αυτή του μήκους παρατηρείται και για το εμβαδόν. Ωστόσο, όπως έχει ήδη σημειωθεί σε προηγούμενη ανάλυση, το μήκος της σειράς συλλεκτών δεν επηρεάζει σημαντικά τις συνιστώσες της σιάς, εφόσον η επίδραση του μήκους καταγράφεται συνήθως μόνο πλησίον της δύσης (ανατολής) του ηλίου, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι ούτως ή άλλως χαμηλή. Ιδιαίτερα δε σε μεγάλης κλίμακας φβ συστήματα όπου το μήκος των σειρών είναι ήδη αρκετά μεγάλο, περαιτέρω αύξηση του μήκους δεν οδηγεί σε ουσιαστική μεταβολή της σκίασης (άλλωστε μια τέτοια αύξηση του μήκους σαν αυτή που μελετάται εδώ – κατά 8 φορές περίπου – δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμη και γίνεται καθαρά για λόγους κατάδειξης του φαινομένου).

2. Σε περίπτωση διπλασιασμού του ύψους των φβ συλλεκτών (από 6.6 σε 13.2 m) το σχετικό ύψος της σκιάς αυξάνεται σημαντικά, σε αντίθεση με το μήκος της, που δε μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου. Ωστόσο, η μικρή αυτή μεταβολή του μήκους (σε σύγκριση με την αντίστοιχη μηδενική του ύψους στην προηγούμενη περίπτωση) οφείλεται στον τρόπο ορισμού του, καθώς εξαρτάται έμμεσα από το ύψος, μέσω του μεγέθους “κανονικοποιημένο μήκος” (εξισώσεις 5.16 του πέμπτου κεφαλαίου). Επιπλέον, αντίστοιχη αύξηση με αυτή του ύψους της σκιάς παρατηρείται και για το εμβαδόν της. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η επίδραση του ύψους των συλλεκτών στη μεταβολή της σκίασης, και κατά συνέπεια στην ενεργειακή τους απόδοσή, είναι αρκετά σημαντική και σε κάθε περίπτωση πιο έντονη σε σχέση με αυτή του μήκους.

Ως γνωστόν, η μεταβολή της σκίασης $h_s = f(\lambda_s)$ στην επιφάνεια ενός φβ συλλέκτη κατά τη διάρκεια της ημέρας έχει μεγάλη σημασία για τον προσδιορισμό τόσο της λαμβανόμενης από τον ήλιο όσο και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενός φβ συστήματος. Η μεταβολή αυτή φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, για τις πρωινές ώρες (συμμετρική για τις απογευματινές ώρες), δύο τυπικών ημερών τους μήνες Φεβρουάριο και Οκτώβριο και για δύο περιπτώσεις:

$$(\alpha) D = 1.35 \times H \Rightarrow D = 4.45 \text{ m}$$

$$(\beta) D = 0.65 \times H \Rightarrow D = 2.15 \text{ m}$$

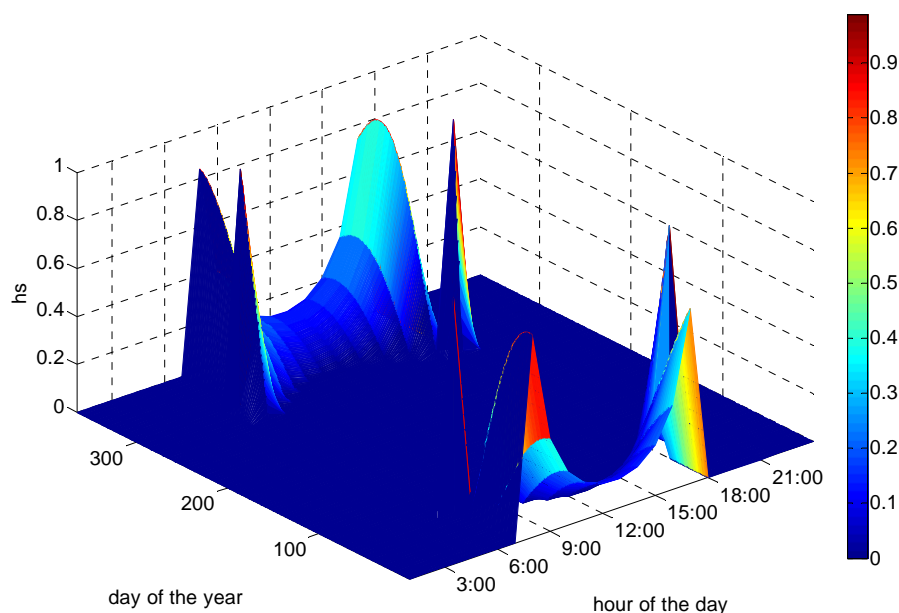


Σχήμα 6.13: Μεταβολή σκίασης $h_s = f(\lambda_s)$ στην επιφάνεια φβ συλλέκτη για τις ημέρες (α) 28 Οκτωβρίου και (β) 24 Φεβρουαρίου

α) Το πρώτο διάγραμμα δείχνει τη μεταβολή της σκίασης για την 28^η Οκτωβρίου και για τις δύο περιπτώσεις αποστάσεων μεταξύ των σειρών συλλεκτών. Επίσης, απεικονίζεται το σχετικό εμβαδόν της σκιασμένης επιφάνειας (γραμμοσκιασμένη περιοχή) για ώρα 10:00 το πρωί. Η επιφάνεια αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη για απόσταση $D = 2.15 \text{ m}$ και διαρκεί ολόκληρη την ημέρα, ενώ για $D = 4.45 \text{ m}$ είναι πολύ μικρότερη και μηδενίζεται από τις 11:00 και έπειτα.

β) Στο δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μεταβολές της σκίασης για την 24^η Φεβρουαρίου. Τη συγκεκριμένη ημέρα, δεν παρατηρείται σκίαση του συλλέκτη για απόσταση $D = 4.45$ m μεταξύ των συλλεκτών από τις 10:00 το πρωί και έπειτα. Για $D = 2.15$ m όμως, η σκίαση διαρκεί για όλη την ημέρα και στις 10:00 καταλαμβάνει σχεδόν τη μισή επιφάνεια του συλλέκτη, όπως φαίνεται από το αντίστοιχο εμβαδόν της.

Όπως αναφέρθηκε, μεταξύ των σχετικών μεγεθών της σκιάς σημαντικότερη επίδραση στην ενεργειακή (ηλιακή) απολαβή και παραγωγή έχει το ύψος παρά το μήκος της. Για το λόγο αυτό, διεξάγεται περαιτέρω μελέτη της μεταβολής του ύψους της σκιάς κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου έτους. Στην τρισδιάστατη απεικόνιση που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή του σχετικού ύψους της σκιάς (για απόσταση $D = 4.45$ m) συναρτήσει της ώρας μέσα στην ημέρα και της ημέρας στη διάρκεια ενός έτους.

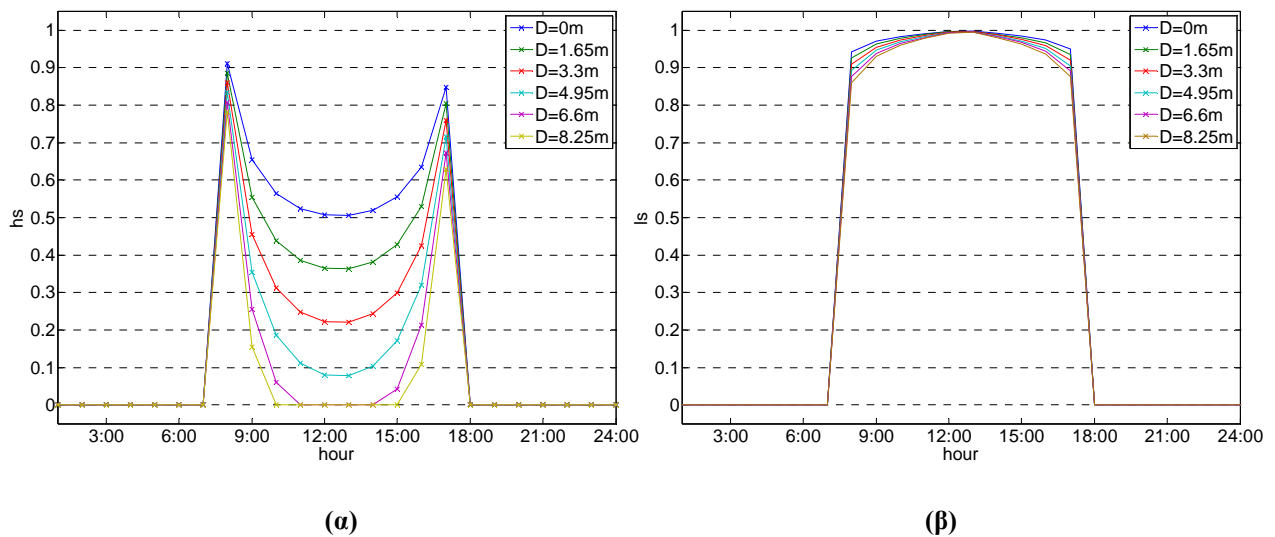


Σχήμα 6.14: Μεταβολή σχετικού ύψους σκιάς κατά τη διάρκεια ενός τυπικού έτους

Όπως είναι αναμενόμενο, εμφανίζεται σκίαση τις ώρες κοντά στην ανατολή και δύση του ήλιου και τους χειμερινούς κατά κανόνα μήνες. Το σχετικό ύψος της μειώνεται καθώς πλησιάζει το ηλιακό μεσημέρι και, όπως προκύπτει από το σχήμα δεν εμφανίζεται σκιά σε σύνολο 185 ημερών το χρόνο περίπου, από τις 20 Μαρτίου έως τις 12 Σεπτεμβρίου.

Ως γνωστόν, το ποσοστό της σκίασης που προκαλείται στην επιφάνεια των φβ συλλεκτών εξαρτάται άμεσα από την απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σειρών και για το λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στο σχεδιασμό της διάταξης των φβ συλλεκτών σε μια δοσμένη έκταση εγκατάστασης. Για μια πρώτη εκτίμηση της σημασίας της επίδρασης που έχει η εν λόγω απόσταση, παρακάτω δίνεται η ωριαία μεταβολή της σκίασης κατά τη διάρκεια μιας ημέρας για διαφορετικές τιμές απόστασης μεταξύ των σειρών.

Συγκεκριμένα, με αύξηση της απόστασης D , παρατηρείται σημαντική μείωση του ύψους της σκιάς (σχήμα 6.15) ενώ αντίθετα η μείωση του μήκους της είναι σχετικά μικρή έως ελάχιστη. Για τις δύο μεγαλύτερες τιμές απόστασης D ($D = 6.6$ m και $D = 8.25$ m), δεν εμφανίζεται καθόλου σκιά (το αντίστοιχο ύψος είναι μηδενικό) για κάποιο χρονικό διάστημα εντός της ημέρας (μεγαλύτερης διάρκειας για $D = 8.25$ m). Σημειώνεται επίσης ότι η παραπάνω μεταβολή των συνιστωσών της σκιάς είναι συμμετρική (σχεδόν) ως προς το ηλιακό μεσημέρι.

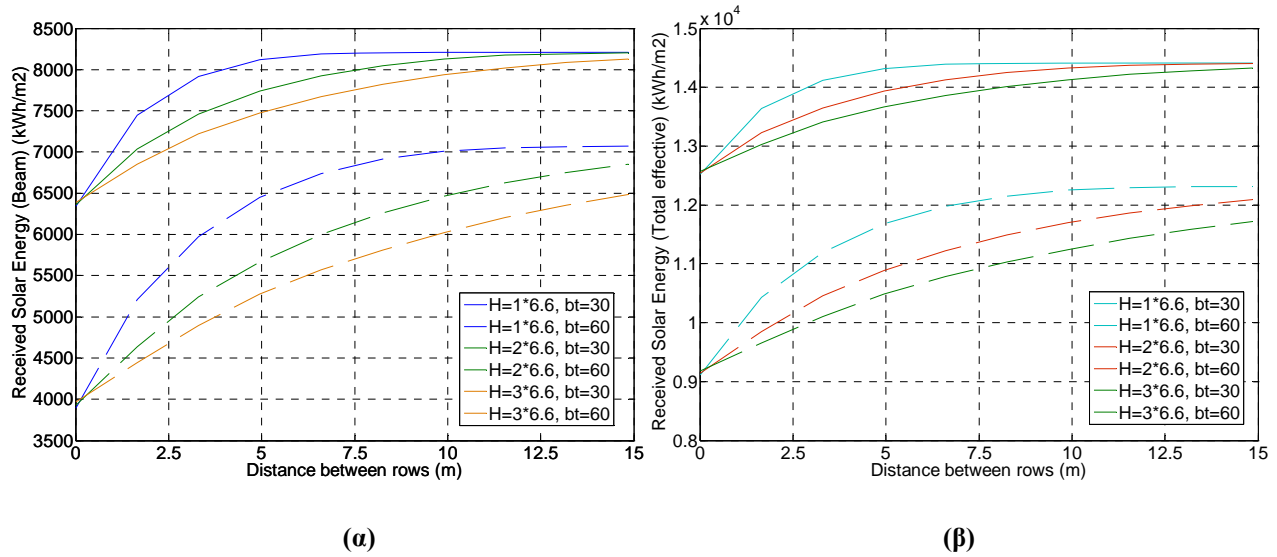


Σχήμα 6.15: Επίδραση αύξησης απόστασης των σειρών συλλεκτών (α) στο σχετικό ύψος της σκιάς και (β) στο σχετικό εμβαδόν της

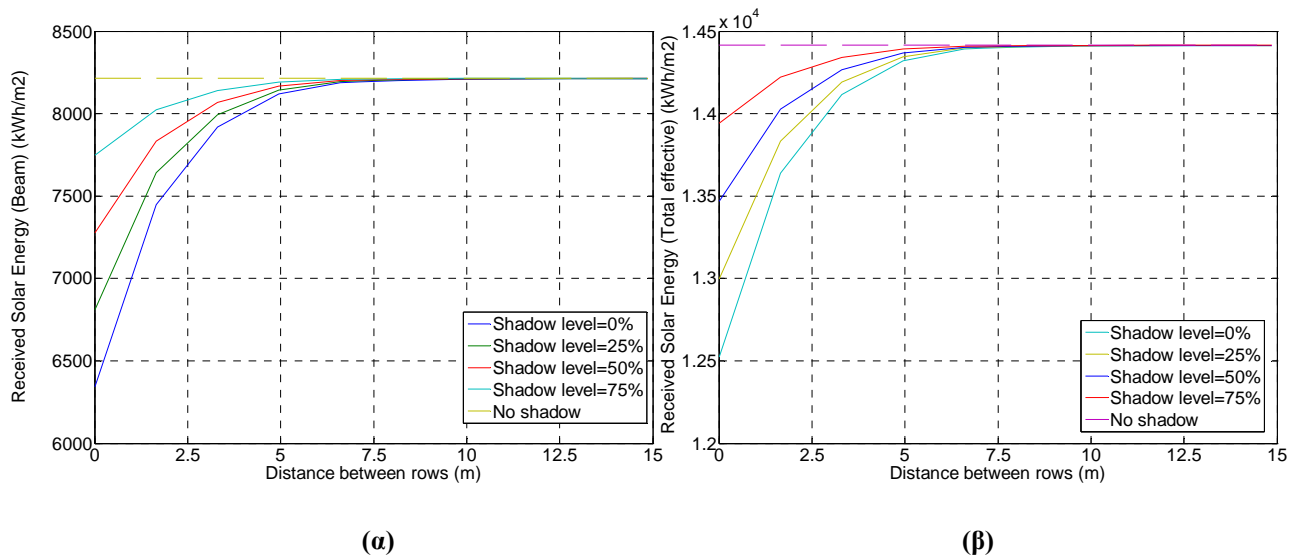
Τέλος, εξετάζεται η επίδραση του φαινομένου της σκίασης στην ετήσια ενεργειακή (ηλιακή) απολαβή του προς εξέταση $\phi\beta$ σταθμού συναρτήσει:

- της απόστασης μεταξύ των σειρών συλλεκτών με δεδομένη ολική εγκατεστημένη ισχύ (ίση με $5292 \times 0.208 = 1100.736$ kWp)
 - για διαφορετικά ύψη ($H = 1 \times 6.6$ m, $H = 2 \times 6.6 = 13.2$ m και $H = 3 \times 6.6 = 19.8$ m) και διαφορετικές γωνίες κλίσης ($\beta = 30^\circ$ και $\beta = 60^\circ$) συλλέκτη
 - για διαφορετικά επίπεδα σκίασης (0%, 25%, 50%, 75%, 100%)
- του αριθμού των σειρών με δεδομένη έκταση εγκατάστασης (ίση με $146.118\text{m} \times 111.48\text{m} = 16289.2$ m² ή ισοδύναμα συνολικής επιφάνειας $\phi\beta$ συλλεκτών $5292 \times (1.64 \times 0.994) = 8626.8$ m²)
 - για διαφορετικά ύψη ($H = 1 \times 6.6$ m, $H = 2 \times 6.6 = 13.2$ m και $H = 3 \times 6.6 = 19.8$ m) και διαφορετικές γωνίες κλίσης ($\beta = 30^\circ$ και $\beta = 60^\circ$) συλλέκτη
 - για διαφορετικά επίπεδα σκίασης (0%, 25%, 50%, 75%, 100%)

- Στην πρώτη περίπτωση, αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σειρών των φβ συλλεκτών με δεδομένη την ολική εγκατεστημένη ισχύ προκύπτουν τα εξής:



Σχήμα 6.16: Επίδραση αύξησης απόστασης των σειρών συλλεκτών στην ετήσια ηλιακή απολαβή για διαφορετικά ύψη και κλίσεις συλλέκτη (α) άμεση – ακτινική και (β) ολική ενεργός



Σχήμα 6.17: Επίδραση αύξησης απόστασης των σειρών συλλεκτών στην ετήσια ηλιακή απολαβή για διαφορετικά επίπεδα σκίασης (α) άμεση – ακτινική και (β) ολική ενεργός

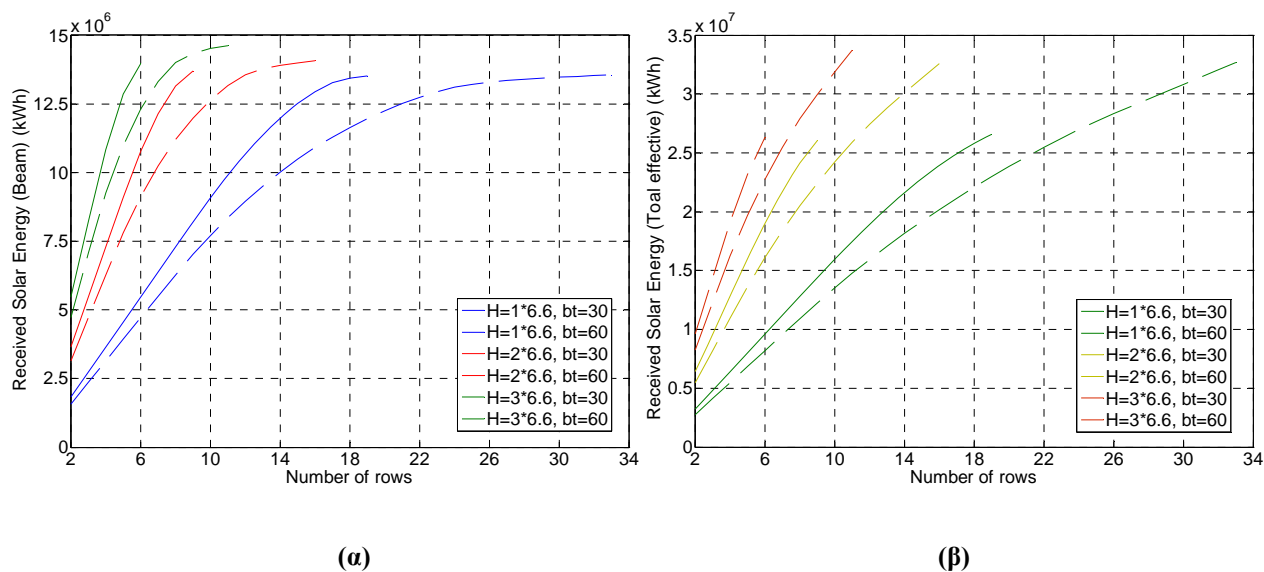
Το σχήμα 6.16 περιγράφει τη μεταβολή της ετήσιας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας καθώς επίσης και της ολικής ενεργού ακτινοβολίας, που δέχονται οι φβ συλλέκτες ανά μονάδα επιφάνειας, συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των σειρών για διαφορετικά ύψη συλλεκτών H και για δύο γωνίες κλίσης $\beta = 30^\circ$ (συνεχής γραμμή) και $\beta = 60^\circ$ (διακεκομμένη γραμμή). Για δεδομένες τιμές των μεγεθών αυτών τα γραφήματα παραθέτουν την ετήσια ενεργειακή (ηλιακή) απολαβή. Όπως προκύπτει και από τα δύο διαγράμματα, με αύξηση της απόστασης η λαμβανόμενη ενέργεια αυξάνεται μέχρι κάποιο σημείο (σημείο κάμψης – γόνατο) πέρα από το οποίο η αύξηση της ενέργειας παύει να είναι σημαντική. Η απόσταση για την οποία αρχίζει να εξαιρείται η επίδραση της σκίασης είναι περίπου 6 m (χοντρικά σε όλες τις περιπτώσεις) και αύξηση της απόστασης πέραν αυτού του σημείου δεν οδηγεί σε περισσότερη λαμβανόμενη ενέργεια. Επιπλέον, υψηλότερες τιμές ενέργειας προκύπτουν για γωνία κλίσης 30° και μεγαλύτερα ύψη H , όπως άλλωστε αναμενόταν: για την προκειμένη θέση εγκατάστασης του εξεταζόμενου φβ σταθμού στρέφοντας τους συλλέκτες σε μια τέτοια κλίση εξασφαλίζεται, όπως έχει ήδη σημειωθεί, βέλτιστη ενεργειακή απόδοση, ενώ αυξάνοντας το ύψος τους περισσότερη επιφάνεια διατίθεται για λήψη της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο σημείο αυτό τονίζεται το γεγονός ότι λόγω της έλλειψης δυνατότητας γνώσης της ακριβούς τιμής του επιπέδου ακτινοβολίας υπό συνθήκες μερικής σκίασης, διεξάγεται παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης της σκίασης (για αυξανόμενη απόσταση μεταξύ των σειρών) στη λαμβανόμενη από το ήλιο ενέργεια για διαφορετικά επίπεδα σκίασης. Το επίπεδο σκίασης (shadow level – transmittance) αντιστοιχεί ουσιαστικά στο εκάστοτε επίπεδο ακτινοβολίας και, ειδικότερα, αναφέρεται στο ποσό της ακτινοβολίας το οποίο έχει υποστεί μείωση από τη σκίαση και που τελικά προσπίπτει στα φβ πλαίσια. Πρόκειται, με άλλα λόγια, για την “ικανότητα διάδοσης” της σκίασης στα διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας.

