



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Βλάβες, καταστροφές και υποβαθμίσεις σε
φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si)
που αποτελούν μέρη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων
διασυνδεδεμένων με δίκτυα διανομής ηλεκτρικής
ενέργειας

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γεώργιος Ι. Περάκης

Επιβλέπων: Κώστας Καλαϊτζάκης
Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Χανιά, 2013

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 Πολυτεχνείου Κρήτης.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Βλάβες, καταστροφές και υποβαθμίσεις σε
φωτοβολταϊκά πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si)
που αποτελούν μέρη φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων
διασυνδεδεμένων με δίκτυα διανομής ηλεκτρικής
ενέργειας

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γεώργιος Ι. Περάκης

Επιβλέπων: Κώστας Καλαϊτζάκης
Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Κώστας Καλαϊτζάκης	Μιχάλης Ζερβάκης	Κατερίνα Μανιά
Καθηγητής	Καθηγητής	Αναπλ. Καθηγήτρια
Πολυτεχνείου Κρήτης	Πολυτεχνείου Κρήτης	Πολυτεχνείου Κρήτης

Χανιά, 2013

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Πολυτεχνείου Κρήτης κύριο Κώστα Καλαϊτζάκη για την ανάθεση αυτής της εργασίας, την υποστήριξη του, τις διορθώσεις του αλλά και την υπομονή που επέδειξε. Η συμβολή του με έκανε να δω τα πράγματα από τη σωστή τους σκοπιά και να προχωρήσω στην συγγραφή αυτής της εργασίας όταν μου φάνταζε αδύνατη η ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών, λόγω ανειλημμένων επαγγελματικών υποχρεώσεων. Λυπάμαι μόνο που δεν ήταν καθηγητής μου και σε προπτυχιακό επίπεδο.

Νιώθω επίσης την ανάγκη να ευχαριστήσω για τη συμβολή του τον καθηγητή Πολυτεχνείου Κρήτης κύριο Μιχάλη Ζερβάκη και την λέκτορα Πολυτεχνείου Κρήτης κυρία Μαρία Σταυρουλάκη για τις επιβεβαιώσεις της σχετικά με την ορθότητα μέρους του κεφαλαίου 5 που παρουσιάζεται σε αυτήν την εργασία.

Θα ήθελα επιπρόσθετα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την εταιρεία Κρητική Ενεργειακή Α.Ε, τη διοίκηση, το προσωπικό και τους συνεργάτες της, για την παραχώρηση του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία αλλά και για την δυνατότητα που μου δόθηκε και μου δίνεται να γνωρίσω τον τομέα των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πρακτικό επίπεδο.

Τελειώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Αθανάσιο Γεωργίου και Γιώργο Σμαραγδή της εταιρείας Exelgroup, για τις απαντήσεις τους σε ορισμένα σημαντικά για την έκβαση της εργασίας ερωτήματα.

Γ.Ι.Περάκης

Περίληψη

Η υιοθέτηση μίας τεχνολογίας δε συνεπάγεται τη λειτουργία των αντίστοιχων συστημάτων χωρίς βλάβες ή προβλήματα. Παράλληλα πολλές φορές προκύπτουν κατά την ευρύτερη διάδοση μίας τεχνολογίας υποβαθμίσεις των αντίστοιχων συστημάτων που δεν είναι αναμενόμενες. Έτσι και με τη φωτοβολταϊκή (Φ/Β) τεχνολογία, είναι αδύνατη η χωρίς βλάβες ή ακόμα και καταστροφές σε ακραίες περιπτώσεις λειτουργία των Φ/Β συστημάτων.

Σκοπός αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής είναι η εξέταση ορισμένων από τις αιτίες που προκαλούν βλάβες, καταστροφές ή μη κανονικές υποβαθμίσεις σε Φ/Β πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου, θεωρούμενων ως συστατικών μερών Φ/Β εγκαταστάσεων διασυνδεδεμένων με δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα πλαίσια αυτά, εξετάζεται το φαινόμενο της δημιουργίας θερμών κηλίδων σε μερικώς σκιασμένο Φ/Β κελί, βασικής δομικής μονάδας του Φ/Β πάνελ, κάνοντας χρήση ενός διαφορετικού από τα συνηθισμένα θερμικού μοντέλου που είναι αλληλένδετο με ένα αντίστοιχο ηλεκτρικό. Στην κατεύθυνση αυτή, παρουσιάζεται ένας πρωτότυπος τρόπος εξαγωγής των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του Φ/Β κελιού στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης με βάση το μοντέλο Bishop, χρησιμοποιώντας μετρήσεις πεδίου με φορητό I-V tester. Όσον αφορά στο κομμάτι της ορθής πόλωσης, υιοθετείται το μοντέλο της μίας διόδου με 5 παραμέτρους, με παράλληλη παρουσίαση δύο πρόσθετων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την αναγωγή από τις συνθήκες αναφοράς σε διαφορετικές συνθήκες.

Στη συνέχεια της διατριβής αυτής, εξετάζεται η αντιμετώπιση φορτίων ανέμου σε Φ/Β εγκαταστάσεις, με την παρουσίαση ενός απλού αλγορίθμου που βασίζεται στον Ευρωκώδικα 1' ο οποίος προτείνεται να χρησιμοποιείται για την ασφαλή επιλογή Φ/Β πάνελ και των βάσεων τους στις επί εδάφους εγκαταστάσεις. Παράλληλα δίνονται κατευθύνσεις για την υλοποίηση ενός αντίστοιχου αλγόριθμου που να αφορά σε Φ/Β συστήματα εγκατεστημένα σε κτίρια.

Τελειώνοντας, παρουσιάζεται το φαινόμενο PID, με ενδεικτικούς τρόπους αντιμετώπισής του σε επίπεδο συστήματος, ενώ παρουσιάζεται και η τεχνολογία των μικροαντιστροφών και των dc βελτιστοποιητών ισχύος, καθώς και η πολιτική του net metering που ενδεχομένως να οδηγήσει τα Φ/Β συστήματα σε μία νέα μορφή ανάπτυξης στην Ελλάδα.

Abstract

The use of any type of technology does not guarantee the operation of the respective systems without failures or operational problems and there also may be degradations which are not expected. The photovoltaic (PV) technology could not be an exception, so it is impossible for the PV systems to operate without failures or damage.

The aim of this MSc thesis is to examine some of the causes of failures, damage or abnormal degradation in PV panels as components of grid-connected photovoltaic power systems.

For this purpose, the hot-spot formation in partially PV cells is examined, using a different from the commonly used thermal model, along with an electrical one. An innovative way to export the reverse-biased electrical characteristics of a PV cell based on the Bishop's model is also presented, using "in the field" measurements with a portable I-V tester. In the forward bias, the well-known five parameters diode model is adopted, with two additional parameters used for the extrapolation from the reference conditions in different operating conditions.

In the frame of this thesis the deal of the impact of wind loads on PV panels is also examined by presenting a simple algorithm based on Eurocode 1, which is suggested to be used by designers for safe choice of PV panels and PV mounting structures for ground-mounted PV systems. Alongside, some guidelines for the implementation of a corresponding algorithm for roof-mounted PV systems are presented.

Finally, the PID phenomenon is presented with some relative corrective measures, in order to prevent its effect in system level, while the technology of microinverters and dc power optimizers is also examined.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	21
1.1	Βλάβες, καταστροφές και μη κανονικές υποβαθμίσεις σε Φ/Β εγκαταστάσεις	21
1.2	Διάρθρωση της εργασίας	22
1.3	Αναφορές	25
2	Ηλιακή ακτινοβολία	26
2.1	Στοιχεία ηλιακής γεωμετρίας	26
2.2	Εξωγήινη ακτινοβολία (Extraterrestrial radiation)	33
2.3	Μετρήσεις και υπολογισμοί έντασης της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας	35
2.3.1	Απευθείας και διάχυτη ακτινοβολία	35
2.3.2	Η έννοια της έντασης και της ροής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας ..	35
2.3.3	Πρόβλεψη και μέτρηση έντασης ηλιακής ακτινοβολίας	36
2.3.4	Επίγειες μετρήσεις	37
2.3.5	Εκτιμήσεις από δορυφόρους	39
2.3.6	Ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη	40
2.4	Ενεργώς απορροφούμενη ακτινοβολία	40
2.4.1	Οπτικές απώλειες	40
2.4.2	Απώλειες λόγω μεταβολής ηλιακού φάσματος	44
2.4.3	Εκτίμηση έντασης της ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας	46
2.5	Αναφορές	47
3	Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης	50
3.1	PV I-V curve testers	51
3.2	Μοντελοποίηση καμπύλης I-V	56
3.2.1	Μοντελοποίηση στο κομμάτι της ορθής πόλωσης	56
3.2.2	Μοντελοποίηση στο κομμάτι της ανάστροφης πόλωσης	68
3.2.3	Λειτουργία της διόδου bypass	71
3.3	Αξιολόγηση μοντέλου στην περιοχή της ορθής και της ανάστροφης πόλωσης	74
3.3.1	Αξιολόγηση του μοντέλου στην περιοχή της ορθής πόλωσης	76
3.3.2	Αξιολόγηση του μοντέλου στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης	80
3.4	Αναφορές	90
4	Θερμοκρασιακή κατανομή στο Φ/Β πάνελ	95
4.1	Μετάδοση θερμότητας στο Φ/Β πάνελ	95
4.1.1	Μετάδοση θερμότητας με αγωγή στο Φ/Β πάνελ	95

4.1.2	Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή στο Φ/Β πάνελ.....	97
4.1.3	Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία στο Φ/Β πάνελ	100
4.1.4	Επίλυση εξίσωσης θερμικής αγωγής	109
4.2	Δομή και θερμικά χαρακτηριστικά Φ/Β πάνελ	110
4.3	Αξιολόγηση του μοντέλου θερμοκρασιακής κατανομής.....	112
4.3.1	Εκτίμηση θερμικής ισχύος.....	112
4.3.2	Σύγκριση μοντελοποιημένης και μετρηθείσας θερμοκρασιακής κατανομής 114	
4.4	Συμπεράσματα	118
4.5	Αναφορές	119
5	Αντιμετώπιση φορτίων ανέμου σε Φ/Β εγκαταστάσεις.....	121
5.1	Τρέχον πλαίσιο στατικής σχεδίασης βάσεων Φ/Β συστημάτων	121
5.2	Μηχανική αντοχή των Φ/Β πάνελ.....	122
5.3	Υπολογισμοί ακραίων πιέσεων βάσει Ευρωκώδικα 1	126
5.3.1	Ανεμολογική συμπεριφορά στην περιοχή εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος 126	
5.3.2	Ορολογία και μαθηματικές σχέσεις στον Ευρωκώδικα 1	127
5.3.3	Παράδειγμα υπολογισμών βάσει Ευρωκώδικα 1	134
5.4	Υπολογισμός συνολικής δράσης του ανέμου στο Φ/Β πάνελ στα επί εδάφους Φ/Β συστήματα.....	135
5.5	Συσχέτιση της αντοχής σε φορτία ανέμου της βάσης και του Φ/Β πάνελ.....	138
5.5.1	Αναζήτηση ασφαλούς λύσης για την επιλογή βάσης & Φ/Β πάνελ	138
5.5.2	Φορτίο χιονιού και μη σεισμικοί συνδυασμοί φορτίων.....	139
5.5.3	Ελάχιστες απαιτήσεις φορτίων ανέμου και χιονιού	141
5.5.4	Σύνοψη υπολογισμών σχετικών με την καταλληλότητα της βάσης και του Φ/Β πάνελ	143
5.6	Συνολική δράση του ανέμου σε εγκατεστημένα σε κτίρια Φ/Β συστήματα-τρέχον τρόπος αντιμετώπισης	145
5.7	Τρόποι εγκατάστασης βάσεων Φ/Β σε κτιριακές εγκαταστάσεις	147
5.8	Σύνοψη	148
5.9	Αναφορές	149
6	Το φαινόμενο PID.....	151
6.1	Ποιοτική εξήγηση του φαινομένου σε επίπεδο συστήματος.....	151
6.2	Ενδεικτικοί τρόποι αντιμετώπισης.....	152
6.3	Συμπεράσματα	153

6.4	Αναφορές	153
7	Νέες τάσεις Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα.....	154
7.1	Μικροαντιστροφείς και μετατροπείς συνεχούς-συνεχούς.....	154
7.2	Net metering	158
7.3	Βιβλιογραφία.....	159

Συμβολισμοί

Σύμβολα που ξεκινούν με λατινικά μικρά γράμματα

a [V]	τροποποιημένος συντελεστής ιδανικότητας διόδου
alt [m]	υψόμετρο της περιοχής εγκατάστασης
b, d [m]	διαστάσεις βάσης Φ/Β (θεώρηση υπόστεγου)
c_{alt}	συντελεστής υψομέτρου (<i>altitude factor</i>)
c_d	συντελεστής δυναμικής απόκρισης
c_{dir}	συντελεστής διεύθυνσης
$c_e(z)$	συντελεστής έκθεσης σε ύψος z [m]
$c_o(z)$	συντελεστής ανάγλυφου ως συνάρτηση του ύψους z [m] από το έδαφος
$c_{p,net}$	συντελεστής τελικής πίεσης
c_{prob}	συντελεστής πιθανότητας
c_p [J / (kg * K)]	ειδική θερμοχωρητικότητα
$c_r(z)$	συντελεστής τραχύτητας ως συνάρτηση του ύψους z [m] από το έδαφος
c_{season}	συντελεστής εποχής
c_s	συντελεστής μεγέθους
c_W	αεροδυναμικός συντελεστής
d_c [deg]	γωνία κλίσης βάσης Φ/Β ή επιφάνειας συλλέκτη-Φ/Β
e	(μέγιστος) βαθμός απόδοσης ενός Φ/Β στοιχείου
$e_{l/S}$	λόγος βαθμού απόδοσης ενός Φ/Β στοιχείου σε συγκεκριμένες συνθήκες χαμηλής έντασης ακτινοβολίας προς τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης σε STC
e_s	βαθμός απόδοσης ενός Φ/Β στοιχείου ως προς την ενεργώς απορροφούμενη και όχι την προσπίπτουσα ακτινοβολία
f	γενικός συμβολισμός συνάρτησης
h_c [W / m ² K]	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή
$h_{c,free,down}$ [W / m ² K]	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή στην οπίσθια πλευρά του Φ/Β πάνελ
$h_{c,free,up}$ [W / m ² K]	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή στην εμπρόσθια πλευρά του Φ/Β πάνελ
$h_{c,forced}$ [W / m ² K]	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή
$h_{c,up}$ [W / m ² K]	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με μικτή συναγωγή στην εμπρόσθια πλευρά του Φ/Β πάνελ
$h_{c,down}$ [W / m ² K]	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με μικτή συναγωγή στην οπίσθια πλευρά του Φ/Β πάνελ
j_1 [meV / K]	παράμετρος σε τύπο υπολογισμού του E_g ως συνάρτηση του $E_{g,0}$ και της θερμοκρασίας
j_2 [K]	παράμετρος σε τύπο υπολογισμού του E_g ως

k_1	συνάρτηση του $E_{g,0}$ και της θερμοκρασίας
k_r	συντελεστής τύρβης (<i>turbulence factor</i>)
l_1, l_2	συντελεστής εδάφους
m	παράμετροι στο μοντέλο Bishop
n	παράμετρος στο μοντέλο των 7 παραμέτρων
$n_{prob.}$	δείκτης διάθλασης
p [kg / m^3]	παράμετρος κατανομής πιθανοτήτων του $v_{b,0}$
p_a [kg / m^3]	γενικός συμβολισμός πυκνότητας
q, q' [W / m^2]	πυκνότητα αέρα κατά τη διάρκεια ανεμοθυελλών
q_i [W / m^2]	ροή ακτινοβολίας ανά m^2
q_c [W / m^2]	ροή θερμικής ακτινοβολίας ανά m^2 από την i επιφάνεια
$q_{r,f}$ [W / m^2]	ροή θερμότητας με συναγωγή ανά m^2
$q_{r,b}$ [W / m^2]	ροή θερμότητας με ακτινοβολία ανά m^2 από την εμπρόσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ
q_b [N / m^2]	ροή θερμότητας με ακτινοβολία ανά m^2 από την οπίσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ
$q_p(z)$ [N / m^2]	βασική πίεση (ανεμοπίεση)
$q_p^{αντ.εγκ}$ [N / m^2]	ακραία (ή μέγιστη) πίεση αιχμής ή πίεση αιχμής σε ύψος z [m]
$q_p^{βάσης}$ [N / m^2]	ελάχιστη απαίτηση για το q_p υπό τις αντιπροσωπευτικές για την εγκατάσταση συνθήκες
r [AU]	μέγιστο q_p που μπορεί να υποστηρίξει η βάση του Φ/Β
$r_0 \equiv AU$	απόσταση μεταξύ Γης και Ήλιου
\vec{r}_p	η αστρονομική μονάδα (<i>astronomical unit</i>)
s_k [N / m^2]	γενικός συμβολισμός διανύσματος θέσης
$s_{k,0}$ [N / m^2]	χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού στο έδαφος
s_l [N / m^2]	s_k αναγόμενο στη στάθμη της θάλασσας
$s_p^{αντ.εγκ}$ [N / m^2]	φορτίο χιονιού
$s_p^{βάσης}$ [N / m^2]	ελάχιστη απαίτηση για το μέγιστο s_l υπό τις αντιπροσωπευτικές για την εγκατάσταση συνθήκες
t [s]	μέγιστο s_l που μπορεί να υποστηρίξει η βάση του Φ/Β
t_{hd} [m^2 / s]	συμβολισμός χρόνου
t_{he} [$1 / K$]	θερμική διαχυτικότητα (<i>thermal diffusivity</i>) ρευστού
u [m^2 / s]	συντελεστής θερμικής διαστολής ρευστού (<i>fluid coefficient of thermal expansion</i>)
$v_{b,0}$ [m / s]	κινηματικό ιξώδες ρευστού
$v_{b,0}^*$ [m / s]	θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου (<i>fundamental basic wind velocity</i>)
	θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου χωρίς την επίδραση του υψομέτρου

v_b [m/s]	βασική ταχύτητα ανέμου (<i>basic wind velocity</i>)
$v_{mf}(z)$ [m/s]	μέση ταχύτητα στη βάση του λόφου σε ύψος z [m]
$v_m(z)$ [m/s]	μέση ταχύτητα ανέμου στην πλαγιά ή στην κορυφή του λόφου σε ύψος z [m]
$v_p(z)$ [m/s]	ταχύτητα αιχμής σε ύψος z [m]
v_∞ [m/s]	ταχύτητα αναφοράς ρευστού
$v_{s.i.}^{eu}$	ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης (<i>european efficiency</i>) ενός συμβατικού αντιστροφέα στοιχειοσειράς
$v_{d-d.c}^{eu}$	ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης ενός dc βελτιστοποιητή ισχύος
v_{ac-dc}^{eu}	ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης ενός αντιστροφέα φ/β συστήματος που εκτελεί μόνο μετατροπή DC-AC
v_{mi}^{eu}	ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης ενός μικροαντιστροφέα
w_{cov}	ποσοστό κάλυψης/σκίασης μερικώς καλυμμένου/σκιασμένου φ/β κελιού
z_0 [m]	μήκος τραχύτητας
$z_{0,II}$ [m]	μήκος τραχύτητας για κατηγορία εδάφους II
z_{min}, z_{max}	ελάχιστο και μέγιστο θεωρούμενο ύψος [m] από το έδαφος
$z_{reference}$ [m]	ύψος αναφοράς

Σύμβολα που ξεκινούν με λατινικά κεφαλαία γράμματα

A [m^2]	εμβαδόν επιφάνειας
A_i [m^2]	εμβαδόν επιφάνειας i
AM_a	απόλυτη μάζα αέρα
C [$1/K$]	παράμετρος σε τύπου υπολογισμού του E_g ως συνάρτηση του $E_{g,ref}$ και της θερμοκρασίας
C_1 [$W \mu m^4 / m^2$], C_2 [μmK]	σταθερές στον τύπο του $E_{\lambda,b}$
C_e	συντελεστής έκθεσης
C_t	συντελεστής θερμοκρασίας
D [N / m^2]	νεκρά φορτία της κατασκευής
DS [min]	λαμβάνει την τιμή των 0 ή 60 λεπτών αναλόγως με το αν είναι σε ισχύ η χειμερινή ή η θερινή ώρα αντίστοιχα
E_b [W / m^2]	ροή θερμικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας από «μελανή» επιφάνεια
$E_{\lambda,b}$ [$W / m^2 \mu m$]	φασματική κατανομή της ακτινοβολίας που εκλύεται από ένα μέλαν σώμα
E_g [eV]	ενεργειακό χάσμα
$E_{g,0}$ [eV]	ενεργειακό χάσμα στο απόλυτο μηδέν
ET [min]	εξίσωση του χρόνου (<i>equation of time</i>)

F_{ij}	συντελεστής όψεως (<i>view factor</i>): τι μέρος της επιφάνειας j «βλέπει» η επιφάνεια i
$F_{f,s}$	συντελεστής όψεως εμπρόσθιας επιφάνειας πάνελ-ουρανού
$F_{f,g}$	συντελεστής όψεως εμπρόσθιας επιφάνειας πάνελ-εδάφους
$F_{b,s}$	συντελεστής όψεως οπίσθιας επιφάνειας πάνελ-ουρανού
$F_{b,g}$	συντελεστής όψεως οπίσθιας επιφάνειας πάνελ-εδάφους
$G_{total} [W / m^2]$	ένταση «ολικής» ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο
$G_b [W / m^2]$	ένταση απευθείας ακτινοβολίας
$G_d [W / m^2]$	ένταση διάχυτης ακτινοβολίας
$G_i [W / m^2]$	ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια i
$G_{on} [W / m^2]$	ροή εξωγήινης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας για επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης ηλιακή σταθερά (<i>solar constant</i>)
$G_{sc} [W / m^2]$	ένταση ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη (Φ/Β)
$G_T [W / m^2]$	μήκος Φ/Β πάνελ
$H_1 [m]$	πλάτος Φ/Β πάνελ με $H_1 \geq H_2$
$H_2 [m]$	ένταση τύρβης σε ύψος z [m]
$I_v(z)$	ένταση ηλεκτρικού ρεύματος
$I [A]$	ένταση ρεύματος διόδου
$I_D [A]$	ένταση φωτορεύματος
$I_L [A]$	μέγιστη τιμή του ρεύματος
$I_m [A]$	ένταση ανάστροφου ρεύματος κορεσμού της διόδου
$I_o [A]$	ένταση ρεύματος διαρροής
$I_{sh} [A]$	ρεύμα βραχυκυκλώσεως
$I_{sc} [A]$	χωρική πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος
$J [A / m^2]$	συνολική ακτινοβολία $J_{r,i} [W / m^2]$ που «απομακρύνεται» από την i επιφάνεια (<i>radiosity</i>)
$J_{r,i} [W / m^2]$	συντελεστής απόσβεσης
$K [m^{-1}]$	συντελεστής τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης (<i>incidence angle modifier</i>) ως συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης
$K_{τα}(\theta)$	παραμέτρος κατανομής πιθανοτήτων του $v_{b,0}$
$K_{prob.}$	πάχος θεωρούμενου κάθε φορά στρώματος
$L [m]$	μήκος αναφοράς για τη διαστατική ανάλυση
$L_{ref} [m]$	γεωγραφικό μήκος
$LL [deg]$	τοπική ώρα
LT	τροποποιητής μάζας αέρα (<i>air mass modifier</i>)
M	η N -οστή μέρα του χρόνου
N	

$NOCT$ [$^{\circ}C$]	ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας φ/β κελιού (Nominal Operating Circuit Temperature)
N_s	αριθμός Φ/Β κελιών συνδεδεμένων σε σειρά στη Φ/Β διάταξη
Nu	μέσος αριθμός Nusselt
O_{cell} [m^3]	όγκος του Φ/Β κελιού
P_m [W]	μέγιστη (ηλεκτρική) ισχύς
P_{θ} [W]	θερμική ισχύς
Pr	αριθμός Prandtl
Q [J/s]	γενικός συμβολισμός ενέργειας ανά μονάδα χρόνου
Q_i [J/s]	θερμική ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που εκλύεται από την επιφάνεια i
$Q_{f,s}$ [J/s]	θερμική ενέργεια ανά μονάδα χρόνου που εκλύεται από την εμπρόσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ και οφείλεται στη συναλλαγή ενέργειας μεταξύ της επιφάνειας και του ουράνιου θόλου
$Ra_{L_{ref}}$	αριθμός Rayleigh για μήκος αναφοράς L_{ref}
R_b	γεωμετρικός παράγοντας (<i>geometry factor</i>)
Re	αριθμός Reynolds
R_i [Ω]	ωμική αντίσταση που χαρακτηρίζει την επιφάνεια i για το ηλεκτρικό ανάλογο του προβλήματος συναλλαγής θερμότητας μεταξύ φαιών επιφανειών
R_{ij} [Ω]	ωμική αντίσταση που χαρακτηρίζει τη συναλλαγή θερμικής ενέργειας μεταξύ των επιφανειών i, j για το ηλεκτρικό ανάλογο του προβλήματος συναλλαγής θερμότητας μεταξύ φαιών επιφανειών
R_s [Ω]	σειριακή αντίσταση
R_{sh} [Ω]	αντίσταση διαρροής
S [W/m^2]	ένταση απορροφούμενης ακτινοβολίας (<i>absorbed radiation</i>)
SL [deg]	γεωγραφικό μήκος που αντιστοιχεί στο μεσημβρινό πάνω στον οποίο βασίζεται η τοπική ώρα
ST	ηλιακή ώρα
T [K]	γενικός συμβολισμός θερμοκρασίας
T_1 [K]	γενικός συμβολισμός θερμοκρασίας ως συνάρτηση χωρικών μεταβλητών και του χρόνου
T_a [K]	θερμοκρασία περιβάλλοντος
T_{back} [K]	θερμοκρασία στην οπίσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ
T_c [K]	θερμοκρασία Φ/Β κελιού (συνήθως σε συνθήκες διαφορετικές από της αναφοράς)
T_f [K]	θερμοκρασία στρώματος (<i>film temperature</i>)
T_{front} [K]	θερμοκρασία στην εμπρόσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ
T_g [K]	θεωρούμενη ενιαία θερμοκρασία εδάφους
T_s [K]	θερμοκρασία θεωρούμενης επιφάνειας

T_{sky} [K]	θεωρούμενη ενιαία θερμοκρασία ουρανού
T_{∞} [K]	θερμοκρασία ρευστού «μακριά» από τη θεωρούμενη επιφάνεια
V [V]	ηλεκτρική τάση
V_{br} [V]	τάση αποκοπής
V_D [V]	τάση στα άκρα της διόδου
V_F [V]	τάση της διόδου bypass στην περιοχή της ορθής πόλωσης
V_{ground} [V]	δυναμικό εδάφους (συνήθως θεωρείται $V_{ground} = 0$ V)
V_j [V]	τάση στα άκρα της διόδου στο μοντέλο Bishop
V_m [V]	μέγιστη τιμή της τάσης
V_{oc} [V]	τάση ανοικτοκυκλώματος
W	θεωρούμενη κάθε φορά επίδραση ανέμου
W_{π} [N / m ²]	φόρτιση του ανέμου ως πίεση
$W_{\nu\pi}$ [N / m ²]	φόρτιση του ανέμου ως υποπίεση
$W^{παν.,πίεση}$ [N / m ²]	φορτίο που δέχεται το Φ/Β πάνελ ως πίεση
$W^{παν.,υποπίεση}$ [N / m ²]	φορτίο που δέχεται το Φ/Β πάνελ ως υποπίεση
$W^{max,παν.,πίεση}$ [N / m ²]	μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχτεί το Φ/Β πάνελ ως πίεση
$W^{max,παν.,υποπίεση}$ [N / m ²]	μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχτεί το Φ/Β πάνελ ως υποπίεση (αρνητικό πρόσημο)

Σύμβολα που ξεκινούν με ελληνικά μικρά γράμματα

α	γενικός συμβολισμός συντελεστή απορροφητικότητας
α_i	συντελεστής απορροφητικότητας στην επιφάνεια i
β_{rel} [% / K], β_{abs} ή	σχετικός και ο απόλυτος θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση ανοικτοκυκλώματος
β [V / K]	
γ_i	i - οστός συντελεστής μη σεισμικού συνδυασμού
γ_{rel} [% / K], γ_{abs} ή	σχετικός και ο απόλυτος θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα βραχυκύκλωσης
γ [A / K]	
δ [deg]	ηλιακή απόκλιση (<i>solar declination</i>)
δ_p^{rel} [% / K], δ_p^{abs} ή	σχετικός και ο απόλυτος θερμοκρασιακός συντελεστής για τη μέγιστη ισχύ
δ_p [W / K]	
ε	γενικός συμβολισμός συντελεστή εκπομπής (<i>emittance</i>)
ε_f	συντελεστής εκπομπής στην εμπρόσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ
ε_b	συντελεστής εκπομπής στην οπίσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ
ε_{λ}	γενικός συμβολισμός μονοχρωματικού συντελεστή εκπομπής
ε_i	συντελεστής εκπομπής της i επιφάνειας

ε_{sky}	συντελεστής εκπομπής ουρανού
ζ [deg]	ζενίθια γωνία
η	συντελεστής ιδανικότητας της διόδου
θ [deg]	γενικός συμβολισμός γωνίας πρόσπτωσης
θ_b [deg]	ηλιακή γωνία πρόσπτωσης (<i>solar incident angle</i>)
$\theta_{e,g}$ [deg]	ενεργή γωνία πρόσπτωσης για την περίπτωση ισοτροπικής ανάκλασης
$\theta_{e,d}$ [deg]	ενεργή γωνία πρόσπτωσης για την περίπτωση ισοτροπικής διάχυσης
θ_r [deg]	γωνία διάθλασης
ι [Pa·s]	ιξώδες ρευστού
κ [W / (m·K)]	γενικός συμβολισμός θερμικής αγωγιμότητας
$\kappa_{-\zeta}$	κωδικός ζώνης χιονιού
λ	μήκος κύματος
μ	συντελεστής σχήματος
ν	γενικός συμβολισμός για πλήθος
π_i	i -οστή εμπειρική παράμετρος για τον υπολογισμό $K_{\alpha}(\theta)$ βάσει Sandia
π'_i	i -οστή εμπειρική παράμετρος για τον υπολογισμό M βάσει Sandia
ρ	γενικός συμβολισμός συντελεστή ανάκλασης
ρ_g	συντελεστής ανάκλασης εδάφους
ρ_i	συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια i
σ_v [m / s]	τυπική απόκλιση που αφορά στο Δt που αντιστοιχεί στην επιλεγμένη $\nu_{b,0}$
τ	γενικός συμβολισμός συντελεστή διαπερατότητας
τ_i	συντελεστής διαπερατότητας στην επιφάνεια i
$(\tau\alpha)$	γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας (<i>transmittance-absorptance product</i>)
$(\tau\alpha)_g$	γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας για την ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία
$(\tau\alpha)_d$	γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας για την διάχυτη ακτινοβολία
$(\tau\alpha)_b$	γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας για την απευθείας ακτινοβολία
ν [deg]	ηλιακή γωνία ύψους
φ	συντελεστής έκφρασης βαθμού «μπλοκαρίσματος» κάτω από το υπόστεγο
ψ	παράμετρος στο μοντέλο των 7-παραμέτρων
ω [deg]	γωνία ώρας (<i>hour angle</i>)

Σύμβολα που ξεκινούν με ελληνικά κεφαλαία γράμματα

$A_{-\zeta}$ [deg]	ηλιακό αζιμούθιο
Γ [rad] ή Γ [deg]	γωνία ημέρας (<i>day angle</i>)
ΔA [m ²]	γενικός συμβολισμός στοιχειώδους επιφάνειας

ΔQ [J / s]	γενικός συμβολισμός ενέργειας ανά μονάδα χρόνου
Δt [s]	γενικός συμβολισμός χρονικού διαστήματος
ΔT [K]	γενικός συμβολισμός διαφοράς θερμοκρασίας
\hat{E}	γενικός συμβολισμός μοναδιαίου διανύσματος που χαρακτηρίζει επιφάνεια
Z [deg]	προσανατολισμός θεωρούμενης επιφάνειας
Θ [W / m^3]	θερμική ισχύς ανά μονάδα όγκου
I [$W / (m^2 sr)$]	ένταση ακτινοβολίας (<i>radiation intensity</i>) (ακριβής έννοια του όρου)
$M(V_j)$	πολλαπλασιαστικός συντελεστής στο μοντέλο του Bishop συναρτήσει της τάσης στα άκρα της διόδου
Π	πιθανότητα ετήσιας υπέρβασης θεμελιώδους βασικής ταχύτητας ανέμου
$\Sigma_{πίεση}$ [N / m^2]	μη σεισμικός συνδυασμός για την περίπτωση της πίεσης
$\Sigma_{υποπίεση}$ [N / m^2]	μη σεισμικός συνδυασμός για την περίπτωση της υποπίεσης
Φ [deg]	γεωγραφικό πλάτος
Ω [sr]	στερεά γωνία (<i>solid angle</i>)

Δείκτες

<i>back</i>	αφορά την οπίσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ
<i>cell</i>	αναφέρεται σε Φ/Β κελί
<i>conv</i>	αναφέρεται σε καλυμμένο με 100% αδιαπέραστο υλικό Φ/Β κελί (όλο ή μέρος του)
<i>eq</i>	αναφέρεται σε ισοδύναμο Φ/Β κελί που χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση μερικώς καλυμμένου Φ/Β κελιού
<i>fix</i>	αναφέρεται σε σταθερή τιμή
<i>fl</i>	αναφέρεται σε ρευστό
<i>front</i>	αφορά την εμπρόσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ
<i>i</i>	αφορά στο στοιχείο (π.χ. επιφάνεια) <i>i</i>
<i>ideal</i>	αναφέρεται στην ιδανική περίπτωση
<i>ill</i>	αναφέρεται σε ακάλυπτο Φ/Β κελί (όλο ή μέρος του)
<i>inv</i>	αναφέρεται σε αντιστροφέα Φ/Β συστήματος
<i>low</i>	αναφέρεται σε συγκεκριμένες - πλήρως καθορισμένες συνθήκες χαμηλής έντασης ακτινοβολίας
<i>mpp</i>	αναφέρεται στο σημείο μέγιστης ισχύος
<i>panel</i>	αναφέρεται σε Φ/Β πάνελ
<i>panel.n.bp</i>	αναφέρεται σε Φ/Β πάνελ χωρίς της διόδους bypass
<i>pc.conv</i>	αναφέρεται στο μέρος του Φ/Β κελιού που είναι καλυμμένο με 100% αδιαπέραστο υλικό
<i>pc.ill</i>	αναφέρεται στο μέρος του Φ/Β κελιού που είναι ακάλυπτο
<i>real</i>	αναφέρεται στην πραγματικότητα
<i>ref</i>	αναφέρεται στις συνθήκες αναφοράς
<i>rest</i>	αφορά στις πλαϊνές επιφάνειες του Φ/Β πάνελ
<i>shad</i>	αναφέρεται σε σκιασμένο Φ/Β κελί (όλο ή μέρος του)
<i>STC</i>	αναφέρεται σε συνθήκες STC

<i>string</i>	αναφέρεται σε ολόκληρη τη στοιχειοσειρά
T_c	αναφέρεται σε γενικότερες συνθήκες πλην των συνθηκών αναφοράς που χαρακτηρίζονται μεταξύ άλλων και από μία θερμοκρασία T_c [K]
<i>tot</i>	αναφέρεται σε συνολικό μέγεθος
+	αναφέρεται στο θετικό πόλο ενός κυκλώματος
–	αναφέρεται στον αρνητικό πόλο ενός κυκλώματος

Σταθερές

$\sigma \approx 5.6697 \times 10^{-8} \text{ [W / m}^2 \text{ K}^4\text{]}$ σταθερά *Stefan-Boltzmann*

$g \text{ [m / s}^2\text{]}$	επιτάχυνση της βαρύτητας
$h \approx 6.626 \times 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$	σταθερά του Planck
$k \approx 1.381 \times 10^{-23} \text{ [J / K]}$	σταθερά Boltzmann
k_{ev}	σταθερά Boltzmann σε eV / K
$q_e \approx 1.602 \times 10^{-19} \text{ [C]}$	φορτίο ηλεκτρονίου

1 Εισαγωγή

Στο εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο, γίνεται αρχικά μία προσπάθεια αναφοράς σε κάποιες από τις αιτίες μη κανονικής υποβάθμισης και βλαβών ή καταστροφών σε φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si), στις διασυνδεδεμένες με το δίκτυο διανομής φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Είναι σαφές ότι στα πλαίσια μίας μεταπτυχιακής διατριβής δεν είναι δυνατή η πλήρης ανάλυση όλων αυτών των δυνατών αιτιών ή/και των αντίστοιχων βλαβών, καταστροφών και υποβαθμίσεων, ακόμα και σε ένα υποσύνολο του συστήματος όπως τα Φ/Β πάνελ. Συνεπώς, η μόνη δυνατότητα είναι είτε μία επί της ουσίας επιφανειακή προσέγγιση αρκετών από αυτών, είτε μία εις βάθος ανάλυση μιας μικρής υποκατηγορίας τους. Στην παρούσα εργασία προτιμήθηκε αυτή η δεύτερη προσέγγιση. Στην παράγραφο 1.2 παρουσιάζεται η διάρθρωση της εργασίας πάνω στην προσέγγιση αυτήν.

1.1 Βλάβες, καταστροφές και μη κανονικές υποβαθμίσεις σε Φ/Β εγκαταστάσεις

Πρέπει να είναι κάθε φορά ξεκάθαρο τι θεωρείται βλάβη, καταστροφή ή μη κανονική υποβάθμιση και τι όχι στα πλαίσια αυτής της εργασίας αλλά και γενικότερα. Δε θεωρείται μη κανονική υποβάθμιση η κανονική υποβάθμιση/χειροτέρευση (*normal degradation/deterioration*) των Φ/Β πάνελ και η αντίστοιχη αναμενόμενη μείωση της απόδοσης του συστήματος με την πάροδο του χρόνου που οφείλεται στη γήρανση των υλικών. Οι βλάβες όμως ή ακόμα και οι καταστροφές που μπορούν να προκύψουν εξαιτίας της εμφάνισης θερμών κηλίδων (*hot-spots*) σαφώς και δεν υπάγονται στην κατηγορία των αναμενόμενων υποβαθμίσεων ή της αναμενόμενης και φυσιολογικής γήρανσης των υλικών. Επίσης η μείωση της απόδοσης των Φ/Β πάνελ εξαιτίας του φαινομένου PID (*Potential Induced Degradation*) που θα παρουσιαστεί στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αν και μπορεί να βρίσκεται μέσα στα όρια των εγγυήσεων απόδοσης του κατασκευαστή, πρέπει να θεωρείται μη κανονική υποβάθμιση των Φ/Β πάνελ. Οι καταστροφές που μπορούν να προκληθούν στις Φ/Β εγκαταστάσεις λόγω ισχυρών ανεμοπιέσεων ή γενικότερα λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων (χαλαζόπτωση κ.α.) υπάγονται και αυτές στην ίδια γενικότερη κατηγορία των βλαβών/καταστροφών ή μη κανονικών υποβαθμίσεων.

Μία σωστά σχεδιασμένη, ποιοτικά κατασκευασμένη (καταλληλότητα, ποιότητα υλικών/ποιότητα εργασίας) και προληπτικά συντηρούμενη Φ/Β εγκατάσταση, έχει σαφώς μικρότερες πιθανότητες να εμφανίσει βλάβες ή καταστροφές σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή σε σχέση με μία εγκατάσταση στην οποία έχουν γίνει σχεδιαστικά λάθη, έχουν χρησιμοποιηθεί ακατάλληλα ή κακής ποιότητας υλικά ή η εργασία ήταν κακής ποιότητας και που λειτουργεί όμως για ίδιο χρονικό διάστημα, υπό τις ίδιες περιβαλλοντολογικές-κλιματολογικές συνθήκες, με την ίδια ποιότητα και συμπεριφορά εδάφους και αντιμετωπίζει τέλος ίδια συμπεριφορά από το εξωτερικό δίκτυο.

Από την άλλη, για τους ίδιους κανόνες σχεδίασης, την ίδια ποιότητα εργασίας και με την ίδια ποιότητα υλικών κατασκευής, η συχνότητα, η σοβαρότητα των βλαβών αλλά

ενδεχομένως και η εμφάνιση μη κανονικών υποβαθμίσεων εξαρτάται από την τοποθεσία. Για παράδειγμα μπορεί να εξαρτάται από τη συχνότητα και την ένταση των υπερτάσεων του δικτύου, τη συχνότητα και την ένταση των άμεσων ή έμμεσων κεραυνικών πληγμάτων, τη συχνότητα, την ένταση και την κατεύθυνση των ανέμων και γενικότερα τη συχνότητα και την ένταση ακραίων καιρικών φαινομένων (π.χ. έντονη χαλαζόπτωση, τυφώνες). Μπορεί να εξαρτάται επίσης από τις γενικότερες περιβαλλοντολογικές-κλιματολογικές συνθήκες (π.χ. υγρασία, θερμοκρασία), την ποιότητα εδάφους, τη συχνότητα και την ένταση των σεισμικών δονήσεων, το επίπεδο διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος, την παρουσία τρωκτικών και λοιπών μικρών ζώων ή ακόμα και από τα ατυχήματα ή τις δολιοφθορές κατά τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

Όσο «ευκολότερη» είναι μία τοποθεσία, τόσο περισσότερες «εκπτώσεις» μπορούν να γίνουν ηθελημένα ή μη κατά τη σχεδίαση και την υλοποίηση της εγκατάστασης. Πάντως πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η επιθυμητή διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων αυτών είναι μεγάλη, συνεπώς συνίσταται αυτές οι «εκπτώσεις» τουλάχιστον να έρχονται σε εναρμόνιση με τα ισχύοντα κατά τύπους πρότυπα και κανονισμούς (ΕΛΟΤ HD 384, αντισεισμικός κανονισμός, EN-IEC 61643 κλπ.) των οποίων η τήρηση είναι άλλωστε πολλές φορές υποχρεωτική.

Καθώς με τα χρόνια βελτιώνεται η ποιότητα, η αντοχή και η αξιοπιστία του εξοπλισμού, μειώνεται δραστικά η πιθανότητα εμφάνισης βλαβών, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα βλάβες και καταστροφές που συνέβαιναν τα προηγούμενα έτη λόγω συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της τοποθεσίας εγκατάστασης, να τείνουν να εξαφανιστούν. Για παράδειγμα, μέχρι πριν από λίγο καιρό οι κατασκευαστές Φ/Β πάνελ δεν παρείχαν τις απαραίτητες εγγυήσεις σχετικά με τη μη διάβρωση (*corrosion*) των Φ/Β πάνελ εξαιτίας έκθεσης σε περιβάλλον αλατονέφωσης (πλησίον θάλασσας) ή σε περιβάλλον υψηλής συγκέντρωσης σε αμμωνία και πολλές φορές ανέφεραν αντίστοιχους περιορισμούς (π.χ. η εγκατάσταση έπρεπε να απέχει τουλάχιστον 700 μέτρα από την ακτή) ενώ πλέον πολλοί από αυτούς προσφέρουν προϊόντα με αντιδιαβρωτική προστασία σε περιβάλλον αλατονέφωσης ή σε περιβάλλον υψηλής συγκέντρωσης σε αμμωνία (*salt mist/ammonia resistance*).

Αξίζει επίσης να επισημανθεί ότι σε ενδεχόμενη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, παρόλο που μπορεί να έχουν ληφθεί όλα τα δυνατά και αναγκαία μέτρα προστασίας, είναι δυνατό να υπάρξουν βλάβες ή καταστροφές στην εγκατάσταση. Δεν πρέπει όμως σε περίπτωση όπου για παράδειγμα θεωρείται επαρκές το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας να θεωρείται βλάβη η αναμενόμενη “φυσιολογική” καταστροφή των *modules* των απαγωγών υπερτάσεων (SPDs), το οποίο άλλωστε είναι αυτό το γεγονός που προστατεύει την εγκατάσταση.

1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, εξετάζεται μεταξύ άλλων το φαινόμενο της δημιουργίας θερμών κηλίδων σε περιπτώσεις αισθητής ανομοιομορφίας όσον αφορά στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. σκιάσεις, περιττώματα πτηνών). Στο πλαίσιο αυτό γίνεται η υιοθέτηση ότι το Φ/Β πάνελ αποτελείται από σταθερά, ομογενή, γραμμικά και ιστροπικά

υλικά τόσο από ηλεκτρικής όσο και από θερμικής σκοπιάς. Βάσει αυτής της υπόθεσης, γίνεται αξιολόγηση ενός μη τετριμμένου τρισδιάστατου θερμικού μοντέλου με πραγματικές μετρήσεις θερμοκρασιακής κατανομής στο Φ/Β πάνελ. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη κάμερα υπερύθρων. Οι συνθήκες σκίασης-κάλυψης ναι μεν ήταν συγκεκριμένες καθότι δεν ήταν δυνατό να θεωρηθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί, αλλά τα εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούν να γενικευθούν με προσοχή. Φυσικά πρέπει να επισημανθεί ότι οι μερικές σκιάσεις ή τα περιπτώματα πτηνών δεν είναι οι μόνοι λόγοι για τους οποίους μπορούν να εμφανιστούν θερμές κηλίδες. Για παράδειγμα ρωγμές (*cracks*) που μπορούν να δημιουργηθούν εκ των υστέρων για διάφορους λόγους μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμών κηλίδων. Επίσης εκ κατασκευής ελαττώματα στα Φ/Β κελιά και στα αντίστοιχα πάνελ, μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμών κηλίδων. Σε κάθε περίπτωση, είναι δυνατό να εντοπιστούν τα ασυνήθιστα θερμά σημεία στο Φ/Β κελί ή στο Φ/Β πάνελ κατά τη διάρκεια της κατασκευής του πάνελ ή και μετέπειτα σε μία “in the field” επιθεώρηση. Μετά τη λειτουργία της εγκατάστασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν κλασσικές μέθοδοι θερμογραφίας στο χώρο εγκατάστασης για τον εντοπισμό των θερμότερων σημείων όχι μόνο στην επιφάνεια του Φ/Β πάνελ, αλλά και στις ηλεκτρικές συνδέσεις, στους ηλεκτρικούς πίνακες και αλλού. Τα θερμά σημεία συνήθως αποτελούν πρόβλημα στο πλαίσιο που καταδεικνύουν αισθητή μεταβολή στα (τοπικά) ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός σημείου, μίας ευρύτερης περιοχής και κατά συνέπεια ενός Φ/Β κελιού ή ολόκληρου του Φ/Β πάνελ. Σε εργαστηριακό περιβάλλον αυτή η διαφοροποίηση στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μπορεί να εντοπιστεί με τη βοήθεια της απεικόνισης με ηλεκτροφωταύγεια (*electroluminiscence (EL) imaging*) ή της απεικόνισης με «σκοτεινή» lock-in θερμογραφία (*dark lock-in thermography*) με εφαρμογή της κατάλληλης τάσης, ή και με φωτεινή (*illuminated*) lock-in θερμογραφία. Καθώς όλο και περισσότεροι κατασκευαστές Φ/Β κελιών και Φ/Β πάνελ εφαρμόζουν αυτές τις μεθόδους ελέγχου ποιότητας στο προϊόν τους κατά τη διαδικασία της κατασκευής, γίνεται αντιληπτό ότι μία γραμμική, ισοτροπική και ομογενής θεώρηση των υλικών από τα οποία αποτελείται ένα Φ/Β πάνελ απέχει τουλάχιστον λιγότερο από την πραγματικότητα από ότι μερικά χρόνια πριν, όταν αυτές οι μέθοδοι ελέγχου ποιότητας δε χρησιμοποιούνταν κατά τη διαδικασία της κατασκευής.

Το συγκεκριμένο τρισδιάστατο θερμικό μοντέλο που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή, είναι αλληλένδετο με ένα αντίστοιχο ηλεκτρικό μοντέλο του Φ/Β κελιού, το οποίο με τη σειρά του σχετίζεται άμεσα με την έννοια της ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας, που είναι και το μέρος εκείνο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από το Φ/Β κελί και είναι διαθέσιμο για τη Φ/Β μετατροπή. Για αυτόν τον λόγο αλλά και για την πληρότητα της εργασίας, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σχετική θεωρία με απώτερο σκοπό την εκτίμηση της έντασης της ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας, παρόλο που στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις της έντασης της ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη εκτίμησής της. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένας πρωτότυπος τρόπος εξαγωγής των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του Φ/Β κελιού στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης, με μετρήσεις πεδίου σε ολόκληρο το Φ/Β πάνελ, κάνοντας χρήση φορητού IV-tester. Στο πλαίσιο αυτό, όσον αφορά στο κομμάτι της ορθής πόλωσης, γίνεται χρήση του γνωστού μοντέλου των 5-παραμέτρων [1, 2] με την προσθήκη δύο ακόμα παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την αναγωγή των γνωστών 5-παραμέτρων σε διαφορετικές συνθήκες από τις εκάστοτε

συνθήκες αναφοράς. Οι δύο αυτοί πρόσθετοι παράμετροι προήλθαν μετά από μελέτη της παρουσίας [3] και του [4]. Όσον αφορά στο κομμάτι της ανάστροφης πόλωσης, γίνεται η εξαγωγή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του Φ/Β κελιού με παράλληλη αξιολόγηση του μοντέλου του Bishop [5] ίσως του πιο διαδεδομένου μοντέλου στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης του Φ/Β κελιού. Διαπιστώνεται ότι το μοντέλο του Bishop, δεν μπορεί να μοντελοποιήσει πλήρως ολόκληρη την καμπύλη I-V στην ανάστροφη πόλωση για αυτό και γίνεται διαχωρισμός της καμπύλης σε τρία διαφορετικά τμήματα. Στο πρώτο τμήμα η σχέση I-V θεωρείται σχεδόν γραμμική, όπως συμβαίνει πολλές φορές στις μετρήσεις για την εκτίμηση της αντίστασης διαρροής στο Φ/Β κελί [6]. Το δεύτερο τμήμα που αποτελεί και το μεγαλύτερο μέρος της καμπύλης μοντελοποιείται αρκετά ικανοποιητικά με το μοντέλο του Bishop, ενώ αντίθετα στο τρίτο τμήμα χρησιμοποιείται η θεώρηση του [7] σχετικά με την εκτίμηση της τάσης διάσπασης και της σχέσης μεταξύ ρεύματος και τάσης κοντά στην περιοχή διάσπασης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων του τρίτου κεφαλαίου με σκοπό την αξιολόγηση του θερμικού μοντέλου που παρουσιάζεται στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Το θερμικό αυτό μοντέλο αποτελεί πρωτοτυπία καθώς δε βρέθηκε στη βιβλιογραφία αντίστοιχο μοντέλο για την μοντελοποίηση της θερμοκρασιακής κατανομής του Φ/Β πάνελ υπό συνθήκες ανομοιομορφίας ακτινοβολίας. Βασίστηκε όμως στα [8, 9] και στο μοντέλο του Bishop. Η αξιολόγηση του μοντέλου, δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα και σίγουρα θέτει μία βάση για τη μοντελοποίηση της θερμοκρασιακής κατανομής των Φ/Β πάνελ υπό συνθήκες ανομοιογένειας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζονται οι καταστροφές που μπορούν να προκληθούν στις Φ/Β εγκαταστάσεις λόγω ισχυρών ανεμοπιέσεων κυρίως από τη μεριά των καταστροφών στα Φ/Β πάνελ και παρουσιάζεται ένας προτεινόμενος αλγόριθμος βασισμένος στον Ευρωκώδικα 1 που μπορεί να χρησιμοποιείται από τους εγκαταστάτες προκειμένου να γίνεται κατάλληλη και ασφαλής επιλογή (όσον αφορά στα φορτία ανέμου-χιονιού) του Φ/Β πάνελ και της βάσης στις επί εδάφους εγκαταστάσεις. Παρουσιάζονται επίσης κάποιες κατευθύνσεις για την υλοποίηση ενός παρόμοιου αλγορίθμου που να αφορά σε Φ/Β συστήματα εγκατεστημένα σε κτίρια, ενώ αναφέρονται και κάποιοι τρόποι εγκατάστασης βάσεων Φ/Β σε κτιριακές εγκαταστάσεις.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται το προαναφερθέν φαινόμενο PID, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης στα Φ/Β συστήματα και αναφέρονται κάποιοι τρόποι αντιμετώπισής του. Αν και οι κατασκευαστές Φ/Β κελιών και πάνελ διατείνονται ότι πλέον το φαινόμενο αυτό δεν πρέπει να θεωρείται πρόβλημα όσον αφορά στα πάνελ που κατασκευάζονται και πρόκειται να κατασκευαστούν, αποτελεί σίγουρα πρόβλημα για τους επενδυτές και τους εγκαταστάτες των ήδη εγκατεστημένων συστημάτων στα οποία έχει εμφανιστεί, καθώς η εγκατάσταση δεν αποδίδει ή δεν απέδωσε μέχρι την αντιμετώπιση του προβλήματος τα αναμενόμενα. Αρκετές φορές το φαινόμενο PID κρύβεται πίσω από ανεξήγητες μέχρι πρότινος παρατηρούμενες μειωμένες αποδόσεις.

Κλείνοντας στο κεφάλαιο 7, παρουσιάζονται δύο σχετικά νέες (ίσως περισσότερο για τα ελληνικά δεδομένα) τάσεις που παρουσιάζονται στα Φ/Β συστήματα, με την πρώτη τάση να έχει να κάνει με τη σχεδίαση και την εγκατάσταση υπό συνθήκες ανομοιογένειας (σκιάσεις,

διαφορετικοί προσανατολισμοί κλπ.) ενώ τη δεύτερη να έχει να κάνει με μία νέα ενεργειακή πολιτική που πιθανόν να οδηγήσει εκ' νέου στην εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων στην Ευρώπη και στην Ελλάδα καθότι την περίοδο που γράφτηκε αυτή η εργασία υπήρχε γενικότερη πτώση στην αγορά των Φ/Β συστημάτων στην Ευρώπη.

1.3 Αναφορές

- [1] John A. Duffie & William A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes", JOHN WILEY & SONS, 3rd edition, 2006.
- [2] W. De Soto, S.A Klein, W.A. Beckmann, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Elsevier, 2006.
- [3] W. Beckman, "The CEC/UW n-parameter model".
- [4] Christopher P. Cameron, Joshua S. Stein, Coryne A., "PV Performance Modeling Workshop Summary Report", Sandia Report, May 2011.
- [5] J.W. Bishop, "Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits", Elsevier, 1988.
- [6] Agilent Technologies, "IV and CV Characterizations of Solar/Photovoltaic Cells Using the B1500A", *Application Note B1500A-14*.
- [7] M.C. Alonso-Garcia, J.M. Ruiz, "Analysis and modeling the reverse characteristic of photovoltaic cells", Elsevier, 2006.
- [8] F. Fertig et al., "Impact of junction breakdown in multi-crystalline silicon solar cells on hot spot formation and module performance" in *26th European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Hamburg, Germany, 5-9 September 2011.
- [9] M. U. Siddiqui, A. Arif, L. Keley and S. Dubowsky, "Three-dimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions", Elsevier, 2012.
- [10] Biao Li, Adam Stokes, Dan M. J. Doble, "TWO DIMENSIONAL MAPPING OF ELECTRICAL PROPERTIES OF PV MODULES USING ELECTROLUMINESCENCE", Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems.
- [11] "NREL-> PDI Laboratory -> Stand-Alone Measurements and Characterization Capabilities," [Online]. Available: http://www.nrel.gov/pv/pdil/samc_capabilities.html.

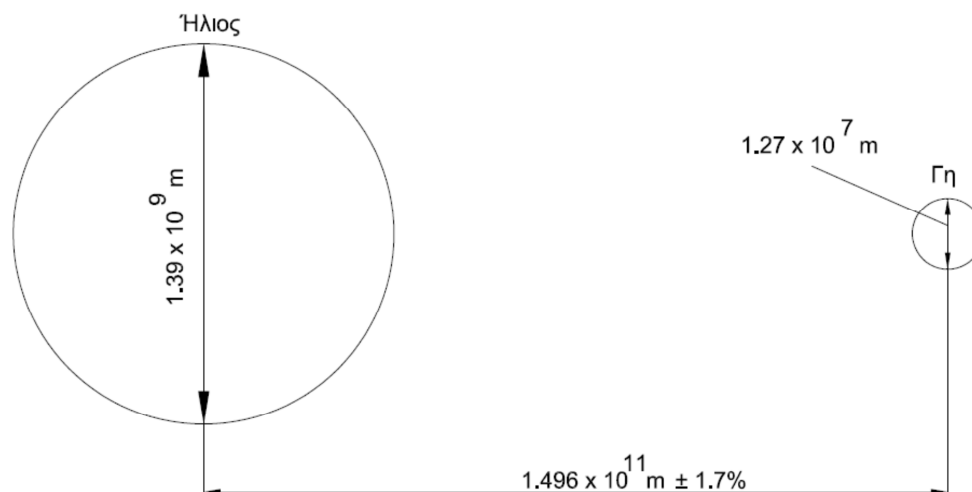
2 Ηλιακή ακτινοβολία

2.1 Στοιχεία ηλιακής γεωμετρίας

Ο Ήλιος παρέχει ενέργεια στη Γη με τη μορφή ακτινοβολίας, δίχως την οποία θα ήταν αδύνατη η ύπαρξη ζωής. Η ενέργεια παράγεται στον πυρήνα του Ήλιου μέσω της διαδικασίας της σύντηξης των ατόμων υδρογόνου σε ήλιο. Ο Ήλιος μπορεί (απλουστευμένα) να θεωρηθεί ως μία σφαίρα από πολύ καυτή αέρια ύλη και διάμετρο $1.39 \times 10^9 \text{ m}$ [1].

Η ανάλυση της δομής του Ήλιου δεν συνάδει με τους σκοπούς αυτής της εργασίας. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης, μπορεί να ανατρέξει στα [2] και [3], τα οποία με τη σειρά τους παραπέμπουν σε ακόμα εκτενέστερες περιγραφές για τη δομή του Ήλιου.

Παρόλο που έτσι θεωρείται, στην πραγματικότητα ο Ήλιος δεν έχει απόλυτα σφαιρικό σχήμα, ούτε η Γη άλλωστε. Ωστόσο, μία απλουστευμένη θεώρηση της γεωμετρίας μεταξύ Γης και Ήλιου, απεικονίζεται στο σχήμα 2-1, όπου έχει θεωρηθεί ότι και τα δύο ουράνια σώματα είναι σφαίρες με τον Ήλιο να έχει διάμετρο $1.39 \times 10^9 \text{ m}$ και τη Γη να έχει διάμετρο $1.27 \times 10^7 \text{ m}$. Για έναν παρατηρητή που βρίσκεται στη Γη, ο «ηλιακός δίσκος» σχηματίζει γωνία περίπου $32'$. Συνήθως στις εφαρμογές συμβατικών Φ/Β συστημάτων, ο Ήλιος θεωρείται σαν σημειακή πηγή. Σε εφαρμογές όμως όπου η εστίαση του ηλιακού φωτός είναι πολύ σημαντική, όπως τα CPV (*concentrated ή concentrating photovoltaics*), αποφεύγεται αυτή η παραδοχή και χρησιμοποιείται η παραπάνω γωνία.



Σχήμα 2-1

Η απόσταση του κέντρου του Ήλιου από το κέντρο της Γης μεταβάλλεται, αλλά η μέση απόσταση είναι περίπου $1.495 \times 10^{11} \text{ m}$ [2] (ακριβέστερα $149597870700 \pm 3 \text{ m}$ [4, 5]). Αυτή η απόσταση ορίζεται ως μία αστρονομική μονάδα (1 *astronomical unit* – 1 AU).

Τα μαθηματικά που διέπουν την κίνηση του Ήλιου σε σχέση με ένα σταθερό σημείο πάνω στη Γη, δεν είναι τόσο απλά, ή τουλάχιστον η πολυπλοκότητά τους εξαρτάται άμεσα από την αποδεκτή αβεβαιότητα που μπορεί να υπάρχει στους υπολογισμούς. Για παράδειγμα, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως στις εφαρμογές σχεδίασης Φ/Β συστημάτων με απώτερο σκοπό την εκτίμηση της έντασης της ακτινοβολίας, είναι σχετικά απλές. Δεν έχει νόημα η χρησιμοποίηση εξισώσεων πολύ μεγάλης ακρίβειας, διότι η συνολική αβεβαιότητα στην όλη διαδικασία είναι πολύ μεγαλύτερη. Αντιθέτως, κατά τη διαδικασία καλιμπραρίσματος των πυρανομέτρων, είναι πολύ σημαντική η ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας στη διαδικασία υπολογισμού της θέσης του Ήλιου [6]. Συνεπώς, δεν υπάρχουν «λάθος» και «σωστές» εξισώσεις, υπάρχουν εξισώσεις με μεγαλύτερη ή μικρότερη αβεβαιότητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι εξισώσεις που προκύπτουν έχουν κάποια καθορισμένη αβεβαιότητα και ισχύουν για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ο αναγνώστης που ενδιαφέρεται να μελετήσει σε βάθος τις εξισώσεις που διέπουν την κίνηση των ουράνιων σωμάτων, παραπέμπεται στο [7].

Η πρώτη ολοκληρωμένη εξήγηση της κίνησης του Ήλιου δόθηκε από τον Κέπλερ (Kepler) στα *Astronomia Nova* (1609) και *Harmonice mundi* (1618) [8]. Δυστυχώς όμως η δουλειά που είχε κάνει ο Κέπλερ διαδόθηκε με πολύ αργούς ρυθμούς. Χαρακτηριστικό και αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο Γαλιλαίος στο *Dialogo sopra y due massimi del mundo* που δημοσιεύθηκε το 1632 θεωρούσε ακόμα ότι η κίνηση των πλανητών γύρω από τον Ήλιο ακολουθεί κυκλική τροχιά, αγνοώντας τις δημοσιεύσεις του Κέπλερ [8]. Σήμερα είναι γνωστό, ότι η τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο είναι τέτοια ώστε η απόσταση Γης - Ήλιου να μεταβάλλεται γύρω από τη μέση τιμή ($1.495 \times 10^{11} \text{ m}$) σε ένα ποσοστό της τάξεως του $\pm 1.7\%$ [2] (σχήμα 2-1).

Στην πραγματικότητα, αν συμβολιστεί με r_0 η μία αστρονομική μονάδα και με r η απόσταση μεταξύ Γης και Ήλιου, ισχύει για την απόσταση Γης-Ήλιου σε AU με ένα μέγιστο σφάλμα ± 0.0001 ότι [3]:

$$\left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin \Gamma + 0.000719 \cos(2\Gamma) + 0.000077 \sin(2\Gamma) \quad (2.1)$$

$$\text{όπου } \Gamma = \frac{2\pi(N-1)}{365} \text{ [rad]} \quad (2.2)$$

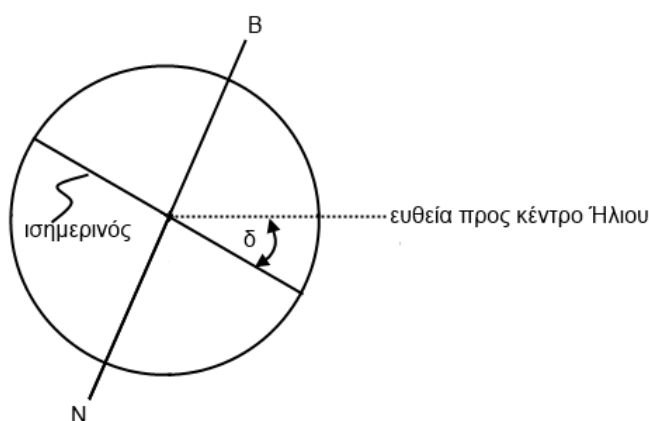
Μία πιο απλουστευμένη σχέση που συνήθως χρησιμοποιείται με λιγότερη ακρίβεια, είναι η [2, 3]:

$$\left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = 1 + 0.033 \times \cos \left(\left(\frac{360N}{365} \right)^\circ \right) \quad (2.3)$$

όπου με N και στις δύο παραπάνω εξισώσεις συμβολίζεται η N -οστή μέρα του χρόνου. Το N μπορεί να πάρει και μη ακέραιες τιμές [2], πράγμα απολύτως λογικό καθώς η κίνηση της Γης και του Ήλιου είναι διαρκής και ουσιαστικά τα δύο ουράνια σώματα απλά

θεωρούνται σταθερά μέσα σε μικρές χρονικές περιόδους όπου η μεταβολή των εκάστοτε παραμέτρων βρίσκεται μέσα στα όρια των κάθε φορά αποδεκτών σφαλμάτων. Έτσι συνήθως θεωρείται ικανοποιητική η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με τις ακέραιες τιμές του N . Για παράδειγμα, ισχύει $N=1$ για την 1^η Ιανουαρίου, $N=31$ για την 31^η Ιανουαρίου κοκ. Το N μεταβάλλεται από 1 έως το 365 (θεωρούνται όπως αναφέρθηκε ακέραιες τιμές).

