



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΒΙΟΤΕΧΝΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Α. Δέρβος

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΒΙΟΤΕΧΝΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Α. Δέρβος

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Απριλίου 2014.

.....
Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Απρίλιος 2014

.....

Νικόλαος Α. Δέρβος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νικόλαος Α. Δέρβος, 2014
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη μιας διασυνδεδεμένης, με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ισχύος 32.4 kWp. Η εγκατάσταση πραγματοποιείται στην ταράτσα βιοτεχνικού κτιρίου διαστάσεων 23x27 μέτρων, που βρίσκεται στην περιοχή της Παλλήνης. Στόχος είναι η μείωση των δαπανών κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας του κτιρίου, μέσω της παροχής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο διανομής. Το κτίριο διαθέτει και ευαίσθητα φορτία που σχετίζονται με ηλεκτρονικό εξοπλισμό βάσης δεδομένων, που είναι ενεργός όλο το 24ωρο. Για την προστασία του ευαίσθητου φορτίου της εγκατάστασης από απώλεια της παροχής ισχύος από το δίκτυο διανομής, θα εγκατασταθεί σύστημα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS), σε συνδυασμό με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (H / Z).

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα, καθώς και στοιχεία του ηλιακού δυναμικού. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται το σύστημα Ηλίου-Γης και στοιχεία για την ηλιακή ακτινοβολία. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της φωτοβολταϊκής μετατροπής. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται το φαινόμενο γήρανσης (PID) των φωτοβολταϊκών πλαισίων και αναλύονται οι παράγοντες που επιδρούν στο φαινόμενο. Στο πέμπτο κεφάλαιο σχεδιάζεται η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Στο έκτο κεφάλαιο σχεδιάζεται το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας της εγκατάστασης με τη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρας. Στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζεται η εγκατάσταση συστήματος αδιαλείπτου παροχής ισχύος (UPS) και ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, για την απρόσκοπτη τροφοδοσία του ευαίσθητου φορτίου (ηλεκτρονικός εξοπλισμός βάσης δεδομένων) του κτιρίου, στην περίπτωση απώλειας της παροχής ισχύος από το δίκτυο διανομής. Στο όγδοο κεφάλαιο αξιολογείται οικονομικά η επένδυση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Λέξεις Κλειδιά

Διασυνδεδεμένη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, αδιάλειπτη παροχή ισχύος, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, αντικεραυνική προστασία, γήρανση πλαισίων.

Abstract

The purpose of the present study is to design a grid-tied photovoltaic power plant of 32.4 kWp. The power plant is installed on the roof of a factory building with dimensions 23x27 meters, located in Pallini. The aim is to reduce the cost of electricity consumption of the building, through the supply of the produced electrical energy to the power grid. The building features critical load associated with database electronic equipment, which is active 24 hours a day. Uninterrupted power supply (UPS), in conjunction with a generator set was installed for the protection of the critical load in case of grid power loss.

The first chapter describes the total installed capacity of photovoltaics, as well as elements of the solar potential in Greece. The second chapter describes the Sun - Earth system and data on solar radiation. The third chapter describes the photovoltaic effect and factors affecting the performance of the photovoltaic conversion. The fourth chapter describes the potential induced degradation (PID) of photovoltaic panels and analyzes the factors that affect the phenomenon. The design of the photovoltaic power plant takes place in the fifth chapter. The lightning protection system is designed in the sixth chapter, with the rolling sphere method. The seventh chapter deals with the installation of uninterruptible power supply (UPS) and generator set, for the power supply of the critical load (database electronic equipment) of the building, in case of grid power loss. The economic assessment of the photovoltaic investment takes place in the eighth chapter.

Key Words

Grid-tied photovoltaic system, uninterrupted power supply, power generator, lightning protection system, potential induced degradation.

Ευχαριστίες

Δόξα Πατρί και Υιώ και Αγίω Πνεύματι. Και νυν και αεί και εις τους αιώνας των αιώνων.

Αμήν. Ευχαριστώ Τον Παντοδύναμο ΘΕΟ για τη φώτιση και το μέγα έλεος.

Ευχαριστώ θερμά τον αξιότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π., κ.Δέρβο Κωνσταντίνο, επιβλέπων της διπλωματικής εργασίας, για την πολύτιμη καθοδήγηση και τις συμβουλές του.

Ευχαριστώ πολύ και τον συνάδελφο κ.Κεντρώτη Κωνσταντίνο για την υποστήριξη του.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΗΛΙΟΥ-ΓΗΣ & ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	18
2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	19
2.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	24
2.2.1 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	25
2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	27
2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	28
2.5 ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ	32
3.1 ΔΙΟΔΟΣ ΕΠΑΦΗΣ p-n - ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΦΡΑΓΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	33
3.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	36
3.3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΦΩΤΙΖΟΜΕΝΗΣ ΙΔΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΔΟΥ p-n.....	39
3.4 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΦΩΤΙΖΟΜΕΝΗΣ ΜΗ ΙΔΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΔΟΥ p-n	40
3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	43
3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	44
3.7 ΔΙΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	46
3.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ R_s – ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ R_{SHUNT} ΣΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V	47
3.9 ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ.....	49
3.10 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	53
3.10.1 ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	53
3.10.2 ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	53

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

3.10.3 ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ (RIBBON)	54
3.10.4 ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΜΟΡΦΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (a-Si)	54
3.11 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	55
3.12 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	57
3.13 ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΕΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ (PID).....	59
4.1 ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ.....	60
4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	62
4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ (ARC) SiN _x	66
4.4 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΑΣΗ.....	68
4.5 ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ- ΤΕΣΤ ΔΟΚΙΜΩΝ	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	72
5.1 ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ.....	73
5.1.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ α ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	75
5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΥΣΜΕΝΕΣΤΕΡΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΥΨΟΥΣ β ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ.....	76
5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑ	77
5.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ	77
5.3.2 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΦΒ ΠΕΔΙΟΥ	79
5.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑ	83
5.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΦΒ ΥΠΟΠΕΔΙΟΥ ΥΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΚΡΑΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ	84
5.4.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΥΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	86

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

5.4.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΥΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	87
5.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ($\sigma_{\Sigma\Lambda\Phi}$)	89
5.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	93
5.7 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	95
5.7.1 DC ΤΜΗΜΑ (ΦΒ ΠΕΔΙΟΥ)	95
5.7.2 AC ΤΜΗΜΑ (ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑΣ – ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ PILLAR)	99
5.7.3 AC ΤΜΗΜΑ (ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ PILLAR – ΜΕΤΡΗΤΗΣ Δ.Ε.Η.)	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	104
6.1 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΕΡΑΥΝΟΥ	105
6.2 ΒΗΜΑΤΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΕΡΑΥΝΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΝΝΕΦΟΥ ΚΑΙ ΓΗΣ ..	108
6.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΙΩΣΗΣ.....	111
6.4 ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	115
6.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΛΙΟΜΕΝΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ.....	115
6.4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΓΩΓΩΝ ΚΑΘΟΔΟΥ	118
6.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ S.....	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΣΤΗΜΑ UPS & Η/Ζ.....	122
7.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΤΙΡΙΟΥ	123
7.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ UPS.....	125
7.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥ ΖΕΥΓΟΥΣ (Η / Ζ).....	127
7.4 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΠΗΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	128

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ	132
8.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	133
8.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΚΟΧΡΕΟΛΥΣΙΩΝ ΔΑΝΕΙΟΥ.....	133
8.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ.....	134
8.1.3 ΦΟΡΟΣ	134
8.1.4 ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΑΜΕΙΑΚΕΣ ΡΟΕΣ (ΚΤΡ).....	134
8.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ	134
8.2.1 ΚΑΘΑΡΗ ΠΑΡΟΥΣΑ ΑΞΙΑ (ΚΠΑ).....	135
8.2.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (IRR).....	136
8.2.3 ΕΝΤΟΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ (ΕΠΑ)	136
8.2.4 ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (LCOE).....	137
8.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ.....	137
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	141

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίγνωση της ανάγκης για αιεφόρο ανάπτυξη γίνεται όλο και μεγαλύτερη. Η ηλιακή ενέργεια είναι σχεδόν ο μοναδικός, και σίγουρα ένας ανεπτυγμένος τρόπος παραγωγής ενέργειας για αυτή την αιεφόρο ανάπτυξη. Αυτό θα είναι δυνατό κυρίως μέσω της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών. Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία αποτελεί μια νέα μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι φιλική στο περιβάλλον και έχει το πλεονέκτημα της επεκτασιμότητας. Είναι μοναδική για πολλές εφαρμογές υψηλής κοινωνικής αξίας, όπως η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε ανθρώπους που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές. Τα τελευταία χρόνια έχει γνωρίσει μια άνευ προηγουμένου έκρηξη ανάπτυξης. Παρέχει ενέργεια σε κατοικίες, εμπορικά κτίρια και στο δημόσιο δίκτυο διανομής μέσω των φωτοβολταϊκών πάρκων, τα οποία έχουν κατασκευαστεί σε όλο τον κόσμο.