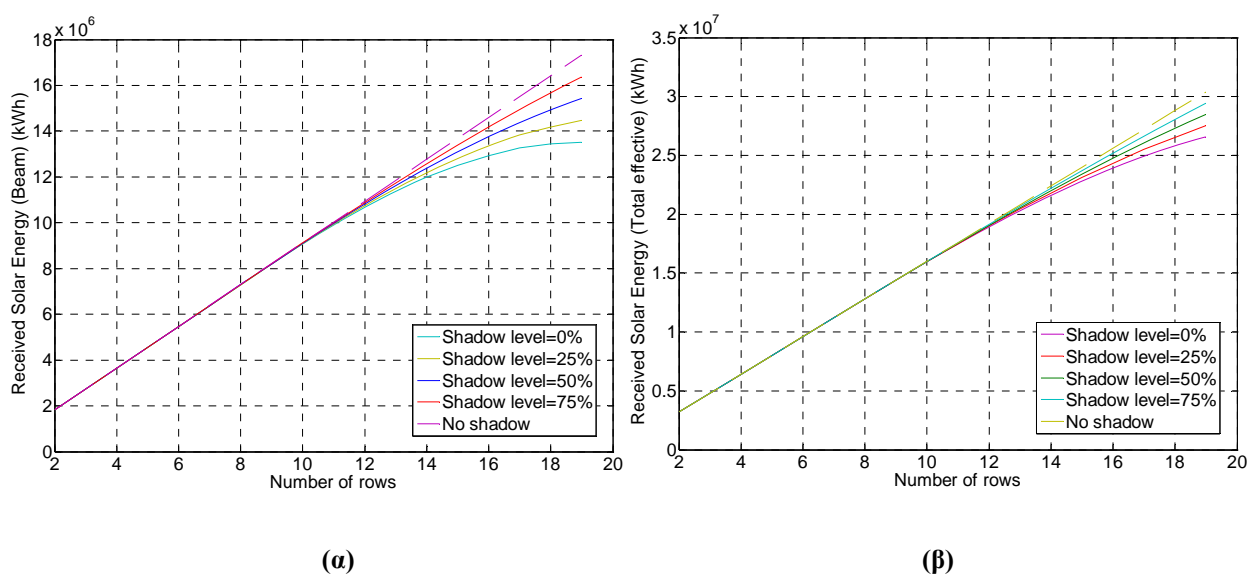
Τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας διερεύνησης για την αρχική διάταξη των φβ συλλεκτών, δηλαδή $H = 6.6$ m και $\beta = 30^\circ$ και ανά μονάδα επιφάνειας, δίνονται στο σχήμα 6.17. Παρατηρείται ότι για υψηλότερα επίπεδα σκίασης (άρα και ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται οι φβ συλλέκτες), όπως είναι προφανές, προκύπτουν υψηλότερες τιμές ενεργειακής ηλιακής απολαβής με θεωρητικό άνω όριο την περίπτωση απουσίας σκίασης (οριζόντια γραμμή, επίπεδο 100%).

(Σημειώνεται ότι σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις όπου δε γίνεται αναφορά στο επίπεδο σκίασης, οι προσομοιώσεις έχουν γίνει θεωρώντας ως μέση λύση το επίπεδο των 50%, εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά.)

- Παρόμοια αποτελέσματα με τα προηγούμενα προκύπτουν στην περίπτωση αύξησης του αριθμού των σειρών ενός φβ σταθμού για δεδομένη έκταση εγκατάστασης, όπως φαίνεται ακολούθως.



Σχήμα 6.18: Επίδραση αύξησης αριθμού των σειρών συλλεκτών στην ετήσια ηλιακή απολαβή για διαφορετικά ύψη και κλίσεις συλλέκτη (α) άμεση – ακτινική και (β) ολική ενεργός



Σχήμα 6.19: Επίδραση αύξησης αριθμού των σειρών συλλεκτών στην ετήσια ηλιακή απολαβή για διαφορετικά επίπεδα σκίασης (α) άμεση – ακτινική και (β) ολική ενεργός

Το πρώτο διάγραμμα του σχήματος 6.18 περιγράφει τη μεταβολή της ετήσιας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται οι φβ συλλέκτες συναρτήσει του αριθμού των σειρών τους, για διαφορετικά ύψη συλλεκτών H και για δύο γωνίες κλίσης $\beta = 30^\circ$ (συνεχής γραμμή) και $\beta = 60^\circ$ (διακεκομμένη γραμμή). Με την προσθήκη περισσοτέρων σειρών, η λαμβανόμενη ενέργεια αυξάνεται μέχρι το σημείο κάμψης, πέρα από το οποίο η αύξηση της ενέργειας παύει να είναι σημαντική, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Ο αριθμός των σειρών για τον οποίο αρχίζει να εμφανίζεται η επίδραση της σκίασης διαφέρει ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση και όσο αυτός αυξάνεται, τόσο η σκίαση γίνεται εντονότερη. Υψηλότερες τιμές ενέργειας προκύπτουν και πάλι για γωνία κλίσης ίση με 30° και μεγαλύτερα ύψη συλλεκτών H , όπως είναι λογικό (έχει ήδη εξηγηθεί). Όλες οι καμπύλες που δίνονται έχουν παρόμοια μορφή με ένα βέλτιστο αριθμό σειρών σε καθεμία από αυτές (εκάστοτε σημείο κάμψης). Στο δεύτερο διάγραμμα, ωστόσο, λαμβάνεται υπόψη, ως γνωστόν, και η επίδραση της διάχυτης ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα αυτή τη φορά να παρατηρείται σημαντική διαφορά. Οι παρατιθέμενες καμπύλες δεν κάμπτονται απότομα καθώς η συνεισφορά της διάχυτης ακτινοβολίας είναι σημαντική αθροιστικά σε ολόκληρο έτος.

Τα εν λόγω αποτελέσματα καθορίζονται άμεσα από τα εκάστοτε επίπεδα ακτινοβολίας, όπως μπορεί να φανεί και στο σχήμα 6.19, παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση της αύξησης της απόστασης μεταξύ των σειρών (σχήμα 6.17). Παρ' όλα αυτά οι παρατηρούμενες διαφορές δεν είναι τόσο αισθητές, ιδιαίτερα στην περίπτωση της ολικής ενεργού ακτινοβολίας, ενώ επίδραση του επιπέδου σκίασης αρχίζει να εμφανίζεται μετά από σημαντικό αριθμό σειρών. Για υψηλότερα επίπεδα σκίασης προκύπτουν υψηλότερες τιμές ηλιακής απολαβής, με θεωρητικό άνω όριο την περίπτωση απουσίας σκίασης (διαγώνια γραμμή, επίπεδο 100%). Θα πρέπει βέβαια να ληφθεί υπόψη ότι όλα τα διαγράμματα στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν αναφέρονται σε ανά μονάδα επιφάνειας των φβ συλλεκτών.

6.4.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων για τον προς Εξέταση Φβ Σταθμό

Με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν με χρήση του λογισμικού PSprice και τα εξαγόμενα ποσοστά μείωσης της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου των φβ συλλεκτών, εξάγονται με τη βοήθεια του μοντέλου ενεργειακής απόδοσης τα τελικά αποτελέσματα για την ετήσια ενεργειακή παραγωγή του προς εξέταση τυπικού φβ σταθμού μεγέθους 1MW.

Συγκεκριμένα, τα παραπάνω ποσοστά μείωσης εφαρμόζονται κατάλληλα στον αρχικό κώδικα (σε Matlab) του κύριου προγράμματος του ενεργειακού μοντέλου, ο οποίος έχει ήδη τροποποιηθεί για να συμπεριλάβει την επίδραση του φαινομένου της ρύπανσης καθώς και τις εξισώσεις υπολογισμού των συνιστωσών της σκιάς, όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες. Ως εκ τούτου, καθίσταται πλέον δυνατή η εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων για τον εξεταζόμενο φβ σταθμό, συμπεριλαμβανομένων όλων των παραγόντων μείωσης της ενεργειακής απόδοσης (derating factors): όσων μέχρι στιγμής έχουν μοντελοποιηθεί αλλά και ορισμένων για τους οποίους έχει ληφθεί μια τυπική σταθερή τιμή (πίνακας 3.6 του τρίτου κεφαλαίου)

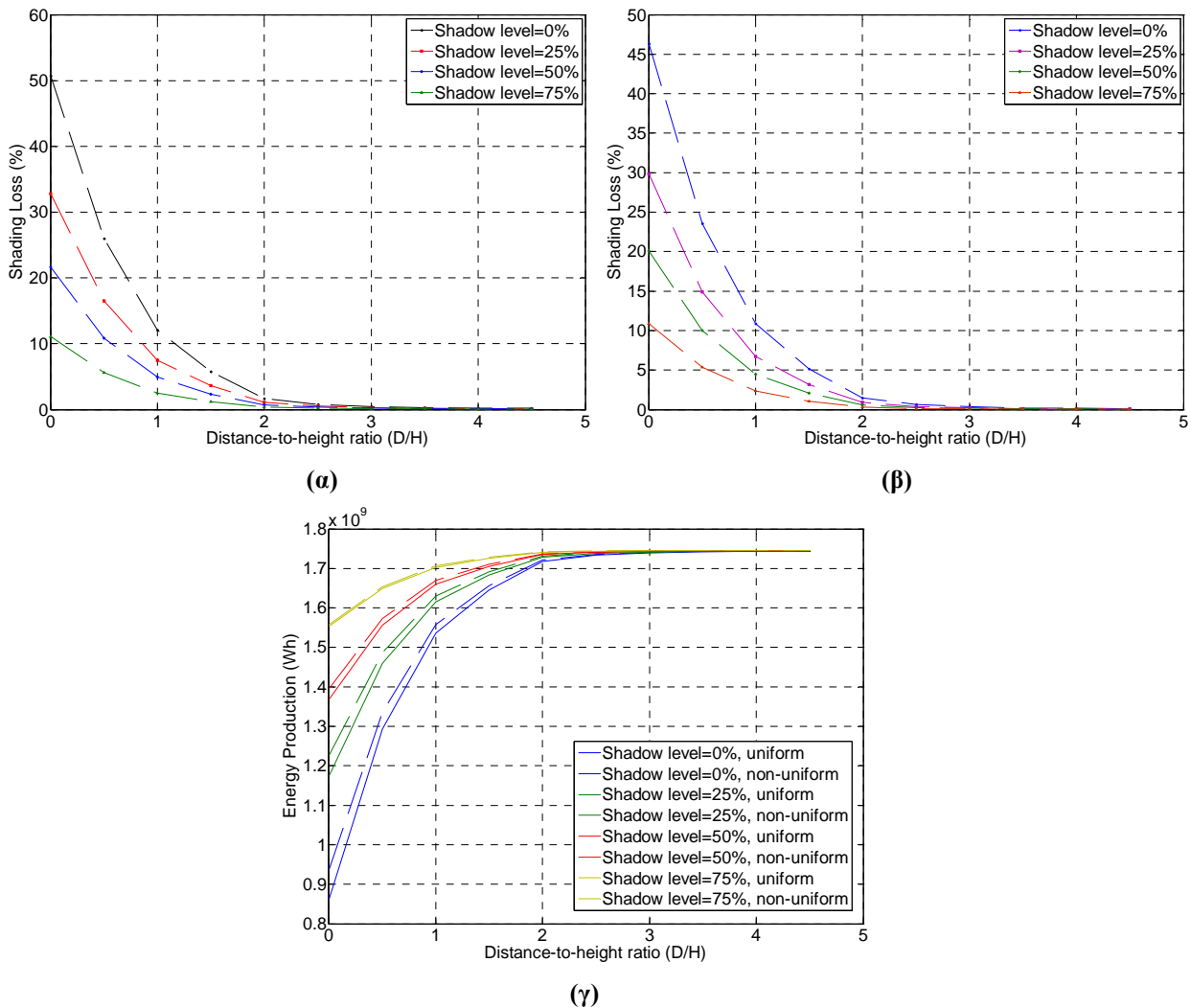
Στην παρούσα εργασία, για τη μελέτη του φαινομένου της σκίασης θεωρούνται δύο τυπικές περιπτώσεις χωροθέτησης των συστοιχιών του φβ σταθμού, του τρόπου δηλαδή με τον οποίο οι συστοιχίες διατάσσονται στη διαθέσιμη έκταση προς εγκατάσταση.

1. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται η παραδοχή ότι οι συστοιχίες από τις οποίες συνίσταται ο προς εξέταση φβ σταθμός αποτελούν μέρος ενός μεγαλύτερου φβ συστήματος και βρίσκονται χωροταξικά στο εσωτερικό μιας ευρύτερης ομάδας συστοιχιών. Εξετάζεται με άλλα λόγια η περίπτωση κατά την οποία οι μεταβολές της σκίασης κατά τη διάρκεια της ημέρας στην επιφάνεια των συστοιχιών είναι πανομοιότυπες για όλες τις συστοιχίες. Κάτι τέτοιο ισοδυναμεί με θεώρηση ίδιων τιμών για τα σχετικά μεγέθη της σκιάς σε όλες τις συστοιχίες του σταθμού, όταν αυτές βέβαια σκιάζονται. Πρόκειται για την περίπτωση της *ομοιόμορφης* (uniform) σκίασης.

2. Στη δεύτερη περίπτωση θεωρείται μια χωροταξική ανάπτυξη του φβ σταθμού σαν αυτή που περιγράφεται στην αρχή του κεφαλαίου (σχήμα 6.3), απουσία οποιουδήποτε πρόσθετου παράγοντα πρόκλησης σκίασης (με εξαίρεση βέβαια τη σκίαση που υφίσταται από τη μία σειρά συστοιχιών στην επόμενη). Σε αυτή την περίπτωση η πρώτη από τις 9 διαδοχικές σειρές συστοιχιών (κατά τον άξονα Β-Ν) παραμένει ασκίαστη κατά τη διάρκεια της ημέρας με τις υπόλοιπες σειρές να υπόκεινται σε σκιάσεις από τις παρακείμενές τους. Ισοδύναμα, το σχετικό μήκος της σκιάς δεν είναι πλέον ίδιο σε όλες τις συστοιχίες (οι συστοιχίες στα άκρα των σειρών σκιάζονται λιγότερο σε ποσοστό μέσα στην ημέρα σε σχέση με αυτές που βρίσκονται στα μέσα των σειρών). Πρόκειται για την περίπτωση της *ανομοιόμορφης* (non-uniform) σκίασης.

Κατόπιν, μελετάται η μεταβολή σε ετήσια βάση των απωλειών εξαιτίας της σκίασης σε περίπτωση (α) ομοιόμορφης και (β) ανομοιόμορφης μεταβολής της καθώς και (γ) της ενεργειακής παραγωγής του προς εξέταση φβ σταθμού, συναρτήσει:

- του λόγου D/H , δηλαδή της απόστασης μεταξύ των σειρών προς το ύψος συλλέκτη, με δεδομένη ολική εγκατεστημένη ισχύ (ίση με $5292 \times 0.208 = 1100.736$ kWp) και για διαφορετικά επίπεδα σκίασης (0%, 25%, 50%, 75%, 100%)
- του αριθμού των σειρών με δεδομένη έκταση εγκατάστασης (ίση με $146.118 \text{m} \times 111.48 \text{m} = 16289.2 \text{m}^2$ ή ισοδύναμα συνολικής επιφάνειας φβ συλλεκτών $5292 \times (1.64 \times 0.994) = 8626.8 \text{m}^2$) και για διαφορετικά επίπεδα σκίασης (0%, 25%, 50%, 75%, 100)
- Με αύξηση του λόγου D/H και με δεδομένη την ολική εγκατεστημένη ισχύ του φβ σταθμού προκύπτουν τα εξής:

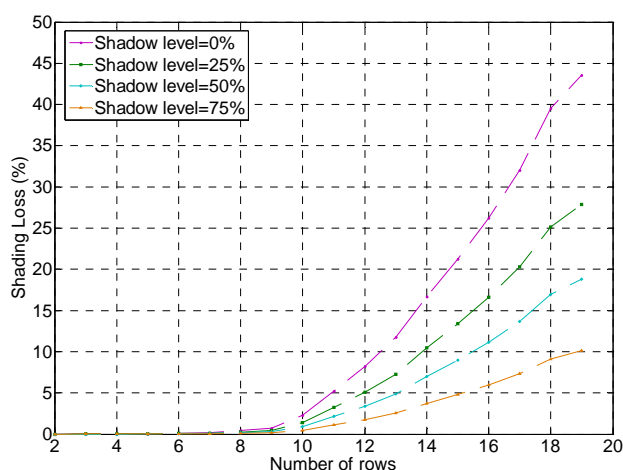


Σχήμα 6.20: Επίδραση αύξησης λόγου D/H στις ετήσιες απώλειες σκίασης για (α) ομοιόμορφη, (β) ανομοιόμορφη μεταβολή της και (γ) στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή

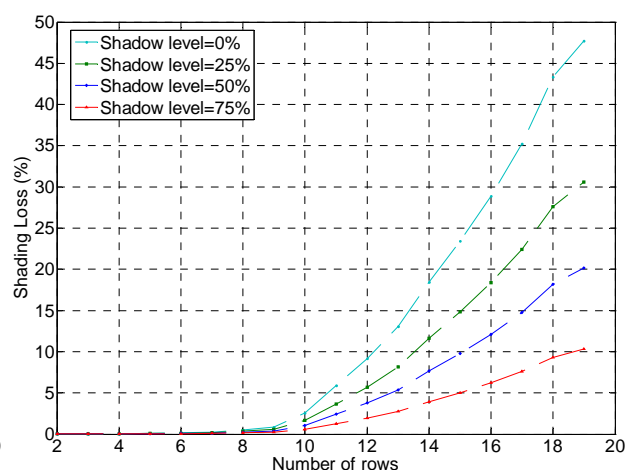
Όπως έχει ήδη τονιστεί, η απόσταση D μεταξύ των διαδοχικών σειρών των φβ συστοιχιών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες εξάρτησης της σκίασης η οποία συντελείται σε μεγάλης κλίμακας φβ συστήματα καθώς και σε άλλες περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης (όπως για παράδειγμα στις στέγες των κτιρίων), καθορίζεται δε άμεσα από το (κάθετο) ύψος H της συστοιχίας. Για το βέλτιστο λοιπόν σχεδιασμό ενός φβ συστήματος θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη η επιλογή μιας κατάλληλης τιμής του λόγου D/H , προκειμένου να αποφεύγονται κατά το δυνατόν περισσότερο οι σκιάσεις στις επιφάνειες των συστοιχιών κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μια τέτοια επιλογή αποτελεί έναν συμβιβασμό, όπως προαναφέρθηκε, μεταξύ των απαιτήσεων για ελαχιστοποίηση των σκιάσεων από τη μια, και της κατάληξης του διαθέσιμου χώρου από την άλλη.

Τα παραπάνω διαγράμματα σκοπό έχουν να συμβάλλουν στην ορθότερη επιλογή μιας τιμής του λόγου D/H έτσι ώστε να επέλθει ένας κατάλληλος συμβιβασμός, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Όπως είναι λογικό, το φαινόμενο της σκίασης έχει δυσμενέστερες επιπτώσεις για επίπεδα σκίασης που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερα επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. Παρατηρείται και πάλι η ύπαρξη ενός σημείου κάμψης (γόνατο) στην καμπύλη της ενεργειακής παραγωγής, που αντιστοιχεί σε μια κρίσιμη τιμή του λόγου D/H , πέρα από την οποία το κέρδος στην παραγόμενη ενέργεια παύει να είναι σημαντικό. Η εν λόγω τιμή προκύπτει στη συγκεκριμένη περίπτωση ίση περίπου με 2, γεγονός που σημαίνει ότι τοποθετώντας τους συλλέκτες σε απόσταση περίπου διπλάσια από το ύψος τους εξασφαλίζεται η επιθυμητή ενεργειακή απόδοση σε ετήσια βάση.

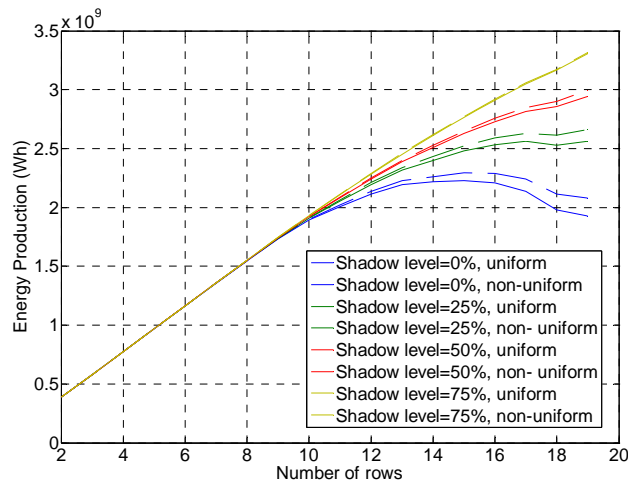
- Αντίστοιχα, με αύξηση του αριθμού των σειρών ενός φβ σταθμού για δεδομένη έκταση εγκατάστασης, προκύπτουν τα ακόλουθα.