Εκτός από τη κίνησή της γύρω από τον Ήλιο, η Γη περιστρέφεται επίσης γύρω από τον άξονά της, εκτελώντας κατά προσέγγιση μία ολόκληρη περιστροφή μέσα σε περίπου είκοσι τέσσερις ώρες. Η σχετική θέση του Ήλιου και της Γης, περιγράφεται απλοποιημένα με τη βοήθεια του ουρανογραφικού συστήματος αναφοράς (*celestial reference system*) και της ουράνιας σφαίρας (*celestial sphere*) [9]. Η ουράνια σφαίρα, είναι μία υποθετική σφαίρα που χρησιμοποιείται στη *Γεωδαιτική Αστρονομία* [9] και μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε και να έχει οποιαδήποτε ακτίνα [9]. Στις συνήθεις εφαρμογές, κέντρο της θεωρείται η Γη. Η βασική διεύθυνση που ορίζει το ουρανογραφικό σύστημα αναφοράς είναι η διεύθυνση του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής της Γης [9]. Το σημείο της ουράνιας σφαίρας που αντιστοιχεί στο διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας (θετικό σε δεξιόστροφο σύστημα αναφοράς) λέγεται Βόρειος Πόλος του ουρανού (*north celestial pole*), ενώ το αντιδιαμετρικό του λέγεται Νότιος Πόλος του ουρανού (*south celestial pole*) [3, 9]. Επομένως οι πόλοι του ουρανού, βρίσκονται στην ίδια ευθεία με τους γεωγραφικούς πόλους της Γης [3, 9]. Ο μέγιστος κύκλος της ουράνιας σφαίρας που έχει τους πόλους του ουρανού ως γεωμετρικούς πόλους λέγεται ουράνιος Ισημερινός (*celestial Equator*) και βρίσκεται στον ίδιο επίπεδο με τον Ισημερινό της Γης [3, 9]. Όλοι οι μέγιστοι κύκλοι που περνούν από τους ουράνιους Πόλους (είναι επομένως κάθετοι στον ουράνιο Ισημερινό) λέγονται ωριαίοι κύκλοι (*hour circles*) [9]. Το επίπεδο της (σχεδόν) ελλειπτικής τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο ορίζει στην ουράνια σφαίρα ένα μέγιστο κύκλο που λέγεται *Εκλειπτική* (*ecliptic*) [9]. Πρέπει να επισημανθεί, ότι το επίπεδο της Εκλειπτικής είναι το επίπεδο που περιέχει τη “μέση” τροχιά της Γης γύρω από τον Ήλιο [3]. Εξαιτίας των δυνάμεων που αλληλεπιδρούν μεταξύ των πλανητών, ο Ήλιος δε βρίσκεται πάντα ακριβώς πάνω στο επίπεδο της εκλειπτικής, αλλά θεωρείται έτσι με πολύ καλή ακρίβεια. Ως ηλιακή απόκλιση (*solar declination*) δ , ορίζεται η γωνία μεταξύ της ευθείας που ενώνει το κέντρο της Γης με το κέντρο του Ήλιου και της προβολής της στο επίπεδο του ουράνιου ισημερινού με $|\delta| \leq 90^\circ$ (σχήμα 2-2).



Σχήμα 2-2

Πάνω στο επίπεδο του ουράνιου ισημερινού ισχύει $\delta = 0^\circ$, θετική θεωρείται η γωνία από το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού προς τον Βόρειο Πόλο του ουρανού και αρνητική προς το Νότιο. Η ηλιακή απόκλιση, δίνεται από τον τύπο [3]:

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.0070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos(2\Gamma) + 0.000907 \sin(2\Gamma) - 0.002697 \cos(3\Gamma) + 0.00148 \sin(3\Gamma) \quad (2.4)$$

με μέγιστο σφάλμα λιγότερο από 0.0006 **ακτίνια**. Άλλη εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι η [3]:

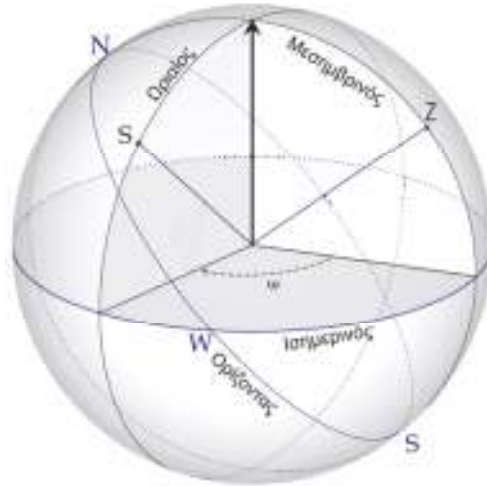
$$\delta = \text{Arcsin} \left\{ 0.4 \sin \left(\frac{360}{365} (N - 80) \right) \right\} \quad (2.5).$$

Συνηθέστερα χρησιμοποιείται η [2]:

$$\delta = 23.45 \times \sin \left(\frac{360}{365} (N + 284) \right) \quad (2.6)$$

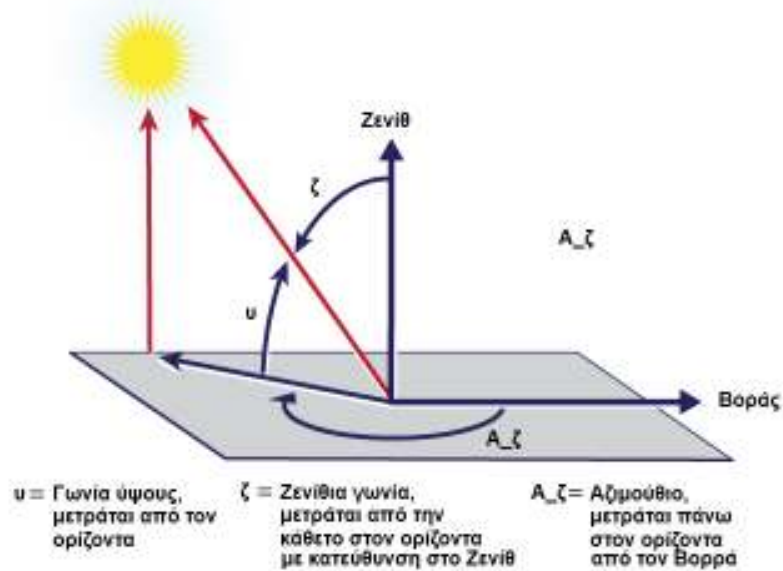
με τη γωνία στις (2.5) και (2.6) να δίνεται σε μοίρες. Υπάρχουν ακόμα πιο ακριβείς εξισώσεις υπολογισμού της ηλιακής απόκλισης καθώς και της απόστασης μεταξύ Γης και Ήλιου. Επιπρόσθετα, σε όλες τις εξισώσεις που έχουν παρουσιαστεί μέχρι στιγμής, θεωρείται ότι η διάρκεια του έτους είναι 365 μέρες, γεγονός το οποίο δεν είναι απόλυτα αληθές ή πιο σωστά είναι αληθές κατά προσέγγιση. Περαιτέρω ανάλυση όμως των εξισώσεων που αφορούν στην κίνηση Γης-Ήλιου, απέχει πολύ από τους σκοπούς αυτής της εργασίας. Έννοιες όπως *Ιουλιανή Μέρα (Julian Day ή JD)*, *Ιουλιανό Έτος (Julian Year ή JY, 1 JY = 365.25 JD)* δεν αναλύονται καθώς οι εξισώσεις που τις χρησιμοποιούν έχουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και η πρόσθετη ακρίβεια που προσφέρουν δεν είναι χρήσιμη για τις συνήθεις προσομοιώσεις λειτουργίας Φ/Β συστημάτων. Συνήθως έννοιες όπως *Julian Day*, *Julian Century* κ.α. χρησιμοποιούνται στην αστρονομία. Στα [6, 10] πάντως, παρουσιάζονται αλγόριθμοι υπολογισμού της θέσης του Ήλιου για εφαρμογές ηλιακής ακτινοβολίας όπου και γίνεται χρήση μεταξύ άλλων και των παραπάνω εννοιών.

Ως *ωριαία γωνία (hour angle)* ω ορίζεται η διέδρη γωνία μεταξύ του ωριαίου κύκλου που περνά από το ζενίθ (*αστρονομικός μεσημβρινός*) του τόπου [9] και του ωριαίου κύκλου που διέρχεται από τον Ήλιο (σημειακή θεώρηση) (σχήμα 2-3). Κατά σύμβαση η τιμή της είναι 0° το *ηλιακό μεσημέρι* (όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο στον ουρανό κάθε μέρα [11] και βρίσκεται επί του αστρονομικού μεσημβρινού). Επειδή η Γη περιστρέφεται περίπου μία φορά κάθε είκοσι τέσσερις ώρες, η ωριαία γωνία αλλάζει κατά 15 μοίρες κάθε ώρα σε ένα εύρος 360 μοιρών στη διάρκεια της ημέρας [3]. Η τιμή της είναι αρνητική το πρωί (πριν ο Ήλιος διέλθει από το μεσημβρινό) και θετική το απόγευμα (αφού ο Ήλιος διέλθει από το μεσημβρινό) [2, 3].



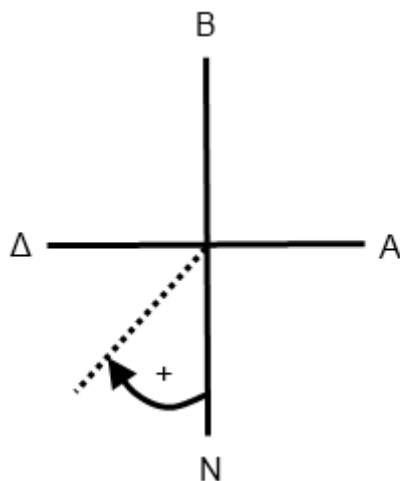
Σχήμα 2-3

Η θέση του Ήλιου σε σχέση με ένα σημείο που βρίσκεται στην επιφάνεια της Γης, χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους που απεικονίζονται στο σχήμα 2-4 [11, 12]. Πρέπει να αποσαφηνιστεί ότι στην Αστρονομία, η διεύθυνση της κατακόρυφου ενός σημείου στην επιφάνεια της Γης ορίζεται από το διάνυσμα της έντασης του Γήινου πεδίου Βαρύτητας στο σημείο αυτό. Έτσι στη συγκεκριμένη εργασία, ορίζεται ως ορίζοντας ενός σημείου (επέκταση: τόπου) το επίπεδο που περιέχει το σημείο αυτό και είναι κάθετο στη διεύθυνση της κατακόρυφου.



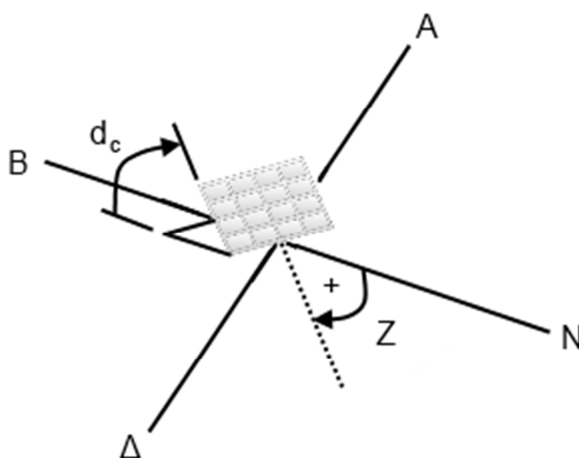
Σχήμα 2-4

Στο σχήμα 2-4, η γωνία ύψους ν έχει θετική φορά από τον ορίζοντα προς το Ζενίθ, ενώ η σχέση που τη συνδέει με τη ζενίθια γωνία ζ , είναι: $\zeta + \nu = 90^\circ$. Το αζιμούθιο A_ζ έχει θετική φορά από το Βορά προς τα ανατολικά (σχήμα 2-4), αν και συνήθως στις εφαρμογές Φ/Β συστημάτων θεωρείται η γωνία από το Νότο και με θετική τη φορά προς τη Δύση [2, 3]. Αυτή η θεώρηση (σχήμα 2-5) υιοθετείται και στην παρούσα εργασία όπου χρειαστεί.



Σχήμα 2-5

Σπάνια τα Φ/Β συστήματα τοποθετούνται παράλληλα στον ορίζοντα ενός τόπου. Συνήθως τοποθετούνται υπό κλίση. Οι γωνίες που χαρακτηρίζουν την τοποθέτηση (προσανατολισμός, κλίση) μιας επιφάνειας σε ένα τόπο, απεικονίζονται στο σχήμα 2-6. Ο προσανατολισμός της επιφάνειας χαρακτηρίζεται από τη γωνία Z που σχηματίζεται μεταξύ της προβολής της κάθετης στην επιφάνεια στον ορίζοντα και της ευθείας Βορρά-Νότου και ορίζεται όπως στο σχήμα 2-5, με $-180^\circ < Z \leq 180^\circ$, και $Z = 0^\circ$ για προσανατολισμό προς το Νότο. Η κλίση χαρακτηρίζεται από τη γωνία d_c που σχηματίζεται από τον ορίζοντα και την επιφάνεια με $d_c = 0^\circ$ για οριζόντια κλίση και $d_c = 90^\circ$ για την περίπτωση που η επιφάνεια είναι κάθετη στον ορίζοντα.



Σχήμα 2-6

Ως ηλιακή γωνία πρόσπτωσης (*incident solar angle*) ορίζεται η γωνία πρόσπτωσης της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια και συμβολίζεται ως θ_b . Με τον όρο γωνία πρόσπτωσης της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας, ονομάζεται η γωνία μεταξύ της απευθείας ακτινοβολίας (θεωρούμενη ως ακτίνα) που προσπίπτει στην επιφάνεια και της κάθετης στην επιφάνεια. Όταν οι ακτίνες του Ήλιου είναι κάθετες στην επιφάνεια ισχύει $\theta_b = 0^\circ$, ενώ όταν είναι παράλληλες $\theta_b = 90^\circ$ [3, 13]. Το συνημίτονο της γωνίας θ_b , είναι τέτοιο ώστε [3]:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_b = & \sin \delta \sin \Phi \sin d_c - \sin \delta \cos \Phi \sin d_c \cos Z + \cos \delta \cos \Phi \cos d_c \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \Phi \sin d_c \cos Z \cos \omega + \cos \delta \sin d_c \sin Z \sin \omega \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

όπου το γεωγραφικό πλάτος (*latitude*) Φ θεωρείται στη συγκεκριμένη εργασία ότι παίρνει τιμές από -90° έως $+90^\circ$, με 0° στον Ισημερινό, -90° νότια και $+90^\circ$ βόρεια αυτού. Η τιμή της γωνίας θ_b ενδέχεται να ξεπερνά τις 90° , που σημαίνει ότι ο Ήλιος βρίσκεται πίσω από την επιφάνεια [2]. Επίσης, κατά τη χρησιμοποίηση της εξίσωσης (2.7) πρέπει να επιβεβαιώνεται ότι η ωριαία γωνία βρίσκεται μεταξύ ανατολής και δύσης του Ηλίου [2]. Σημειώνεται τέλος, ότι για τον υπολογισμό της ζενίθιας γωνίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση (2.7), καθότι για $d_c = 0^\circ$, είναι $\theta_b \equiv \zeta$.

Για τον υπολογισμό της ωριαίας γωνίας, είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η ηλιακή ώρα (*solar time ή apparent solar time*) που είναι η ώρα βάσει της γωνιακής κίνησης του Ήλιου στον ουρανό. Η ηλιακή ώρα, δεν συμπίπτει με την τοπική ώρα. Για να είναι δυνατό να γίνει μετατροπή από τη μία στην άλλη και το αντίστροφο, πρέπει να γίνουν δύο διορθώσεις.

Η πρώτη διόρθωση έχει να κάνει με τη διαφορά του γεωγραφικού μήκους της θέσης του παρατηρητή και του γεωγραφικού μήκους που αντιστοιχεί στο μεσημβρινό πάνω στον οποίο βασίζεται η τοπική ώρα. Ο Ήλιος (βάσει της θέσης του παρατηρητή) χρειάζεται 4 λεπτά για να μετακινηθεί κατά 1° γεωγραφικού μήκους, θεωρώντας ότι η Γη δεν περιστρέφεται. Λαμβάνοντας υπόψη όμως (και αυτή είναι η δεύτερη διόρθωση) τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της Γης λόγω ιδιοπεριστροφών της τροχιάς της γύρω από τον Ήλιο, η ηλιακή ώρα δίνεται από τον τύπο [1, 2]:

$$ST - LT = ET + 4 \times (SL - LL) - DS \quad (2.8)$$

όπου με ST συμβολίζεται η ηλιακή ώρα ενώ με LT συμβολίζεται η τοπική ώρα. Ακόμα, το σύμβολο ET (*Equation of time*) αντιπροσωπεύει τη δεύτερη διόρθωση που αναφέρθηκε παραπάνω. Υπολογίζεται (σε λεπτά) με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια από τον τύπο:

$$\left. \begin{aligned} ET = & 229.18 \times (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - \\ & - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma) \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Με SL (*Standard longitude*) συμβολίζεται το γεωγραφικό μήκος που αντιστοιχεί στο μεσημβρινό πάνω στον οποίο βασίζεται η τοπική ώρα, ενώ με LL (*local longitude*) συμβολίζεται το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή. Το γεωγραφικό μήκος στη συγκεκριμένη εξίσωση θεωρείται ότι μεταβάλλεται από 0 έως 360 μοίρες, με θετική φορά

από το μεσημβρινό του Γκρίνουιτς (0 μοίρες) προς τα **δυτικά**. Το SL έχει διακριτές τιμές (ανά 15 μοίρες). Έτσι π.χ. για την Αθήνα ισχύει $SL = -30^\circ$. Τέλος η παράμετρος DS (*Daylight saving*) λαμβάνει τιμές 0 ή 60 λεπτά αναλόγως με το αν είναι σε ισχύ η χειμερινή ή η θερινή ώρα αντίστοιχα.

Δοθείσας της ηλιακής ώρας, η ωριαία γωνία μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\omega = 15(ST - 12) \text{ [deg]} \quad (2.10)$$

με το ST να δίνεται σε ώρες. Για παράδειγμα όπως προαναφέρθηκε για το ηλιακό μεσημέρι είναι $ST = 12$ [hours], δίνοντας $\omega = 0^\circ$, ενώ η ηλιακή ώρα 13:30 γράφεται ως $ST = 13.5$ [hours], δίνοντας $\omega = +22.5^\circ$.

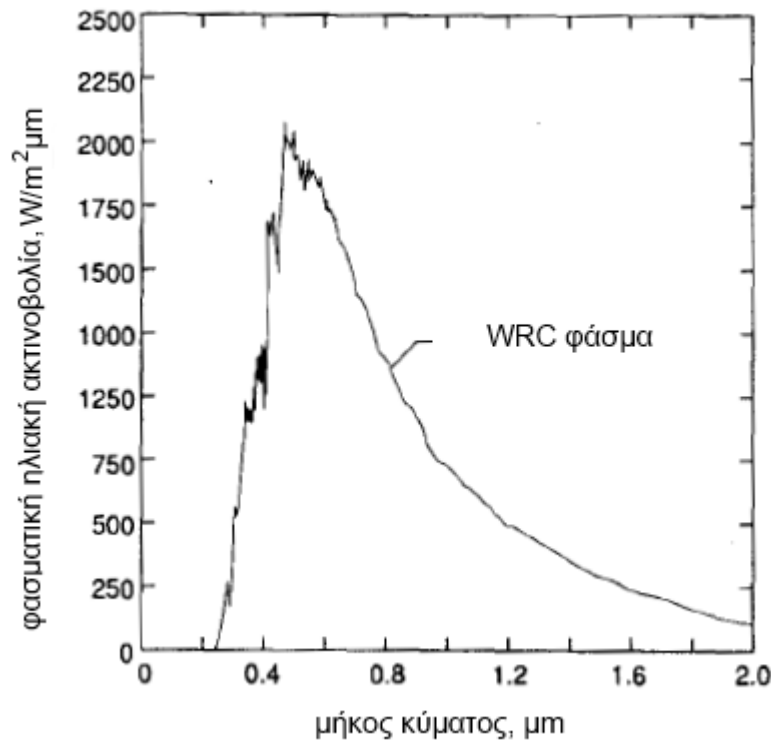
Συνεπώς, βάσει των παραπάνω, είναι δυνατόν από την (2.7) να εκτιμάται το συνημίτονο της ηλιακής γωνίας πρόσπτωσης, κάτι το οποίο είναι καθοριστικής σημασίας για πολλές εφαρμογές χρήσης ηλιακής ενέργειας.

2.2 Εξωγήινη ακτινοβολία (Extraterrestrial radiation)

Ορίζεται ως ηλιακή σταθερά (**solar constant**) (συμβολίζεται εδώ ως G_{sc}) η συνολική ηλιακή ενέργεια που δέχεται ανά δευτερόλεπτο (ισχύς) μοναδιαία επιφάνεια 1 m^2 , η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας, απέχει από το κέντρο του Ήλιου απόσταση ίση με τη μέση απόσταση Γης-Ήλιου και βρίσκεται εκτός γήινης ατμόσφαιρας [1]. Το 2000 υιοθετήθηκε για την ηλιακή σταθερά η τιμή 1366.1 W/m^2 από την ASTM (*American Society for Testing and Materials*) [1, 3]. Παραπλήσια τιμή για την ηλιακή σταθερά έχει δοθεί από το *World Radiation Center (WRC)* και θεωρείται ίση με 1367 W/m^2 με αβεβαιότητα της τάξεως του 1% [2]. Σε κάθε περίπτωση, η αβεβαιότητα στις μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της γήινης ατμόσφαιρας, είναι αρκετά μεγαλύτερη. Συνεπώς, η αναζήτηση μίας ακόμη ακριβέστερης τιμής της ηλιακής σταθεράς, δεν έχει και τόσο νόημα. Πάνω σε αυτό, μπορεί να γίνει μία γενικότερη παρατήρηση: κατά πόσο είναι σωστή η αναζήτηση μίας μηδενικού σχεδόν σφάλματος τιμής για μία συγκεκριμένη παράμετρο ή η αναζήτηση μίας μηδενικού σχεδόν σφάλματος μέτρησης, την ίδια ώρα που το σφάλμα σε κάποια άλλη παράμετρο ή μέτρηση που αφορά στη γενικότερη διαδικασία που αναλύεται είναι πολύ μεγαλύτερο. Παρόλα αυτά, στη συγκεκριμένη εργασία όπου υπάρχει η δυνατότητα θα δίνονται όσο το δυνατό ακριβέστεροι τύποι και τιμές για τις διάφορες παραμέτρους, αρκεί αυτό να μην αυξάνει δυσανάλογα την πολυπλοκότητα του προβλήματος που κάθε φορά μελετάται.

Έγινε αναφορά στη συνολική ενέργεια ανά δευτερόλεπτο ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2) αλλά πολλές φορές είναι χρήσιμη η γνώση της φασματικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή του πως κατανέμεται η συνολική ενέργεια ανά δευτερόλεπτο ανά τετραγωνικό μέτρο σε σχέση με το μήκος κύματος ($\text{W/m}^2 \mu\text{m}$). Η κατανομή του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας (βάσει WRC), απουσία ατμόσφαιρας και στην μέση απόσταση Γης-Ήλιου, απεικονίζεται στο σχήμα 2-7 [2].

Το συνολικό εμβαδόν κάτω από τη συγκεκριμένη καμπύλη (θεωρώντας ότι το μήκος κύματος εκτείνεται ως το άπειρο) είναι η ηλιακή σταθερά βάσει WRC (1367 W/m^2). Η περισσότερη ενέργεια που εκλύεται από τον Ήλιο (φαίνεται εν μέρει από το σχήμα 2-7) βρίσκεται μεταξύ των μηκών κύματος $0.25-3 \mu\text{m}$ ή αυστηρότερα μεταξύ $0.25-8 \mu\text{m}$ [2]. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται στο [1] όπου παρουσιάζεται το αντίστοιχο φάσμα βάσει της υιοθέτησης της τιμής της ASTM.



Σχήμα 2-7

Η ακτινοβολία απουσία ατμόσφαιρας (εξωγήινη ακτινοβολία - *extraterrestrial radiation*) μεταβάλλεται κυρίως για δύο λόγους:

Πρώτον, διότι μεταβάλλεται η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο, μία μεταβολή που είναι εν γένει απεριοδική και δε μπορεί να υπολογιστεί εύκολα. Είναι βέβαια μία μεταβολή γύρω στο $\pm 1.5\%$ το πολύ [2]. Για τις συνήθεις περιπτώσεις Φ/Β συστημάτων, θεωρείται σταθερή η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο.

Δεύτερον, διότι μεταβάλλεται η απόσταση Γης-Ήλιου. Η ηλιακή σταθερά αντιστοιχεί σε απόσταση ίση με τη μέση απόσταση Γης-Ήλιου. Για διαφορετικές αποστάσεις (δηλαδή διαφορετικές χρονικές στιγμές ή για απλούστευση για διαφορετικές μέρες) μεταβάλλεται η ακτινοβολία απουσία ατμόσφαιρας.

Δεδομένης αυτής της δεύτερης θεωρούμενης μεταβολής στην απόσταση, θεωρώντας επιφάνεια η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας, η ροή ανά μονάδα επιφάνειας της εξωγήινης ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$G_{on} = G_{sc} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (2.11)$$

όπου για παράδειγμα μπορεί να γίνει χρήση των σχέσεων (2.1) ή (2.3), για τον υπολογισμό του $\left(\frac{r_0}{r} \right)^2$ με ακριβέστερη τη σχέση που προκύπτει με χρήση της (2.1).

2.3 Μετρήσεις και υπολογισμοί έντασης της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας

2.3.1 Απευθείας και διάχυτη ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία χωρίζεται σε απευθείας (*direct* ή *beam*) και διάχυτη (*diffused*). Ως απευθείας ακτινοβολία ονομάζεται η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια που ενδιαφέρει και προέρχεται απευθείας από τον Ήλιο, χωρίς να υφίσταται σκέδαση (αλλαγή κατεύθυνσης) κατά τη διαδρομή της μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα [14]. Διάχυτη ακτινοβολία ονομάζεται η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια που ενδιαφέρει μετά από αλλαγές που υφίσταται στην κατεύθυνση της λόγω ανάκλασης ή σκέδασης μέσα στην ατμόσφαιρα ή μετά από ανάκλαση στο έδαφος. Πολλές φορές η ανακλώμενη στο έδαφος ακτινοβολία, ονομάζεται απλά “ανακλώμενη από το έδαφος” (*ground-reflected*) ακτινοβολία ή *albedo* ακτινοβολία και θεωρείται ξέχωρα από την ακτινοβολία που υφίσταται ανάκλαση ή σκέδαση εντός της ατμόσφαιρας. Συνεπώς, η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε μια επιφάνεια αποτελείται από τις τρεις αυτές συνιστώσες (απευθείας, διάχυτη και ανακλώμενη), όπου η ανάκλαση στο έδαφος περιλαμβάνει και την περίπτωση ανάκλασης σε ανθρώπινες κατασκευές, σε βουνά, θάλασσα, λίμνες ή ότι βρίσκεται στο εγγύς περιβάλλον της θεωρούμενης επιφάνειας.

2.3.2 Η έννοια της έντασης και της ροής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας

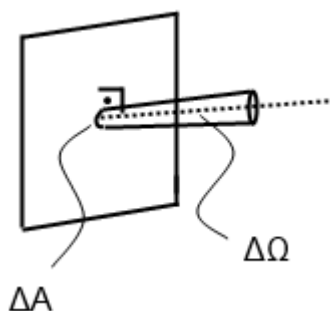
Για την καλύτερη κατανόηση του κειμένου, είναι απαραίτητη μία μικρή παρουσίαση ορισμένων εννοιών που σχετίζονται με την ακτινοβολία.

Με τον όρο *ένταση ακτινοβολίας* (*radiation intensity*) ορίζεται η ενέργεια που διέρχεται από ένα υποθετικό επίπεδο ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα στερεάς γωνίας, της οποίας η κεντρική κατεύθυνση είναι κάθετη στο υποθετικό επίπεδο

(σχήμα 2-8) [2]. Αν συμβολιστεί με ΔQ η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου, τότε θεωρώντας στοιχειώδη επιφάνεια ΔA και στοιχειώδη στερεά γωνία $\Delta \Omega$ (σχήμα 2-8) το μέτρο της έντασης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας ορίζεται ως:

$$I = \lim_{\substack{\Delta A \rightarrow 0 \\ \Delta \Omega \rightarrow 0}} \frac{\Delta Q}{\Delta A \cdot \Delta \Omega}$$

και θεωρείται διάνυσμα με διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια [2].



Σχήμα 2-8

Η ροή ακτινοβολίας (ροή ηλεκτρομαγνητικής ισχύος) ανά μονάδα επιφάνειας q [W / m^2] προκύπτει με κατάλληλη ολοκλήρωση σε ημισφαίριο (βλ. [2]). Έτσι προκύπτει η ενέργεια που διέρχεται από ένα υποθετικό επίπεδο ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου:

$$q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I \cos x_1 \sin x_1 dx_1 dx_2$$

Ο όρος “irradiance” αναφέρεται στην ροή ηλεκτρομαγνητικής ισχύος ή ροή ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (στο μέτρο της, αν θεωρηθεί διάνυσμα) και εκφράζεται σε W / m^2 , ενώ ο όρος “irradiation” αναφέρεται στην αντίστοιχη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και εκφράζεται σε J / m^2 . Ο όρος “irradiation” για την περίπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας ονομάζεται και “insolation” [1]. Στη συγκεκριμένη εργασία με τον όρο *ένταση ακτινοβολίας* (συγκεκριμένα: *ένταση ηλιακής ακτινοβολίας*) ή απλά *ακτινοβολία* θα ονομάζεται είτε η ροή ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (“irradiance”) είτε ο όρος “insolation” κατά περίπτωση. Πάντως στην εργασία αυτή ενδιαφέρουν κυρίως οι στιγμιαίες τιμές-μετρήσεις της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (“irradiance”), συνεπώς δεν θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά σε μέσες ωριαίες, μηνιαίες, ετήσιες κλπ. τιμές.

2.3.3 Πρόβλεψη και μέτρηση έντασης ηλιακής ακτινοβολίας

Οι προβλέψεις, οι υπολογισμοί και οι μετρήσεις για την ένταση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να βασιστούν σε διάφορες μεθόδους, με διαφορετική κάθε φορά ακρίβεια. Στην πραγματικότητα για να γίνει η αξιολόγηση μιας χρηματοοικονομικής επένδυσης που η απόδοσή της εξαρτάται μεταξύ άλλων από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. ηλιοθερμικά, φωτοβολταϊκά πάρκα κ.α.) πρέπει η ένταση αυτή να

μπορεί να **προβλεφθεί** όσο το δυνατό ακριβέστερα, ταχύτερα και φυσικά με μειωμένο κόστος. Σε μεγάλες επενδύσεις με βαθύ ορίζοντα σχεδιασμού, είναι δυνατή και οικονομικά συμφέρουσα η εγκατάσταση μετρητικού εξοπλισμού υψηλής ακρίβειας (π.χ. πυρανομέτρων) προκειμένου να γίνει καταγραφή μετρήσεων για το μεγαλύτερο δυνατό χρονικό διάστημα, πριν την οριστική σχεδίαση της εγκατάστασης. Ακόμα και έτσι όμως, τα μετεωρολογικά φαινόμενα είναι δύσκολα προβλέψιμα και το ότι για παράδειγμα παρατηρήθηκε στη συγκεκριμένη περιοχή υψηλή ένταση ηλιακής ακτινοβολίας για ένα έτος, δε σημαίνει ότι και το επόμενο έτος η ένταση θα κυμανθεί στα ίδια επίπεδα. Επομένως, από την άποψη του όσο το δυνατό ακριβέστερου προσδιορισμού της μελλοντικά παραγόμενης ενέργειας από ένα Φ/Β σύστημα χρειάζονται μετρήσεις ακριβείας και μεγάλης χρονικής διάρκειας για τη συγκεκριμένη περιοχή. Ελάχιστο σφάλμα, πολλές αντιπροσωπευτικές μετρήσεις μεγάλης διάρκειας και για τη δεδομένη κάθε φορά **τοπογραφία** και τις γενικότερες κλιματολογικές συνθήκες (υγρασία, νέφωση κ.α.) της περιοχής. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων κάτι τέτοιο είναι αδύνατο, οπότε το σύνηθες είναι οι μηχανικοί-σχεδιαστές να χρησιμοποιούν τιμές του παρελθόντος που θα μπορούν να εκφράζουν όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτικά τις μελλοντικές τιμές. Εξάλλου, σε γενικές γραμμές, είναι πρακτικά αδύνατο να γίνονται υπολογισμοί της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που καταφθάνει στη Γη με βάση την εξασθένιση που υφίσταται η εξωγήινη ακτινοβολία από τα ατμοσφαιρικά στρώματα, καθότι σπάνια είναι διαθέσιμη η κατάλληλη μετεωρολογική πληροφορία [2]. Για αυτό και αναζητούνται πηγές (“ιστορικών”) δεδομένων έντασης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης.

Εκτός από την ανάγκη πρόβλεψης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας **πριν** τη σχεδίαση και κατασκευή ενός Φ/Β συστήματος, είναι απαραίτητες και μετρήσεις της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας **μετά** την κατασκευή και τη θέση σε λειτουργία του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η παρακολούθηση και αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Οι επίγειες μετρήσεις της έντασης της ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται τόσο ως πηγές ιστορικών δεδομένων για τη σχεδίαση Φ/Β συστημάτων όσο και για την παρακολούθηση και αξιολόγηση της λειτουργίας τους. Αντίθετα οι υπολογισμοί-μετρήσεις που βασίζονται σε δορυφορικά δεδομένα [15] χρησιμοποιούνται περισσότερο κατά τη σχεδίαση Φ/Β συστημάτων.

2.3.4 Επίγειες μετρήσεις

Για τις επίγειες μετρήσεις συνήθως χρησιμοποιείται το πυρανόμετρο (εικόνα 2-1), παρόλο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διάφορα άλλα όργανα, όπως οι Φ/Β αισθητήρες, που κάποιες φορές ονομάζονται και Φ/Β κελιά αναφοράς. Οι επίγειες μετρήσεις μπορούν να διεξάγονται σε μικρά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. ανά ένα λεπτό), παρέχοντας έτσι υψηλή **χρονική** ανάλυση.

Τα πυρανόμετρα μπορούν να μετρήσουν τη «συνολική» (άμεση και διάχυτη) ακτινοβολία ή με κατάλληλη μετατροπή, μόνο τη διάχυτη ακτινοβολία. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι λόγω του τρόπου λειτουργίας τους, ανταποκρίνονται αργά σε περιπτώσεις γρήγορων εναλλαγών της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, λόγω αστάθειας καιρού για παράδειγμα.

Παρόλα αυτά, για μεγάλες χρονικές περιόδους, με προσεκτική συντήρηση, συχνό καλιμπράρισμα και τοποθετημένα σε κατάλληλη αντιπροσωπευτική θέση, μπορούν να παρέχουν αρκετά καλή ακρίβεια (λιγότερο από 1% αβεβαιότητα σε ετήσιο μέσο όρο [16]).



Εικόνα 2-1

Οι Φ/Β αισθητήρες αποτελούνται από ένα Φ/Β κελί που παράγει ρεύμα ανάλογο της έντασης της ακτινοβολίας [16]. Συνήθως ονομάζονται Φ/Β κελιά αναφοράς, όταν χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους τα ίδια υλικά (κελί, γυαλί, στρώμα ενθυλάκωσης, οπίσθιο μέρος κλπ.) με αυτά των Φ/Β πάνελ του τωρινού ή μελλοντικού Φ/Β συστήματος και βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (plane of array) με αυτά. Με αυτόν τον τρόπο, παρουσιάζουν αντίστοιχη απόκριση σε σχέση με το ηλιακό φάσμα και τη γωνία πρόσπτωσης με τα Φ/Β πάνελ του συστήματος [17]. Έτσι επί της ουσίας μετράνε όπως θα φανεί παρακάτω την ένταση της ενεργώς απορροφούμενης (effective absorbed) ακτινοβολίας που είναι και το μέρος εκείνο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από το Φ/Β κελί. Υπό προϋποθέσεις, για τη μέτρηση αυτής της ακτινοβολίας τα Φ/Β κελιά αναφοράς είναι προτιμότερα από τα πυρανόμετρα και μπορούν να προσφέρουν λιγότερη αβεβαιότητα στο τελικό αποτέλεσμα [17]. Τα Φ/Β κελιά αναφοράς χρησιμοποιούνται συνήθως για την σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση της λειτουργίας εγκατεστημένων Φ/Β συστημάτων, χωρίς να εξασφαλίζεται πάντα ταυτόσημη (αλλά τουλάχιστον εξασφαλίζεται συναφής) κατασκευαστική δομή με αυτή των Φ/Β πάνελ, πάντα όμως με την ίδια τεχνολογία Φ/Β κελιού. Συνοψίζοντας, είναι δυνατό να μετρηθεί με ακρίβεια η διαθέσιμη για το Φ/Β κελί ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (useable incident ή effective absorbed irradiance) με χρήση κατάλληλου ‘matched’ and ‘clean’ [18] Φ/Β κελιού αναφοράς τοποθετημένου στο ίδιο επίπεδο και σε αντιπροσωπευτική θέση με τα Φ/Β πάνελ που ενδιαφέρουν.

Πιθανά προβλήματα που μπορούν να παρουσιαστούν στις επίγειες μετρήσεις, εκτός από τα σφάλματα στο ίδιο το μετρητικό σύστημα, έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι ο εκάστοτε αισθητήρας μπορεί να καλυφθεί από ακαθαρσίες, χιόνι κ.α. ή να σκιάζεται από γειτονικά εμπόδια [15]. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν με προσεκτική επιλογή του χώρου εγκατάστασης και προσεκτική συντήρηση του μετρητικού εξοπλισμού [15]. Η πραγματική δυσκολία στις επίγειες μετρήσεις, όταν αυτές χρησιμοποιούνται ως πηγές ιστορικών δεδομένων, έγκειται στο γεγονός ότι συνήθως δεν είναι δυνατό να εγκαθίστανται ή να είναι ήδη εγκατεστημένοι μετρητικοί εξοπλισμοί στην περιοχή που ενδιαφέρει, πριν την κατασκευή και θέση σε λειτουργία του συστήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι

δυνατό να εκτιμηθεί η ακτινοβολία από διαθέσιμες μετρήσεις σε σταθμούς που βρίσκονται όσο το δυνατό πιο κοντά στην περιοχή αυτή και σε παραπλήσιο κλίμα. Επιπρόσθετα, υπάρχει η δυνατότητα να συνδυαστούν τα δεδομένα από τους σταθμούς αυτούς. Πολλές φορές είναι διαθέσιμες μετρήσεις απευθείας και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και ανά ώρα [2]. Υπάρχουν επίσης διαθέσιμες μετρήσεις και για κεκλιμένες επιφάνειες ή για μικρότερο χρονικό διάστημα [2]. Συχνά είναι διαθέσιμα και δεδομένα σε ημερήσια ή ακόμα (το πιο σύνθητες [8]) σε μηνιαία βάση και για οριζόντια επιφάνεια. Από την άλλη, σπάνια είναι διαθέσιμα στιγμιαία δεδομένα [W / m^2] που να αφορούν μεγάλη χρονική περίοδο [2].

2.3.5 Εκτιμήσεις από δορυφόρους

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους, χρησιμοποιώντας δεδομένα από δορυφόρους. Τυπικά, οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ακτινοβολίας που προέρχεται από τη Γη. Η ακτινοβολία αυτή, αποτελείται κυρίως από δύο συνιστώσες: αυτήν που ανακλάται στο έδαφος και αυτήν που ανακλάται στα σύννεφα. Συνεπώς, για τον υπολογισμό κατ' αυτόν τον τρόπο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους, πρέπει μεταξύ άλλων να λαμβάνεται υπόψη η ακτινοβολία που απορροφάται από την ατμόσφαιρα και εκείνη που ανακλάται στα σύννεφα [15].

Για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφόρων τύπων δορυφόροι. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι γεωστατικοί (*geostationary*) δορυφόροι καιρού (μετεωρολογικοί δορυφόροι) που «φωτογραφίζουν» τη Γη ανά μικρά χρονικά διαστήματα (π.χ. 15 ή ανά 30 λεπτά) και κατά συνέπεια έχουν πολύ καλή χρονική ανάλυση [15]. Παρόλα αυτά, κάθε *pixel* στη φωτογραφία αναπαριστά ένα τετράγωνο πλευράς μερικών χιλιομέτρων, έτσι η εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε *pixel* είναι ουσιαστικά ο μέσος όρος για το τετράγωνο αυτό [15]. Αντιθέτως, οι δορυφόροι πολικής τροχιάς (*Polar-orbiting*) βρίσκονται πιο κοντά στη Γη, με αποτέλεσμα να έχουν καλύτερη **χωρική** ανάλυση. Το κύριο μειονέκτημα των δορυφόρων πολικής τροχιάς, είναι ότι δεν παραμένουν μόνιμα πάνω από μία συγκεκριμένη περιοχή. Έτσι μπορούν να λαμβάνουν μερικές φωτογραφίες ανά ημέρα για μία δεδομένη περιοχή [15], συνεπώς δεν έχουν τόσο καλή χρονική ανάλυση.

Το κύριο πλεονέκτημα των μεθόδων μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας που βασίζονται σε δορυφόρους, είναι ότι προσφέρουν αρκετά ομοιόμορφη κάλυψη μεγάλων περιοχών εδάφους, σε αντίθεση με τους επίγειους σταθμούς. Από την άλλη, υπάρχουν πιθανά προβλήματα που μπορούν να προκύψουν στις μετρήσεις με δορυφόρους, όπως [15]:

- Το χιόνι σε μία εικόνα που λαμβάνεται από δορυφόρο, μοιάζει αρκετά με τα σύννεφα. Παρόλο που υπάρχουν μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατά μέρους αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, η αβεβαιότητα που προκύπτει θεωρείται μεγάλη ιδίως σε περιοχές όπου επικρατούν συχνές χιονοπτώσεις.
- Σε ορεινές περιοχές, είναι πιθανόν ένα *pixel* να καλύπτει μία περιοχή με μεγάλες υψομετρικές διαφορές, με αποτέλεσμα πολλές φορές να μην αναπαρίσταται ικανοποιητικά η εξάρτηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας από το υψόμετρο.
- Επιπρόσθετα, η εκτίμηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας από δορυφορικά δεδομένα δυσκολεύει όταν η ζενίθια γωνία λαμβάνει μεγάλες τιμές. Το γεγονός αυτό, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην εκτίμηση της ακτινοβολίας κατά

τους χειμερινούς μήνες, ιδιαίτερα σε περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλο γεωγραφικό πλάτος.

Για τους παραπάνω λόγους, καλό είναι η ποιότητα των εκτιμήσεων της έντασης της ακτινοβολίας μέσω δορυφόρων, να αξιολογείται με βάση αντιπροσωπευτικές και υψηλής ποιότητας μετρήσεις από σταθμούς στο έδαφος. Μία πολύ χρήσιμη πηγή ιστορικών δεδομένων από επίγειες μετρήσεις και από εκτιμήσεις από δορυφόρους για την περιοχή της Ευρώπης, παρέχεται μέσω του *PVGIS* (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>)

2.3.6 Ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη

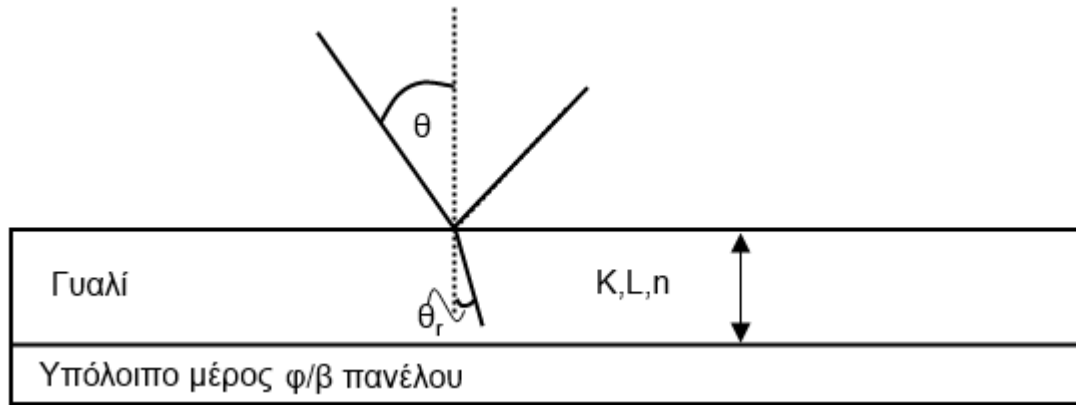
Πολλές φορές οι μετρήσεις έντασης ηλιακής ακτινοβολίας αφορούν στο οριζόντιο επίπεδο. Η ένταση της προσπίπτουσα ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με σταθερό ή τυχαίο προσανατολισμό (Φ/Β πάνελ) υπολογίζεται κυρίως με χρήση θεωρητικών και εμπειρικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί [14]. Τα μοντέλα αυτά «μεταφράζουν» τις τιμές της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, σε “plane of array” (POA) ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολία πάνω στο επίπεδο του Φ/Β πάνελ-συλλέκτη [19]. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι το μοντέλο ιστροπικού ουρανού (*isotropic sky model*), του *Klucher*, των *Hay-Davies*, του *Reindl* (ή μοντέλο *HDKR*), των *Perez et al* [1, 2, 19] κ.α. Κάποια μοντέλα είναι συνήθως καταλληλότερα σε διαφορετικές τοποθεσίες, με διαφορετικά κλίματα. Για παράδειγμα, το μοντέλο των *Perez et al*. δίνει πολύ καλά αποτελέσματα στην περιοχή της Αλμπουρκέρκης (*Albuquerque*) στο Νέο Μεξικό [19, 20], ενώ το μοντέλο *HDKR* φαίνεται να δίνει πολύ καλά αποτελέσματα στην περιοχή της Μεσογείου [1]. Οι διαφορές τους εστιάζονται κυρίως στον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζουν την ανακλώμενη και τη διάχυτη ακτινοβολία. Δε θα γίνει περαιτέρω αναφορά στα μοντέλα αυτά, με εξαίρεση αυτό του ιστροπικού ουρανού για το οποίο γίνεται αναφορά παρακάτω.

2.4 Ενεργώς απορροφούμενη ακτινοβολία

Η POA ακτινοβολία δεν είναι αυτή στην οποία «αποκρίνεται» άμεσα το Φ/Β κελί. Η ακτινοβολία αυτή, αποκαλείται πολλές φορές ενεργώς απορροφούμενη [21] με την έννοια της απορρόφησης να περιορίζεται στο στρώμα του Φ/Β κελιού.

2.4.1 Οπτικές απώλειες

Αν θεωρηθεί απλοποιημένα ότι το Φ/Β πάνελ αποτελείται από στρώματα που το κάθε ένα είναι κατασκευασμένο από διαφορετικό υλικό, τότε για κάθε στρώμα του Φ/Β πάνελ ισχύει ότι η ακτινοβολία διαδίδεται μέσα από αυτό και απορροφάται ένα μέρος της από αυτό, ενώ στις επιφάνειες διαχωρισμού των στρωμάτων ένα μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακλάται. Όταν προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία στο Φ/Β πλαίσιο, ένα μέρος της ανακλάται από το γυαλί που καλύπτει το εμπρόσθιο μέρος του Φ/Β πάνελ (σχήμα 2-9). Το υπόλοιπο διαδίδεται εντός του στρώματος του γυαλιού, προκειμένου εν τέλει να φτάσει στο στρώμα του Φ/Β κελιού και το υπόλοιπο απορροφάται από το γυαλί.



Σχήμα 2-9

Η διάδοση εντός του εξωτερικού στρώματος (γυαλί) του Φ/Β πάνελ και η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κυρίως λόγω του στρώματος του Φ/Β κελιού, εκφράζονται ικανοποιητικά από τον τύπο [2]:

$$(\tau\alpha)(\theta) = e^{-(KL/\cos\theta_r)} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_r - \theta)}{\sin^2(\theta_r + \theta)} + \frac{\tan^2(\theta_r - \theta)}{\tan^2(\theta_r + \theta)} \right) \right] \quad (2.12)$$

όπου με K συμβολίζεται ο συντελεστής απόσβεσης του γυαλιού, με θ_r η γωνία διάθλασης και με L το πάχος του στρώματος του γυαλιού (σχήμα 2-9). Με $(\tau\alpha)$ συμβολίζεται το γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας (*transmittance-absorptance product*) το οποίο πρέπει να θεωρείται ως αυτούσια ιδιότητα ενός συνδυασμού καλύμματος-απορροφητή και δεν ισούται ακριβώς με το γινόμενο του συντελεστή απορρόφησης του απορροφητή (π.χ. στρώμα Φ/Β κελιού) επί το συντελεστή διάδοσης του καλύμματος (στρώμα γυαλιού) [2].

Η σχέση μεταξύ της γωνίας διάθλασης και πρόσπτωσης καθορίζεται από το νόμο του Snell [22]:

$$\theta_r = \text{Arc sin}(n \sin \theta) \quad (2.13)$$

όπου με n συμβολίζεται ο γνωστός δείκτης διάθλασης. Τόσο το K όσο και το n εξαρτώνται από το μήκος κύματος, αλλά για την περίπτωση του γυαλιού η υπόθεση ότι είναι ανεξάρτητοι από το μήκος κύματος είναι αρκετά ρεαλιστική [2]. Για την περίπτωση του “water white” γυαλιού μία τιμή $K = 4m^{-1}$ θεωρείται αντιπροσωπευτική [2] ενώ για την περίπτωση θεώρησης μη απορροφητικού γυαλιού (*nonabsorbing glass*) μία τιμή $n = 1.526$ σε όλο το ηλιακό φάσμα θεωρείται αντιπροσωπευτική.

Η επίδραση της ανάκλασης και της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας εκφράζεται από τον συντελεστή τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης (*incidence angle modifier* [2, 22]):

$$K_{\tau\alpha}(\theta) = \frac{\tau\alpha(\theta)}{\tau\alpha(0)} \quad (2.14)$$

όπου για κάθε συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας (απευθείας, διάχυτη και ανακλώμενη από το έδαφος) είναι απαραίτητος ο υπολογισμός διαφορετικού συντελεστή τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης, καθότι και τα αντίστοιχα γινόμενα διαπερατότητας-απορροφητικότητας είναι διαφορετικά για κάθε συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε περίπτωση που θεωρηθεί ότι τόσο η ανακλώμενη όσο και η διάχυτη ακτινοβολία συμπεριφέρονται *ισοτροπικά* οι αντίστοιχες μέσες γωνίες πρόσπτωσης (*ενεργές γωνίες πρόσπτωσης*), μπορούν να υπολογιστούν από το σχήμα 2-10 [22] που παρουσιάζεται στο [2].

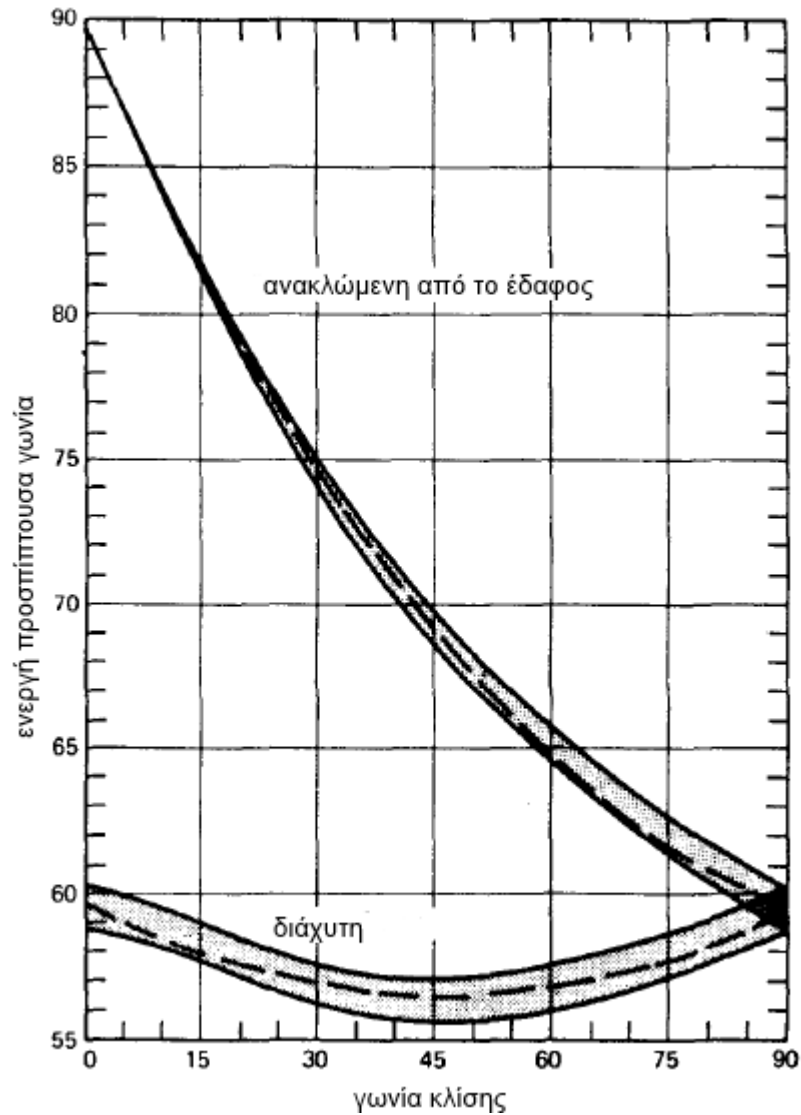
Οι τιμές στο διάγραμμα αυτό έχουν εξαχθεί για την περίπτωση ηλιακών συλλεκτών (*solar collectors*), αλλά παρόλα αυτά διαπιστώθηκε ότι παρέχουν λογικά αποτελέσματα και στην περίπτωση των Φ/Β συστημάτων [2, 22]. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν σε [2]:

$$\theta_{e,g} = 90 - 0.5788d_c + 0.002693d_c^2 \quad (2.15)$$

όσον αφορά στην ενεργή γωνία πρόσπτωσης για την περίπτωση της ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας και σε

$$\theta_{e,d} = 59.7 - 0.1388d_c + 0.001497d_c^2 \quad (2.16)$$

για την περίπτωση της διάχυτης ακτινοβολίας.



Σχήμα 2-10

Στο [21] όπου παρουσιάζεται το μοντέλο της *Sandia* (βλ. επόμενο κεφάλαιο) παρουσιάζεται και ένας εμπειρικός τρόπος υπολογισμού του συντελεστή τροποποίησης γωνίας πρόσπτωσης με τη μορφή πολυωνύμου [22]

$$K_{τα}(\theta) = \sum_{i=0}^4 \pi_i \theta^i \quad (2.17)$$

όπου όμως για τον υπολογισμό των κατάλληλων εμπειρικών παραμέτρων π_i απαιτείται η διεξαγωγή κατάλληλων μετρήσεων. Ο χαρακτηρισμός ενός Φ/Β πάνελ βάσει του μοντέλου της *Sandia* απαιτεί μεταξύ άλλων και τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων για τον προσδιορισμό των οποίων είναι απαραίτητη η διεξαγωγή κατάλληλων μετρήσεων. Ωστόσο, κάποιες αντιπροσωπευτικές τιμές των σταθερών αυτών παρέχονται από το εργαστήριο της *Sandia* για διάφορους τύπους κελιών με χαρακτηριστικό κάλυμμα. Αντίστοιχα παρέχονται παρόμοιοι (χαρακτηριστικοί για κάθε τύπο κελιού και αντίστοιχου καλύμματος) συντελεστές από το NIST [22]. Οι συντελεστές του NIST για τις περιπτώσεις των

πολυκρυσταλλικών και μονοκρυσταλλικών κελιών απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα [22].

Πίνακας 2-1		
Είδος κελιού	Μονοκρυσταλλικό	Πολυκρυσταλλικό
π_0	1.000341	0.998515
π_1	-0.005557	-0.012122
π_2	6.553×10^{-4}	1.440×10^{-3}
π_3	-2.730×10^{-5}	-5.576×10^{-5}
π_4	4.641×10^{-7}	8.779×10^{-7}
π_5	-2.806×10^{-9}	-4.919×10^{-9}

Στο [21], έχει γίνει σύγκριση των δύο τύπων που δίνουν το $K_{\alpha}(\theta)$, θεωρώντας $n = 1.526$, $K = 4 \text{ m}^{-1}$ και $L = 2 \text{ mm}$ και έχουν ληφθεί παρόμοια αποτελέσματα και στις τρεις περιπτώσεις (δύο συνδυασμοί π_i από τον παραπάνω πίνακα με χρήση της (2.17) από τη μία και χρήση των (2.12) και (2.14) από την άλλη).

2.4.2 Απώλειες λόγω μεταβολής ηλιακού φάσματος

Η φασματική κατανομή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο Φ/Β πάνελ λόγω της επίδρασης της ατμόσφαιρας διαφοροποιείται από την αντίστοιχη εξωγήινη. Στο [21] δίνεται μία εμπειρική σχέση με πολυωνυμική μορφή:

$$M = \sum_{i=0}^4 \pi'_i (AM_a)^i \quad (2.18)$$

που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκφραστεί αυτή η διαφοροποίηση στη φασματική κατανομή που προκαλείται από τις αλλαγές στην απόλυτη μάζα αέρα. Η παράμετρος M ονομάζεται τροποποιητής μάζας αέρα (*air mass modifier*).

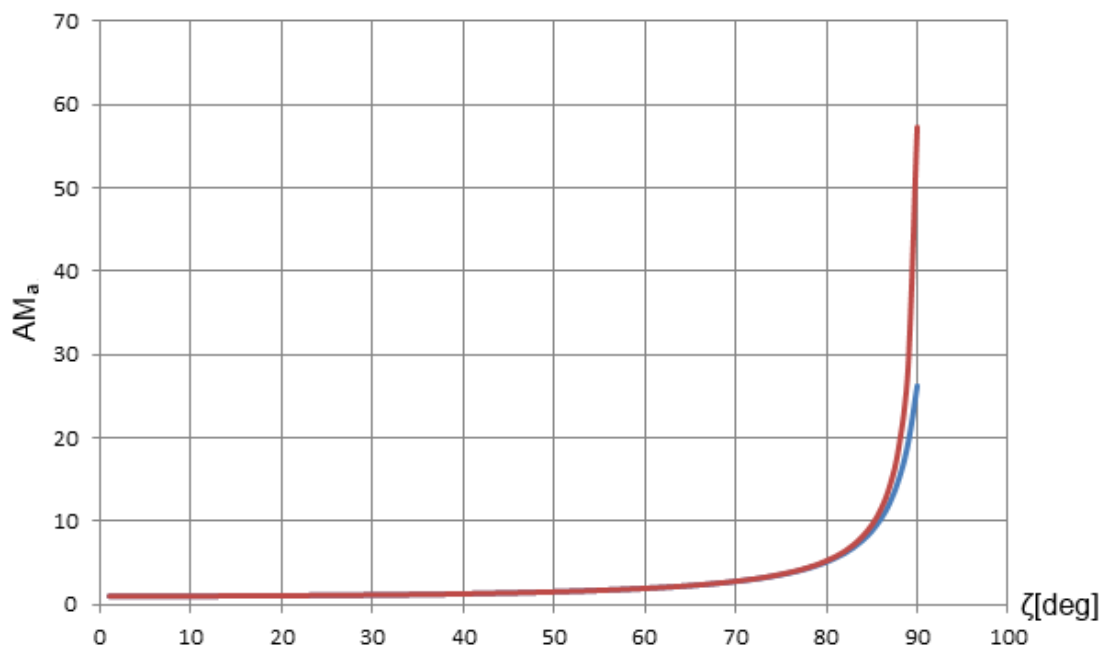
Η απόλυτη μάζα αέρα είναι μία αδιάστατη ποσότητα και παρέχει ένα σχετικό μέτρο (*relative measure*) του μήκους της διαδρομής εντός της ατμόσφαιρας που πρέπει να διανύσει η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία μέχρι να φτάσει στο σημείο που ενδιαφέρει. Εξαρτάται από τη ζενίθια γωνία και το υψόμετρο. Στο επίπεδο της θάλασσας και όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ, είναι $AM_a = 1$. Υπάρχουν διάφοροι τύποι-μοντέλα για τον υπολογισμό της απόλυτης μάζας αέρα, άλλοι περισσότερο και άλλοι λιγότερο ακριβείς. Μία ενδιαφέρουσα σύγκριση κάποιων από αυτά τα μοντέλα παρουσιάζεται εποπτικά στο [23]. Για ζενίθιες γωνίες μικρότερες των 80 μοιρών [23] ($\zeta < 80^\circ$) ο απλός και πιο διαδεδομένος τύπος

$$AM_a = \frac{1}{\cos \zeta} \quad (2.19)$$

παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια. Στο [22] γίνεται σύγκριση της τιμής του M για τέσσερις τύπους Φ/Β κελιών σε σχέση με τη ζενίθια γωνία, με βάση τον τύπο

$$AM_a = \frac{1}{\cos \zeta + 0.5057(96.080 - \zeta)^{-1.634}} \quad (2.20).$$

Ο τύπος αυτός δίνει παραπλήσια αποτελέσματα με τον απλούστερο τύπο (2.19) για ζενίθιες γωνίες μικρότερες των 80 μοιρών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-11 (καμπύλη κόκκινου χρώματος - σχέση (2.19), καμπύλη μπλε χρώματος - σχέση (2.20)).



Σχήμα 2-11

Σε κάθε περίπτωση η σύγκριση της τιμής του M για τέσσερις τύπους Φ/Β κελιών σε σχέση με τη ζενίθια γωνία, δηλαδή η γραφική απεικόνιση του $M(\zeta)$ με το AM_a να υπολογίζεται με βάση την (2.20), έδειξε ότι ειδικά στις περιπτώσεις του μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού κελιού η τιμή του M είναι σχεδόν ίδια για $\zeta < 75^\circ$, επομένως για αυτές τις τιμές της ζενίθιας γωνίας η θεώρηση του τύπου του κελιού ως μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού, δεν έχει και τόση σημασία.

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι η διαφοροποίηση στη φασματική κατανομή δεν προκαλείται μόνο από τις αλλαγές στην απόλυτη μάζα αέρα. Τα σύννεφα, ο καπνός ή σκόνη στην ατμόσφαιρα είναι μερικοί από τους πρόσθετους παράγοντες που επηρεάζουν τη φασματική κατανομή. Η συνολική επίδραση όμως αυτών των παραγόντων θεωρείται αμελητέα σε ετήσια, μηνιαία ή και εβδομαδιαία βάση [21], όσον αφορά στην πρόβλεψη της απόδοσης ή την θεωρητικά αναμενόμενη απόδοση ενός Φ/Β συστήματος. Από την άλλη, σε περιπτώσεις παρακολούθησης (*monitoring*) της απόδοσης ενός Φ/Β συστήματος ή του επί τόπου έλεγχου του συστήματος (*field testing*) τα όποια συμπεράσματα εξάγονται ή πρέπει να εξάγονται υπό ή κοντά σε συνθήκες καθαρού

ουρανού (*clear sky conditions*), όπου ο μόνος ουσιαστικός παράγοντας που επιδρά στη διαφοροποίηση της φασματικής κατανομής είναι η απόλυτη μάζα αέρα.