Προβλέψεις δείχνουν ότι η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά θα συνεισφέρει μόνο ένα μικρό ποσοστό ως το 2030. Για την αύξηση του ποσοστού απαιτείται η εξεύρεση νέων τρόπων αποθήκευσης ενέργειας. Η σημερινή ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών έχει γίνει δυνατή μέσα από τη δημόσια στήριξη, κατευθυνόμενη από την κοινή γνώμη, η οποία έχει οδηγήσει τις κυβερνήσεις σε δαπάνη σημαντικών ποσών για την επιδότηση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Ωστόσο, αυτά τα χρήματα αποτελούν μια επένδυση και είναι ένας τρόπος ανάπτυξης μέσω της αύξησης της απασχόλησης σε μονάδες παραγωγής και στις εγκαταστάσεις. Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία διαθέτει μια πανοπλία νέων τεχνολογιών που εξασφαλίζουν μια συνεχή πρόοδο στη μείωση του κόστους και χρειάζεται συνεχή υποστήριξη της έρευνας.

Η Ελλάδα παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, που κυμαίνεται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος μεταξύ 1400-1800 kWh / m² year σε οριζόντιο επίπεδο. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια μορφή ενέργειας με σχεδόν σταθερή και προβλέψιμη ένταση στη διάρκεια του έτους. Στον πίνακα 1.1 δίνονται μέσες τιμές για τη μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία [kWh/m².mo] στο οριζόντιο επίπεδο για διάφορες περιοχές της Ελλάδας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010). Επίσης, ο χάρτης (σχήμα 1.1) αναπαριστά την ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kWh] από ένα σύστημα ισχύος 1kWp με φωτοβολταϊκά πλαίσια που έχουν τη βέλτιστη κλίση. (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/countries/countries-europe.htm>).

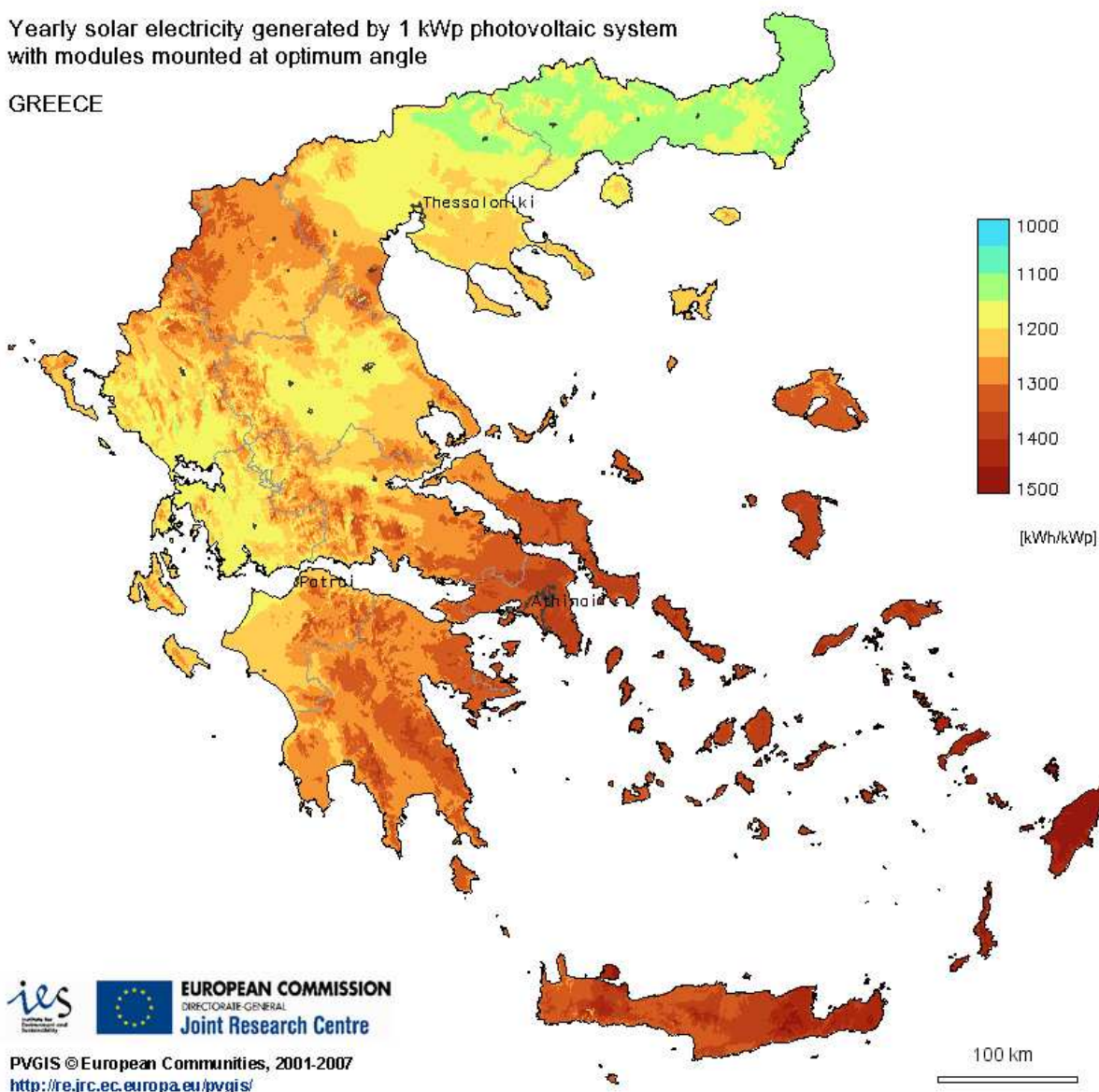
Πίνακας 1.1. Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/m².mo].