(α)



(β)

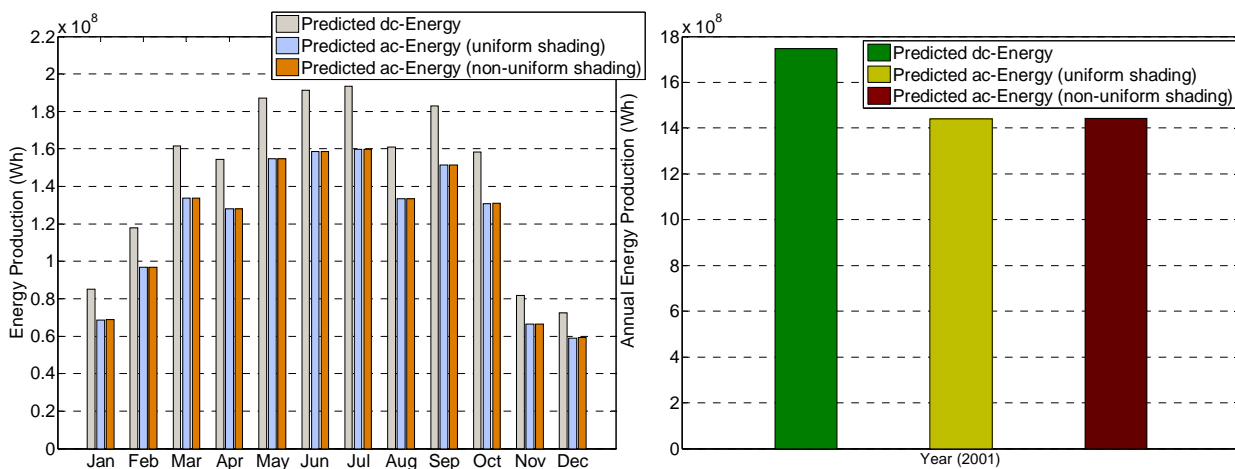


(γ)

Σχήμα 6.21: Επίδραση αύξησης αριθμού των σειρών συλλεκτών στις ετήσιες απώλειες σκίασης για (α) ομοιόμορφη, (β) ανομοιόμορφη μεταβολή της και (γ) στην ετήσια ενεργειακή παραγωγή

Διακρίνεται παρόμοια συμπεριφορά με της προηγούμενης περίπτωσης, όπου πέρα από ένα συγκεκριμένο αριθμό σειρών το κέρδος στην παραγόμενη ενέργεια γίνεται ασήμαντο (σημείο κάμψης). Επίσης τονίζεται το γεγονός ότι και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις προκύπτουν μικρές διαφορές ανάμεσα στην ομοιόμορφη και την ανομοιόμορφη μεταβολή της σκίασης, με ελαφρώς πιο έντονη επίδραση στην ομοιόμορφη, όπως είναι λογικό (δεν εμφανίζεται σκίαση στην πρώτη σειρά συστοιχιών καθώς και στα άκρα των σειρών αρκετές ώρες της ημέρας, με αποτέλεσμα να αποδίδεται συνολικά περισσότερη ενέργεια στην περίπτωση της ανομοιόμορφης σκίασης). Οι εν λόγω διαφορές φαίνεται, τέλος, να αυξάνουν για μικρότερα επίπεδα ακτινοβολίας (ιδιαίτερα στο τρίτο διάγραμμα του σχήματος 6.21)

Τα ιστογράμματα που ακολουθούν συνοψίζουν τα τελικά αποτελέσματα για την ενεργειακή απόδοση του προς εξέταση φβ σταθμού μεγέθους 1MW. Το σχήμα 6.22 παρουσιάζει την υπολογιζόμενη dc ενέργεια που παρέχεται από το φβ σταθμό και την τελική ac ενέργεια που διατίθεται στο δίκτυο, τόσο σε μηνιαία και όσο και σε ετήσια βάση.



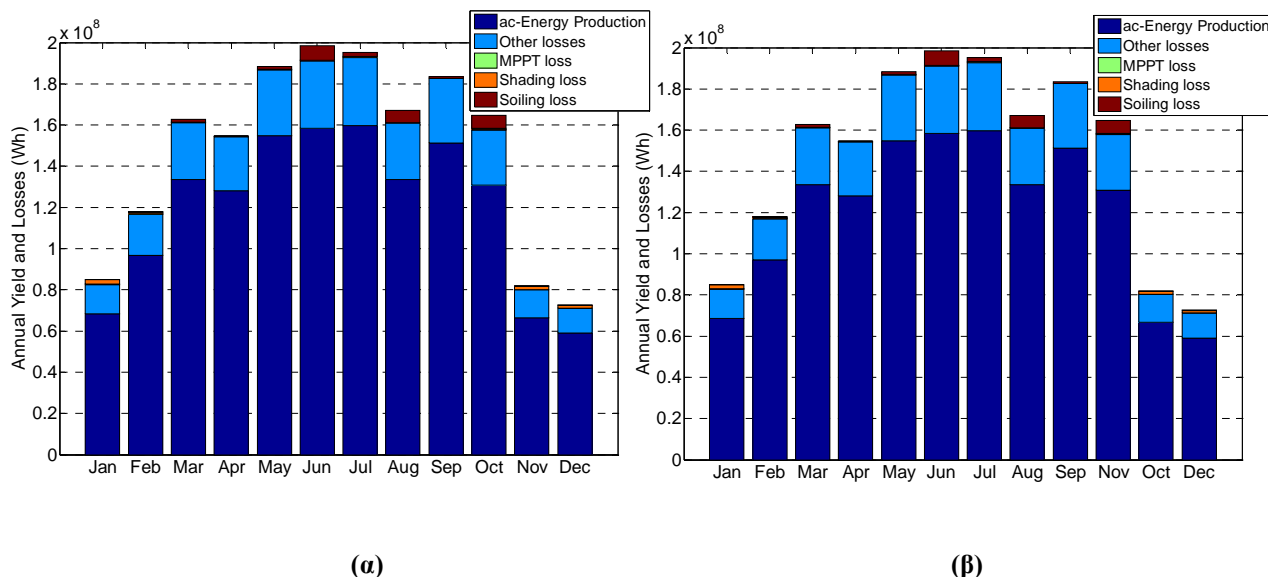
(α)

(β)

Σχήμα 6.22: Ενεργειακή παραγωγή τυπικού φβ σταθμού 1MW σε (α) μηνιαία και (β) ετήσια βάση

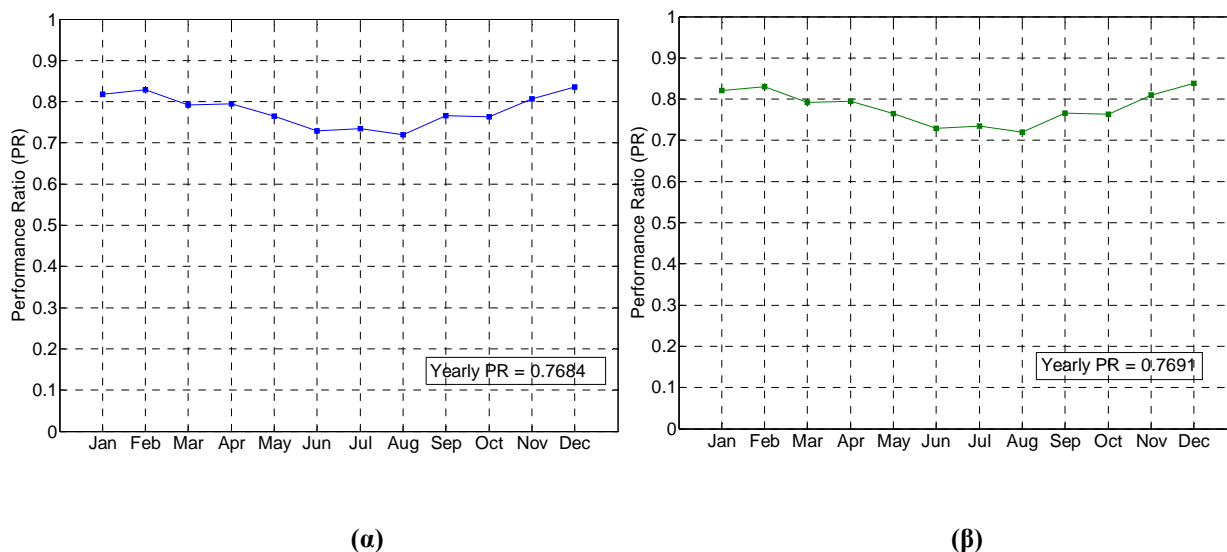
Για τον υπολογισμό της ac ενέργειας που παρέχεται στο δίκτυο έχουν ληφθεί υπόψη τα χαρακτηριστικά απόδοσης του μετατροπέα ο οποίος περιγράφεται σε προηγούμενη ενότητα. Στο παραπάνω σχήμα είναι εμφανείς οι μικρές έως ελάχιστες διαφορές μεταξύ των περιπτώσεων της ομοιόμορφης και ανομοιόμορφης σκίασης, όπως άλλωστε έχει ήδη αναφερθεί.

Η μηνιαία ενεργειακή παραγωγή του προς εξέταση φβ σταθμού σε συνδυασμό με τις απώλειες που οφείλονται στους διάφορους παράγοντες μείωσης (μοντελοποιημένων ή μη) δίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.23: Ετήσια ενεργειακή παραγωγή και ετήσιες απώλειες τυπικού φβ σταθμού 1MW σε περίπτωση (α) ομοιόμορφης και (β) ανομοιόμορφης σκίασης

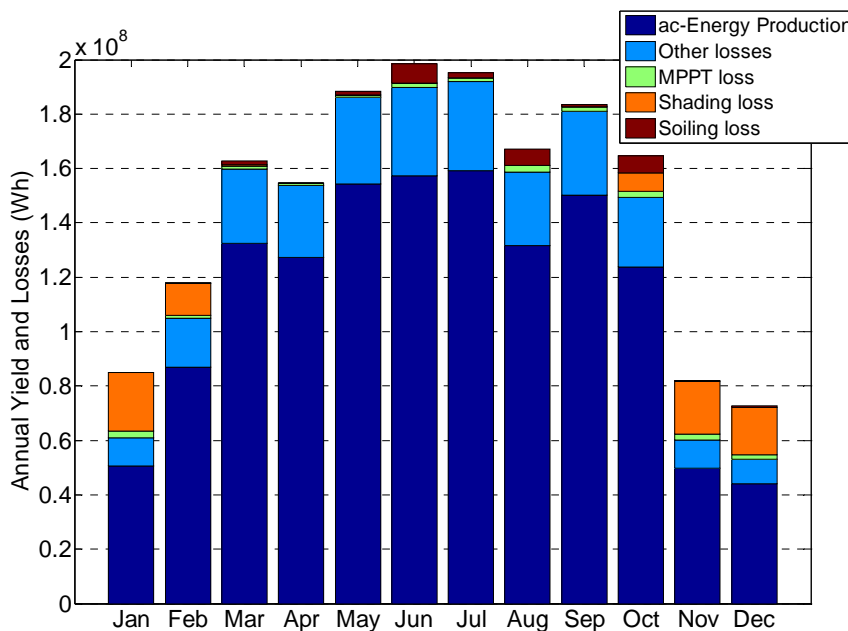
Τέλος, υπολογίζεται ο συντελεστής απόδοσης (performance ratio, PR) του φβ σταθμού κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου έτους καθώς και η μηνιαία μεταβολή του. Εξαιτίας των απωλειών που οφείλονται στη θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων εντός της συστοιχίας, οι τιμές του PR παρουσιάζονται αυξημένες κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι, όπως φαίνεται ακολούθως



Σχήμα 6.24: Συντελεστής απόδοσης τυπικού φβ σταθμού 1MW σε περίπτωση (α) ομοιόμορφης και (β) ανομοιόμορφης σκίασης

Από τα παραπάνω, καθίσταται εμφανές το γεγονός ότι η αρχική επιλογή των τιμών των παραμέτρων του ενεργειακού μοντέλου που σχετίζονται με τους παράγοντες μείωσης που έχουν μέχρι στιγμής μοντελοποιηθεί (απώλειες MPPT, ρύπανσης και σκίασης) οδηγεί σε ικανοποιητικά (έως ιδανικά) αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η απόσταση που επελέγη μεταξύ των σειρών των φβ συστοιχιών έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλές απώλειες σκίασης (όπως φαίνεται στο σχήμα 6.20), κάτι που οφείλεται – εκτός των άλλων – και στο επίπεδο σκίασης με το οποίο έγιναν οι αντίστοιχες προσομοιώσεις (ίσο με 50%, όπως έχει αναφερθεί).

Για την πληρέστερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο επιδρούν οι εν λόγω παράγοντες μείωσης στην ενεργειακή απόδοση ενός τυπικού φβ σταθμού, παρατίθενται στη συνέχεια τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για μια περίπτωση στην οποία έχουν ληφθεί οι εξής τιμές παραμέτρων: κάτω όριο τάσεως λειτουργίας MPPT 550 V, κατώφλι καθαρισμού 8 mm, επίπεδο σκίασης 25%, απόσταση μεταξύ σειρών $D = 1.35 \times H \Rightarrow D = 4.45$ m.



Σχήμα 6.25: Ετήσια ενεργειακή παραγωγή και ετήσιες απώλειες τυπικού φβ σταθμού 1MW (διαφορετικές τιμές παραμέτρων)

Στο παραπάνω ιστόγραμμα γίνεται αισθητή η εποχιακή διαφοροποίηση των επιδράσεων των επιμέρους παραγόντων μείωσης της ενεργειακής απόδοσης ενός τυπικού φβ σταθμού μεγέθους 1MW. Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση της σκίασης εμφανίζεται κατά κύριο λόγο τους χειμερινούς μήνες του έτους, οπότε και οι κυκλικές τροχιές του ήλιου διαγράφονται νοτιότερα στον ουρανό σε σχέση με το καλοκαίρι (στο βόρειο ημισφαίριο). Αντίστοιχα, η επίδραση της ρύπανσης συντελείται κυρίως το καλοκαίρι λόγω μειωμένης βροχόπτωσης ή απουσίας της που παρατηρείται σε αυτή τη χρονική περίοδο. Σημειώνεται τέλος ότι η συμπεριφορά που παρατηρείται εξαρτάται άμεσα από τη διαθέσιμη χρονοσειρά μετεωρολογικών δεδομένων.

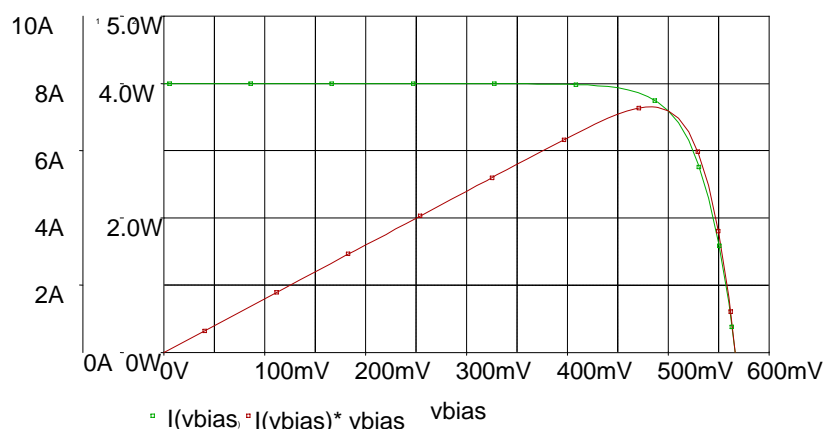
6.4.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων με χρήση του λογισμικού PSpice

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης που προηγήθηκε στην αντίστοιχη ενότητα του πέμπτου κεφαλαίου, παρατίθενται μια σειρά αποτελεσμάτων που έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού PSpice. Η παρουσίαση των εν λόγω αποτελεσμάτων γίνεται με κλιμακωτό τρόπο, ξεκινώντας από το επίπεδο του ηλιακού στοιχείου (solar cell) και καταλήγοντας σε αυτό της φβ συστοιχίας (array).

Προσομοιώσεις σε επίπεδο φβ στοιχείου

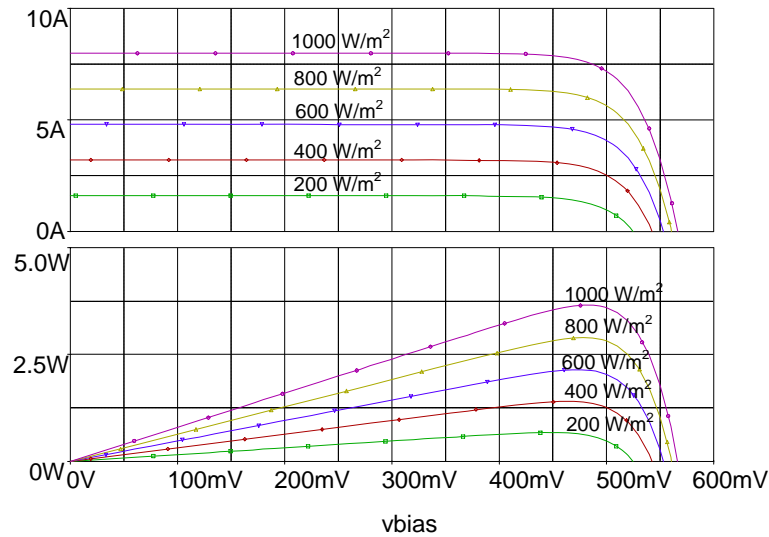
Αρχικά γίνεται ανάλυση στο κατώτερο επίπεδο, αυτό του κελιού, χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο μοντέλο PSpice ενός φβ στοιχείου, το οποίο περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι τιμές των παραμέτρων του εν λόγω μοντέλου λαμβάνονται από το φύλλο προδιαγραφών του κατασκευαστή του πλαισίου που επιλέγεται προς μελέτη (τύπου Sharp ND-208U1F). Για τις απαραίτητες προσομοιώσεις οι συγκεκριμένες τιμές (τετραγωνικό στοιχείο εμβαδού $156\text{mm} \times 156\text{mm} = 243.36 \text{ cm}^2$ με ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc} = 7.99 \text{ A}$) εισάγονται στον κώδικα netlist του PSpice και προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

- Οι χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ του προς εξέταση φβ στοιχείου έχουν ως εξής:



Σχήμα 6.26: Χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ ενός φβ στοιχείου

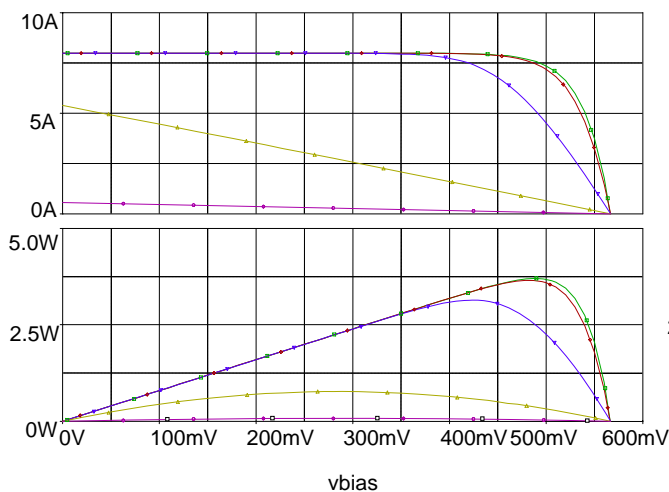
- Η ηλεκτρική απόκριση του φβ στοιχείου για διαφορετικά επίπεδα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (και συγκεκριμένα για $IR = 200, 400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$) φαίνεται ακολούθως. Η μείωση που παρατηρείται είναι ανάλογη της μείωσης του επιπέδου ηλιακής ακτινοβολίας.