Οι παράμετροι π'_i του παραπάνω πολυωνύμου, εξαρτώνται από τα Φ/Β υλικά και συνεπώς και από τον τύπο του Φ/Β κελιού που χρησιμοποιείται. Οι σταθερές αυτές παρέχονται από το εργαστήριο της Sandia για διάφορους τύπους κελιών. Αντίστοιχα παρέχονται παρόμοιοι συντελεστές από το NIST [22] για διάφορους τύπους κελιών. Οι συντελεστές του NIST για τις περιπτώσεις των πολυκρυσταλλικών και μονοκρυσταλλικών κελιών απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα [2, 22]:

Πίνακας 2-2		
Είδος κελιού	Μονοκρυσταλλικό	Πολυκρυσταλλικό
π'_0	0.935823	0.918093
π'_1	0.054289	0.086257
π'_2	-0.008677	-0.024459
π'_3	0.000527	0.002816
π'_4	-0.000011	-0.000126

2.4.3 Εκτίμηση έντασης της ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας

Μία εκτίμηση της έντασης της ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας S [W / m^2] μπορεί να γίνει με βάση τον παρακάτω τύπο [2]:

$$S = M \left(G_b R_b (\tau\alpha)_b + G_d (\tau\alpha)_d \frac{1 + \cos d_c}{2} + G_{total} \rho_g (\tau\alpha)_g \frac{1 - \cos d_c}{2} \right) \quad (2.21)$$

όπου έχει θεωρηθεί το μοντέλο του ισοτροπικού ουρανού. Στον παραπάνω τύπο με G_b, G_d συμβολίζονται η ένταση της απευθείας και της διάχυτης ακτινοβολίας ενώ με G_{total} συμβολίζεται η ένταση «ολικής» ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Για την παράμετρο R_b , ισχύει

$$R_b = \frac{\cos \theta_b}{\cos \zeta} \quad (2.22)$$

ενώ με $(\tau\alpha)_b, (\tau\alpha)_d, (\tau\alpha)_g$ συμβολίζονται τα γινόμενα διαπερατότητας-απορροφητικότητας τα οποία υπολογίζονται όπως έχει αναφερθεί για κάθε συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας (απευθείας, διάχυτη και ανακλώμενη από το έδαφος). Με ρ_g συμβολίζεται ο συντελεστής ανάκλασης που εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους.

Πολλές φορές κάνοντας χρήση κατάλληλου κελιού αναφοράς, είναι διαθέσιμη πλέον η ένταση της ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας στις περισσότερες εφαρμογές

παρακολούθησης ή ελέγχου Φ/Β συστημάτων, όπως αναφέρθηκε και στο 2.3.4. Διαφορετικά, αν δίνεται π.χ. η ένταση της ΡΟΑ ακτινοβολίας, πρέπει να είναι γνωστοί άλλοι παράμετροι προκειμένου από αυτήν να προκύψει η απορροφούμενη ακτινοβολία. Για παράδειγμα, αν είναι γνωστή η ένταση της ΡΟΑ ακτινοβολίας (G_T), που για την περίπτωση του μοντέλου ισοτροπικού ουρανού δίνεται από τη σχέση:

$$G_T = G_b R_b + G_d \frac{1 + \cos d_c}{2} + G_{total} \rho_g \frac{1 - \cos d_c}{2} \quad (2.23)$$

είναι δυνατόν με επέκταση του μοντέλου των *Erbs et al.* να εκτιμηθεί το κλάσμα G_d / G_{total} [22] μέσω μιας χαρακτηριστικής τιμής του δείκτη καθαρότητας (*clearness index*) [2]. Στη συνέχεια, δεδομένης της σχέσης [22] $G_b = G_{total} - G_d$, μίας εύλογης κατά περίπτωση τιμής για το συντελεστή ανάκλασης ρ_g και με γνωστό τον R_b μπορούν να εκτιμηθούν τα G_b, G_{total}, G_d και με αυτόν τον τρόπο να εκτιμηθεί εν τέλει η ένταση της ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας μέσω της (2.21).

Στη συγκεκριμένη εργασία, η ενεργώς απορροφούμενη ακτινοβολία θεωρείται γνωστή και μετράται με χρήση κατάλληλου θεωρούμενου κελιού αναφοράς, όπως θα φανεί παρακάτω. Κρίθηκε απαραίτητο όμως να παρουσιαστεί και ένας τρόπος εκτίμησής της σε περίπτωση που δεν καθίσταται δυνατό να μετρηθεί άμεσα, αλλά και για την πληρότητα της εργασίας.

2.5 Αναφορές

- [1] S. A. Kalogirou, "Solar Energy Engineering: Processes and Systems", Elsevier, 2009.
- [2] John A. Duffie & William A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes", JOHN WILEY & SONS, 3rd edition, 2006.
- [3] Robert Foster, Majid Ghassemi, Alma Cota, "Solar Energy, Renewable Energy and the environment", CRC Press, 2010.
- [4] E. V. & S. E. M. Pitjeva, "Proposals for the masses of the three largest asteroids, the Moon-Earth mass ratio and the Astronomical Unit", Springer, 2009.
- [5] E.V. PITJEVA, E.M. STANDISH, "VALUES OF SOME ASTRONOMICAL CONSTANTS PROPOSED FOR NSFA".
- [6] Ibrahim Reda and Afshin Andreas, "Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications", NREL, 2008.
- [7] J. Meeus, "Astronomical Algorithms", Richmond, Virginia, USA: Willmann-Bell, Inc., 2nd edition 1998.
- [8] Steven Hegedus & Antonio Luque, "Handbook of photovoltaic science and engineering",

- [9] P. A. Κορακίτης, "Σημειώσεις Γεωδαιτικής Αστρονομίας", Δ' έκδοση, Μάρτιος 2006.
- [10] M. Blanco-Muriel et al, "Computing the Solar Vector", *Solar Energy*, Vol. 70, No. 5, pp. 431-441, 2001.
- [11] «<http://pvpmc.org/modeling-steps/irradiance-and-weather-2/sun-position/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://pvpmc.org/modeling-steps/irradiance-and-weather-2/sun-position/>.
- [12] «<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/glossary.html>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/glossary.html>.
- [13] J. A. Duffie και W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes", JOHN WILEY & SONS, 2nd edition, 1980.
- [14] Α. Γαγλία και Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας, "Προσδιορισμός προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες και περιστρεφόμενες επιφάνειες", ΕΑΑ, ΙΕΠΒΑ.
- [15] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/databasehelp_en.html [Ηλεκτρονικό].
- [16] The German Energy Society, "Planning and installing Photovoltaic Systems: A guide for Installers, Architects and Engineers", Earthscan, 2009.
- [17] Jenya Meydbray, Evan Riley, Lawrence Dunn και Keith Emery and Sarah Kurtz, "Pyranometers and Reference Cells: Part 2: What Makes the Most Sense for PV Power Plants?", NREL (preprint), 2012.
- [18] "IMPROVED TEST METHOD TO VERIFY THE POWER RATING OF A PHOTOVOLTAIC (PV) PROJECT", in *Conference (PVSC '09)*, Philadelphia, Pennsylvania, 7-12 June 2009.
- [19] Tarn Yates και Bradley Hibberd, "Production Modeling for Grid-Tied PV Systems", *Solarpro*, April/May 2010.
- [20] C. P. Cameron, W. E. Boyson και D. M. Riley, "Comparison of PV System Performance-Model Predictions with Measured PV System Performance", Sandia National Laboratories.
- [21] D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil, "Photovoltaic Array Performance Model", *Sandia National Laboratories*, 2004.
- [22] W. De Soto, S.A Klein, W.A. Beckmann, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Elsevier, 2006.
- [23] <http://pvpmc.org/modeling-steps/irradiance-and-weather-2/irradiance-and->

insolation/air-mass/ [Ηλεκτρονικό].

- [24] J. V. Roger A. Messenger, "Photovoltaic Systems Engineering", 2nd επμ., CRC Press, 2004.

3 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης

Στην περίπτωση των Φ/Β συστημάτων πολλές φορές κρίνεται αναγκαία η προσεκτική θεώρηση της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης (“I-V” ή “J-V”) ενός Φ/Β κελιού, ολόκληρου του Φ/Β πάνελ ή μιας μεγαλύτερης συνδεσμολογίας. Μέσα από αυτήν τη προσέγγιση μπορεί μεταξύ άλλων να εξεταστεί η επίδραση των διαφόρων ανομοιογενειών σε επίπεδο Φ/Β κελιών και πάνελ και να βελτιωθεί με αυτόν τον τρόπο η απόδοση των Φ/Β συστημάτων ή/και να μειωθεί η συχνότητα των βλαβών σε αυτά. Στην περίπτωση της εμφάνισης θερμών κηλίδων (*hot-spots*) σε Φ/Β κελιά-πάνελ που μπορούν να οδηγήσουν στην καταστροφή τους, η προσπάθεια κατανόησης του τρόπου με τον οποίο κατανέμεται η θερμοκρασία στο Φ/Β πάνελ βοηθάει στον εντοπισμό των σημείων όπου αυτές εμφανίζονται. Αυτό όμως που ουσιαστικά διαφοροποιεί τη θερμική ανάλυση ενός Φ/Β πάνελ από μία «κλασσική» θερμική ανάλυση, είναι η ηλεκτρική σύνδεση των κελιών μεταξύ τους, για τη μοντελοποίηση της οποίας είναι απαραίτητη η θεώρηση των χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσης σε επίπεδο Φ/Β κελιού. Στο εξής, με V θα συμβολίζεται η τάση (σε Volts) που αναπτύσσεται μεταξύ των άκρων του κελιού και με I το ρεύμα (σε Amperes) που το διαρρέει. Με \vec{J} θα συμβολίζεται το διάνυσμα της χωρικής πυκνότητας του ρεύματος (μονάδες: A/m^2) που διαρρέει το Φ/Β κελί, όπου θεωρείται ότι λίγο πριν την επιφάνεια του Φ/Β κελιού η χωρική πυκνότητα του ρεύματος \vec{J} είναι κάθετη στην επιφάνεια του Φ/Β κελιού, αγνοώντας τυχόν φαινόμενα άκρων.

Κάθε Φ/Β κελί έχει, **για συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος και για συγκεκριμένη γήρανση**, μία δεδομένη I-V ή J-V χαρακτηριστική. Ακόμα και για τις ίδιες συνθήκες περιβάλλοντος οι χαρακτηριστικές I-V ή J-V των κελιών που αποτελούν ένα Φ/Β πάνελ διαφέρουν, ιδιαίτερα στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης. Δηλαδή το λεγόμενο *mismatching* ισχύει τόσο στην περίπτωση Φ/Β πάνελ ίδιου μοντέλου - κατασκευαστή, όσο και στην περίπτωση Φ/Β κελιών. Για να εξαχθεί η χαρακτηριστική ενός Φ/Β κελιού που βρίσκεται σε συγκεκριμένες συνθήκες, πρέπει να διεξαχθούν όσο το δυνατό ακριβέστερες (και πιο αντιπροσωπευτικές) μετρήσεις τάσης-ρεύματος. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει μοντελοποίηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του Φ/Β κελιού και η επίλυση (αναλυτική ή αριθμητική) εξισώσεων της μορφής $f(I,V)=0$ ή $f(J,V)=0$ να οδηγήσει στην εξαγωγή της χαρακτηριστικής. Υπάρχει τέλος η δυνατότητα, να γίνει ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων, αυτό άλλωστε περιλαμβάνεται στην έννοια της λέξης «αντιπροσωπευτικές» που αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτονόητο είναι ότι ένας κατάλληλος συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων, δίνει και την ακριβέστερη λύση.

3.1 PV I-V curve testers

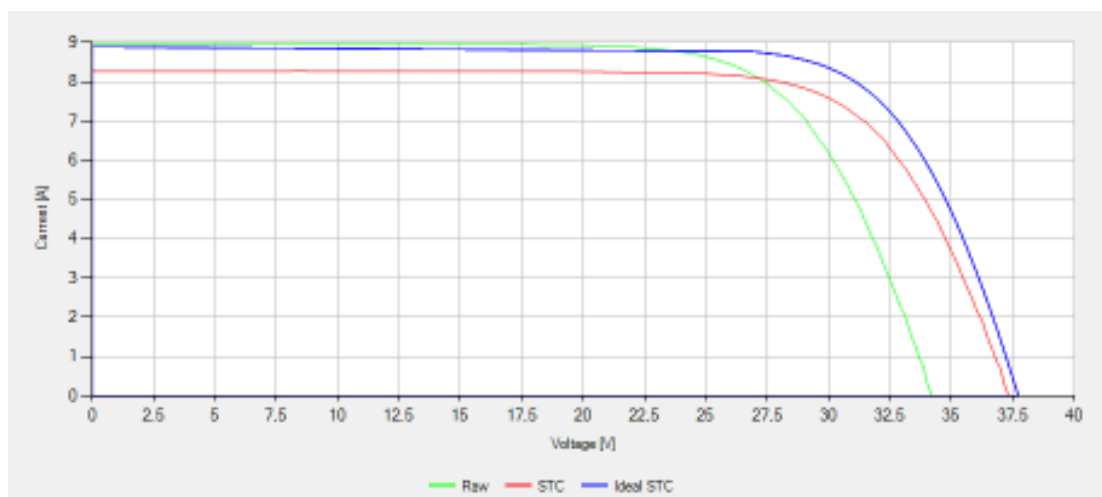
Βάσει όσων αναφέρθηκαν, είναι δυνατό να γίνουν μετρήσεις σε ένα Φ/Β κελί για συγκεκριμένες συνθήκες και να γίνει με αυτόν τον τρόπο η εξαγωγή της I-V χαρακτηριστικής, η οποία πρακτικά θα αποτελείται από αρκετά και αντιπροσωπευτικά ζεύγη τιμών τάσης-ρεύματος. Μετρήσεις για την εξαγωγή της I-V χαρακτηριστικής μπορούν να γίνουν επίσης (κάτι το οποίο είναι και το πιο σύνηθες) σε ένα Φ/Β πάνελ ή σε μία ομάδα Φ/Β πάνελ. Για την εξαγωγή της I-V χαρακτηριστικής, χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα “PV I-V curve testers” ή “PV I-V curve tracers” ή απλά “I-V testers”. Ο εξοπλισμός αυτός είναι ήδη γνωστός στην βιομηχανία των ημιαγωγών, όπου αναπτύχθηκε για δοκιμές σε τρανζίστορς και διόδους [1].

Υπάρχουν I-V testers για την εξαγωγή χαρακτηριστικής Φ/Β κελιών, τα οποία συνήθως δεν είναι φορητά, βρίσκονται σε εσωτερικούς χώρους (π.χ. εντός εργαστηρίων) και περιλαμβάνουν την πηγή ακτινοβολίας - *ηλιακό προσομοιωτή (solar simulator)*, τον υπολογιστή με το κατάλληλο λογισμικό καθώς και το μετρητικό εξοπλισμό [2]. Κατ’ αντιστοιχία, υπάρχουν I-V testers με ενσωματωμένο μεταξύ άλλων ηλιακό προσομοιωτή που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της χαρακτηριστικής ολόκληρου του Φ/Β πάνελ. Ουσιαστικά πρόκειται για τα αποκαλούμενα *flashers* που χρησιμοποιούν οι εταιρείες-κατασκευαστές των Φ/Β πάνελ. Οι κατασκευαστές συνήθως ενδιαφέρονται να εκτελέσουν τις μετρήσεις που επιβάλλουν τα πρότυπα, για αυτό και η ένταση της ακτινοβολίας από τους flashers είναι συνήθως από 200 έως 1000 W/m^2 σε κάθετη πρόσπτωση, ενώ το φάσμα της αντιστοιχεί όσο το δυνατόν σε αυτό με απόλυτη μάζα αέρα $AM_a = 1.5$ και συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Παρεμπιπτόντως, εκτός από τους flashers που παράγουν ηλιακή ακτινοβολία για ένα διάστημα μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου, στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται και προσομοιωτές με συνεχή ακτινοβολία (*steady-state testers*).

Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται μεταξύ άλλων σε I-V testers που χρησιμοποιούνται για επί τόπου (“on-site”) μετρήσεις, σε πραγματικό και όχι σε εργαστηριακό περιβάλλον. Συνεπώς σε αυτήν την περίπτωση δεν έχει έννοια ο όρος “solar simulator”. Τα όργανα αυτά, συνήθως συνοδεύονται από (ή διαθέτουν) πολυόργανα με αισθητήρες ακτινοβολίας (π.χ. Φ/Β αισθητήρες), θερμοκρασίας, εντοπισμού της γωνίας κλίσης (d_c) κ.α., όπως για παράδειγμα το SOLAR-4000 της εταιρείας Amprobe [3]. Η χαρακτηριστική I-V καμπύλη που εξάγεται από το συγκεκριμένο όργανο, ανάγεται και σε συνθήκες STC^1 [4, 5]. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται στο χρήστη και η ιδανική καμπύλη σε συνθήκες STC, βάσει των τιμών των τεχνικών χαρακτηριστικών του κατασκευαστή που

¹ Οι στάνταρ συνθήκες δοκιμής ($STC=standard\ test\ conditions$), στις οποίες συνήθως υποβάλλονται τα Φ/Β πάνελ ενός κατασκευαστή. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών αυτών, το Φ/Β πάνελ δέχεται ηλιακή ακτινοβολία έντασης 1000 W/m^2 με διεύθυνση κάθετη σε αυτό (μηδενικές οπτικές απώλειες), βρίσκεται σε θερμοκρασία 25°C (θερμοκρασία κελιού) (με μία ενδεχόμενη ανοχή $\pm 2^\circ C$) ενώ το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται αντιστοιχεί (κατά το δυνατό) στην φασματική κατανομή αναφοράς βάσει IEC 60904-3 (IEC 60904-3 reference solar spectral irradiance distribution) με απόλυτη μάζα αέρα $AM_a = 1.5$ ($M = 1$).

εισάγει ο χρήστης ή της βάσης δεδομένων που διαθέτει το όργανο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εντοπιστούν τα προβληματικά Φ/Β πάνελ (και όχι μόνο) σε μία εγκατάσταση (εικόνα 3-1). Το σφάλμα των μετρήσεων τάσης και ρεύματος για το συγκεκριμένο όργανο είναι 1% το πολύ για κάθε μέγεθος, ενώ το εύρος τους είναι 1.0 έως 1000 V για την τάση και 0.1 έως 15 A για το ρεύμα.



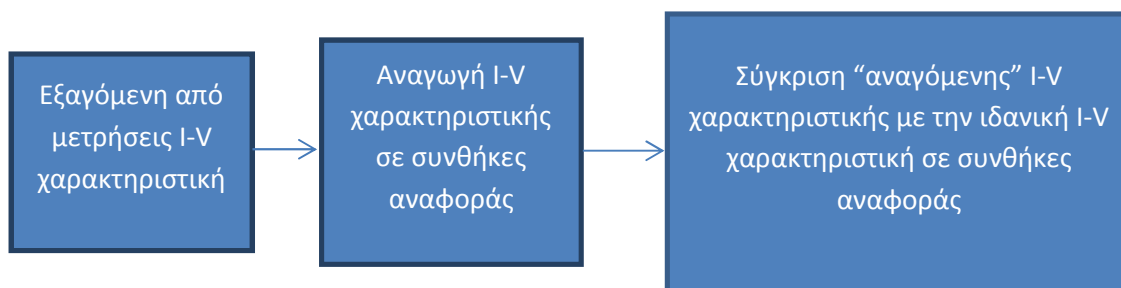
Εικόνα 3-1

Άλλο παράδειγμα “on-site” I-V tester είναι το μοντέλο I-V 400 της εταιρείας HT-Italia [6], το οποίο διαθέτει μεταξύ άλλων και συνοδευτικό μηχανικό ινκλινόμετρο με τη βοήθεια του οποίου είναι δυνατό ο χρήστης να ελέγξει αν η ηλιακή γωνία πρόσπτωσης είναι κατάλληλη για εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Όσο πιο κοντά είναι η ηλιακή γωνία πρόσπτωσης στο μηδέν, τόσο πιο ασφαλή είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων, με βάση και τη θεωρία που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά σίγουρα δεν αρκεί αυτό από μόνο του. Αντιπροσωπευτικό I-V tester, είναι και το PVA-600 PV Analyzer της εταιρείας Solmetric που χρησιμοποιεί μεταξύ άλλων τα μοντέλα των 5-παραμέτρων² [1, 7, 8, 9, 10, 11] ή

² Το μοντέλο των 5-παραμέτρων που είναι ενσωματωμένο στο λογισμικό του PVA-600 PV Analyzer, χρησιμοποιείται και στο λογισμικό SAM (Solar Advisor Model) [9] αλλά και στο CECPV Calculator [10]. Οι 5 παράμετροι που χρησιμοποιεί, προέρχονται από βάση δεδομένων του CEC (California Energy Commission) όπου καταχωρούνται οι τιμές των παραμέτρων αυτών για διάφορα μοντέλα Φ/Β πάνελ σε συγκεκριμένες συνθήκες αναφοράς. Οι παράμετροι αυτοί για ένα δεδομένο Φ/Β πάνελ, μπορούν να εξαχθούν και από το φυλλάδιο τεχνικών χαρακτηριστικών του κατασκευαστή του πάνελ. Οι τιμές που προέρχονται με τη μέθοδο αυτή, πιθανόν να μην είναι το ίδιο αξιόπιστες με τις τιμές της βάσης δεδομένων του CEC, η μέθοδος όμως αυτή είναι ιδανική για όσα Φ/Β πάνελ δεν είναι καταχωρημένα στη βάση του CEC. Στη διεύθυνση <http://sel.me.wisc.edu/software.shtml> είναι διαθέσιμο πρόγραμμα εξαγωγής των 5 παραμέτρων με επίλυση των αντίστοιχων εξισώσεων, μέσω των τιμών του φυλλαδίου τεχνικών χαρακτηριστικών. Ωστόσο, ένας αλγόριθμος για την εξαγωγή των τιμών των 5 παραμέτρων σε συνθήκες αναφοράς μέσω των τιμών του φυλλαδίου τεχνικών χαρακτηριστικών και η αναγωγή τους στις εκάστοτε συνθήκες, υλοποιήθηκε ανεξάρτητα και αυτοτελώς στην παρούσα εργασία στο λογισμικό Matlab, όπου και προστέθηκαν, βάσει του [11] δύο ακόμα παράμετροι. Λεπτομέρειες θα αναφερθούν στην επόμενη ενότητα.

εναλλακτικά το μοντέλο της Sandia³ [12, 13, 14] για την πρόβλεψη χαρακτηριστικών τιμών της καμπύλης I-V ή «ολόκληρης» της I-V χαρακτηριστικής του Φ/Β πάνελ ή του συστήματος των πάνελ που προκύπτει βάσει των τρεχουσών κάθε φορά συνθηκών. Επιπρόσθετα, προσφέρει και τη δυνατότητα αναγωγής της I-V χαρακτηριστικής σε συνθήκες STC και της σύγκρισής της με την ιδανική I-V χαρακτηριστική.

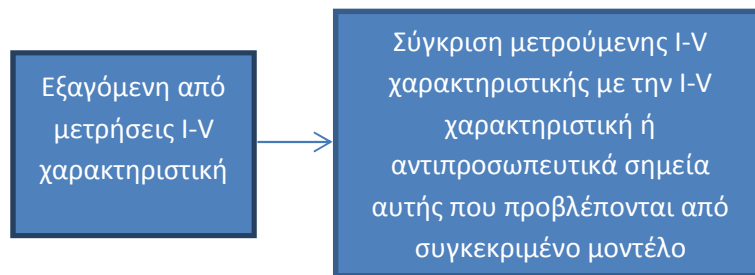
Όλα τα παραπάνω όργανα, χρησιμοποιούνται *“in the field”* για τον εντοπισμό των ελαττωματικών πάνελ ή κάποιου μέρους αυτών (π.χ. *junction boxes* ή διόδων *bypass* βλ. παρακάτω) καθώς και για τον εντοπισμό των ελαττωματικών συνδέσεων στο συνεχές ρεύμα. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ακόμα και στο να αποφασιστεί αν είναι απαραίτητος ή όχι ο καθαρισμός των Φ/Β πάνελ και γενικότερα στον έλεγχο των αποδόσεων του Φ/Β συστήματος υπό φυσιολογικές συνθήκες ή μετά από κάποιο ακραίο γεγονός (π.χ. κεραυνοπληξία, καταστροφές από ισχυρές ανεμοπιέσεις κ.α.). Στην πράξη συνήθως μετράται η I-V χαρακτηριστική μίας ολόκληρης στοιχειοσειράς, συμπεριλαμβανομένων των καλωδιώσεων, και σε περίπτωση που διαπιστωθεί ότι υπάρχει κάποια ανωμαλία γίνεται προσπάθεια εύρεσης του σφάλματος με διαδοχικές διχοτομήσεις. Κοινό χαρακτηριστικό των οργάνων αυτών, είναι η αναγωγή της I-V χαρακτηριστικής του Φ/Β πάνελ, από τις πραγματικές *“on-site”* συνθήκες, σε δεδομένες συνθήκες αναφοράς (συνήθως σε συνθήκες STC). Για την αναγωγή αυτή (*translation*), μπορεί να γίνεται χρήση κάποιου μοντέλου, όπως για παράδειγμα της Sandia [12], αρκεί βέβαια να είναι γνωστές οι παράμετροι του Φ/Β πάνελ, βάσει του μοντέλου της Sandia. Έπειτα, γίνεται σύγκριση της *“αναγόμενης”* I-V χαρακτηριστικής με την ιδανική I-V χαρακτηριστική στις ίδιες συνθήκες αναφοράς (σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-1

Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει σύγκριση της εξαγόμενης από τις μετρήσεις χαρακτηριστικής, με τη χαρακτηριστική (ή σημεία αυτής) που προβλέπεται από συγκεκριμένο μοντέλο Φ/Β πάνελ (π.χ. της Sandia) βάσει των πραγματικών συνθηκών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3-2.

³ Το μοντέλο της Sandia [12] είναι κατ' ουσίαν ένα εμπειρικό μοντέλο. Χρησιμοποιεί παραμέτρους με τιμές που για να εξαχθούν απαιτούνται μετρήσεις στα Φ/Β πάνελ. Είναι ένα *“point-value model”*, με την έννοια ότι στόχος του είναι να προβλέψει σημεία (5 χαρακτηριστικά σημεία) πάνω στην I-V καμπύλη ως συνάρτηση των περιβαλλοντολογικών συνθηκών (ένταση και φάσμα ακτινοβολίας, θερμοκρασία κ.α.) [12,13]. Τα σημεία πάντως αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την προσέγγιση ολόκληρης της I-V καμπύλης [12,14]. Όπως και στην περίπτωση του *“CEC 5-parameter model database”*, υπάρχει αντίστοιχη βάση δεδομένων όπου καταχωρούνται οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου για διάφορα Φ/Β πάνελ.



Σχήμα 3-2

Το πρότυπο IEC 61829 περιγράφει τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται για την επί τόπου μέτρηση των χαρακτηριστικών Φ/β συστοιχίας κρυσταλλικού πυριτίου και την αναγωγή τους στις εκάστοτε συνθήκες αναφοράς. Σύντομα αναμένεται και η δεύτερη έκδοση του εν λόγω προτύπου .

Κατά την αναγωγή της καμπύλης που εξάγεται από το I-V tester σε συνθήκες αναφοράς (συνήθως STC), παρουσιάζεται όπως είναι αναμενόμενο, σφάλμα. Η αντίστοιχη αβεβαιότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται η διαφορά των συνθηκών μέτρησης από τις συνθήκες αναφοράς [1]. Για αυτόν το λόγο, οι συνθήκες μέτρησης πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο σταθερές (ιδιαίτερα η ένταση της ακτινοβολίας) κατά τη διάρκεια της εξαγωγής της χαρακτηριστικής [1] και να είναι όσο γίνεται πιο κοντά στις συνθήκες αναφοράς. Το φάσμα της ακτινοβολίας, πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στην φασματική κατανομή αναφοράς βάσει IEC 60904-3 με απόλυτη μάζα αέρα $AM_a = 1$ και η ένταση της POA ακτινοβολίας όσο το δυνατό πιο κοντά στα 1000 W/m^2 με τη ηλιακή γωνία πρόσπτωσης θ_b να πρέπει να έχει τιμή κοντά στο μηδέν. Σε περίπτωση πάντως χρησιμοποίησης της δεύτερης μεθόδου που παρουσιάστηκε παραπάνω (άμεση σύγκριση - χωρίς αναγωγή), ενδεχόμενη διαφοροποίηση των συνθηκών μέτρησης από τις συνθήκες αναφοράς, δεν είναι τόσο καθοριστική. Σε κάθε περίπτωση όμως είναι σημαντικό οι συνθήκες μέτρησης να είναι κατά το δυνατό σταθερές, και να διενεργούνται κατά το δυνατό υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (*clear sky conditions*). Σημαντικό ρόλο παίζει επίσης η ένταση του ανέμου: πρέπει να υπάρχει σχετική άπνοια και κατά τη διάρκεια των μετρήσεων να μην εμφανίζονται ριπές, καθότι με αυτόν τον τρόπο μεταβάλλεται διαρκώς η θερμοκρασία του πάνελ. Βάσει του [1], η ταχύτητα του ανέμου, καλό είναι να μη ξεπερνά τα 2 μίλια ανά ώρα.

Η ένταση της ακτινοβολίας που μετράται συνήθως με αισθητήρες παρόμοιας τεχνολογίας με αυτήν του Φ/β πάνελ είναι πολύ κοντά στην ενεργώς απορροφούμενη ακτινοβολία [1], όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2. Για παράδειγμα το SOLAR-4000 διαθέτει δύο διαφορετικούς αισθητήρες ανάλογα με την τεχνολογία του Φ/β πάνελ (πολυκρυσταλλικό, μονοκρυσταλλικό). Οι αισθητήρες στερεώνονται σε ένα σταθερό κομμάτι του Φ/β συστήματος που βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με το Φ/β πάνελ (συνήθως σε κάποιο πάνελ που βρίσκεται στην άκρη της Φ/β συστοιχίας) και με αυτόν τον τρόπο μετρούν την ένταση της ακτινοβολίας (εικόνες 3-2, 3-3).



Εικόνα 3-2

Η σωστή μέτρηση της θερμοκρασίας είναι ο δεύτερος σημαντικός παράγοντας για την αναγωγή της I-V χαρακτηριστικής σε συνθήκες αναφοράς. Το SOLAR-4000 [15] διαθέτει αισθητήρα θερμοκρασίας υπερύθρων για τον σκοπό αυτό. Σε περίπτωση χρησιμοποίησης τέτοιου αισθητήρα (εικόνα 3-3), οι μετρήσεις πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτικές κατά μήκος της Φ/Β συστοιχίας ή του Φ/Β πάνελ που ενδιαφέρει.



Εικόνα 3-3

Μεταξύ των διαφόρων σημείων της Φ/Β συστοιχίας, μπορούν να παρατηρηθούν μεγάλες διαφορές στη θερμοκρασία ακόμα και υπό σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες, λόγω π.χ. διαφοροποίησης στον αερισμό των σημείων του Φ/Β πάνελ ή ανακλάσεων. Στα κατώτερα σημεία, πολλές φορές ο αερισμός δεν γίνεται στο βαθμό που γίνεται στα ανώτερα, ενώ ανεξάρτητα από αυτό η θερμοκρασία στο κέντρο τείνει να είναι μεγαλύτερη από την

αντίστοιχη στα άκρα [1] με την προϋπόθεση παρόμοιων συνθηκών αερισμού. Για την αναγωγή σε συνθήκες αναφοράς, πρέπει να υπολογιστεί κατά το δυνατό η “average cell junction temperature”, δηλαδή ο μέσος όρος της θερμοκρασίας της ένωσης του κελιού, συνεπώς οι τιμές από τις οποίες θα υπολογιστεί αυτός ο μέσος όρος πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτικές. Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κάμερα υπερύθρων, αν και σαν όργανο χρησιμοποιείται περισσότερο για την απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας.

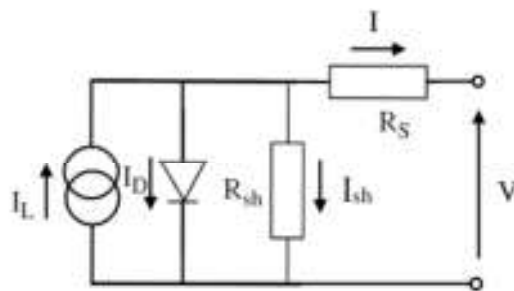
Παρεμπιπτόντως, προτιμητέο είναι οι μετρήσεις να γίνονται στο πίσω μέρος του Φ/Β πάνελ ή της συστοιχίας, αν και αυτό πολλές φορές δεν είναι πρακτικό. Ακόμα και έτσι όμως, για τα Φ/Β πάνελ σε γεωμετρία επίπεδης πλάκας (*flat-plate pv modules*) με την κλασσική “open-rack” τοποθέτηση, η διαφορά θερμοκρασίας υπό φυσιολογικές συνθήκες μεταξύ του κελιού και της πίσω επιφάνειας του πάνελ σε επίπεδο έντασης ακτινοβολίας 1000 W/m^2 είναι συνήθως 2 με 3 βαθμοί Κελσίου [12].

Και στις δύο περιπτώσεις χρήσης υπερύθρων (IR αισθητήρας, κάμερα υπερύθρων) σημαντικός είναι ο ρόλος του συντελεστή εκπομπής (*emittance*) και η σωστή επιλογή του. Ωστόσο, περαιτέρω ανάλυση της θεωρίας της θερμογραφίας, στο κομμάτι αυτό δεν είναι δυνατή στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

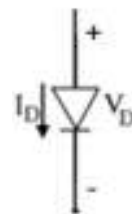
3.2 Μοντελοποίηση καμπύλης I-V

3.2.1 Μοντελοποίηση στο κομμάτι της ορθής πόλωσης

Η μοντελοποίηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του Φ/Β κελιού, πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ανταποκρίνεται κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο στην πραγματικότητα, χωρίς όμως παράλληλα η πολυπλοκότητα να αυξάνεται δυσανάλογα. Συνήθως χρησιμοποιούνται τα ισοδύναμα κυκλωματικά μοντέλα της μίας διόδου (*single diode equivalent circuit models*) (σχήμα 3-3, 3-4) τα οποία ορίζουν την I-V χαρακτηριστική ως μία συνεχής συνάρτηση για ένα καθορισμένο σύνολο συνθηκών λειτουργίας [5, 16-22].



Σχήμα 3-3



Σχήμα 3-4

Το μοντέλο της μίας διόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση Φ/Β κελιού ή Φ/Β πάνελ ή και συστοιχίας Φ/Β πάνελ [23, 24]. Από αυτό προκύπτει το μοντέλο των 5-

παραμέτρων (*5-parameter model*)⁴ [17, 20, 24, 25]⁵, το οποίο για να οριστεί πρέπει να είναι γνωστές οι τιμές 5 παραμέτρων: του φωτορεύματος (*light current ή photocurrent*) I_L [A], του ανάστροφου ρεύματος κορεσμού της διόδου (*diode reverse saturation current*) I_o [A], της σειριακής αντίστασης (*series resistance*) R_s [Ω], της αντίστασης διαρροής [26] (*shunt resistance*) R_{sh} [Ω] και μία παράμετρος η οποία χαρακτηρίζει τη διόδο και ονομάζεται τροποποιημένος συντελεστής ιδανικότητας της διόδου (*modified ideality factor*) a [V] [17]. Σταδιακά προστέθηκαν δύο ακόμα παράμετροι, με αποτέλεσμα να προκύψουν το μοντέλο 6 παραμέτρων και των 7 παραμέτρων [20]. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν και τη δυναμική συμπεριφορά (*dynamic behavior*) του Φ/Β κελιού/πάνελ [27, 28, 29, 30], η οποία ωστόσο δεν εξετάζεται στη συγκεκριμένη εργασία, όπου μελετάται η μόνιμη κατάσταση (*steady state*).

Από το σχήμα 3-3 και το νόμο ρευμάτων του Kirchhoff, προκύπτει ότι:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (3.1), \text{ με } I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.2)$$

Από τη θεωρία των ημιαγωγών, είναι γνωστή η εξίσωση της διόδου [17, 24, 31, 32]:

$$I_D = I_o \left(e^{V_D/a} - 1 \right) \quad (3.3), \text{ με } V_D = V + IR_s \quad (3.4)$$

την τάση στα άκρα της (σχήμα 3-4). Ο τροποποιημένος συντελεστής ιδανικότητας της διόδου, δίνεται από τον τύπο [17, 24]:

$$a \equiv \frac{\eta k T N_s}{q_e} \quad (3.5)$$

όπου με το ελληνικό γράμμα η συμβολίζεται ο συντελεστής ιδανικότητας (*ideality factor*) της διόδου, με k η σταθερά του Boltzmann $k \approx 1.381 \cdot 10^{-23} [J/K]$, $T[K]$ η θερμοκρασία του κελιού, του πάνελ ή της συστοιχίας των Φ/Β πάνελ, N_s ο αριθμός των Φ/Β κελιών που είναι τοποθετημένα σε σειρά στη Φ/Β διάταξη και με $q_e \approx 1.602 \cdot 10^{-19} [C]$ το φορτίο του ηλεκτρονίου. Θεωρώντας για απλούστευση ότι $N_s = 1$ η εξίσωση (3.3) με χρήση της (3.5), δίνει την εξίσωση της διόδου στην πιο «κλασσική» μορφή:

$$I_D = I_o \left(e^{(q_e V_D)/(\eta k T)} - 1 \right) \quad (3.6).$$

⁴ Ως μοντέλο 5 παραμέτρων, μπορεί να ονομαστεί οποιοδήποτε μοντέλο για τον ορισμό του οποίου απαιτείται ο υπολογισμός 5 παραμέτρων, όπως για παράδειγμα ακόμα και ένα κυκλωματικό μοντέλο που αποτελείται από δύο διόδους παράλληλα συνδεδεμένες, αντί για τη μία που απεικονίζεται στο σχήμα 3-3. Αν σε αυτό το μοντέλο των δύο διόδων, θεωρηθούν σταθεροί οι συντελεστές ιδανικότητας (με τιμή συνήθως 1 για τη μία και 2 για την άλλη διόδο), τότε προκύπτει πάλι ένα “μοντέλο 5 παραμέτρων”. Συνηθίζεται όμως, ο όρος να χρησιμοποιείται για το μοντέλο της μίας διόδου, που εκφράζεται από την εξίσωση (3.7) (βλ. παρακάτω).

⁵ Το [25] περιέχει μία διόρθωση σε ένα λάθος που υπήρχε στο [24]

Η εξίσωση (3.6), προσεγγίζει την I-V χαρακτηριστική μίας πραγματικής διόδου αρκετά ικανοποιητικά, αλλά για «κανονικές» τιμές τάσης τόσο στην περιοχή της ορθής όσο και (κυρίως) στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης. Σε ένα ακραίο αλλά ενδεικτικό παράδειγμα, θεωρώντας ότι οι υπόλοιποι συντελεστές παραμένουν σταθεροί, για $V_D \rightarrow -\infty$, η (3.6) δίνει $I_D = -I_o$. Φυσικά κάτι τέτοιο είναι αδύνατο να συμβεί στην πραγματικότητα και η διόδος εισέρχεται στην *περιοχή διάσπασης*, όταν η απόλυτη τιμή της ανάστροφης τάσης ξεπερνά την *τάση διάσπασης* [31], όπου το (ανάστροφο) ρεύμα αυξάνει εξαιρετικά γρήγορα. Συνεπώς η εξίσωση (3.6) (ή (3.3)) θεωρείται ότι ισχύει αρκετά ικανοποιητικά στην περιοχή της ορθής πόλωσης, ίσως και σε κομμάτι της περιοχής της ανάστροφης πόλωσης αλλά σίγουρα όχι κοντά στην περιοχή διάσπασης της διόδου ένωσης p-n. Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι στην *περιοχή ορθής πόλωσης* ισχύει από τις (3.1), (3.2), (3.3) και (3.4) ότι:

$$I = I_L - I_o \left(e^{(V+IR_s)/a} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.7).$$

Ο τροποποιημένος συντελεστής ιδανικότητας της διόδου a εξαρτάται βάσει της σχέσης (3.5) από τον συντελεστή ιδανικότητας της διόδου η , ο οποίος συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 1.5 [33] για τα κρυσταλλικά Φ/Β πλαίσια. Τις περισσότερες φορές θεωρείται ότι συντελεστής ιδανικότητας της διόδου δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, πράγμα το οποίο μάλλον δεν ισχύει απόλυτα στην περίπτωση των Φ/Β [34, 35, 36]. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση των Φ/Β, ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου φαίνεται να έχει και μία εξάρτηση από την ακτινοβολία [34, 35, 36]. Πάντως, μία τιμή ίση με τη μονάδα τεκμαίρεται ότι είναι καλή επιλογή για τη μοντελοποίηση Φ/Β [37]. Εξάλλου, μικρές μεταβολές του συντελεστή ιδανικότητας της διόδου στην πραγματικότητα δεν έχουν επίδραση στη πρόβλεψη της παραγωγής βάσει του μοντέλου της Sandia [38], τουλάχιστον σε ετήσια βάση. Στη συγκεκριμένη εργασία έχει θεωρηθεί ότι ο συντελεστής ιδανικότητας δεν εξαρτάται ούτε από τη θερμοκρασία ούτε από την ακτινοβολία και η τιμή του υπολογίζεται βάσει συγκεκριμένης διαδικασίας [17,24] που θα αναλυθεί παρακάτω.

Η έννοια του ανάστροφου ρεύματος κορεσμού της διόδου I_o , είναι γνωστή από τη θεωρία των ημιαγωγών. Η φυσική έννοια της σειριακής αντίστασης R_s έχει να κάνει με την αντίσταση του ημιαγωγού [30] και με την πτώση τάσης που εμφανίζεται στο Φ/Β κελί καθώς οι φορείς ρεύματος μεταφέρονται από τον ημιαγωγό στις ηλεκτρικές επαφές [5]. Επιπρόσθετα τα *ρεύματα διαρροής* που προκύπτουν περιγράφονται από την αντίσταση διαρροής R_{sh} [5].

Στο [24], όπου παρουσιάζεται το μοντέλο των 5-παραμέτρων, παρατίθεται μία διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων αυτών από συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά σε συγκεκριμένες συνθήκες αναφοράς που είναι πάντα διαθέσιμα από τους κατασκευαστές των Φ/Β πάνελ. Πρόκειται για τις μέγιστες τιμές της τάσης V_m [V], του ρεύματος I_m [A], για την τάση ανοικτοκυκλώματος V_{oc} [V], το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} [A], τιμές οι οποίες δίνονται σχεδόν πάντα σε συνθήκες STC καθώς και για τους θερμοκρασιακούς συντελεστές του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτοκυκλώματος, οι οποίοι σχεδόν πάντα δίνονται για τις συνθήκες ακτινοβολίας STC. Οι θερμοκρασιακοί συντελεστές

μπορεί να δίνονται είτε ως απόλυτοι (*absolute temperature coefficient*) σε A/K ή $A/^{\circ}C$ για το ρεύμα και V/K ή $V/^{\circ}C$ για την τάση αντίστοιχα είτε ως σχετικοί (*relative temperature coefficient*) θερμοκρασιακοί συντελεστές σε $\%/^{\circ}C$ ή $\%/K$. Οι θερμοκρασιακοί συντελεστές συνήθως δίνονται για το ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοικτοκυκλώματος καθώς επίσης και για τη μέγιστη ισχύ $P_m [W]$ σε $\%/^{\circ}C$ ή $\%/K$, αλλά μπορεί να δίνονται και για το μέγιστο ρεύμα ή τη μέγιστη τάση. Σε κάθε περίπτωση, κανονικά αφορούν όπως αναφέρθηκε σε συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας. Ωστόσο, για πάνελ με γνωστή γραμμικότητα σε ένα εύρος ακτινοβολίας σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60891, οι θερμοκρασιακοί συντελεστές μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύουν για όλο το εύρος αυτό [39]. Παρόλα αυτά, συνήθως πρακτική είναι να θεωρούνται σταθεροί με ικανοποιητική ακρίβεια τουλάχιστον στις περιπτώσεις των «συμβατικών» Φ/Β πάνελ (*non-concentrator flat-plate modules* [12]). Αν συμβολιστούν ως $\gamma_{rel}, \gamma_{abs}$ ο σχετικός και ο απόλυτος θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα βραχυκύκλωσης, και ως β_{rel}, β_{abs} , ο σχετικός και ο απόλυτος θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση ανοικτοκυκλώματος, ισχύουν:

$$\gamma_{abs} = \gamma_{rel} I_{sc} \quad (3.8) \quad \text{και} \quad \beta_{abs} = \beta_{rel} V_{oc} \quad (3.9)$$

για τις συγκεκριμένες συνθήκες αναφοράς και τις μονάδες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επισημαίνεται ότι η σχέση που συνδέει του βαθμούς Kelvin με τους βαθμούς Κελσίου είναι:

$$[K] = [^{\circ}C] + 273.15.$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην έναρξη της διαδικασίας των δοκιμών βάσει του προτύπου IEC 61215 (πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου), υπάρχει η δυνατότητα διεξαγωγής των δοκιμών που σχετίζονται με τις μέγιστες τιμές τάσης και ρεύματος, την τάση ανοικτοκυκλώματος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, καθώς και της εξαγωγής όλης της I-V χαρακτηριστικής του πάνελ, σε ένα εύρος θερμοκρασιών κελιού από $25^{\circ}C$ έως $50^{\circ}C$ και για επίπεδα έντασης ακτινοβολίας από $700 W/m^2$ έως $1100 W/m^2$ [39, 40]. Παρόλα αυτά, συνήθως οι δοκιμές αυτές διεξάγονται σε συνθήκες STC [39, 40]. Εξάλλου, το ίδιο το πρότυπο επιβάλλει να διεξαχθούν ούτως ή άλλως αργότερα στη διαδικασία δοκιμών οι δοκιμές αυτές σε συνθήκες STC [40].

Δυστυχώς υπάρχουν ακόμα κατασκευαστές Φ/Β πάνελ που δεν παρέχουν επαρκείς πληροφορίες μέσω των τεχνικών φυλλαδίων, τουλάχιστον σε συμφωνία με το πρότυπο DIN EN 50330 "Data sheet and identification plate information of photovoltaic modules" [5] και βάσει των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που αναφέρονται στο [40]. Πάντα όμως οι κατασκευαστές παρέχουν μέσω των τεχνικών φυλλαδίων τουλάχιστον τις πληροφορίες που απαιτούνται για την εξαγωγή των 5 παραμέτρων. Τώρα το κατά πόσον το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή Φ/Β πάνελ, είναι αντιπροσωπευτικό για το προϊόν του, είναι ένα θέμα που σαφώς δε μπορεί να εξεταστεί στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Συνήθως όμως, οι περισσότεροι κατασκευαστές συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 9001, συνεπώς το να παράγουν προϊόν με «χειρότερα» τεχνικά χαρακτηριστικά από αυτά που αναφέρονται στα τρέχοντα φυλλάδια τεχνικών χαρακτηριστικών έρχεται σε αντίθεση με τη «διαρκής βελτίωση» που είναι βασική απαίτηση του εν λόγω προτύπου.

Τις περισσότερες φορές αναφέρεται μία ακρίβεια $\pm 3\%$ στη μετρούμενη τιμή της μέγιστης ισχύος, ενώ τελευταία παρέχεται θετική ανοχή ισχύος από του περισσότερους κατασκευαστές (π.χ. $0-3\%$ ή $0-5 W_p$). Παράλληλα πολλές φορές οι τιμές των

V_{oc}, I_{sc}, V_m, I_m δίνονται με ακρίβεια ακόμα και $\pm 10\%$, ενώ η ανοχή στις μετρήσεις των θερμοκρασιακών συντελεστών, μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερη. Περισσότερη ακρίβεια για τις τιμές των V_{oc}, I_{sc}, V_m, I_m , παρέχεται στα *flash reports* των κατασκευαστών ή καμιά φορά και στις αυτοκόλλητες ετικέτες που επικολλούνται στο πίσω μέρος των Φ/Β πάνελ. Η

πληροφορία αυτή όμως είναι συνήθως διαθέσιμη, αφού έχει αγοραστεί το συγκεκριμένο προϊόν. Για λόγους απλούστευσης και επειδή, δεν είναι δυνατό να είναι γνωστές οι ακριβείς τιμές των χαρακτηριστικών από το φυλλάδιο του κατασκευαστή, χρησιμοποιούνται οι τιμές αυτές ως έχει.

Παρακάτω απεικονίζονται τα ηλεκτρικά τεχνικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται από το μοντέλο των 5 παραμέτρων (πρόκειται για τυπικές τιμές παραγωγής) για το Φ/Β πάνελ CS6P 235P της εταιρείας Canadian Solar (συνθήκες STC) :

Πίνακας 3-1		
Τάση ανοικτοκυκλώματος $V_{oc} [V]$	36.9	
Ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc} [A]$	8.46	
Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) $V_m [V]$	29.8	
Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) $I_m [A]$	7.9	
Θερμοκρασιακός Συντελεστής	P_m	-0.43 % / °C
	V_{oc}	-0.34 % / °C
	I_{sc}	0.065 % / °C

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, είναι

$$\beta_{rel} = -0.34 \text{ \% / } ^\circ C, \gamma_{rel} = 0.065 \text{ \% / } ^\circ C$$

συνεπώς από τις (3.8), (3.9) προκύπτει:

$$\beta_{abs} = 0.12546 \text{ [V / } ^\circ C], \gamma_{abs} = 0.005499 \text{ [A / } ^\circ C].$$

Φυσικά ισχύει και

$$\beta_{rel} = -0.34 \text{ \% / K}, \gamma_{rel} = 0.065 \text{ \% / K}$$

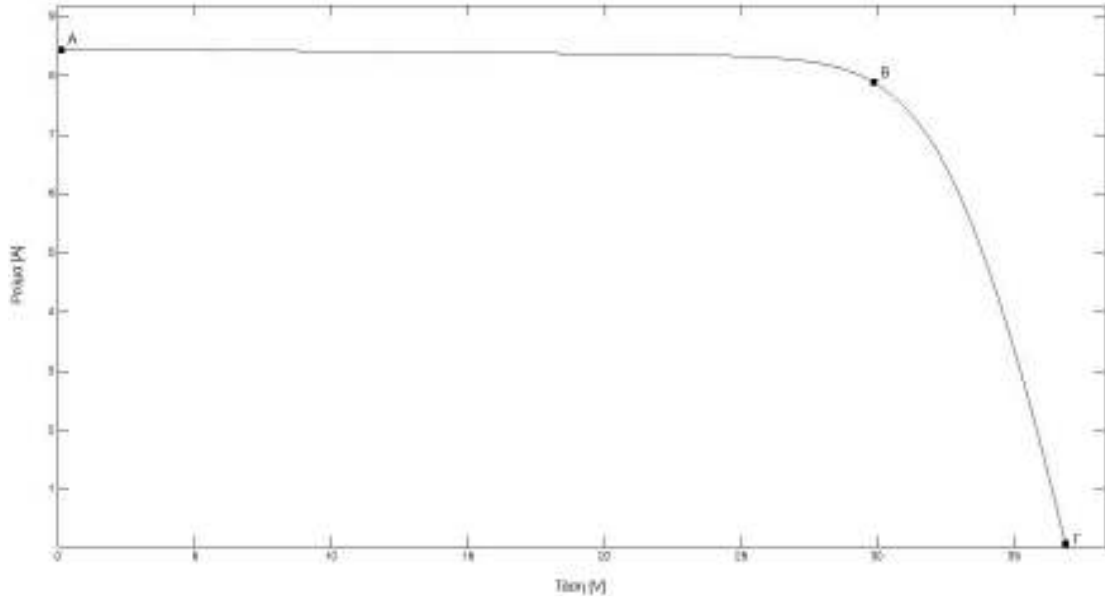
καθώς και

$$\beta_{abs} = 0.12546 \text{ [V / K]}, \gamma_{abs} = 0.005499 \text{ [A / K]}$$

αντίστοιχα. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής που αφορά στη μέγιστη ισχύ, αναφέρεται καθότι χρησιμοποιείται στο μοντέλο των 6 παραμέτρων, το οποίο θα παρουσιαστεί και αυτό στη συνέχεια. Θα παρουσιαστεί τέλος και το μοντέλο των 7 παραμέτρων, παρόλο που αφορά κυρίως στη μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών πάνελ λεπτού υμενίου (*thin film*) [20].

Στο εξής, όταν αναφέρεται θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση ανοικτοκυκλώματος και το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα εννοείται απόλυτος θερμοκρασιακός συντελεστής και θα συμβολίζεται με $\beta [V / K]$ και $\gamma [A / K]$ αντίστοιχα, ενώ όταν αναφέρεται θερμοκρασιακός συντελεστής για τη μέγιστη ισχύ θα εννοείται πάλι απόλυτος εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά και θα συμβολίζεται με $\delta_p [W / K]$. Στη συνέχεια (σχήμα 3-5) απεικονίζεται η τυπική I-V χαρακτηριστική του συγκεκριμένου Φ/Β πάνελ της Canadian Solar στην περιοχή της ορθής πόλωσης όπως αυτή σχεδιάζεται με χρήση του μοντέλου των 5-παραμέτρων (υλοποίηση στο *Matlab*). Τα σημεία Α, Β και Γ είναι χαρακτηριστικά σημεία οποιασδήποτε καμπύλης I-V στην περιοχή της ορθής πόλωσης και αντιστοιχούν στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, στο σημείο μέγιστης ισχύος και στην τάση ανοικτοκυκλώματος. Από αυτά τα τρία σημεία καθώς και από το ρυθμό μεταβολής της ισχύος σε σχέση με την τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος και το θερμοκρασιακό συντελεστή για την τάση

ανοικτοκυκλώματος, προκύπτουν οι 5 ανεξάρτητες εξισώσεις που είναι απαραίτητες για την εκτίμηση των 5 παραμέτρων του μοντέλου, στις συνθήκες αναφοράς.



Σχήμα 3-3

Πιο συγκεκριμένα, [17, 24, 25], από την ανάγκη να ικανοποιείται η (3.7) στο σημείο $A(0, I_{sc,ref})$, προκύπτει η σχέση:

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left(e^{\frac{(I_{sc,ref} R_{s,ref})}{a_{ref}}} - 1 \right) - \frac{I_{sc,ref} R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (3.10)$$

όπου ο δείκτης ref αναφέρεται στις συνθήκες αναφοράς (συνήθως STC). Αντίστοιχα από την (3.7) στο σημείο $\Gamma(V_{oc,ref}, 0)$, προκύπτει:

$$I_{L,ref} = I_{o,ref} \left(e^{\frac{V_{oc,ref}}{a_{ref}}} - 1 \right) + \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (3.11)$$

Από το σημείο μέγιστης ισχύος $B(V_{m,ref}, I_{m,ref})$, προκύπτει:

$$I_{m,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left(e^{\frac{(V_{m,ref} + I_{m,ref} R_{s,ref})}{a_{ref}}} - 1 \right) - \frac{V_{m,ref} + I_{m,ref} R_{s,ref}}{R_{sh,ref}} \quad (3.12)$$

ενώ από τη σχέση $\left. \frac{d(VI)}{dV} \right|_{mpp} = 0$, προκύπτει μετά από πράξεις η σχέση:

$$\frac{I_{m,ref}}{V_{m,ref}} = \frac{\frac{I_{o,ref}}{a_{ref}} e^{\frac{(V_{m,ref} + I_{m,ref} R_{s,ref})}{a_{ref}}} + \frac{1}{R_{sh,ref}}}{1 + \frac{I_{o,ref} R_{s,ref}}{a_{ref}} e^{\frac{(V_{m,ref} + I_{m,ref} R_{s,ref})}{a_{ref}}} + \frac{R_{s,ref}}{R_{sh,ref}}} \quad (3.13).$$

Τέλος, η συνθήκη που αφορά στον θερμοκρασιακό συντελεστή της τάσης ανοικτοκυκλώματος είναι η

$$\left. \frac{\partial V_{oc}}{\partial T} \right|_{ref} = \beta_{ref} \quad (3.14)$$

η οποία για την περίπτωση συνθηκών με την ίδια ακτινοβολία όπως των STC και θερμοκρασία κελιού T_c με διαφορά το πολύ 10 K (απόλυτη τιμή) από την T_{ref} [17, 24] γίνεται:

$$\beta_{ref} \approx \frac{V_{oc,Tc} - V_{oc,ref}}{T_c - T_{ref}} \quad (3.15)$$

που χρησιμοποιείται σαν απόλυτη ισότητα.

Ο υπολογισμός των θερμοκρασιακών συντελεστών σύμφωνα με το [40] γίνεται μέσω μετρήσεων και της απλής μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι, για να υπολογιστεί π.χ. ο β_{ref} σε συνθήκες ακτινοβολίας STC, λαμβάνεται η τιμή της τάσης ανοικτοκυκλώματος σε 25°C θερμοκρασία πάνελ και σε βήματα περίπου 5°C σε ένα εύρος τουλάχιστον 30°C . Για παράδειγμα στις θερμοκρασίες $25^\circ \text{C}, 30^\circ \text{C}, 35^\circ \text{C}, 40^\circ \text{C}, 45^\circ \text{C}, 50^\circ \text{C}, 55^\circ \text{C}$ [39]. Έπειτα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων λαμβάνεται ουσιαστικά ο πιο “αντιπροσωπευτικός” θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση ανοικτοκυκλώματος. Βέβαια, όσο πιο μικρό βήμα χρησιμοποιηθεί κατά τον υπολογισμό του θερμοκρασιακού συντελεστή και όσο πιο μικρό είναι το εύρος των θερμοκρασιών γύρω από τη T_{ref} , τόσο το καλύτερο για την ακρίβεια του υπολογισμού μέσα σε αυτό το εύρος. Σίγουρα π.χ., για την εφαρμογή των (3.14), (3.15), θα ήταν προτιμότερες μετρήσεις στις θερμοκρασίες $21^\circ \text{C}, 22^\circ \text{C}, \dots$ κοκ. με βήμα 1°C μέχρι τη θερμοκρασία των 30°C . Επομένως η σχέση (3.14) είναι τόσο σωστή όσο μικρότερο είναι το εύρος μετρήσεων ΔT γύρω από τη T_{ref} . Υπό αυτήν την έννοια, η (3.15) είναι τόσο σωστή όσο πιο “εντός” του εύρους μετρήσεων ΔT βρίσκεται η T_c . Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε η τιμή που χρησιμοποιείται για τη β_{ref} είναι αυτή που αναφέρεται στο φυλλάδιο του κατασκευαστή, παρόλο που πιθανόν να έχει προκύψει με βήμα περίπου 5°C σε ένα εύρος 30°C σε μία κατ’ ελάχιστον εφαρμογή του προτύπου IEC 61215 (εκτός αν διενεργηθούν ακριβέστερες μετρήσεις) και η επιλογή της T_c είναι τέτοια ώστε $|T_c - T_{ref}| \leq 10 \text{ K}$. Τα ίδια ισχύουν για τους θερμοκρασιακούς συντελεστές μέγιστης ισχύος και ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Στη (3.15), είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του V_{oc,T_c} για τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η (3.7) στις συγκεκριμένες συνθήκες:

$$0 = I_{L,T_c} - I_{o,T_c} \left(e^{(V_{oc,T_c})/a_{T_c}} - 1 \right) - \frac{V_{oc,T_c}}{R_{sh,T_c}} \quad (3.16).$$

Παρακάτω θα αναλυθεί ο τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων I_L, I_o, a, R_s, R_{sh} σε «οποιοσδήποτε συνθήκες»⁶, βάσει των συνθηκών αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο, θα υπολογιστούν τα $I_{L,T_c}, I_{o,T_c}, a_{T_c}, R_{sh,T_c}$ και θα αντικατασταθούν στην (3.16), προκειμένου η τελευταία να εκφραστεί από γνωστές τιμές και τους 5 αγνώστους $I_{L,ref}, I_{o,ref}, a_{ref}, R_{sh,ref}, R_{s,ref}$ και να αποτελέσει μαζί με τις (3.10), (3.11), (3.12), (3.13) το προς επίλυση σύστημα των 5 εξισώσεων και των 5 αγνώστων.

Μία σχέση που εκφράζει την ένταση του φωτορεύματος σε διαφορετικές από αυτές της αναφοράς συνθήκες, δίνεται στο [17]:

$$I_L = \frac{S}{S_{ref}} \left[I_{L,ref} + \gamma_{ref} (T_c - T_{ref}) \right] \quad (3.17)$$

όπου με S, S_{ref} συμβολίζεται η ένταση της ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας σε γενικές συνθήκες και σε συνθήκες αναφοράς αντίστοιχα.

Από τα [17, 24, 41] με μία επέκταση του [11] για το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left(\frac{G_T}{G_{ref}} \right)^m \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \left(e^{\frac{E_{g,ref}}{k_{ev} T_{ref}}} - e^{\frac{E_g}{k_{ev} T_c}} \right) \quad (3.18)$$

όπου με $E_g [eV]$ συμβολίζεται το ενεργειακό χάσμα (*band gap energy*) και με $E_{g,ref} [eV]$ το ενεργειακό χάσμα στις συνθήκες αναφοράς. Στη συγκεκριμένη σχέση, η σταθερά του Boltzmann k_{ev} , δίνεται σε eV / K [42]. Το ενεργειακό χάσμα για το πυρίτιο στους $25^\circ C$ ή $298.15 K$, έχει τιμή $E_{g,ref} = 1.121 eV$, ενώ στους $0^\circ C$ ή $273.15 K$, έχει τιμή $E_{g,0} = 1.166 eV$ [43]. Οι τιμές αυτές αφορούν περισσότερο στην περίπτωση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα αντίστοιχα ενεργειακά φάσματα στην περίπτωση πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι λίγο μεγαλύτερα όπως φαίνεται από τις

⁶ Στην πραγματικότητα, αυτές οι σχέσεις αναγωγής που θα παρουσιαστούν φαίνεται να γίνονται λιγότερο ακριβείς καθώς οι συνθήκες απομακρύνονται από τις συνθήκες αναφοράς, που είναι συνήθως οι STC. Για παράδειγμα η χρησιμοποίηση των θερμοκρασιακών συντελεστών σε συνθήκες ακτινοβολίας STC για συνθήκες ακτινοβολίας που απέχουν αρκετά από αυτές, δεν είναι απόλυτα σωστή. Ακόμα και στην περίπτωση Φ/Β πάνελ για τα οποία βάσει του προτύπου IEC 60891, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι θερμοκρασιακοί συντελεστές για ένα εύρος ακτινοβολίας, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στην πραγματικότητα αυτό ισχύει ακριβώς για το εύρος αυτό.

αντιπροσωπευτικές τιμές από το NIST που παρουσιάζονται στο [24]. Η σχέση που συνδέει τα E_g και $E_{g,ref}$, δίνεται στο [17] (παρόμοια με αυτήν στο [32]) και είναι η:

$$\frac{E_g}{E_{g,ref}} = 1 - C(T_c - T_{ref}) \quad (3.19)$$

με $C = 0.0002677 \text{ [1/K]}$ για την περίπτωση του πυριτίου. Μία διαφορετική σχέση και ίσως πιο ακριβής από τη (3.19) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, δίνεται στο [43] (παρόμοιες παρουσιάζονται στα [42, 44]) και είναι της μορφής

$$E_g = E_{g,0} - \frac{j_1 T_c^2}{T_c + j_2} \quad (3.20)$$

με $j_1 = 0.473 \text{ [meV/K]}$ και $j_2 = 636 \text{ K}$ για την περίπτωση του πυριτίου. Στα [17, 24], η σχέση που συνδέει τους τροποποιημένους συντελεστές ιδανικότητας της διόδου, είναι η

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{ref}} \quad (3.21)$$

στην οποία θεωρείται ότι ο συντελεστής ιδανικότητας η , είναι ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία.