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	63,0	79,0	117,7	154,3	195,4	214,0	222,4	202,7	152,6	109,0	70,7	55,7
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	63,3	77,7	118,9	152,7	190,4	207,4	214,5	198,6	156,0	111,1	68,1	54,4
Αγρίνιο	63,5	78,3	119,4	148,4	189,9	214,1	224,2	200,3	151,3	109,8	69,8	55,1
Αγχιάλος	61,3	74,3	112,5	149,2	189,7	212,7	217,4	195,1	146,8	98,8	63,1	51,5
Αλεξανδρούπολη	50,7	68,9	107,3	141,8	182,8	205,8	211,6	192,3	144,2	99,4	57,8	43,7
Αλιάρτος	51,0	70,0	114,0	158,0	206,0	216,0	220,0	204,0	153,0	102,0	66,0	49,0
Ανδραβίδα	68,4	83,4	128,4	159,5	200,2	220,6	228,4	205,5	156,1	115,6	75,2	60,1
Αραξος	62,6	78,6	119,7	155,6	196,1	210,9	217,8	197,6	152,4	110,2	69,4	54,6
Αργος (Πυργέλα)	68,7	83,6	127,7	159,5	202,5	220,6	229,0	206,4	157,2	115,5	74,8	59,2
Αργοστόλι	65,0	80,0	124,9	157,3	204,3	219,4	226,1	203,1	155,6	112,6	72,6	56,1
Ζάκυνθος	64,2	77,6	110,1	158,8	190,8	200,1	218,5	203,8	154,0	104,3	65,4	52,8
Άρτα	65,5	79,7	120,4	149,1	190,2	211,2	218,1	196,4	150,6	110,0	69,5	56,2
Ηράκλειο	65,6	81,6	125,0	166,5	207,3	222,4	227,1	207,0	163,0	117,3	78,6	61,2
Θεσσαλονίκη	52,6	67,5	103,2	140,7	179,1	198,6	209,5	184,7	136,7	91,4	56,6	45,5
Ιεράπετρα	73,0	89,0	137,0	174,0	210,0	220,0	224,0	205,0	165,0	125,0	89,0	69,0
Ιωάννινα	51,8	66,4	105,2	134,9	178,3	202,1	212,0	190,3	136,5	96,1	57,6	45,1
Καλαμάτα	68,2	82,3	126,1	156,2	198,7	216,0	222,0	200,9	154,9	114,5	75,2	59,3
Καστοριά	57,6	71,3	111,2	141,1	173,6	201,8	206,3	185,5	138,5	97,0	60,0	47,7
Κέρκυρα	57,7	73,5	116,7	149,9	195,4	213,6	221,0	197,8	148,2	103,1	64,4	50,7
Κομοτηνή	50,0	65,0	105,0	145,0	188,0	209,0	215,0	193,0	145,0	99,0	58,0	45,0
Κόνιτσα	53,0	65,0	112,0	138,0	190,0	200,0	216,0	194,0	141,0	99,0	63,0	50,0
Κόρινθος (Βέλο)	65,4	82,8	123,4	157,9	201,7	218,3	223,2	201,9	154,2	111,9	72,0	55,2
Κύθηρα	68,0	81,0	127,0	161,0	210,0	220,0	223,0	204,0	160,0	117,0	78,0	60,0
Λαμία	59,4	73,1	113,9	150,5	188,8	210,3	214,1	193,4	145,5	100,3	65,3	52,1
Λάρισα	55,1	71,4	112,1	151,1	190,9	210,8	215,8	194,3	145,9	97,8	61,2	47,8
Λήμνος	51,1	69,6	112,3	154,3	199,5	215,3	220,9	198,5	150,8	104,6	61,3	46,0
Μεθώνη	62,0	78,0	125,0	155,0	207,0	215,0	220,0	199,0	157,0	116,0	77,0	57,0
Μήλος	56,0	67,0	120,0	175,0	213,0	223,0	226,0	205,0	164,0	112,0	77,0	52,0
Μυτιλήνη	52,0	70,0	113,0	156,0	209,0	219,0	223,0	201,0	156,0	109,0	67,0	50,0
Νάξος	60,3	77,0	122,6	161,2	204,7	220,4	224,5	204,8	159,1	115,9	73,7	55,6
Πάρος	60,0	80,0	125,0	168,0	211,0	220,0	223,0	202,0	160,0	117,0	75,0	58,0
Πάτρα	55,0	72,0	124,0	147,0	200,0	215,0	218,0	197,0	153,0	107,0	66,0	53,0
Πύργος	68,4	83,1	127,5	157,9	200,4	215,6	223,8	202,1	155,0	115,9	75,5	59,3
Ρέθυμνο	62,0	81,0	119,0	164,0	211,0	218,0	223,0	204,0	160,0	106,0	81,0	58,0
Ρόδος	69,9	85,1	130,8	164,0	203,0	217,2	225,1	204,3	158,9	120,2	79,2	61,2
Σάμος	64,9	82,1	126,7	162,5	206,8	224,9	230,6	209,6	163,7	120,5	78,6	58,5
Σέρρες	50,8	68,0	105,7	141,0	180,5	202,8	209,7	187,7	140,8	94,7	56,5	43,7
Σητεία	66,5	83,0	128,4	165,2	207,4	223,2	227,1	207,5	163,7	119,3	80,4	61,9
Σκύρος	51,2	69,1	109,9	153,3	197,2	214,2	219,7	198,8	151,7	102,5	62,9	47,7
Σούδα	65,0	81,7	130,7	166,5	208,5	221,9	228,5	209,3	163,6	116,3	76,8	60,3
Σύρος	58,0	80,0	121,0	172,0	212,0	219,0	225,0	204,0	160,0	199,0	74,0	57,0
Τανάγρα	59,1	74,2	112,7	151,9	194,0	215,4	222,0	201,3	153,1	104,5	64,7	51,2
Τρίκαλα (Ημαθίας)	57,3	72,2	105,6	140,2	178,0	202,9	206,4	185,8	138,6	94,0	59,7	49,1
Τυμπάκιο	73,4	90,5	137,5	169,0	207,8	222,9	228,7	209,8	166,3	127,2	85,9	67,7
Χανιά	62,0	80,0	124,0	167,0	212,0	220,0	225,0	205,0	161,0	111,0	78,0	59,0
Χίος	55,0	72,0	119,0	161,0	210,0	220,0	225,0	203,0	159,0	116,0	71,0	53,0
Χρυσούπολη	57,5	78,0	111,3	137,6	189,9	204,0	208,8	187,6	141,8	97,7	62,1	43,3

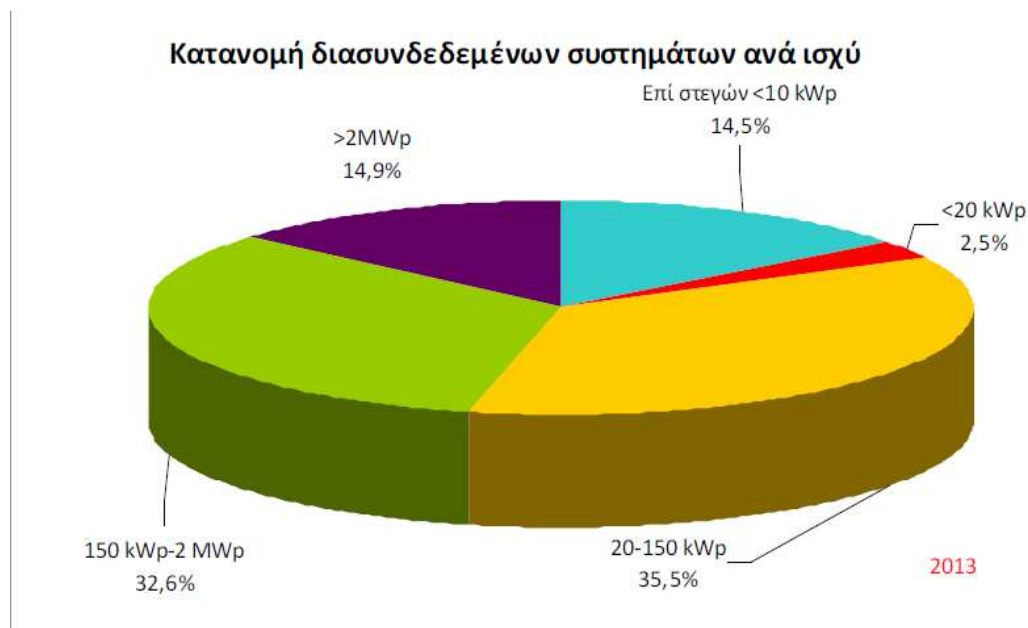
Yearly solar electricity generated by 1 kWp photovoltaic system
with modules mounted at optimum angle

GREECE



Σχήμα 1.1. Χωρική κατανομή της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από φβ σύστημα ισχύος 1kWp (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/countries/countries-europe.htm>).

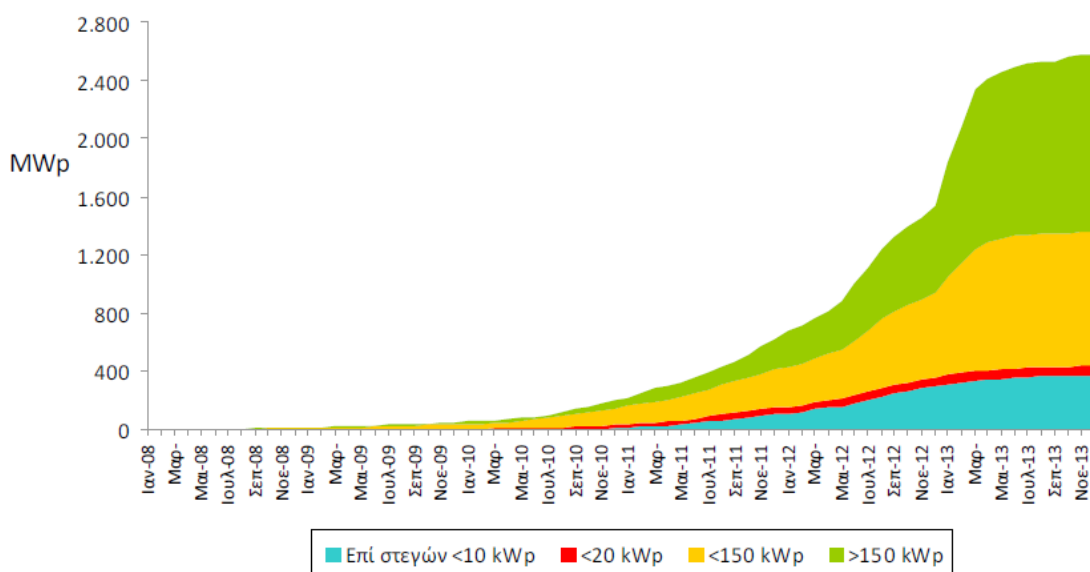
Στην Ελλάδα οι εγκαταστάσεις των διασυνδεδεμένων συστημάτων παρουσιάζουν διαρκή αύξηση. Η νέα εγκατεστημένη ισχύς των διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών κατά το **2013** ανήλθε σε **1043 MWp** και η κατανομή τους ανά κατηγορία μεγέθους φαίνεται στο σχήμα 1.2. Η **συνολική εγκατεστημένη ισχύς** των φωτοβολταϊκών φθάνει τα **2579 MWp**. Η κατανομή της συνολικής ισχύος στις διάφορες κατηγορίες μεγέθους δίνεται στον πίνακα 1.2 και χρονικά στο σχήμα 1.3 (<http://helarco.gr> - Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών).