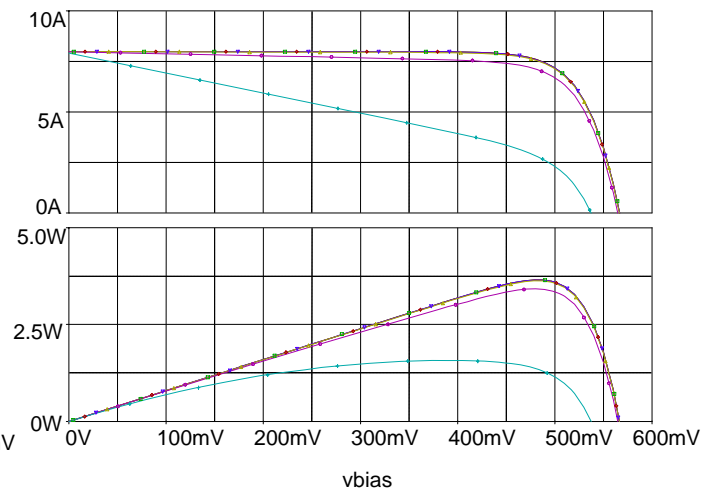
Σχήμα 6.27: Χαρακτηριστικές I(V) και P(V) ενός φβ στοιχείου για διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας

- Στη συνέχεια διερευνάται η επίδραση ορισμένων παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος στις χαρακτηριστικές I(V) και P(V) του φβ στοιχείου και συγκεκριμένα για:

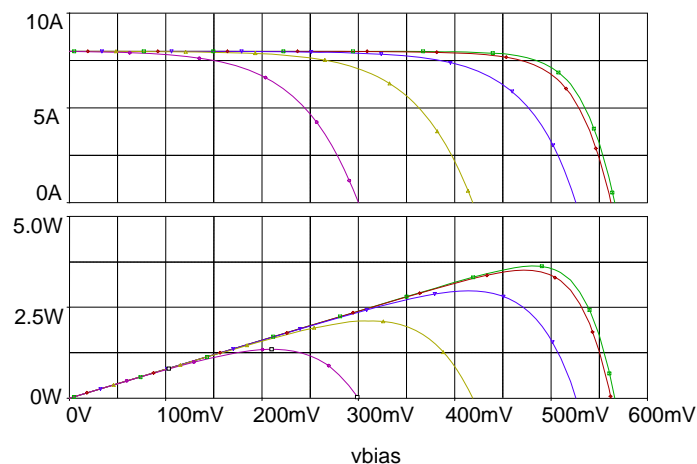
- αύξηση αντίστασης σειράς R_s ($R_s = 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1 \text{ Ohm}$)
- μείωση αντίστασης εκτροπής R_{sh} ($R_{sh} = 10000, 1000, 100, 10, 1, 0.1 \text{ Ohm}$)
- αύξηση αναστροφικού ρεύματος κόρου J_{02} της διόδου επανασύνδεσης ($J_{02} = 1e^{-8}, 1e^{-7}, 1e^{-6}, 1e^{-5}, 1e^{-4} \text{ A}$)



(α)



(β)



(γ)

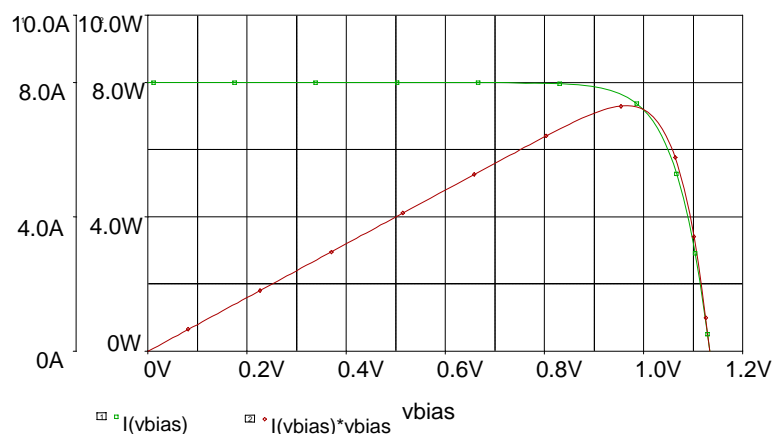
Σχήμα 6.28: Επίδραση (α) αντίστασης σειράς R_s , (β) αντίστασης εκτροπής R_{sh} και (γ) ανάστροφο ρεύμα κόρου J_{02} επανασύνδεσης στις χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ ενός φβ στοιχείου

α) Με αύξηση της αντίστασης σειράς R_s το ρεύμα βραχυκύκλωσης μειώνεται, ιδιαίτερα για κάποια κρίσιμη τιμή και έπειτα, ενώ η τάση ανοιχτοκύκλωσης παραμένει αμετάβλητη. Παρόμοια μεταβολή με αυτή του I_{sc} παρατηρείται για την ισχύ αιχμής P_{mp} .

β) Με μείωση της αντίστασης εκτροπής R_{sh} η τάση ανοιχτοκύκλωσης δε μεταβάλλεται αισθητά, εκτός και αν η τιμή της συγκεκριμένης αντίστασης γίνει πολύ μικρή, όποτε μειώνεται αρκετά. Από την άλλη, το ρεύμα βραχυκύκλωσης παραμένει σταθερό, ενώ η ισχύς αιχμής μεταβάλλεται παρόμοια με την V_{oc} .

γ) Με αύξηση του ανάστροφου ρεύματος κόρου J_{02} της διόδου επανασύνδεσης η τάση ανοιχτοκύκλωσης μειώνεται, ιδιαίτερα δε όταν το συγκεκριμένο ρεύμα γίνει αρκετα σημαντικό. Παρόμοια μεταβάλλεται και η μέγιστη ισχύς και καθόλου το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

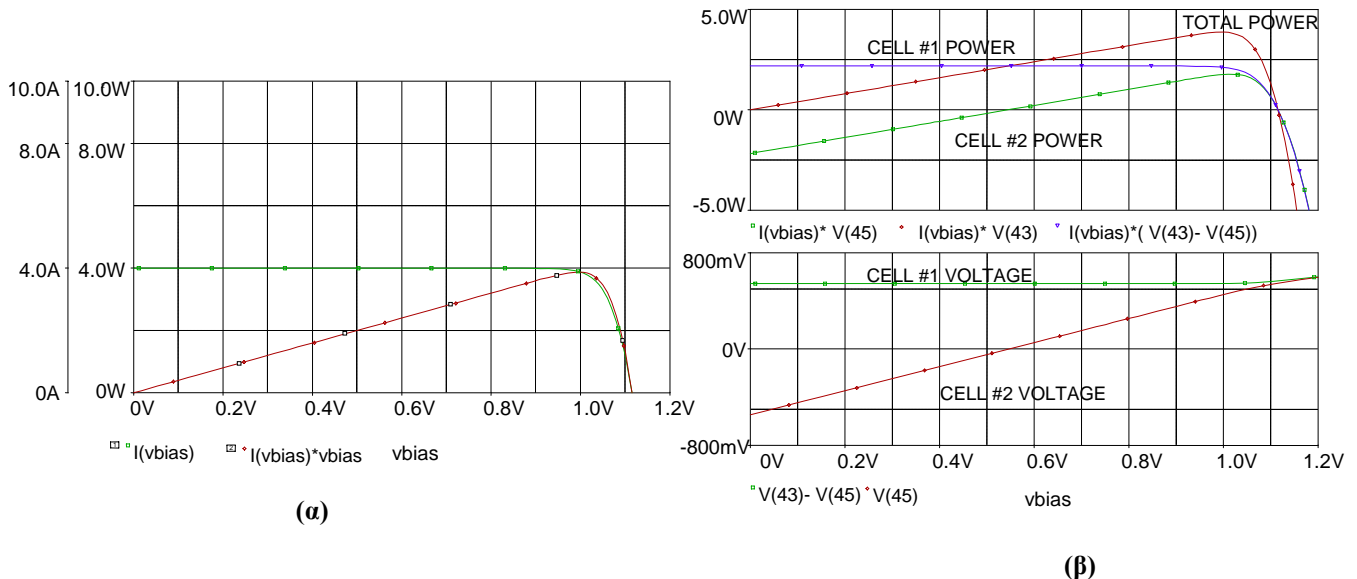
- Κατόπιν, μελετάται η σε σειρά σύνδεση αρχικά στην απλή περίπτωση δύο φβ στοιχείων και εν συνεχεία 60 στοιχείων, προς σχηματισμό του εξεταζόμενου φβ πλαισίου. Για δύο πανομοιότυπα φβ στοιχεία, οι χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ του εν σειρά συνδυασμού τους κάτω από ίδιες συνθήκες λειτουργίας έχουν ως εξής:



Σχήμα 6.29: Χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ δύο φβ στοιχείων σε σειρά

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης των εν σειρά φβ στοιχείων ισούται με το ρεύμα βραχυκύκλωσης καθενός εκ των δύο, ενώ η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι η διπλάσια από αυτή του ενός, όπως είναι αναμενόμενο.

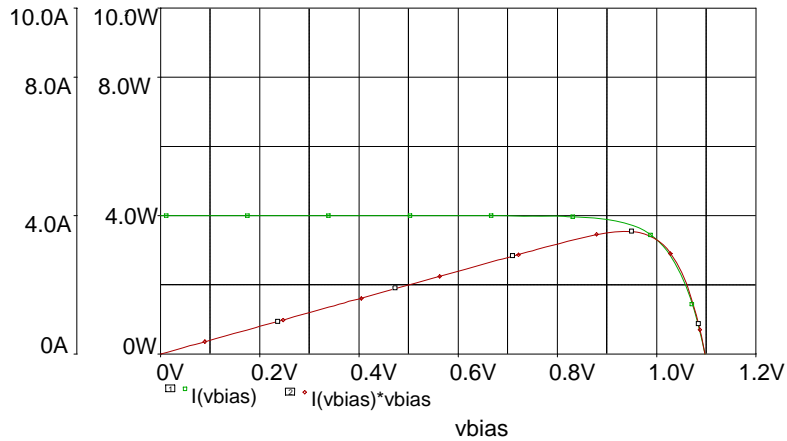
➤ Σε περίπτωση που δεν προσπίπτει ίση ακτινοβολία και στα δύο στοιχεία (για παράδειγμα 500 W/m^2 στο ένα και 1000 W/m^2 στο άλλο), όπως συμβαίνει σε μια τυπική περίπτωση μερικής σκίασης, το αποτέλεσμα στις χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ της σειριακής σύνδεσης φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6.30: Σκίαση ενός εκ των δύο φβ στοιχείων σε σειρά: (α) χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$, (β) επιμέρους μεταβολές τάσης και μέγιστης ισχύος

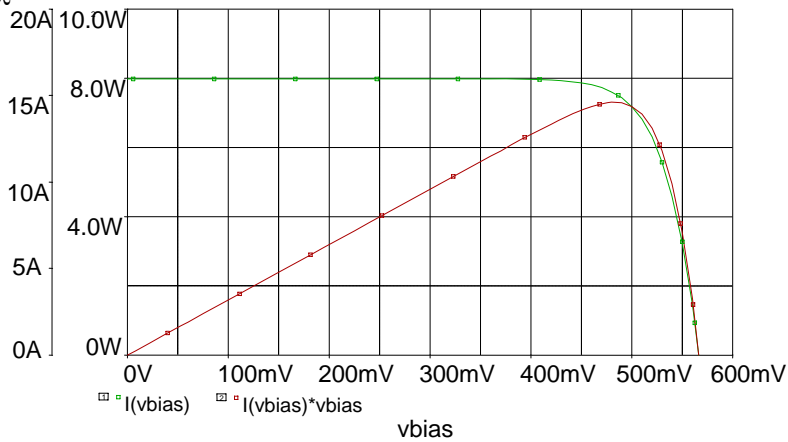
Όπως μπορεί να φανεί, το ρεύμα βραχυκύκλωσης του εν σειρά συνδυασμού των φβ στοιχείων ισούται με αυτό που προέρχεται από το περισσότερο σκιασμένο στοιχείο (δηλαδή $7.99 \times (500/1000) \approx 4 \text{ A}$). Επίσης η πτώση τάσης κατά μήκος των στοιχείων κατανέμεται άνισα για τιμές τάσεων μικρότερες της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, όπως φαίνεται στο δεύτερο γράφημα του σχήματος 6.30(β), όπου έχει σχεδιαστεί ξεχωριστά η πτώση τάσης και για τα δύο στοιχεία. Για παράδειγμα, στο σημείο βραχυκυκλώσεως η πτώση τάσης στο πρώτο κελί είναι περίπου 500mV ενώ αυτή στο δεύτερο - 500mV, εξασφαλίζοντας ότι η συνολική τάση κατά μήκος της σύνδεσης είναι, προφανώς, μηδέν. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι σε ορισμένες συνθήκες λειτουργίας ένα από τα δύο στοιχεία, το περισσότερο σκιασμένο, είναι δυνατόν να βρεθεί σε λειτουργία υπό ανάστροφη πόλωση. Συνέπεια αυτού είναι κατανάλωση ισχύος αντί για παραγωγή από το συγκεκριμένο στοιχείο (το δεύτερο) για σημεία λειτουργίας από 0.6V περίπου και κάτω. Με αποτέλεσμα η συνολική διαθέσιμη ισχύς από το σειριακό συνδυασμό να μειώνεται και να αυξάνεται η θερμοκρασία τοπικά γύρω από το στοιχείο αυτό. Πρόκειται για το επονομαζόμενο πρόβλημα *hot-spot*, το οποίο είναι δυνατόν να προκαλέσει σοβαρές δυσλειτουργίες.

➤ Στην περίπτωση σκίασης και των δύο φβ στοιχείων (500 W/m^2) οι χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ δίνονται παρακάτω. Δεν παρατηρείται, όπως είναι φανερό, μεγάλη διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου σκιάζεται το ένα μόνο στοιχείο.



Σχήμα 6.31: Σκίαση δύο φβ στοιχείων σε σειρά

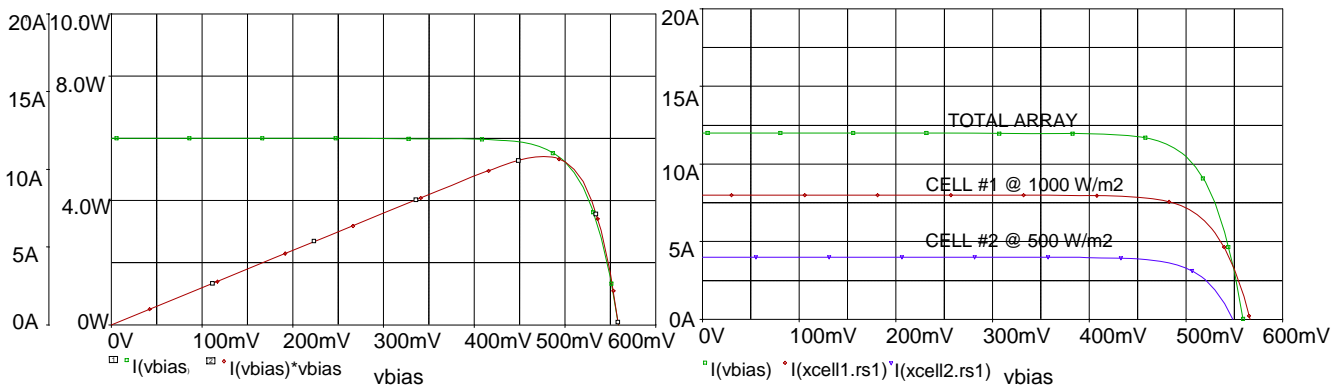
- Στη συνέχεια δίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για παράλληλο συνδυασμό δύο φβ στοιχείων.



Σχήμα 6.32: Χαρακτηριστικές I(V) και P(V) δύο φβ στοιχείων παράλληλα

Όπως αναμένεται, η τάση ανοικτοκύκλωσης ισούται με αυτή του ενός φβ στοιχείου ενώ το ρεύμα είναι διπλάσιο.

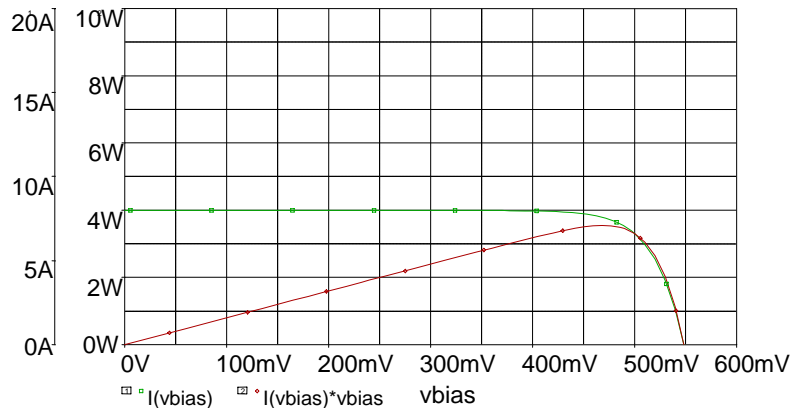
- Στην περίπτωση που σκιαστεί ένα από τα δύο φβ στοιχεία οι προκύπτουσες χαρακτηριστικές είναι οι ακόλουθες.



Σχήμα 6.33: Σκίαση ενός από δύο φβ στοιχείων παράλληλα: (α) χαρακτηριστικές I(V) και P(V), (β) επιμέρους μεταβολές ρεύματος

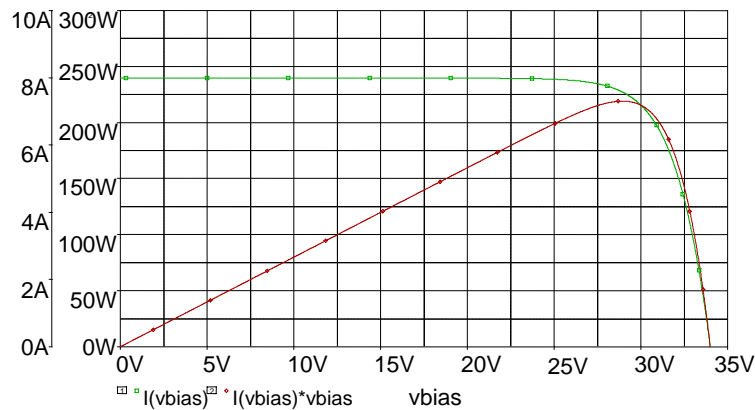
Σε αυτή την περίπτωση το ολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ισούται με το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων βραχυκύκλωσης, ενώ η τάση ανοικτοκύκλωσης έχει τιμή στο διάστημα μεταξύ των τάσεων ανοικτοκύκλωσης του καθενός φβ στοιχείου.

➤ Η σκίαση και των δύο στοιχείων οδηγεί σε ρεύμα βραχυκύκλωσης υποδιπλάσιο σε σχέση με προηγουμένως, αποτέλεσμα προφανές από τη γραμμική εξάρτηση ρεύματος – ακτινοβολίας.



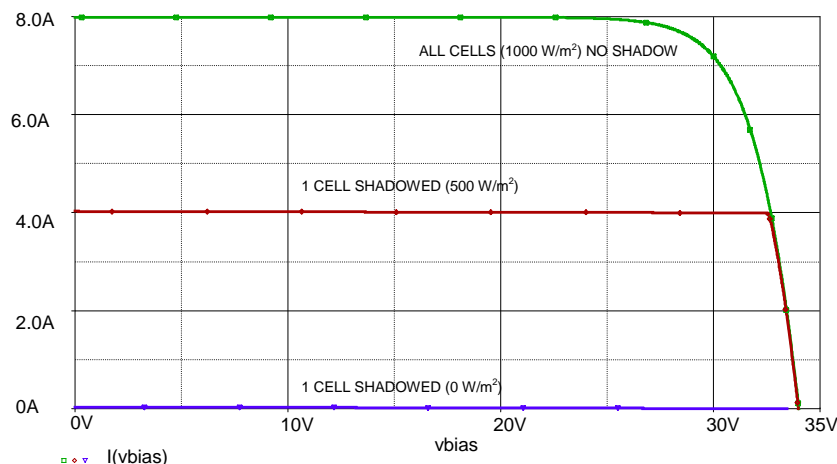
Σχήμα 6.34: Σκίαση δύο φβ στοιχείων παράλληλα

• Στην ακόλουθη γραφική παράσταση δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες μιας ακολουθίας 60 εν σειρά συνδεδεμένων φβ στοιχείων. Η συγκεκριμένη σύνδεση ισοδυναμεί με αυτήν που υλοποιείται σε ένα τυπικό πλαίσιο του εμπορίου, σαν και αυτό που μελετάται στην παρούσα εργασία.



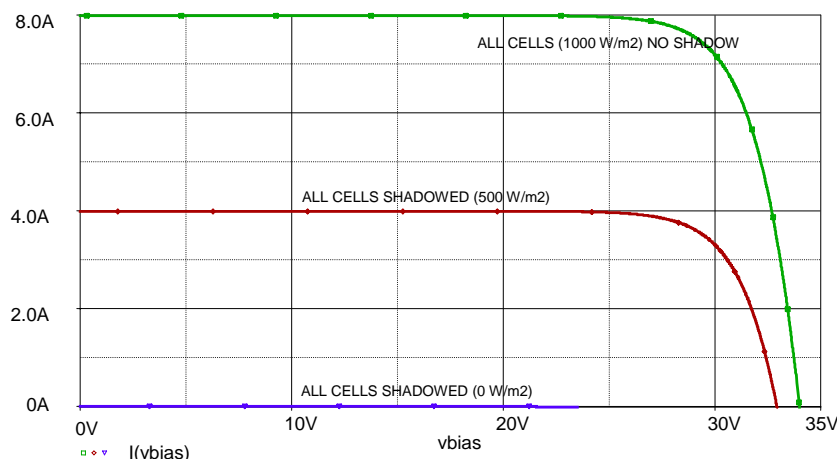
Σχήμα 6.35: Χαρακτηριστικές I(V) και P(V) 60 φβ στοιχείων σε σειρά

➤ Όταν σκιάζεται ένα μόνο στοιχείο της ακολουθίας το ρεύμα βραχυκύκλωσης που προκύπτει, όπως φαίνεται και στην παρακάτω γραφική παράσταση, ισούται με το ρεύμα του σκιασμένου αυτού στοιχείου.



Σχήμα 6.36: Σκίαση ενός από 60 φβ στοιχείων σε σειρά για δύο επίπεδα ακτινοβολίας ($IR = 500, 0 \text{ W/m}^2$)

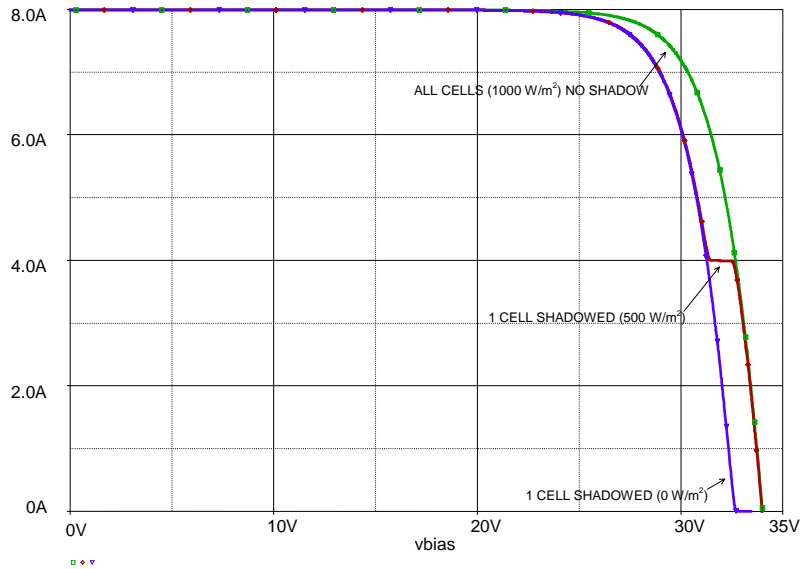
Παρατηρείται δηλαδή, σε συνδυασμό με το διάγραμμα 6.37 που ακολουθεί, ότι στην περίπτωση ενός πλαισίου η σκίαση ακόμα και ενός πολύ μικρού μέρους του οδηγεί σε δραματική μείωση της απόδοσής του. Κάτι τέτοιο γίνεται εμφανές από την ομοιότητα των χαρακτηριστικών: αυτής με ένα μόνο σκιασμένο κελί και αυτής με σκιασμένα και τα 60 κελιά.