Για την αντίσταση διαρροής, πολλές φορές χρησιμοποιείται η σχέση [17, 24]:

$$R_{sh} = R_{sh,ref} \frac{S_{ref}}{S} \quad (3.22)$$

όπου θεωρείται ότι η αντίσταση διαρροής είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία, γεγονός το οποίο μπορεί να μην ισχύει απόλυτα [45] αλλά είναι μία καλή προσέγγιση.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά στη σειριακή αντίσταση, υιοθετείται μία θεώρηση που πηγάζει από το [11]:

$$R_s = R_{s,ref} \left[1 + \psi(T_c - T_{ref}) \right] \quad (3.23)$$

Συνεπώς, η (3.16), γίνεται από τις (3.15), (3.17), (3.18), (3.21), (3.22), για $S = S_{ref}$, $G_T = G_{ref}$

$$0 = I_{L,ref} + \gamma_{ref}(T_c - T_{ref}) - I_{o,ref} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \left(e^{\frac{E_{g,ref}}{k_{ev} T_{ref}}} - e^{\frac{E_g}{k_{ev} T_c}} \right) \left(e^{(V_{oc,ref} + \beta_{ref}(T_c - T_{ref})) / ((a_{ref} * T_c) / T_{ref})} - 1 \right) - \frac{V_{oc,ref} + \beta_{ref}(T_c - T_{ref})}{R_{sh,ref}} \quad (3.24)$$

Η (3.24), δεδομένης της (3.19) ή (3.20), αποτελεί μαζί με τις (3.10), (3.11), (3.12), (3.13) το προς επίλυση σύστημα των 5 εξισώσεων και των 5 αγνώστων για την εύρεση των I_L, I_o, a, R_s, R_{sh} στις συνθήκες αναφοράς, δηλαδή των $I_{L,ref}, I_{o,ref}, a_{ref}, R_{s,ref}, R_{sh,ref}$. Συνήθως, οι συνθήκες αναφοράς είναι οι συνθήκες STC. Επομένως υπολογίζονται συνήθως οι $I_{L,STC}, I_{o,STC}, a_{STC}, R_{s,STC}, R_{sh,STC}$. Από τις σχέσεις όμως (3.17), (3.18), (3.21), (3.22), (3.23), μπορούν να εκτιμηθούν στη συνέχεια οι παράμετροι I_L, I_o, a, R_s, R_{sh} για οποιοσδήποτε συνθήκες με ακρίβεια που έχει να κάνει με το πόσο «μακριά» από τις συνθήκες STC βρίσκονται αυτές οι «οποιοσδήποτε» συνθήκες.

Στη συνέχεια, για τον πλήρη ορισμό του μοντέλου, πρέπει δοθεί ένας τρόπος εκτίμησης για την παράμετρο ψ στη σχέση (3.23) και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος, ο οποίος κατά σύμβαση δίνεται συνήθως σε συνθήκες ακτινοβολίας STC. Αν παρέχεται ο σχετικός θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος $\delta_{p,ref}^{rel} [\% / K]$, πρέπει αρχικά να μετατραπεί σε απόλυτο θερμοκρασιακό συντελεστή ισχύος με τη σχέση

$$\delta_{p,ref}^{abs} = \delta_{p,ref}^{rel} P_{m,ref} \Leftrightarrow \delta_{p,ref}^{abs} = \delta_{p,ref}^{rel} V_{m,ref} I_{m,ref} \quad (3.25)$$

Έτσι ισχύει για θερμοκρασία κελιού T_c κοντά στην T_{ref} , βάσει παρόμοιων θεωρήσεων όπως αυτών για το θερμοκρασιακό συντελεστή τάσης ανοικτοκυκλώματος:

$$\delta_{p,ref}^{abs} \simeq \frac{P_{m,T_c} - P_{m,ref}}{T_c - T_{ref}} \quad (3.26)$$

που χρησιμοποιείται σαν απόλυτη ισότητα. Η (3.26) ισοδύναμα γίνεται:

$$\delta_{p,ref}^{abs} \simeq \frac{I_{m,T_c} V_{m,T_c} - I_{m,ref} V_{m,ref}}{T_c - T_{ref}} \quad (3.27)$$

Από την (3.7) και τις δύο συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο σημείο μέγιστης ισχύος:

$$\left. \frac{d(VI)}{dV} \right|_{mpp} = 0, \text{ σημείο } (V_m, I_m)$$

για συνθήκες ακτινοβολίας όπως αυτές των συνθηκών αναφοράς και για θερμοκρασία κελιού T_c κοντά στην T_{ref} προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$I_{m,T_c} = I_{L,T_c} - I_{o,T_c} \left(e^{\frac{(V_{m,T_c} + I_{m,T_c} R_{s,T_c})}{a_{T_c}}} - 1 \right) - \frac{V_{m,T_c} + I_{m,T_c} R_{s,T_c}}{R_{sh,T_c}} \quad (3.28)$$

$$\frac{I_{m,T_c}}{V_{m,T_c}} = \frac{\frac{I_{o,T_c}}{a_{T_c}} e^{\frac{(V_{m,T_c} + I_{m,T_c} R_{s,T_c})}{a_{T_c}}} + \frac{1}{R_{sh,T_c}}}{1 + \frac{I_{o,T_c} R_{s,T_c}}{a_{T_c}} e^{\frac{(V_{m,T_c} + I_{m,T_c} R_{s,T_c})}{a_{T_c}}} + \frac{R_{s,T_c}}{R_{sh,T_c}}} \quad (3.29).$$

Δεδομένης της (3.23) η επίλυση του συστήματος των (3.27), (3.28) και (3.29) θα δώσει μία εκτίμηση της παραμέτρου ψ .

Η παράμετρος m , με την προϋπόθεση ότι οι συνθήκες αναφοράς είναι οι STC συνθήκες, θα προκύψει κατά κάποιο τρόπο βάσει του [11] από την τιμή της μέγιστης ισχύος σε θερμοκρασία $25^\circ C$, σε ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας $200 W/m^2$ με κάθετη πρόσπτωση ($\theta = 0^\circ$) και σε φασματική κατανομή αναφοράς βάσει IEC 60904-3. Η τιμή αυτή της μέγιστης ισχύος, μπορεί να εκτιμηθεί από το βαθμό απόδοσης (efficiency) e_{low} στις παραπάνω συνθήκες όπου ο δείκτης low , υποδηλώνει χαμηλή ένταση ακτινοβολίας. Ο (μέγιστος) βαθμός απόδοσης ενός Φ/Β στοιχείου, δίνεται από τον τύπο [17]

$$e = \frac{I_m V_m}{A G_T} \quad (3.30)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του στοιχείου και G_T η ένταση της ΡΟΑ ακτινοβολίας. Ο e_{low} παρουσιάζεται άμεσα ή έμμεσα πολλές φορές στα φυλλάδια τεχνικών χαρακτηριστικών. Πιο συγκεκριμένα, τα φυλλάδια τεχνικών χαρακτηριστικών των κατασκευαστών, δίνουν ουσιαστικά τη σχέση e_{low}/e_{STC} , έστω $e_{low}/e_{STC} = e_{l/s}$ (3.31). Από την (3.30) για $e = e_{low}$ και $e = e_{STC}$ και την (3.31) προκύπτει ότι:

$$e_{l/s} = \frac{G_{T,STC} I_{m,low} V_{m,low}}{G_{T,low} I_{m,STC} V_{m,STC}} \quad (3.32).$$

Η (3.32) μαζί με τις δύο εξισώσεις που αφορούν στο σημείο μέγιστης ισχύος για τις συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση της παραμέτρου m , θεωρώντας το ρεύμα $I_{o,low}$ ως άγνωστη παράμετρο και επιλύοντας (μετά τον υπολογισμό του) τη σχέση (3.18) για $I_o = I_{o,low}$ ως προς m . Συνοψίζοντας, από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων:

$$I_{m,low} = I_{L,low} - I_{o,low} \left(e^{\frac{(V_{m,low} + I_{m,low} R_{s,low})}{a_{low}}} - 1 \right) - \frac{V_{m,low} + I_{m,low} R_{s,low}}{R_{sh,low}} \quad (3.33)$$

$$\frac{I_{m,low}}{V_{m,low}} = \frac{\frac{I_{o,low}}{a_{low}} e^{\frac{(V_{m,low} + I_{m,low} R_{s,low})}{a_{low}}} + \frac{1}{R_{sh,low}}}{1 + \frac{I_{o,low} R_{s,low}}{a_{low}} e^{\frac{(V_{m,low} + I_{m,low} R_{s,low})}{a_{low}}} + \frac{R_{s,low}}{R_{sh,low}}} \quad (3.34)$$

και την (3.32), εκτιμώνται οι $I_{m,low}$, $V_{m,low}$, $I_{o,low}$. Με γνωστό έτσι το ρεύμα $I_{o,low}$, από την (3.18) για $I_o = I_{o,low}$ λαμβάνεται:

$$\begin{aligned} \frac{I_{o,low}}{I_{o,ref}} &= \left(\frac{G_T}{G_{ref}} \right)^m \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \left(e^{\frac{E_{g,ref}}{k_{ev} T_{ref}}} - e^{\frac{E_g}{k_{ev} T_c}} \right) \Leftrightarrow \left(\frac{G_T}{G_{ref}} \right)^m = \frac{\frac{I_{o,low}}{I_{o,ref}}}{\left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \left(e^{\frac{E_{g,ref}}{k_{ev} T_{ref}}} - e^{\frac{E_g}{k_{ev} T_c}} \right)} \Leftrightarrow \\ m \ln \left(\frac{G_T}{G_{ref}} \right) &= \ln \left[\frac{\frac{I_{o,low}}{I_{o,ref}}}{\left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \left(e^{\frac{E_{g,ref}}{k_{ev} T_{ref}}} - e^{\frac{E_g}{k_{ev} T_c}} \right)} \right] \Leftrightarrow m = \frac{\ln \left[\frac{\frac{I_{o,low}}{I_{o,ref}}}{\left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \left(e^{\frac{E_{g,ref}}{k_{ev} T_{ref}}} - e^{\frac{E_g}{k_{ev} T_c}} \right)} \right]}{\ln \left(\frac{G_T}{G_{ref}} \right)} \quad (3.35) \end{aligned}$$

από όπου υπολογίζεται εύκολα η παράμετρος m . Το μοντέλο τώρα είναι πλήρες, καθόσον έχουν οριστεί όλες οι παράμετροί του. Για την επαλήθευση του μοντέλου, όσον αφορά στο κομμάτι της αναγωγής μπορούν μεταξύ άλλων να χρησιμοποιηθούν και οι μετρήσεις σε συνθήκες *NOCT*⁷ [39,40] που παρέχονται πολλές φορές στα φυλλάδια τεχνικών χαρακτηριστικών.

⁷ Ως *NOCT* (Nominal Operating Circuit Temperature) ορίζεται ως η μέση θερμοκρασία του κελιού σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας [39] στις εξής συνθήκες [39]:

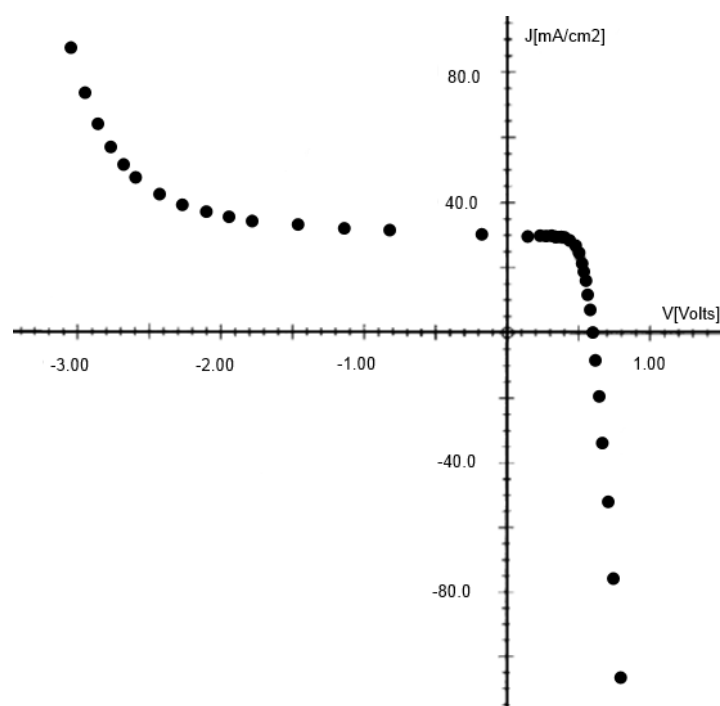
1. "Open-rack" τοποθέτηση με γωνία κλίσης του πάνελ 45°
2. Ένταση συνολικής ακτινοβολίας 800 W/m²
3. Θερμοκρασία περιβάλλοντος 20° C
4. Ταχύτητα ανέμου 1 m / s
5. Ανοικτοκύκλωμα

Το πρότυπο IEC 61215 περιγράφει τρόπους υπολογισμού της *NOCT*. Για τα συνήθη κρυσταλλικά πλαίσια ισχύει τις περισσότερες φορές $NOCT = 45^\circ C \pm 2^\circ C$. Ακολουθώντας, οι συνθήκες *NOCT*, όπως αποκαλούνται στη συγκεκριμένη εργασία, είναι αντίστοιχες με τις συνθήκες *STC*, αλλά σε αυτές το Φ/Β πάνελ δέχεται ηλιακή ακτινοβολία έντασης 800 W/m² με διεύθυνση κάθετη σε αυτό και βρίσκεται σε θερμοκρασία *NOCT*, ενώ το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται, αντιστοιχεί (κατά το δυνατό) στην φασματική κατανομή αναφοράς βάσει IEC 60904-3 με απόλυτη μάζα αέρα $AM_a = 1.5$. Επομένως δεν πρέπει να

3.2.2 Μοντελοποίηση στο κομμάτι της ανάστροφης πόλωσης

Το παραπάνω μοντέλο, είναι αρκετά ακριβές όσον αφορά στη μοντελοποίηση της χαρακτηριστικής του Φ/Β κελιού ή πάνελ ή του συστήματος των Φ/Β πάνελ στην περιοχή της ορθής πόλωσης. Για την περιοχή της ανάστροφης πόλωσης, χρησιμοποιούνται συνήθως διαφορετικά μοντέλα. Η διαφορετικότητα στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης, έχει να κάνει όπως προαναφέρθηκε με το ότι η εξίσωση (3.6), είναι ικανοποιητική προσέγγιση της I-V χαρακτηριστικής μίας πραγματικής διόδου μόνο για «κανονικές» τιμές τάσης. Για να ισχύει και κοντά στην περιοχή διάσπασης της διόδου ένωσης p-n, πρέπει να τροποποιηθεί.

Ίσως το πιο συνηθισμένο μοντέλο για την μοντελοποίηση της χαρακτηριστικής στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης, είναι το μοντέλο που παρουσιάζεται στο [46], όπου εξετάζεται η I-V (J-V) χαρακτηριστική σε τρία τεταρτημόρια (εικόνα 3-4 [46]), αν και ενδιαφέρον παρουσιάζουν κυρίως το πρώτο και το δεύτερο τεταρτημόριο.



Εικόνα 3-4

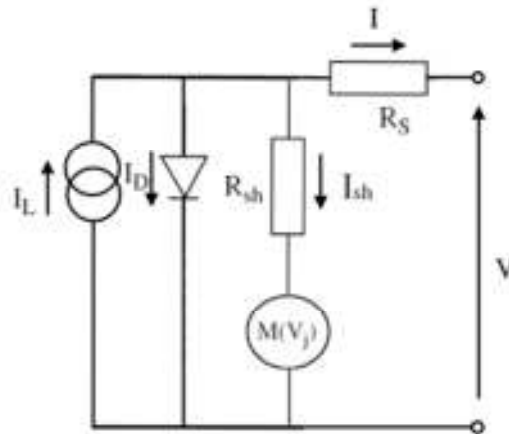
Στην περίπτωση αυτή, η εξίσωση (3.7) μετατρέπεται στην [46, 47, 48, 49, 50]:

$$I = I_L - I_o \left(e^{(V+IR_s)/a} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \left[1 + I_1 \left(1 - \frac{V + IR_s}{V_{br}} \right)^{-l_2} \right] \quad (3.36)$$

δημιουργείται σύγκυση μεταξύ της θερμοκρασίας NOCT που ορίζεται για ανοικτοκυκλωμένο πάνελ και των συνθηκών NOCT που ορίζονται σε θερμοκρασία NOCT και αφορούν οποιοδήποτε φορτίο.

ενώ το κυκλωματικό μοντέλο απεικονίζεται στο σχήμα 3-6, με $V_j = V + IR_s$ (3.37).

Ο μη γραμμικός πολλαπλασιαστικός συντελεστής (*non-linear multiplication factor*) $M(V_j)$, χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του μηχανισμού της χιονοστιβάδας (*avalanche*) που μπορεί να οδηγήσει στη διάσπαση της ένωσης p-n (διάσπαση χιονοστιβάδας ή *avalanche breakdown*).



Σχήμα 3-4

Για λόγους πληρότητας, επιβάλλεται να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο μοντέλο, που αποκαλείται και μοντέλο του *Bishop*, έχει χρησιμοποιηθεί ίσως περισσότερο, αλλά δεν είναι το μοναδικό ούτε περιγράφει το μηχανισμό της ανάστροφης πόλωσης με απόλυτη ακρίβεια για όλους τους τύπους των (κρυσταλλικών) Φ/Β κελιών. Στο [40] γίνεται αναφορά στη σημαντική διαφοροποίηση που μπορεί να υπάρξει στα χαρακτηριστικά των Φ/Β κελιών στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης και στην κατηγοριοποίηση των Φ/Β κελιών σε τύπου A (type A) και σε τύπου B (type B), ανάλογα με το πώς η χαρακτηριστική στην ανάστροφη πόλωση, τέμνει μία συγκεκριμένη ζώνη ορίων. Βάσει αυτής της διαφοροποίησης, γίνεται στο [47] αναφορά στο μοντέλο ανάστροφης πόλωσης που φαίνεται να πρωτοπαρουσιάστηκε από τους *Spirito* και *Abergamo*, οι οποίοι χρησιμοποίησαν διαφορετικές εξισώσεις για να περιγράψουν την ανάστροφη πόλωση στα κελιά τύπου A και B. Στο [47] παρουσιάζεται επίσης μοντέλο από την βιβλιογραφία (*Lopez Pineda*), βάσει του οποίου γίνεται διαχωρισμός των ανάστροφων I-V χαρακτηριστικών σε καμπύλες τύπου I, II και III (*type-I, type-II, type-III curves*) και παρουσιάζεται επίσης η αντίστοιχη (ενιαία και για τις τρεις περιπτώσεις) εξίσωση I-V στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης, όμοια με αυτή των *Spirito* και *Abergamo*. Στο ίδιο το [47] παρουσιάζεται ένα νέο, ενδιαφέρον μοντέλο το οποίο σύμφωνα με τους συγγραφείς δίνει καλά αποτελέσματα για τα κρυσταλλικά Φ/Β κελιά στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στην εργασία που παρουσιάστηκε στο [47]. Στην παρούσα εργασία ωστόσο, χρησιμοποιείται το μοντέλο του *Bishop* που φέρεται να είναι το πιο διαδεδομένο και ανεξάρτητο του τύπου των Φ/Β κελιών.

Πρέπει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι στο [46] που παρουσιάζεται το μοντέλο του *Bishop*, η παράμετρος I_1 φαίνεται να μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 0 και 1 ($1 \geq I_1 \geq 0$), ενώ

η παράμετρος I_2 που αποκαλείται *avalanche breakdown exponent*, έχει περιορισμούς στις τιμές που λαμβάνει $4 > I_2 > 3.4$ και οι οποίοι προκύπτουν από το παλαιότερο [51]. Υπό αυτήν την έννοια, διαφαίνεται ότι η παράμετρος I_2 είναι μάλλον ο λεγόμενος εκθέτης *Miller* (*Miller exponent*) από το όνομα του συγγραφέα του [51]. Αντιθέτως, το εύρος τιμών της παραμέτρου I_2 που αναφέρεται στο [50] είναι $10 \geq I_2 \geq 1$ παρόλο που στη συγκεκριμένη αναφορά χρησιμοποιείται το μοντέλο των δύο διόδων (ο μηχανισμός όμως της διάσπασης χιονοστιβάδας είναι κοινός). Σε κάθε περίπτωση, πολλές φορές πλέον οι δύο αυτοί παράμετροι χρησιμοποιούνται χωρίς ιδιαίτερος περιορισμούς περισσότερο σαν παράμετροι προσαρμογής (*fitting parameters*) χωρίς κατ' ανάγκη να έχουν κάποια φυσική σημασία. Ωστόσο στην συγκεκριμένη εργασία, περιορίζονται σε τιμές $6 \geq I_2 \geq 2$ [52] και $1 \geq I_1 \geq 0$.

Συνήθως ένα μη ελαττωματικό Φ/Β κελί μπορεί να λειτουργήσει στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης όταν βρίσκεται υπό συνθήκες σκίασης, συμπεριλαμβανομένης και της περίπτωσης απόθεσης περιττωμάτων πτηνών στην επιφάνειά του, και όχι όταν βρίσκεται υπό φυσιολογικές συνθήκες. Το ερώτημα βέβαια που τίθεται είναι τι γίνεται στην περίπτωση της μερικής σκίασης (*partial shading*) ενός Φ/Β κελιού, που είναι και το σύνηθες στην πράξη. Σε αυτή την περίπτωση, αν συμβολιστεί ως A_{cell} η συνολική επιφάνεια του Φ/Β κελιού, ως $A_{pc.cov}$ η σκιασμένη ή καλυμμένη επιφάνεια του Φ/Β κελιού και ως $A_{pc.ill}$ η επιφάνεια του Φ/Β που δέχεται (και) απευθείας ακτινοβολία, ισχύει:

$$A_{cell} = A_{pc.cov} + A_{pc.ill}$$

Στην πραγματικότητα, το σκιασμένο μέρος του Φ/Β κελιού δέχεται ανακλώμενη και διάχυτη ακτινοβολία, αλλά όχι απευθείας. Στην περίπτωση βέβαια κάλυψης του κελιού, λόγω π.χ. περιττωμάτων, το καλυμμένο μέρος δέχεται σχεδόν μηδενική ακτινοβολία. Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται ότι και τα δύο μέρη (καλυμμένο και μη) του Φ/Β κελιού έχουν στα άκρα τους την ίδια τάση, η οποία μπορεί να υπολογιστεί για δεδομένες συνθήκες με τον εξής τρόπο: Η κοινή τάση των δύο μερών του Φ/Β κελιού (τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως δύο ξεχωριστά Φ/Β κελιά συνδεδεμένα παράλληλα), προκύπτει από την I-V χαρακτηριστική ενός τυπικού Φ/Β κελιού που ανήκει στο Φ/Β πάνελ και του οποίου το φωτόρευμα $I_{L,eq}$ σε συμφωνία και με το [53] είναι τέτοιο ώστε:

$$I_{L,eq} = \left((A_{cell} - A_{pc.cov}) / A_{cell} \right) \times A_{cell} \times J_{L,pc.ill}$$

δηλαδή ουσιαστικά είναι ίσο με το φωτόρευμα του μη καλυμμένου Φ/Β κελιού, αν το καλυμμένο μέρος του Φ/Β κελιού και το μη καλυμμένο, θεωρηθούν δύο ξεχωριστά Φ/Β κελιά συνδεδεμένα παράλληλα:

$$I_{L,eq} = I_{L,pc.cov} \quad (3.38)$$

Η συνολική ισχύς που παράγεται (ή καταναλώνεται για αρνητικό πρόσημο) σε ολόκληρο το μερικώς σκιασμένο Φ/Β κελί, θεωρείται ίση με το γινόμενο $I_{eq} \times V_{eq}$ [53]. Η συνολική αυτή

ισχύς όμως, δεν κατανέμεται εξίσου στα δύο μέρη του Φ/Β κελιού. Το καλυμμένο τμήμα καταναλώνει ισχύ $I_{pc.cov} \times V_{eq}$ και το μη καλυμμένο $I_{pc.ill} \times V_{eq}$. Φυσικά ισχύει ότι:

$$(I_{pc.cov} + I_{pc.ill}) \times V_{eq} = I_{eq} \times V_{eq} \quad (3.39)$$

3.2.3 Λειτουργία της διόδου bypass

Επιστρέφοντας στην εξίσωση (3.36), ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει την ύπαρξη τριών νέων παραμέτρων. Οι παράμετροι I_1, I_2 θεωρούνται σταθερές, ενώ η V_{br} είναι η τάση διάσπασης της ένωσης η οποία πολλές φορές λαμβάνεται σαν απόλυτη τιμή και όχι με το αρνητικό πρόσημο (π.χ. αντί για $V_{br} = -12 [V]$, θεωρείται $V_{br} = 12 [V]$). Οι παράμετροι αυτοί αυξάνουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος, αυξάνοντας των αριθμό των παραμέτρων από 7 (θεωρώντας το μοντέλο των 7 παραμέτρων) σε 10.

Οι κατασκευαστές Φ/Β πάνελ δεν δίνουν στοιχεία σχετικά με τα χαρακτηριστικά των Φ/Β κελιών που χρησιμοποιούνται για τα πάνελ τους στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης, παρόλο που ούτως ή άλλως υπάρχουν όπως έχει προαναφερθεί διαφορές μεταξύ κελιών που αποτελούν το ίδιο πάνελ στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης. Σε κάθε περίπτωση για τον προσδιορισμό των νέων παραμέτρων είναι απαραίτητες μετρήσεις στο προς μοντελοποίηση Φ/Β κελί, κάτι το οποίο τις περισσότερες φορές είναι αδύνατο για τους σχεδιαστές, εγκαταστάτες, συντηρητές ή ελεγκτές της απόδοσης Φ/Β συστημάτων, και καθόσον αυτές οι μετρήσεις - στοιχεία σπάνια παρέχονται από τους κατασκευαστές, είναι φανερό ότι η συμπεριφορά των κελιών στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης είναι συνήθως άγνωστη.

Όσον αφορά στην τάση διάσπασης, είναι απαραίτητες μετρήσεις κοντά στην περιοχή διάσπασης, χωρίς βέβαια για λόγους ασφάλειας του κελιού, να πλησιάζει πολύ η τάση αυτήν της διάσπασης. Ακόμα και αν συμβεί κάτι τέτοιο η διάρκεια κατά την οποία παραμένει η μετρούμενη τάση κοντά στην τάση διάσπασης πρέπει να είναι πολύ μικρή. Στο [47] παρουσιάζεται ένας «ασφαλής» τρόπος υπολογισμού της τάσης διάσπασης που χρησιμοποιείται και στο [48], σε κάθε περίπτωση όμως είναι απαραίτητες μετρήσεις στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης, τόσο για τον υπολογισμό της τιμής της τάσης διάσπασης, όσο και για τον υπολογισμό των εναπομεινάντων παραμέτρων I_1, I_2 .

Στην πράξη, τα Φ/Β πάνελ διαθέτουν διόδους *bypass* στα *junction boxes*, οι οποίες έχουν ως στόχο να εμποδίζουν τη δημιουργία υψηλών τάσεων στα Φ/Β κελιά στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης. Υψηλή τάση σε ένα Φ/Β κελί στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης μπορεί να δημιουργηθεί εξαιτίας σκιάσεων ή γενικότερης ανομοιομορφίας και έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας από το Φ/Β κελί. Αν αυτή η καταναλισκόμενη ενέργεια συγκεντρώνεται τοπικά σε σημεία στο Φ/Β κελί, μπορεί να οδηγήσει, σε τοπική αύξηση της θερμοκρασίας και εν συνεχεία πιθανόν στην καταστροφή του Φ/Β κελιού ή και ολόκληρου του πάνελ (εικόνες 3-5,3-6).

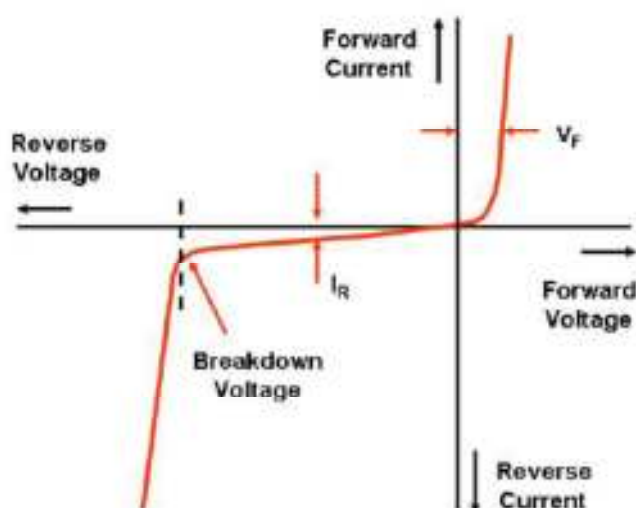


Εικόνα 3-5: Καταστροφή Φ/Β πάνελ (αποκόλληση = *delamination*) εξαιτίας δημιουργίας θερμών κηλίδων

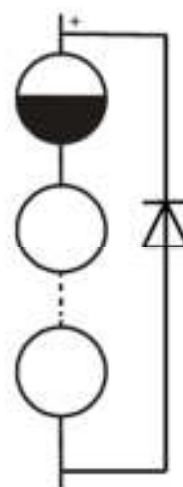


Εικόνα 3-6: Αποκόλληση-τήξη στο πίσω μέρος του ίδιου με την εικόνα 3-5 Φ/Β πάνελ

Η πιο δυνατή αντοχή σε σκιάσεις θα μπορούσε να επιτευχθεί αν τοποθετούνταν δίοδοι παράλληλα σε κάθε κελί, αλλά συνήθως για εργοστασιακούς λόγους οι δίοδοι bypass ενώνονται παράλληλα με ομάδες των 18 με 20 κελιών [5]. Σε κάθε περίπτωση, μία σωστά επιλεγμένη bypass δίοδος καθ' όλη τη διάρκεια φυσιολογικής λειτουργίας της πρέπει θεωρητικά να εμποδίζει κάθε Φ/Β κελί από το σύνολο των Φ/Β κελιών που προστατεύει, από το να πλησιάσει στην περιοχή της τάσης διάσπασης. Συνήθως ως δίοδοι bypass χρησιμοποιούνται δίοδοι τύπου Schottky. Ιδανικά μία bypass δίοδος πρέπει να έχει χαμηλή τάση κατά την ορθή πόλωση (μικρή κατανάλωση ισχύος) και χαμηλή τιμή ανάστροφου ρεύματος [54] (μικρές διαρροές κατά την κανονική λειτουργία της στοιχειοσειράς (string) που προστατεύει). Πρέπει δηλαδή, η συμπεριφορά της να είναι κατά το δυνατό κοντά στην συμπεριφορά της ιδανικής διόδου. Στο σχήμα 3-7 [55] απεικονίζεται μία τυπική I-V χαρακτηριστική μίας bypass διόδου, που στη γενικότερη μορφή της είναι παρόμοια με την I-V χαρακτηριστική μίας τυπικής διόδου ένωσης p-n, ενώ στο σχήμα 3-8 απεικονίζεται μία κλασική τυπολογία στοιχειοσειράς από N_s κελιά που προστατεύονται από μία δίοδο bypass. Τα Φ/Β πάνελ που χρησιμοποιούνται αυτήν τη στιγμή περισσότερο στα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα αποτελούνται από 60 ή 72 κελιά συνδεδεμένα σε σειρά και συνήθως είναι $N_s = 20$ ή 24 αντίστοιχα, δηλαδή διαθέτουν τρεις (3) bypass δίοδους, προστατευμένες εντός του junction box του Φ/Β πάνελ.



Σχήμα 3-7



Σχήμα 3-8

Σε περίπτωση που όλα τα Φ/Β κελιά που προστατεύονται από τη δίοδο bypass, είναι πολωμένα ορθά, η bypass δίοδος είναι πολωμένη ανάστροφα και στην ιδανική περίπτωση, δεν άγει, ενώ στην πραγματικότητα διαρρέεται από ένα μικρό ανάστροφο ρεύμα. Όταν ένα ή περισσότερα κελιά βρίσκονται υπό συνθήκες σκίασης πιθανότατα θα διέλθουν στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης με αποτέλεσμα σταδιακά η δίοδος να οδεύει προς την δική της περιοχή ορθής πόλωσης. Για οποιοδήποτε επίπεδο ακτινοβολίας η μέγιστη ισχύς που μπορεί να καταναλωθεί από το σκιασμένο κελί, αντιστοιχεί σε τάση $V_{shad} = -(N_s - 1) * V_{cell}$ στα άκρα του, που αφορά στην περίπτωση βραχυκυκλώσεως των άκρων της στοιχειοσειράς [40], όπου με V_{cell} συμβολίζεται η τάση στα άκρα των υπό συνθήκες μη σκίασης κελιών και

θεωρείται κοινή σε όλα. Ακόμα και αν τείνει να αναπτυχθεί αρνητική συνολικά τάση στη στοιχειοσειρά, αυτό θα σημαίνει ότι αρχίζει να άγει η δίοδος. Η σωστά επιλεγμένη δίοδος bypass, πρέπει να ικανοποιεί όσον αφορά στο μέγιστο αριθμό κελιών που μπορεί να προστατέψει, βάσει του [54] την ανισότητα:

$$N_s \leq \frac{-V_{br} - V_F}{V_{oc,cell}} + 1 \quad (3.40)$$

όπου $V_{oc,cell}$ η τάση ανοικτοκυκλώματος στα άκρα του καθενός από τα υπό συνθήκες μη σκίασης κελιά και V_F η τάση της διόδου bypass στην περιοχή της ορθής πόλωσης, η οποία εξαρτάται κυρίως από το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο, τη θερμοκρασία και φυσικά την ίδια τη δίοδο. Για αντιπροσωπευτικές (βάσει συνθηκών) τιμές κελιών $V_{oc,cell} \approx 0.5 [V]$, διόδου bypass $V_F \approx 0.5 [V]$ και $V_{br} = -12 [V]$ [54] η (3.40) δίνει την ανισότητα $N_s \leq 24$ αντιπροσωπευτική όπως προαναφέρθηκε για τον αριθμό των κελιών που προστατεύονται από μία bypass δίοδο στα συνήθη εμπορικά διαθέσιμα για διασυνδεδεμένα συστήματα, τουλάχιστον στην Ευρώπη, Φ/Β πάνελ (π.χ. για 72 ή 60 Φ/Β κελιά, 3 bypass δίοδοι).

Από τα παραπάνω, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η χαρακτηριστική του Φ/Β κελιού, σε περίπτωση που η δίοδος bypass λειτουργεί χωρίς προβλήματα, δεν μπορεί να πλησιάσει την τάση αποκοπής, και συνεπώς δεν είναι και τόσο κρίσιμη η γνώση της τάσης αποκοπής, αλλά απλά η μοντελοποίηση της I-V καμπύλης στην ανάστροφη πόλωση, στα σημεία εκείνα που λειτουργεί το Φ/Β κελί. Για να ισχύει όμως κάτι τέτοιο, είναι απαραίτητο η δίοδος να λειτουργεί χωρίς προβλήματα και να έχει τέτοια χαρακτηριστικά ώστε τα Φ/Β κελιά που προστατεύει να μην πλησιάζουν κατά τη λειτουργία τους την τάση αποκοπής. Στην πράξη, η δίοδος να μην ενδεχομένως να λειτουργεί χωρίς προβλήματα, αλλά πιθανόν να μην μπορεί να προστατέψει όλα τα κελιά, ειδικά στην περίπτωση που κάθε ένα από αυτά σκιάζεται ή καλύπτεται μεμονωμένα. Αυτό συμβαίνει διότι κάθε κελί πιθανότατα έχει τη δική του χαρακτηριστική στην ανάστροφη πόλωση και αυτό ίσως ισχύει και για όλα τα κελιά του ίδιου Φ/Β πάνελ. Συνεπώς ενδεχομένως για παράδειγμα για τα κελιά Α και Β της ίδιας στοιχειοσειράς εντός του Φ/Β πάνελ, να ισχύει π.χ. $V_{br,A} = -14 [V]$ και $V_{br,B} = -10 [V]$ ενώ για τα υπόλοιπα π.χ. 22 κελιά, να είναι $V_{br,\Gamma} = -12 [V]$. Για αντιπροσωπευτικές (βάσει συνθηκών) τιμές κελιών $V_{oc,cell} \approx 0.5 [V]$ και διόδου bypass $V_F \approx 0.5 [V]$ και $N_s = 24$, από την (3.40) προκύπτει: $V_{oc,cell}(N_s - 1) + V_F \leq -V_{br} \Leftrightarrow 12 \leq -V_{br}$, επομένως το κελί Β δεν μπορεί να προστατευτεί

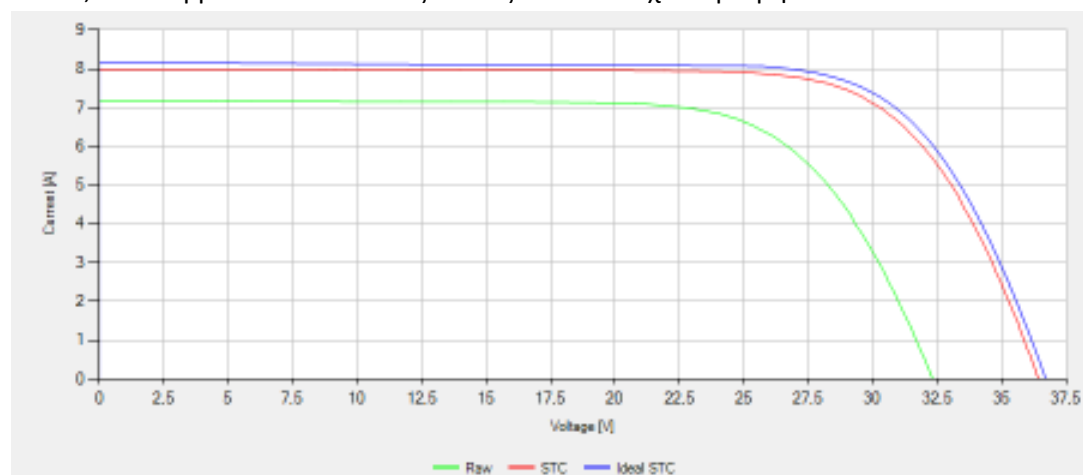
3.3 Αξιολόγηση μοντέλου στην περιοχή της ορθής και της ανάστροφης πόλωσης

Στην εικόνα 3-7 απεικονίζεται μία εξαγόμενη I-V χαρακτηριστική σε συνθήκες έντασης ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας $898 [W/m^2]$, σχεδόν κάθετη πρόσπτωση, υπό συνθήκες καθαρού ουρανού και με μέση θερμοκρασία κελιού $55.1^\circ C$ και σχετική άπνοια,

κάνοντας χρήση του οργάνου SOLAR-4000. Οι χαρακτηριστικές τιμές για το Φ/Β πάνελ που χρησιμοποιήθηκε βάσει των τιμών του κατασκευαστή, ήταν οι παρακάτω:

Πίνακας 3-2		
Μέγιστη ισχύς $P_m [W]$	222.51 0/+3%	
Τάση ανοικτοκυκλώματος $V_{oc} [V]$	36.71	
Ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc} [A]$	8.16	
Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) $V_m [V]$	29.21	
Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) $I_m [A]$	7.62	
Θερμοκρασιακός Συντελεστής	V_{oc}	$-0.35 \rightarrow -0.37 [\% / ^\circ C]$
	I_{sc}	$0.03 \%/ ^\circ C$
	P_m	$-0.43 \rightarrow -0.47 [\% / ^\circ C]$

Για την ακρίβεια, οι τιμές των $P_m, V_m, I_m, V_{oc}, I_{sc}$ προέρχονται από την ετικέτα του κατασκευαστή που είναι επικολλημένη στο πίσω μέρος του Φ/Β πάνελ (εικόνα 3-8), ενώ οι τιμές των θερμοκρασιακών συντελεστών προέρχονται από το αντίστοιχο τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή, μειωμένες όσον αφορά στο θερμοκρασιακό συντελεστή ισχύος και τάσης ανοικτοκυκλώματος, σε ελαφρώς πιο «ρεαλιστικές» τιμές για το συγκεκριμένο Φ/Β πάνελ, που βρίσκονται πάντως εντός των ανοχών μετρήσεων του κατασκευαστή.



Εικόνα 3-7

Το συγκεκριμένο πάνελ, δεν είναι προβληματικό καθότι η αναγόμενη καμπύλη σε συνθήκες STC συμφωνεί ικανοποιητικά με την ιδανική καμπύλη και η όποια απόκλιση θα μπορούσε να οφείλεται μεταξύ άλλων και σε σφάλματα μετρήσεων, σε σφάλματα στην αναγωγή ή και σε αβεβαιότητα στις τιμές των τεχνικών χαρακτηριστικών του κατασκευαστή. Εξάλλου, ενδεχόμενη πραγματική υποβάθμιση μπορεί να οφείλεται και στην ελαφρά παλαιότητα του συγκεκριμένου Φ/Β πάνελ.



Εικόνα 3-8

3.3.1 Αξιολόγηση του μοντέλου στην περιοχή της ορθής πόλωσης

Υπενθυμίζεται στον αναγνώστη, ότι η καμπύλη πράσινου χρώματος στην εικόνα 3-7, εξήχθη μετά από μετρήσεις που διεξήχθησαν με το όργανο SOLAR-4000. Η καμπύλη κόκκινου χρώματος, είναι η αναγόμενη καμπύλη STC που υπολογίζεται από το όργανο. Η καμπύλη μπλε χρώματος είναι η ιδανική καμπύλη σε συνθήκες STC του πάνελ που υπολογίζεται πάλι από το όργανο SOLAR-4000 βάσει των δεδομένων του πίνακα 3-2 που εισάγει ο χρήστης του οργάνου. Πρέπει να επισημανθεί δε ξανά, ότι για να κάνει το όργανο το λεγόμενο “translation” από τις κανονικές συνθήκες στις συνθήκες STC με ικανοποιητική ακρίβεια, πρέπει οι δύο αυτές διαφορετικές συνθήκες, να βρίσκονται σχετικά κοντά, ιδιαίτερα όσον αφορά στην ακτινοβολία. Στην περίπτωση των μετρήσεων που αντιστοιχούν στην εικόνα 3-7, οι δύο αυτές διαφορετικές συνθήκες ήταν ικανοποιητικά «κοντά» και συνεπώς η καμπύλη κόκκινου χρώματος μπορεί να θεωρείται ως η καμπύλη του συγκεκριμένου πάνελ σε συνθήκες STC.

3.3.1.1 Αξιολόγηση του μοντέλου στην περιοχή της ορθής πόλωσης σε συνθήκες STC, βάσει των τιμών των τεχνικών χαρακτηριστικών που παρέχει ο κατασκευαστής - Πραγματική καμπύλη σε STC

Η επίλυση των εξισώσεων που αναφέρονται στην ενότητα 3.2.1 στη ρουτίνα που υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα *Matlab R2012b*, με βάση τα δεδομένα του πίνακα 3-2, έδωσε όσον αφορά στην περίπτωση της ορθής πόλωσης και στις συνθήκες STC, τις εξής τιμές των παραμέτρων⁸:

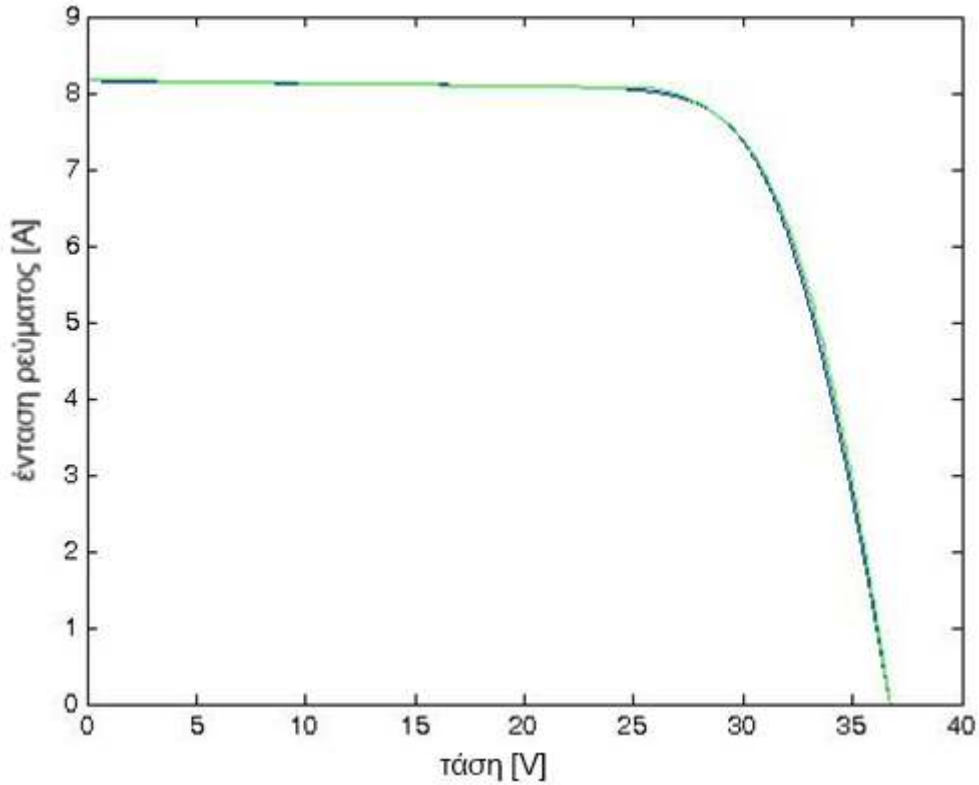
⁸ Παραπλήσιες τιμές εξάγονται και μέσω του *Engineering Equation Solver(EES)* που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των 5 παραμέτρων από το λογισμικό που είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα <http://sel.me.wisc.edu/software.shtml>

$$\begin{aligned}
I_{L,STC}^{ideal} &\approx 8.171 \text{ A}, \quad I_{o,STC}^{ideal} \approx 0.379 \times 10^{-9} \text{ A} \\
a_{STC}^{ideal} &\approx 1.544 \text{ V}, \quad R_{s,STC}^{ideal} \approx 0.397 \text{ } \Omega \\
R_{sh,STC}^{ideal} &\approx 302.6 \text{ } \Omega, \quad \psi_{STC}^{ideal} \approx -1.31 \times 10^{-3} \text{ [K}^{-1}\text{]} \\
m_{STC}^{ideal} &\approx -0.477
\end{aligned}$$

Η τιμή του τροποποιημένου συντελεστή ιδανικότητας της διόδου a_{STC}^{ideal} , αντιστοιχεί σε ελαφρώς μεγαλύτερη της μονάδας τιμή του συντελεστή ιδανικότητας της διόδου η_{STC}^{ideal} , γεγονός που είναι αποδεκτό από τη φυσική σκοπιά του θέματος. Ωστόσο, κάποιες φορές, μπορεί από τις εξισώσεις αυτές να ληφθεί τιμή ελαφρώς μικρότερη της μονάδας (π.χ. $\eta \approx 0.975$). Αυτό να μην είναι αποδεκτό όσον αφορά στη φυσική του ερμηνεία, αλλά πριν απορριφθεί η αντίστοιχη λύση, πρέπει τουλάχιστον να ληφθούν υπόψη οι ανοχές μετρήσεων που αναφέρονται στα φυλλάδια τεχνικών χαρακτηριστικών ή τα σφάλματα μετρήσεων. Σε περίπτωση που η τιμή αυτή είναι μικρότερη της μονάδας, μπορούν βάσει των ανοχών μετρήσεων να θεωρηθούν οι τιμές των αρχικών εισόδων και ιδιαίτερα του θερμοκρασιακών συντελεστών προς το χειρότερο, και με αυτόν τον τρόπο πιθανότατα θα ληφθεί τιμή μεγαλύτερη της μονάδας. Σε κάθε περίπτωση όμως, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το γεγονός ότι κατά την επίλυση των εξισώσεων της ενότητας 3.2.1, η αντίστοιχη τιμή του συντελεστή ιδανικότητας της διόδου, ουσιαστικά είναι μία παράμετρος προσαρμογής (*fitting parameter*) της I-V καμπύλης. Αξιοσημείωτη επίσης είναι η αρνητική τιμή του ψ_{STC}^{ideal} , που δείχνει ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας η σειριακή αντίσταση μειώνεται ελαφρώς.

Ο λόγος των συντελεστών απόδοσης που θεωρήθηκε για το συγκεκριμένο Φ/Β πάνελ (σχέση (3.31)) ήταν 95% που είναι μία τυπική τιμή. Η τιμή αυτή πάντως επηρεάζει μόνο στον υπολογισμό της παραμέτρου m , η οποία (όπως και η παράμετρος ψ) δεν παίζει ρόλο στο χαρακτηρισμό του μοντέλου στην περιοχή της ορθής πόλωσης σε δεδομένες συνθήκες (π.χ. συνθήκες STC). Τόσο η παράμετρος m όμως όσο και η ψ είναι απαραίτητες για την αναγωγή από τις συνθήκες αναφοράς σε άλλες διαφορετικές συνθήκες.

Στην εικόνα 3-9 απεικονίζεται η καμπύλη I-V όπως δημιουργήθηκε στο Matlab βάσει των παραπάνω τιμών και της εξίσωσης (3.7) (με μπλε χρώμα), συγκρινόμενη με την αντίστοιχη “ιδανική STC” καμπύλη που εξήγαγε το ίδιο το όργανο (μπλε χρώμα στην εικόνα 3-8, στην εικόνα 3-9 είναι χρωματισμένη με πράσινο χρώμα). Οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται.



Εικόνα 3-9

Το συγκεκριμένο πάνελ όμως, δεν έχει την ιδανική (σύμφωνα με τα στοιχεία της εικόνας 3-8) καμπύλη STC. Η αναγόμενη καμπύλη σε STC συνθήκες (κόκκινο χρώμα στην εικόνα 3-7) αντιστοιχεί σε ένα σύνολο ζευγών τάσης, ρεύματος. Χρησιμοποιώντας τουλάχιστον 5 σημεία της I-V καμπύλης, είναι δυνατή η δημιουργία ενός συστήματος 5 εξισώσεων-5 αγνώστων βάσει της εξίσωσης (3.7) με απώτερο σκοπό την επίλυσή του και την εύρεση των 5 (πραγματικών) παραμέτρων στις συνθήκες STC.

Δηλαδή, δεδομένων 5 ζευγών $(I_1, V_1), (I_2, V_2), (I_3, V_3), (I_4, V_4), (I_5, V_5)$, αναζητείται η λύση του συστήματος:

$$\begin{cases} I_1 = I_L - I_o \left(e^{\frac{V_1 + I_1 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V_1 + I_1 R_s}{R_{sh}} \\ I_2 = I_L - I_o \left(e^{\frac{V_2 + I_2 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V_2 + I_2 R_s}{R_{sh}} \\ I_3 = I_L - I_o \left(e^{\frac{V_3 + I_3 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V_3 + I_3 R_s}{R_{sh}} \\ I_4 = I_L - I_o \left(e^{\frac{V_4 + I_4 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V_4 + I_4 R_s}{R_{sh}} \\ I_5 = I_L - I_o \left(e^{\frac{V_5 + I_5 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V_5 + I_5 R_s}{R_{sh}} \end{cases}$$

Το παραπάνω σύστημα μπορεί να επιλυθεί με αριθμητικές μεθόδους, όπως και αυτό της ενότητας 3.2.1. Σε αυτό το πλαίσιο, μπορούν να θεωρηθούν οι συναρτήσεις:

$$\begin{cases} f_1 = -I_1 + I_L - I_o \left(e^{\frac{V_1 + I_1 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V_1 + I_1 R_s}{R_{sh}} \\ f_2 = -I_2 + I_L - I_o \left(e^{\frac{V_2 + I_2 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V_2 + I_2 R_s}{R_{sh}} \\ f_3 = -I_3 + I_L - I_o \left(e^{\frac{V_3 + I_3 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V_3 + I_3 R_s}{R_{sh}} \\ f_4 = -I_4 + I_L - I_o \left(e^{\frac{V_4 + I_4 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V_4 + I_4 R_s}{R_{sh}} \\ f_5 = -I_5 + I_L - I_o \left(e^{\frac{V_5 + I_5 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V_5 + I_5 R_s}{R_{sh}} \end{cases}$$

και ουσιαστικά να αναζητηθεί εκείνη η πεντάδα παραμέτρων I_L, R_s, R_{sh}, I_o, a η οποία ελαχιστοποιεί το άθροισμα: $f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + f_4^2 + f_5^2$.

Τα (τουλάχιστον) 5 σημεία που μπορούν να επιλεγούν καλό είναι να βρίσκονται κοντά ή και σχεδόν να ταυτίζονται με τα εξής 5 χαρακτηριστικά σημεία του μοντέλου της Sandia:

- $(0, V_{oc})$
- $(I_{sc}, 0)$
- (I_m, V_m)
- $\left(I_x, \frac{1}{2} V_{oc} \right)$
- $\left(I_{xx}, \frac{1}{2} (V_{oc} + V_m) \right)$

Στο πλαίσιο αυτό, επιλέχθηκαν τα παρακάτω σημεία μετρήσεων:

Πίνακας 3-3	
I [A]	V [V]
7,983	0
0	36,45
7,44	28,98
7,92	17,43
5,31	32,57

και για την εξαγωγή των m, ψ χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές θερμοκρασιακών συντελεστών για το μέγιστο ρεύμα και τη μέγιστη ισχύ του πίνακα 3-2. Έτσι ελήφθησαν οι εξής τιμές:

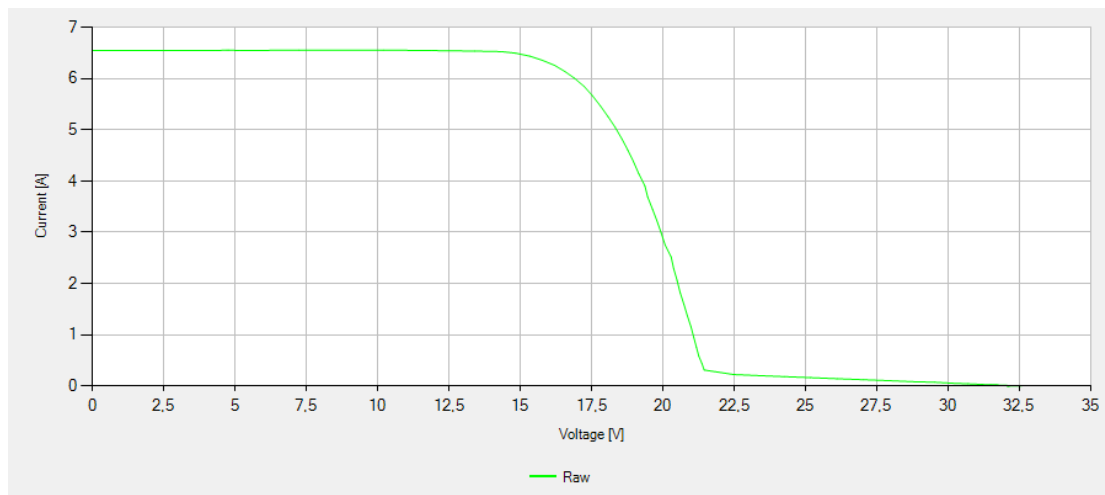
$$I_{L,STC}^{real} \approx 7.995 \text{ A}, \quad I_{o,STC}^{real} \approx 0.482 \times 10^{-9} \text{ A}, \quad a_{STC}^{real} \approx 1.550 \text{ V},$$

$$R_{s,STC}^{real} \approx 0.403 \text{ } \Omega, \quad R_{sh,STC}^{real} \approx 277.5 \text{ } \Omega, \quad \psi_{STC}^{real} \approx -2.28 \times 10^{-3} \text{ [K}^{-1}\text{]},$$

$$m_{STC}^{real} \approx -0.459$$

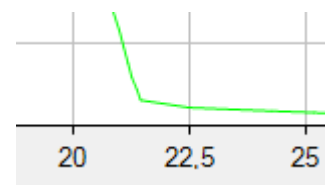
3.3.2 Αξιολόγηση του μοντέλου στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης

Η χαρακτηριστική καμπύλη για το ίδιο πάνελ, σε συνθήκες παρόμοιες με τις προηγούμενες της εικόνας 3-7 ($875 \text{ W/m}^2, 53.1^\circ\text{C}$) και με ένα Φ/Β κελί πλήρως καλυμμένο από αδιαπέραστο υλικό, απεικονίζεται στην εικόνα 3-10. Η κατάσταση αυτή (κάλυψη με αδιαπέραστο από την ηλιακή ακτινοβολία υλικό) δεν προσομοιώνει απόλυτα την περίπτωση σκίασης της ίδιας επιφάνειας. Αυτό συμβαίνει αφενός διότι στην περίπτωση κανονικής σκίασης ένα ποσό ανακλώμενης και διάχυτης ακτινοβολίας προσπίπτει σε και απορροφάται από το σκιασμένο Φ/Β κελί και αφετέρου διότι με το κάλυμμα εμποδίζεται εν μέρει η απαγωγή θερμότητας από το Φ/Β κελιού, γεγονός το οποίο δεν επηρεάζει τόσο σε περίπτωση που μεσολαβεί μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ της κάλυψης και των μετρήσεων.



Εικόνα 3-10

Στο διπλανό σχήμα, παρουσιάζεται σε μεγέθυνση η περιοχή γύρω από την τάση 21,45 V κοντά στην οποία η bypass διάδος που προστατεύει την υποομάδα-string στην οποία ανήκει το καλυμμένο Φ/Β κελί σταματάει να άγει. Είναι εμφανές το γόνατο που δημιουργείται στην καμπύλη.



Από τη καμπύλη της εικόνας 3-10 φαίνεται να είναι εφικτό με τέτοιου είδους πειράματα-μετρήσεις χωρίς την παρουσία bypass διόδων, να εξαχθεί μέρος της χαρακτηριστικής του καλυμμένου Φ/Β κελιού στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης. Στη συγκεκριμένη εργασία αφαιρέθηκαν οι bypass δίοδοι και διεξήχθησαν παρόμοιες με την παραπάνω μετρήσεις (πλήρης κάλυψη Φ/Β κελιού).

Δεδομένου ότι δεν είναι δυνατό τέτοιου είδους μετρήσεις να γίνονται σε κάθε Φ/Β πάνελ και σε κάθε Φ/Β κελί, μπορεί να γίνει μία γενίκευση και να θεωρηθεί ότι τα Φ/Β κελιά ενός συγκεκριμένου μοντέλου Φ/Β πάνελ, έχουν την ίδια I-V χαρακτηριστική σε όλο το εύρος. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι I_1, I_2, V_{br} στην εξίσωση (3.36). Οι λοιπές παράμετροι στην εξίσωση (3.36), θεωρούνται ίδιες σε όλα τα ακάλυπτα και διαφορετικές άλλα ίδιες μεταξύ τους στα καλυμμένα κελιά: $I_L^{ill}, I_o^{ill}, a^{ill}, R_s^{ill}, R_{sh}^{ill}$ και $I_L^{cov}, I_o^{cov}, a^{cov}, R_s^{cov}, R_{sh}^{cov}$ αντίστοιχα.

Βάσει της σχέσης (3.22), προκύπτει ότι $R_{sh}^{cov} \rightarrow +\infty$, σε περίπτωση που ένα κελί δεν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία. Πρακτικά όμως, η υιοθέτηση της τιμής $R_{sh}^{cov} \rightarrow +\infty$ δε μπορεί να γίνει αποδεκτή. Άλλωστε κάτι τέτοιο θα καθιστούσε μηδενική την παράσταση:

$$\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \left[1 + I_1 \left(1 - \frac{V + IR_s}{V_{br}} \right)^{-I_2} \right]$$

στην (3.36) και θα ήταν αδύνατη η εύρεση των παραμέτρων I_1, I_2, V_{br} . Εξάλλου, όπως αναφέρθηκε στην υποσημείωση 6, η (3.22) χάνει την ακρίβεια της καθώς οι συνθήκες “απομακρύνονται” από τις συνθήκες αναφοράς. Έτσι η παράμετρος αυτή θεωρείται άγνωστη και προς εκτίμηση. Ωστόσο, οι παράμετροι $I_L^{ill}, I_o^{ill}, a^{ill}, R_s^{ill}, R_{sh}^{ill}$ μπορούν να υπολογιστούν βάσει όσων αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.2.1, αφού ληφθεί υπόψη ότι αφορούν σε ένα κελί και όχι σε ένα Φ/Β πάνελ. Επίσης ισχύει $I_L^{cov} = 0$. Ακόμα θεωρώντας ότι για

$$G_T \rightarrow 0 \Rightarrow \left(\frac{G_T}{G_{ref}} \right)^m \rightarrow 1$$

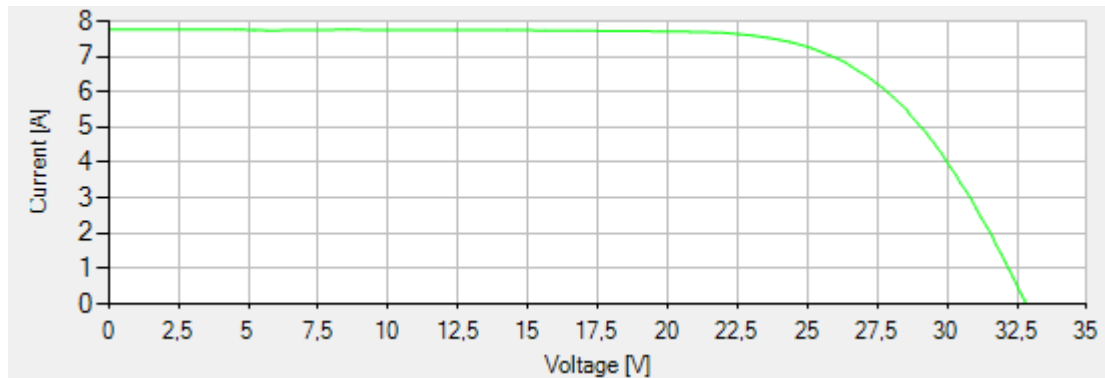
η (3.18) ανάγεται στην πιο γνωστή σχέση [17,24]:

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \left(e^{\frac{E_{g,ref}}{k_{ev} T_{ref}}} - e^{\frac{E_g}{k_{ev} T_c}} \right) \quad (3.41)$$

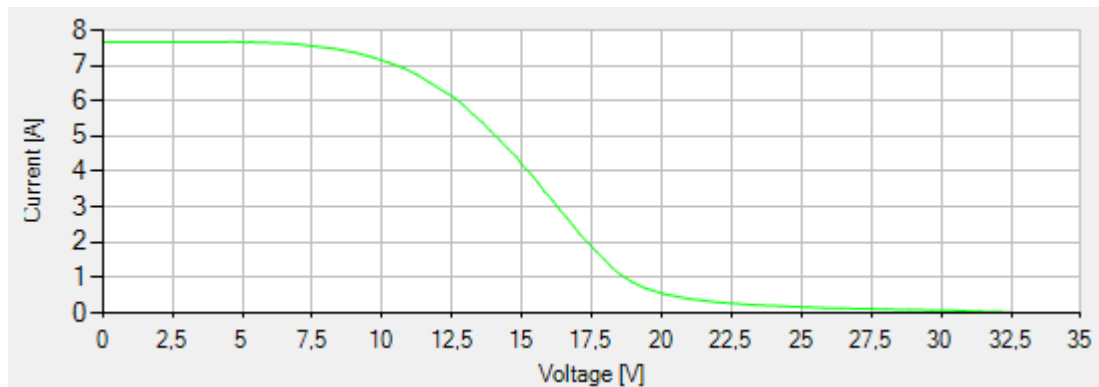
από όπου μπορεί να προκύψει η τιμή I_o^{cov} . Για τον υπολογισμό των a^{cov}, R_s^{cov} , χρησιμοποιούνται κατά τα γνωστά οι σχέσεις (3.21) και (3.23).