Σχήμα 1.2. Κατανομή διασυνδεδεμένων συστημάτων ανά ισχύ, το έτος 2013 (<http://helarco.gr> - Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών).

Πίνακας 1.2. Κατανομή της συνολικής φβ ισχύος στις διάφορες κατηγορίες μεγέθους.

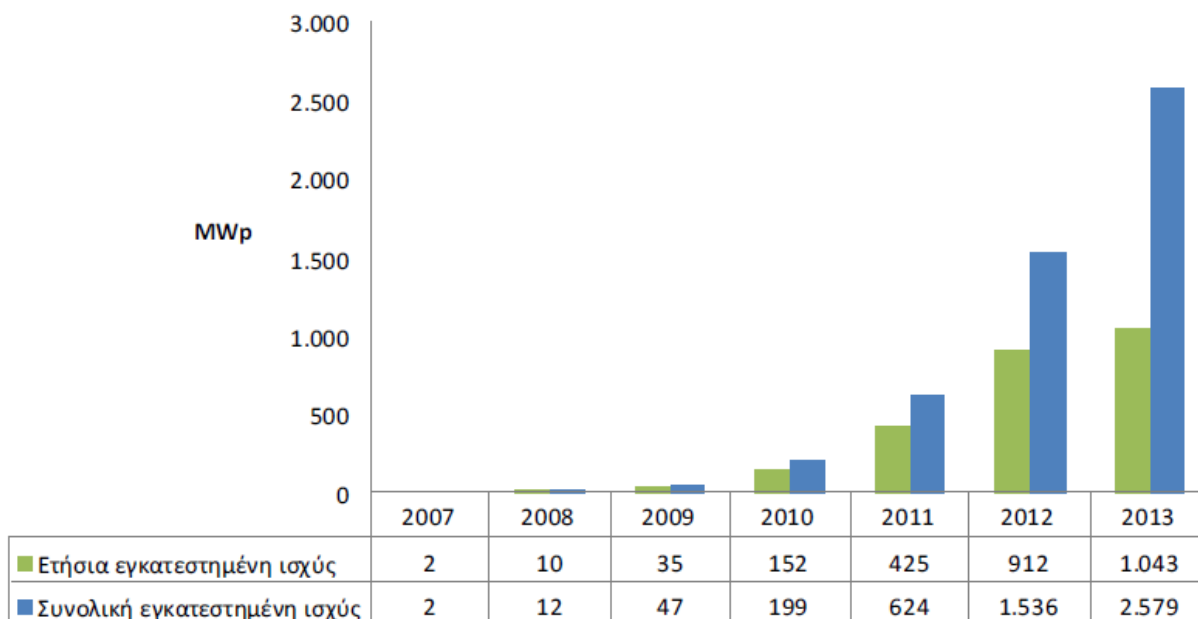
Διασυνδεδεμένα συστήματα ανά κατηγορία	Στέγες <10 kWp	<20 kWp	20-150 kWp	150 kWp-2 MWp	>2 MWp
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (MWp)	372,7	65	917	843,2	380,9



Σχήμα 1.3. Χρονική ανάπτυξη των διασυνδεδεμένων συστημάτων.

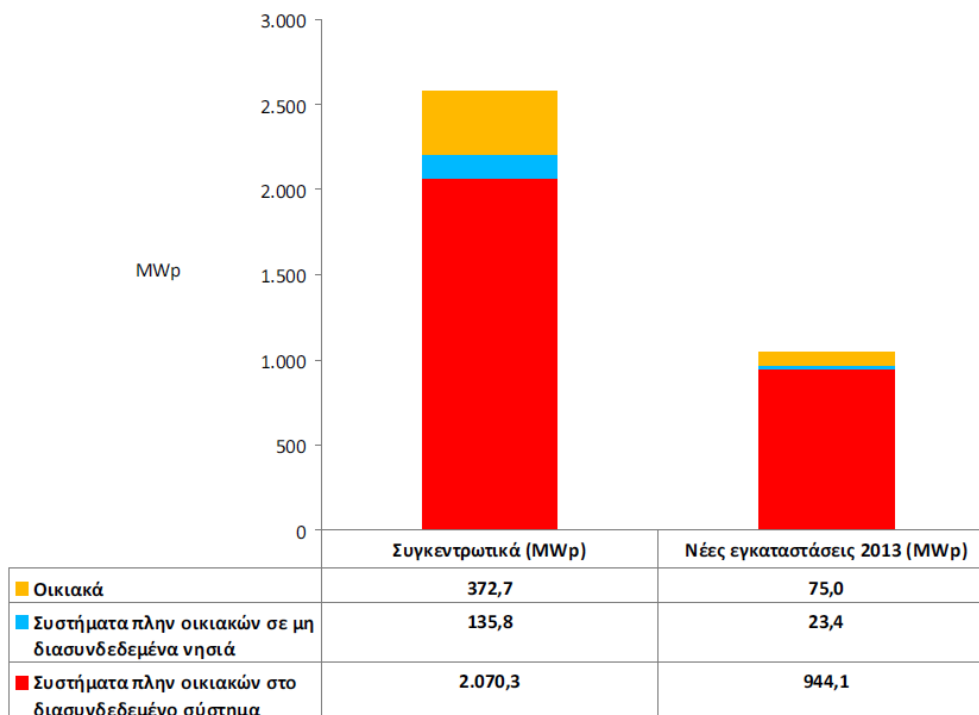
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πιο αναλυτικά, η χρονική κατανομή των εγκαταστάσεων κατά τα 6 τελευταία έτη, στην ελληνική αγορά, φαίνεται στο επόμενο σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4. Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων στην ελληνική αγορά

Η κατανομή της ισχύος στα διάφορα είδη εγκαταστάσεων φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:

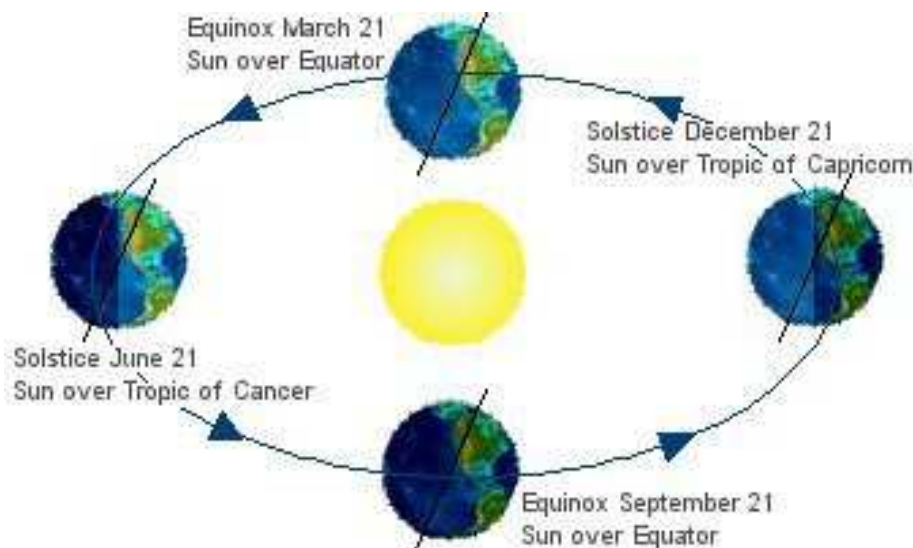


Σχήμα 1.5. Κατανομή εγκατεστημένης ισχύς φωτοβολταϊκών ανά τύπο συστήματος (<http://helarco.gr> - Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΗΛΙΟΥ-ΓΗΣ
& ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Το επίπεδο αναφοράς για τη Γη είναι το επίπεδο του ουράνιου Ισημερινού, το οποίο τέμνει κάθετα τον πολικό άξονα της Γης στο κέντρο της. Η Γη κινείται σε μια ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο, σε 365 ημέρες. Το επίπεδο που περιέχει αυτή την τροχιά λέγεται εκλειπτικό επίπεδο. Επίσης η Γη περιστρέφεται γύρω από τον πολικό άξονα της σε 24 ώρες. Από τον βόρειο πόλο, η φορά της τροχιάς είναι αντίθετη στη φορά των δεικτών του ρολογιού. Μεταξύ του πολικού άξονα και της καθέτου στο εκλειπτικό επίπεδο σχηματίζεται γωνία 23,45 μοιρών, σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους (Σχήμα 2.1). Η κοντινότερη απόσταση της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο σηματοδοτεί το περιήλιο (χειμώνας στο βόρειο ημισφαίριο), ενώ η μακρινότερη (καλοκαίρι στο βόρειο ημισφαίριο) το αφήλιο της τροχιάς.