Σχήμα 6.37: Σκίαση 60 φβ στοιχείων παράλληλα για δύο επίπεδα ακτινοβολίας ($IR = 500, 0 \text{ W/m}^2$) χωρίς δίοδο bypass

Η συγκεκριμένη παρατήρηση, ότι δηλαδή η ηλεκτρική απόκριση ενός πλαισίου με ένα μόνο κελί σκιασμένο είναι παρόμοια με αυτή ενός πλαισίου με όλα του τα στοιχεία σκιασμένα, εφαρμόζεται στο μοντέλο ενεργειακής απόδοσης. Θεωρείται με άλλα λόγια ότι όταν σκιάζεται ακόμα κι ένα μικρό τμήμα του πλαισίου η ισχύς εξόδου του περιορίζεται κατά το ίδιο ποσοστό με εκείνο της περίπτωσης που το πλαίσιο σκιάζεται πλήρως.

- Ένας τρόπος περιορισμού της μείωσης της απόδοσης που οφείλεται στη σκίαση ενός πλαισίου είναι η χρήση bypass διόδων. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη γραφική παράσταση, όταν στα άκρα του στοιχείου που σκιάζεται συνδεθεί μια bypass δίοδος, η προκύπτουσα I-V καμπύλη δεν παρουσιάζει τη μεταβολή που αναφέρθηκε προηγουμένως αλλά μια πολύ μικρότερη.

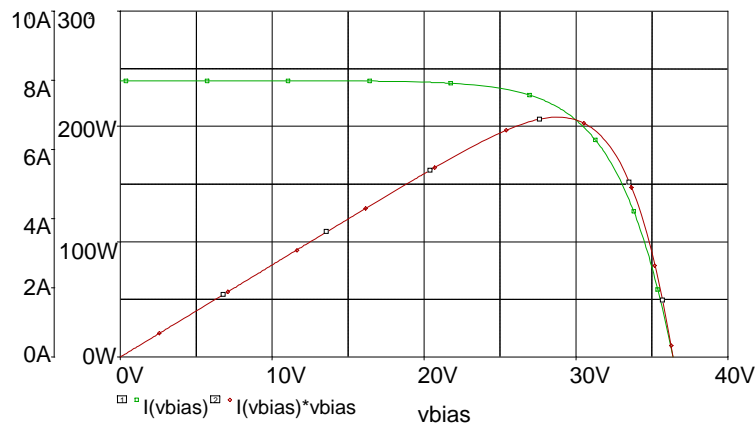


Σχήμα 6.38: Σκίαση 60 φβ στοιχείων παράλληλα για δύο επίπεδα ακτινοβολίας ($IR = 500, 0 \text{ W/m}^2$) με δίοδο bypass

Προσομοιώσεις σε επίπεδο φβ πλαισίου

Με βάση το μοντέλο PSpice ισοδύναμου φβ πλαισίου για αυθαίρετες συνθήκες λειτουργίας που παρουσιάστηκε στο πέμπτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις διάφορες προσομοιώσεις.

- Οι χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ του προς εξέταση φβ πλαισίου έχουν ως εξής:



Σχήμα 6.39: Χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ ενός φβ πλαισίου

- Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα σκιασμένο φβ στοιχείο είναι δυνατόν να λειτουργεί υπό συνθήκες κατανάλωσης ισχύος αντί παραγωγής. Κατανάλωση ισχύος από ένα φβ στοιχείο έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του και, ως εκ τούτου, συνιστά κοινή πρακτική ο υπολογισμός των ακραίων συνθηκών κάτω από τις οποίες είναι δυνατόν να προέλθει μερική καταστροφή του στοιχείου ή του υλικού επικάλυψης. Ένας τρόπος προσδιορισμού μιας συγκεκριμένης περιοχής ασφαλούς λειτουργίας είναι ο υπολογισμός της ισχύος που καταναλώνει ένα φβ στοιχείο (αριθμού n) μέσω της σχέσης:

$$P_{dis} = -I_M V(n)$$

Η απαραίτητη συνθήκη για την αποφυγή καταστρεπτικών συνεπειών είναι, ότι κάτω από οποιαδήποτε συνθήκες λειτουργίας αυτή η κατανάλωση ισχύος από το στοιχείο αριθμού n θα πρέπει να είναι μικρότερη από ένα συγκεκριμένο όριο $P_{dis\ max}$. Η τάση $V(n)$ δίνεται από την

$$V(n) = V_M - \sum_{i=1}^{i=n-1} V(i)$$

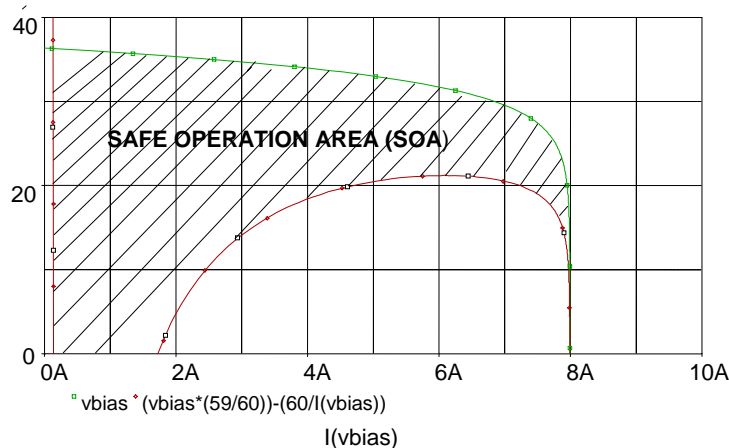
Από την εξίσωση 4.34 προκύπτει ότι

$$-I_M V_M + I_M \sum_{i=1}^{i=n-1} V(i) < P_{dis\ max}$$

και

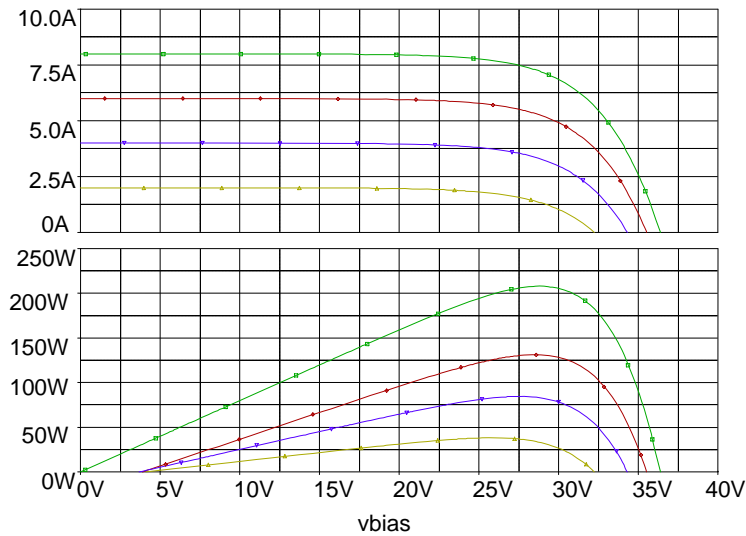
$$V_M > \sum_{i=1}^{i=n-1} V(i) - \frac{P_{dis\ max}}{I_M}$$

Η τελευταία εξίσωση αναπαρίσταται γραφικά μέσω του ακόλουθου σχήματος, όπου θεωρείται ότι για το συγκεκριμένο πλαίσιο που μελετάται $P_{dis\ max} = 60\ W$. Η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας κείται εντός του γραμμοσκιασμένου τμήματος μεταξύ των δύο καμπυλών. Εάν οποιαδήποτε στιγμή το σημείο λειτουργίας βρεθεί εντός της απαγορευμένης περιοχής (ή ισοδύναμα εκτός της ασφαλούς περιοχής λειτουργίας), μπορεί να επέλθει κατανάλωση πέρα από τα επιτρεπτά όρια.



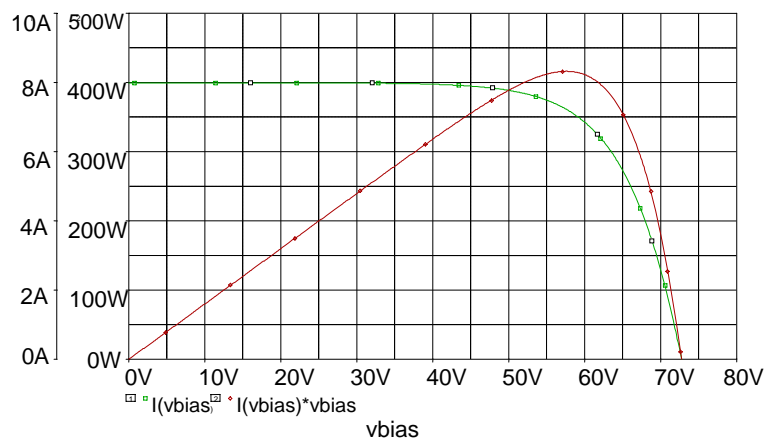
Σχήμα 6.40: Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας για ένα φβ πλαίσιο (σ.σ. η τάση είναι στον y άξονα και το ρεύμα στον x)

- Η απόκριση ενός φβ πλαισίου κάτω από διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας δίνεται στο ακόλουθο σχήμα και, όπως είναι προφανές, έχει παρόμοια μορφή με την απόκριση ενός μόνο στοιχείου που δόθηκε προηγούμενα.



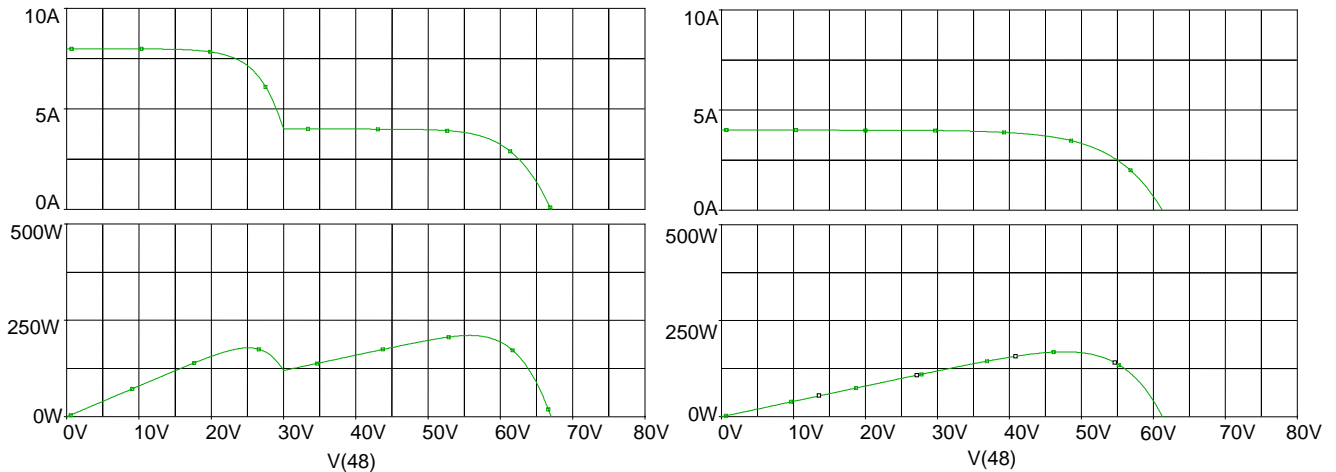
Σχήμα 6.41: Χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ ενός φβ πλαισίου για διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας ($IR = 1000, 750, 500, 250 \text{ W/m}^2$)

- Η σε σειρά σύνδεση δύο πλαισίων έχει ως αποτέλεσμα διπλάσια τάση και κατά συνέπεια και παραγόμενη ισχύ καθώς το ρεύμα παραμένει ίδιο με αυτό του ενός πλαισίου.



Σχήμα 6.42: Χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ δύο φβ πλαισίων σε σειρά

- Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι καμπύλες $I(V)$ και $P(V)$ στην περίπτωση που σκιαστεί το ένα ή και τα δύο πλαίσια, με bypass διόδους συνδεδεμένες παράλληλα σε καθένα από αυτά. Αυτό που παρατηρείται εδώ, και το οποίο έχει αναλυθεί πιο εκτεταμένα σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ότι η λειτουργία της ακολουθίας υφίσταται μια μικρότερη επίδραση με την ύπαρξη της διόδου γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερη μεν απόδοση, αλλά συγχρόνως δημιουργούνται δύο μέγιστα στην καμπύλη $P-V$ τα οποία δημιουργούν πρόβλημα όπως έχει προαναφερθεί στη λειτουργία MPPT του μετατροπέα.

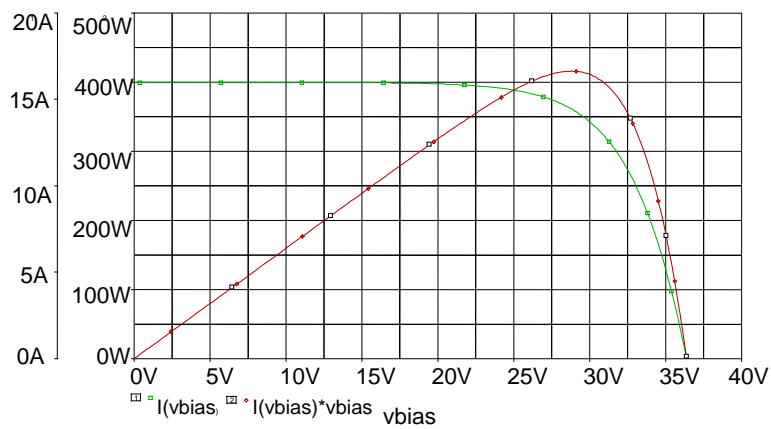


(α)

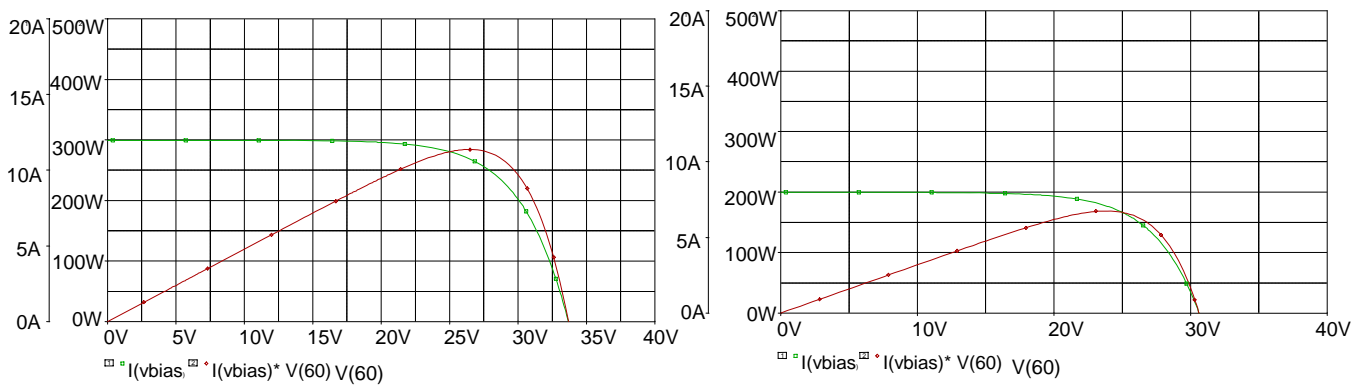
(β)

Σχήμα 6.43: Σκίαση φβ πλαίσιων σε σειρά (α) ενός, (β) και των δύο

- Αντίστοιχα με τα προηγούμενα, δίνονται τα διαγράμματα για την περίπτωση δύο πλαίσιων συνδεδεμένων παράλληλα. Σε αντίθεση με την εν σειρά σύνδεση, στην προκειμένη περίπτωση δεν παρουσιάζονται πολλαπλές κορυφές στην καμπύλη ισχύος. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η σειριακή σύνδεση είναι πιο ευπαθής στη μερική σκίαση σε σχέση με την παράλληλη.



Σχήμα 6.44: Χαρακτηριστικές I(V) και P(V) δύο φβ πλαίσιων παράλληλα

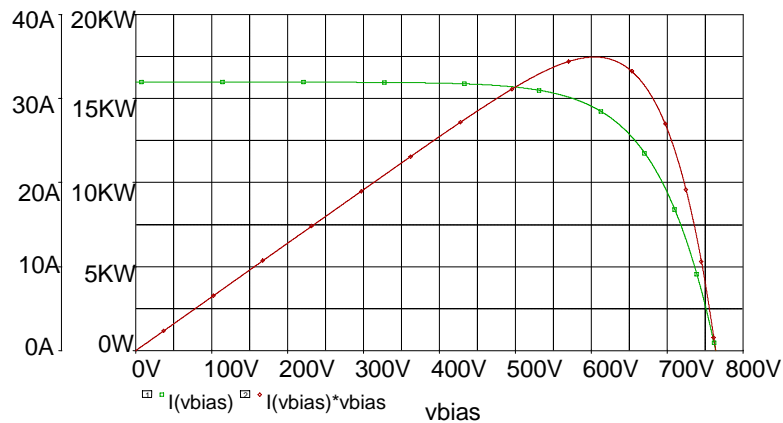


Σχήμα 6.45: Σκίαση φβ πλαίσιων παράλληλα (α) ενός, (β) και των δύο

Προσομοιώσεις σε επίπεδο φβ συστοιχίας

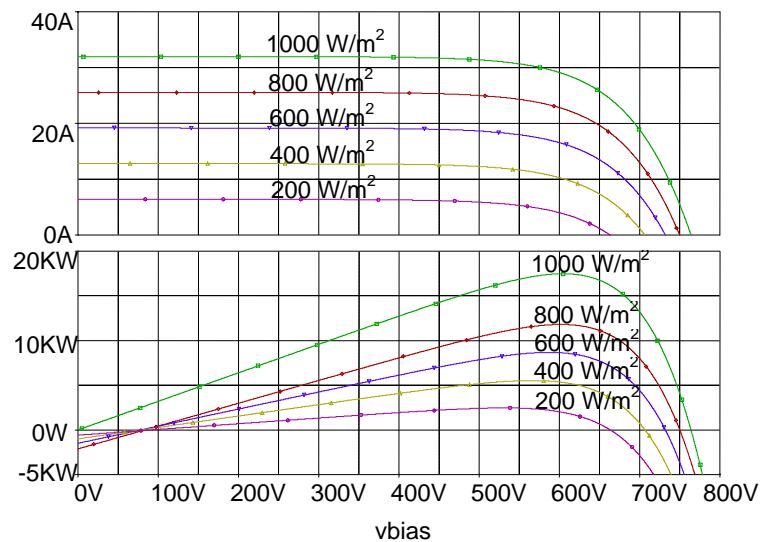
Με βάση το αντίστοιχο μοντέλο PSpice ισοδύναμου φβ πλαισίου γίνεται αναγωγή σε επίπεδο φβ συστοιχίας, συνολικού αριθμού πλαισίων $4 \times 21 = 84$. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ανάλογα με τα αντίστοιχα της περίπτωσης ενός πλαισίου και παρατίθενται ακολούθως.

- Οι χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ της προς εξέταση φβ συστοιχίας έχουν ως εξής:



Σχήμα 6.46: Χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ μιας φβ συστοιχίας

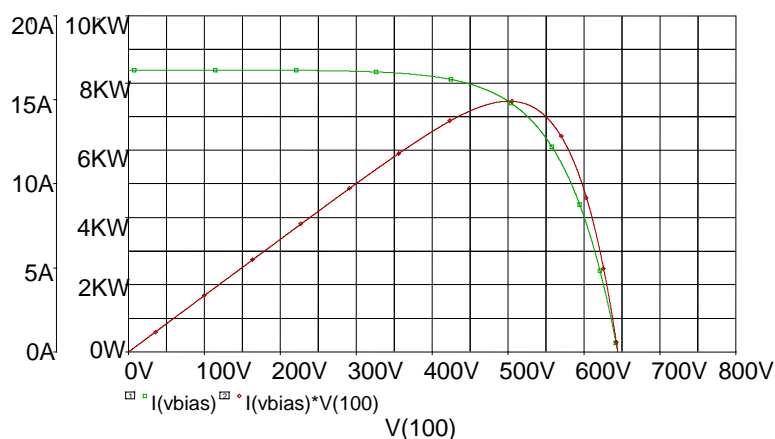
- Η ηλεκτρική απόκριση μιας φβ συστοιχίας κάτω από διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας (και συγκεκριμένα για $IR = 200, 400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$) φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6.47: Χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ μιας φβ συστοιχίας για διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας ($IR = 200, 400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$)

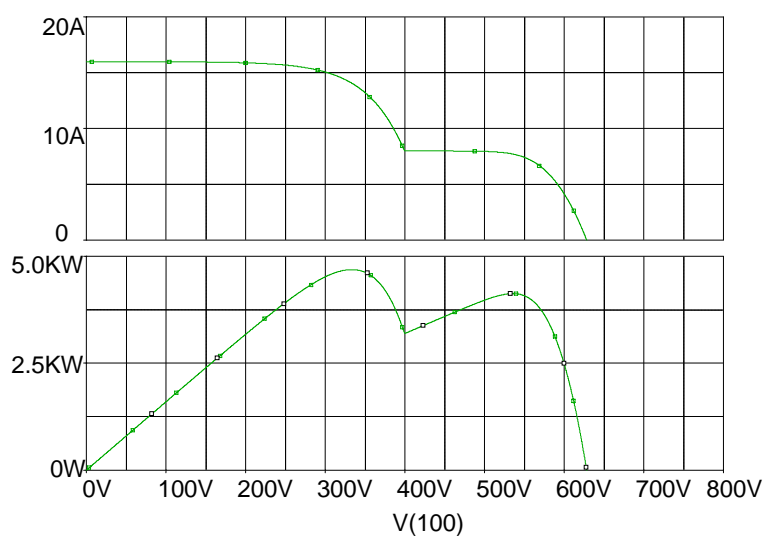
• Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις δύο τυπικών περιπτώσεων ομοιόμορφης και ανομοιόμορφης σκίασης. Σκοπός αυτών των προσομοιώσεων είναι ο υπολογισμός των ποσοστών μείωσης της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου των φβ συστοιχιών του προς εξέταση φβ σταθμού. Κατόπιν, τα εν λόγω ποσοστά εφαρμόζονται κατάλληλα στον αρχικό κώδικα (σε Matlab) του κύριου προγράμματος του ενεργειακού μοντέλου προκειμένου να εξαχθούν τα τελικά αποτελέσματα για την ενεργειακή απόδοση του φβ σταθμού.