Αναλυτικότερα, αρχικά αφαιρέθηκαν από το junction box του παραπάνω πάνελ οι τρεις δίοδοι bypass και στη συνέχεια μετρήθηκε η αντίστοιχη I-V χαρακτηριστική του Φ/Β πάνελ

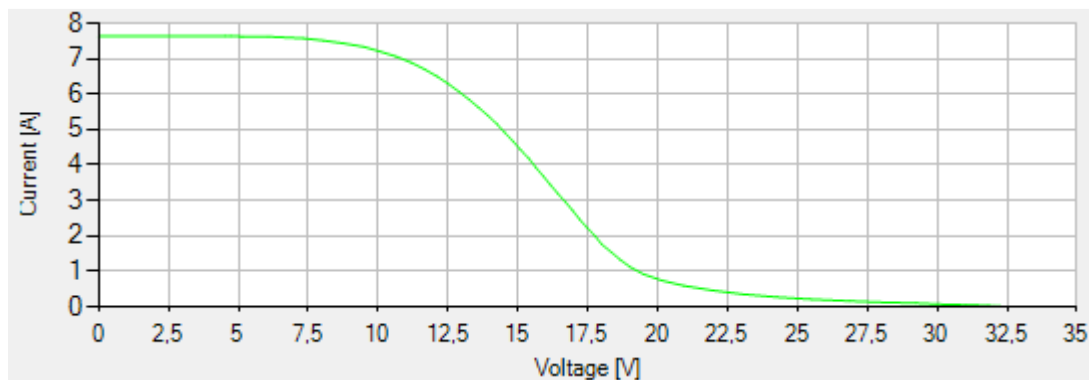
(εικόνα 3-11). Έπειτα, έγινε εναλλάξ κάλυψη δύο Φ/Β κελιών (κελί Α και κελί Β) με αδιαπέραστο υλικό και μετρήθηκε ξανά η I-V χαρακτηριστική του Φ/Β πάνελ για τις δύο περιπτώσεις (εικόνες 3-12, 3-13).



Εικόνα 3-11



Εικόνα 3-12



Εικόνα 3-13

Από τις χαρακτηριστικές (τις αντίστοιχες τιμές) που απεικονίζονται παραπάνω, μπορεί να γίνει μία προσπάθεια εξαγωγής των παραμέτρων του μοντέλου του Bishop στην ανάστροφη πόλωση. Αν θεωρηθεί ότι το καλυμμένο Φ/Β κελί στην περίπτωση της εικόνας 3-12 ή 3-13, έχει τη δική του I-V χαρακτηριστική (ίδια θερμοκρασία, μηδενική ακτινοβολία) και ότι αντίστοιχα τα υπόλοιπα Φ/Β κελιά έχουν και αυτά με τη σειρά τους ίδια I-V χαρακτηριστική, τότε για κάθε σημείο μετρήσεων (V'' , I'') που αντιστοιχεί στην καμπύλη της εικόνας 3-12 ή 3-13, ισχύει: $V''_{cov}(I'') + 59V''_{ill}(I'') = V''(I'')$. Αντίστοιχα στην περίπτωση της εικόνας 3-11

για κάθε σημείο μετρήσεων (V', I') ισχύει: $60V'_{ill}(I') = V'(I')$. Επειδή οι συνθήκες μέτρησης που απεικονίζονται στην εικόνα 3-11 και 3-12, 3-13 σχεδόν ταυτιζόταν, για μία τυχαία τιμή έντασης ρεύματος $I' = I''$, θα ισχύουν:

$$V''_{cov}(I'') + 59V''_{ill}(I'') = V''(I'') \text{ και } 60V'_{ill}(I'') = V'(I'')$$

Επίσης ισχύει $V''_{ill}(I'') = V'_{ill}(I'')$ και επομένως:

$$V''_{cov}(I'') + 59 \frac{V'(I'')}{60} = V''(I'').$$

Συνεπώς, για δεδομένο ζεύγος σημείων $(V'', I''), (V', I' = I'')$, είναι δυνατό να υπολογιστεί η $V''_{cov}(I'')$:

$$V''_{cov}(I'') = V''(I'') - 59 \frac{V'(I'')}{60} \quad (3.42)$$

Στη γενική της μορφή, η (3.42), μπορεί να γραφεί ως:

$$V''_{cov}(I'') = V''(I'') - (N_s - 1) \frac{V'(I'')}{N_s} \quad (3.43)$$

όπου με N_s συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός των κελιών εν σειρά.

Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να ληφθούν σημεία της I-V χαρακτηριστικής στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης του Φ/Β κελιού και με τη βοήθεια αυτών μπορούν να εξαχθούν οι παράμετροι στο μοντέλο του Bishop. Θεωρητικά τέσσερα αντιπροσωπευτικά τέτοια σημεία αρκούν, στην πράξη ωστόσο παραπάνω σημεία μπορούν να αυξήσουν την ακρίβεια των υπολογισμών.

Για την εξαγωγή των παραμέτρων που αντιστοιχούν στην καμπύλη της εικόνας 3-11 χρησιμοποιήθηκαν 5 σημεία της καμπύλης που απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα, τα οποία βρίσκονταν κοντά ή ταυτιζόταν με τα αντίστοιχα 5 χαρακτηριστικά σημεία του μοντέλου της Sandia, όπως και στην προηγούμενη υποενότητα:

Πίνακας 3-4	
$I'[A]$	$V'[V]$
7,77	0
0	32,79
7,237	25,14
7,71	16,8
5,07	28,96

έτσι προέκυψε και εδώ το αντίστοιχο σύνολο εξισώσεων:

$$\begin{cases} f'_1 = -I'_1 + I_L - I_o \left(e^{\frac{V'_1 + I'_1 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V'_1 + I'_1 R_s}{R_{sh}} \\ f'_2 = -I'_2 + I_L - I_o \left(e^{\frac{V'_2 + I'_2 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V'_2 + I'_2 R_s}{R_{sh}} \\ f'_3 = -I'_3 + I_L - I_o \left(e^{\frac{V'_3 + I'_3 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V'_3 + I'_3 R_s}{R_{sh}} \\ f'_4 = -I'_4 + I_L - I_o \left(e^{\frac{V'_4 + I'_4 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V'_4 + I'_4 R_s}{R_{sh}} \\ f'_5 = -I'_5 + I_L - I_o \left(e^{\frac{V'_5 + I'_5 R_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V'_5 + I'_5 R_s}{R_{sh}} \end{cases}$$

όπου αναζητήθηκε εκείνη η πεντάδα παραμέτρων η οποία ελαχιστοποιεί το άθροισμα: $f_1'^2 + f_2'^2 + f_3'^2 + f_4'^2 + f_5'^2$. Λόγω σφαλμάτων μετρήσεων και οργάνου, είναι προτιμότερη αυτή η δεύτερη μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων με ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων και όχι αναγκαστικά η επίλυση του συστήματος που αντιστοιχεί σε $f'_1 = f'_2 = f'_3 = f'_4 = f'_5 = 0$. Με τη βέλτιστη προσαρμογή της καμπύλης στα παραπάνω σημεία προέκυψαν (για 48° C ή 321.15 K) οι τιμές:

$$R_s^{panel.n.b-b} \simeq 0.3971 \text{ } \Omega, R_{sh}^{panel.n.b-b} \simeq 297.13 \text{ } \Omega, a^{panel.n.b-b} \simeq 1.6831 \text{ V}, \\ I_o^{panel.n.b-b} \simeq 26.54 \times 10^{-9} \text{ A}, I_L^{panel.n.b-b} \simeq 7.7804 \text{ A}$$

Στην αντίστοιχη περίπτωση ενός Φ/Β κελιού, οι τιμές των

$$I_L^{cell}, I_o^{cell}, a^{cell}, R_{sh}^{cell}, R_s^{cell}, \psi^{cell}, m^{cell}$$

προκύπτουν από τις τιμές που αντιστοιχούν για το Φ/Β πάνελ (χωρίς bypass διόδους) βάσει των εξής εξισώσεων:

$$R_s^{panel.n.b-b} = N_s \times R_s^{cell}, R_{sh}^{panel.n.b-b} = N_s \times R_{sh}^{cell}, I_o^{panel.n.b-b} = I_o^{cell}, a^{panel.n.b-b} = N_s \times a^{cell}, \\ I_L^{panel.n.b-b} = I_L^{cell}.$$

Επομένως προκύπτουν:

$$I_L^{cell,ill} \simeq 7.7804 \text{ A}, I_o^{cell,ill} \simeq 26.54 \times 10^{-9} \text{ A} \\ a^{cell,ill} \simeq 0.02805 \text{ V}, R_s^{cell,ill} \simeq 0.00662 \text{ } \Omega \\ R_{sh}^{cell,ill} \simeq 4.952 \text{ } \Omega$$

Η μοντελοποίηση της καμπύλης για την περίπτωση ενός μη καλυμμένου Φ/Β κελιού, ήταν αναγκαία, καθότι από τις μετρήσεις που εξήγαγε το όργανο, πολλές φορές δεν υπήρχαν ταυτόσημες τιμές I' και I'' , προκειμένου με χρήση της (3.42) να προκύψει η αντίστοιχη τάση για το καλυμμένο κελί. Για αυτό έγινε χρήση των μετρούμενων (I'', V'') με τα

αντίστοιχα (I'', V') που προέκυψαν από τη μοντελοποίηση της καμπύλης της εικόνας 3-11 με βάση τις παραπάνω παραμέτρους.

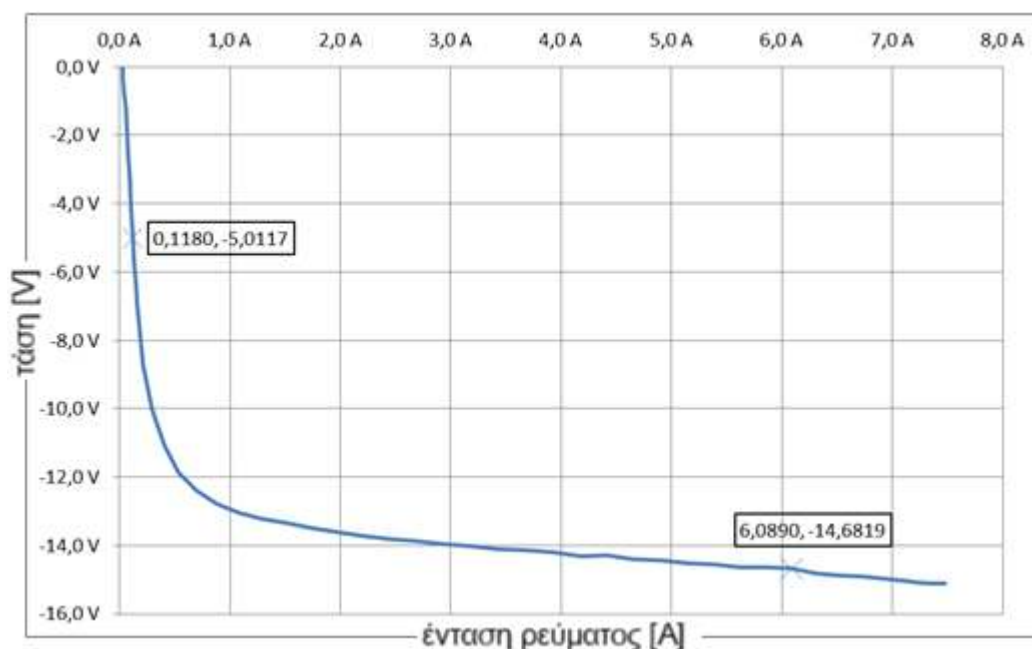
Η θερμοκρασία του κελιού που καλύπτονταν θεωρήθηκε ίση με των μη καλυμμένων που ήταν 48° C ή 321.15 K , καθότι μεσολάβησε μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ της κάλυψης και των μετρήσεων, επομένως δεδομένων των (3.21), (3.23), (3.41):

$$I_o^{cell, cov} \approx I_o^{cell, ill} \approx 26.54 \times 10^{-9} \text{ A}, a^{cell, cov} \approx a^{cell, ill} \approx 0.02805 \text{ V}$$

$$R_s^{cell, cov} \approx R_s^{cell, ill} \approx 0.00662 \text{ } \Omega \text{ και όπως έχει αναφερθεί: } I_L^{cell, cov} = 0$$

Ακόμα και σε περίπτωση διαφοράς θερμοκρασίας όμως (± 10), η χαρακτηριστική στην ανάστροφη δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές σύμφωνα με το μοντέλο του Bishop, καθώς ο όρος που περιλαμβάνει το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου και τον τροποποιημένο συντελεστή ιδανικότητας της διόδου στην (3.36) είναι μικρός σε σύγκριση με την υπόλοιπη παράσταση. Εξάλλου, οι παράμετροι R_{sh}, I_1, I_2, V_{br} , θεωρούνται σχεδόν σταθεροί για μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας (± 10) αν και στην πραγματικότητα η τάση αποκοπής, για παράδειγμα, αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας [56].

Τα αποτελέσματα, δηλαδή τα ζεύγη τιμών (I'', V''_{cov}) (βάσει των μετρούμενων (I'', V') , των αντίστοιχων μοντελοποιημένων (I'', V') και της (3.42)) για το πρώτο κελί (κελί Α), στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης, απεικονίζονται στην παρακάτω γραφική παράσταση:



Εικόνα 3-14

Το μοντέλο του Bishop μπόρεσε να μοντελοποιήσει επιτυχώς το μεγαλύτερο μέρος της καμπύλης στην ανάστροφη πόλωση. Συγκεκριμένα, για το μέρος της καμπύλης που βρισκόταν μεταξύ του σημείου (0.1180, -5.0117) και του σημείου (6.0890, -14.6819) το μοντέλο του Bishop έδωσε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η εκτίμηση των

παραμέτρων $R_{sh}^{cov}, I_1, V_{br}, I_2$ έγινε με ελαχιστοποίηση του αθροίσματος $\sum f_i''^2$, όπου σε αυτήν την περίπτωση:

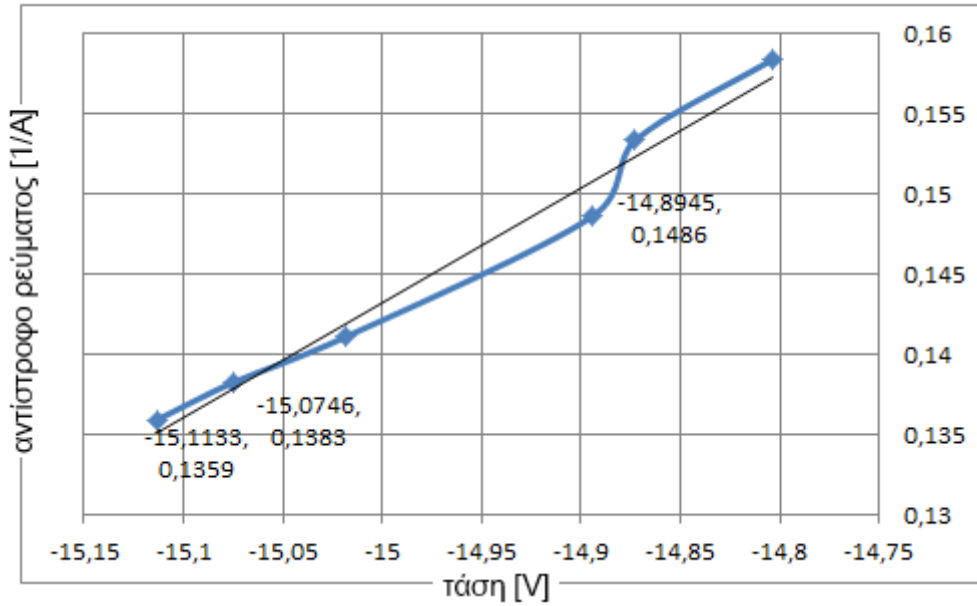
$$f_i'' = -I_i'' + I_o^{cell, cov} \left(e^{\frac{V_{cov,i}'' + I_i'' \times R_s^{cell, cov}}{a^{cell, cov}}} - 1 \right) - \frac{V_{cov,i}'' + I_i'' \times R_s^{cell, cov}}{R_{sh}^{cov}} \left[1 + I_1 \left(1 - \frac{V_{cov,i}'' + I_i'' \times R_s^{cell, cov}}{V_{br}} \right)^{-I_2} \right]$$

και οι άγνωστοι είναι οι $R_{sh}^{cov}, I_1, V_{br}, I_2$, με $I_L^{cell, cov} = 0$ σε όλες τις εξισώσεις. Για την εκτίμηση των παραμέτρων, είναι απαραίτητα τουλάχιστον τέσσερα σημεία, αλλά λόγω σφαλμάτων στις μετρήσεις και λόγω της φύσης των συναρτήσεων f_i'' είναι προτιμότερη η χρησιμοποίηση περισσότερων από των ελάχιστα απαιτούμενων, αλλά και προσπάθεια μείωσης των αγνώστων, όπως θα φανεί σύντομα.

Από την (σχεδόν) αρχή του άξονα μέχρι περίπου το σημείο (0.1180, -5.0117), το μοντέλο του Bishop αδυνατούσε να δώσει αποτελέσματα με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για την ερμηνεία της καμπύλης από το (0.1180, -5.0117) έως το (6.0890, -14.6819). Αυτό από θεωρητική σκοπιά είναι λογικό, διότι η περιοχή της καμπύλης λίγο μετά από την αρχή των αξόνων μέχρι το σημείο (0.1180, -5.0117) έχει γραμμική μορφή και απέχει αρκετά από το σημείο εκκίνησης διάσπασης της διόδου. Ωστόσο, η περιοχή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της τιμής της αντίστασης διαρροής στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης υπό συνθήκες (σχεδόν) μηδενικής έντασης ακτινοβολίας με την απλή μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η τιμή της αντίστασης προκύπτει από την κλίση της «βέλτιστης» ευθείας που ενώνει τα σημεία της περιοχής αυτής. Με αυτόν τον τρόπο προέκυψε η τιμή $R_{sh}^{cov} \approx 56.62 \Omega$. Η τιμή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια με μία σχετική αβεβαιότητα ή να χρησιμοποιηθεί σαν αρχική τιμή (*initial guess*) ή για τη δημιουργία περιορισμών (*constraints*) στην προσπάθεια εύρεσης των παραμέτρων $R_{sh}^{cov}, I_1, V_{br}, I_2$. Από την άλλη, το μέρος της καμπύλης που βρισκόταν δεξιά από το σημείο (6.0890, -14.6819) δεν μπορούσε ούτε αυτό με τη σειρά του να ερμηνευτεί επαρκώς από το μοντέλο του Bishop, γεγονός που ενδεχομένως να οφείλονταν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων λόγω μετρητικού εξοπλισμού ή/και πιθανότατα διότι η διόδος είχε φτάσει αρκετά κοντά στο σημείο διάσπασης. Στο [47] γίνεται η θεώρηση ότι κοντά στο σημείο διάσπασης ($V \rightarrow V_{br}, I \rightarrow +\infty$) η τάση τείνει να εξαρτάται γραμμικά από το αντίστροφο του ρεύματος. Δηλαδή κοντά στο σημείο διάσπασης υπάρχει B τέτοιο ώστε να ισχύει:

$$V = V_{br} + B \frac{1}{I} \quad (3.44)$$

Αυτό παρατηρείται έντονα αριστερά του σημείου (-14.8945, 0.1486) στην παρακάτω γραφική παράσταση όπου στον κάθετο άξονα βρίσκονται οι τιμές του αντιστρόφου του ρεύματος και στον οριζόντιο οι τιμές της τάσης. Θεωρώντας με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων την ευθεία του σχήματος, λαμβάνεται $V_{br} \approx -17V$. Αν ωστόσο, θεωρηθούν μόνο τα σημεία (-15.1133, 0.1359) και (-15.0746, 0.1383), λαμβάνεται $V_{br} \approx -17.35V$.



Εικόνα 3-15

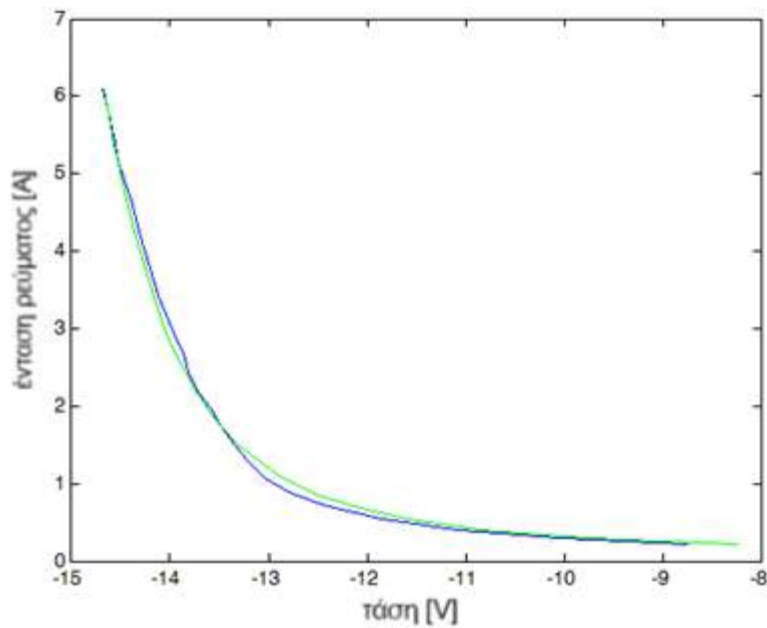
Σε κάθε περίπτωση, όπως και στην περίπτωση της αντίστασης διαρροής, η τιμή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια με μία σχετική αβεβαιότητα ή να χρησιμοποιηθεί σαν αρχική τιμή (*initial guess*) ή για τη δημιουργία περιορισμών (*constraints*) σε μία προσπάθεια εύρεσης των παραμέτρων $R_{sh}^{cov}, l_2, l_1, V_{br}$.

Λόγω της φύσης των συναρτήσεων f_i'' , μία μικρή διαφορά στις μετρούμενες τιμές μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα αισθητά διαφορετική τετράδα τιμών $R_{sh}^{cell, cov}, l_2, l_1, V_{br}$. Συνεπώς, αν η αβεβαιότητα στις μετρούμενες τιμές θεωρείται μεγάλη, ίσως είναι προτιμότερο να προσδιορίζονται με κάποιο τρόπο εξ' αρχής ορισμένοι παράμετροι όπως π.χ. οι R_{sh}^{cov}, V_{br} ή ίσως και η $l_2 \approx 3.7$ [46].

Τα τελικά αποτελέσματα για το Φ/Β κελί Α ήταν:

$$R_{sh}^{A, cell, cov} \approx 55.69 \, \Omega, l_2^A \approx 3.657677$$

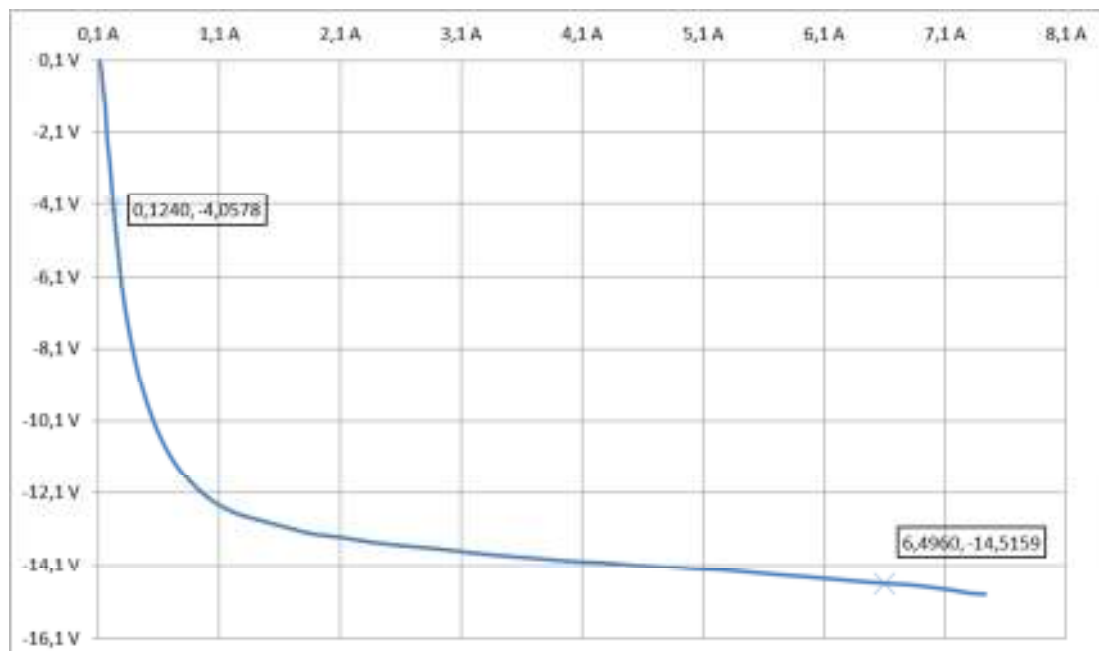
$$l_1^A \approx 0.025428, V_{br}^A \approx -17.35 \, V$$



Εικόνα 3-16

Στην εικόνα 3-16 είναι εμφανές ότι η χρώματος πράσινη καμπύλη με βάση τις παραπάνω παραμέτρους, είναι ικανοποιητικά κοντά στην χρώματος μπλε καμπύλη που αντιστοιχεί στις μετρήσεις του οργάνου.

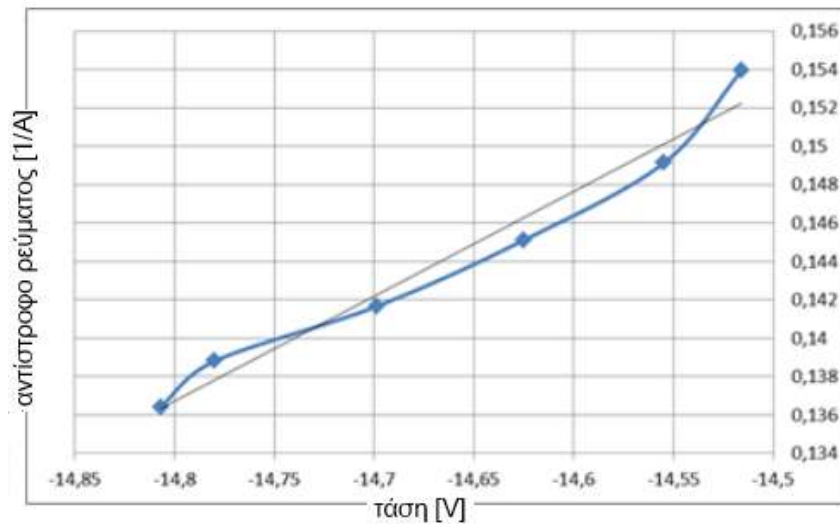
Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα για το δεύτερο κελί (κελί Β), στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης, απεικονίζονται στην παρακάτω γραφική παράσταση:



Εικόνα 3-17

όπου το μοντέλο του Bishop μπόρεσε να χρησιμοποιηθεί για το μέρος της καμπύλης που βρισκόταν μεταξύ του σημείου (0.1240, -4.0578) και του σημείου (6.4960, -14.5159). Το τμήμα της καμπύλης από την αρχή του άξονα μέχρι περίπου το σημείο (0.1240, -4.0578),

θεωρείται γραμμικό και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τιμής της αντίστασης διαρροής στην περιοχή της ανάστροφης πόλωσης όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση προέκυψε η τιμή $R_{sh}^{cov} \approx 35.69 \Omega$. Όσον αφορά στο μέρος της καμπύλης που βρισκόταν δεξιά από το σημείο (6.4960, -14.5159) με την υιοθέτηση και εδώ της θεώρησης σύμφωνα με την οποία κοντά στο σημείο διάσπασης η τάση τείνει να εξαρτάται γραμμικά από το αντίστροφο του ρεύματος, λαμβάνεται $V_{br} \approx -17.40V$ (εικόνα 3-18).



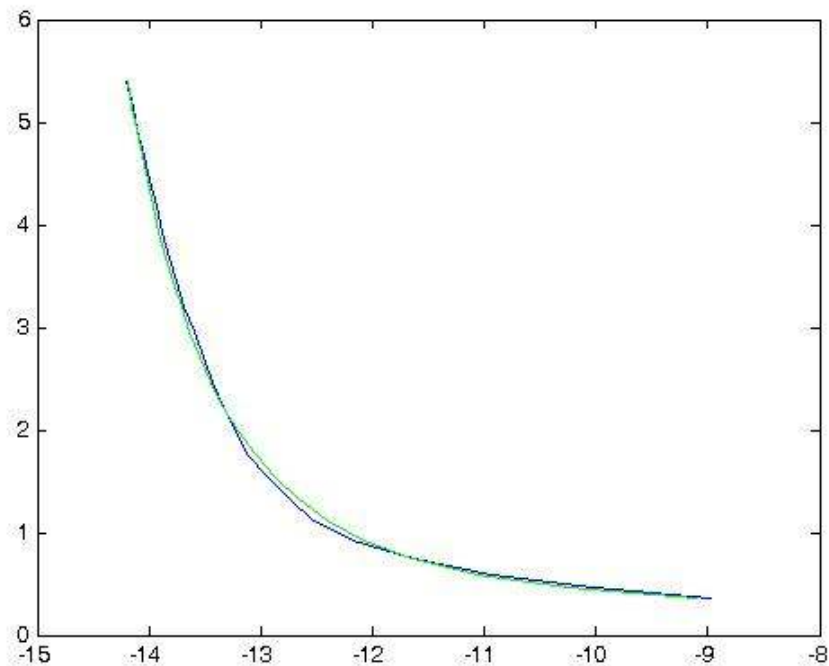
Εικόνα 3-18

Τα τελικά αποτελέσματα για το Φ/Β κελί Β ήταν:

$$R_{sh}^{B, cell, cov} \approx 35.69 \Omega, \quad l_2^B \approx 4.098468$$

$$l_1^B \approx 0.012881, \quad V_{br}^B \approx -17.40 V$$

και η αντίστοιχη σύγκριση των καμπυλών:



Εικόνα 3-19

όπου και εδώ είναι εμφανές ότι η χρώματος πράσινη καμπύλη με βάση τις παραπάνω παραμέτρους, είναι ικανοποιητικά κοντά στην χρώματος μπλε που αντιστοιχεί στις μετρήσεις του οργάνου, καμπύλη.

Παρατηρείται κάποια ομοιότητα στα χαρακτηριστικά των κελιών Α και Β στην ανάστροφη πόλωση, κυρίως όσον αφορά στην τάση διάσπασης. Κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητα ο κανόνας, εκτός αν ο προμηθευτής-κατασκευαστής του Φ/Β κελιού έχει φροντίσει ώστε τα κελιά να έχουν τουλάχιστον παραπλήσια τάση διάσπασης, κάτι που σαφώς αποτελεί σωστή τεχνική απαίτηση.

3.4 Αναφορές

- [1] P. Hernday, "Field Applications for I-V Curve Tracers", *Solar Promagazine*, August/September 2011 .
- [2] «<http://www.pvmeasurements.com/products/i-v-testing-system>» [Ηλεκτρονικό].
- [3] «http://www.amprobe.eu/en_GB/» [Ηλεκτρονικό].
- [4] IEC 60904-3:2008: "Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data".
- [5] The German Energy Society, Planning and installing Photovoltaic Systems: A guide for Installers, Architects and Engineers, Earthscan, 2009.
- [6] «<http://www.ht-instruments.com/>» [Ηλεκτρονικό].

- [7] P. Hernday, «Commissioning and Troubleshooting PV Arrays with the Solmetric PV Analyzer».
- [8] Solmetric Corporation,, «Application Note PVA-600-1: Guide To Interpreting I-V Curve Measurements of PV Arrays,» 1 March 2011.
- [9] «<https://sam.nrel.gov/>» [Ηλεκτρονικό].
- [10] «<http://www.gosolarcalifornia.ca.gov/tools/calculators.php>,» [Ηλεκτρονικό].
- [11] W. Beckman, «The CEC/UW n-parameter model».
- [12] D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil, "Photovoltaic Array Performance Model", *Sandia National Laboratories*, 2004.
- [13] «<http://pvpmc.org/modeling-steps/module-iv-curve/point-value-models/>» [Ηλεκτρονικό].
- [14] Tarn Yates and Bradley Hibberd, «Production Modeling for Grid-Tied PV Systems,» *Solarpro*, Apri/May 2010.
- [15] Amprobe, «SOLAR-4000 Solar-Analyzer instruction manual,» 04/2012.
- [16] «<http://pvpmc.org/modeling-steps/module-iv-curve/diode-equivalent-circuit-models/>» [Ηλεκτρονικό].
- [17] John A. Duffie & William A.Beckman, Solar engineering of thermal processes, JOHN WILEY & SONS,3rd edition, 2006.
- [18] Andreas Wagner, "Peak-leistung-und serien-innenwiderstand-messung unter natuerlichen umgebungsbedingungen".
- [19] Andreas Wagner, "Photovoltaik Engineering", Springer, 2006.
- [20] Christopher P. Cameron, Joshua S. Stein, Coryne A., "PV Performance Modeling Workshop Summary Report", Sandia Report, May 2011.
- [21] M Simon, "The physics governing the operation of photovoltaic modules", University of Fort Hare Institutional Repository, 2009.
- [22] Jenny Nelson, "The physics of solar cells", Imperial College Press.
- [23] S. A. Kalogirou, "Solar Energy Engineering: Processes and Systems", Elsevier, 2009.
- [24] W. De Soto, S.A Klein, W.A. Beckmann, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Elsevier, 2006.

- [25] W. De Soto, S.A Klein, W.A. Beckmann, "Erratum to "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance"", Elsevier, 2006.
- [26] Σταμάτης Δ. Πέρδιος, Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, ΤεκΔΟΤΙΚΗ, Β' έκδοση.
- [27] Maria Carmela Di Piazza et al., "A Dynamic Model of a Photovoltaic Generator Based on Experimental Data", σε *ICREPQ' 10*.
- [28] C. Monokrousos et al., "The effects of solar cell capacitance on calibration accuracy when using a flash simulator", IEEEExplore.
- [29] G. Vachtsevanos, K. Kalaitzakis, "A hybrid photovoltaic simulator for utility interactive studies", IEEEExplore.
- [30] Agilent Technologies , "IV and CV Characterizations of Solar/Photovoltaic Cells Using the B1500A", in *Application Note B1500A-14*.
- [31] Adel S. Sedra, Kenneth S. Smith, Μικροηλεκτρονικά κυκλώματα, εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1994.
- [32] Charles L. Alley, Kenneth W. Atwood, Electronic Engineering, JOHN WILEY & SONS, 1973.
- [33] Marcelo Gradella Villalva et al., "Comprehensive Approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009.
- [34] Georgi Hristov Yordanov, Ole-Morten Midtgard και Tor Oskar Saetre, "PV Modules with Variable Ideality Factors", IEEEExplore.
- [35] G.H. Yordanov et al., «TWO-DIODE MODEL REVISITED:PARAMETERS EXTRACTION FROM SEMI-LOG PLOTS OF I-V DATA,» in *5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia, Spain, 6-10 September 2010.
- [36] G.H. Yordanov et al., «Equivalent Cell Temperature Calculation for PV Modules with Variable Ideality Factors,» IEEEExplore, 2011.
- [37] C. Carrero, J. Amador, S. Arnaltes, «A single procedure for helping PV designers to select silicon PV modules and evaluate the loss resistances,» Elsevier, 2007.
- [38] Larry Prat and David L. King, «The effect of uncertainty in modeling coefficients used to predict energy production using the Sandia Array Performance Model,» Sandia National Laboratories.
- [39] Regan Arndt Puto and Dr. Ing Robert, «Basic Understanding of IEC Standard Testing For Photovoltaic Panels,» TÜV SÜD Product Service.

- [40] IEC, «CEI/IEC 61215:2005 Crystalline silicon terrestrial PV module- Design qualification and type approval,» IEC, 2005.
- [41] J. V. Roger A. Messenger, Photovoltaic Systems Engineering, 2nd επιμ., CRC Press, 2004.
- [42] G.M.Tina and S.Scrofani, «Electrical and Thermal model for PV module temperature evaluation,» IEEEExplore, 2008.
- [43] Van Zeghbroeck B., «Principles of Semiconductor Devices,» 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter2/ch2_3.htm.
- [44] Futoshi Nakanishi, Tomoaki Ikegam, Kenji Ebihara, Satichi Kuriyama και Yuuji Shiota, «Modeling and operation of a 10 kW photovoltaic power generator using equivalent electric circuit method,» IEEEExplore, 2000.
- [45] W. A. Anderson and S. Banerjee , «Temperature dependence of shunt resistance in photovoltaic devices,» American Institute of Physics, 1986.
- [46] J.W.Bishop, «Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits,» Elsevier, 1988.
- [47] M.C. Alonso-Garcia, J.M. Ruiz, «Analysis and modeling the reverse characteristic of photovoltaic cells,» Elsevier, 2006.
- [48] B. M. R. Ramaprabha, «Development of an Improved Model of SPV Cell for Partially Shaded Solar Photovoltaic Arrays,» EuroJournals Publishing, 2010.
- [49] Hajime Kawamura et al., «Simulation of I-V characteristics of a PV module with shaded PV cells,» Elsevier, 2003.
- [50] Volker Quashing and Rolf Hanitsch, «Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells,» *Solar Energy Vol. 56, No. 6 (Elsevier)*, pp. 513-520, 1996.
- [51] S. L. MILLER, «Ionization Rates for Holes and Electrons in Silicon,» 1956.
- [52] V. Z. B., «Principles of Semiconductor Devices,» 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/ch4_5.htm.
- [53] F. Fertig et al., «Impact of junction breakdown in multi-crystalline silicon solar cells on hot spot formation and module performance,» σε *26th European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Hamburg, Germany, 5-9 September 2011.
- [54] «How to choose a bypass diode for a silicon panel junction box (Application Note),» STMicroelectronics, 2011.

- [55] «Solar Cell Bypass Diodes in Silicon Crystalline Photovoltaic Panels (Application note),» Vishay general semiconductor, Aug 2011.
- [56] «http://people.seas.harvard.edu/~jones/es154/lectures/lecture_2/breakdown/breakdown.html,» [Ηλεκτρονικό].

4 Θερμοκρασιακή κατανομή στο Φ/B πάνελ

Με τον όρο θερμοκρασιακή κατανομή νοείται η γνώση της θερμοκρασίας ενός μέσου, ως συνάρτηση του χώρου στην περίπτωση της μόνιμης κατάστασης ή/και του χρόνου κατά τη διάρκεια της μεταβατικής κατάστασης [1]. Ενδεχόμενη μοντελοποίηση της θερμοκρασιακής κατανομής του Φ/B πάνελ υπό συγκεκριμένες συνθήκες σκίασης-κάλυψης και σύγκρισή της με την όσο το δυνατό ακριβέστερα μετρούμενη πραγματική θερμοκρασιακή κατανομή υπό παρόμοιες συνθήκες, θα βοηθήσει στον εντοπισμό των περιοχών στις οποίες είναι αυξημένη η πιθανότητα εμφάνισης θερμών κηλίδων σε περιπτώσεις περιστασιακών, μόνιμων ή συχνά επαναλαμβανόμενων σκιάσεων-καλύψεων. Φαίνεται ότι το να λειτουργεί ένα Φ/B κελί στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης, ακόμα και αν πλησιάζει την τάση διάσπασης του, δεν είναι σαν γεγονός από μόνο αυτό που προκαλεί την καταστροφή της ένωσης $p-n$. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι αυτή που πιθανότατα οδηγεί στην καταστροφή της ένωσης $p-n$. Επομένως εκτός από το σημείο της καμπύλης της ανάστροφης πόλωσης στο οποίο λειτουργεί το Φ/B κελί ή ένα τμήμα του, σημασία έχει και ο χρόνος που θα παραμείνει και θα λειτουργεί το Φ/B κελί ή το τμήμα του σε αυτό το σημείο ή σε κάποιο άλλο σημείο της καμπύλης ανάστροφης πόλωσης. Αλλά και πριν από την πιθανή καταστροφή της ένωσης $p-n$ μπορεί να παρατηρηθεί καταστροφή υλικού στο Φ/B πάνελ, όπως θα φανεί παρακάτω.

4.1 Μετάδοση θερμότητας στο Φ/B πάνελ

Όπως είναι γνωστό, οι τρεις τρόποι μετάδοσης της θερμότητας, είναι οι [1, 2]:

1. Αγωγή (conduction)
2. Μεταφορά ή συναγωγή (convection)
3. Ακτινοβολία (radiation)

Στη συνέχεια θα γίνει μία μικρή αναφορά στους παραπάνω τρόπους μετάδοσης της θερμότητας με έμφαση στα κομμάτια της αντίστοιχης θεωρίας που αφορούν άμεσα στην περίπτωση του Φ/B πάνελ.

4.1.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγή στο Φ/B πάνελ

Ως αγωγή ονομάζεται ο τρόπος μετάδοσης της θερμότητας που οφείλεται στη «συναλλαγή» ενέργειας μεταξύ των μορίων χωρίς να υπάρχει πραγματική κίνηση των μορίων, ή στην κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων εάν αυτά υπάρχουν. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης θερμότητας, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες του μέσου και λαμβάνει χώρα σε στερεά, υγρά ή αέρια, αν υφίστανται θερμοκρασιακές διαφορές [1].

Η (σημειακή) εξίσωση της θερμικής αγωγής σε ένα σημείο \vec{r}_p ενός σταθερού μέσου στο οποίο δεν υπάρχει κίνηση ρευστού, δίνεται από τη σχέση (αρχή διατήρησης ενέργειας - 1^{ος} νόμος της θερμοδυναμικής):

$$-\nabla \vec{q} + \Theta = pc_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

όπου με \vec{q} συμβολίζεται το διάνυσμα που εκφράζει τη ροή της θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (το μέτρο του έχει μονάδες $[W/m^2]$), με p $[kg/m^3]$ συμβολίζεται η πυκνότητα, με c_p $[J/(kg \cdot K)]$ η ειδική θερμοχωρητικότητα, με T $[K]$ συμβολίζεται η θερμοκρασία και τέλος με Θ $[W/m^3]$ συμβολίζεται η θερμική ισχύς ανά μονάδα όγκου. Το διάνυσμα ροής της θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, σύμφωνα με το νόμο του Fourier δίνεται από τη σχέση:

$$[q]_{3 \times 1} = -[\kappa]_{3 \times 3} [\nabla T]_{3 \times 1} \quad (4.2)$$

όπου με $[q]_{3 \times 1}$ συμβολίζεται η μήτρα (αντίστοιχα διάνυσμα) που περιγράφει τη ροή θερμότητας (*conductive heat flux*) και με $[\kappa]_{3 \times 3}$ η μήτρα $[1]$ που εκφράζει τη *θερμική αγωγιμότητα* (τα στοιχεία της έχουν μονάδα $[W/(m \cdot K)]$) στις διάφορες κατευθύνσεις και με $[\nabla T]_{3 \times 1}$, το διάνυσμα-βαθμίδα της θερμότητας σε μορφή πίνακα. Η θερμότητα σε ένα σημείο, είναι συνάρτηση της θέσης του σημείου (διάνυσμα θέσης) και του χρόνου, δηλαδή: $T = T(\vec{r}_p, t)$. Επομένως σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ισχύει:

$$\nabla T = \hat{x} \frac{\partial T}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial T}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial T}{\partial z} = \hat{x} (\nabla T)_x + \hat{y} (\nabla T)_y + \hat{z} (\nabla T)_z \quad (4.3)$$

Συνεπώς από τις (4.2) και (4.3), για την περίπτωση των καρτεσιανών συντεταγμένων λαμβάνεται :

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \kappa_{xx} & \kappa_{xy} & \kappa_{xz} \\ \kappa_{yx} & \kappa_{yy} & \kappa_{yz} \\ \kappa_{zx} & \kappa_{zy} & \kappa_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\nabla T)_x \\ (\nabla T)_y \\ (\nabla T)_z \end{bmatrix}$$

Για $\kappa_{xy} = \kappa_{xz} = \kappa_{yx} = \kappa_{yz} = \kappa_{zx} = \kappa_{zy} = 0$ και $\kappa_{xx} = \kappa_x, \kappa_{yy} = \kappa_y, \kappa_{zz} = \kappa_z$, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \kappa_x & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_y & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\nabla T)_x \\ (\nabla T)_y \\ (\nabla T)_z \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} \\ -\kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} \\ -\kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix}$$

ή ισοδύναμα:

$$\vec{q} = -\kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} \hat{x} - \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} \hat{y} - \kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \hat{z} \quad (4.4)$$

Επομένως, θεωρώντας πάντα καρτεσιανές συντεταγμένες, η σχέση (4.1) από την (4.4) δίνει:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \Theta + \frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \right],$$

όπου με $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z$ [$W / (m \cdot K)$] είναι η θερμική αγωγιμότητα που εξαρτάται από την κατεύθυνση. Σε περίπτωση που το υλικό που μελετάται θεωρηθεί ισотροπικό (η θερμική αγωγιμότητα δεν εξαρτάται από την κατεύθυνση), ισχύει $\kappa = \kappa_x = \kappa_y = \kappa_z$ και η παραπάνω σχέση λαμβάνει τη μορφή:

$$\frac{\rho c_p}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\Theta}{\kappa} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4.5)$$

Η σχέση αυτή έχει εφαρμογή στην περίπτωση του Φ/Β πάνελ, όπου κάθε στρώμα θεωρείται γραμμικό, ισотροπικό, ομογενές και σταθερό μέσο (βλ. παρακάτω 4.2) με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ρ, c_p, κ .

4.1.2 Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή στο Φ/Β πάνελ

Τα μόρια που βρίσκονται στα υγρά ή στα αέρια κινούνται με σχετική ελευθερία και κατά τη μετακίνησή τους από μία θερμή σε μία ψυχρή περιοχή, μεταφέρουν ενέργεια [1]. Η μετάδοση της θερμότητας από μία περιοχή σε μία άλλη εξαιτίας αυτού του είδους της μακροσκοπικής κίνησης στα ρευστά, σε συνδυασμό με τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή μέσα στα ρευστά [1] ονομάζεται μετάδοση θερμότητας με *συναγωγή*.

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή συνήθως εμπλέκει τη συναλλαγή ενέργειας μεταξύ μίας επιφάνειας και ενός γειτονικού ρευστού (στη συγκεκριμένη περίπτωση μεταξύ του Φ/Β πάνελ και του αέρα). Μπορεί να είναι ελεύθερη ή αλλιώς εκ' φύσεως (*free or natural convection*), εξαναγκασμένη (*forced convection*) ή μικτή (*mixed convection*). Στην ελεύθερη συναγωγή, η κίνηση του ρευστού οφείλεται στη διαφορά πυκνότητας που προκαλείται από τις θερμοκρασιακές διαφορές [1]. Στην εξαναγκασμένη συναγωγή, η κίνηση του ρευστού, προκαλείται από κάποια εξωτερική δύναμη δηλαδή από κάποιον εξωτερικό παράγοντα, όπως για παράδειγμα από έναν ανεμιστήρα ή μία αντλία. Στη μικτή συναγωγή, θεωρείται ότι λαμβάνουν χώρα και τα δύο παραπάνω είδη συναγωγής.

Όσον αφορά στη μετάδοση της θερμότητας με συναγωγή, ισχύει ο νόμος του *Newton* στην κατεύθυνση της ροής θερμότητας:

$$q_c = h_c \Delta T \quad (4.6)$$

όπου με h_c [$W / m^2 K$] συμβολίζεται ο *συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή* (*convective heat transfer coefficient*) και με ΔT η διαφορά θερμοκρασίας (π.χ. μεταξύ της επιφάνειας και του ρευστού). Ο συντελεστής h_c στην παραπάνω σχέση έχει σημειακή εξάρτηση (*local heat transfer coefficient*), δηλαδή εξαρτάται από τη θέση του σημείου για παράδειγμα πάνω στην επιφάνεια, αλλά μπορούν να θεωρηθούν και συνολικές ή μέσοι όροι τιμές του οι οποίες εφαρμόζονται σε μία δεδομένη ολόκληρη περιοχή μιας επιφάνειας.

Στην περίπτωση που η συναγωγή εμπλέκει τη συναλλαγή ενέργειας μεταξύ μίας ορθογώνιας επιφάνειας (πλευρά Φ/Β πάνελ) και ενός γειτονικού ρευστού (αέρα) πάνω στην επιφάνεια, θεωρώντας ότι η κατεύθυνση της ροής θερμότητας είναι κάθετη στην επιφάνεια, η διαφορά θερμοκρασίας είναι $\Delta T = T_s - T_\infty$, όπου με T_s συμβολίζεται η θερμοκρασία της επιφάνειας και με T_∞ η θερμοκρασία του ρευστού «μακριά» από τη στερεά επιφάνεια.

Όπως προαναφέρθηκε, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μεταβάλλεται ως συνάρτηση της θέσης του σημείου στην επιφάνεια. Θεωρώντας ωστόσο ομοιόμορφη θερμοκρασία επιφάνειας, μπορεί να υιοθετηθεί η μέση τιμή του. Στο Φ/Β πάνελ η θερμοκρασία μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη για σταθερές ή σχεδόν σταθερές καιρικές συνθήκες. Στην περίπτωση της σκίασης, αυτή η σχετική ομοιομορφία παύει να υφίσταται. Ωστόσο, για ευκολία και κυρίως για μείωση των απαιτούμενων υπολογιστικών πόρων γίνεται η ίδια θεώρηση. Έτσι, για την εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στο Φ/Β πάνελ, το πάνελ αντιμετωπίζεται σαν επίπεδη πλάκα με ομοιόμορφη θερμοκρασία και γίνεται χρήση των τεσσάρων χαρακτηριστικών αριθμών που παρουσιάζονται στο 4.1.2.1. Οι αριθμοί αυτοί μεταβάλλονται ως συνάρτηση της θέσης του σημείου, αλλά στη συγκεκριμένη εργασία θεωρούνται μέσες τιμές.

4.1.2.1 Εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στο Φ/Β πάνελ

Θεωρώντας (διαστατική ανάλυση) [2] ένα μήκος αναφοράς (*reference length*) L_{ref} [m] και μία ταχύτητα αναφοράς (*reference velocity*) v_∞ [m/s] σε ένα (συνεχές) ρευστό, μπορεί να οριστεί ο αριθμός *Reynolds* ως:

$$Re = \frac{L_{ref} v_\infty \rho_{fl}}{\mu} \quad (4.7)$$

όπου με μ [Pa·s] συμβολίζεται το δυναμικό ιξώδες του ρευστού και με ρ_{fl} [kg/m³] η πυκνότητα του ρευστού [2]. Βάσει γενίκευσης ενός πειράματος που διεξήγαγε ο Reynolds από τον οποίο πήρε και το όνομά του ο παραπάνω αδιάστατος αριθμός, ο διαχωρισμός της ροής του ρευστού σε στρωτή (*laminar*) και τυρβώδη (*turbulent*) μπορεί να γίνει με βάση έναν ορισμένο κάθε φορά κρίσιμο αριθμό *Reynolds* (*critical Reynolds number*). Έτσι για τιμές του αριθμού *Reynolds* κάτω από τον κρίσιμο αριθμό *Reynolds* θεωρείται ότι υπερισχύει ο μηχανισμός της στρωτής ροής, ενώ αντίθετα για τιμές του αριθμού *Reynolds* πάνω από τον κρίσιμο αριθμό *Reynolds* θεωρείται ότι υπερισχύει ο μηχανισμός της τυρβώδους ροής.

Ο αριθμός *Prandtl* ορίζεται ως:

$$Pr = \frac{\mu}{k_{fl}} = \frac{c_{p,fl}}{\alpha_{fl}} \quad (4.8)$$

όπου με α_{fl} [m²/s] συμβολίζεται το κινηματικό ιξώδες του ρευστού που ορίζεται ως $\alpha_{fl} = \mu / \rho_{fl}$, με k_{fl} [W/(m·K)] η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού, με $c_{p,fl}$ [J/kgK] η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού ενώ με t_{hd} [m²/s] συμβολίζεται η θερμική διαχυτικότητα (*thermal diffusivity*) που ορίζεται ως:

$$t_{hd} = \frac{\kappa_{fl}}{p_{fl} c_{p,fl}} \quad (4.9)$$

Ο αριθμός Prandtl μπορεί να θεωρηθεί ως ιδιότητα του ρευστού και εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία [2].

Ο αριθμός *Rayleigh* στην περίπτωση της ροής πάνω από επίπεδη πλάκα δίνεται από τη σχέση:

$$Ra_{L_{ref}} = \frac{g t_{he}}{u t_{hd}} (T_s - T_\infty) L_{ref}^3 \quad (4.10)$$

όπου με $g [m/s^2]$ συμβολίζεται η επιτάχυνση της βαρύτητας και με $t_{he} [1/K]$ συμβολίζεται ο *συντελεστής θερμικής διαστολής ρευστού (fluid coefficient of thermal expansion)*.

Τέλος ο (μέσος) αριθμός *Nusselt* για τη θεώρηση ρευστού πάνω σε μία ακίνητη επίπεδη επιφάνεια με ροή παράλληλη στην επιφάνεια, ορίζεται ως:

$$Nu = \frac{h_c L_{ref}}{\kappa_{fl}} \quad (4.12)$$

Στις σχέσεις (4.8)-(4.12) για την περίπτωση του προβλήματος ροής παράλληλα σε επίπεδη πλάκα, όπου είναι ανάγκη να χρησιμοποιηθεί θερμοκρασία ρευστού, η θερμοκρασία αυτή υπολογίζεται στη θερμοκρασία στρώματος (*film temperature*) που ορίζεται ως:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

Σε περίπτωση που το Φ/Β πάνελ είναι τοποθετημένο οριζόντια $d_c \approx 0$, τότε στην εμπρόσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ θεωρώντας περίπτωση ελεύθερης συναγωγής και καθώς ο αέρας βρίσκεται σε θερμοκρασία μικρότερη από την εμπρόσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ ισχύει [2], κάνοντας χρήση της (4.12):

$$h_{c,free,up} = \begin{cases} 0.54 \frac{\kappa_{fl}}{L_{ref}} (Ra_{L_{ref}})^{1/4} & 10^5 < Ra_{L_{ref}} < 2 \times 10^7 \\ 0.14 \frac{\kappa_{fl}}{L_{ref}} (Ra_{L_{ref}})^{1/3} & 2 \times 10^7 < Ra_{L_{ref}} < 2 \times 10^{10} \end{cases} \quad (4.13)$$

με:

$$L_{ref} = \frac{H_1 H_2}{2(H_1 + H_2)} \quad (4.14)$$

όπου H_1, H_2 το μήκος και το πλάτος αντίστοιχα του Φ/Β πάνελ με $H_1 \geq H_2$. Από την άλλη, θεωρώντας πάλι περίπτωση ελεύθερης συναγωγής και καθώς πάλι ο αέρας βρίσκεται σε θερμοκρασία μικρότερη από την οπίσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ ισχύει [2] με χρήση της (4.12) ότι:

$$h_{c,free,down} = 0.27 \frac{\kappa_{fl}}{L_{ref}} \left(Ra_{L_{ref}} \right)^{1/4} \quad 3 \times 10^5 < Ra_{L_{ref}} < 10^{10} \quad (4.15)$$

με την ίδια τιμή για το μήκος αναφοράς.

Και στις δύο παραπάνω σχέσεις, οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται σε θερμοκρασία στρώματος.

Για την περίπτωση της εξαναγκασμένης συναγωγής, θεωρώντας ότι η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη στην επιφάνεια του Φ/Β πάνελ και ότι ο αριθμός Prandtl δεν μεταβάλλεται κατά μήκος του πάνελ, ο (μέσος) αριθμός Nusselt δίνεται από τη σχέση [3]:

$$Nu = 2 \frac{0.3387 Pr^{1/3} Re_{H_1}^{1/2}}{\left(1 + \left(\frac{0.0468}{Pr} \right)^{2/3} \right)^{1/4}} \quad Re_{H_1} \leq 5 \times 10^5 \quad (4.16)$$

Ενώ για $Re_{H_1} > 5 \times 10^5$ η αντίστοιχη σχέση γίνεται [4]:

$$Nu = 2 Pr^{1/3} (0.037 Re_{H_1}^{4/5} - 871) \quad Re_{H_1} > 5 \times 10^5 \quad (4.17)$$

Και εδώ, οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται σε θερμοκρασία στρώματος ενώ θεωρείται σαν μήκος το μήκος του Φ/Β πάνελ. Από τις (4.16) ή (4.17) και την (4.12) προκύπτει ο $h_{c,forced}$ για την εμπρόσθια και οπίσθια πλευρά του Φ/Β πάνελ. Στις παραπάνω σχέσεις, ο αριθμός 5×10^5 είναι το υποθετικό όριο μεταξύ των περιοχών όπου η ροή είναι στρωτή και τυρβώδης.

Πολλές φορές στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο τύπος $h_{c,r} = 5.7 + 3.8 v_\infty$ για την θεώρηση ελεύθερης συναγωγής ίσως ταυτόχρονα με την ακτινοβολία [6] ή ο τύπος $h_c = 2.8 + 3.0 v_\infty$ για τη θεώρηση συναγωγής, αλλά όπως αναφέρεται στο [6], οι τύποι αυτοί αφορούν σε διαστάσεις $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ για μήκος αναφοράς 0.5 m και δεν είναι απαραίτητα έγκυροι για διαφορετικές διαστάσεις.

4.1.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία στο Φ/Β πάνελ

Η θερμική ακτινοβολία είναι ουσιαστικά ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις από κάθε υλικό σώμα που βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 0 K [5]. Το σύνολο όλων των ηλεκτρομαγνητικών συχνοτήτων (αντίστοιχα μηκών κύματος) είναι αυτό που αποκαλείται συνήθως με τον όρο *ηλεκτρομαγνητικό φάσμα*. Το τελευταίο χωρίζεται σε διάφορες περιοχές (ζώνες συχνοτήτων) χωρίς όμως τα όρια μεταξύ των περιοχών αυτών να είναι σαφή. Συνήθως η ακτινοβολία μεταξύ 0.1 και $100 \text{ } \mu\text{m}$ ονομάζεται θερμική ακτινοβολία [2]. Στο [6] αναφέρεται ως θερμική ακτινοβολία η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταξύ 0.2 και $1000 \text{ } \mu\text{m}$.

Η εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας είναι ένα ογκομετρικό φαινόμενο, αλλά για την περίπτωση αδιαφανών στερεών θεωρείται ότι περιορίζεται στην επιφάνεια του σώματος. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας μίας επιφάνειας μπορούν να μεταβληθούν αισθητά με την κατάλληλη εφαρμογή λεπτών στρωμάτων-μανδυνών σε αυτήν.

Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ επιφανειών διαφέρει από την αγωγή και τη συναγωγή στο ότι δεν απαιτείται κάποιο μέσο για τη διάδοση της θερμότητας. Στην πραγματικότητα η μεταφορά ενέργειας μέσω ακτινοβολίας μεγιστοποιείται όταν μεταξύ των επιφανειών που εμπλέκονται στη συναλλαγή ενέργειας μεσολαβεί το απόλυτο κενό [2]. Ο Ήλιος ως ένα πολύ θερμό σώμα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία σε μικρά μήκη κύματος (*solar or short-wave radiation* [6]) καθώς τα αντίστοιχα φωτόνια περιέχουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Συνήθως το κομμάτι αυτό του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αφορά σε μήκη κύματος από 0.3 έως 3 μm [6]. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι αυτή που περιέχει ενέργεια ικανή για τη δημιουργία τάσης καθώς προσπίπτει σε ένα Φ/Β κελί. Αντίθετα, τα σώματα που βρίσκονται σε συνήθεις θερμοκρασίες είναι κατά πολύ ψυχρότερα από τον Ήλιο, αλλά και αυτά εκπέμπουν ακτινοβολία με τη μορφή θερμότητας, σε μεγάλα όμως μήκη κύματος (*long-wave radiation*) εφόσον τα αντίστοιχα φωτόνια περιέχουν μικρή ποσότητα ενέργειας. Στη βιβλιογραφία και ιδίως για περιπτώσεις “επίπεδης πλάκας” (“flat-plate”) Φ/Β πάνελ γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των δύο αυτών υποκατηγοριών της ακτινοβολίας.

Όταν προσπίπτει θερμική ακτινοβολία σε ένα σώμα, ένα μέρος της απορροφάται, ένα άλλο ανακλάται και το υπόλοιπο διαδίδεται («διαπερνά») το σώμα. Το λεγόμενο «μέλαν σώμα» (*blackbody*) είναι ένας υποθετικός τέλειος απορροφητής ακτινοβολίας. Τέλειος με την έννοια ότι ανεξαρτήτως των μηκών κύματος και των κατευθύνσεων που περιγράφουν την προσπίπτουσα σε αυτόν ακτινοβολία, η τελευταία απορροφάται από αυτόν εξ' ολοκλήρου, χωρίς να ανακλάται, ούτε να διαδίδεται κάποιο ποσοστό της. Επιπρόσθετα το μέλαν σώμα είναι και τέλειος εκπομπός της θερμικής ακτινοβολίας [6]: εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Ο ρυθμός με τον οποίο ακτινοβολείται η ολική θερμική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας από μία μελανή επιφάνεια [1] περιγράφεται από την εξίσωση [1, 2, 6]:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (4.18)$$

όπου με σ συμβολίζεται η σταθερά *Stefan-Boltzmann* με τιμή $5.6697 \times 10^{-8} [W / m^2 K^4]$. Η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας που εκλύεται από ένα μέλαν σώμα, δίνεται από το νόμο του Planck:

$$E_{\lambda,b} = \frac{2\pi h C_0^2}{\lambda^5 [\exp(h C_0 / \lambda k T) - 1]} = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]}$$

οπού με h συμβολίζεται η σταθερά του Planck, με k η σταθερά του Boltzmann, με λ το μήκος κύματος και με $C_1 = 2\pi h C_0^2$, $C_2 = h C_0 / k$ κατάλληλες σταθερές, με προτεινόμενες τιμές [6]: $C_1 = 3.7405 \times 10^8 [W \mu m^4 / m^2]$ και $C_2 = 14387.8 [\mu m K]$. Για τον υπολογισμό του ρυθμού ακτινοβολίας της «ολικής» θερμικής ενέργειας ανά μονάδα

επιφάνειας, γίνεται ολοκλήρωση σε όλα τα μήκη κύματος $(0, \infty)$ της παράστασης που δίνει το ρυθμό ακτινοβολίας της θερμικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας σε συγκεκριμένο μήκος κύματος σύμφωνα με το νόμο του Planck. Δηλαδή:

$$E_b = \int_0^\infty E_{\lambda,b} d\lambda = \sigma T^4.$$

Πολλές φορές αναφέρονται ως θερμοκρασία του Ήλιου τα $5777K$, που ουσιαστικά αναφέρονται σε *effective blackbody temperature*, δηλαδή στη θερμοκρασία που έχει ένα υποθετικό μέλαν σώμα το οποίο ακτινοβολεί την ίδια ποσότητα ενέργειας όπως ο Ήλιος.

Ο ρυθμός με τον οποίο εκπέμπεται (ολική-όλα τα μήκη κύματος) θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας από μία «φαιά» (gray)⁹ επιφάνεια, δίνεται από τον τύπο [1]:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4.19)$$

όπου με ε συμβολίζεται ο συντελεστής εκπομπής (*emittance*) της επιφάνειας. Ακριβέστερα, ο συντελεστής εκπομπής (*emittance*) μιας φαιάς επιφάνειας ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο εκπέμπεται η ολική θερμική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας προς τον ρυθμό με τον οποίο ακτινοβολείται η ολική θερμική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας μιας υποθετικής μελανής επιφάνειας που βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία T .