Σχήμα 2.1. Κίνηση της Γης γύρω από τον Ήλιο (<http://www.crh.noaa.gov/fsd/?n=season>)

Για λόγους πρακτικών υπολογισμών της ενέργειας που δέχεται ηλιακός συλλέκτης θα γίνει η παραδοχή ότι η Γη είναι σταθερή και ο Ήλιος κινείται γύρω της, διαγράφοντας τροχιά πάνω στο εκλειπτικό επίπεδο. Η γωνία μεταξύ του εκλειπτικού επιπέδου και του επιπέδου του ουράνιου Ισημερινού είναι 23,45 μοίρες. Καθώς ο Ήλιος κινείται στο εκλειπτικό επίπεδο, μεταβάλλεται η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του ουράνιου Ισημερινού και την ευθεία που ενώνει το κέντρο της Γης με τον Ήλιο. Αυτή η γωνία είναι η ηλιακή απόκλιση δ και λαμβάνει τιμές: $+23,45^\circ$ κατά το θερινό ηλιοστάσιο (21/6), $-23,45^\circ$ κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21/12) και μηδέν κατά την εαρινή (21/3) και φθινοπωρινή ισημερία (21/9). Η ηλιακή απόκλιση συμπίπτει με τη γωνία ύψους του Ήλιου, όπως φαίνεται από παρατηρητή στο επίπεδο του ουράνιου ισημερινού, στο κέντρο της Γης.

Αζιμούθια γωνία Z

Η αζιμούθια γωνία Z, ως προς το Νότο, υπολογίζεται από την εξίσωση (για $\omega \leq 0$):

$$\cos Z = \frac{\sin \beta * \sin \phi - \sin \delta}{\cos \beta * \cos \phi}$$

Όπου:

δ η ηλιακή απόκλιση της συγκεκριμένης ημερολογιακής ημέρας (DoY)

ϕ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου

Κατά τη μεσημβρία (12:00) ισχύει $Z=0$. (όλες οι γωνίες είναι σε μοίρες και επίπεδο αναφοράς είναι η οριζόντια επιφάνεια του εδάφους).

Ηλιακή απόκλιση δ

Είναι η γωνία (σχήμα 2.3) που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του ουράνιου ισημερινού και της ευθείας που ενώνει τη Γη με τον Ήλιο. Λαμβάνει τιμές $+23,45^\circ$ κατά το θερινό ηλιοστάσιο (21/6), $-23,45^\circ$ κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21/12) και μηδέν κατά την εαρινή (21/3) και φθινοπωρινή ισημερία (21/9). Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\delta = 23,45 * \sin\left[\frac{360}{365}(DoY + 284)\right]$$

Ο όρος 284 αποδίδει τον αριθμό των ημερών μετά την εαρινή ισημερία, ώστε η θέση του Ήλιου να αντιστοιχεί στην έναρξη του ημερολογιακού έτους.

Ηλιακή ωριαία γωνία ω

Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των δύο ημιεπιπέδων, που ορίζονται από:

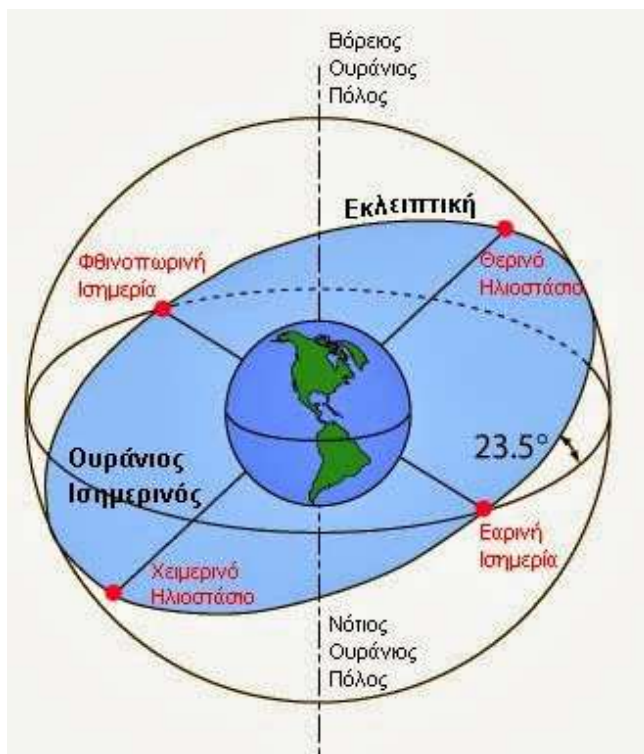
- Τον πολικό άξονα της Γης και το ζενίθ της τοποθεσίας
- Τον πολικό άξονα της Γης και τον Ήλιο

Μετρείται σε μοίρες και δίνεται από τον τύπο:

$$\omega = 15^\circ / h * (T_{SOLAR} - 12h)$$

$\omega=0$ κατά την ηλιακή μεσημβρία (12:00)

$\omega < 0$ πριν την ηλιακή μεσημβρία και $\omega > 0$ μετά την ηλιακή μεσημβρία.



Σχήμα 2.3. Προσδιορισμός της ηλιακής απόκλισης δ .

Ηλιακή ώρα

Η ηλιακή ώρα έχει αναφορά τον Ήλιο και δεν ταυτίζεται με την τοπική ώρα. Για τον προσδιορισμό της εφαρμόζονται δύο διορθώσεις:

- Η πρώτη οφείλεται στη διαφορά ανάμεσα στο γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού του παρατηρητή και του μεσημβρινού αναφοράς για τον καθορισμό της τοπικής ώρας.

$$L_{ST} = (15^\circ / h) * \Delta T_{GMT}$$

ΔT η διαφορά μεταξύ ώρας GMT και τοπικής ώρας (-2 για την Ελλάδα)

L_{ST} ο μεσημβρινός αναφοράς για τον καθορισμό της τοπικής ώρας (σχήμα 2.4)

- Η δεύτερη διόρθωση εξαρτάται από την ημέρα του έτους. Η εξίσωση χρόνου E λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της χρονικής διάρκειας που απαιτεί ο Ήλιος, για να μεταφερθεί κατά μήκος της ηλιακής τροχιάς του στην ουράνια σφαίρα του παρατηρητή. Δίνεται από την εμπειρική σχέση

$$E = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B)$$

- Β η γωνία ημέρας, προσδιορίζεται με αναφορά την ημέρα κατά την οποία ο Ήλιος θα εισέλθει στην εαρινή ισημερία και δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{360}{364}(DoY - 81)$$

Όπου

DoY η ημερολογιακή ημέρα (τιμές 1 ως 365).