➤ Οι χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ μιας φβ συστοιχίας υπό μερική σκίαση και της οποίας η μια ακολουθία σκιάζεται (ακτινοβολία 300W/m^2) ενώ οι υπόλοιπες τρεις δέχονται όμοια ακτινοβολία (600W/m^2) είναι οι ακόλουθες.



Σχήμα 6.49: Τυπική απόκριση φβ συστοιχίας υπό ομοιόμορφη σκίαση

➤ Στην περίπτωση της ανομοιόμορφης σκίασης, όπου έξι πλαίσια από κάθε ακολουθία σκιάζονται (250W/m^2) ενώ τα υπόλοιπα δέχονται όμοια ακτινοβολία (500W/m^2) οι χαρακτηριστικές $I(V)$ και $P(V)$ που προκύπτουν έχουν ως εξής:



Σχήμα 6.49: Τυπική απόκριση φβ συστοιχίας υπό ανομοιόμορφη σκίαση

Από προσομοιώσεις σαν και τις παραπάνω παρατηρείται η δημιουργία παραμορφώσεων στις χαρακτηριστικές καμπύλες της φβ συστοιχίας για την περίπτωση της ανομοιόμορφης σκίασης, κάτι που δε συμβαίνει σε αυτήν της ομοιόμορφης. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα στη λειτουργία ΜΡΡΤ του αντιστροφέα, όπως τονίζεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ιδιαίτερα δε σε περιπτώσεις που εντός του εύρους λειτουργίας ΜΡΡΤ απαντώνται περισσότερες από μία κορυφές. Σε τέτοιες περιπτώσεις ενέχεται κίνδυνος εγκλωβισμού σε σημείο διαφορετικό από αυτό που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ.

Για τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης και λαμβάνοντας υπόψη ότι αυτή επικεντρώνεται στην εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης ενός φβ σταθμού και όχι στον ακριβή προσδιορισμό των ηλεκτρικών μεγεθών υπό συνθήκες μερικής σκίασης, θεωρείται ότι δεν υφίστανται τέτοια προβλήματα λειτουργίας ΜΡΡΤ του αντιστροφέα και σε κάθε περίπτωση επιλέγεται η λειτουργία στο σημείο που αντιστοιχεί στο ολικό μέγιστο.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν οι επιδράσεις της σκίασης και της ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκών σταθμών. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης ενσωματώθηκαν σε ένα υπολογιστικό μοντέλο με χρήση της προγραμματιστικής γλώσσας Matlab, το οποίο παρέχει μια εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας μιας φβ συστοιχίας και κατ' επέκταση ενός φβ σταθμού σε ετήσια βάση. Καθώς η μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων που οφείλεται στη σκίαση και στη ρύπανση μπορεί να είναι σημαντική σε σύγκριση με άλλους παράγοντες μείωσης (derating factors), είναι καίρια η μελέτη και η ακριβής μοντελοποίηση των συγκεκριμένων φαινομένων, προκειμένου να επιτευχθεί μια κατά το δυνατόν ορθότερη εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης.

Από την ανάλυση που επιχειρείται στην παρούσα εργασία, προκύπτει κατ' αρχάς ένα βελτιωμένο μοντέλο για την πρόβλεψη των απωλειών ενέργειας που συντελούνται στα φβ συστήματα, εξαιτίας της συσσώρευσης ρύπων και λοιπών αντικειμένων στην επιφάνεια των φβ πλαισίων. Τα περισσότερα διαθέσιμα προγράμματα προσομοίωσης φβ συστημάτων υιοθετούν την ύπαρξη ενός σταθερού παράγοντα απωλειών ρύπανσης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Το εν λόγω μοντέλο, ωστόσο, αποτελεί βελτίωση της κλασικής αυτής υπόθεσης, προτείνοντας γραμμική μεταβολή του συγκεκριμένου παράγοντα προκειμένου να προσεγγιστούν κατά το δυνατόν ορθότερα οι απώλειες λόγω ρύπανσης, οι οποίες συντελούνται κατά τη διάρκεια περιόδων ξηρασίας. Τα αποτελέσματα που εξάγονται ύστερα από εφαρμογή του μοντέλου συναρτώνται άμεσα με τη διαθέσιμη χρονοσειρά δεδομένων βροχόπτωσης. Επιπλέον, καθώς οι απώλειες λόγω ρύπανσης ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με την περιοχή και τον τύπο περιβάλλοντος, θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη λειτουργία των φβ συστημάτων, ιδιαίτερα δε στην περίπτωση που ξεπερνούν κάποιο όριο και είναι πλέον οικονομικά συμφέρουσα η επιλογή ενός χειροκίνητου καθαρισμού.

Η σκίαση των φβ συστοιχιών από την άλλη είναι δυνατό να επηρεάσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση σε μεγάλης κλίμακας φβ συστήματα όπως και σε άλλες περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης. Για την πληρέστερη ποσοτικοποίηση του εν λόγω φαινομένου μελετήθηκε η ηλεκτρική απόκριση των φβ συστοιχιών υπό συνθήκες μερικής σκίασης μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων στο λογισμικό PSpice. Τα ποσοστά μείωσης της ισχύος εξόδου υπολογίζονται για δύο τυπικές περιπτώσεις σκίασης, ομοιόμορφης και ανομοιόμορφης, και όπως προκύπτει οι παρατηρούμενες διαφορές στην απόδοση είναι πολύ μικρές. Η επίδραση του φαινομένου της σκίασης στην ετήσια ηλιακή απολαβή και την ενεργειακή παραγωγή συναρτίζεται της απόστασης μεταξύ των διαδοχικών σειρών και του αριθμού αυτών διερευνάται με σκοπό τον προσδιορισμό της βέλτιστης διάταξης των φβ συστοιχιών στη διαθέσιμη έκταση προς εγκατάσταση. Στα πλαίσια αυτού, η μεταβολή των ετήσιων απωλειών σκίασης συναρτίζεται του λόγου D/H έχει μεγάλη σημασία για την επίτευξη ενός συμβιβασμού, μεταξύ των απαιτήσεων για ελαχιστοποίηση των σκιάσεων από τη μια, και της κατάληψης του διαθέσιμου χώρου από την άλλη. Τα τελικά αποτελέσματα της ενεργειακής απόδοσης ενός τυπικού φβ σταθμού μεγέθους 1MW (συμπεριλαμβανομένων όλων των παραγόντων μείωσης), καταδεικνύουν την ύπαρξη εποχιακών διαφοροποιήσεων στις επιδράσεις των επιμέρους παραγόντων (μείωσης). Οι επιδράσεις αυτές, τέλος, εξαρτώνται άμεσα από τις συγκεκριμένες

κλιματολογικές συνθήκες και τα ιδιάζοντα χαρακτηριστικά της εκάστοτε θέσης εγκατάστασης.

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Συνοψίζοντας, καθίσταται πλέον εμφανής η δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης της διαδικασίας μοντελοποίησης των συγκεκριμένων παραγόντων μείωσης που εξετάστηκαν.

Πιο συγκεκριμένα, με βάση την προηγηθείσα μελέτη, γίνεται σαφές το γεγονός ότι η ρύπανση είναι δυνατόν να διαφοροποιείται ακόμη και στην ίδια τοποθεσία, από χρόνο σε χρόνο. Έτσι, για την πληρέστερη ποσοτικοποίηση της εν λόγω επίδρασης, απαιτείται εξέταση των συστημάτων για εκτενέστερες χρονικές περιόδους. Επιπλέον, είναι απαραίτητη περαιτέρω έρευνα σχετικά με την ποσότητα της βροχής που απαιτείται για τον πλήρη καθαρισμό ενός ΦΒ συστήματος, καθώς και προσεκτικότερη επιλογή της έναρξης και λήξης της καθορισμένης περιόδου ξηρασίας, προκειμένου να αποφευχθεί μια απρόβλεπτη συμπεριφορά στο τέλος της περιόδου αυτής (μείωση της απόδοσης του συστήματος έπειτα από μία ασθενή βροχόπτωση). Εκτός των άλλων, εκτιμάται ότι και η ένταση της βροχής είναι πιθανό να επιδρά στον επαρκή καθαρισμό ή μη του συστήματος, κάτι που χρήζει περαιτέρω έρευνας. Τέλος, η γνώση της ακριβούς τιμής καθαρισμού, η οποία διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία και τον τύπο περιβάλλοντος, είναι αναγκαία για τον προσδιορισμό του οικονομικού οφέλους που μπορεί να προκύψει από την επιλογή ενός χειροκίνητου καθαρισμού.

Στην παρούσα εργασία η ανάλυση επικεντρώθηκε στο φαινόμενο της σκίασης που εμφανίζεται στις επιφάνειες φβ συλλεκτών διατεταγμένων σε διαδοχικές σειρές και που προκαλείται από τη μία σειρά στην επόμενη. Ωστόσο, σκιάσεις είναι δυνατόν να προκαλούνται και από άλλους παράγοντες όπως πχ παρακείμενα αντικείμενα, κτίρια, βλάστηση κλπ, η επίδραση των οποίων δεν έχει συμπεριληφθεί σε αυτή τη μελέτη. Επιπλέον, δεν υπήρχε η δυνατότητα γνώσης της ακριβούς τιμής του επιπέδου ακτινοβολίας υπό συνθήκες μερικής σκίασης, δηλαδή του ποσού της ακτινοβολίας το οποίο έχει υποστεί μείωση από τη σκίαση και που τελικά προσπίπτει στα φβ πλαίσια. Η γνώση της μεταβολής της σκίασης κατά τη διάρκεια μιας ημέρας στην επιφάνεια μιας φβ συστοιχίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του τρόπου διασύνδεσης των πλαισίων στο εσωτερικό της συστοιχίας. Κάτι τέτοιο δεν έχει αναλυθεί εκτενώς και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Βιβλιογραφία

- [1] Castaner L., Silvestre S. “Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice”, Wiley, England, 2002
- [2] Δέρβος Κ. “Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα Υλικά και Φωτοβολταϊκές Διατάξεις”, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2007
- [3] Steven Hegedus, Antonio Luque “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, Wiley, England, 2002
- [4] Tom Markvart, Luis Castaner “Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications”, Elsevier
- [5] Duffie JA, Beckman WA “Solar Engineering of Thermal Processes” 2nd edition, Wiley, New York, NY, 1991
- [6] Παπαδόπουλος Μιχ. “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1997
- [7] Καγκαράκη Κ. “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία
- [8] Marion B., Adelstein J., Boyle K. “Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems”, 31st IEEE Photovoltaics Specialists, Florida, 2005
- [10] King D. L., Boyson W. E., Kratochvil J. A. “Analysis of Factors Influencing the Annual Energy Production of Photovoltaic Systems”, Albuquerque, New Mexico, 2002
- [11] Kimber A., Mitchell L., Nogradi S., Wenger H. “The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and Southwest Region of The United States ”, Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, USA, 2006
- [12] Kimber A. “The Effect of Soiling on Photovoltaic Systems Located in Arid Climates”, USA, 2007
- [13] Appebaum J., Bany J. “Shadow Effect of Adjacent Solar Collectors in Large Scale Systems”, Solar Energy **23**, 1979
- [14] Weinstock D., Appelbaum J. “Shadow Variation on Photovoltaic Collectors in a Solar Field”, Tel-Aviv, Israel, 2004
- [15] Alonso-Garcia M.C., Ruiz J.M., Herrmann W. “Computer Simulation of Shading Effects in Photovoltaic Arrays”, Renewable Energy **31**, 2006

- [16] Kawamura H., Naka K., Yonekura N. et al “Simulation of I-V Characteristics of a PV Module with Shaded PV Cells”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* **75**, 2003
- [17] Karatepe E., Boztepe M., Colak M. “Development of a Suitable Model for Characterizing Photovoltaic Arrays with Shaded Solar Cells”, *Solar Energy* **81**, 2007
- [18] Woyte A., Nijs J., Belmans R. “Partial Shadowing of Photovoltaic Arrays with Different System Configurations: Literature Review and Field Test Results”, *Solar Energy* **74**, 2003
- [19] King D. L., Boyson W. E., Kratochvil J. A. “Photovoltaic Array Performance Model”, Albuquerque, New Mexico, 2004
- [20] Καραμάνου Ε. “Διερεύνηση Δυνατοτήτων Διείσδυσης Φωτοβολταϊκής Παραγωγής σε Αυτόνομα Νησιωτικά Συστήματα με Εγκατεστημένη Αιολική Ισχύ”, Αθήνα, 2006
- [21] Πέππα Α. “Μοντέλο Ενεργειακής Απόδοσης Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας”, Αθήνα, 2007
- [22] <http://photovoltaics.sandia.gov/>
- [23] <http://www.nrel.gov/>
- [24] <http://www.earthscan.co.uk/>

Παράρτημα Α

Ακολουθώς παρατίθενται τα εξαγόμενα ποσοστά μείωσης της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου των φβ συστοιχιών, απαραίτητα για τις κατάλληλες προσομοιώσεις με το μοντέλο ενεργειακής απόδοσης.

ομοιόμορφη

μείωση 50%

	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση
Pmp (kW)	1000	17,472		800	11,801		600	8,6736		400	5,5199		200	2,4544	
	1000			800			600			400			200		
Vmp(V)	1000	604,5		800	518,41		600	508,75		400	487,7		200	439,09	
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	500	14,626	0,163	400	10,208	0,135	300	7,4625	0,14	200	4,7202	0,145	100	2,0808	0,152
	1000			800			600			400			200		
Vmp(V)	1000	580,54	0,04	800	512,94	0,011	600	500,99	0,015	400	477,75	0,02	200	426,75	0,028
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	500	11,945	0,316	400	8,6266	0,269	300	6,2715	0,277	200	3,9411	0,286	100	1,7211	0,299
	500			400			300			200			100		
Vmp(V)	1000	555,48	0,081	800	506,26	0,023	600	492,12	0,033	400	466,6	0,043	200	413,52	0,058
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	500	9,4325	0,46	400	7,0621	0,402	300	5,1039	0,412	200	3,1849	0,423	100	1,3763	0,439
	500			400			300			200			100		
Vmp(V)	500	528,92	0,125	400	498,18	0,039	300	481,76	0,053	200	453,94	0,069	100	398,78	0,092
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	500	7,0951	0,594	400	5,5199	0,532	300	3,964	0,543	200	2,4544	0,555	100	0,342	0,577
	500			400			300			200			100		
Vmp(V)	500	500,26	0,172	400	487,7	0,059	300	468,99	0,078	200	439,09	0,1	100	383,25	0,127
	500			400			300			200			100		

μείωση 25%

	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση
Pmp (kW)	1000	17,472		800	11,801		600	8,6736		400	5,5199		200	2,4544	
	1000			800			600			400			200		
Vmp(V)	1000	604,5		800	518,41		600	508,75		400	487,7		200	439,09	
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	750	15,739	0,099	600	11,018	0,066	450	8,0765	0,069	300	5,1247	0,072	150	2,2694	0,075
	1000			800			600			400			200		
Vmp(V)	1000	582,86	0,036	800	516,4	0,004	600	505,59	0,062	400	483,5	0,086	200	433,65	0,012
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	750	14,086	0,194	600	10,235	0,133	450	7,4828	0,137	300	4,7335	0,143	150	2,0873	0,15
	750			600			450			300			150		
Vmp(V)	1000	561,02	0,072	800	514,08	0,008	600	502,23	0,013	400	478,9	0,018	200	428	0,025
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	750	12,515	0,284	600	9,4535	0,199	450	6,8926	0,205	300	4,3466	0,213	150	1,9083	0,223
	750			600			450			300			150		
Vmp(V)	750	538,98	0,108	600	511,57	0,013	450	498,57	0,02	300	474,09	0,028	150	422,15	0,033
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	750	11,025	0,369	600	8,6736	0,265	450	6,3063	0,273	300	3,964	0,282	150	0,3719	0,349
	750			600			450			300			150		
Vmp(V)	750	516,64	0,145	600	508,75	0,019	450	494,61	0,278	300	468,99	0,038	150	402,95	0,082
	750			600			450			300			150		

μείωση 75%

	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση
Pmp (kW)	1000	17,472		800	11,801		600	8,6736		400	5,5199		200	2,4544	
	1000			800			600			400			200		
Vmp(V)	1000	604,5		800	518,41		600	508,75		400	487,7		200	439,09	
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	250	13,438	0,231	200	9,3413	0,208	150	6,8092	0,215	100	4,2915	0,223	50	1,8812	0,234
	1000			800			600			400			200		
Vmp(V)	1000	574,83	0,049	800	506,18	0,024	600	493,19	0,031	400	468,81	0,037	200	416,87	0,051
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	250	9,697	0,445	200	6,9486	0,411	150	5,0195	0,421	100	3,1292	0,433	50	1,3489	0,45
	250			200			150			100			50		
Vmp(V)	1000	542,26	0,103	800	490,95	0,053	600	474,53	0,067	400	446,82	0,084	200	391,75	0,108
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	250	6,2702	0,641	200	4,641	0,607	150	3,3182	0,617	100	2,0421	0,63	50	0,8621	0,649
	250			200			150			100			50		
Vmp(V)	250	504,59	0,165	200	470,62	0,092	150	450,77	0,114	100	419,83	0,139	50	361,73	0,176
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	250	3,201	0,817	200	2,4544	0,792	150	0,3719	0,957	100	0,1614	0,85	50	0,0715	0,971
	250			200			150			100			50		
Vmp(V)	250	455,73	0,246	200	439,09	0,153	150	402,95	0,208	100	366,55	0,19	50	324,84	0,26
	250			200			150			100			50		

μείωση 100%

	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση	ακτινοβολία		μείωση
Pmp (kW)	1000	17,472		800	11,801		600	8,6736		400	5,5199		200	2,4544	
	1000			800			600			400			200		
Vmp(V)	1000	604,5		800	518,41		600	508,75		400	487,7		200	439,09	
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	0	11,082	0,366	0	7,6022	0,356	0	5,5484	0,36	0	3,5021	0,366	0	1,539	0,373
	1000			800			600			400			200		
Vmp(V)	1000	518,99	0,142	800	452,05	0,128	600	441	0,133	400	419,92	0,139	200	374,36	0,147
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	0	5,964	0,659	0	4,1717	0,647	0	5,0143	0,653	0	1,8795	0,66	0	0,811	0,67
	0			0			0			0			0		
Vmp(V)	1000	428,08	0,292	800	380,19	0,267	600	367,76	0,277	400	346,63	0,289	200	304,53	0,306
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	0	2,1712	0,876	0	1,5567	0,868	0	1,1058	0,873	0	0,6747	0,878	0	0,2811	0,886
	0			0			0			0			0		
Vmp(V)	0	323,77	0,454	0	294,63	0,432	0	280,91	0,448	0	260,15	0,467	0	222,19	0,494
	1000			800			600			400			200		
Pmp(kW)	0			0			0			0			0		
	0			0			0			0			0		
Vmp(V)	0			0			0			0			0		
	0			0			0			0			0		

ανομοιόμορφη

1000/500

1 σειρά

1 σειρά				2 σειρές				3 σειρές				4 σειρές			
πλαίσια	Pmp(kW)	μείωση	Vmp(V)	πλαίσια	Pmp(kW)	μείωση	Vmp(V)	πλαίσια	Pmp(kW)	μείωση	Vmp(V)	πλαίσια	Pmp(kW)	μείωση	Vmp(V)
1	17,187	0,0163	594,678	1	16,939	0,0305	586,156	1	16,72	0,043	578,734		16,522	0,0544	572,12
2	16,788	0,0391	580,656	2	16,293	0,0675	563,712		15,901	0,0899	550,469	1	11,043	0,368	694,312
	16,256	0,0696	562,034		15,549	0,1101	537,969	2	11,893	0,3193	654,669		15,573	0,1087	539,525
3	15,468	0,1147	611,134	3	13,549	0,2245	623,699		15,035	0,1395	520,703	2	10,749	0,3848	679,125
	15,591	0,1077	538,712		14,729	0,157	509,425	3	11,827	0,3231	648,003		14,623	0,1631	507,037
4	15,444	0,1161	610,212	4	13,505	0,227	621,225		14,137	0,1909	489,737	3	10,482	0,4001	665,637
	14,814	0,1521	511,49		13,856	0,207	479,181	4	11,739	0,3281	639,437		13,674	0,2174	474,549
5	15,418	0,1176	608,99	5	13,453	0,23	617,781		13,219	0,2434	458,171	4	10,233	0,4143	653,149
	13,954	0,2014	481,669		12,948	0,2589	447,837	5	11,631	0,3343	630,771		12,724	0,2717	442,062
6	15,389	0,1192	607,569	6	13,391	0,2336	613,737		12,289	0,2966	426,206	5	9,997	0,4278	641,362
	13,039	0,2537	449,947		12,02	0,312	415,793	6	11,51	0,3412	622,506		11,775	0,3261	409,574
7	15,355	0,1212	605,847	7	13,318	0,2378	609,293		11,352	0,3503	394,04	6	9,771	0,4408	630,274
	12,09	0,308	417,225		11,079	0,3659	383,549	7	11,38	0,3487	614,54		10,826	0,3804	377,086
8	15,317	0,1233	603,925	8	13,238	0,2423	604,849		10,41	0,4042	361,774	7	9,555	0,4531	619,586
	11,121	0,3635	383,903		10,131	0,4202	351,006	8	11,245	0,3564	607,074		9,878	0,4346	344,699
9	15,275	0,1257	602,003	9	13,151	0,2473	600,506		9,4658	0,4582	329,408	8	9,3458	0,4651	609,399
	10,141	0,4196	350,281		9,1792	0,4746	318,362	9	11,106	0,3644	599,808		8,9293	0,4889	312,211
10	15,229	0,1284	599,981	10	13,059	0,2526	596,162		8,5204	0,5123	297,042	9	9,1441	0,4766	599,611
	9,1541	0,4961	316,559		8,2248	0,5293	285,618	10	10,965	0,3724	592,942		7,9815	0,5432	279,723
11	15,18	0,1312	597,959	11	12,964	0,258	592,018		7,5744	0,5665	264,677	10	8,9486	0,4878	590,123
	8,1644	0,5327	282,737		7,2693	0,5839	252,874	11	10,823	0,3806	586,277		7,0343	0,5974	247,336
12	15,129	0,1341	596,037	12	12,866	0,2636	587,874		6,6283	0,6206	232,211	11	8,7588	0,4987	580,936
	7,1731	0,5895	248,915		6,3133	0,6387	220,13	12	10,861	0,3887	579,911		6,088	0,6516	214,948
13	15,077	0,1371	594,215	13	12,766	0,2693	583,93		5,6827	0,6748	199,845	12	8,5741	0,5093	571,948
	6,1811	0,6462	215,293		5,3574	0,6934	187,386	13	10,538	0,3969	573,645		5,1431	0,7056	182,56
14	15,023	0,1402	592,393	14	12,664	0,2752	580,086		4,738	0,7288	167,479	13	8,3942	0,5186	563,26
	5,1896	0,703	182,071		4,4021	0,748	154,742	14	10,396	0,405	567,579		4,2001	0,7596	150,273
15	14,968	0,1433	590,571	15	12,562	0,281	576,343		3,795	0,7828	135,214	14	8,2188	0,5296	554,773
	14,912	0,1465	588,749		3,4481	0,8026	122,099	15	10,255	0,4131	561,714		3,2606	0,8134	118,085
16	14,855	0,1498	587,027	16	12,459	0,2869	572,699		2,855	0,8366	102,948	15	8,0475	0,5394	546,485
	14,799	0,153	585,306		2,4967	0,8571	89,555	16	10,115	0,4211	555,948		2,3274	0,8668	85,997
17	14,741	0,1563	583,784	17	12,356	0,2928	569,055	17	1,9216	0,89	70,982	16	7,8801	0,549	538,397