4.1.3.1 Συναλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ Φ/Β πάνελ, ουρανού και εδάφους

Θεωρώντας τώρα ένα έγκλειστο μέρος (*enclosure*) ν το πλήθος φαιών επιφανειών στις οποίες η ανάκλαση είναι διάχυτη (*diffuse*) και η θερμοκρασία τους αλλά και η προσπίπτουσα σε αυτές ακτινοβολία είναι ομοιόμορφες [6], αν συμβολιστεί με G_i [W/m^2] η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία στην i επιφάνεια και με ρ_i ο συντελεστής ανάκλασης, τότε για τη συνολική ακτινοβολία $J_{r,i}$ [W/m^2] που «απομακρύνεται» από την i επιφάνεια (*radiosity*) θα ισχύει:

$$J_{r,i} = \varepsilon_i E_{b,i} + \rho_i G_i \quad (4.20)$$

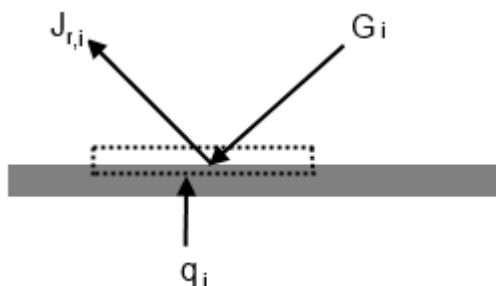
Καθότι οι επιφάνειες είναι φαιές, δεν διαδίδεται σε αυτές θερμική ακτινοβολία και συνεπώς ο συντελεστής διαπερατότητας είναι $\tau_i = 0$. Επομένως από τον τύπο $\alpha_i + \rho_i + \tau_i = 1$ λαμβάνεται για το συντελεστή απορροφητικότητα $\alpha_i = 1 - \rho_i$ και καθώς για μία φαιά επιφάνεια ισχύει ότι $\alpha_i = \varepsilon_i$, προκύπτει $\rho_i = 1 - \varepsilon_i$. Συνεπώς η (4.20) γίνεται:

$$J_{r,i} = \varepsilon_i E_{b,i} + (1 - \varepsilon_i) G_i \quad (4.21)$$

⁹ Οι ιδιότητες μίας φαιάς επιφάνειας όσον αφορά στην ακτινοβολία είναι ανεξάρτητες του μήκους κύματος. Για παράδειγμα, όσον αφορά στον μονοχρωματικό συντελεστή εκπομπής ισχύει $\varepsilon_\lambda = \varepsilon$ για κάθε μήκος κύματος, είναι σταθερός δηλαδή και ανεξάρτητος του μήκους κύματος.

Θεωρώντας ενεργειακή ισορροπία σε ένα στοιχείο της επιφάνειας αυτής (σχήμα 4-1) ανά μονάδα επιφάνειας ισχύει:

$$q_i = J_{r,i} - G_i \stackrel{(4.21)}{=} J_{r,i} - \frac{(J_{r,i} - \varepsilon_i E_{b,i})}{(1 - \varepsilon_i)} = \frac{\varepsilon_i (E_{b,i} - J_{r,i})}{1 - \varepsilon_i}$$



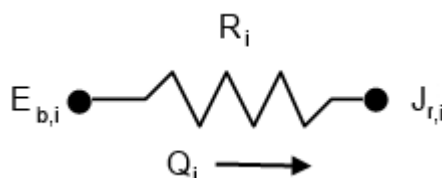
Σχήμα 4-1

Συνεπώς για όλη την επιφάνεια με εμβαδόν A_i ισχύει:

$$Q_i = \frac{(E_{b,i} - J_{r,i})}{\left(\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i} \right)} \quad (4.22)$$

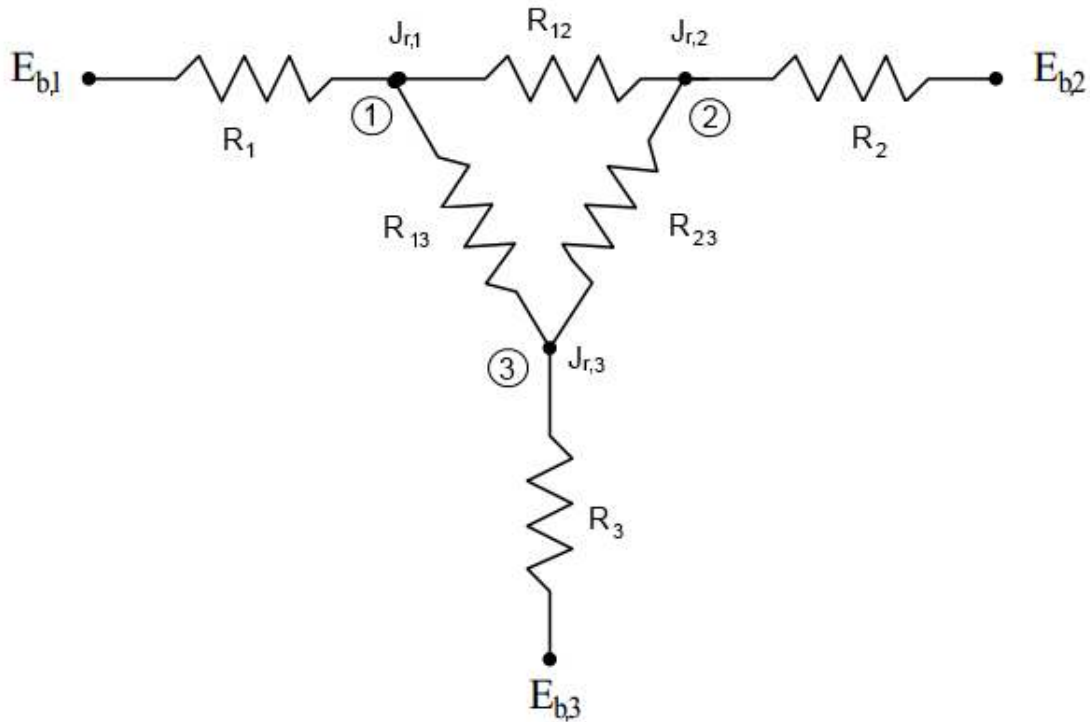
Το ηλεκτρικό ανάλογο απεικονίζεται στο σχήμα 4-2, με την ωμική αντίσταση να έχει τιμή

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}$$



Σχήμα 4-2

Με βάση τα παραπάνω, είναι δυνατό σε αντιστοιχία με τη μέθοδο ρευμάτων βρόχων της θεωρίας των κυκλωμάτων, να υπολογίζονται τα αντίστοιχα ρεύματα (*radiosities*) στα κατάλληλα διαμορφωμένα ηλεκτρικά κυκλώματα, που προσομοιώνουν το αντίστοιχο πρόβλημα της συναλλαγής θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ N φαιών επιφανειών που βρίσκονται σε ένα έγκλειστο μέρος (*enclosure*). Για την περίπτωση όπου $N=3$ (π.χ. εμπρόσθια ή οπίσθια πλευρά Φ/Β πάνελ, έδαφος, ουρανός) το αντίστοιχο κύκλωμα [7, 8] απεικονίζεται στο σχήμα 4-3.



Σχήμα 4-3

Στο σχήμα 4-3 για τις αντιστάσεις R_1, R_2, R_3 ισχύουν

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i} \quad \forall \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.23)$$

ενώ για τις υπόλοιπες αντιστάσεις είναι

$$R_{13} = \frac{1}{A_1 F_{13}}, R_{23} = \frac{1}{A_1 F_{23}}, R_{12} = \frac{1}{A_1 F_{12}} \quad (4.24)$$

όπου με F_{ij} συμβολίζεται ο λεγόμενος *συντελεστής όψεως (view factor)* και εκφράζει τι μέρος της συνολικής ακτινοβολίας που εκλύει η επιφάνεια i , προσπίπτει στην επιφάνεια j . Για παράδειγμα, η συνολική ακτινοβολία που εκλύεται από την επιφάνεια 2 και προσπίπτει στην 1 (αντίστοιχα η τιμή ρεύματος με φορά από τον κόμβο 2 προς τον 1) είναι: $J_2 A_2 F_{21}$. Η συνολική ακτινοβολία που εκλύεται από την επιφάνεια 3 και προσπίπτει στην 1 (αντίστοιχα η τιμή ρεύματος με φορά από τον κόμβο 3 προς τον 1) είναι $J_3 A_3 F_{31}$. Επιπρόσθετα, για τους συντελεστές όψεως ισχύει η λεγόμενη *σχέση της αμοιβαιότητας (reciprocity relation)* [2], σύμφωνα με την οποία: $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$. Επομένως: $A_2 F_{21} = A_1 F_{12}$ και $A_3 F_{31} = A_1 F_{13}$. Επίσης από την ενεργειακή ισορροπία στην επιφάνεια 1 (τιμή του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R_1 με φορά προς τον κόμβο 1) ισχύει:

$$Q_1 = \frac{E_{b,1} - J_{r,1}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}}$$

Συνεπώς από το νόμο ρευμάτων του *Kirchhoff* στον κόμβο 1, λαμβάνεται:

$$\frac{E_{b,1} - J_{r,1}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} + \frac{J_{r,2} - J_{r,1}}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{J_{r,3} - J_{r,1}}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} = 0.$$

Ομοίως εφαρμόζοντας το Ν.Ρ.Κ στους κόμβους 2 και 3, λαμβάνεται το σύστημα:

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_{b,1} - J_{r,1}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} + \frac{J_{r,2} - J_{r,1}}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{J_{r,3} - J_{r,1}}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} &= 0 \\ \frac{E_{b,2} - J_{r,2}}{\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} + \frac{J_{r,3} - J_{r,2}}{\frac{1}{A_2 F_{23}}} + \frac{J_{r,1} - J_{r,2}}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} &= 0 \\ \frac{E_{b,3} - J_{r,3}}{\frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3}} + \frac{J_{r,2} - J_{r,3}}{\frac{1}{A_2 F_{23}}} + \frac{J_{r,1} - J_{r,3}}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

Η επίλυση του παραπάνω συστήματος, οδηγεί στην εύρεση των $J_{r,1}, J_{r,2}, J_{r,3}$. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να βρεθεί και ο ρυθμός με τον οποίο λαμβάνει/εκκλύει θερμότητα η i επιφάνεια (σχέση (4.22)).

Στην περίπτωση που το Φ/Β πάνελ βρίσκεται υπό κλίση d_c , μπορεί απλουστευμένα να θεωρηθεί ότι το έγκλειστο μέρος (enclosure) αποτελείται από την πάνω επιφάνεια του Φ/Β πάνελ, από το τμήμα του ουράνιου θόλου που «βλέπει» το πάνελ και το τμήμα του εδάφους που «βλέπει» το πάνελ, θεωρώντας το έδαφος ως άπειρο επίπεδο. Σε αυτήν την περίπτωση οι αντίστοιχοι συντελεστές όψεως γίνονται [9]:

$$F_{f,s} = F_{13} = \frac{1 + \cos d_c}{2} \text{ και } F_{f,g} = F_{12} = \frac{1 - \cos d_c}{2}$$

και καθώς πρόκειται για έγκλειστο μέρος (enclosure) ισχύει ο τύπος [2]:

$$\sum_j F_{ij} = 1$$

Συνεπώς $F_{11} = 0$. Όμως για $A_2 \rightarrow \infty, A_3 \rightarrow \infty$ είναι και $R_2 \rightarrow 0, R_3 \rightarrow 0$ από τη (4.23) και έτσι (θεωρώντας τις αντίστοιχες ισότητες: $R_2 = 0, R_3 = 0$) η πρώτη εξίσωση του συστήματος (4.25) δίνει:

$$\frac{E_{b,1} - J_{r,1}}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1}} + \frac{E_{b,2} - J_{r,1}}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{E_{b,3} - J_{r,1}}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} = 0$$

από όπου προκύπτει:

$$J_{r,1} = \frac{\frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} E_{b,1} + F_{12} E_{b,2} + F_{13} E_{b,3}}{\frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} + F_{12} + F_{13}}$$

Συνεπώς, δεδομένου ότι: $F_{12} + F_{13} = 1$, από την παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$q_1 = \frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_1} (E_{b,1} - J_{r,1}) = \dots = \varepsilon_1 E_{b,1} - \varepsilon_1 F_{12} E_{b,2} - \varepsilon_1 F_{13} E_{b,3}$$

Επομένως για την εμπρόσθια πλευρά-επιφάνεια του Φ/Β πάνελ με συντελεστή εκπομπής ε_f ισχύει:

$$q_{r,f} = \varepsilon_f \sigma T_{front}^4 - \varepsilon_f F_{f,g} \sigma T_g^4 - \varepsilon_f F_{f,s} \sigma T_{sky}^4 \quad (4.26)$$

όπου T_g, T_{sky} είναι οι θερμοκρασίες εδάφους και ουρανού, στις οποίες θα γίνει σύντομα περαιτέρω αναφορά.

Σε περίπτωση που θεωρηθεί ότι το Φ/Β πάνελ είναι σε οριζόντια θέση και ότι με αυτό τον τρόπο το έγκλειστο μέρος (enclosure) θεωρώντας την εμπρόσθια επιφάνεια αποτελείται μόνο από τον ουράνιο θόλο $A_2 \rightarrow \infty$ και την επιφάνεια την ίδια, μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει μία ισοδύναμη-ενιαία θερμοκρασία ουρανού τέτοια ώστε να ισχύει: $Q_{f,s} = A F_{f,s} \varepsilon_f \sigma (T_{front}^4 - T_{sky}^4)$, όπου με A συμβολίζεται η επιφάνεια του πάνελ. Ο συντελεστής όψεως είναι ίσος με τη μονάδα καθώς το πάνελ «βλέπει» μόνο τον ουράνιο θόλο, επομένως θα ισχύει:

$$Q_{f,s} = A \varepsilon_f \sigma (T_{front}^4 - T_{sky}^4) \quad (4.27)$$

Η πραγματική θερμοκρασία του ουρανού δεν είναι εύκολο να μετρηθεί και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το ύψος και οι καιρικές συνθήκες (καθαρός - συννεφιασμένος ουρανός κλπ.). Πολλές φορές ο ουρανός θεωρείται ως μέλαν σώμα [6] ($\varepsilon_{sky} = 1$) που βρίσκεται σε μία ισοδύναμη θερμοκρασία T_{sky} , τέτοια ώστε να ισχύει η (4.27). Στα [9, 10, 11] η θερμοκρασία του ουρανού υπολογίζεται από τον τύπο

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \quad (4.28)$$

που αποδίδεται στον *Swanbank*, όπου με T_a συμβολίζεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται αρκετά στη βιβλιογραφία. Η φόρμουλα αυτή αναφέρεται σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Στο [12] αναφέρεται ότι μπορεί να θεωρηθεί $T_{sky} = T_a - 20K$ για συνθήκες καθαρού ουρανού και $T_{sky} = T_a$ για συνθήκες συννεφιάς (*overcast*). Γενικά σε συνθήκες συννεφιάς τείνει να αυξάνεται η θερμοκρασία του ουρανού σε σχέση με συνθήκες καθαρού ουρανού [6]. Από την άλλη, συνήθως η θερμοκρασία του εδάφους θεωρείται ότι ταυτίζεται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος [10, 13]. Δηλαδή:

$$T_g = T_a \quad (4.29)$$

Η αντίστοιχη με την (4.26) σχέση για την οπίσθια πλευρά του πάνελ είναι:

$$q_{r,b} = \varepsilon_b \sigma T_{back}^4 - \varepsilon_b F_{b,g} \sigma T_g^4 - \varepsilon_b F_{b,s} \sigma T_{sky}^4 \quad (4.30)$$

και οι αντίστοιχοι συντελεστές όψεως λαμβάνουν τη μορφή [9, 11]:

$$F_{b,s} = \frac{1 + \cos(\pi - d_c)}{2} = \frac{1 - \cos d_c}{2} \quad \text{και} \quad F_{b,g} = \frac{1 - \cos(\pi - d_c)}{2} = \frac{1 + \cos d_c}{2}$$

Χαρακτηριστικές ενδεικτικές τιμές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν βάσει του [9] είναι οι: $\varepsilon_b = 0.85, \varepsilon_f = 0.91$.

Φυσικά οι παραπάνω θεωρήσεις είναι απλουστεύσεις που δεν ισχύουν στην πραγματικότητα σε ένα Φ/Β σύστημα, αλλά μπορεί κανείς να ισχυριστεί ότι αποτελούν σχετικά ικανοποιητικές προσεγγίσεις για ένα ορθώς σχεδιασμένο Φ/Β σύστημα σε επίπεδο έδαφος. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (4.26) και (4.30) για μικρή όμως γωνία κλίσης $\sim 7^\circ$, συνεπώς θα μπορούσε να υιοθετηθεί και η σχέση (4.27) με την αντίστοιχη που αφορά στην οπίσθια πλευρά του Φ/Β πάνελ και στο έδαφος.

4.1.3.2 Μετάδοση θερμότητας λόγω ηλιακής ακτινοβολίας

Στην περίπτωση των μικρών μηκών κύματος δηλαδή για τη συγκεκριμένη περίπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, γίνεται η θεώρηση ότι όση από την απορροφούμενη από το στρώμα του Φ/Β κελιού ηλιακή ακτινοβολία δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, μετατρέπεται σε θερμότητα.

Έχοντας ως βάση το κεφάλαιο 3 όπου μελετήθηκε η χαρακτηριστική καμπύλη τάσεως-ρεύματος, είναι δυνατό να εκφραστεί η θερμική ισχύς ανά μονάδα όγκου Θ [W / m^3] εντός ενός Φ/Β κελιού. Σε αυτήν την περίπτωση, δε χρειάζεται να εξεταστεί άμεσα η θερμότητα που προέρχεται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ως αντίστοιχη συνοριακή συνθήκη είτε πρόκειται για τρισδιάστατη είτε για δυσδιάστατη ή μονοδιάστατη θεώρηση, κάτι που είναι και το πιο σύνηθες σε αντίστοιχες μελέτες-προσομοιώσεις. Αντ' αυτού, χρησιμοποιείται μία προσέγγιση που πηγάζει αρχικά από μία παρόμοια με του [13] θεώρηση και σύμφωνα με την οποία η παραγωγή θερμότητας ανά μονάδα όγκου Θ [W / m^3] εντός του Φ/Β κελιού δίνεται από τον τύπο:

$$\Theta = \frac{(1-e_s) \times S \times A_{cell}}{O_{cell}} \quad (4.31)$$

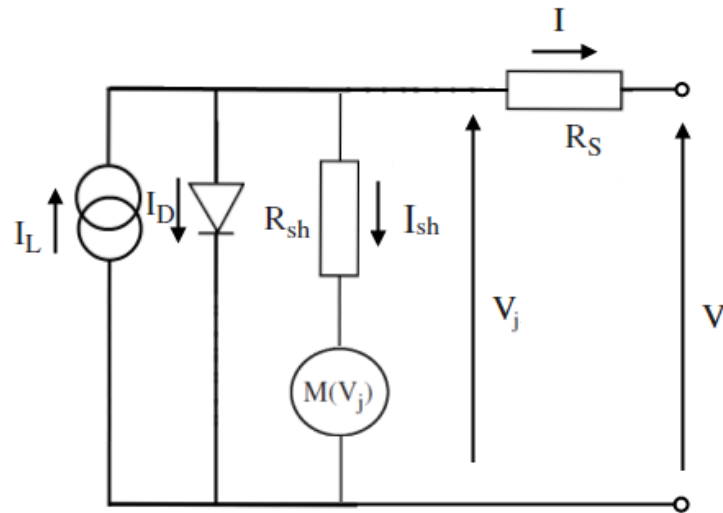
όπου με $O_{cell} [m^3]$ συμβολίζεται ο όγκος του Φ/Β κελιού και με e_s το μέρος από τη συνολική ισχύ που απορροφάται, που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στην εργασία αυτή γίνεται η θεώρηση, όπως στο [13] ότι η παραγωγή θερμότητας γίνεται εντός του στρώματος του Φ/Β κελιού, χωρίς να θεωρείται άλλη πηγή θερμότητας εντός του Φ/Β πάνελ, αλλά ο τρόπος προσέγγισης διαφέρει.

Συγκεκριμένα, βάσει του μοντέλου του Bishop η ισχύς που παράγει ή καταναλώνει το Φ/Β κελί, βασίζεται στην εξίσωση (3.36):

$$I = I_L - I_o \left(e^{(V+IR_s)/a} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \left[1 + l_1 \left(1 - \frac{V + IR_s}{V_{br}} \right)^{-l_2} \right]$$

Παρατίθεται ξανά και το αντίστοιχο σχήμα για ευκολία:



Σχήμα 4-4

Από το παραπάνω σχήμα, μπορεί να προκύψει μία καλή εκτίμηση της θερμότητας που παράγεται στο Φ/Β κελί, η οποία για $V_j \geq 0$, δίνεται από την παράσταση $I^2 R_s + I_D V_j + I_{sh}^2 R_{sh}$ ως θερμική ισχύς, ενώ για $V_j < 0$, δίνεται από τη σχέση VI . Δηλαδή:

$$P_{\theta, cell} = \begin{cases} I^2 R_s + I_D V_j + I_{sh}^2 R_{sh} & V_j \geq 0 \\ VI & V_j < 0 \end{cases} \quad (4.32)$$

όπου στην παραπάνω σχέση ισχύει:

$$I_{sh} = \frac{V_j}{R_{sh}} \left[1 + l_1 \left(1 - \frac{V_j}{V_{br}} \right)^{-l_2} \right] \text{ με } V_j = V + IR_s$$

Έτσι, για δεδομένες παραμέτρους $I_L, I_o, a, R_s, R_{sh}, l_1, l_2, V_{br}$ και με γνωστό το σημείο λειτουργίας του Φ/Β κελιού, είναι δυνατή η εκτίμηση του $P_{\theta, cell}$.

4.1.4 Επίλυση εξίσωσης θερμικής αγωγής

Για να έχει η εξίσωση (4.1) μία και μοναδική λύση και να είναι καλώς τεθειμένο το αντίστοιχο κάθε φορά πρόβλημα, πρέπει να οριστούν οι κατάλληλες συνοριακές και αρχικές συνθήκες. Στις εξισώσεις θερμικής αγωγής, οι συνοριακές συνθήκες σε μη ιδιόμορφα σημεία, μπορούν να είναι δύο ειδών (σχήμα 4-5):

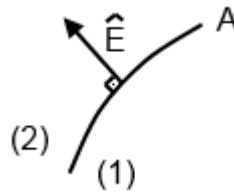
1) Συνθήκες *Dirichlet*:

$$T|_A = T_1$$

2) Συνθήκες *Neumann*:

$$\hat{E} \cdot \vec{q}|_A = q'$$

όπου \hat{E} το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα που χαρακτηρίζει την επιφάνεια A .



Σχήμα 4-5

Οι παραπάνω συνθήκες είναι εν γένει σημειακές. Αντίστοιχα οι αρχικές συνθήκες αφορούν στην τιμή της θερμοκρασίας στα διάφορα σημεία του μέσου κατά την έναρξη του χρονικού διαστήματος που ενδιαφέρει. Η τιμή αυτή μπορεί να θεωρείται ίδια σε όλα τα σημεία του μέσου ή να έχει και αυτή σημειακή εξάρτηση και να εξαρτάται από τις χωρικές μεταβλητές (τη θέση του σημείου).

Βάσει όλων των παραπάνω, οι συνοριακές συνθήκες για την εμπρόσθια επιφάνεια του Φ/Β πάνελ, λαμβάνουν τη μορφή:

$$\hat{E} \cdot \vec{q}|_{A_{front}} = h_{c,up}(T_{\infty} - T) + q_{r,f} \quad (4.33)$$

Ενώ αντίστοιχα, στην οπίσθια πλευρά του Φ/Β πάνελ:

$$\hat{E} \cdot \vec{q}|_{A_{back}} = h_{c,down}(T_{\infty} - T) + q_{r,b} \quad (4.34)$$

όπου με $T_{\infty}[K]$ συμβολίζεται η θερμοκρασία του αέρα μακριά από την επιφάνεια του Φ/Β πάνελ. Οι συντελεστές $h_{c,up}, h_{c,down}$ είναι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας για την περίπτωση της μικτής συναγωγής για την πάνω και κάτω επιφάνεια αντίστοιχα και θεωρούνται συναρτήσεις των $h_{c,free,up}, h_{c,forced}$ και $h_{c,free,down}, h_{c,forced}$ αντίστοιχα.

Επιπρόσθετα, στις τέσσερις εναπομείνουσες πλευρές του Φ/Β πάνελ θεωρείται ότι η μόνωση από θερμικής πλευράς είναι τέλεια, συνεπώς: $\hat{\mathbf{E}} \cdot \vec{q}|_{A_{\text{rest}}} = 0$ (4.35)

4.2 Δομή και θερμικά χαρακτηριστικά Φ/Β πάνελ

Η εσωτερική δομή των κρυσταλλικών Φ/Β πάνελ, εξαρτάται μεταξύ άλλων από το είδος του Φ/Β κελιού (πόλυ- ή μόνο-) και διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή και από μοντέλο σε μοντέλο. Για να προσομοιωθεί η κατανομή της θερμοκρασίας σε ένα Φ/Β πάνελ, είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η εσωτερική δομή του συγκεκριμένου Φ/Β πάνελ του οποίου η θερμοκρασιακή κατανομή προσομοιώνεται. Στην παρούσα εργασία, σε μία προσπάθεια γενίκευσης των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε μία όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτική για το τρέχον τεχνολογικό επίπεδο δομή ενός πολυκρυσταλλικού Φ/Β πάνελ.

Οι δύο μεγάλες διαστάσεις του Φ/Β πάνελ που χρησιμοποιήθηκε ήταν 1650 mm και 1020 mm. Ωστόσο, όσον αφορά στη μελέτη της θερμοκρασιακής κατανομής, δεν ενδιαφέρει η τρίτη διάσταση, δηλαδή το πάχος του Φ/Β πάνελ, που καθορίζεται από το πάχος του πλαισίου (*frame*), αλλά η διαστρωμάτωση και τα υλικά από τα οποία αποτελείται το κύριο μέρος του Φ/Β πάνελ, δηλαδή το Φ/Β πάνελ πριν την τοποθέτηση του εξωτερικού πλαισίου (το τελευταίο κατασκευάζεται συνήθως από ανοδιωμένο αλουμίνιο). Κατά την κατασκευή ενός Φ/Β πάνελ η τοποθέτηση του εξωτερικού πλαισίου (*framing*) είναι ένα από τα τελευταία στάδια κατασκευής του και ακολουθεί έπειτα από τη διαδικασία του *lamination* (κατά την οποία δημιουργείται το «σάντουιτς» από την ενοποίηση των στρωμάτων-υλικών που αποτελούν το πάνελ) και αφού κοπούν πιθανές περισσευούμενες άκρες (*edge cutting and trimming*).

Θεωρήθηκε ότι το Φ/Β πάνελ, αποτελείται από τα υλικά και τη διαστρωμάτωση που φαίνεται στον πίνακα 4-1, οποίος συνοδεύεται και από το ανάλογο απλουστευμένο σχήμα:

Πίνακας 4-1					
Στρώμα	Εμπρόσθιο κάλυμμα	Ενθυλάκωση (encapsulation)	Φ/Β κελί	Ενθυλάκωση (encapsulation)	Οπίσθιο κάλυμμα
Θεωρούμενο υλικό κατασκευής	Tempered glass	EVA	Πυρίτιο	EVA	PET
Πάχος	3.2 mm [14]	500 μm [15]	0.166 mm [15]	500 μm	328 μm μ.ο για 0% αβεβαιότητα από τα [16, 17]
Θερμική αγωγιμότητα κ [W/mK]	2 [13]	0.311 [13]	148 [18]	0.311	0.15 [13, 18]

Ειδική θερμοχωρητι- κότητα $c_p [J / kgK]$	500 [13, 18]	2090 [13, 18]	677 [13, 18]	2090	1250 [13, 18]
Πυκνότητα $\rho [kg / m^3]$	2450 [13]	960 [18, 19]	2330 [13, 18, 20]	960	1200 [13, 18]



Σχήμα 4-6

Πρέπει να επισημανθεί και με βάση τον παραπάνω πίνακα, ότι ένα στρώμα μέσα στο Φ/Β πάνελ δεν αποτελείται από ένα μόνο υλικό, για αυτό και αναφέρεται στην πρώτη στήλη η έκφραση «θεωρούμενο υλικό κατασκευής». Για παράδειγμα το στρώμα που αφορά στο Φ/Β κελί συνήθως αποτελείται και από ασήμι (συλλέκτης [20]) (*metal grid-“fingers”*) και από ασήμι ή αλουμίνιο (εκπομπός [20]) τα οποία, σε συμφωνία και με το [13], δε λαμβάνονται υπόψη. Επίσης από την άποψη του υλικού, δε λαμβάνεται υπόψη η ενδεχόμενη ύπαρξη του πολύ λεπτού *αντιανακλαστικού μανδύα (ar coating)*¹⁰ [21]. Δε λαμβάνονται επιπρόσθετα υπόψη τα *interconnect ribbons* και τα *bus-bars* που χρησιμοποιούνται έτσι ώστε η εμπρόσθια επαφή (αρνητικός πόλος) του ενός κελιού να ενώνεται με την οπίσθια επαφή (θετικός πόλος) του επόμενου. Για αυτό το λόγο άλλωστε υπάρχει και μία μικρή απόσταση μεταξύ των κελιών που όμως ούτε αυτή λαμβάνεται υπόψη και το στρώμα «Φ/Β κελί» θεωρείται ενιαίο. Ακόμα το εξωτερικό στρώμα, δεν αποτελείται μόνο από υλικό PET αλλά και από πρόσθετο υλικό επικόλλησης που μεσολαβεί μεταξύ του EVA και του PET ή μπορεί να αποτελείται από διαστρωμάτωση της μορφής Tedlar-PET-Tedlar ή PET-EVA-PET. Επισημαίνεται ξανά ότι ο διαχωρισμός αυτός δεν είναι απόλυτος, τόσο όσον αφορά στην κατηγοριοποίηση των στρωμάτων και στο πάχος τους όσο και στα υλικά από τα οποία αποτελούνται.

Επισημαίνεται τέλος, ότι τα υλικά θεωρούνται σταθερά (μη εξάρτηση των παραμέτρων κ, c_p, ρ από το χρόνο), γραμμικά (μη εξάρτηση των παραμέτρων κ, c_p, ρ από τη θερμοκρασία), ομογενή (μη εξάρτηση των παραμέτρων κ, c_p, ρ από τις χωρικές μεταβλητές-θέση του σημείου) και ανισοτροπικά (μη εξάρτηση των παραμέτρων κ, c_p, ρ από την κατεύθυνση). Αυτές οι υποθέσεις δεν ισχύουν στην πραγματικότητα, αλλά για

¹⁰ Με την εφαρμογή του αντιανακλαστικού μανδύα, επιτυγχάνεται καλύτερος βαθμός απόδοσης τόσο στο επίπεδο του κελιού όσο και του αντίστοιχου Φ/Β πάνελ. Ο αντιανακλαστικός μανδύας εξασφαλίζει ότι όσο το δυνατό λιγότερο φως ανακλάνεται από την επιφάνεια του κελιού και μειώνει έτσι τις απώλειες από την ανάκλαση. Εφαρμόζεται πριν την εφαρμογή των εμπρόσθιων και των οπίσθιων επαφών (συλλέκτης-εκπομπός).

μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικές προσεγγίσεις. Για παράδειγμα στο στρώμα του Φ/Β κελιού που ενδιαφέρει άμεσα, μπορεί να εμφανιστεί ανομοιογένεια, ανισοτροπικότητα και μη γραμμικότητα τόσο στις θερμικές όσο και στις ηλεκτρομαγνητικές παραμέτρους του (διηλεκτρική επιτρεπτότητα, ηλεκτρική αγωγιμότητα, μαγνητική διαπερατότητα). Για αυτούς τους λόγους εξάλλου, η συνολική $I-V$ χαρακτηριστική ενός κελιού δεν είναι ακριβώς η ίδια σε διαφορετικές περιπτώσεις σκίασης όπου όμως συνολικά σκιάζεται το ίδιο ποσοστό επιφάνειας του Φ/Β κελιού. Δηλαδή η επίδραση της σκίασης στην πραγματικότητα δεν είναι απολύτως γραμμική ούτε σε επίπεδο Φ/Β κελιού, ούτε προφανώς στην περίπτωση του Φ/Β πάνελ, όπου συνδέονται πολλά Φ/Β κελιά σε σειρά. Ωστόσο για απλούστευση και επειδή δεν είναι δυνατό στα πλαίσια αυτής της εργασίας να είναι γνωστές μεταξύ άλλων οι παράμετροι κ, c_p, ρ ούτε η διηλεκτρική επιτρεπτότητα και η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σημειακό επίπεδο, αλλά ούτε και σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας ή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, θεωρείται ότι η επίδραση της σκίασης είναι γραμμική τόσο από ηλεκτρικής όσο και από θερμικής σκοπιάς σε επίπεδο Φ/Β κελιού.

4.3 Αξιολόγηση του μοντέλου θερμοκρασιακής κατανομής

Η επαλήθευση του μοντέλου θερμοκρασιακής κατανομής που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή, βασίστηκε σε μετρήσεις που διεξήχθησαν με θερμοκάμερα στο Φ/Β πάνελ που είχε χρησιμοποιηθεί και στις μετρήσεις του κεφαλαίου 3 και από το οποίο είχαν αφαιρεθεί οι δίοδοι bypass. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων το Φ/Β πάνελ βραχυκυκλώθηκε αφού έγινε κάλυψη ενός Φ/Β κελιού του, στο εξής θα ονομάζεται φ/β κελί Γ, με αδιαπέραστο υλικό σε ποσοστό 75% της συνολικής επιφάνειας. Η μέση τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά τη διάρκεια του πειράματος μετρήθηκε με χρήση κατάλληλου αμπερομέτρου. Χρησιμοποιήθηκε επίσης η μέση τιμή της ενεργώς απορροφούμενης ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η οποία μετρήθηκε με τη βοήθεια του φ/β αισθητήρα-κελιού αναφοράς της εικόνας 3-3. Η θερμοκρασία αέρα θεωρήθηκε ίδια με αυτήν του περιβάλλοντος, ενώ η μέση θερμοκρασία του Φ/Β κελιού λίγο πριν την έναρξη της κάλυψης και των αντίστοιχων μετρήσεων ήταν $56^{\circ}C$ περίπου.

4.3.1 Εκτίμηση θερμικής ισχύος

Οι ηλεκτρικές παράμετροι του καλυμμένου Φ/Β κελιού του πάνελ, μπορούν να εκτιμηθούν με μετρήσεις πεδίου ακολουθώντας τη μέθοδο που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ή με οποιαδήποτε άλλη μεθοδολογία.

Έτσι, για παράδειγμα στο καλυμμένο μέρος του Φ/Β κελιού Γ, και για κάλυψη σε ποσοστό w_{cov} ($w_{cov} = 75\%$ βάσει του συγκεκριμένου πειράματος), μπορούν να εκτιμηθούν οι παράμετροι του μοντέλου του Bishop ως:

$$R_{sh}^{pc.cov} \approx w_{cov} R_{sh}^{cell.cov}, I_2^{pc.cov} \approx I_2^{cell.cov}$$

$$I_1^{pc.cov} \approx I_1^{cell.cov}, V_{br}^{pc.cov} \approx V_{br}^{cell.cov}$$

Αντίστοιχα σε ένα ακάλυπτο Φ/Β κελί του πάνελ, είναι δυνατόν ενδεχομένως και με χρήση των σχέσεων αναγωγής της παραγράφου 3.2.1, να εκτιμηθούν οι παράμετροι:

$$I_L^{cell,ill}, I_o^{cell,ill}, a^{cell,ill}, R_s^{cell,ill}, R_{sh}^{cell,ill}$$

Έτσι, μπορούν να τελικά να εκτιμηθούν οι παράμετροι:

$$I_L^{pc,ill}, I_o^{pc,ill}, a^{pc,ill}, R_s^{pc,ill}$$

που αφορούν στο ακάλυπτο μέρος του μερικώς καλυμμένου φ/β κελιού κατά την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας, με βάση τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} I_L^{pc,ill} &\simeq (1 - w_{cov}) \times I_L^{cell,ill}, & I_o^{pc,ill} &\simeq (1 - w_{cov}) \times I_o^{cell,ill} \\ a^{pc,ill} &\simeq (1 - w_{cov}) \times a^{cell,ill}, & R_s^{pc,ill} &\simeq (1 - w_{cov}) \times R_s^{cell,ill} \end{aligned}$$

ενώ η $R_{sh}^{pc,ill}$ θεωρείται άγνωστη.

Αντίστοιχα, για το καλυμμένο μέρος του μερικώς καλυμμένου φ/β κελιού ισχύει:

$$\begin{aligned} I_L^{pc,cov} &\simeq 0, & I_o^{pc,cov} &\simeq w_{cov} \times I_o^{cell,ill} \\ a^{pc,cov} &\simeq w_{cov} \times a^{cell,ill}, & R_s^{pc,cov} &\simeq w_{cov} \times R_s^{cell,ill} \end{aligned}$$

Το ισοδύναμο κελί με ομοιόμορφη ακτινοβολία αλλά με μικρότερη ένταση ακτινοβολίας θα έχει παραμέτρους που εκτιμώνται βάσει της παραγράφου 3.2.2 και των αντίστοιχων σχέσεων αναγωγής της 3.2.1 ως:

$$\begin{aligned} I_L^{eq} &\simeq I_L^{pc,ill}, & I_o^{eq} &\simeq I_o^{cell,ill} \\ a^{eq} &\simeq a^{cell,ill}, & R_s^{eq} &\simeq R_s^{cell,ill} \\ R_{sh}^{eq} &\simeq \frac{1}{(1 - w_{cov})} \times R_{sh}^{cell,ill} \end{aligned}$$

Από τις παραπάνω 5 παραμέτρους, καθώς είναι εύκολο να μετρηθεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} κατά τη διάρκεια του πειράματος, υπολογίζεται η τάση V^{eq} από την οποία στη συνέχεια υπολογίζεται το ρεύμα που διέρχεται από το καλυμμένο και το μη καλυμμένο τμήμα και συνεπώς, η θερμική ισχύς που παράγει το κάθε τμήμα.

Με υπολογισμένη τώρα την τάση V^{eq} μπορεί να εκτιμηθεί η άγνωστη $R_{sh}^{pc,ill}$ έτσι ώστε να ισχύουν:

$$I_L^{pc,ill} + I_L^{pc,cov} = I_{sc} \quad (4.36)$$

$$V^{pc,ill} = V^{pc,cov} = V^{eq} \quad (4.37)$$

$$f_{pc,ill}(I_L^{pc,ill}, V^{pc,ill}, R_{sh}^{pc,ill}) = 0 \quad (4.38)$$

$$f_{pc,cov}(I_L^{pc,cov}, V^{pc,cov}) = 0 \quad (4.39)$$

όπου με τις (4.38) και (4.39) εκφράζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του καλυμμένου και του ακάλυπτου μέρους. Από την $\int_{pc.cov} (I^{pc.cov}, V^{pc.cov}) = 0$ προκύπτει η τιμή του $I^{pc.cov}$ και συνεπώς από την (4.36) η τιμή του $I^{pc.ill}$. Από την (4.36) εκτιμάται τέλος η τιμή του $R_{sh}^{pc.ill}$.

Συνεπώς:

$$\begin{aligned} P_{\theta}^{pc.ill} &= V^{eq} \times I^{pc.ill} \\ P_{\theta}^{pc.cov} &= V^{eq} \times I^{pc.cov} \end{aligned}$$

Τα «κανονικώς» φωτισμένα Φ/Β κελιά έχουν τάση

$$V^{ill} = \frac{-V^{eq}}{N_s - 1}$$

από όπου με βάση τις τιμές των $I_L^{cell,ill}$, $I_o^{cell,ill}$, $a^{cell,ill}$, $R_s^{cell,ill}$, $R_{sh}^{cell,ill}$, εκτιμάται η τιμή I^{ill} . Φυσιολογικά, θα πρέπει $I^{ill} \approx I_{sc}$.

Στη συνέχεια, καθώς για ένα Φ/Β κελί είναι $e_s = \frac{I^{ill} V^{ill}}{S A_{cell}}$, θα είναι και:

$$\Theta_{ill} = \frac{(1 - e_s) \times S \times A_{cell}}{O_{cell,ill}} [W / m^3]$$

Η τιμή που προκύπτει από τη σχέση αυτή για το Θ_{ill} και οι αντίστοιχες που πηγάζουν από την $P_{\theta}^{pc.cov}$ και την $P_{\theta}^{pc.ill}$, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη σχέση (4.5) και σε συνδυασμό με τις κατάλληλες οριακές και αρχικές συνθήκες (4.1.4) οδηγούν στην επίλυσή της και κατά συνέπεια στην εκτίμηση της θερμοκρασιακής κατανομής.

4.3.2 Σύγκριση μοντελοποιημένης και μετρηθείσας θερμοκρασιακής κατανομής

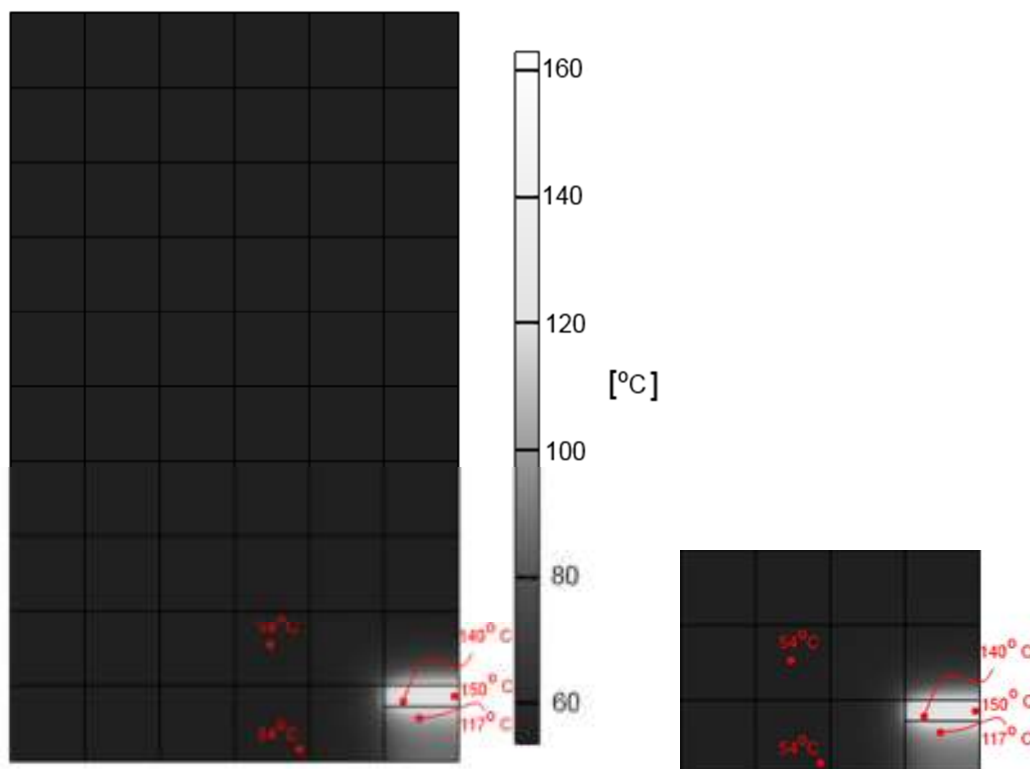
Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις αξιολόγησης του μοντέλου θερμοκρασιακής κατανομής (θερμοκάμερα, αναλυτής ισχύος) απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα, όπου ο αναλυτής ισχύος χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης με κατάλληλη “αμπεροτσιμπίδα”.



Εικόνα 4-1

Επίσης έγινε χρήση του I-V tester με τους αισθητήρες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.

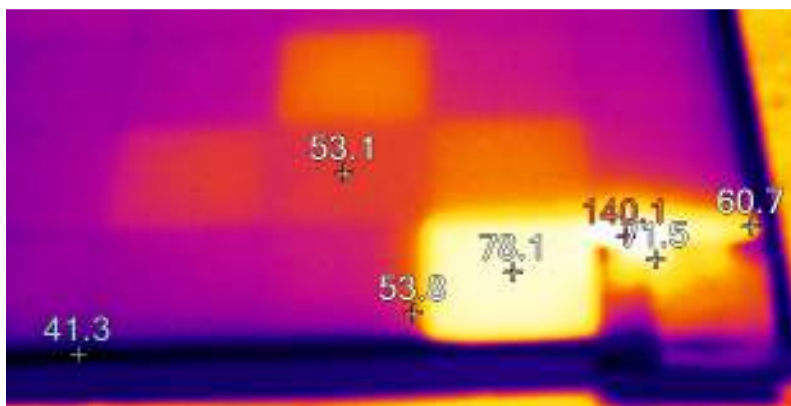
Αρχικά παρουσιάζεται η περίπτωση των μετρήσεων με τα (στρογγυλοποιημένα στον πλησιέστερο ακέραιο) αποτελέσματα που ελήφθησαν 409 δευτερόλεπτα μετά την έναρξη του πειράματος, με χρήση κατάλληλου εμπορικού λογισμικού, να απεικονίζονται στην εικόνα 4-2.



Εικόνα 4-2

Φυσικά, δεν είναι εύκολο να αποτυπωθεί σε γραπτό κείμενο ο τρόπος με τον οποίο κατανέμονταν η θερμοκρασία για αυτό και παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά σημεία.

Η αντίστοιχη μέτρηση με τη θερμοκάμερα απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



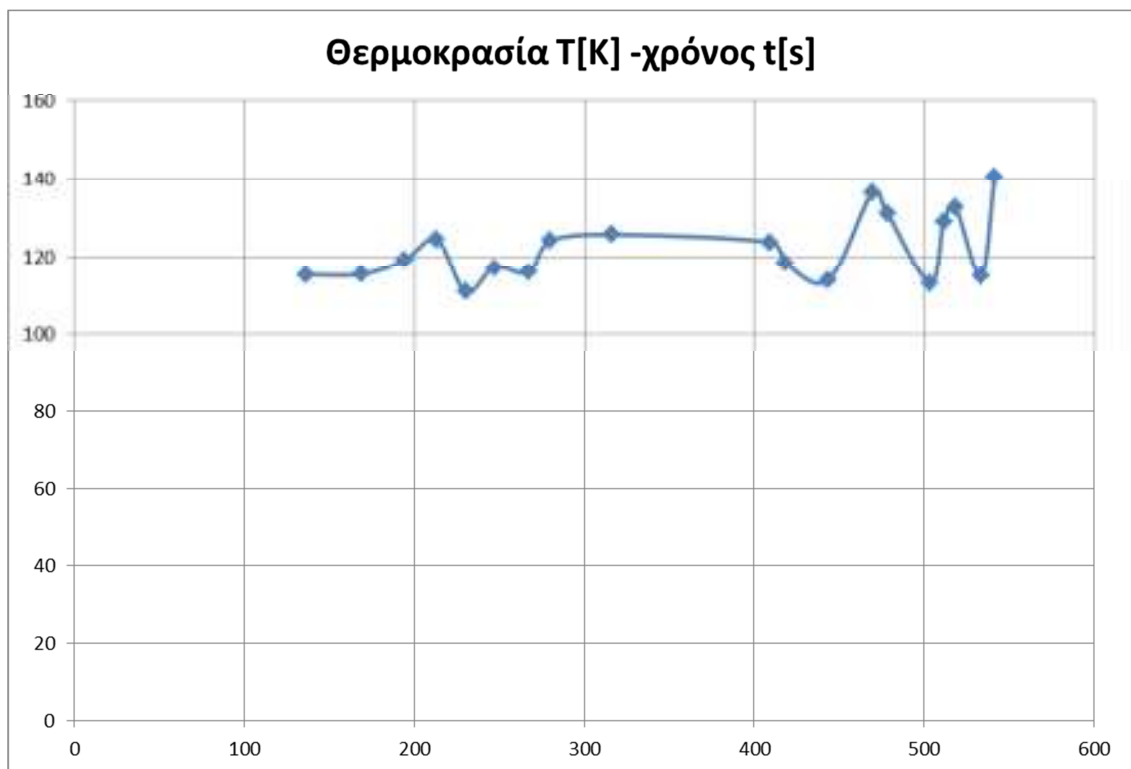
Εικόνα 4-3

Συγκρίνοντας τα δύο αποτελέσματα μπορεί κανείς να παρατηρήσει πως η θερμοκρασία των γειτονικών στο καλυμμένο κελιών είναι παραπλήσια με την εξαίρεση του άμεσα γειτονικού του που έχει αναπτύξει θερμοκρασία 78.1°C σαν μέγιστη τιμή. Στη φωτογραφία από τη θερμοκάμερα, απεικονίζεται ακόμα και η θερμοκρασία του πλαισίου του Φ/Β πάνελ. Η θερμοκρασία των 140°C βρίσκεται στο ίδιο περίπου σημείο και στις δύο εικόνες. Όμως οι θερμοκρασίες 78.1°C , 71.5°C , 60.7°C δεν έχουν προσομοιωθεί ικανοποιητικά. Ο λόγος για τον οποίο έγινε κάτι τέτοιο πέραν του προφανούς λόγου των απλοποιήσεων που έχουν γίνει κατά τη μοντελοποίηση (ομοιογένεια, γραμμικότητα, ισοτροπικότητα κλπ.) είναι ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με τη θερμοκάμερα ξεκίνησε να λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του *delamination* (εικόνα 4-4) ως επακόλουθο της δημιουργίας θερμής κηλίδας, όταν η θερμοκρασία πλησίασε την τιμή των 120°C σαν μέγιστο.



Εικόνα 4-4

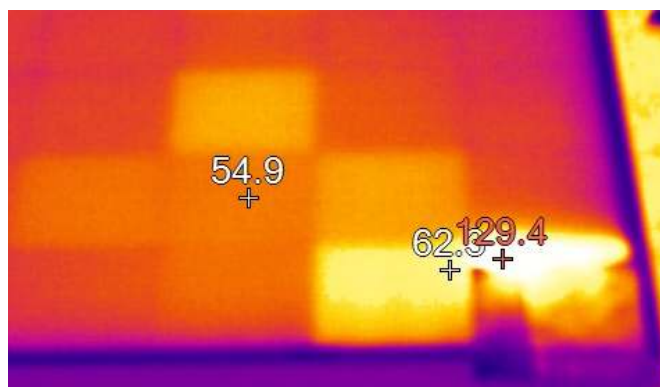
Από τη θερμοκρασία 120°C παρατηρήθηκε ότι ξεκίνησε το φαινόμενο αυτό που έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή αλλαγή της φύσης των υλικών (αποκόλληση). Το φαινόμενο αυτό επαναλαμβάνονταν σταδιακά με την επίτευξη υψηλής θερμοκρασίας. Στην πραγματικότητα οι μέγιστες θερμοκρασίες όπως απεικονίστηκαν από τη θερμοκάμερα είναι αυτές που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



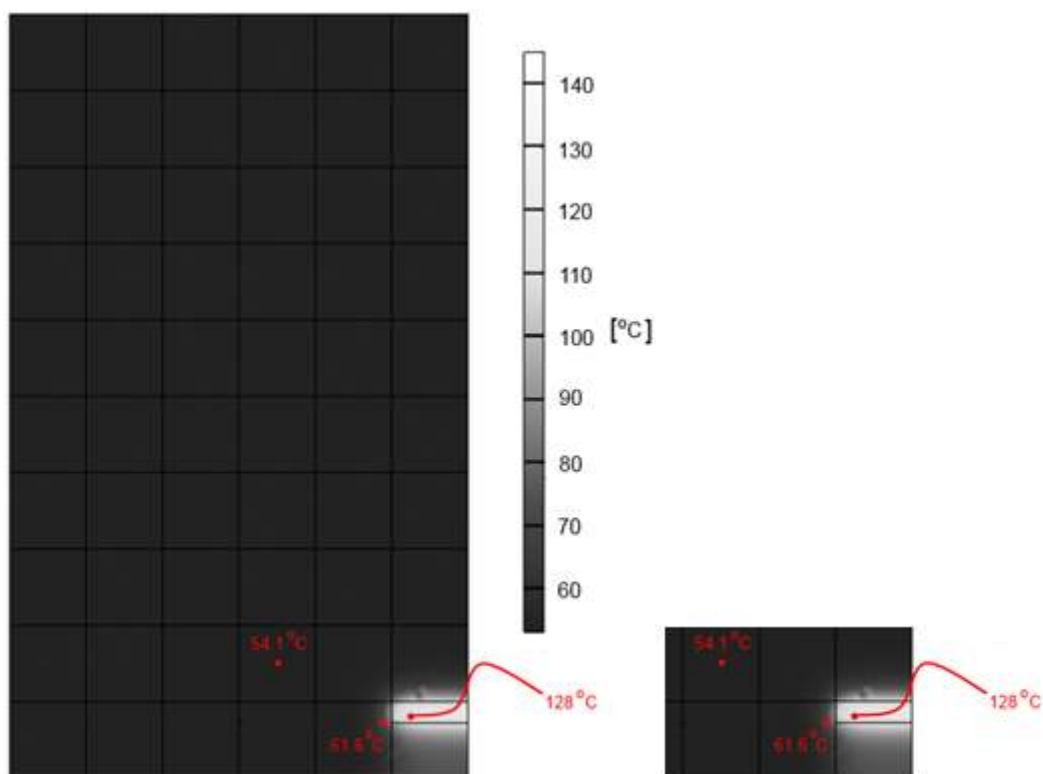
Σχήμα 4-7

Συνεπώς για μία πιο αξιόπιστη σύγκριση έγινε και σύγκριση των αποτελεσμάτων και σε 316 δευτερόλεπτα (βλ. σχήμα 4-7) μετά την κάλυψη του Φ/Β κελιού.

Στις εικόνες 4-5 και 4-6 είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι οι ομοιότητες είναι πιο εμφανείς.



Εικόνα 4-5



Εικόνα 4-6

4.4 Συμπεράσματα

Με βάση τις μετρήσεις και τις συγκρίσεις που έγιναν, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Στο συγκεκριμένο πείραμα, το παρατηρηθέν φαινόμενο του delamination, ξεκίνησε να λαμβάνει χώρα περίπου στους $120^{\circ}C$. Η θερμοκρασία όμως αυτή, αντιστοιχεί στη θερμοκρασία της εμπρόσθιας επιφάνειας του φ/β πανέλ. Δεν υπήρχε η δυνατότητα μέτρησης της οπίσθιας επιφάνειας στο συγκεκριμένο πείραμα, της οποίας η θερμοκρασία θεωρείται και πιο κοντά στη θερμοκρασία του φ/β κελιού. Με την υιοθέτηση του τρισδιάστατου μοντέλου που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, τη χρονική στιγμή που ξεκίνησε να λαμβάνει χώρα το φαινόμενο του delamination η αντίστοιχη μέγιστη θερμοκρασία στο φ/β κελί ήταν μεγαλύτερη τουλάχιστον κατά $10^{\circ}C$.
- Η εμφάνιση του delamination σε θερμοκρασία μικρότερη από αυτή που αναμενόταν, είχε σαν αποτέλεσμα πρόσθετες δυσκολίες στην προσπάθεια αξιολόγησης του θερμικού μοντέλου. Υπήρξε αλλαγή στη φύση ορισμένων υλικών (αποκόλληση EVA), αλλά δε θεωρείται ότι στη θερμοκρασία αυτή ξεκίνησε η καταστροφή της ίδιας της ένωσης p-n του φ/β κελιού.
- Είναι φανερό ότι η θεώρηση σταθερών, ομογενών, γραμμικών και ισοτροπικών υλικών δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Καθώς η θερμοκρασία μεταβάλλεται και ιδιαίτερα όταν λαμβάνει μεγάλες τιμές, μεταβάλλονται αισθητά τόσο τα ηλεκτρικά όσο και τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών του φ/β πάνελ.

- Παρόλες τις δυσκολίες, η αξιολόγηση του μοντέλου δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα για την περίπτωση των γειτονικών στο μερικώς καλυμμένο ϕ/β κελιών του πανέλου. Σαφέστατα όμως, είναι αναγκαία η αξιολόγηση του μοντέλου και σε ελεγχόμενο εργαστηριακό περιβάλλον.

4.5 Αναφορές

- [1] R. W. Lewis, P. Nithiarasu και K. N. Seetharamu, *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*, John Wiley & Sons, 2004.
- [2] J. R. Welty, C. E. Wicks, R. E. Wilson και G. L. Rorrer, *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 5th edition, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [3] «Heat Transfer Principals in Electronics Cooling (Part B),» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.pathways.cu.edu.eg/ec/text-pdf/part%20b-9.pdf>.
- [4] Α. Προδρόμου, «Εξαναγκασμένη Συναγωγή-Ροή πάνω από μία επίπεδη επιφάνεια», διαφάνειες μαθήματος στο τμήμα Μηχανικών Μηχανολογίας και κατασκευαστικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου
- [5] Β. Α. Μπακιρτζόγλου, «Μοντελοποίηση Κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών,» 2012.
- [6] J. A. Duffie & W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, JOHN WILEY & SONS, 3rd edition, 2006.
- [7] John H. Lienhard IV,V, *HEAT TRANSFER TEXTBOOK*, John H. Lienhard IV,V, 2000.
- [8] Prabal Talukdar, «Radiation Exchange between Surfaces -2».
- [9] M. Bardhi, G. Grandi και G.M.Tina, «Comparison of PV Cell Temperature Estimation by Different Thermal Power Exchange Calculation Methods,» σε *ICREPQ' 12*, 2012.
- [10] G. Notton, C.Cristofari, M. Mattei, P. Poggi, «Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences,» *Applied Thermal Engineering (Elsevier), Volume 25, Issues 17-18*, pp. 2854-2877, December 2005.
- [11] Ty W. Neises, Sanford A. Klein και Douglas T. Reindl, «Development of a Thermal Model for Photovoltaic Modules and Analysis of NOCT Guidelines,» ASME, 2012.
- [12] A. D. Jones και C. P.Underwood, «A thermal model for photovoltaic systems,» *Solar Energy (Elsevier), Vol.70, No.4*, pp. 349-351, 2001.
- [13] M. U. Siddiqui, A. Arif, L. Keley και S. Dubowsky, *Three-dimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions*, Elsevier, 2012.

- [14] Exelgroup, ESP series60Poly τεχνικές προδιαγραφές, v 04.13 επιμ.
- [15] M. Paggi, M. Corrado και M. A. Rodriguez, «A multi-physics and multi-scale numerical approach to microcracking and power-loss in photovoltaic modules,» *Composite Structures*, τόμ. 95 , pp. 630 - 638, 2013.
- [16] coveme, « dyMat PYE: technical datasheet,» 2012.
- [17] D. DunSolar, «1369 Dun-Solar PPE,» 2010.
- [18] Iounut-Razvan Caluianu και Florin Baltaretu, «Thermal modelling of photovoltaic module under variable free convection,» *Applied Thermal Engineering*, 2012.
- [19] Evatane, «EVATANE 33-45 PV: technical datasheet,» 2012.
- [20] S. Vergura, G. Acciani και O. Falcone, «3-D PV-cell Model by means of FEM,» IEEE, 2009.
- [21] The German Energy Society, Planning and installing Photovoltaic Systems: A guide for Installers, Architects and Engineers, Earthscan, 2009.

5 Αντιμετώπιση φορτίων ανέμου σε Φ/Β εγκαταστάσεις

5.1 Τρέχον πλαίσιο στατικής σχεδίασης βάσεων Φ/Β συστημάτων

Με βάση τη διερεύνηση της τρέχουσας βιβλιογραφίας, δεν υπάρχει μέχρι στιγμής σχεδιαστικός κώδικας (κανονισμός) για το στατικό σχεδιασμό βάσεων Φ/Β συστημάτων. Συνήθως οι κατασκευές αυτές σχεδιάζονται και μελετώνται στατικά βάσει των Ευρωκωδίκων (ιδίως αν πρόκειται για περιοχή της Ευρώπης) και των κατά τόπους αντισεισμικών κανονισμών. Σε αυτό το πλαίσιο, ο υπολογισμός των φορτίσεων στις οποίες περιλαμβάνονται και οι ανεμοφορτίσεις βασίζεται πολλές φορές στη χρησιμοποίηση του Ευρωκώδικα 1 και του αντίστοιχου μέρους του γερμανικού κώδικα DIN 1055. Επιπρόσθετα, συνήθως η διαστασιολόγηση των στοιχείων που αποτελούν αυτές τις κατασκευές, βασίζεται στην εφαρμογή του Ευρωκώδικα 3 ή 9 που αφορά στο σχεδιασμό φερουσών κατασκευών από χάλυβα ή από αλουμίνιο αντίστοιχα. Πρόσθετοι κανονισμοί και πρότυπα μπορούν επίσης να εφαρμόζονται, όπως για παράδειγμα το πρότυπο ASTM A123 σχετικά με τις προδιαγραφές θερμού γαλβανίσματος ή οι Ευρωκωδικές 2 και 4 που αφορούν στο σχεδιασμό κατασκευών από σκυρόδεμα και στο σχεδιασμό σύμμικτων φερουσών κατασκευών από χάλυβα και από σκυρόδεμα, αντίστοιχα, με τον τελευταίο να σχετίζεται και με τη σωστή θεμελίωση της βάσης. Το κομμάτι της θεμελίωσης της βάσης του Φ/Β συστήματος καλύπτει και μέρος του Ευρωκώδικα 7 που αφορά στο γεωτεχνικό σχεδιασμό. Ο έλεγχος της θεμελίωσης και της πάκτωσης του συστήματος για την περίπτωση εγκαταστάσεων στο έδαφος, γίνεται συνήθως με γεωτεχνική-εδαφοτεχνική μελέτη, με pull-out tests ή με συνδυασμό των δύο αυτών μεθόδων. Σε εγκαταστάσεις σε κτίρια, είναι απαραίτητη και εκεί μία αντίστοιχη μελέτη που να αφορά στο μέρος του κτιρίου στο οποίο θα αγκυρωθεί η βάση του Φ/Β. Επειδή όμως το κομμάτι της θεμελίωσης - αγκύρωσης των βάσεων του Φ/Β, της ποιότητας του εδάφους θεμελίωσης ή του σκυροδέματος κλπ. είναι από μόνο του ένα ξεχωριστό κομμάτι, δεν είναι δυνατό να γίνει πάνω σε αυτό αναλυτική αναφορά στη συγκεκριμένη εργασία, απλά γίνεται μία μικρή αναφορά στο κομμάτι της θεμελίωσης - αγκύρωσης στο τέλος του παρόντος Κεφαλαίου.

Πολλές φορές, και με βάση τον Ευρωκώδικα 1, ο άνεμος αντιμετωπίζεται σαν ημι-στατικό φορτίο, παρόλο που στην πραγματικότητα η συμπεριφορά του έχει δυναμικό χαρακτήρα. Πέραν τούτου, κατά τη σχεδίαση των βάσεων, τα Φ/Β πάνελ θεωρείται συχνά ότι καταλαμβάνουν μία ενιαία (ανά τμήματα) επιφάνεια και οι βάσεις αντιμετωπίζονται στην περίπτωση των εγκαταστάσεων επί εδάφους σαν διατάξεις ανοιχτών υπόστεγων (*monopitch canopies*) με βάση τον Ευρωκώδικα 1, ειδικά σε περιοχές όπως η Ελλάδα που συνήθως η γωνία κλίσης είναι μεταξύ 0 και 30 μοιρών. Για εύρος από 0 έως 45 μοίρες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το αμερικάνικο πρότυπο ASCE/SEI 7-05 (*monoslope free roofs*) [1, 2]. Στην πραγματικότητα όμως, υπάρχει κενό γύρω στα 1.5 με 2 cm από ένα Φ/Β πάνελ μέχρι το επόμενο που ανήκει στο ίδιο τμήμα της βάσης. Παρόλα αυτά στο κεφάλαιο αυτό, υιοθετείται η ίδια θεώρηση με βάση τον Ευρωκώδικα 1, δηλαδή η βάση του Φ/Β

αντιμετωπίζεται σαν διάταξη ανοικτού υπόστεγου και μελετάται η περίπτωση των επί εδάφους σταθερών βάσεων Φ/Β. Γίνεται προσπάθεια ώστε να αντιμετωπιστούν τα Φ/Β πάνελ σαν δομικά στοιχεία των βάσεων και να συσχετιστούν οι αντοχές σε φορτία ανέμου της βάσης (σαν σύνολο) και των Φ/Β πάνελ (σαν χωριστές μονάδες) με έναν απλουστευμένο τρόπο.