Η ηλιακή ώρα υπολογίζεται από την εξίσωση:

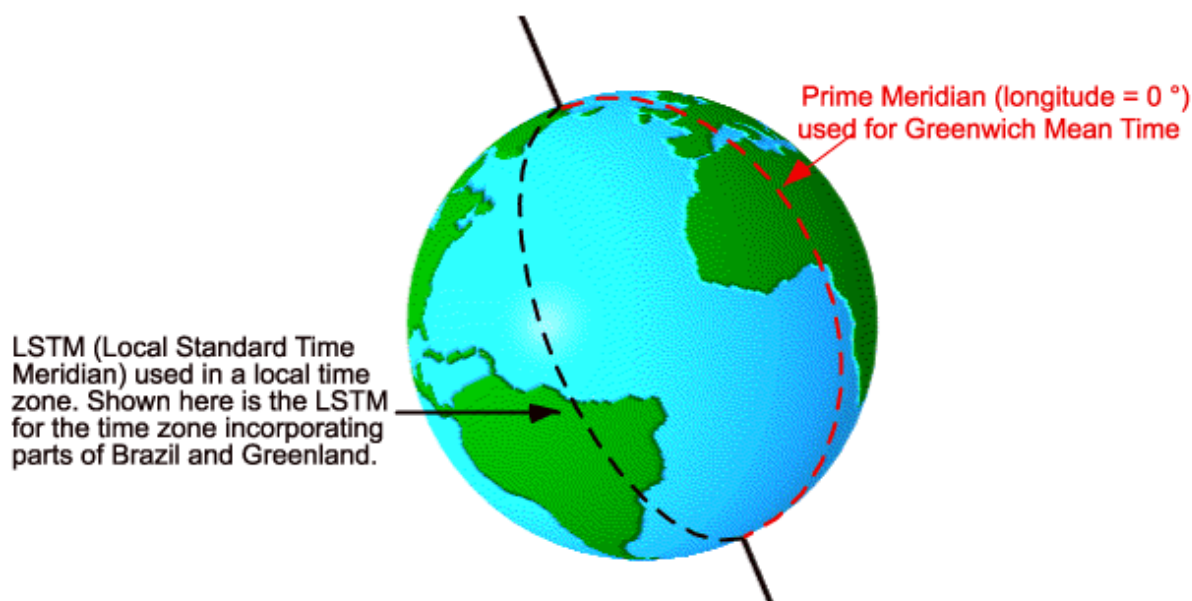
$$T_{SOLAR} = T_{LOCAL} + E + 4 \text{ min}^{\circ} * (L_{ST} - L_{LOCAL})$$

$L_{ST} = -30$ μοίρες για την Ελλάδα.

L_{LOCAL} το γεωγραφικό μήκος του τόπου

T_{LOCAL} η τοπική ώρα (πάντα χειμερινή)

(η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της 1 μοίρα σε 4 λεπτά)



Σχήμα 2.4. Ο μεσημβρινός αναφοράς για τον καθορισμό της τοπικής ώρας

2.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Το ορατό τμήμα που βρίσκεται στην επιφάνεια του Ηλίου λέγεται φωτόσφαιρα (πάχος 500 km) και αποτελεί την πηγή της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη. Στη φωτόσφαιρα παρατηρούνται οι ηλιακές κηλίδες, οι κόκκοι και οι ηλιακές εκλάμψεις. Πάνω από τη φωτόσφαιρα βρίσκεται η χρωμόσφαιρα (πάχος 3500-9000 km) στην οποία παρατηρούνται οι ηλιακές προεξοχές. Ακολουθούν η ζώνη αναστροφής της θερμοκρασίας (η θερμοκρασία αυξάνει απότομα στους 30000 °K από 5700 °K), το ηλιακό στέμμα (πάχος 1000000 km) και η ηλιόσφαιρα που συνιστά την εξωτερική ατμόσφαιρα του Ηλίου και εκτείνεται μέχρι την τροχιά του Πλούτωνα. Στην περιοχή πέρα του ηλιακού στέμματος παρατηρείται ο ηλιακός άνεμος, που συνιστά ασθενή ακτινοβολία σωματιδιακής φύσης (ηλεκτρόνια, πρωτόνια), που απομακρύνονται από τον Ήλιο με την ταχύτητα του φωτός. Σε περιόδους έντονων ηλιακών εκρήξεων, φθάνει στην επιφάνεια της Γης με τιμές ως 10^{12} πρωτόνια / $m^2 \text{ sec}$.

Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την γήινη ατμόσφαιρα είναι σχεδόν σταθερή στην τιμή 1367 W/m^2 . Αυτή η τιμή προσδιορίζει την πυκνότητας ισχύος της ηλιακής σταθεράς $G_{\text{SOLAR_CONSTANT}} = 1367 \text{ W/m}^2$. Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μοναδιαία επιφάνεια, έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, δίνεται από τον τύπο:

$$G_{\text{EXTRA_TERRESTRIAL}} = G_{\text{SOLAR_CONSTANT}} * [1 + 0.033 * \cos(\frac{360 * DoY}{365})]$$

Καθώς η ακτινοβολία μεταδίδεται προς τη Γη, εξασθενεί η πυκνότητα ισχύος της, ενώ συγχρόνως μειώνεται η ενέργεια (συχνότητα) των φωτονίων και αυξάνει το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης, το 7% της φασματικής απόκρισης βρίσκεται στην υπεριώδη περιοχή ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$), το 47% βρίσκεται στο ορατό φάσμα και το 46% στην υπέρυθη περιοχή ($\lambda > 0.75 \mu\text{m}$).

Με βάση την τιμή της ηλιακής σταθεράς $G_{\text{SOLAR_CONSTANT}} = 1367 \text{ W/m}^2$ και την περίμετρο 40000 km της Γης, υπολογίζεται ότι η συνολική ισχύς που δέχεται ο πλανήτης είναι της τάξης των 174000 TW. Η εξασθένηση της ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ακτινοβολίας στο επίπεδο της θάλασσας στην τιμή 1 KW/m^2 (αναφέρεται ως ισχύς ενός Ηλίου). Θεωρώντας καθημερινά 5 ώρες ηλιοφάνειας ισχύος 1 KW/m^2 , η ετήσια μέση ισχύς που προσπίπτει στη Γη στο επίπεδο της θάλασσας είναι 102000 TW.

2.2.1 ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Οι τρεις βασικοί μηχανισμοί κατά τη μεταφορά μιας δέσμης φωτός μέσα από την ατμόσφαιρα είναι: απορρόφηση, σκέδαση και ανάκλαση. Οι μηχανισμοί αυτοί τροποποιούν την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (υψηλής ενέργειας) (Δέρβος Κ., Παν/κές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.).

Η **απορρόφηση** περιλαμβάνει τη μετατροπή της προσπίπτουσας ενέργειας σε θερμότητα και τη μερική επανεκπομπή της ως ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος. Η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από το όζον, η υπέρυθρη από τους υδρατμούς, το CO₂, το SF₆.

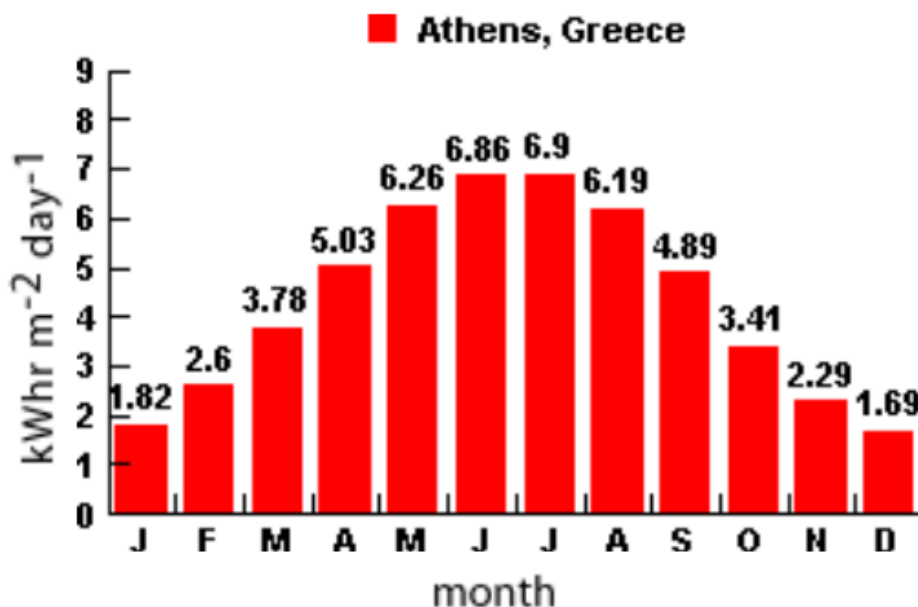
Η **σκέδαση** συνδέεται με την αλλαγή στην κατεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. εξαρτάται από το μήκος κύματος και αποδίδεται κυρίως στην ύπαρξη αερίων μορίων που συνιστούν τον ατμοσφαιρικό αέρα, στους υδρατμούς, στους σωματιδιακούς ρύπους και στην αιωρούμενη σκόνη.