(συνέχεια
1000/500)

20	14,684	0,1596	582,062		1,5524	0,9111	57,311		9,976	0,429	550,282		1,4086	0,9194	54,41
21	14,626	0,1629	580,54	18	12,253	0,2987	565,511		1,0063	0,9424	39,516	17	7,7165	0,5584	530,41
				19	12,15	0,3046	562,167	18	9,838	0,4369	544,816		0,535913	0,9693	23,922
				20	12,047	0,3105	558,723	19	9,702	0,4447	539,351	18	7,5563	0,5675	522,622
				21	11,945	0,3163	555,479	20	9,566	0,4525	534,085	19	7,3995	0,5765	515,034
								21	9,4325	0,4601	528,919	20	7,2458	0,5853	507,547
												21	7,0951	0,5939	500,259

500/250

1 σειρά

πλαίσια

2 σειρές

3 σειρές

4 σειρές

πλαίσια	Pmp(kW)	μείωση	Vmp(V)	πλαίσια	Pmp(kW)	μείωση	Vmp(V)	πλαίσια	Pmp(kW)	μείωση	Vmp(V)	πλαίσια	Pmp(kW)	μείωση	Vmp(V)
1	6,9729	0,0172	491,654	1	6,868	0,032	484,349	1	6,7759	0,045	478,043		6,6938	0,0566	472,438
2	6,7985	418	479,249	2	6,5888	0,0714	464,738		6,426	0,0943	453,628	1	4,6147	0,3496	580,838
	6,563	0,075	462,443		6,264	0,1171	441,828	2	4,9474	0,3027	551,328		6,2925	0,1131	444,518
3	6,3257	0,1084	508,843	3	5,5886	0,2123	522,828		6,054	0,1652	427,612	2	4,4985	0,366	569,618
	6,2659	0,1169	441,238		5,9036	0,1679	416,518	3	4,9303	0,3051	544,912		5,8914	0,1697	416,797
4	6,3238	0,1087	508,438	4	5,5826	0,2132	521,318		5,667	0,2013	400,697	3	4,3953	0,3805	559,797
	5,9159	0,1662	416,433		5,518	0,2223	389,507	4	4,9014	0,3092	538,197		5,4903	0,2262	388,976
5	6,3203	0,1092	507,833	5	5,5712	0,2148	518,707		5,2705	0,2572	372,981	4	4,3006	0,3939	551,076
	5,5264	0,2211	389,128		5,1159	0,279	361,397	5	4,8648	0,3143	531,781		5,0893	0,2827	361,156
6	6,3146	0,11	506,928	6	5,5542	0,2172	515,697		4,868	0,3139	345,066	5	4,2123	0,4063	543,056
	5,1102	0,2798	360,223		4,7035	0,3371	332,687	6	4,8235	0,3202	525,966		4,6885	0,3392	333,335
7	6,3054	0,1112	505,723	7	5,5328	0,2202	512,687		4,4619	0,3711	316,85	6	4,1292	0,418	535,635
	4,6775	0,3407	330,518		4,2848	0,3961	303,676	7	4,7793	0,3264	520,65		4,2879	0,3957	305,514
8	6,2961	0,1126	504,518	8	5,503	0,2237	509,676		4,0538	0,4286	288,535	7	4,0502	0,4292	528,614
	6,284	0,1143	503,212		3,8626	0,4556	274,366	8	4,7334	0,3329	515,735		3,8875	0,4521	277,694
10	6,2705	0,1162	502,007	9	5,4807	0,2275	506,866		3,6445	0,4863	260,119	8	3,9749	0,4398	521,993
	6,2558	0,1183	500,802		3,4385	0,5154	245,056	9	4,6865	0,3395	511,119		3,4874	0,5085	249,973
12	6,2404	0,1205	499,697	10	5,4516	0,2316	504,156		3,2348	0,5441	231,704	9	3,9029	0,4499	515,773
	6,2243	0,1227	498,592		3,0135	0,5753	215,645	10	4,6391	0,3462	506,804		3,0877	0,5648	222,252
14	6,2078	0,1251	497,587	11	5,4212	0,2359	501,645		2,8251	0,6018	203,388	10	3,8336	0,4597	509,752
	6,1909	0,1274	496,581		2,5884	0,6352	186,335	11	4,5915	0,3529	502,688		2,6886	0,6211	194,531
16	6,1738	0,1299	495,576	12	5,39	0,2403	499,235		2,4159	0,6595	174,973	11	3,7669	0,4591	504,031
				13											
	6,1565	0,1323	494,671		2,1638	0,695	156,925	12	4,544	0,3596	498,773	12	2,2903	0,6772	166,811

(συνέχεια
500/250)

17															
18	6,1391	0,1347	493,866		5,3582	0,2448	496,924		2,0075	0,7171	146,657		3,7024	0,4782	498,511
19	6,1217	0,1372	492,961		1,7406	0,7547	127,714	13	4,4968	0,3662	495,057		1,8931	0,7332	139,19
20	6,1042	0,1397	492,156	14	5,326	0,2493	494,714		1,6008	0,7744	118,442	13	3,6401	0,487	493,19
21	6,0867	0,1421	491,35		1,3199	0,814	98,704	14	4,4499	0,3728	491,542		1,4979	0,7889	111,669
				15	5,2936	0,2539	492,604		1,1969	0,8313	90,326	14	3,5797	0,4955	489,969
					0,904928	0,8725	70,293	15	4,4035	0,3794	488,126		1,1059	0,8441	84,349
				16	5,2611	0,2585	490,493		0,798845	0,8874	62,611	15	3,5211	0,5037	483,049
				17	5,2286	0,2631	488,583	16	4,3576	0,3858	484,811		0,720418	0,8985	57,328
				18	5,1961	0,2676	486,673		0,415437	0,9414	35,895	16	3,4642	0,5117	478,228
				19	5,1637	0,2722	484,862	17	4,3122	0,3922	481,595		0,351442	0,9505	31,107
				20	5,1316	0,2767	483,052	18	4,2674	0,3985	478,58	17	3,4088	0,5196	473,507
				21	5,0996	0,2813	481,342	19	4,2231	0,4048	475,564	18	3,3549	0,5272	468,987
								20	4,1795	0,4109	472,649	19	3,3023	0,5346	464,566
								21	4,1364	0,417	469,733	20	3,251	0,5418	460,145
												21	3,201	0,5488	455,925

διόρθωση_28

μείωση 50%

1000/500

	Pmp(kW)	μείωση P	Vmp(V)	μείωση V
28x1000	5,824		28,8	
1x500	5,6851	0,0238	28,668	0,00458
2x500	5,5474	0,0475	28,437	0,0126
3x500	5,4108	0,0709	28,305	0,0172
4x500	5,2753	0,0942	28,173	0,0218
5x500	5,1409	0,1173	27,942	0,0298
6x500	5,0076	0,1402	27,81	0,0344
7x500	4,8754	0,1629	27,678	0,039
8x500	4,7444	0,1854	27,446	0,047
9x500	4,6145	0,2077	27,315	0,0516
10x500	4,4856	0,2298	27,183	0,0561
11x500	4,3579	0,2517	26,951	0,0642
12x500	4,2314	0,2735	26,82	0,0688
13x500	4,1059	0,295	26,588	0,7681
14x500	3,9817	0,3163	26,456	0,0814
15x500	3,8585	0,3375	26,225	0,0894
16x500	3,7366	0,3584	26,093	0,094
17x500	3,6157	0,3792	25,961	0,0986
18x500	3,4961	0,3997	25,729	0,1066
19x500	3,3776	0,4201	25,598	0,1112
20x500	3,2603	0,4402	25,366	0,1192
21x500	3,1441	0,4601	25,234	0,1238
22x500	3,0292	0,4799	25,003	0,1318
23x500	2,9155	0,4994	24,771	0,1399
24x500	2,8029	0,5187	24,639	0,1445
25x500	2,6916	0,5378	24,407	0,1525
26x500	2,5815	0,5567	24,176	0,1606
27x500	2,4727	0,5754	24,044	0,1651
28x500	2,365	0,5939	23,812	0,1732

500/250

	Pmp(kW)	μείωση P	Vmp(V)	μείωση V
28x500	2,365			
1x250	2,3166	0,0205	23,797	0,00063
2x250	2,2683	0,0409	23,682	0,0055
3x250	2,2201	0,0613	23,667	0,0061
4x250	2,1721	0,0816	23,552	0,0109
5x250	2,1242	0,1018	23,537	0,0115
6x250	2,0765	0,122	23,422	0,0164
7x250	2,0289	0,1421	23,407	0,017
8x250	1,9814	0,1622	23,292	0,0218
9x250	1,9341	0,1822	23,277	0,0225
10x250	1,8869	0,2022	23,162	0,0273
11x250	1,8399	0,222	23,147	0,0279
12x500	1,7931	0,2418	23,032	0,0328
13x250	1,7464	0,2616	23,017	0,0334
14x250	1,6998	0,2813	22,902	0,0382
15x250	1,6535	0,3008	22,887	0,0388
16x250	1,6073	0,3204	22,772	0,0437
17x250	1,5612	0,3399	22,657	0,0485
18x250	1,5153	0,3593	22,642	0,0491
19x250	1,4697	0,3786	22,527	0,054
20x250	1,4241	0,3978	22,412	0,0588
21x250	1,3788	0,417	22,397	0,594
22x250	1,3337	0,4361	22,282	0,0643
23x250	1,2887	0,4551	22,167	0,0691
24x250	1,2439	0,474	22,152	0,0697
25x250	1,1994	0,4929	22,034	0,0747
26x250	1,1551	0,5116	21,922	0,0794
27x250	1,1109	0,5302	21,807	0,0842
28x250	1,067	0,5488	21,692	0,089

μείωση 25%

1000/750

	Pmp(kW)	μείωση P	Vmp(V)	μείωση V
28x1000	5,824		28,8	
1x750	5,738	0,0145	28,661	0,0048
2x750	5,6561	0,0288	28,522	0,0097
3x750	5,573	0,0431	28,383	0,0145
4x750	5,4905	0,0573	28,244	0,0193
5x750	5,4085	0,0713	28,005	0,0276
6x750	5,3271	0,0853	27,866	0,0324
7x750	5,2462	0,0992	27,7227	0,0373
8x750	5,1657	0,113	27,588	0,0421
9x750	5,0861	0,1267	27,449	0,0469

500/375

	Pmp(kW)	μείωση P	Vmp(V)	μείωση V
28x500	2,365		23,812	
1x375	2,3413	0,01	23,809	0,0001
2x375	2,3175	0,02	23,807	0,0002
3x375	2,2938	0,0301	23,704	0,0045
4x375	2,2701	0,0401	23,701	0,0047
5x375	2,2464	0,0501	23,698	0,0048
6x375	2,2227	0,0602	23,695	0,005
7x375	2,1991	0,0701	23,692	0,005
8x375	2,1755	0,0801	23,589	0,0094
9x375	2,152	0,0901	23,586	0,0095

10x750	5,0068	0,1403	27,309	0,0518	10x375	2,1284	0,1	23,583	0,0096
11x750	4,9282	0,1538	27,17	0,0566	11x375	2,1049	0,11	23,58	0,0097
12x750	4,85	0,15672	27,031	0,0614	12x375	2,0814	0,12	23,477	0,0141
13x750	4,7724	0,1806	26,892	0,0663	13x375	2,0579	0,1299	23,474	0,0142
14x750	4,6953	0,1938	26,753	0,0711	14x375	2,0345	0,1397	23,471	0,0143
15x750	4,6188	0,2069	26,614	0,0759	15x375	2,0111	0,1496	23,468	0,0144
16x750	4,5429	0,022	26,375	0,0842	16x375	1,9877	0,1595	23,365	0,0188
17x750	4,4676	0,2329	26,236	0,089	17x375	1,9644	0,1694	23,363	0,0189
18x750	4,3928	0,2457	26,097	0,0939	18x375	1,941	0,1793	23,36	0,019
19x750	4,3185	0,2585	25,958	0,0987	19x375	1,9177	0,1891	23,357	0,0193
20x750	4,2448	0,2712	25,819	0,1035	20x375	1,8945	0,1989	23,254	0,0234
21x750	4,1716	0,2837	25,68	0,1083	21x375	1,8712	0,2088	23,251	0,0236
22x750	4,099	0,2962	25,541	0,1132	22x375	1,848	0,2186	23,248	0,0237
23x750	4,0269	0,3086	25,402	0,118	23x375	1,8248	0,2284	23,145	0,028
24x750	3,9554	0,3208	25,163	0,1263	24x375	1,8017	0,2382	23,142	0,0281
25x750	3,8845	0,333	25,024	0,1311	25x375	1,7786	0,2479	23,139	0,0283
26x750	3,8141	0,451	24,885	0,1359	26x375	1,7555	0,2577	23,136	0,0284
27x750	3,7443	0,3571	24,746	0,1408	27x375	1,7325	0,2674	23,033	0,0327
28x750	3,675	0,369	24,606	0,1456	28x375	1,7095	0,2772	23,03	0,0328

μείωση 75%

1000/250

	Pmp(kW)	μείωση P	Vmp(V)	μείωση V
28x1000	5,824		28,8	
1x250	5,626	0,034	28,553	0,0086
2x250	5,4301	0,0676	28,407	0,0136
3x250	5,236	0,101	28,16	0,0222
4x250	5,0439	0,1339	28,013	0,0273
5x250	4,8538	0,1666	27,766	0,0359
6x250	4,6655	0,1989	27,62	0,041
7x250	4,4793	0,2309	27,373	0,0495
8x250	4,295	0,2625	27,126	0,0581
9x250	4,1128	0,2938	26,98	0,0632
10x250	3,9326	0,3248	26,733	0,0718
11x250	3,7544	0,3554	26,486	0,0803
12x500	3,5782	0,3856	26,239	0,0889
13x250	3,4042	0,4155	26,093	0,094
14x250	3,2323	0,445	25,846	0,1026
15x250	3,0625	0,4742	25,599	0,1111
16x250	2,8948	0,503	25,352	0,1197
17x250	2,7293	0,5314	25,106	0,1283
18x250	2,5661	0,5594	24,859	0,1368
19x250	2,4051	0,587	24,612	0,1454
20x250	2,2464	0,6143	24,266	0,1574
21x250	2,0901	0,6411	24,019	0,166
22x250	1,9361	0,6676	23,772	0,1746
23x250	1,7847	0,6936	23,425	0,1866
24x250	1,6357	0,7191	23,179	0,1952
25x250	1,4894	0,7443	22,832	0,2072

500/125

	Pmp(kW)	μείωση P	Vmp(V)	μείωση V
28x500	2,365		23,812	
1x125	2,2898	0,318	23,663	0,0063
2x125	2,2151	0,634	23,613	0,0084
3x125	2,1408	0,0948	23,466	0,0145
4x125	2,0669	0,126	23,314	0,0209
5x125	1,9935	0,1571	23,265	0,023
6x125	1,9206	0,1879	23,115	0,0293
7x125	1,8482	0,2185	22,966	0,0355
8x125	1,7762	0,249	22,916	0,0376
9x125	1,7048	0,2792	22,767	0,0439
10x125	1,6339	0,3091	22,617	0,0502
11x125	1,5635	0,3389	22,468	0,0564
12x125	1,4936	0,3685	22,318	0,0627
13x125	1,4243	0,3978	22,169	0,069
14x125	1,3555	0,4268	22,019	0,0753
15x125	1,2872	0,4557	21,27	0,0816
16x125	1,2196	0,4843	21,72	0,0879
17x125	1,1526	0,5126	21,571	0,0941
18x125	1,0861	0,5408	21,421	0,1004
19x125	1,0203	0,5686	21,172	0,1109
20x125	0,955177	0,5961	21,022	0,1172
21x125	0,890695	0,6234	20,733	0,1293
22x125	0,826962	0,6503	20,623	0,1339
23x125	0,763941	0,677	20,374	0,1444
24x125	0,7016	0,7033	20,125	0,1548
25x125	0,640262	0,7293	19,975	0,1611

26x250	1,3457	0,7689	22,485	0,2193	26x125	0,579697	0,7544	19,626	0,1758
27x250	1,2049	0,7931	22,138	0,2313	27x125	0,520058	0,7801	19,376	0,1863
28x250	1,067	0,8168	21,692	0,2468	28x125	0,461381	0,8049	19,127	0,1967

μείωση 100%

1000/0	Pmp(kW)	μείωση P	Vmp(V)	μείωση V	500/0	Pmp(kW)	μείωση P	Vmp(V)	μείωση V
28x1000	5,924		28,8		28x500	2,365		23,812	
1x0	5,494	0,0567	28,163	0,0221	1x0	2,2325	0,056	23,407	0,017
2x0	5,1727	0,0211	27,625	0,0408	2x0	2,1033	0,1107	22,901	0,383
3x0	4,8598	0,1656	27,088	0,0594	3x0	1,9774	0,1639	22,495	0,0553
4x0	4,5554	0,2178	26,45	0,0816	4x0	1,8548	0,2157	21,989	0,0766
5x0	4,2597	0,2186	25,913	0,1002	5x0	1,7355	0,2662	21,483	0,0978
6x0	3,9725	0,3179	25,275	0,1224	6x0	1,6196	0,3152	21,078	0,1148
7x0	3,694	0,3657	24,738	0,141	7x0	1,507	0,3628	20,572	0,1361
8x0	3,4249	0,4121	24,1	0,1632	8x0	1,3978	0,409	20,066	0,1573
9x0	3,1628	0,4569	23,463	0,1853	9x0	1,2919	0,4537	19,66	0,1744
10x0	2,9103	0,5003	22,925	0,204	10x0	1,1895	0,497	19,155	0,1956
11x0	2,6665	0,5422	22,288	0,2261	11x0	1,0904	0,5389	18,649	0,2168
12x0	2,4315	0,5825	21,65	0,2483	12x0	0,994816	0,5794	18,143	0,2381
13x0	2,2053	0,6213	21,013	0,2704	13x0	0,902676	0,6183	17,637	0,2593
14x0	1,988	0,6587	20,375	0,2925	14x0	0,814026	0,6558	17,031	0,2848
15x0	1,7797	0,6944	19,738	0,3147	15x0	0,728947	0,6918	16,526	0,306
16x0	1,5803	0,7287	19,1	0,3368	16x0	0,647423	0,7262	16,02	0,3272
17x0	1,3902	0,7613	18,363	0,3624	17x0	0,56953	0,7592	15,414	0,3527
18x0	1,2093	0,7924	17,725	0,3845	18x0	0,495314	0,7906	14,808	0,3781
19x0	1,0378	0,8218	16,988	0,4101	19x0	0,424871	0,8204	14,203	0,4035
20x0	0,875821	0,8496	16,25	0,4358	20x0	0,358291	0,8405	13,597	0,429
21x0	0,72373	0,8757	15,413	0,4648	21x0	0,295657	0,875	12,991	0,4544
22x0	0,581726	0,9001	14,575	0,4939	22x0	0,237159	0,8997	12,185	0,4883
23x0	0,450233	0,9227	13,638	0,5265	23x0	0,182981	0,9226	11,479	0,5179
24x0	0,329872	0,9434	12,701	0,559	24x0	0,13341	0,9436	10,574	0,5559
25x0	0,2215	0,962	11,563	0,5986	25x0	0,088874	0,9624	9,568	0,5982
26x0	0,126656	0,9783	10,126	0,6484	26x0	0,050104	0,9788	8,2621	0,653
27x0	0,048517	0,9917	8,088	0,7192	27x0	0,018608	0,9921	6,4563	0,728
28x0					28x0				