Σε αυτό το κομμάτι αναφέρεται ότι υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις από κάποιο σημείο και μετά, κατά τους υπολογισμούς των επιδράσεων του ανέμου (κυρίως όσον αφορά στους *αεροδυναμικούς συντελεστές* [3]) ανάλογα με το αν η εγκατάσταση γίνεται στο έδαφος, σε δώμα ή σε στέγη, για αυτό και στη συγκεκριμένη εργασία μελετώνται περιπτώσεις εγκαταστάσεων επί εδάφους όπως αυτές που απεικονίζονται στην εικόνα 5-1.



Εικόνα 5-1

5.2 Μηχανική αντοχή των Φ/Β πάνελ

Οι κατασκευαστές βάσεων Φ/Β συστημάτων αναφέρονται συνήθως στην περίπτωση των έτοιμων λύσεων των προϊόντων που διαθέτουν, στην αντοχή της βάσης σε συγκεκριμένα φορτία ανέμου ή χιονιού, βάσει του Ευρωκώδικα 1. Πολλές φορές οι κατασκευές αυτές αναλύονται με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ή ελέγχονται με δοκιμές. Το ζητούμενο είναι οι τάσεις που ασκούνται να είναι κάτω από τα όρια αντοχής των υλικών που αποτελούν τη βάση, γεγονός που απαιτεί προσεκτική μελέτη - επανασχεδίαση, με εύρεση και ενίσχυση των αδύνατων σημείων (ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στις συνδέσεις και στις κολλήσεις). Η αντοχή της βάσης σε υψηλότερες απαιτήσεις φορτίων χιονιού και ανέμου, μπορεί να βελτιωθεί και με τροποποίηση των αποστάσεων μεταξύ των δοκών στήριξης, ελέγχοντας πάντα την πιθανότητα να εμφανιστούν νέα σημεία αυξημένης καταπόνησης. Κάποιες φορές, το αδύναμο σημείο του συστήματος αποδεικνύεται να είναι η *τεγίδα* (βλ. παρακάτω) της βάσης ή το Φ/Β πάνελ και συγκεκριμένα η σύνδεση του κύριου μέρους του με το εξωτερικό πλαίσιο (*frame*).

Οι κατασκευαστές Φ/Β πάνελ δίνουν τις περισσότερες φορές ως μέγιστη τιμή φορτίου για το πάνελ τα $+5.4 \text{ kPa}$ ¹¹ βάσει του προτύπου IEC 61215 [4] για την εμπρόσθια πλευρά και -

¹¹ Ισχύει ότι : $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$ ή $1 \text{ kPa} = 1 \text{ kN} / \text{m}^2$. Οι δυνάμεις που αντιστοιχούν στις πιέσεις που ασκούνται θεωρείται ότι έχουν διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια του πάνελ. Η φορά τους είναι από την οπίσθια πλευρά του πάνελ προς την εμπρόσθια, σε περίπτωση που η αντίστοιχη πίεση έχει

2.4 *kPa* για την οπίσθια πλευρά του Φ/Β πάνελ. Η βάση πρέπει να είναι κατασκευασμένη έτσι ώστε να αντέχει σίγουρα αυτά τα φορτία, συν τα πρόσθετα φορτία της ίδιας της κατασκευής, αλλά και άλλου είδους φορτία όπως λόγω βροχής, εδάφους, υδροστατικής πίεσης και πλημμυρών [5], των ατόμων και του εξοπλισμού για τη συντήρηση («ζωντανά» φορτία [5]), σεισμικά φορτία και πιθανούς συνδυασμούς των φορτίων αυτών. Η παραπάνω τιμή των +5.4 *kPa* αναφέρεται σε συνδυασμένα φορτία ανέμου και χιονιού-πάγου βάσει του [4] και αφορά όπως αναφέρθηκε στην εμπρόσθια πλευρά του Φ/Β πάνελ, η οποία είναι εκτεθειμένη στο χιόνι. Δε σημαίνει όμως ότι αυτή η τιμή όπως και η τιμή των -2.4 *kPa* είναι και η μέγιστη (κατ' απόλυτη τιμή) τιμή που μπορεί να δεχτεί στιγμιαία το Φ/Β πάνελ, αν και πολλές φορές έτσι αφήνεται να εννοηθεί από τα φυλλάδια τεχνικών χαρακτηριστικών των Φ/Β πάνελ. Συγκεκριμένα, ένα μοντέλο Φ/Β πάνελ που πιστοποιείται από κάποιον οργανισμό πιστοποίησης ότι ακολουθεί το πρότυπο IEC 61215, σημαίνει σύμφωνα με το [4], ότι μπορεί να δεχτεί φορτίο 5.4 *kPa* ή 2.4 *kPa* στην εμπρόσθια ή στην οπίσθια πλευρά του αντίστοιχα για τρεις κύκλους [4], με το φορτίο των 5.4 *kPa* να επιβάλλεται μόνο κατά τη διάρκεια του τελευταίου κύκλου. Επιπρόσθετα, αξιοσημείωτο είναι ότι αυτή η δοκιμή γίνεται σε χαρακτηριστικά δείγματα Φ/Β πάνελ του συγκεκριμένου μοντέλου τα οποία έχουν ήδη υποστεί καταπονήσεις από προηγούμενα στάδια δοκιμών [6]. Από την άλλη, το φορτίο κατά τη διάρκεια των δοκιμών μηχανικού φορτίου στο [4] εφαρμόζεται σταδιακά και ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του Φ/Β πάνελ, ενώ στην πραγματικότητα η πίεση που προκαλείται από τον άνεμο στο Φ/Β πάνελ αφενός δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνειά του [7] και αφετέρου μπορεί να λάβει απότομα ακραίες τιμές κατά τη διάρκεια ανεμορριπών. Επίσης, ένα Φ/Β πάνελ κατά τη διάρκεια ζωής του, ενδεχομένως να δεχτεί αυτά τα φορτία για μεγάλη στο σύνολό της χρονική διάρκεια, γι αυτό και οι δοκιμές που αναφέρονται στο [4], έχουν και την έννοια του συνόλου της διάρκειας αυτής.

Ο συνήθης τρόπος στήριξης ενός τυπικού Φ/Β πάνελ πάνω στη βάση, για διασυνδεδεμένα συστήματα που εγκαθίστανται στην Ευρώπη, διαστάσεων 1640 mm × 992 mm × 40 mm, απεικονίζεται στην εικόνα 5-2¹² όπου η στήριξη γίνεται με τα λεγόμενα *clamps* (σφιγκτήρες). Οι σφιγκτήρες διαφέρουν από βάση σε βάση, αλλά όλοι επιτελούν τον ίδιο σκοπό: Συνδέουν το πλαίσιο του Φ/Β πάνελ με την *τεγίδα (rail)* της βάσης. Χωρίζονται σε ενδιάμεσους και ακραίους σφιγκτήρες (*medium* και *end clamps*) (εικόνα 5-3¹³).

αρνητικό πρόσημο (υποπίεση), διαφορετικά η φορά τους είναι από την εμπρόσθια πλευρά του πάνελ προς την οπίσθια, σε περίπτωση που η αντίστοιχη πίεση έχει θετικό πρόσημο (πίεση).

¹² Απεικονίζεται ενδιάμεσος σφιγκτήρας της εταιρείας *Alumil*

¹³ Απεικονίζεται ακραίος σφιγκτήρας της εταιρείας *Alumil*



Εικόνα 5-2



Εικόνα 5-3

Υπάρχουν κατασκευαστές που προσφέρουν τη δυνατότητα εναλλακτικών τρόπων στήριξης, όπως για παράδειγμα με κοχλία-περικόχλιο και ροδέλες, μέσω προκατασκευασμένων οπών στο πλαίσιο του Φ/Β πάνελ.

Ασχέτως με το αν το Φ/Β πάνελ τοποθετείται κάθετα (*portrait*) ή οριζόντια (*landscape*), ο τρόπος τοποθέτησης των σφιγκτήρων είναι τις περισσότερες φορές κοινός, όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα 5-4 με τους σφιγκτήρες να τοποθετούνται στις μεγάλες πλευρές του Φ/Β πάνελ. Ωστόσο, υπάρχουν πλέον κατασκευαστές που παρέχουν την δυνατότητα τοποθέτησης σφιγκτήρων στις μικρού μήκους πλευρές των Φ/Β πάνελ.

Οι αποστάσεις στις οποίες τοποθετούνται οι σφιγκτήρες πάνω στο Φ/Β πάνελ, παρέχονται κανονικά από τον κατασκευαστή του Φ/Β πάνελ στο αντίστοιχο εγχειρίδιο εγκατάστασης, στο οποίο αναφέρονται και κάποιες ελάχιστες διαστάσεις που πρέπει να έχουν οι σφιγκτήρες. Οι τελευταίοι όμως παρέχονται από τους κατασκευαστές των βάσεων σαν μέρος της βάσης και ο τρόπος σύνδεσής τους με την τεγίδα της βάσης, μπορεί να διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή. Κάποιοι κατασκευαστές Φ/Β βάσεων παρέχουν επίσης και πλαστικά παρεμβλήματα, τα οποία συνιστούν να τοποθετούνται μεταξύ του πλαισίου του πάνελ και της βάσης, για την αποφυγή άμεσης επαφής τους.



Εικόνα 5-4

Το πρόσφατο πρότυπο UL 2703, καλύπτει μεταξύ άλλων τις απαιτήσεις, στις οποίες “πρέπει” να ανταποκρίνονται οι συνήθεις Φ/Β βάσεις (*rack mounting systems*) και οι σφιγκτήρες για την περίπτωση στήριξης *συγκεκριμένων* φωτοβολταϊκών πάνελ «επίπεδης πλάκας» (*flat plate PV modules*) που συμμορφώνονται με το πρότυπο ασφαλείας ANSI/UL 1703 [8]. Μεταξύ αυτών των απαιτήσεων, αναφέρονται και αναλύονται απαιτήσεις που αφορούν στη μηχανική αντοχή και την καταλληλότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται. Σημειώνεται εδώ ότι το πρότυπο ANSI/UL 1703, καλύπτει τις απαιτήσεις ασφαλείας (*safety standard*) για ένα Φ/Β πάνελ, όπως και τα IEC 61730-1 και IEC 61730-2. Αντιθέτως, το πρότυπο IEC 61215 (EN 61215) είναι περισσότερο “*performance standard*”, καθότι, μετά τις δοκιμές που γίνονται στο Φ/Β πάνελ, υπάρχουν απαιτήσεις σχετικά με την αποδεκτή μείωση της απόδοσής του και μόνο αν το Φ/Β πάνελ καλύπτει τις απαιτήσεις αυτές, θεωρούνται οι δοκιμές επιτυχημένες.

Αξίζει τέλος να αναφερθεί ότι υπάρχουν κατασκευαστές Φ/Β πάνελ των οποίων η μηχανική αντοχή στις ανεμοπιέσεις ή στα φορτία χιονιού-πάγου μπορεί να βελτιωθεί αν στηριχθούν σε περισσότερα σημεία από ότι στο συνήθη τρόπο τοποθέτησης. Έτσι εξασφαλίζουν νέα διαφορετική τιμή αντοχής (π.χ. τα -5.4 kPa αντί των -2.4 kPa) με το νέο αυτό τρόπο τοποθέτησης, με βάση συνήθως το πρότυπο IEC 61215. Άλλοι κατασκευαστές δίνουν ακόμα και με το συνήθη τρόπο τοποθέτησης μεγαλύτερο μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο από αυτό των $+5.4\text{ kPa}$ (π.χ. $+6\text{ kPa}$ ή $+8.4\text{ kPa}$), ουσιαστικά εκτελώντας τις αντίστοιχες δοκιμές που προβλέπονται στο [4] με μεγαλύτερη τιμή.

5.3 Υπολογισμοί ακραίων πιέσεων βάσει Ευρωκώδικα

1

5.3.1 Ανεμολογική συμπεριφορά στην περιοχή εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος

Κατά τη σχεδίαση ενός Φ/Β συστήματος, είναι απαραίτητο ο σχεδιαστής να γνωρίζει τις γενικότερες περιβαλλοντολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή στην οποία πρόκειται να εγκατασταθεί το σύστημα. Η -μεταξύ άλλων- όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτική γνώση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας βοηθούν στην καλύτερη δυνατή πρόβλεψη της απόδοσης του συστήματος και στην απόφαση για την τελική του σχεδίαση. Η όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτική γνώση όμως των εντάσεων, των διευθύνσεων των ανέμων, της συχνότητας αυτών κλπ., πέραν του ότι παίζει και αυτή το ρόλο της στην απόφαση για την τελική του σχεδίαση από άποψη ενεργειακής απόδοσης (αερισμός των Φ/Β πάνελ και επακόλουθη μείωση της θερμοκρασίας), είναι απαραίτητη προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητες καταστάσεις και καταστροφές από ισχυρούς ανέμους. Για παράδειγμα, αν σε μία περιοχή πνέουν συχνά ισχυρότατοι άνεμοι με συχνές αυξομειώσεις στην ένταση, σε διαφορετικές διευθύνσεις και με ασυνήθεις στροβιλισμούς, ενδέχεται η περιοχή να είναι ακατάλληλη για εγκατάσταση ηλιοστατών (*trackers*) διπλού ή μονού άξονα, διότι ακόμα και αν οι συγκεκριμένοι ηλιοστάτες έχουν ελεγχθεί με δοκιμές ή προσομοιώσεις και αντέχουν σε ισχυρές συνθήκες ανέμου, πρέπει να εξακριβωθεί ότι οι συνθήκες αυτές είναι αντιπροσωπευτικές για την συγκεκριμένη περιοχή της εγκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη την ένταση, τη διεύθυνση αλλά και τη συχνότητα και τους στροβιλισμούς του ανέμου. Σε κάθε περίπτωση, ακόμα και αν αποφασιστεί η εγκατάσταση σταθερών Φ/Β βάσεων, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι όλο το σύστημα, από τη θεμελίωση μέχρι το Φ/Β πάνελ θα αποτελείται από συστατικά που αντέχουν στις καταπονήσεις που θα ακολουθήσουν και σε μεγάλο βάθος χρόνου, δεδομένης βέβαια μίας τακτικής συντήρησης που σε κάθε περίπτωση είναι αναγκαία. Ενδέχεται να είναι απαραίτητη μία ειδική κατασκευή βάσης με πιο πυκνά τοποθετημένους δοκούς στήριξης, με ενισχυμένη θεμελίωση, αλλά και ενδεχομένως με Φ/Β πάνελ που να έχει μεγαλύτερη από το σύνηθες μηχανική αντοχή ή που να συγκρατείται σε περισσότερα σημεία από ότι συνήθως πάνω στη βάση του Φ/Β.

Επομένως η γνώση της συμπεριφοράς των ανέμων στην περιοχή που πρόκειται να γίνει η εγκατάσταση είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στη λήψη των τελικών αποφάσεων που έχουν να κάνουν με την Φ/Β εγκατάσταση. Πολλές φορές, οι πληροφορίες και τα δεδομένα που υπάρχουν είναι ελάχιστα ή δεν επαρκούν και είναι συνήθως αδύνατη η εγκατάσταση μετρητικού συστήματος και η λειτουργία του για εύλογο χρονικό διάστημα προκειμένου να είναι δυνατή η εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων σχετικών με την ανεμολογική συμπεριφορά που επικρατεί στην περιοχή. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν να εξαχθούν με προσοχή κάποια συμπεράσματα από την χλωρίδα της περιοχής (π.χ. ύψος βλάστησης, φορά ανάπτυξης των φυτών), από το είδος του εδάφους κ.α., δηλαδή με προσεκτική παρατήρηση του περιβάλλοντος και ίσως με επικοινωνία με ιθαγενείς που ενδεχομένως να έχουν βιώσει ακραία καιρικά φαινόμενα. Με βάση όσα δεδομένα - παρατηρήσεις μπορούν

να συλλεχθούν, πιθανόν να είναι αναγκαία, ακόμα και σε περίπτωση χρησιμοποίησης του Ευρωκώδικα 1, η υιοθέτηση διαφορετικής τιμής της *θεμελιώδους βασικής ταχύτητας ανέμου* [3], από αυτήν που προβλέπεται στα διάφορα Εθνικά Προσαρτήματα για την περιοχή που ενδιαφέρει. Στους υπολογισμούς που βασίζονται στον Ευρωκώδικα 1, από αυτήν την τιμή ξεκινά η υπολογιστική διαδικασία, επομένως μια λάθος επιλογή αυτής της τιμής, θα καταλήξει σε μη αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Σε μία δεδομένη περιοχή ενδεχομένως η ταχύτητα που προβλέπεται στο Εθνικό Προσάρτημα να μην είναι αντιπροσωπευτική και να πρέπει να υιοθετηθεί μεγαλύτερη τιμή.

5.3.2 Ορολογία και μαθηματικές σχέσεις στον Ευρωκώδικα 1

Όπως προαναφέρθηκε, βάσει και του [3], το πρώτο βήμα στον υπολογισμό των δράσεων του ανέμου σε δομήματα που πρέπει να σχεδιάζονται με βάση τον Ευρωκώδικα 1, είναι ο υπολογισμός της θεμελιώδους βασικής ταχύτητας ανέμου (*fundamental basic wind velocity* [9]) $v_{b,0}$. Ως θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου, ορίζεται η μέση τιμή δεκαλέπτου της ταχύτητας του ανέμου με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 0.02, ανεξάρτητα από την διεύθυνση του ανέμου και την εποχή του έτους, σε ύψος 10 m από επίπεδη ανοικτή περιοχή εδάφους (κατηγορία εδάφους II - βλ. παρακάτω) και προσμετρώντας (αν απαιτείται) πρόσθετες επιπτώσεις λόγω υψομέτρου (*altitude factor* c_{alt}) [3, 9, 10]. Δηλαδή λαμβάνεται ανά δεκάλεπτο μία μέση τιμή, και από το σύνολο αυτών των τιμών σε χρονικό διάστημα ενός έτους, υπολογίζεται εκείνη η χαρακτηριστική τιμή, η οποία έχει πιθανότητα ετήσιας υπέρβασης $\Pi = 0.02$. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι σε βάθος χρόνου πενήντα ετών, η τιμή αυτή υπερβαίνεται κατά μέσο όρο μία φορά [3]. Σε περίπτωση που η πιθανότητα Π είναι μικρότερη ή η μέση τιμή λαμβάνεται σε μικρότερο διάστημα Δt , η τιμή που εξάγεται από τις αντίστοιχες μετρήσεις τείνει να είναι μεγαλύτερη.

Βάσει των παραπάνω ισχύει $v_{b,0} = c_{alt} v_{b,0}^*$, όπου με $v_{b,0}^*$ συμβολίζεται η υιοθετούμενη τιμή της θεμελιώδους βασικής ταχύτητας ανέμου, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του υψομέτρου. Στο εξής ωστόσο, και για τις εφαρμογές που αναφέρονται στην εργασία αυτή θα θεωρείται ότι $c_{alt} = 1$, και επομένως $v_{b,0}^* = v_{b,0}$.

Στο Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα, οι τιμές που έχουν υιοθετηθεί είναι $v_{b,0} = 33 \text{ m/s}$ για τη νησιωτική χώρα και για τις ηπειρωτικές περιοχές που βρίσκονται μέχρι και 10 km από τις ακτές και $v_{b,0} = 27 \text{ m/s}$ για την υπόλοιπη χώρα. Η τιμή όμως των $33 \text{ m/s} = 118,8 \text{ km/h}$ σε περιοχές της νότιας Κρήτης, της Καρπάθου και αλλού θεωρείται χαμηλή και δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Μία σωστή επιλογή αυτής της τιμής, η οποία **κατ' ελάχιστον** πρέπει να ξεπερνά ή να είναι ίση με τις τιμές που υιοθετούνται στο Εθνικό Προσάρτημα, είναι όπως προαναφέρθηκε βαρύνουσας σημασίας για τους υπολογισμούς των δράσεων του Ανέμου που βασίζονται στον Ευρωκώδικα 1.

Ως *βασική ταχύτητα ανέμου* (*basic wind velocity*) ορίζεται η τροποποιημένη θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η διεύθυνση του θεωρούμενου ανέμου και η εποχή (αν απαιτείται) [3, 9]. Οι δύο αυτοί πρόσθετες παράμετροι,

λαμβάνονται ως πολλαπλασιαστικοί συντελεστές επί της θεμελιώδους βασικής ταχύτητας ανέμου, δηλαδή:

$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0} \quad (5.1)$$

Για τις περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητή διαφορετική ετήσια πιθανότητα υπέρβασης Π ή με διαφορετικές παραμέτρους $K_{prob.}, n_{prob.}$ της κατανομής πιθανοτήτων, μπορεί να γίνει χρήση του αντίστοιχου διορθωτικού συντελεστή [3, 9]:

$$c_{prob} = \left(\frac{1 - K_{prob.} \ln(-\ln(1 - \Pi))}{1 - K_{prob.} \ln(-\ln(0.98))} \right)^{n_{prob.}} \quad (5.2)$$

ο οποίος μπορεί πολλαπλασιαστεί, είτε με τη θεμελιώδη βασική ταχύτητα ανέμου, είτε με τη βασική ταχύτητα ανέμου:

$$v_b = c_{prob} c_{dir} c_{season} v_{b,0} \quad (5.3)$$

Μετά από τον υπολογισμό της βασικής ταχύτητας ανέμου, μπορεί να υπολογιστεί και η βασική πίεση q_b , από τη σχέση [9] :

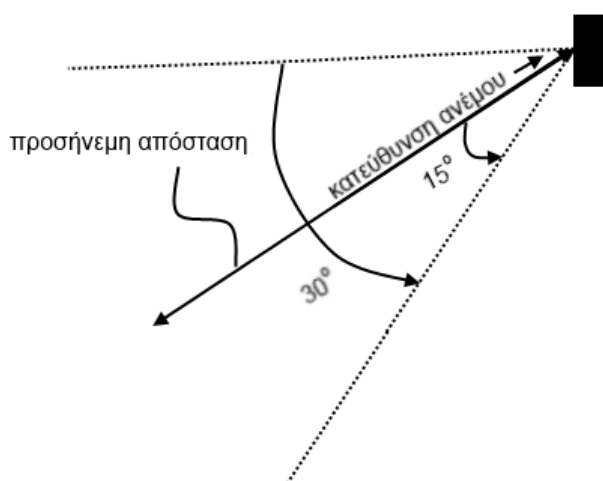
$$q_b = \frac{1}{2} p_a v_b^2 \quad (5.4)$$

όπου με p_a συμβολίζεται η πυκνότητα αέρα η οποία εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένεται στη συγκεκριμένη περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθυελλών [9]. Συνήθως υιοθετείται η τιμή $p_a = 1.25 \text{ kg} / \text{m}^3$.

Η *τραχύτητα του εδάφους (terrain roughness)* εξαρτάται κυρίως από το ύψος και την πυκνότητα των εμποδίων γύρω από την εξεταζόμενη περιοχή [3] και επηρεάζει την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος. Υπάρχουν κατά τον Ευρωκώδικα 1 5 κατηγορίες εδάφους (*terrain categories*) (0, I, II, III, IV) που κάθε μία έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (παράρτημα Α στο [9]), όπως αναφέρεται στον παρακάτω πίνακα [3, 11]:

Πίνακας 5-1	
Κατηγορία Εδάφους	Περιγραφή
0	Θάλασσα, παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα
I	Λίμνες ή περιοχή με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια
II	Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) που οι μεταξύ τους αποστάσεις είναι τουλάχιστον 20 φορές το ύψος τους
III	Περιοχή με «κανονική» κάλυψη από βλάστηση ή από κτίρια ή από μεμονωμένα εμπόδια που οι μεταξύ τους αποστάσεις είναι το πολύ 20 φορές το ύψος τους (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)
IV	Περιοχή στην οποία τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται από κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15 m.

Η τραχύτητα του εδάφους που ορίζεται για μία δεδομένη διεύθυνση ανέμου, εξαρτάται από την απόσταση κατά μήκος της οποίας υφίσταται ομοιόμορφη τραχύτητα μέσα σε μία γωνία γύρω από τη συγκεκριμένη διεύθυνση του ανέμου. Μέσα σε αυτόν τον *γωνιακό τομέα (angular sector)* που δημιουργείται (σχήμα 1), μικρές περιοχές (μικρότερες από το 10% της περιοχής που ορίζει ο γωνιακός τομέας) με μεταβλητή τραχύτητα, μπορούν να αγνοηθούν [9]. Συνιστάται, βάσει του [9] η γωνία του γωνιακού τομέα να έχει εύρος 30° , δηλαδή $\pm 15^\circ$ γύρω από την διεύθυνση του ανέμου (σχήμα 5-1) ή όπως αλλιώς ορίζεται στο εκάστοτε Εθνικό Προσάρτημα. Ο τρόπος υπολογισμού της προσήνεμης απόστασης (*upstream distance*) (σχήμα 5-1) αναφέρεται στο παράρτημα Α.2 του [9].



Σχήμα 5-1

Ενδεχομένως, σε διαφορετικές διευθύνσεις γύρω από την περιοχή που ενδιαφέρει, να ισχύουν διαφορετικές τραχύτητες εδάφους και σε αυτήν την περίπτωση συνιστάται να θεωρείται η μικρότερη κατηγορία εδάφους [3]. Επιπρόσθετα, η περίπτωση μετάβασης πάνω σε μία διεύθυνση από μία κατηγορία εδάφους σε μία άλλη, εξετάζεται και αυτή στο

παράρτημα Α.2 του [9]. Ο συντελεστής τραχύτητας που εκφράζει τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος για τις διάφορες τραχύτητες του εδάφους [3] μπορεί να υπολογίζεται μέσω διαδικασίας που προβλέπεται στα εκάστοτε Εθνικά Προσαρτήματα ή διαφορετικά από τον τύπο:

$$c_r(z) = \begin{cases} k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \forall z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ k_r \ln\left(\frac{z_{\min}}{z_0}\right) & \forall z \leq z_{\min} \end{cases} \quad (5.5)$$

όπου με z_0 συμβολίζεται το μήκος τραχύτητας και με

$$k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} \quad (5.6)$$

ο συντελεστής εδάφους [3]. Η παράμετρος z_0 και το ελάχιστο ύψος z_{\min} καθορίζονται από τον παρακάτω πίνακα [9] με βάση την κατηγορία του εδάφους. Το z_{\max} θεωρείται βάσει του [9] ίσο με 200 m . Το $z_{0,II}$ στη σχέση (6) είναι το μήκος τραχύτητας για την κατηγορία εδάφους II.

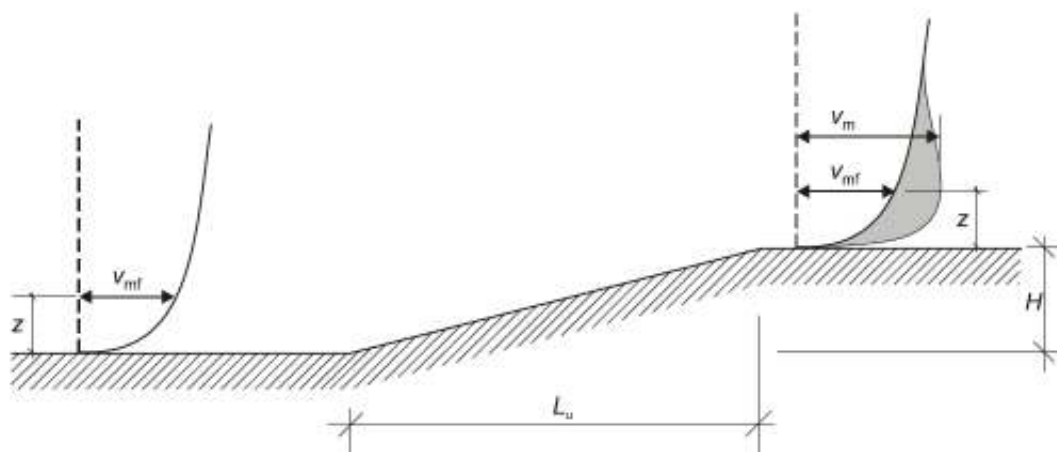
Πίνακας 5-2		
Κατηγορία Εδάφους	$z_0 [m]$	$z_{\min} [m]$
0	0.003	1
I	0.01	1
II	0.05	2
III	0.3	5
IV	1	10

Ο συντελεστής ανάγλυφου (*orography factor*) λαμβάνει υπόψη την αύξηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου που παρατηρείται σε κορυφές απομονωμένων λόφων και κορυφογραμμών ή σε κοιλάδες και χαράδρες [3, 9]. Ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ταχύτητας, στην πλαγιά ή την κορυφή του λόφου, προς τη μέση ταχύτητα στη βάση του λόφου (σε επίπεδο έδαφος) (σχήμα 5-2 [9]):

$$c_o(z) = \frac{v_m(z)}{v_{mf}(z)} \quad (5.7)$$

Ο συντελεστής αυτός έχει περισσότερο νόημα σε περίπτωση απομονωμένων λόφων ή κοιλάδων και όχι γενικότερα σε ορεινές περιοχές με «κυματιστό» ανάγλυφο. Όταν το ανάγλυφο του εδάφους δεν προκαλεί αυξήσεις πάνω από 5% στις ταχύτητες του ανέμου, ο συντελεστής αυτός δε λαμβάνεται υπόψη (ουσιαστικά θεωρείται ίσος με τη μονάδα).

Επίσης θεωρείται ίσος με τη μονάδα, αν κατά τον υπολογισμό-μέτρηση της βασικής ταχύτητας ανέμου, έχει ληφθεί ήδη υπόψη το ανάγλυφο της περιοχής. Ο τρόπος προσδιορισμού του δίνεται στα εκάστοτε Εθνικά Προσαρτήματα ή με βάση το παράρτημα Α.3 στο [9]. Από τον ορισμό του πάντως, είναι εμφανές ότι μπορεί να πάρει και τιμές μεγαλύτερες της μονάδας.



Σχήμα 5-2

Η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z , $v_m(z)$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v_m(z) = c_r(z) c_0(z) v_b \quad (5.8)$$

όπου είναι $c_0(z) = 1$, αν, όπως προαναφέρθηκε, κατά τον υπολογισμό υπολογισμό-μέτρηση της βασικής ταχύτητας ανέμου, έχει ληφθεί ήδη υπόψη το ανάγλυφο της περιοχής. Κατά τον υπολογισμό της $v_m(z)$, για την αντιπροσωπευτική θεώρηση του ύψους z , πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η επιρροή από γειτονικές κατασκευές (παράρτημα Α.4 στο [9] ή αντίστοιχο κομμάτι Εθνικού Προσαρτήματος). Για τον τελικό υπολογισμό της δράσης του ανέμου σε ύψος z , δεν λαμβάνεται η παραπάνω μέση ταχύτητα, αλλά η τιμή αυτή προσαυξημένη κατά 3.5 φορές την τυπική απόκλιση σ_v και ονομάζεται ταχύτητα αιχμής $v_p(z)$ και αντιστοιχεί στην πίεση αιχμής [3]. Η τυπική αυτή απόκλιση σ_v , πρέπει να αφορά στο χαρακτηριστικό δεκάλεπτο ή γενικά στο χαρακτηριστικό χρονικό διάστημα Δt , το οποίο αντιστοιχεί στην επιλεγμένη τιμή της θεμελιώδους βασικής ταχύτητας ανέμου. Επομένως, ισχύει ότι:

$$v_p(z) = v_m(z) + 3.5\sigma_v \quad (5.9)$$

και η αντίστοιχη πίεση αιχμής δίνεται από τον τύπο (για $v_m(z) \neq 0$):

$$\begin{aligned}
q_p(z) &= \frac{1}{2} p_a (v_p(z))^2 \Leftrightarrow q_p(z) = \frac{1}{2} p_a (v_m(z) + 3.5\sigma_v)^2 \Leftrightarrow \\
q_p(z) &= \frac{1}{2} p_a \left((v_m(z))^2 + 2v_m(z)3.5\sigma_v + (3.5\sigma_v)^2 \right) \Leftrightarrow \\
q_p(z) &= \frac{(v_m(z))^2}{2} p_a \left(1 + \frac{7\sigma_v}{v_m(z)} + \left(\frac{3.5\sigma_v}{v_m(z)} \right)^2 \right)
\end{aligned}$$

Αγνοώντας στην παραπάνω σχέση τον τελευταίο όρο [3], λαμβάνεται η σχέση:

$$q_p(z) \approx \frac{(v_m(z))^2}{2} p_a \left(1 + \frac{7\sigma_v}{v_m(z)} \right)$$

που χρησιμοποιείται σαν απόλυτη ισότητα:

$$q_p(z) = \frac{(v_m(z))^2}{2} p_a \left(1 + \frac{7\sigma_v}{v_m(z)} \right) \quad (5.10)$$

Η (5.10), γίνεται ισοδύναμα από την (5.8):

$$\begin{aligned}
q_p(z) &= \frac{(c_r(z)c_0(z)v_b)^2}{2} p_a \left(1 + \frac{7\sigma_v}{v_m(z)} \right) \stackrel{(5.4)}{\Leftrightarrow} \\
q_p(z) &= (c_r(z)c_0(z))^2 q_b \left(1 + \frac{7\sigma_v}{v_m(z)} \right) \quad (5.11)
\end{aligned}$$

Ορίζεται ως:

$$I_v(z) \equiv \frac{\sigma_v}{v_m(z)} \quad (5.12)$$

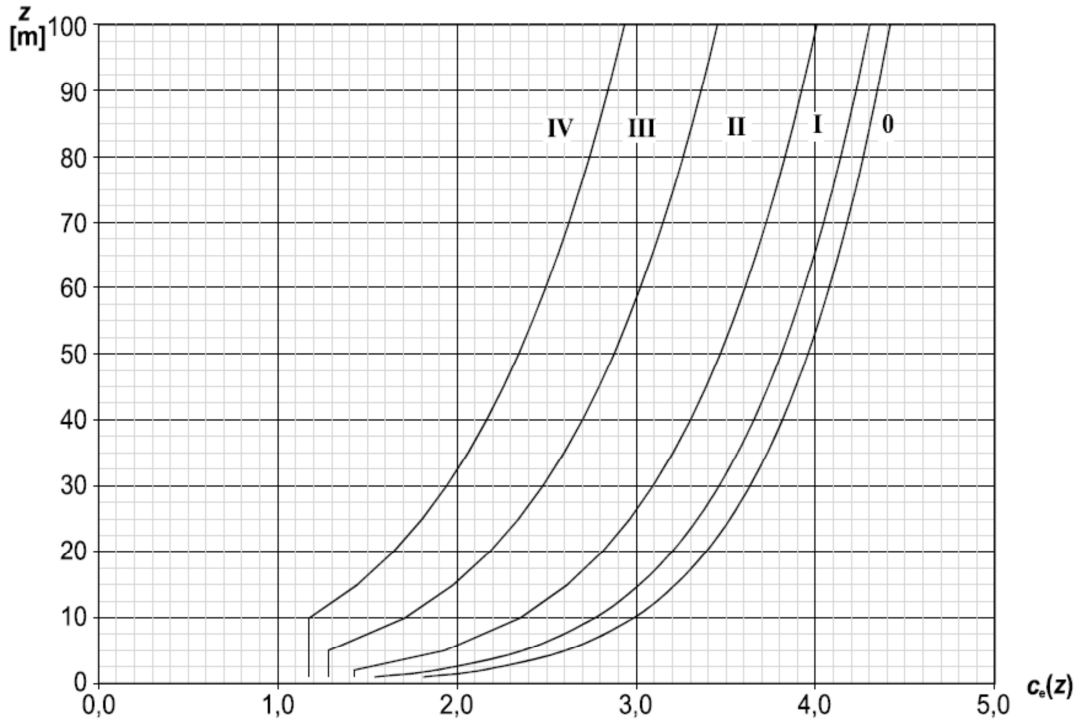
η ένταση της τύρβης (στροβιλισμού) (*turbulence intensity* [9]) η οποία βάσει του [9], συστήνεται να υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_v(z) = \begin{cases} \frac{k_1}{c_o(z) \ln(z/z_0)} \forall z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ \frac{k_1}{c_o(z) \ln(z_{\min}/z_0)} \forall z < z_{\min} \end{cases} \quad (5.13)$$

όπου k_1 είναι ο συντελεστής τύρβης (*turbulence factor*) που θεωρείται τις περισσότερες φορές ίσος με τη μονάδα. Ο συντελεστής έκθεσης $c_e(z)$ ορίζεται έτσι ώστε να ισχύει $q_p(z) = c_e(z) q_b$, δηλαδή από την (5.11) και τη (5.12):

$$c_e(z) = (c_r(z)c_0(z))^2 (1 + 7I_v(z)) \quad (5.14)$$

και για την περίπτωση όπου $c_0(z) = k_1 = 1$, δίνεται στο σχήμα 5-3 (σχήμα 4.2 στο [9]), ως συνάρτηση του ύψους z και της κατηγορίας του εδάφους.



Σχήμα 5-3

Συνοψίζοντας, η ακραία (ή μέγιστη) πίεση αιχμής (peak velocity pressure [9]) ή απλά πίεση αιχμής σε ύψος z υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\begin{aligned} q_p(z) &= [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} p_a v_m^2(z) = c_e(z) q_b = (c_r(z)c_0(z))^2 (1 + 7I_v(z)) \frac{1}{2} p_a v_b^2(z) = \\ &= (c_r(z)c_0(z))^2 (1 + 7I_v(z)) \frac{1}{2} p_a c_{prob}^2 c_{dir}^2 c_{season}^2 v_{b,0}^2 \quad (5.15) \end{aligned}$$

Από τη σχέση $q_p(z) = \frac{1}{2} p_a v_p^2(z)$ και από την (5.15), λαμβάνεται για την ταχύτητα αιχμής η σχέση:

$$v_p(z) = c_r(z)c_0(z) \sqrt{(1 + 7I_v(z))} c_{prob} c_{dir} c_{season} v_{b,0} = \sqrt{c_e(z)} c_{prob} c_{dir} c_{season} v_{b,0}$$

Καθότι στις παραπάνω σχέσεις η παράμετρος z είναι μεταβλητή, συνήθως στους υπολογισμούς υιοθετείται η τιμή που αναφέρεται σαν ύψος αναφοράς $z_{reference}$. Υπάρχει η δυνατότητα να θεωρείται διαφορετικό ύψος αναφοράς ανά τμήματα της υπό μελέτη κατασκευής, σε μία προσπάθεια προσομοίωσης του γεγονότος ότι η πίεση μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται και η μεταβλητή z .

5.3.3 Παράδειγμα υπολογισμών βάσει Ευρωκώδικα 1

Θεωρείται μία επί εδάφους Φ/Β βάση, η οποία με συγκεκριμένη θεμελίωση και γωνία κλίσης, έχει ύψος π.χ. $z_{reference} = 2.2 \text{ m}$ (θεώρηση μέγιστου ύψους, όπως στην περίπτωση ανοικτών υπόστεγων) και ο κατασκευαστής της αναφέρει ότι η βάση του αντέχει σε φορτία ανέμου 800 N/m^2 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1.

Η τιμή αυτή, των 800 N/m^2 , αφορά συνήθως στην ακραία πίεση αιχμής. Κατά τους υπολογισμούς που έχουν γίνει για να εξαχθεί αυτή η τιμή, συνήθως οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στην (5.15), είναι οι: $c_{dir} = c_{season} = 1$, $c_o(2.2) = k_1 = 1$. Αν θεωρηθεί κατηγορία εδάφους II, από την (5.13) για $z = 2.2 \text{ m}$, $z_0 = 0.05 \text{ m}$ και $z_{min} = 2.0 \text{ m}$ (πίνακας 2, για κατηγορία εδάφους II), λαμβάνεται:

$$I_v(2.2) = \frac{1}{\ln(2.2/0.05)}$$

Επίσης ο συντελεστής εδάφους, προκύπτει από την (5.6): $k_r = 0.19$ και συνεπώς από την (5.5):

$$c_r(2.2) = 0.19 \ln\left(\frac{2.2}{0.05}\right)$$

Τελικά προκύπτει ότι:

$$q_p(2.2) = c_e(2.2)q_b^{(5.14)} = (c_r(2.2)c_o(2.2))^2 (1 + 7I_v(2.2)) \frac{1}{2} \rho v_b^2$$

Με $p_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$ που είναι η συνήθης τιμή για την πυκνότητα αέρα, λαμβάνεται:

$$q_p(2.2) = \left(0.19 \ln\left(\frac{2.2}{0.05}\right)\right)^2 \left(1 + \frac{7}{\ln(2.2/0.05)}\right) 0.625 v_b^2 \approx 0.9207 v_b^2$$

Για την περίπτωση, όπου $q_p(2.2) = 800 \text{ N/m}^2$, λαμβάνεται $v_b \approx 29.47 \text{ m/s}$. Μπορεί να θεωρηθεί ότι $c_{prob} \approx 0.96$, που είναι η τιμή που προκύπτει από την (5.2), για $K_{prob.} = 0.2$, $n_{prob.} = 0.5$ οι οποίες είναι οι τιμές που προτείνονται στο [9] και θεωρώντας ότι $P_{r,v_{b,0}} = 0.04$, θεωρήσει η οποία ερμηνεύεται στο ότι σε βάθος χρόνου 25 ετών, η τιμή της $v_{b,0}$ ξεπερνιέται κατά μέσο όρο μία φορά. Η υιοθέτηση αυτή της τιμής για το $P_{r,v_{b,0}}$ έχει να κάνει με το γεγονός ότι συνήθως η εγγύηση που παρέχουν οι κατασκευαστές είναι διάρκειας 25 χρόνων. Επομένως, από την παραπάνω τιμή της βασικής ταχύτητας και την (5.1) για $c_{prob} = 0.96$, προκύπτει $v_{b,0} \approx 30,71 \text{ m/s}$. Διαφορετικά, για $c_{prob} = 1$, προκύπτει $v_{b,0} \approx 29.47 \text{ m/s}$. Και με τις δύο θεωρήσεις, βάσει του Εθνικού Προσαρτήματος μία

τέτοια βάση δεν είναι κατάλληλη για τη νησιωτική χώρα και τα παράλια, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ηπειρωτική χώρα. Βέβαια στην πραγματικότητα πολλές φορές μία βάση Φ/Β, μπορεί να αντέξει σε αισθητά δυσμενέστερες συνθήκες από αυτές που προδιαγράφονται από τον κατασκευαστή όσον αφορά στις ανεμοπιέσεις αλλά και στα φορτία χιονιού, καθότι εκτός των άλλων πολλές φορές κατά τη μελέτη-σχεδίαση λαμβάνονται πρόσθετοι συντελεστές ασφαλείας υπόψη.

5.4 Υπολογισμός συνολικής δράσης του ανέμου στο Φ/Β πάνελ στα επί εδάφους Φ/Β συστήματα

Για να υπολογιστεί η συνολική δράση του ανέμου πάνω σε μία κατασκευή ή στα τμήματά της, χρειάζεται να υπολογιστούν ο συντελεστής μεγέθους c_s και ο συντελεστής δυναμικής απόκρισης c_d [3]. Βάσει του [9], το γινόμενο $c_s c_d$, μπορεί να ληφθεί ίσο με τη μονάδα, για την περίπτωση κατά την οποία το ύψος της κατασκευής είναι μικρότερο των 15 m και τα δομικά στοιχεία έχουν φυσική συχνότητα μεγαλύτερη των 5 Hz, γεγονότα που τις περισσότερες φορές ισχύουν για τις Φ/Β κατασκευές. Στο εξής, θα θεωρείται ότι $c_s c_d = 1$.

Η γενικότερη έκφραση που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των επιδράσεων του ανέμου, δίνεται από τη σχέση [12] :

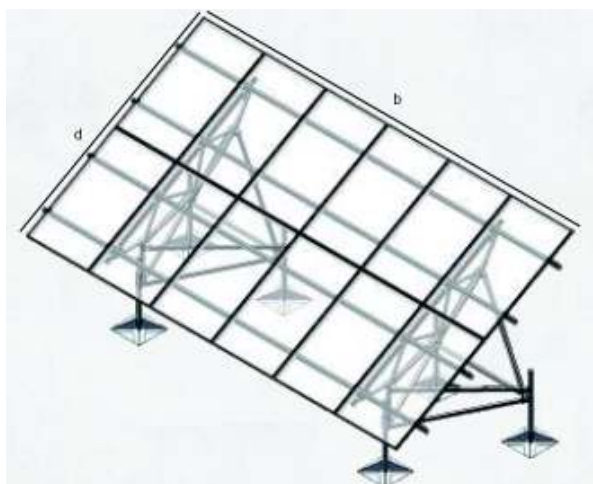
$$W = \frac{1}{2} \rho v_b^2 c_e(z) c_w c_s c_d = q_p c_w c_s c_d$$

όπου με W συμβολίζεται η επίδραση του ανέμου, είτε με την έννοια της δύναμης, της πίεσης, της τριβής ή της ροπής. Με c_w συμβολίζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής που αφορά στην υπό μελέτη επίδραση του ανέμου (συντελεστής εξωτερικής πίεσης, συντελεστής εσωτερικής πίεσης, συντελεστής δύναμης, συντελεστής τελικής πίεσης ή συντελεστής τριβής ή συνδυασμοί των παραπάνω). Οι συντελεστές τελικής πίεσης $c_{p,net}$ είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνισταμένης δράσης του ανέμου σε μία κατασκευή ή τμήματά της και αυτοί υιοθετούνται τις περισσότερες φορές κατά τους υπολογισμούς της δράσης του ανέμου στα Φ/Β πάνελ. Επομένως στην περίπτωση όπου $c_w = c_{p,net}$, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$W = q_p c_{p,net} c_s c_d \stackrel{c_s c_d = 1}{=} q_p c_{p,net} \quad (5.16)$$

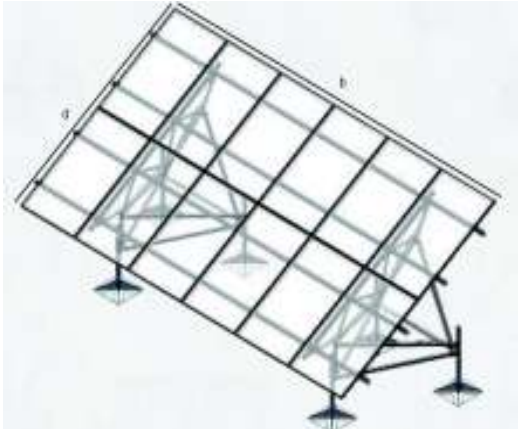
Για την περίπτωση επί εδάφους συστημάτων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, οι συντελεστές τελικής πίεσης, εξάγονται από τον πίνακα 7.6 που παρουσιάζεται στο [9]. Οι διαστάσεις b, d απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 5-4¹⁴, και ουσιαστικά αφορούν σε αυτόνομο κομμάτι της βάσης. Ο συντελεστής φ εκφράζει το βαθμό «μπλοκαρίσματος» κάτω από το υποτιθέμενο υπόστεγο, και θεωρείται ίσος με 0.

¹⁴ Το συγκεκριμένο σχήμα, απεικονίζει τη βάση Exel G1 της εταιρείας Exelgroup.



Σχήμα 5-4

Επομένως για την περίπτωση των επί εδάφους βάσεων Φ/Β συστημάτων, ο πίνακας 7.6 λαμβάνει τη μορφή:

Πίνακας 5-3				
Net Pressure coefficients $c_{p,net}$				
Key plan				
Γωνία κλίσης	Δράση ανέμου	Zone A	Zone B	Zone C
0°	Πίεση	+0,5	+1,8	+1,1
	Υποπίεση	-0,6	-1,3	-1,4
5°	Πίεση	+0,8	+2,1	+1,3
	Υποπίεση	-1,1	-1,7	-1,8
10°	Πίεση	+1,2	+2,4	+1,6
	Υποπίεση	-1,5	-2,0	-2,1
15°	Πίεση	+1,4	+2,7	+1,8
	Υποπίεση	-1,8	-2,4	-2,5
20°	Πίεση	+1,7	+2,9	+2,1
	Υποπίεση	-2,2	-2,8	-2,9
25°	Πίεση	+2,0	+3,1	+2,3
	Υποπίεση	-2,6	-3,2	-3,2
30°	Πίεση	+2,2	+3,2	+2,4
	Υποπίεση	-3,0	-3,8	-3,6

Συνεπώς, η συνολική πίεση που ασκείται στα Φ/Β πάνελ λαμβάνει τη «χειρότερη τιμή» στην περίπτωση κλίσης 30° και αφορά στα ακραία πάνελ ή μέρος αυτών. Έτσι στη χειρότερη περίπτωση λαμβάνεται από τη (5.16) αντίστοιχα, για μία τιμή π.χ. $q_p(z_{ref}) = 1000 \text{ N/m}^2$, $W = q_p(z_{ref})c_{p,net} = -3,8 * 1000 \text{ N/m}^2 = -3,8 \text{ kPa}$, όπου βέβαια ίσως είναι υπερβολικό να θεωρηθεί το μέγιστο ύψος ως ύψος αναφοράς. Ωστόσο, αν θεωρηθεί η τιμή των $-2,4 \text{ kPa}$ ως ακραία τιμή υποπίεσης που μπορεί να δεχτεί το Φ/Β πάνελ, είναι προφανές ότι με αυτές τις δύο θεωρήσεις, το Φ/Β πάνελ θα καταστραφεί, δεδομένου ότι το ίδιο βάρος του Φ/Β είναι πολύ μικρό για να αντισταθμίσει αυτή τη δύναμη που ασκείται.

Από τον παραπάνω πίνακα, είναι φανερό ότι από πλευράς ανεμοπιέσεων καλό είναι η βάση του Φ/Β να έχει μικρή κλίση και το ύψος της να είναι χαμηλό. Αυτό, για δεδομένη γωνία κλίσης, σημαίνει ότι η κατώτατη κάθετη απόσταση του πάνελ από το έδαφος, πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο μικρή. Δεν πρέπει όμως να είναι μηδενική ούτε τις τάξεως των λίγων εκατοστών. Οι λόγοι για τους οποίους κάτι τέτοιο πρέπει να αποφεύγεται είναι πολλοί και ορισμένοι προφανείς. Κατ' αρχάς, ειδικά στην περίπτωση των επί εδάφους εγκαταστάσεων, δεδομένων των ανωμαλιών στην επιφάνεια του εδάφους, μία τέτοια υιοθέτηση θα ήταν καταστροφική, καθότι σε κάποια σημεία η εγκατάσταση ενδεχομένως να ήταν αδύνατη. Αλλά ακόμα και αν ήταν δυνατή η εγκατάσταση σε τέτοια χαμηλή απόσταση από το έδαφος, σε μία τέτοια περίπτωση θα εμποδιζόταν η ροή του ανέμου: Το ότι μία βάση απέχει από το έδαφος απόσταση πάνω από π.χ. 50 cm, δεν είναι απαραίτητα αρνητικό λαμβάνοντας υπόψη μόνο το γεγονός ότι η ακραία πίεση αιχμής αποκτά μεγαλύτερες τιμές καθώς αυξάνεται το ύψος. Μία ενδεχόμενη εκτόνωση του ισχυρού ανέμου, πιθανόν να είναι πιο αποτελεσματική από το να διατηρηθεί η βάση, υπό την ίδια κλίση σε χαμηλότερο ύψος. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση της «πιο υψωμένης» βάσης, ο αερισμός των Φ/Β πάνελ είναι συνήθως καλύτερος και η ενεργειακή απόδοση υψηλότερη.

Όσον αφορά όμως στη μικρή κλίση που αναφέρθηκε, πρέπει να επισημανθεί ότι σύμφωνα με το [5] έρευνα που έγινε από την Boeing (σε ανοιχτό πεδίο [1]) έδειξε ότι για «απλές» συστοιχίες Φ/Β πάνελ, οι δυνάμεις που ασκούνταν από τον άνεμο είχαν την ελάχιστη τιμή σε κλίση 20° , ενώ μέγιστες τιμές παρατηρήθηκαν μεταξύ 10° και 15° . Αυτό συνέβαινε διότι μεταξύ 10° και 15° , η συστοιχία δρούσε σαν αεροτομή, προκαλώντας μεγάλες δυνάμεις ανύψωσης [5]. Συνεπώς, καλό είναι αυτές οι κλίσεις να αποφεύγονται. Επίσης απαιτείται προσοχή σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό των αντίστοιχων τιμών που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα για γωνίες κλίσης μεταξύ 10° και 15° . Βάσει των αποτελεσμάτων της παραπάνω έρευνας, οι τιμές που προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή από τον παραπάνω πίνακα για π.χ. 13° , πιθανότατα δεν δίνουν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Βέβαια πρέπει να επισημανθεί ότι δε στάθηκε δυνατή η πλήρης μελέτη της συγκεκριμένης αναφοράς της Boeing, προκειμένου να είναι γνωστές και λοιπές συνθήκες, όπως για παράδειγμα το ελάχιστο ύψος της βάσης από το έδαφος. Το ύψος αυτό, είναι συνήθως μεταξύ 40 cm και 70 cm από το επίπεδο για τις συνήθεις βάσεις που χρησιμοποιούνται σε ανοιχτό πεδίο, ενώ αντίστοιχα μεταξύ 15 cm και 45 cm, για τις αντίστοιχες βάσεις που χρησιμοποιούνται σε δώματα. Σημειώνεται, τέλος, ότι μικρή κλίση σημαίνει ταυτόχρονη αύξηση του φορτίου χιονιού-πάγου, όπως αναφέρεται παρακάτω.

Στην πραγματικότητα οι υπολογισμοί για τις δράσεις του ανέμου συνήθως απλοποιούνται, καθώς τις περισσότερες φορές, ακόμα και με λογισμικά προσομοίωσης, είναι δύσκολο να προσομοιωθεί η ροή του ανέμου γύρω από τις διάφορες επιφάνειες. Ένας σχετικά ασφαλής τρόπος για την εξαγωγή συμπερασμάτων και τιμών αεροδυναμικών συντελεστών, είναι οι δοκιμές σε σήραγγες (*wind tunnel tests*), όπου βέβαια πρέπει να γίνει σε μικρή κλίμακα μία όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική αναπαράσταση της τοπογραφίας του χώρου, συμπεριλαμβανομένης και της Φ/Β συστοιχίας. Ακόμα πιο ασφαλής τρόπος, είναι οι δοκιμές σε πραγματική κλίμακα σε μεγάλους θαλάμους όπου στόχος είναι να προσομοιωθούν κατά τον καλύτερο τρόπο διαφορετικές συνθήκες ανέμου.

5.5 Συσχέτιση της αντοχής σε φορτία ανέμου της βάσης και του Φ/Β πάνελ

5.5.1 Αναζήτηση ασφαλούς λύσης για την επιλογή βάσης & Φ/Β πάνελ

Είναι απαραίτητο κατά την αναζήτηση λύσεων που αφορούν στη βάση της Φ/Β εγκατάστασης, να γνωρίζει ο εγκαταστάτης τις υποθέσεις και παραδοχές που έχει κάνει ο κατασκευαστής της βάσης, όταν αναφέρεται σε τιμές σχετικά με την αντοχή του προϊόντος του είτε στον άνεμο, είτε στο χιόνι. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορέσει να ανάγει, αν χρειαστεί, τις τιμές αυτές στις αντίστοιχες τιμές για την περιοχή στην οποία πρόκειται να γίνει η εγκατάσταση. Τις περισσότερες φορές, αν ο κατασκευαστής αναφέρεται στα τεχνικά στοιχεία του προϊόντος του σε φορτίο ανέμου, αυτή η αναφορά αφορά στην ακραία πίεση αιχμής. Πολλές φορές επίσης ο κατασκευαστής αναφέρει και μία αντίστοιχη τιμή ταχύτητας ανέμου. Καλό είναι να γνωρίζει ο εγκαταστάτης αυτή η τιμή σε τι συγκεκριμένο αφορά: στη θεμελιώδη βασική ταχύτητα ανέμου, στη βασική ταχύτητα ανέμου, στη μέση ταχύτητα ανέμου ή στην ταχύτητα αιχμής. Για παράδειγμα, αν στα τεχνικά στοιχεία της βάσης αναφέρεται: «Φορτίο ανέμου : 0.5 kN/m² (102 km/h)», είναι φανερό ότι σε αυτήν την περίπτωση η τιμή αυτή του φορτίου ανέμου, λαμβάνεται με τον πολλαπλασιασμό

$$\frac{1}{2} \rho_a v_p^2 \approx 0.625 * (28.3)^2 \approx 500 \text{ N / m}^2$$

όπου $v_p = 102 \text{ km / h} \approx 28.3 \text{ m / s}$, δηλαδή σε αυτήν την περίπτωση η τιμή της ταχύτητας είναι η ταχύτητα αιχμής, υπό την προϋπόθεση, ότι το φορτίο ανέμου αφορά στην ακραία πίεση αιχμής. Σε άλλες περιπτώσεις όμως, η αντίστοιχη τιμή πιθανόν να αφορά στη θεμελιώδη βασική ταχύτητα ανέμου.

Πολλές φορές, η υιοθέτηση μίας κατασκευής που προσφέρεται σαν έτοιμη λύση είναι κατά πολύ οικονομικότερη από μία ειδική κατασκευή κατά παραγγελία (*custom-made*), δεδομένου ότι και στις δύο περιπτώσεις η κατασκευή πρέπει να έχει μελετηθεί στατικά. Δηλαδή η υλοποίηση κάποιας ειδικής κατασκευής και η αντίστοιχη στατική μελέτη που αφορά στη συγκεκριμένη κατασκευή έχει τις περισσότερες φορές μεγαλύτερο κόστος, από μία έτοιμη λύση, μελετημένη όσον αφορά στη στατική επάρκειά της για συγκεκριμένες συνθήκες. Επομένως, συμφέρει οικονομικά η υιοθέτηση μίας έτοιμης λύσης βάσης,

ελεγμένης στατικά, με αναγωγή (αν χρειαστεί) των συνθηκών βάσει των οποίων έχουν δοθεί τα τεχνικά στοιχεία της βάσης στις πραγματικές συνθήκες. Ουσιαστικά, η διαδικασία που πρέπει να ακολουθείται, είναι ο σχεδιαστής της Φ/Β εγκατάστασης εξ αρχής να προδιαγράφει τα τεχνικά στοιχεία που είναι απαραίτητο να έχει η βάση που θα χρησιμοποιήσει, δηλαδή τις ελάχιστες απαιτήσεις, για να μπορέσει στη συνέχεια να κρίνει με τις κατάλληλες αναγωγές αν ένα έτοιμο, ελεγμένο στατικά προϊόν, καλύπτει τη συγκεκριμένη περίπτωση. Στην απόφαση που θα ληφθεί, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η αντοχή του Φ/Β πάνελ που θα επιλεγεί, καθότι είτε υπάρξει αστοχία στη βάση αυτή καθαυτή, είτε στα Φ/Β πάνελ, και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει αστοχία, γεγονός ανεπιθύμητο.

5.5.2 Φορτίο χιονιού και μη σεισμικοί συνδυασμοί φορτίων

Η αντοχή των Φ/Β πάνελ, αλλά και της τεγίδας και του φορέα της βάσης, πρέπει να εξετάζεται για διάφορους συνδυασμούς φορτίων υπό τις αντιπροσωπευτικές για την εγκατάσταση συνθήκες, στη δυσμενέστερη περίπτωση, και να ελέγχεται ποιά από το σύνολο των προτεινόμενων Φ/Β πάνελ και βάσεων αντέχουν στις αντίστοιχες καταπονήσεις.

Εξετάζονται συνήθως περιπτώσεις μη σεισμικών συνδυασμών φορτίων, καθότι οι πιο επικίνδυνες δυνάμεις που ασκούνται στα Φ/Β πάνελ, είναι αυτές από τον άνεμο, ίσως και από το χιόνι σε ακραίες περιπτώσεις. Περιπτώσεις «ζωντανών» φορτίων [5] πάνω στα Φ/Β πάνελ, συνήθως δεν εξετάζονται και επίσης δε λαμβάνονται υπόψη θερμοκρασιακά φορτία.

Συγκεκριμένα στην εργασία αυτή, θεωρούνται οι παρακάτω μη σεισμικοί συνδυασμοί φόρτισης για τον έλεγχο των τεγίδων και για των Φ/Β πάνελ, σε σχετική συμφωνία με τον Ευρωκώδικα:

Πίνακας 5-4		
Εξεταζόμενοι μη σεισμικοί συνδυασμοί φόρτισης για τον έλεγχο των Φ/Β πάνελ		
A	B	Γ
$1.05s_l + 1.5W_\pi$	$1.5s_l + 0.9W_\pi$	$1.5W_{\nu\pi}$

όπου με s_l συμβολίζεται το φορτίο χιονιού και με $W_\pi, W_{\nu\pi}$, η φόρτιση του ανέμου ως πίεση και ως υποπίεση, αντίστοιχα.

Η φόρτιση του χιονιού, υπολογίζεται βάσει της ενότητας 1-3 του Ευρωκώδικα [13]. Το *χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού στο έδαφος*, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση και το υψόμετρο της περιοχής. Στο αντίστοιχο Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα [14], η σχέση που δίνει την τιμή του είναι:

$$s_k = s_{k,0} \left[1 + \left(\frac{\left[\frac{alt+1}{100} \right] * 100}{917} \right)^2 \right] \quad (5.17)$$

όπου με *alt* συμβολίζεται το υψόμετρο της περιοχής εγκατάστασης σε μέτρα. Το $s_{k,0}$ είναι το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού στο έδαφος αναγόμενο στη στάθμη της θάλασσας. Για την περίπτωση της Ελλάδας, οι τρεις πιθανές τιμές του είναι οι [11, 14]: 0.4 kPa , 0.8 kPa , 1.7 kPa όπου κάθε μία τιμή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ζώνη: Η τιμή 0.4 kPa στη ζώνη Α, η τιμή 0.8 kPa στη ζώνη Β και η τιμή 1.7 kPa στη ζώνη Γ. Στη ζώνη Α, ανήκουν οι νομοί Αρκαδίας, Ηλείας, Λακωνίας, Μεσσηνίας και όλα τα νησιά πλην των Σποράδων και της Εύβοιας. Στη ζώνη Γ, ανήκουν οι νομοί Μαγνησίας, Φθιώτιδας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Λάρισας, οι Σποράδες και Εύβοια και τέλος στη ζώνη Β, ανήκουν οι περιοχές της υπόλοιπης χώρας:

Πίνακας 5-5			
Ζώνη	Περιοχές	$s_{k,0} [\text{kPa}]$	Κωδικός Ζώνης ($\kappa - \zeta$)
Α	Νομοί Αρκαδίας, Ηλείας, Λακωνίας, Μεσσηνίας και όλα τα νησιά πλην των Σποράδων και της Εύβοιας.	0.4 kPa	1
Β	Όσες περιοχές δεν ανήκουν στις ζώνες Α ή Γ	0.8 kPa	2
Γ	Νομοί Μαγνησίας, Φθιώτιδας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Λάρισας, οι Σποράδες και Εύβοια	1.7 kPa	4.25

Αν δε θεωρηθούν οι περιπτώσεις εξαιρετικών φορτίων χιονιού, το φορτίο χιονιού στο Φ/Β πάνελ, προκύπτει από τη σχέση [14]:

$$s_l = \mu C_e C_t s_k \quad (5.18)$$

όπου με μ συμβολίζεται ο συντελεστής σχήματος, με C_e ο συντελεστής έκθεσης, και με C_t ο συντελεστής θερμοκρασίας [15]. Ο συντελεστής σχήματος, για την περίπτωση της Φ/Β βάσης, η οποία όσον αφορά στο φορτίο χιονιού μπορεί να θεωρηθεί *monopitch roof* [13], δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = 0.8 \frac{(60 - d_c)}{30} \quad (5.19)$$

με τη κλίση d_c να δίνεται σε μοίρες. Όσον αφορά στο συντελεστή έκθεσης, για τις Φ/Β εγκαταστάσεις θεωρούνται κανονικές συνθήκες, συνεπώς $C_e = 1$. Τέλος ο συντελεστής θερμοκρασίας C_t θεωρείται συνήθως και αυτός ίσος με τη μονάδα, παρόλο που στην

πραγματικότητα η θεώρηση τιμής μικρότερης της μονάδας για την περίπτωση των Φ/Β πάνελ είναι ίσως πιο ρεαλιστική.