Η **ανάκλαση** πραγματοποιείται σε διεπιφάνειες διαφορετικής οπτικής πυκνότητας και είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_{GLOBAL} που φθάνει στην επιφάνεια της Γης αποτελείται από την άμεση και τη διάχυτη συνιστώσα (σχήμα 2.5).

Η **άμεση** φθάνει απευθείας από τον Ήλιο στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς σκέδαση κατά τη διαδρομή της μέσα από την ατμόσφαιρα. Η τιμή της εξαρτάται από την απόσταση Ηλίου-Γης, την ηλιακή απόκλιση δ , τη γωνία ύψους του Ηλίου, το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο, την κλίση της επιφάνειας που προσπίπτει και την απορρόφηση που υφίσταται στην ατμόσφαιρα. Η ένταση της ακτινοβολίας εξαρτάται από την απόσταση που διανύει εντός της ατμόσφαιρας και για το λόγο αυτό έχει μεγαλύτερη τιμή κατά το θέρος και μικρότερη το χειμώνα. Επίσης όσο πιο κάθετα προσπίπτει στην επιφάνεια τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της.

Η **διάχυτη** ακτινοβολία φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά από ανάκλαση, σκέδαση εντός της ατμόσφαιρας, αλλά και μετά από ανάκλαση πάνω στην επιφάνεια της Γης. Ο συντελεστής ανάκλασης $albedo$ ορίζεται από το λόγο ανακλώμενης προς προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ στη θέση που δημιουργεί την ανάκλαση. Η διάχυτη ακτινοβολία εξαρτάται από τη γωνία ύψους του Ηλίου, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσοστό νέφωσης και υδροσταγονιδίων και άλλων παραγόντων σκέδασης που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 2.5. Μέση τιμή ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (kwh/m².ημέρα), στο οριζόντιο επίπεδο, στην πόλη της Αθήνας (<http://www.pveducation.org>).

Περιστρεφόμενες βάσεις των ηλιακών συστημάτων

Διακρίνονται σε συστήματα με ένα ή δύο άξονες περιστροφής. Τα συστήματα με ένα άξονα περιστροφής διατηρούν τη συλλεκτική επιφάνεια του ηλιακού συστήματος σε σταθερή κλίση. Ο προσανατολισμός μεταβάλλεται ανάλογα με το ηλιακό αζιμούθιο. Τα συστήματα με δύο άξονες περιστροφής μετακινούν τη συλλεκτική επιφάνεια σε κλίση ίση με αυτή του ηλιακού ύψους και προσανατολισμό ίσο με το ηλιακό αζιμούθιο, δηλαδή το σύστημα παρακολουθεί πλήρως την κίνηση του Ήλιου. Στην Ελλάδα, τα συστήματα περιστρεφόμενων βάσεων με ένα άξονα αυξάνουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ποσοστό 23-25% ως προς την προσπίπτουσα σε σύστημα σταθερής ετήσιας κλίσης, ενώ στην περίπτωση περιστρεφόμενων βάσεων δύο αξόνων, η αύξηση ανέρχεται σε 28-30% (TOTEE 20701-3/2010).

2.3 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Υπάρχουν 2 οικογένειες μοντέλων που προβλέπουν τις μέσες ωριαίες τιμές των διαφόρων συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας. Είναι τα παραμετρικά μοντέλα και τα μοντέλα κατάτμησης. Τα πρώτα απαιτούν λεπτομερείς πληροφορίες ατμοσφαιρικών μετεωρολογικών παραμέτρων, ενώ τα δεύτερα απαιτούν πειραματικά δεδομένα καταγραφής της συνολικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί το **μοντέλο κατάτμησης ακτινοβολίας των Erbs-Klein-Duffie**. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ωριαίων τιμών της συνολικής ακτινοβολίας στο οριζόντιο έδαφος. Το μοντέλο αυτό βρέθηκε ότι έχει καλύτερα αποτελέσματα στα γεωγραφικά πλάτη μεταξύ 31 και 42 μοιρών και για μεσαίου εύρους γωνίες του ηλιακού ζενίθ (50-65 μοίρες).

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία επί οριζόντιου εδάφους δίνεται από τον τύπο:

$$G_{BEAM,h} = G_{GLOBAL,h} \cdot \frac{1 - k_d}{\sin \beta}$$

Όπου

- $G_{BEAM,h}$ η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο του εδάφους
- $G_{GLOBAL,h}$ η συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο του εδάφους, όπως μετρήθηκε από ένα πυρανόμετρο.
- k_d το κλάσμα διάχυσης της ακτινοβολίας, οποίο υπολογίζεται από την παρακάτω εμπειρική συνάρτηση, στην οποία k_t είναι ο δείκτης αιθριότητας, η τιμή του οποίου υποδεικνύει τη νεφοκάλυψη. Η πρώτη περιοχή τιμών ($k < 0,22$) αντιστοιχεί σε πολύ συννεφιασμένο ουρανό, η δεύτερη σε συννεφιασμένο και η τελευταία με τις υψηλές τιμές σε ουρανό χωρίς σύννεφα.

$$k_d = \left\{ \begin{array}{l} 1 - 0.09k_t, k_t \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_t + 4.388k_t^2 - 16.638k_t^3 + 12.336k_t^4, 0.22 < k_t < 0.8 \\ 0.165, k_t \geq 0.8 \end{array} \right\}$$

Ο δείκτης αιθριότητας k_t υπολογίζεται από τον τύπο:

$$k_t = \frac{G_{GLOBAL,h}}{G_{GLOBAL,h,oa}}$$

Όπου

$G_{GLOBAL,h,oa}$ η συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, η οποία αποτελείται μόνο από την άμεση συνιστώσα διότι δεν υπάρχει ατμόσφαιρα για να προκαλέσει διάχυση.

Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα είναι σχεδόν σταθερή στην τιμή 1367 W/m^2 (πυκνότητα ισχύος της ηλιακής σταθεράς $G_{SOLAR_CONSTANT}$). Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μοναδιαία επιφάνεια (AM0), έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, δίνεται από τον τύπο:

$$G_{EXTRA_TERRESTRIAL} = G_{SOLAR_CONSTANT} * [1 + 0.033 * \cos(\frac{360 * DoY}{365})]$$

Ο όρος μέσα στην παρένθεση λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στην απόσταση Ήλιου-Γης, στις διάφορες ημέρες του έτους. Λόγω της γωνίας β του ύψους του Ηλίου, αν μετατοπιστεί το οριζόντιο επίπεδο του εδάφους έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, η ακτινοβολία που δέχεται καθορίζεται από την κάθετη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας και δίνεται από τον τύπο:

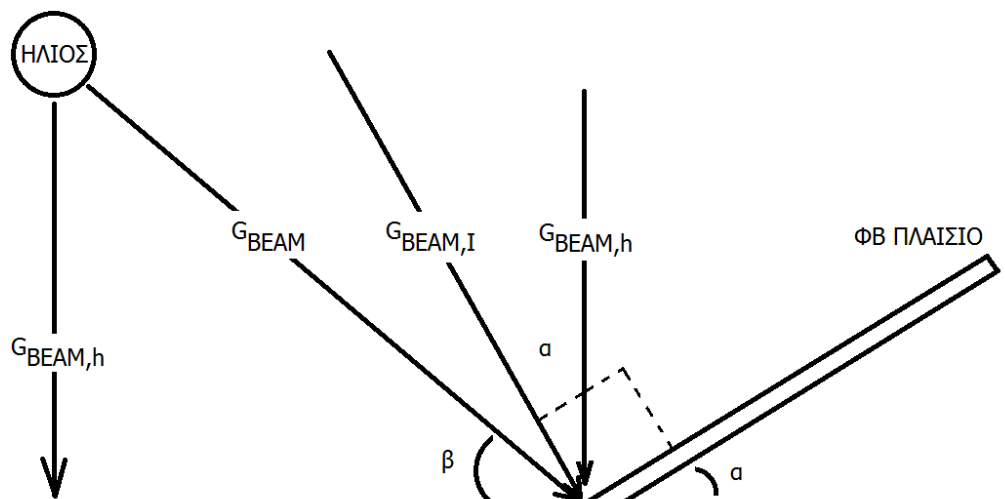
$$G_{GLOBAL,h,oa} = G_{EXTRA_TERRESTRIAL} \cdot \sin \beta$$

Μετά τον υπολογισμό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας $G_{BEAM,h}$ επί οριζόντιου εδάφους, υπολογίζεται η διάχυτη συνιστώσα $G_{DIFF,h}$ από τον τύπο:

$$G_{DIFF,h} = G_{GLOBAL,h} - G_{BEAM,h}$$

2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Η ακτινοβολία που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται σύμφωνα με το μοντέλο των Liu & Jordan (1960). Θεωρείται ότι κάθε φβ πλαίσιο έχει ελεύθερη θέα που εκτείνεται από τον ορίζοντα ως το ζενίθ και το νοητό επίπεδο του φβ πλαισίου, το οποίο καθορίζεται από τη γωνία κλίσης α του φβ πλαισίου ως προς το επίπεδο έδαφος. Για το λόγο αυτό υπερεκτιμάται η διάχυτη ακτινοβολία που υπολογίζεται για την επόμενη φβ συστοιχία, αφού βλέπει ένα τμήμα της παραπάνω ουράνιας σφαίρας. Οι συνιστώσες της άμεσης ακτινοβολίας φαίνονται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6. Συνιστώσες της άμεσης ακτινοβολίας G_{BEAM} .