διόρθωση_36

μείωση 50%

	Pmp(kW)	αύξησηP	Vmp(V)	αύξησηV		Pmp(kW)	αύξησηP	Vmp(V)	αύξησηV
1000/500					500/250				
36x500	3,0408		23,8120		36x250	1,3718		21,6920	
4x1000+32x500	3,4765	0,1433	24,4220	0,0256	4x500+32x250	1,5484	0,1287	22,0380	0,0160
9x500+27x1000	6,2684		27,6780		9x250+27x500	2,6080		23,4070	
8x500+28x1000	6,4005	0,0211	27,7810	0,0037	8x250+28x500	2,6561	0,0184	23,4190	0,000513
18x500+18x1000	5,1193		26,4560		18x250+18x500	2,1855		22,9020	
16x500+20x1000	5,3684	0,0487	26,7610	0,0115	16x250+20x500	2,2787	0,0426	23,0250	0,00537
27x500+9x1000	4,0424		25,2340		27x250+9x500	1,7727		22,3970	
24x500+12x1000	4,3932	0,0868	25,6420	0,0153	24x250+12x500	1,9091	0,0769	22,5320	0,006028

μείωση 25%

	Pmp(kW)	αύξησηP	Vmp(V)	αύξησηV		Pmp(kW)	αύξησηP	Vmp(V)	αύξησηV
1000/750					500/375				
36x750	4,7250		24,6060		36x375	2,1979		23,0300	
4x1000+32x750	5,0044	0,0591	25,0390	0,0176	4x500+32x375	2,2901	0,0419	23,1390	0,0047
9x750+27x1000	6,7451		27,7270		9x375+27x500	2,2874		23,6920	
8x750+28x1000	6,8259	0,0120	27,8350	0,0039	8x375+28x500	2,8511	0,0084	23,6940	0,000084
18x750+18x1000	6,0369		26,7530		18x375+18x500	2,6158		23,4710	
16x750+20x1000	6,1913	0,0256	26,9700	0,0081	16x375+20x500	2,6627	0,0179	23,4760	0,00021
27x750+9x1000	5,3635		25,6800		27x375+9x500	2,4590		23,2510	
24x750+12x1000	5,5841	0,0411	26,0040	0,0121	24x375+12x500	2,4576	0,0215	23,3580	0,0046

μείωση 75%

	Pmp(kW)	αύξησηP	Vmp(V)	αύξησηV		Pmp(kW)	αύξησηP	Vmp(V)	αύξησηV
1000/250					500/125				
36x250	1,3718		21,6920		36x125	593,2040		19,1270	
4x1000+32x250	1,9356	0,4110	22,8480	0,0533	4x500+32x125	831,9290	0,4240	19,9810	0,0446
9x250+27x1000	5,7591		27,3730		9x125+27x500	2,3762		22,9660	
8x250+28x1000	5,9450	0,0323	27,4870	0,0042	8x125+28x500	2,4486	0,0305	23,1040	0,0060
18x250+18x1000	4,1558		25,8460		18x125+18x500	1,7427		22,0190	
16x250+20x1000	4,5009	0,0830	26,1740	0,0127	16x125+20x500	1,8806	0,0791	22,2960	0,0126
27x250+9x1000	2,6872		24,0190		24x125+12x500	1,3399		21,2880	
24x250+12x1000	3,1610	0,1763	24,6610	0,0267	27x125+9x500	1,1452	0,1700	20,7730	0,0248

μείωση 100%

	Pmp(kW)	αύξησηP	Vmp(V)	αύξησηV		Pmp(kW)	αύξησηP	Vmp(V)	αύξησηV
1000/0					500/0				
36x0			350,5530		36x0	13,1160		350,5530	
4x1000+32x0	3,2994	0,9900	11,7230	0,2500	4x500+32x0	0,120284	0,9800	9,7130	0,2400
9x0+27x1000	4,7494		4,7380		9x0+27x500	1,9376		20,5720	
8x0+28x1000	5,0270	0,0584	25,1560	0,0169	8x0+28x500	2,0498	0,0579	20,9880	0,0202

18x0+18x1000	2,5560		20,3750		18x0+18x500	1,0466		17,0310	
16x0+20x1000	2,9955	0,1719	21,4110	0,0508	16x0+20x500	1,2258	0,1712	17,8630	0,0489
27x0+9x1000	0,9305		15,4130		27x0+9x500	0,3801		12,9910	
24x0+12x1000	1,4064	0,5114	17,1670	0,1138	24x0+12x500	0,5759	0,5151	14,4380	0,1114

Παράρτημα Β

Ακολουθως παρατίθενται οι κώδικες netlist που συντάχθηκαν για την υλοποίηση των ισοδυνάμων φβ μοντέλων, και οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για τις απαραίτητες προσομοιώσεις με το λογισμικό PSpice.

Φβ στοιχείο

```
.include cell_2.lib
xcell2 0 31 32 cell_2 params: area=243.36 j0=1e-11 j02=1e-9
+jsc=0.032832018408941485864562787639711 rs=1e-3 rsh=1000
vbias 31 0 dc 0
virrad 32 0 dc 1000
.plot dc i(vbias)
.probe
.end
```

Φβ πλαίσιο

```
.include module_conv.lib
xmodule1 0 43 42 module_1 params: ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ns=60, np=1, nd=1.92
vbias 43 0 dc 0
virrad1 42 0 dc 1000
d1 0 43 diode
.model diode d(is=1e-6, n=1)
.param vocmr=36.3
.param tr=25
.param ta=25
edv1 43 44 value={if (v(42)<950, vocmr*(0.06*log(1000/v(42))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*v(42)), 0)}
.probe
.end
```

Φβ συστοιχία

```
.include module_conv.lib

xmodule1 0 2 1 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule2 2 4 3 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule3 4 6 5 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule4 6 8 7 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule5 8 10 9 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule6 10 12 11 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule7 12 14 13 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule8 14 16 15 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule9 16 18 17 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule10 18 20 19 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule11 20 22 21 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule12 22 24 23 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
```

xmodule13 24 26 25 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule14 26 28 27 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule15 28 30 29 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule16 30 32 31 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule17 32 34 33 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule18 34 36 35 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule19 36 38 37 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule20 38 40 39 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule21 40 42 41 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92

xmodule2221 0 222 221 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule22 222 224 223 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule23 224 226 225 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule24 226 228 227 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule25 228 210 229 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule26 210 212 211 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule27 212 214 213 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule28 214 216 215 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule29 216 218 217 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule210 218 220 219 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule211 220 2222 2221 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule212 2222 2224 2223 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule213 2224 2226 2225 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule214 2226 2228 2227 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule215 2228 2230 2229 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule216 2230 2232 2231 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule217 2232 2234 2233 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule218 2234 2236 2235 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule219 2236 2238 2237 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule220 2238 2240 2239 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule221 2240 42 2241 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92

xmodule31 0 332 331 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule32 332 334 333 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule33 334 336 335 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,

+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule416 430 432 431 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule417 432 434 433 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule418 434 436 435 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule419 436 438 437 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule420 438 440 439 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92
xmodule421 440 42 4441 module_1 params:ta=25, tr=25, iscmr=7.99, pmaxmr=208, vocmr=36.3,
+ ns=60, np=1, nd=1.92

vbias 42 0 dc 0

virrad1 1 0 dc 1000
virrad2 3 2 dc 1000
virrad3 5 4 dc 1000
virrad4 7 6 dc 1000
virrad5 9 8 dc 1000
virrad6 11 10 dc 1000
virrad7 13 12 dc 1000
virrad8 15 14 dc 1000
virrad9 17 16 dc 1000
virrad10 19 18 dc 1000
virrad11 21 20 dc 1000
virrad12 23 22 dc 1000
virrad13 25 24 dc 1000
virrad14 27 26 dc 1000
virrad15 29 28 dc 1000
virrad16 31 30 dc 1000
virrad17 33 32 dc 1000
virrad18 35 34 dc 1000
virrad19 37 36 dc 1000
virrad20 39 38 dc 1000
virrad21 41 40 dc 1000

virrad2221 221 0 dc 1000
virrad22 223 222 dc 1000
virrad23 225 224 dc 1000
virrad24 227 226 dc 1000
virrad25 229 228 dc 1000
virrad26 211 210 dc 1000
virrad27 213 212 dc 1000
virrad28 215 214 dc 1000
virrad29 217 216 dc 1000
virrad210 219 218 dc 1000
virrad211 2221 220 dc 1000
virrad212 2223 2222 dc 1000
virrad213 2225 2224 dc 1000
virrad214 2227 2226 dc 1000
virrad215 2229 2228 dc 1000
virrad216 2231 2230 dc 1000
virrad217 2233 2232 dc 1000
virrad218 2235 2234 dc 1000
virrad219 2237 2236 dc 1000
virrad220 2239 2238 dc 1000
virrad221 2241 2240 dc 1000
virrad31 331 0 dc 1000
virrad32 333 332 dc 1000
virrad33 335 334 dc 1000
virrad34 337 336 dc 1000
virrad35 339 338 dc 1000
virrad36 311 310 dc 1000
virrad37 313 312 dc 1000
virrad38 315 314 dc 1000

virrad39 317 316 dc 1000
virrad310 319 318 dc 1000
virrad311 321 320 dc 1000
virrad312 323 322 dc 1000
virrad313 325 324 dc 1000
virrad314 327 326 dc 1000
virrad315 329 328 dc 1000
virrad316 331 330 dc 1000
virrad317 333 332 dc 1000
virrad318 335 334 dc 1000
virrad319 337 336 dc 1000
virrad320 339 338 dc 1000
virrad321 341 340 dc 1000

virrad41 441 0 dc 1000
virrad42 443 442 dc 1000
virrad43 445 444 dc 1000
virrad44 447 446 dc 1000
virrad45 449 448 dc 1000
virrad46 411 410 dc 1000
virrad47 413 412 dc 1000
virrad48 415 414 dc 1000
virrad49 417 416 dc 1000
virrad410 419 418 dc 1000
virrad411 421 420 dc 1000
virrad412 423 422 dc 1000
virrad413 425 424 dc 1000
virrad414 427 426 dc 1000
virrad415 429 428 dc 1000
virrad416 431 430 dc 1000
virrad417 433 432 dc 1000
virrad418 435 434 dc 1000
virrad419 437 436 dc 1000
virrad420 439 438 dc 1000
virrad421 441 440 dc 1000

d1 0 2 diode
d2 2 4 diode
d3 4 6 diode
d4 6 8 diode
d5 8 10 diode
d6 10 12 diode
d7 12 14 diode
d8 14 16 diode
d9 16 18 diode
d10 18 20 diode
d11 20 22 diode
d12 22 24 diode
d13 24 26 diode
d14 26 28 diode
d15 28 30 diode
d16 30 32 diode
d17 32 34 diode
d18 34 36 diode
d19 36 38 diode
d20 38 40 diode
d21 40 42 diode

d221 0 222 diode
d22 222 224 diode
d23 224 226 diode
d24 226 228 diode
d25 228 210 diode
d26 210 212 diode
d27 212 214 diode
d28 214 216 diode

d29 216 218 diode
d210 218 220 diode
d211 220 2222 diode
d212 2222 2224 diode
d213 2224 2226 diode
d214 2226 2228 diode
d215 2228 2230 diode
d216 2230 2232 diode
d217 2232 2234 diode
d218 2234 2236 diode
d219 2236 2238 diode
d220 2238 2240 diode
d221 2240 42 diode

d31 0 332 diode
d32 332 334 diode
d33 334 336 diode
d34 336 338 diode
d35 338 310 diode
d36 310 312 diode
d37 312 314 diode
d38 314 316 diode
d39 316 318 diode
d310 318 320 diode
d311 320 322 diode
d312 322 324 diode
d313 324 326 diode
d314 326 328 diode
d315 328 330 diode
d316 330 3332 diode
d317 3332 3334 diode
d318 3334 3336 diode
d319 3336 3338 diode
d320 3338 3340 diode
d321 3340 42 diode

d41 0 442 diode
d42 442 444 diode
d43 444 446 diode
d44 446 448 diode
d45 448 410 diode
d46 410 412 diode
d47 412 414 diode
d48 414 416 diode
d49 416 418 diode
d410 418 420 diode
d411 420 422 diode
d412 422 424 diode
d413 424 426 diode
d414 426 428 diode
d415 428 430 diode
d416 430 432 diode
d417 432 434 diode
d418 434 436 diode
d419 436 438 diode
d420 438 440 diode
d421 440 42 diode

```
.model diode d(is=1e-6, n=1)  
.param vocmr=36.3  
.param tr=25  
.param ta=25
```

```
edv1 42 51 value={if (v(1)<950, vocmr*(0.06*log(1000/v(1))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*v(1)), 0)}  
edv2 51 52 value={if ((v(3)-v(2))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(3)-v(2)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(3)-v(2))),  
0)}
```

```

edv3 52 53 value={if ((v(5)-v(4))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(5)-v(4)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(5)-v(4))),
0)}
edv4 53 54 value={if ((v(7)-v(6))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(7)-v(6)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(7)-v(6))),
0)}
edv5 54 55 value={if ((v(9)-v(8))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(9)-v(8)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(9)-v(8))),
0)}
edv6 55 56 value={if ((v(11)-v(10))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(11)-v(10)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(11)-
v(10))), 0)}
edv7 56 57 value={if ((v(13)-v(12))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(13)-v(12)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(13)-
v(12))), 0)}
edv8 57 58 value={if ((v(15)-v(14))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(15)-v(14)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(15)-
v(14))), 0)}
edv9 58 59 value={if ((v(17)-v(16))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(17)-v(16)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(17)-
v(16))), 0)}
edv10 59 510 value={if ((v(19)-v(18))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(19)-v(18)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(19)-
v(18))), 0)}
edv11 510 511 value={if ((v(21)-v(20))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(21)-v(20)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(21)-v(20))), 0)}
edv12 511 512 value={if ((v(23)-v(22))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(23)-v(22)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(23)-v(22))), 0)}
edv13 512 513 value={if ((v(25)-v(24))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(25)-v(24)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(25)-v(24))), 0)}
edv14 513 514 value={if ((v(27)-v(26))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(27)-v(26)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(27)-v(26))), 0)}
edv15 514 515 value={if ((v(29)-v(28))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(29)-v(28)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(29)-v(28))), 0)}
edv16 515 516 value={if ((v(31)-v(30))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(31)-v(30)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(31)-v(30))), 0)}
edv17 516 517 value={if ((v(33)-v(32))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(33)-v(32)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(33)-v(32))), 0)}
edv18 517 518 value={if ((v(35)-v(34))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(35)-v(34)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(35)-v(34))), 0)}
edv19 518 519 value={if ((v(37)-v(36))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(37)-v(36)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(37)-v(36))), 0)}
edv20 519 520 value={if ((v(39)-v(38))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(39)-v(38)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(39)-v(38))), 0)}
edv21 520 521 value={if ((v(41)-v(40))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(41)-v(40)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(41)-v(40))), 0)}

edv2221 42 61 value={if (v(221)<950, vocmr*(0.06*log(1000/v(221))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*v(221)), 0)}
edv22 61 62 value={if ((v(223)-v(222))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(223)-v(222)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(223)-v(222))), 0)}
edv23 62 63 value={if ((v(225)-v(224))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(225)-v(224)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(225)-v(224))), 0)}
edv24 63 64 value={if ((v(227)-v(226))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(227)-v(226)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(227)-v(226))), 0)}
edv25 64 65 value={if ((v(229)-v(228))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(229)-v(228)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(229)-v(228))), 0)}
edv26 65 66 value={if ((v(211)-v(210))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(211)-v(210)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(211)-v(210))), 0)}
edv27 66 67 value={if ((v(213)-v(212))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(213)-v(212)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(213)-v(212))), 0)}
edv28 67 68 value={if ((v(215)-v(214))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(215)-v(214)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(215)-v(214))), 0)}
edv29 68 69 value={if ((v(217)-v(216))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(217)-v(216)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(217)-v(216))), 0)}
edv210 69 610 value={if ((v(219)-v(218))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(219)-v(218)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(219)-v(218))), 0)}
edv211 610 611 value={if ((v(221)-v(220))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(221)-v(220)))+0.004*(ta-tr)+0.12e-
3*(v(221)-v(220))), 0)}
edv212 611 612 value={if((v(223)-v(222))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(223)-v(222)))+0.004*(ta-
tr)+0.12e-3*(v(223)-v(222))),0)}
edv213 612 613 value={if((v(225)-v(224))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(225)-v(224)))+0.004*(ta-
tr)+0.12e-3*(v(225)-v(224))),0)}
edv214 613 614 value={if((v(227)-v(226))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(227)-v(226)))+0.004*(ta-
tr)+0.12e-3*(v(227)-v(226))),0)}

```

```

edv215 614 615 value={if((v(2229)-v(2228))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(2229)-v(2228))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(2229)-v(2228))),0)}
edv216 615 616 value={if((v(2231)-v(2230))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(2231)-v(2230))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(2231)-v(2230))),0)}
edv217 616 617 value={if((v(2233)-v(2232))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(2233)-v(2232))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(2233)-v(2232))),0)}
edv218 617 618 value={if((v(2235)-v(2234))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(2235)-v(2234))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(2235)-v(2234))),0)}
edv219 618 619 value={if((v(2237)-v(2236))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(2237)-v(2236))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(2237)-v(2236))),0)}
edv220 619 620 value={if((v(2239)-v(2238))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(2239)-v(2238))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(2239)-v(2238))),0)}
edv221 620 621 value={if((v(2241)-v(2240))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(2241)-v(2240))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(2241)-v(2240))),0)}

edv31 42 71 value={if(v(331)<950, vocmr*(0.06*log(1000/v(331))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*v(331)), 0)}
edv32 71 72 value={if ((v(333)-v(332))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(333)-v(332))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(333)-v(332))), 0)}
edv33 72 73 value={if ((v(335)-v(334))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(335)-v(334))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(335)-v(334))), 0)}
edv34 73 74 value={if ((v(337)-v(336))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(337)-v(336))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(337)-v(336))), 0)}
edv35 74 75 value={if ((v(339)-v(338))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(339)-v(338))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(339)-v(338))), 0)}
edv36 75 76 value={if ((v(311)-v(310))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(311)-v(310))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(311)-v(310))), 0)}
edv37 76 77 value={if ((v(313)-v(312))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(313)-v(312))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(313)-v(312))), 0)}
edv38 77 78 value={if ((v(315)-v(314))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(315)-v(314))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(315)-v(314))), 0)}
edv39 78 79 value={if ((v(317)-v(316))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(317)-v(316))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(317)-v(316))), 0)}
edv310 79 710 value={if ((v(319)-v(318))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(319)-v(318))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(319)-v(318))), 0)}
edv311 710 711 value={if ((v(321)-v(320))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(321)-v(320))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(321)-v(320))), 0)}
edv312 711 712 value={if ((v(323)-v(322))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(323)-v(322))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(323)-v(322))), 0)}
edv313 712 713 value={if ((v(325)-v(324))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(325)-v(324))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(325)-v(324))), 0)}
edv314 713 714 value={if ((v(327)-v(326))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(327)-v(326))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(327)-v(326))), 0)}
edv315 714 715 value={if ((v(329)-v(328))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(329)-v(328))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(329)-v(328))), 0)}
edv316 715 716 value={if ((v(331)-v(330))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(331)-v(330))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(331)-v(330))), 0)}
edv317 716 717 value={if((v(333)-v(332))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(333)-v(332))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(333)-v(332))),0)}
edv318 717 718 value={if((v(335)-v(334))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(335)-v(334))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(335)-v(334))),0)}
edv319 718 719 value={if((v(337)-v(336))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(337)-v(336))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(337)-v(336))),0)}
edv320 719 720 value={if((v(339)-v(338))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(339)-v(338))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(339)-v(338))),0)}
edv321 720 721 value={if((v(341)-v(340))<950,vocmr*(0.06*log(1000/(v(341)-v(340))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(341)-v(340))),0)}

edv41 42 81 value={if(v(441)<950, vocmr*(0.06*log(1000/v(441))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*v(441)), 0)}
edv42 81 82 value={if ((v(443)-v(442))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(443)-v(442))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(443)-v(442))), 0)}
edv43 82 83 value={if ((v(445)-v(444))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(445)-v(444))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(445)-v(444))), 0)}
edv44 83 84 value={if ((v(447)-v(446))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(447)-v(446))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(447)-v(446))), 0)}
edv45 84 85 value={if ((v(449)-v(448))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(449)-v(448))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(449)-v(448))), 0)}

```



```
edv46 85 86 value={if ((v(411)-v(410))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(411)-v(410))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(411)-v(410))), 0)}
edv47 86 87 value={if ((v(413)-v(412))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(413)-v(412))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(413)-v(412))), 0)}
edv48 87 88 value={if ((v(415)-v(414))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(415)-v(414))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(415)-v(414))), 0)}
edv49 88 89 value={if ((v(417)-v(416))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(417)-v(416))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(417)-v(416))), 0)}
edv410 89 810 value={if ((v(419)-v(418))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(419)-v(418))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(419)-v(418))), 0)}
edv411 810 811 value={if ((v(421)-v(420))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(421)-v(420))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(421)-v(420))), 0)}
edv412 811 812 value={if ((v(423)-v(422))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(423)-v(422))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(423)-v(422))), 0)}
edv413 812 813 value={if ((v(425)-v(424))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(425)-v(424))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(425)-v(424))), 0)}
edv414 813 814 value={if ((v(427)-v(426))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(427)-v(426))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(427)-v(426))), 0)}
edv415 814 815 value={if ((v(429)-v(428))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(429)-v(428))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(429)-v(428))), 0)}
edv416 815 816 value={if ((v(431)-v(430))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(431)-v(430))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(431)-v(430))), 0)}
edv417 816 817 value={if ((v(433)-v(432))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(433)-v(432))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(433)-v(432))), 0)}
edv418 817 818 value={if ((v(435)-v(434))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(435)-v(434))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(435)-v(434))), 0)}
edv419 818 819 value={if ((v(437)-v(436))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(437)-v(436))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(437)-v(436))), 0)}
edv420 819 820 value={if ((v(439)-v(438))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(439)-v(438))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(439)-v(438))), 0)}
edv421 820 821 value={if ((v(441)-v(440))<950, vocmr*(0.06*log(1000/(v(441)-v(440))))+0.004*(ta-tr)+0.12e-3*(v(441)-v(440))), 0)}

r1 521 100 1
r2 621 100 1
r3 721 100 1
r4 821 100 1

.probe
.end
```