Επομένως από τις σχέσεις (5.17), (5.18), (5.19) και τον πίνακα 5-5, λαμβάνεται:

$$s_l = 0.8 \times \frac{(60 - d_c)}{30} C_e C_i \times 0.4 \times \kappa - \zeta \left(1 + \left(\frac{\left[\frac{alt+1}{100} \right] \times 100}{917} \right)^2 \right) [kPa] \quad (5.20)$$

Υπενθυμίζεται τέλος, ότι $W = q_p(z_{ref})c_{p,net}$, είτε στην περίπτωση της πίεσης του ανέμου, είτε σε αυτήν της υποπίεσης.

5.5.3 Ελάχιστες απαιτήσεις φορτίων ανέμου και χιονιού

Έστω ότι συμβολίζεται με $q_p^{αντ.εγκ}$ η ελάχιστη απαίτηση για τη μέγιστη πίεση αιχμής υπό τις αντιπροσωπευτικές για την εγκατάσταση συνθήκες. Αντίστοιχα, υπάρχει μία μέγιστη πίεση που αφορά στα φορτία από χιόνι-πάγο, για την οποία υπάρχει πάλι μία ελάχιστη απαίτηση $s_p^{αντ.εγκ}$ υπό τις αντιπροσωπευτικές για την εγκατάσταση συνθήκες. Η βάση που πρέπει να επιλεγεί, πρέπει να μπορεί (για λόγους που θα φανούν στη συνέχεια) να δεχτεί τουλάχιστον φορτία τέτοια ώστε:

$$q_p^{βάσης} > q_p^{αντ.εγκ} \text{ και } s_p^{βάσης} > s_p^{αντ.εγκ}$$

για το φορτίο χιονιού-πάγου που αφορά στην εμπρόσθια πλευρά της βάσης. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να υπολογισθεί, αν δεν δίνεται, η μέγιστη πίεση αιχμής για τις υποψήφιες λύσεις της βάσης υπό τις αντιπροσωπευτικές για την εγκατάσταση συνθήκες και η μέγιστη πίεση που αφορά στα φορτία από χιόνι-πάγο για τις υποψήφιες λύσεις της βάσης υπό τις αντιπροσωπευτικές για την εγκατάσταση συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, απορρίπτονται όσες βάσεις δεν ανταποκρίνονται στις ακραίες για τις αντιπροσωπευτικές για την εγκατάσταση συνθήκες.

Ο σχεδιαστής της βάσης του Φ/Β, έχει θεωρήσει αντίστοιχους μη σεισμικούς συνδυασμούς με αυτούς που θεωρήθηκαν για τον έλεγχο των Φ/Β πάνελ, για τον έλεγχο των τεγίδων και του φορέα της βάσης (θεώρηση ανοικτών υπόστεγων), οι οποίοι στη γενική τους μορφή, στις δυσμενέστερες περιπτώσεις, δίνονται από τον τύπο:

$$\Sigma_{πίεση} = \gamma_1 D + \gamma_2 s_p^{βάσης} + \gamma_3 q_p^{βάσης}$$

για την περίπτωση της πίεσης και

$$\Sigma_{υποπίεση} = \gamma_4 D + \gamma_5 q_p^{βάσης}$$

για την περίπτωση της υποπίεσης, με $\gamma_i > 0 \forall i \in \{1, 2, 3, 4\}$ και $\gamma_5 < 0$. Αν ισχύει:

$$q_p^{βάση} > q_p^{αντ.εγκ} \quad (5.21)$$

και

$$s_p^{βάση} > s_p^{αντ.εγκ} \quad (5.22)$$

τότε ισχύει:

$$\gamma_1 D + \gamma_2 s_p^{βάση} + \gamma_3 q_p^{βάση} > \gamma_1 D + \gamma_2 s_p^{αντ.εγκ} + \gamma_3 q_p^{αντ.εγκ}$$

ανεξαρτήτως των τιμών των $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ για την περίπτωση της πίεσης και

$$\gamma_4 D + \gamma_5 q_p^{βάση} < \gamma_4 D + \gamma_5 q_p^{αντ.εγκ}$$

για την περίπτωση της υποπίεσης και συνεπώς η βάση κρίνεται κατάλληλη. Αν ωστόσο, είναι γνωστές οι τιμές για τα $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$, ενδεχομένως να μην ισχύουν ταυτόχρονα οι ανισότητες (5.21) και (5.22), αλλά να ισχύει η ανισότητα

$$\gamma_1 D + \gamma_2 s_p^{βάση} + \gamma_3 q_p^{βάση} > \gamma_1 D + \gamma_2 s_p^{αντ.εγκ} + \gamma_3 q_p^{αντ.εγκ}$$

Δηλαδή:

$$q_p^{βάση} > q_p^{αντ.εγκ} \wedge s_p^{βάση} > s_p^{αντ.εγκ} \Rightarrow \gamma_1 D + \gamma_2 s_p^{βάση} + \gamma_3 q_p^{βάση} > \gamma_1 D + \gamma_2 s_p^{αντ.εγκ} + \gamma_3 q_p^{αντ.εγκ}$$

ενώ

$$q_p^{βάση} > q_p^{αντ.εγκ} \Leftrightarrow \gamma_4 D + \gamma_5 q_p^{βάση} < \gamma_4 D + \gamma_5 q_p^{αντ.εγκ}$$

Επομένως, αν:

$$\begin{aligned} & q_p^{βάση} > q_p^{αντ.εγκ} \wedge s_p^{βάση} > s_p^{αντ.εγκ} \Rightarrow \\ & \gamma_1 D + \gamma_2 s_p^{βάση} + \gamma_3 q_p^{βάση} > \gamma_1 D + \gamma_2 s_p^{αντ.εγκ} + \gamma_3 q_p^{αντ.εγκ} \wedge \\ & \gamma_4 D + \gamma_5 q_p^{βάση} < \gamma_4 D + \gamma_5 q_p^{αντ.εγκ} \end{aligned}$$

Αφού επιλεγεί, βάσει των παραπάνω, η βάση (ύψος, γωνία κλίσης κλπ.), πρέπει να επιλεγεί και το κατάλληλο πάνελ το οποίο με τη σειρά του πρέπει στη χειρότερη περίπτωση να μπορεί να δεχτεί τουλάχιστον φορτία $W^{\max, \piαν., \piίεση}, W^{\max, \piαν., \upsilonποπίεση}$ τέτοια ώστε:

$$\left. \begin{aligned} W^{\max, \piαν., \piίεση} &> 1.05 s_p^{αντ.εγκ} + 1.5 W^{\piαν., \piίεση} (q_p^{αντ.εγκ}) \wedge \\ W^{\max, \piαν., \piίεση} &> 1.5 s_p^{αντ.εγκ} + 0.9 W^{\piαν., \piίεση} (q_p^{αντ.εγκ}) \wedge \\ W^{\max, \piαν., \upsilonποπίεση} &< 1.5 W^{\piαν., \upsilonποπίεση} (q_p^{αντ.εγκ}) \end{aligned} \right\} \quad (5.23)$$

Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, στο να προσπαθεί να γνωρίζει ο εγκαταστάτης, ποιο είναι το πιο αδύναμο σημείο του όλου συστήματος, για την αποφυγή λύσεων που δεν έχουν

ουσιαστικό νόημα. Για παράδειγμα, αν για μία βάση που βρίσκεται σε κλίση 30° , ισχύει $q_p^{αντ.εγκ} = 1000 \text{ N/m}^2$ και $q_p^{βάσης} = 900 \text{ N/m}^2$, ενδεχομένως η αντοχή της βάσης να μπορεί να βελτιωθεί με πιο μικρές αποστάσεις μεταξύ των δοκών στήριξης και να αποκτήσει νέα τιμή π.χ. $q_p^{βάσης} = 1100 \text{ N/m}^2$. Κάτι τέτοιο όμως σημαίνει πρόσθετο κόστος, το οποίο πιθανόν να έχει νόημα στην περίπτωση που:

$$W^{\max, \piαν., \text{υποπίεση}} < W^{\piαν., \text{υποπίεση}}(q_p^{αντ.εγκ}) = -3.8 \text{ kPa}$$

(Πίνακας 5-3) αλλά όχι στην περίπτωση όπου π.χ. $W^{\max, \piαν., \text{υποπίεση}} = -2.4 \text{ kPa}$. Σε μία τέτοια περίπτωση το πάνελ πιθανόν κοντά στην ακραία πίεση $q_p^{αντ.εγκ}$, να αφαιρεθεί από τη βάση και επομένως να μην έχει νόημα η παραπάνω νέα βελτιωμένη κατασκευή της βάσης, επειδή εκτός των άλλων η βάση θα αποφορτιστεί με την αφαίρεση του πάνελ. Συνοψίζοντας, μία σωστή λύση, θα δοθεί αν ισχύουν:

$$\left. \begin{aligned} q_p^{βάσης} > q_p^{αντ.εγκ} \wedge s_p^{βάσης} > s_p^{αντ.εγκ} \wedge W^{\max, \piαν., \text{πίεση}} > 1.05s_p^{αντ.εγκ} + 1.5W^{\piαν., \text{πίεση}}(q_p^{αντ.εγκ}) \wedge \\ W^{\max, \piαν., \text{πίεση}} > 1.5s_p^{αντ.εγκ} + 0.9W^{\piαν., \text{πίεση}}(q_p^{αντ.εγκ}) \wedge W^{\max, \piαν., \text{υποπίεση}} < 1.5W^{\piαν., \text{υποπίεση}}(q_p^{αντ.εγκ}) \end{aligned} \right\} (5.24)$$

Σε αυτό το πλαίσιο αναφέρεται επίσης και η δυνατότητα τοποθέτησης ανεμοφρακτών που παρέχονται και σαν έτοιμες λύσεις-μέρη του συστήματος βάσης του Φ/Β ή μπορούν να κατασκευαστούν σαν ιδιοκατασκευές. Στόχος τους είναι να μεταβάλλουν και να ελαχιστοποιούν τη ροή του ανέμου γύρω από τα Φ/Β πάνελ, μειώνοντας έτσι τις δυνάμεις που ασκούνται στα Φ/Β πάνελ για δεδομένες συνθήκες ανέμου και οι οποίες μεταφέρονται σε όλη την κατασκευή της βάσης. Δηλαδή ουσιαστικά θεωρείται με αυτόν τον τρόπο νέα μειωμένη τιμή για το $q_p^{αντ.εγκ}$, αρκεί (και σε αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή) η ανακοπή της ροής σε κάποιο τμήμα του συστήματος, να μην έχει ως επακόλουθο την αύξηση της ροής και μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου σε άλλο τμήμα του συστήματος. Ένα μεγάλο μειονέκτημα όμως των ανεμοφρακτών, πέραν από το ενδεχόμενο κόστος, είναι ότι σε περιπτώσεις που βρίσκονται αισθητά κοντά στα Φ/Β πάνελ εμποδίζουν την απαγωγή της θερμότητας από το Φ/Β πάνελ με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση της απόδοσης του τελευταίου.

5.5.4 Σύνοψη υπολογισμών σχετικών με την καταλληλότητα της βάσης και του Φ/Β πάνελ

Για τον υπολογισμό, της τιμής $q_p^{αντ.εγκ}$, χρησιμοποιείται η σχέση (5.15):

$$q_p(z) = (c_r(z)c_0(z))^2 (1 + 7I_v(z)) \frac{1}{2} p_a c_{prob}^2 c_{dir}^2 c_{season}^2 v_{b,0}^2 \quad (5.5) \quad (5.6) \quad (5.12) \Leftrightarrow$$

$$q_p(z) = \begin{cases} \left(0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} * \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) c_0(z) \right)^2 \left(1 + 7 \frac{k_1}{c_o(z) \ln(z/z_0)} \right) \frac{1}{2} p_a c_{prob}^2 c_{dir}^2 c_{season}^2 v_{b,0}^2 \quad \forall z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ \left(0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} * \ln \left(\frac{z_{\min}}{z_0} \right) c_0(z) \right)^2 \left(1 + 7 \frac{k_1}{c_o(z) \ln(z_{\min}/z_0)} \right) \frac{1}{2} p_a c_{prob}^2 c_{dir}^2 c_{season}^2 v_{b,0}^2 \quad \forall z < z_{\min} \end{cases} \quad (5.25)$$

Η (5.25), χρησιμοποιείται για $z = z_{ref}$, μαζί με τον πίνακα 5-2, που επαναλαμβάνεται εδώ:

Κατηγορία Εδάφους	$z_0[m]$	$z_{\min}[m]$	$z_{\max}[m]$
0	0.003	1	200
I	0.01	1	200
II	0.05	2	200
III	0.3	5	200
IV	1	10	200

Η (5.25) βασίζεται στους συνιστώμενους τρόπους υπολογισμού των συντελεστών τραχύτητας και ανάγλυφου βάσει του Ευρωκώδικα 1. Για διαφορετικές θεωρήσεις, η σχέση αυτή πιθανόν να μην ισχύει ή να χρειάζεται μετατροπές.

Συνήθως υιοθετούνται οι τιμές $c_{dir} = c_{season} = k_I = 1$ και $p_a = 1.25 \text{ kg/m}^3$, εκτός αν γίνονται διαφορετικές θεωρήσεις ή δίνονται διαφορετικές κατευθύνσεις από τα εκάστοτε Εθνικά Προσαρτήματα.

Συνεπώς, για τον υπολογισμό της ακραίας πίεσης αιχμής $q_p^{αντ.εγκ}$, εν τέλει απαιτούνται:

- Το ύψος αναφοράς z_{ref} (συνήθως θεωρείται το μέγιστο ύψος της βάσης)
- Η θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου $v_{b,0}$
- Ο συντελεστής c_{prob} (συνήθως $c_{prob} = 1$, διαφορετικά δίνεται από τη σχέση (5.2))
- Ο συντελεστής ανάγλυφου (συνήθως $c_0(z_{ref}) = 1$, διαφορετικά γίνεται υπολογισμός του βάσει των εκάστοτε Εθνικών Προσαρτημάτων ή του παραρτήματος Α.3 του [9])

Έτσι, τελικά υπολογίζεται η τιμή για το $q_p^{αντ.εγκ}$.

Ο αντίστοιχος υπολογισμός του $s_p^{αντ.εγκ}$, βασίζεται στη σχέση (5.20) που παρατίθεται ξανά:

$$s_p^{αντ.εγκ} = 0.8 \frac{(60 - d_c)}{30} C_e C_t \times 0.4 \times \kappa - \zeta \left(1 + \left(\frac{\left[\frac{alt+1}{100} \right] \times 100}{917} \right)^2 \right) [kPa]$$

ενώ πιθανότερη τιμή είναι συνήθως $s_p^{βάσης} = s_k$, κατά τον υπολογισμό του κατασκευαστή της βάσης, βάσει της (5.18). Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να είναι ξεκάθαρο ποιες θεωρήσεις έχει κάνει ο κατασκευαστής και σε τι αναφέρεται.

Από τα παραπάνω, εξετάζεται κατά πόσον ισχύουν οι (5.21) και (5.22) ανισότητες.

Τα $W^{\max, \piαν., πίεση}$ και $W^{\max, \piαν., υποπίεση}$, δίνονται από τους κατασκευαστές των Φ/Β πάνελ, συνήθως βάσει του προτύπου IEC 61215 ή του ANSI/UL 1703. Επειδή τις τιμές αυτές, δεν τις επηρεάζει το βάρος του Φ/Β πάνελ, οι εξεταζόμενοι μη σεισμικοί συνδυασμοί και οι αντίστοιχες απαιτήσεις δίνονται ως (βλ. και πίνακα 5-4):

Πίνακας 5-6		
Εξεταζόμενοι μη σεισμικοί συνδυασμοί φόρτισης για τον έλεγχο των Φ/Β πάνελ		
A	B	Γ
$\Sigma_A = 1.05 s_p^{αντ.εγκ} + 1.5 W^{\piαν., πίεση} (q_p^{αντ.εγκ})$	$\Sigma_B = 1.55 s_p^{αντ.εγκ} + 0.9 W^{\piαν., πίεση} (q_p^{αντ.εγκ})$	$\Sigma_\Gamma = 1.5 W^{\piαν., υποπίεση} (q_p^{αντ.εγκ})$
Απαιτήσεις		
$W^{\piαν., πίεση} (q_p^{αντ.εγκ}) > \Sigma_A$	$W^{\piαν., πίεση} (q_p^{αντ.εγκ}) > \Sigma_B$	$W^{\piαν., υποπίεση} (q_p^{αντ.εγκ}) < \Sigma_\Gamma$

Οι τιμές $W^{\piαν., υποπίεση} (q_p^{αντ.εγκ})$ και $W^{\piαν., πίεση} (q_p^{αντ.εγκ})$, βασίζονται στη σχέση $W = q_p^{αντ.εγκ} c_{p,net}$, με τους συντελεστές $c_{p,net}$ να δίνονται από τον πίνακα 5-3. Καθότι, το πιθανότερο είναι να υπάρχουν, ειδικά σε μεγάλα κομμάτια βάσεων, κάποια Φ/Β πάνελ που να βρίσκονται εξ' ολοκλήρου στις δυσμενέστερες ζώνες βάσει του σχήματος 5-4 και του πίνακα 5-3 χρησιμοποιούνται για την αντίστοιχη γωνία κλίσης του πίνακα 5-3, οι δυσμενέστερες περιπτώσεις.

Αν η εξέταση όλων των παραπάνω ανισοτήτων βγάλει αληθή αποτελέσματα, δηλαδή αν ισχύσει η (5.24) τότε σημαίνει ότι ο συνδυασμός βάσης-Φ/Β πάνελ, είναι κατάλληλος.

5.6 Συνολική δράση του ανέμου σε εγκατεστημένα σε κτίρια Φ/Β συστήματα-τρέχον τρόπος αντιμετώπισης

Θεωρείται ευρέως ότι τα επί εδάφους Φ/Β συστήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν, με αρκετή ασφάλεια, σαν ανοιχτά υπόστεγα σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Επίσης, στις

περιπτώσεις όπου τα Φ/Β πάνελ εγκαθίστανται παράλληλα και αρκετά κοντά σε στέγες, τα αντίστοιχα φορτία ανέμου μπορούν να εκτιμηθούν με υπολογισμό των φορτίων που αναμένονται στην εξωτερική επένδυση του αντίστοιχου κτιρίου [16], σε σχετική συμφωνία και πάλι με τον Ευρωκώδικα. Σε περιπτώσεις όμως Φ/Β συστημάτων που βρίσκονται υπό κλίση πάνω σε επίπεδο δώμα (εικόνα 5-5), δεν υπάρχουν αντίστοιχα δομήματα στον Ευρωκώδικα 1 ή στο πρότυπο ASCE 7-05, είτε στο πιο πρόσφατο ASCE 7-10, που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ουσιαστικά, σε αυτές τις περιπτώσεις δεν υπάρχει η δυνατότητα επιλογής αντιπροσωπευτικών τιμών αεροδυναμικών συντελεστών με χρήση Κωδίκων ή Προτύπων που αφορούν στους γενικότερους σχεδιασμούς κατασκευών. Ωστόσο, το Κέντρο Κτιριακών Ερευνών (*Building Research Establishment (BRE)*) της Μεγάλης Βρετανίας αναφέρει στο [17] αεροδυναμικούς συντελεστές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες περιπτώσεις Φ/Β συστημάτων σε επίπεδα δώματα, οι οποίοι εξήχθησαν μετά από δοκιμές που έγιναν από τον *Ολλανδικό Οργανισμό Εφαρμοσμένης Επιστημονικής Έρευνας (TNO)*. Υπάρχει επίσης ήδη από το 2007 το ολλανδικό «προ-πρότυπο» *NVN 7250*, που αφορά στη σχεδίαση συστημάτων ηλιακής ενέργειας ενσωματωμένων σε στέγες, δώματα και προσόψεις. Πρόσφατα επίσης (2012), δημιουργήθηκε δωρεάν λογισμικό υπολογισμού των συντελεστών αυτών, αλλά και των πιέσεων και δυνάμεων που ασκούνται στα τμήματα των συστημάτων αυτών (υπό κλίση, πάνω σε επίπεδο δώμα), με βάση το πρότυπο ASCE 7-05 για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου και μετά από ένα μεγάλο αριθμό δοκιμών σε σήραγγες για τον υπολογισμό των συντελεστών πίεσης [18]. Έπειτα από αυτό, ο σύνδεσμος πολιτικών μηχανικών της πολιτείας της Καλιφόρνιας (*Structural Engineers association of California*), συνέταξε το [19], σε μία προσπάθεια να καλυφθούν τα κενά που υπάρχουν στα πρότυπα ASCE 7-05, ASCE 7-10. Με κατάλληλες μετατροπές, το [19] μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνεργασία με τον Ευρωκώδικα 1, αντί των προτύπων ASCE 7-05 ή ASCE 7-10. Πολύ μεγάλος αριθμός δοκιμών σε σήραγγες έχουν διεξαχθεί και διεξάγονται σε διάφορα εργαστήρια ανά την υφήλιο σε μία προσπάθεια να εξαχθούν οι κατάλληλοι αεροδυναμικοί συντελεστές. Οι πιθανές περιπτώσεις είναι αναρίθμητες και οι δοκιμές αυτές πρέπει να γίνονται για όσο το δυνατό πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις όσον αφορά στο ύψος του κτιρίου, στη συσχέτιση των διαστάσεων του δώματος με το ύψος του κτιρίου, στην ύπαρξη μικρότερων δομημάτων επί του δώματος (περιμετρικά τοιχία, καμινάδες, δορυφορικά «πιάτα» κ.α.) κλπ.



5.7 Τρόποι εγκατάστασης βάσεων Φ/Β σε κτιριακές εγκαταστάσεις

Στις επί εδάφους εγκαταστάσεις, ο τρόπος θεμελίωσης εξαρτάται άμεσα από τον τύπο του εδάφους και έχει ιδιαίτερη σημασία, διότι εν τέλει οι δυνάμεις που ασκούνται σε όλη την κατασκευή, μεταφέρονται στα θεμέλια της βάσης. Συνήθης τρόπος θεμελίωσης για τα εδάφη και τις συνθήκες που συναντιούνται στην Ελλάδα, είναι η έμπηξη εδαφοπασσάλων σε συγκεκριμένο βάθος, που συνοδεύεται σχεδόν πάντα με πλήρωση των αντίστοιχων οπών διάτρησης με τσιμεντένεμα. Μπορεί επίσης να γίνει έμπηξη εδαφοκοχλίων ή να γίνει θεμελίωση με χρήση πεδιλοδοκών. Σε κάθε περίπτωση το έδαφος θεμελίωσης μπορεί να ενισχυθεί τεχνητά, για παράδειγμα με ποιοτικό σκυρόδεμα κατάλληλου όγκου ή με βελτίωση του υπεδάφους. Στις εγκαταστάσεις σε δώμα ο συνήθης τρόπος εγκατάστασης στην Ελλάδα που απεικονίζεται στην εικόνα 5-6 συνοδεύεται σχεδόν πάντα με «αγκύρωση» της βάσης στο δώμα, ιδιαίτερα στα μικρής κλίμακας συστήματα, όπου πολλές φορές ο χώρος εγκατάστασης δεν είναι αρκετός. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν ο χώρος και η γεωμετρία το επιτρέπουν, μπορούν τα Φ/Β πλαίσια να διατηρηθούν σε χαμηλό ύψος (π.χ. “μόνο landscape”) και ενδεχομένως να μπορούν να αποτελέσουν ενιαία κατασκευή (συνήθως με ανεμοφράκτες) (π.χ. προϊόντα εταιρειών *Knubix*, *Renusol*, *Versolsolar*, *Abakus Solar*, *Hilti* κ.α.) (ή/και να συγκρατηθούν με αντίβαρα ώστε να αποφευχθεί έτσι η τρήση του δώματος (*no roof penetration*)). Σε κάθε περίπτωση πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το πρόσθετο βάρος ή ο διαφορετικός τρόπος στήριξης δεν θα δημιουργήσει πρόβλημα στο δώμα, στατικά, αλλά ούτε ενδεχομένως σε υπάρχουσα μόνωση. Πρόσθετες λύσεις σαν ιδιοκατασκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποφυγή τρήσης και αποκατάστασης του δώματος όπως αυτή που απεικονίζεται στην εικόνα 5-7, με αγκύρωση δοκών σε σταθερά τοιχεία από ανθεκτικό υλικό (π.χ. σκυρόδεμα κατάλληλης ποιότητας) που πιθανόν να υπάρχουν και στη συνέχεια σύνδεση της βάσης του Φ/Β με αυτές τις δοκούς. Όλες αυτές οι αποφάσεις (αντίβαρα, ενιαία χαμηλή σε ύψος βάση ή στήριξη μέσω δοκών σε περιμετρικά τοιχεία κλπ.) πρέπει να λαμβάνονται με γνώμονα το ενδεχόμενο πρόσθετο κόστος και πάντα σε συνεργασία με πολιτικό μηχανικό, λόγω των πρόσθετων βαρών που θα δεχτεί το δώμα ή το τοιχείο στήριξης, της ενδεχόμενης ανάγκης ειδικής στατικής μελέτης για την περίπτωση των ιδιοκατασκευών κ.α. Γενικότερα, κατά την εγκατάσταση Φ/Β συστήματος σε δώμα πρέπει να εξετάζεται και η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος σε σεισμική φόρτιση. Συνεργασία με πολιτικό μηχανικό πρέπει να υπάρχει και όταν η αγκύρωση γίνεται (συνήθως με χημικά αγκυρία) όπως στην εικόνα 5-6, σε σχέση με τη φόρτιση του δώματος και της επάρκειας-αντοχής του υποστρώματος του δώματος στα σημεία όπου θα γίνει η αγκύρωση. Επίσης, σε μία τέτοια περίπτωση, είναι αυτονόητη η σωστή επιλογή των χημικών αγκυρίων (δυνατότητα ταυτόχρονης μόνωσης της οπής) και των μεταλλικών συνδέσμων (υλικό, ποιότητα, διάμετρος), του βάθους έμπηξης, της απόστασης μεταξύ των οπών (συνήθως αυτή προκαθορίζεται από τη βάση του Φ/Β) κ.α.



Εικόνα 5-6



Εικόνα 5-7

5.8 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται, μεταξύ άλλων, ένας αλγόριθμος που μπορεί να χρησιμοποιείται προκειμένου να γίνεται κατάλληλη και ασφαλής επιλογή (όσον αφορά στα φορτία ανέμου-χιονιού) του Φ/Β πάνελ και της βάσης στις επί εδάφους εγκαταστάσεις. Η υλοποίηση του αλγορίθμου σε οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού είναι απλή κάνοντας χρήση όσων αναφέρονται στο 5.4. Δόθηκαν επίσης κατευθύνσεις για την υλοποίηση ενός παρόμοιου αλγορίθμου που να αφορά σε Φ/Β συστήματα εγκατεστημένα σε κτίρια, ενώ αναφέρθηκαν και κάποιοι τρόποι εγκατάστασης βάσεων Φ/Β σε κτιριακές εγκαταστάσεις.

Ο κλάδος των Φ/Β εξελίσσεται διαρκώς και μαζί του εξελίσσεται και το κομμάτι που αφορά στην αντοχή όλου του Φ/Β συστήματος σε ισχυρές ανεμοπιέσεις και στον καλύτερο τρόπο αντιμετώπισής τους. Σε αυτήν την εξέλιξη θα παίξουν σημαντικό ρόλο πρότυπα που αναμένονται μελλοντικά, όπως για παράδειγμα το πρότυπο IEC που αναμένεται στο άμεσο

μέλλον: “IEC 62782 Ed. 1.0: Dynamic mechanical load testing for photovoltaic (PV) modules”. Όση όμως προτυποποίηση και να υπάρξει, είναι πολύ σημαντικό η κάθε περίπτωση να αντιμετωπίζεται ξεχωριστά, και σύμφωνα με τις δικές της ιδιαιτερότητες.

5.9 Αναφορές

- [1] I.SCALETCHI, I. VISA & R. VELICU, "Modeling Wind Action on solar tracking pv platforms", *Series I: Engineering Science*, 2010.
- [2] ASCE, "ASCE 7-05:Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", ASCE.
- [3] Κώστας Τρέζος & Νίκος Μαλακάτας, "ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ για τη χρήση των Ευρωκωδίκων EN 1991-1-4: Γενικές δράσεις- Δράσεις Ανέμου", Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2009.
- [4] IEC, "CEI/IEC 61215:2005 Crystalline silicon terrestrial PV module-Design qualification and type approval", IEC, 2005.
- [5] Jerry Ventre & Roger A. Messenger, "Photovoltaic Systems Engineering", 2nd ed., CRC Press, 2004.
- [6] Regan Arndt and Ing Robert Puto, "Basic Understanding of IEC Standard Testing For Photovoltaic Panels", TÜV SÜD Product Service.
- [7] Hans Ruscheweyh & Reiner Windhovel, "Wind loads at solar and photovoltaic modules for large plants", www.scribd.com.
- [8] UL, "UL 1703: Flat-Plate Photovoltaic Modules and Panels", Underwriters Laboratories, 2004.
- [9] CEN, "Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions-Wind actions", CEN, 2005.
- [10] DCLG: London, "Guide to the use of EN 1991-1-4 – Wind Actions", DCLG, 2006.
- [11] Παπαχατζάκης Μιχάλης, "ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΣΤΕΓΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΣΚΕΛΕΤΟ", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2011.
- [12] Chris P.W Geurts & Carine A. van Bentum, "Wind loads on solar energy roofs", HERON Vol. 52 No. 3, 2007.
- [13] CEN, "Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions-Snow Loads", CEN, 2003.

- [14] Κώστας Τρέζος & Νίκος Μαλακάτας, "ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ για τη χρήση των Ευρωκωδίκων EN 1991-1-3: Γενικές δράσεις- Φορτία Χιονιού", Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, 2009.
- [15] Κ. Τρέζος, "Ημερίδα: Σχεδιασμός Κτηρίων Σκυροδέματος με βάση τους Ευρωκώδικες 2 & 8", ΤΕΕ-ΣΠΜΕ-ΟΑΣΠ, Πάτρα, 2011.
- [16] Colleen O'Brien and David Banks, "Wind Load", *SOLARPRO*, June/July 2012.
- [17] P. Blackmore, "Wind loads on roof-based photovoltaic systems", BRE, 2004.
- [18] DNV KEMA, "DNV wind load calculator - Sloped PV Modules on Flat Roofs", Available: <http://www.dnvkema.com/services/ces/solar/>.
- [19] SEAOC Solar Photovoltaic Systems Committee, "WIND DESIGN FOR LOW- PROFILE SOLAR PHOTOVOLTAIC ARRAYS ON FLAT ROOFS", SEAOC, 2012.
- [20] Chris P.W. Geurts & Carine A. van Bentum, "LOCAL WIND LOADS ON ROOF-MOUNTED SOLAR ENERGY SYSTEMS".

6 Το φαινόμενο PID

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται συνοπτικά το φαινόμενο PID (*Potential Induced Degradation*), ένα σχετικά πρόσφατα παρατηρηθέν φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει αισθητή μείωση της απόδοσης του Φ/Β πάνελ. Αν και οι κατασκευαστές Φ/Β κελιών και πάνελ διατείνονται ότι πλέον το φαινόμενο αυτό δεν πρέπει να θεωρείται πρόβλημα όσον αφορά στα πάνελ που κατασκευάζονται και πρόκειται να κατασκευαστούν, αποτελεί σίγουρα πρόβλημα για τους επενδυτές και τους εγκαταστάτες των ήδη εγκατεστημένων συστημάτων στα οποία έχει εμφανιστεί, για αυτό και κρίθηκε σκόπιμη η παρουσίασή του ως αιτία μη κανονικής υποβάθμισης του Φ/Β πάνελ.

6.1 Ποιοτική εξήγηση του φαινομένου σε επίπεδο συστήματος

Το φαινόμενο PID μπορεί πλέον να αντιμετωπιστεί σε επίπεδο Φ/Β κελιού, Φ/Β πάνελ ή συστήματος [1]. Η ιδανική λύση είναι ανθεκτική PID (*PID resistant*) τεχνολογία σε επίπεδο Φ/Β κελιού [2]. Πολλές εταιρείες κατασκευής Φ/Β πάνελ ή κελιών έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν πλέον προϊόντα στα οποία βάσει των ισχυρισμών τους δεν εμφανίζεται το φαινόμενο PID είτε σε επίπεδο κελιών είτε σε επίπεδο πάνελ.

Επομένως στην πραγματικότητα άμεσο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τρόποι αντιμετώπισης και η θεώρηση του φαινομένου σε επίπεδο συστήματος, για τις εγκαταστάσεις που αποτελούνται από Φ/Β πάνελ που έχουν ήδη εμφανίσει ή πρόκειται να εμφανίσουν το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Υπό συνήθεις συνθήκες, θεωρώντας την τάση του Φ/Β κελιού για παράδειγμα 0.5 V ένα Φ/Β πάνελ που αποτελείται από 60 τέτοια κελιά συνδεδεμένα σε σειρά, έχει τάση 30 V. Στα συμβατικά Φ/Β συστήματα ένας αριθμός τέτοιων Φ/Β πάνελ συνδέεται σε σειρά με αποτέλεσμα η συνολική τάση να είναι π.χ. 600 V για την περίπτωση 20 Φ/Β πάνελ συνδεδεμένων σε σειρά. Ο θετικός και ο αρνητικός πόλος της σχηματιζόμενης στοιχειοσειράς (string) συνδέεται στον αντιστροφέα, έτσι ώστε να ισχύει συγκεκριμένα για την παραπάνω περίπτωση: $V_{string}^{+} - V_{string}^{-} = 600 \text{ V}$. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του θετικού πόλου ενός Φ/Β κελιού και της Γης, που θεωρείται ότι βρίσκεται σε μηδενικό δυναμικό, εξαρτάται από το πώς κατανέμει ο αντιστροφέας την τάση σε σχέση με το μηδενικό δυναμικό της Γης. Για παράδειγμα, αντιστροφείς [3] με γαλβανική μόνωση με τον αρνητικό πόλο γειωμένο $V_{string}^{-} = 0 \text{ V}$, θα «δώσουν» τιμή $V_{string}^{+} = +600 \text{ V}$ στο θετικό πόλο της στοιχειοσειράς. Αντίστοιχα για την περίπτωση που είναι ο θετικός πόλος της στοιχειοσειράς γειωμένος, $V_{string}^{+} = 0 \text{ V}$, θα «δοθεί» τιμή $V_{string}^{-} = -600 \text{ V}$ στον αρνητικό πόλο. Ένας αγείωτος αντιστροφέας με γαλβανική μόνωση θα κατανείμει συμμετρικά το δυναμικό: $V_{string}^{+} = +300 \text{ V}$ και $V_{string}^{-} = -300 \text{ V}$. Είναι συνήθης πρακτική στην Ευρώπη να χρησιμοποιούνται TL (*transformerless*) αντιστροφείς (χωρίς μετασχηματιστή) λόγω

υψηλότερου βαθμού απόδοσης οι οποίοι ανάλογα με το σχεδιασμό μπορεί να καταναείμουν την τάση με αισθητή ασυμμετρία π.χ. $V_{string}^{+} = +150 \text{ V}$ και $V_{string}^{-} = -450 \text{ V}$.

Συνεπώς από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ενδέχεται να υπάρχει αισθητή διαφορά δυναμικού μεταξύ του θετικού πόλου ενός Φ/Β κελιού ή Φ/Β πάνελ που βρίσκεται κοντά στον αρνητικό πόλο της στοιχειοσειράς, και της Γης: $V_{ground} - V_{cell}^{+}$ ή $V_{ground} - V_{panel}^{+}$ η οποία μπορεί να πάρει υψηλές τιμές. Πολλές φορές το πλαίσιο του Φ/Β πάνελ γειώνεται για λόγους ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας. Παρόλο που το πλαίσιο είναι από ανοδιωμένο αλουμίνιο και η ανοδίωση λειτουργεί επιφανειακά σαν μονωτικό, ο τρόπος γείωσης χαλά την ανοδίωση στο συγκεκριμένο σημείο, η οποία εξάλλου χαλάει και από την εφαρμογή των σφικτήρων που υπό προϋποθέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το σύνολο της βάσης σαν σύστημα γείωσης. Συνεπώς υπάρχει μία διαφορά τάσης μεταξύ του πλαισίου που πλέον το δυναμικό του σχεδόν ταυτίζεται με αυτό της Γης και του θετικού πόλου του Φ/Β κελιού ή αντίστοιχα πάνελ [1]. Αυτή η διαφορά τάσης έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ρεύματος διαρροής που αυξανόμενη της διαφοράς τάσεως, υγρασίας, θερμοκρασίας κ.α. [1, 4] μπορεί για δεδομένη κατασκευή Φ/Β κελιού και πάνελ να λάβει μεγάλες τιμές.

6.2 Ενδεικτικοί τρόποι αντιμετώπισης

Η μη κανονική υποβάθμιση του Φ/Β πάνελ εξαιτίας του φαινομένου PID είναι αναστρέψιμη σε μεγάλο βαθμό στα κρυσταλλικά Φ/Β πάνελ, όταν ουσιαστικά πρόκειται για απώλεια ηλεκτρονίων των υλικών του Φ/Β πάνελ - φόρτιση (*polarization*). Το φαινόμενο PID δεν παρατηρείται αμέσως, αλλά εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου και η απόδοση μειώνεται σταδιακά.

Σε εγκαταστάσεις που διαθέτουν αντιστροφέα με μετασχηματιστή η γείωση του αρνητικού πόλου της στοιχειοσειράς συνήθως επιλύει το πρόβλημα. Αυτή η λύση όμως δεν είναι χρήσιμη στην περίπτωση των αντιστροφέων χωρίς μετασχηματιστή όπου δεν γειώνεται ο αρνητικός πόλος. Υπάρχουν παρόλα αυτά τρόποι να μετατεθεί η διαφορά τάσης στη στοιχειοσειρά με αποτέλεσμα ακόμα και ο αρνητικός πόλος να αποκτήσει θετική τιμή.

Επιπρόσθετα, μπορεί με κάποιο τρόπο να γίνει αποφόρτιση (*depolarization*) των φορτισμένων πάνελ, γεγονός που επιτυγχάνεται με χρησιμοποίηση του *PV offset box* [3]. Η συσκευή αυτή εφαρμόζει ανάστροφη τάση στη Φ/Β γεννήτρια κατά τη διάρκεια της νύχτας αποφορτίζοντας σταδιακά τα φορτισμένα πάνελ. Επιπρόσθετα, η κατανάλωση της συσκευής είναι πολύ μικρή.

Μία τρίτη αλλά πιο δαπανηρή λύση είναι η χρησιμοποίηση dc βελτιστοποιητών ισχύος ή μικροαντιστροφέων, ο τρόπος λειτουργίας των οποίων θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

6.3 Συμπεράσματα

Το φαινόμενο PID, τείνει σταδιακά να παύει να αποτελεί πρόβλημα για τα Φ/Β πάνελ που κατασκευάζονται και πρόκειται να κατασκευαστούν. Όμως στις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις, το κατά πόσο το πρόβλημα είναι του κατασκευαστή του κελιού, του πάνελ ή του αντιστροφέα είναι υποκειμενικό, δεδομένου ότι πριν από λίγα χρόνια δεν ήταν ευρέως γνωστή η ύπαρξη του φαινομένου παρόλο που ορισμένες εταιρείες κατασκευής Φ/Β πάνελ υψηλής απόδοσης είχαν υιοθετήσει τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος όσον αφορά στο προϊόν τους. Μάλλον όμως θα πρέπει να θεωρηθεί πρόβλημα των κατασκευαστών των Φ/Β κελιών. Το σίγουρο είναι ότι μπορεί να προκαλέσει μείωση στην απόδοση της επένδυσης και επομένως κρίνεται σκόπιμη μία άμεση και αποτελεσματική αντιμετώπισή του σε επίπεδο συστήματος.

6.4 Αναφορές

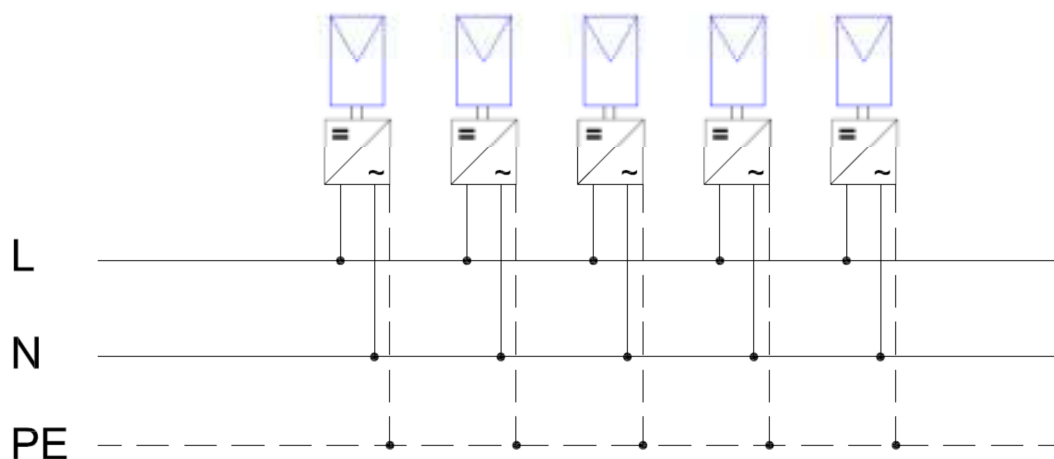
- [1] J. Berghold, O. Frank, H. Hoehne, S. Pingel και T. Geipel, H. Hoehne and J. Berghold, «POTENTIAL INDUCED DEGRADATION OF SOLAR CELLS AND PANELS», 2010.
- [2] Q-cell, «Fraunhofer CSP confirms Q.CELLS modules offer unlimited PID protection», Press release, 2012.
- [3] SMA-technical information, «Potential Induced Degradation (PID)».
- [4] S. Pingel, O. Frank, M. Winkler, S. Daryan και T. Geipel, H. Hoehne and J. Berghold, «POTENTIAL INDUCED DEGRADATION OF SOLAR CELLS AND PANELS,» SOLON SE.

7 Νέες τάσεις Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχει διαδοθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια. Ιδιαίτερα μετά το 2008, η τεχνολογία αυτή εξαπλώθηκε και στην Ελλάδα σε σημαντικό βαθμό, όπου δημιουργήθηκαν οι κατάλληλες προϋποθέσεις για εγκαταστάσεις στην ύπαιθρο άλλα και σε δώματα κτιρίων, στέγες και αλλού. Τα συστήματα αυτά συνήθως εγκαταστάθηκαν και συνδέθηκαν με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και πλέον η παραγόμενη από αυτά ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται σε αυτό. Αντίθετα, τα αυτόνομα (*stand alone*) Φ/Β συστήματα, εγκαθίστανται συνήθως σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή, επιθυμητή ή συμφέρουσα λόγω αναγκών έργων σύνδεσης η σύνδεση ενός δικτύου με το δίκτυο διανομής. Παρακάτω θα παρουσιαστούν δύο σχετικά νέες τάσεις που εμφανίζονται στα Φ/Β συστήματα με την πρώτη να έχει ήδη εμφανιστεί και τη δεύτερη να τείνει να εμφανιστεί και στην Ελλάδα. Η πρώτη τάση έχει να κάνει με τη σχεδίαση και την εγκατάσταση υπό συνθήκες ανομοιογένειας (σκιάσεις, διαφορετικοί προσανατολισμοί κλπ.). Η δεύτερη αφορά στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η συναλλαγή ενέργειας και του οικονομικού κάθε φορά ανταλλάγματος της μεταξύ παραγωγού-καταναλωτή και διαχειριστή του δικτύου διανομής.

7.1 Μικροαντιστροφείς και μετατροπείς συνεχούς-συνεχούς

Οι μικροαντιστροφείς (*micro inverters*) είναι ουσιαστικά -όπως φανερώνει και ο ίδιος ο όρος- αντιστροφείς μικρής κλίμακας. Συνήθως συνδέονται με ένα Φ/Β πλαίσιο και η λειτουργία που επιτελούν είναι αυτή του εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος (*MPP* *ιχνήλαση=MPP tracking*) και της μετατροπής του συνεχούς ρεύματος του πλαισίου σε εναλλασσόμενο. Ένα Φ/Β πλαίσιο εναλλασσόμενου ρεύματος (*AC module*) διαθέτει έναν ενσωματωμένο (ενσωμάτωση κατά την κατασκευή του πλαισίου) μικροαντιστροφέα. Μία ενδεικτική τοπολογία σύνδεσης Φ/Β πλαισίων εναλλασσόμενου ρεύματος ή συνδυασμού Φ/Β πλαισίων - μικροαντιστροφέων, απεικονίζεται στο παρακάτω απλοποιημένο διάγραμμα, σαν τμήμα ενός μονοφασικού συστήματος.



Σχήμα 7-1

Οι μετατροπείς συνεχούς-συνεχούς (*DC-DC converters*) αποκαλούνται πολλές φορές και *dc* βελτιστοποιητές ισχύος (*dc power optimizers*). Η φιλοσοφία κατασκευής τους θα μπορούσε να θεωρηθεί κοινή, αλλά γενικά υπάρχουν διαφοροποιήσεις από εταιρεία σε εταιρεία. Εκτελούν σε επίπεδο Φ/Β πάνελ τον εντοπισμό του σημείο μέγιστης ισχύος¹⁵, αλλά συνήθως σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται και ένας κεντρικός “αντιστροφέας” ο οποίος όμως δεν εκτελεί εντοπισμό του σημείο μέγιστης ισχύος απλά χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της συνεχούς ισχύος σε εναλλασσόμενη.

Στο σχήμα 2, απεικονίζεται ένας ενδεικτικός τρόπος λειτουργίας των συστημάτων αυτών. Το σύστημα αυτό θεωρείται ότι αποτελείται από μία στοιχειοσειρά (*string*) όπως συμβαίνει αρκετές φορές σε μικρής κλίμακας συστήματα και θεωρείται επίσης για απλοποίηση ότι δεν υπάρχουν απώλειες.

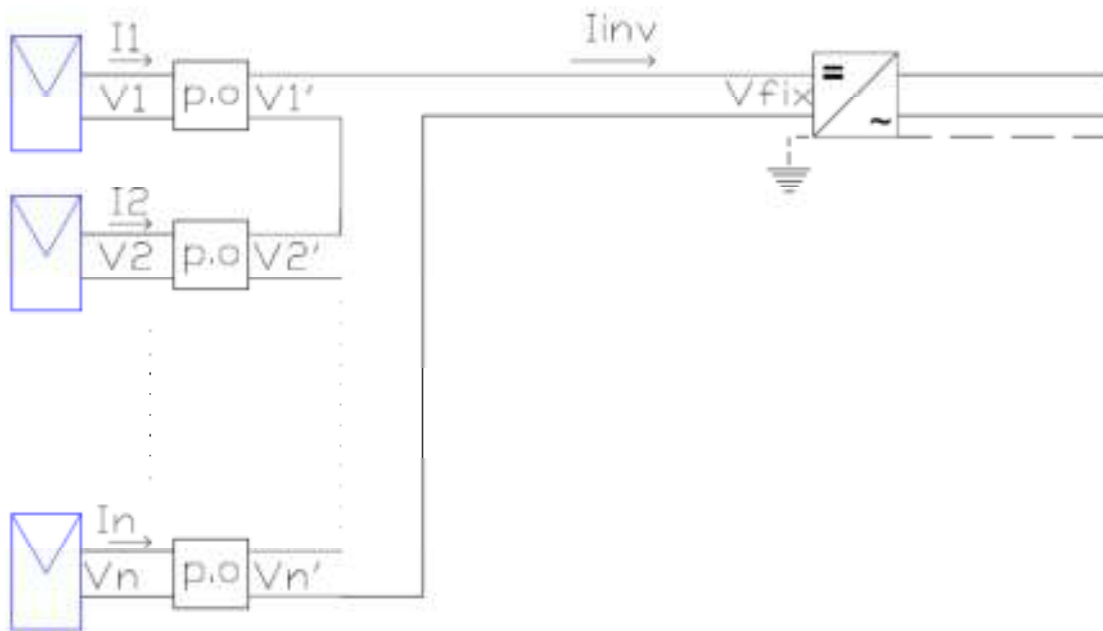
Η συνολικά διαθέσιμη *dc* ισχύς του συστήματος είναι:

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^n I_i V_i \quad (7.1)$$

με κάθε Φ/Β πάνελ να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, στην περίπτωση που αυτό έχει εκτιμηθεί σωστά από τον βελτιστοποιητή ισχύος (*p.o*). Ο αντιστροφέας «απαιτεί» συνήθως συγκεκριμένη σταθερή τάση V_{fix} για να λειτουργήσει η οποία όμως «επιβάλλεται» από τους βελτιστοποιητές ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, ο κάθε βελτιστοποιητής ισχύος δίνει τάση στην έξοδό του η οποία υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_i' = \frac{V_i I_i}{\left(\frac{P_{tot}}{V_{fix}} \right)} \quad (7.2)$$

¹⁵ Όπου αναφέρεται η MPP ιχνηλάτηση θεωρείται ότι ο ιχνηλάτης εντοπίζει το καθολικό σημείο μέγιστης ισχύος και δεν «εγκλωβίζεται» σε κάποιο τοπικό μέγιστο.



Σχήμα 7-2

Θεωρώντας ότι ο συντελεστής απόδοσης του βελτιστοποιητή ισούται με τη μονάδα, το ρεύμα στην έξοδό του αρά και το ρεύμα στην είσοδο του αντιστροφέα, δίνεται από τη σχέση:

$$I_{inv} = \frac{V_i I_i}{V'_i} \quad (7.3)$$

επομένως τελικά η συνολική dc ισχύς στην είσοδο του αντιστροφέα είναι:

$$V_{fix} \times I_{inv} \stackrel{(7.3)}{=} V_{fix} \times \frac{V_i I_i}{V'_i} \stackrel{(7.2)}{=} V_{fix} \times \frac{P_{tot}}{V_{fix}} = P_{tot}$$

Σε άλλη περίπτωση είναι δυνατό οι μετατροπείς συνεχούς-συνεχούς, να λειτουργούν σε αρχική φάση περισσότερο σαν αισθητήρες: στέλνουν χαρακτηριστικές τιμές τάσης, ρεύματος και θερμοκρασίας για κάθε πάνελ. Η MPP ιχνηλάτηση εκτελείται για κάθε πάνελ κάπου κεντρικά από μία «έξυπνη μονάδα» και στη συνέχεια η απαιτούμενη πληροφορία μεταφέρεται από τη μονάδα πίσω στους μετατροπείς συνεχούς-συνεχούς οι οποίοι «φροντίζουν» προκειμένου το Φ/Β πάνελ στο οποίο είναι εγκατεστημένοι να «βλέπει» τέτοια αντίσταση ώστε να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος και ταυτόχρονα το εξαγόμενο από αυτούς ρεύμα να ισούται με το μέγιστο δυνατό ρεύμα της στοιχειοσειράς. Σε αυτήν την περίπτωση το όλο σύστημα συνεργάζεται με έναν συμβατικό MPP ιχνηλάτη στοιχειοσειράς (για παράδειγμα αν ένας αντιστροφέας στοιχειοσειράς έχει δύο στοιχειοσειρές με ξεχωριστό ιχνηλάτη η κάθε μία, τότε το σύστημα μπορεί αν είναι επιθυμητό να εγκατασταθεί μόνο στη μία στοιχειοσειρά). Ο ιχνηλάτης δεν δυσκολεύεται να ανιχνεύσει το σημείο μέγιστης ισχύος που αντιστοιχεί στο άθροισμα των μεγίστων τιμών ισχύος των Φ/Β πάνελ.

Σε μία απλούστερη περίπτωση ο μετατροπέας συνεχούς-συνεχούς εκτελεί MPP ιχνηλάτηση σε επίπεδο Φ/Β πάνελ και στην έξοδό του η τάση έχει τέτοια τιμή ώστε το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα να προσαρμόζεται με διάφορους τρόπους στο θεωρούμενο μέγιστο δυνατό ρεύμα της στοιχειοσειράς. Πολλές φορές αυτού του είδους οι μετατροπείς μπορούν να εγκατασταθούν μόνο στα Φ/Β πάνελ που προκαλούν το πρόβλημα της ανομοιογένειας π.χ. λόγω τακτικών σκιάσεων γεγονός που μπορεί να μειώσει το αντίστοιχο κόστος. Από την άλλη, απαιτείται η ύπαρξη συμβατικού ιχνηλάτη, ενώ συνήθως δεν υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου και παρακολούθησης σε επίπεδο Φ/Β πάνελ, όπως υπάρχει στις δύο παραπάνω περιπτώσεις.

Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν ιδιαιτερότητες μεταξύ διαφόρων τύπων dc βελτιστοποιητών ισχύος και πολλές φορές υπάρχουν περιορισμοί όσων αφορά στους δυνατούς συνδυασμούς Φ/Β πάνελ, βελτιστοποιητών και συνεργαζόμενων συμβατικών αντιστροφών. Κάθε κατασκευαστής οφείλει να παρέχει επαρκείς πληροφορίες για το εύρος των Φ/Β πάνελ ή των συνεργαζόμενων αντιστροφών που υποστηρίζει το προϊόν του καθώς και τις απαραίτητες σχεδιαστικές κατευθύνσεις.

Η νέα τάση που παρατηρείται στην αγορά, είναι η ενσωμάτωση των μετατροπέων συνεχούς-συνεχούς μαζί με το junction box στο Φ/Β πάνελ κατά την κατασκευή του και η πώληση του Φ/Β πάνελ σαν σύνολο. Για το σκοπό αυτό πολλοί κατασκευαστές Φ/Β πάνελ έχουν συνεργασία με αντίστοιχους κατασκευαστές dc βελτιστοποιητών ισχύος.

Κάποιες φορές αυτά τα κατανεμημένα ηλεκτρονικά ισχύος (μικροαντιστροφείς και dc βελτιστοποιητές ισχύος) μπορούν να χρησιμοποιούνται και σε ομάδες των δύο ή ενδεχομένως και περισσότερων Φ/Β πάνελ, αλλά η συνήθης πρακτική είναι να τοποθετείται ένα τεμάχιο ανά Φ/Β πάνελ. Σε κάθε περίπτωση προσφέρεται η δυνατότητα η MPP ιχνηλάτηση να γίνεται ανά ένα ίσως και ανά δύο-τρία Φ/Β πάνελ, σε αντίθεση με περιπτώσεις όπου γίνεται MPP ιχνηλάτηση σε μεγάλες ομάδες Φ/Β πάνελ, όπως στις περιπτώσεις των κεντρικών αντιστροφών (*central inverters*). Ακόμα και στις περιπτώσεις των αντιστροφών στοιχειοσειράς οι οποίοι ενδεχομένως να διαθέτουν και χωριστό MPP ιχνηλάτη ανά στοιχειοσειρά, η MPP ιχνηλάτηση γίνεται συνήθως σε ομάδες περισσότερων Φ/Β πάνελ.

Οι μικροαντιστροφείς και οι μετατροπείς συνεχούς-συνεχούς χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων σε περιπτώσεις αισθητών σκιάσεων και γενικότερης ανομοιογένειας και (τουλάχιστον σε αυτές τις περιπτώσεις) παρέχουν συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα που σχεδιάζονται με κεντρικούς αντιστροφείς, αντιστροφείς στοιχειοσειράς κλπ. Επιπρόσθετα, τις περισσότερες φορές προσφέρουν τη δυνατότητα ελέγχου και παρακολούθησης σε επίπεδο Φ/Β πάνελ και όχι σε επίπεδο στοιχειοσειράς ή γενικά συνδυασμού Φ/Β πάνελ. Παράλληλα αυξάνεται η ασφάλεια καθώς πολλές φορές σε περίπτωση βλάβης η τάση περιορίζεται σε τιμή λιγότερη των 120V στο συνεχές. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται το αυξημένο κόστος εξοπλισμού, αν και οι εταιρείες κατασκευής τους θεωρούν ότι το κόστος αυτό εν μέρει αντισταθμίζεται από αντίστοιχη μείωση των απαιτούμενων καλωδιώσεων. Επίσης φαίνεται ότι αυξάνεται η πιθανότητα βλάβης στο σύστημα (*probability of system failure*), λόγω περισσότερων συστατικών μερών, αν και τις περισσότερες φορές οι βλάβες αυτές δεν είναι της ίδιας καθοριστικής σημασίας

με τα συμβατικά συστήματα. Πέραν τούτου, πολλές φορές ο συνολικός βαθμός απόδοσης συνεχούς σε εναλλασσόμενο είναι χαμηλότερος σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα αν και υπάρχει διαρκής βελτίωση και σε αυτό το κομμάτι. Για παράδειγμα, αν συμβολιστεί με $\nu_{s.i.}^{eu}$ ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης (*european efficiency*) ενός συμβατικού αντιστροφέα στοιχειοσειράς, μπορεί να ισχύει π.χ. $\nu_{s.i.}^{eu} = 0.97$. Αντίστοιχα για την περίπτωση ενός dc βελτιστοποιητή ισχύος με ενσωματωμένο MPP ιχνηλάτη μπορεί π.χ. να είναι (υπό τις ίδιες συνθήκες δοκιμής) $\nu_{d-d.c}^{eu} = 0.985$, ενώ για τον απλό μετατροπέα της συνεχούς ισχύς σε εναλλασσόμενη, ισχύει για παράδειγμα $\nu_{dc-ac}^{eu} = 0.975$. Από τις παραπάνω τιμές, είναι φανερό ότι θεωρώντας μηδενικές απώλειες στις καλωδιώσεις, ισχύει:

$$\nu_{dc-ac}^{eu} \times \nu_{d-d.c}^{eu} \approx 0.96 \Rightarrow \nu_{dc-ac}^{eu} \times \nu_{d-d.c}^{eu} < \nu_{s.i.}^{eu}$$

Αντίστοιχα, στην περίπτωση μικροαντιστροφέα, μία χαρακτηριστική τιμή υπό τις αντίστοιχες συνθήκες δοκιμής είναι $\nu_{mi}^{eu} = 0.95$. Οι διαφορές πάντως στο βαθμό απόδοσης είναι μικρές και μπορούν να αντισταθμιστούν από τα όποια πλεονεκτήματα.

Συμπερασματικά και με βάση τη τρέχουσα τεχνολογία φαίνεται ότι σε περιπτώσεις συντηρητικής σχεδίασης για την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω σκιάσεων, ελαχιστοποίησης του mismatching μέσω ενδεχομένως και κατάλληλης ταξινόμησης (*sorting*) των Φ/Β πάνελ (με βάση το μέγιστο ρεύμα συνήθως) και τακτικής συντήρησης (καθαρισμός, εντοπισμός βλαβών) η οικονομικότερη λύση των συμβατικών αντιστροφέων είναι προτιμητέα. Όσο αυξάνει η ανομοιογένεια μεταξύ των Φ/Β πάνελ του συστήματος, πρέπει να αυξάνεται αντίστοιχα και ο αριθμός των ξεχωριστών ομάδων Φ/Β πάνελ που διαθέτουν ανεξάρτητο MPP ιχνηλάτη. Τόσο οι μετατροπείς συνεχούς όσο και οι μικροαντιστροφείς προσφέρουν υψηλή ευελιξία ιδιαίτερα κατά τη σχεδίαση μικρής κλίμακας Φ/Β συστημάτων με προβλήματα σκίασης και γενικότερης ανομοιογένειας (π.χ. διαφορετικός προσανατολισμός) σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα όπου πολλές φορές υπάρχει περιορισμός στις ομάδες Φ/Β πάνελ με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά η κάθε μία στις οποίες μπορεί να «σπάσει» το σύστημα και να γίνεται χωριστός εντοπισμός του σημείου μέγιστης ισχύος (για παράδειγμα δεν είναι σωστή πρακτική η σύνδεση ίδιων Φ/Β πάνελ με διαφορετικό προσανατολισμό στην ίδια στοιχειοσειρά που διαθέτει το δικό της MPP ιχνηλάτη).

7.2 Net metering

Το τρέχον πλαίσιο Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα προβλέπει ότι ένα συνδεδεμένο στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας Φ/Β σύστημα συνδέεται απευθείας με το δίκτυο και όλη η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αγοράζεται από τη ΔΕΔΔΗΕ. Στην περίπτωση των εγκαταστάσεων σε κτίρια τα οποία διαθέτουν μετρητή εισερχόμενης ενέργειας από το δίκτυο, εγκαθίσταται μετρητής εξερχόμενης ενέργειας για τη μέτρηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το εγκατεστημένο στο κτίριο Φ/Β σύστημα. Ο συμψηφισμός που γίνεται είναι οικονομικός με βάση την τιμή στην οποία πουλά ο παραγωγός από τη μία και ο διαχειριστής του δικτύου από την άλλη.

Στην περίπτωση των αμφίδρομων Φ/Β συστημάτων (*grid interactive pv systems*) το σύστημα αποτελεί μέρος του δικτύου ενεργειακής τροφοδότησης του κτιρίου. Η περίσσεια της παραγόμενης ενέργειας είτε διαβιβάζεται στο δίκτυο είτε αποθηκεύεται σε συσσωρευτές (αν υπάρχουν) για μελλοντική χρήση. Όταν το σύστημα αδυνατεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες της κατανάλωσης, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από το δίκτυο ή από τους συσσωρευτές αν επαρκεί, είτε από άλλη πηγή ενέργειας. Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται συμψηφισμός ενέργειας με χρήση μετρητών διπλής ενέργειας. Ο συμψηφισμός αυτός της παραγόμενης με την καταναλισκόμενη ενέργεια αποκαλείται *net metering*. Τέτοιου τύπου συμφωνίες μεταξύ των καταναλωτών-παραγωγών και του διαχειριστή προβλέπουν για παράδειγμα ότι αν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου καταμέτρησης η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση, το πλεόνασμα πιστώνεται στο επόμενο τιμολόγιο χρέωσης. Αν αντίθετα η παραγωγή είναι μικρότερη από την κατανάλωση, ο καταναλωτής-παραγωγός χρεώνεται μόνο τη διαφορά. Αν με το κλείσιμο ενός έτους από τη σύνδεση του συστήματος παραγωγής υπάρχει τελικά περίσσεια ενέργειας τότε ανάλογα με την πολιτική που ακολουθείται αυτή η περίσσεια πληρώνεται ή όχι στον παραγωγό-καταναλωτή και η διαδικασία ξεκινά από την αρχή για το επόμενο έτος. Σε κάθε περίπτωση ο συμψηφισμός είναι ενεργειακός και ανάλογα με την πολιτική που ακολουθείται γίνεται η χρέωση ή πίστωση στον αντίστοιχο λογαριασμό του καταναλωτή-παραγωγού.

7.3 Βιβλιογραφία

- [1] The German Energy Society, "Planning and installing Photovoltaic Systems: A guide for Installers, Architects and Engineers", Earthscan, 2009.
- [2] C.Deline and B.Marion, J.Granata and S.Gonzalez, "A Performance and Economic Analysis of Distributed Power Electronics in Photovoltaic Systems", NREL, 2011.
- [3] ET Solar, "AC Module Installation Guide Content for ET-P660250AC". 2012.
- [4] AUO, "AC UNISON SOLAR POWER SYSTEM INSTALLATION GUIDE", 2012.
- [5] Solaredge, "Application Note SolarEdge Fixed String Voltage, Concept of Operation", 2010.
- [6] Tigo Energy, "IMPEDANCE MATCHING The Science Behind the Tigo Energy Maximizer Series Product (MM-ES)".
- [7] «ΠΡΑΣΙΝΟ ΣΠΙΤΙ & ΚΤΙΡΙΟ» [Ηλεκτρονικό]. Available:
http://www.4green.gr/data/fotovoltaika/news/preview_news/96863.asp.
- [8] ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ, «Νομοθετική κατοχύρωση του net-metering στα φωτοβολταϊκά», 2013.