Από το σχήμα προκύπτει ότι:

$$G_{BEAM,h} = G_{BEAM} \cdot \sin \beta$$

$$G_{BEAM,i} = G_{BEAM} \cdot \cos(\phi_z - a) = G_{BEAM} \cdot \sin(a + \beta)$$

$$G_{BEAM,i} = G_{BEAM,h} \cdot \frac{\sin(a + \beta)}{\sin \beta}$$

Όπου:

ϕ_z η συμπληρωματική της γωνίας β .

G_{BEAM} η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο του εδάφους

$G_{BEAM,i}$ η συνιστώσα της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα στο κεκλιμένο επίπεδο του συλλέκτη.

Η διάχυτη ακτινοβολία $G_{DIFF,I}$ που προσπίπτει στο επίπεδο του συλλέκτη, θεωρείται ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες: το τμήμα που οφείλεται στον ουράνιο θόλο από τον ορίζοντα ως το ζενίθ και το τμήμα που οφείλεται στον ουράνιο θόλο από το ζενίθ ως το νοητό επίπεδο του φβ πλαισίου. Με επαλληλία, η διάχυτη ακτινοβολία $G_{DIFF,I}$ που προσπίπτει στο επίπεδο του συλλέκτη υπολογίζεται από τον τύπο:

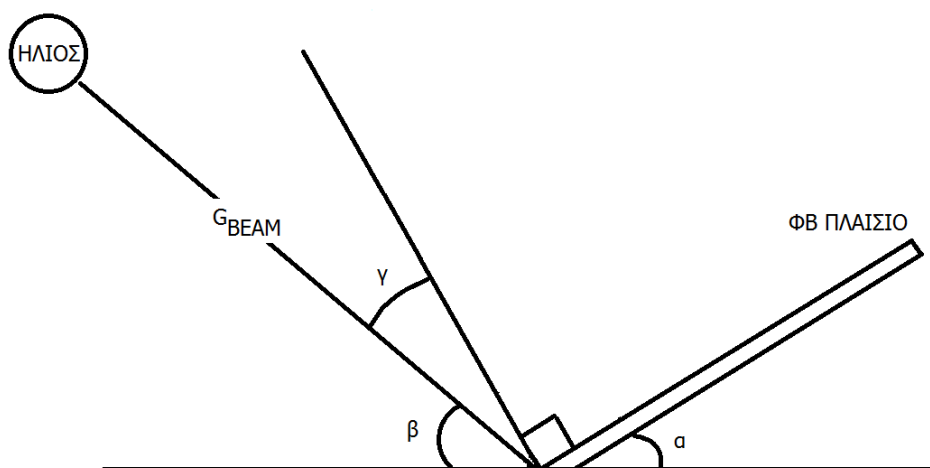
$$G_{DIFF,i} = \frac{1}{2} G_{DIFF,h} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

Η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο του φβ πλαισίου δίνεται από τον τύπο:

$$G_{GLOBAL,i} = G_{BEAM,i} + G_{DIFF,i}$$

2.5 ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Η γωνία πρόσπτωσης γ (σχήμα 2.7) ορίζεται η γωνία μεταξύ της άμεσης δέσμης G_{BEAM} , η οποία συνδέει τον Ήλιο με τον συλλέκτη, και της καθέτου στο συλλέκτη. Η μέγιστη εισερχόμενη ενέργεια στο φβ πλαίσιο συμβαίνει όταν $\gamma=0$.



Σχήμα 2.7. Γωνία πρόσπτωσης γ σε κεκλιμένο φβ πλαίσιο

Η γωνία πρόσπτωσης γ ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\cos \gamma = \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \alpha - \sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \theta + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \theta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \omega \cdot \sin \theta$$

Όπου: δ η γωνία ηλιακής απόκλισης

ϕ το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής

α η κλίση του φβ πλαισίου ως προς το οριζόντιο επίπεδο

θ η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη ως προς το νότο

ω η ωριαία γωνία

- Για $\theta=0$, δηλαδή προσανατολισμός του φβ πλαισίου προς νότο, είναι:

$$\cos \gamma = \sin \delta \cdot \sin(\phi - \alpha) + \cos \delta \cdot \cos(\phi - \alpha) \cdot \cos \omega$$

- Για $\alpha=0$ (οριζόντιο φβ πλαίσιο), η γωνία γ ταυτίζεται με τη γωνία ϕ_z , που σχηματίζεται μεταξύ της άμεσης δέσμης και του τοπικού ζενίθ. Η ϕ_z είναι συμπληρωματική της γωνίας ύψους β του Ηλίου.

$$\cos \phi_z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega$$

- Για $\alpha=0$ (οριζόντιο φβ πλαίσιο) και $\gamma=90^\circ$ (Ηλιος στον ορίζοντα), υπολογίζεται η ηλιακή ώρα δύσης ω_s . (Με βάση την ω_s υπολογίζεται η διάρκεια ημέρας N , $N = \frac{2}{15/h} \cdot \omega_s$). Είναι:

$$\cos \omega_s = -\tan \delta \cdot \tan \phi$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ
ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

3.1 ΔΙΟΔΟΣ ΕΠΑΦΗΣ p-n - ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΦΡΑΓΜΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Οι περιοχές που συνθέτουν τη δομή μιας διόδου p-n (χωρίς εξωτερικό φωτισμό ή ηλεκτρικό πεδίο) είναι (Δέρβος Κ., Παν/κές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.):

Ημιαγωγός τύπου n

Περιέχει τα πεντασθενή άτομα των δοτών με συγκέντρωση N_D . Για το Si ως άτομα προσμείξεων δοτών χρησιμοποιούνται τα πεντασθενή χημικά στοιχεία φώσφορος, αρσενικό και αντιμόνιο. Το άτομο της πρόσμειξης πρέπει να έχει όσο το δυνατόν την ίδια ατομική ακτίνα με αυτή του πυριτίου, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι κρυσταλλικές αταξίες και οι ενεργειακές στάθμες των δοτών να είναι κοντά στην κορυφή του ενεργειακού διακένου. Το είδος των ατόμων των προσμείξεων εξαρτάται από τη μέθοδο εισαγωγής των προσμείξεων στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού. Μετά τον ιοντισμό τους, τα άτομα των δοτών ελευθερώνουν ηλεκτρόνια προς τη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού και σχηματίζονται θετικά ιόντα. Τα τελευταία δεν μπορούν να μετακινηθούν υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν ενεργειακές τιμές πάνω από τη στάθμη E_C . Τα ηλεκτρόνια με ενέργειες κάτω από τη στάθμη E_V είναι δεσμευμένα από τα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος και δεν συμβάλλουν στην αγωγιμότητα του υλικού.

Ημιαγωγός τύπου p

Περιέχει τα τρισθενή άτομα των αποδεκτών με συγκέντρωση N_A . Για το Si ως άτομα προσμείξεων αποδεκτών χρησιμοποιούνται τα τρισθενή χημικά στοιχεία βόριο, γάλλιο, ίνδιο, αλουμίνιο. Οι ενεργειακές στάθμες των αποδεκτών είναι κοντά στον πυθμένα του ενεργειακού διακένου, γεγονός που διασφαλίζει ότι ο ιοντισμός των ατόμων των προσμείξεων θα γίνεται με χαμηλή ενέργεια ενεργοποίησης. Μετά τον ιοντισμό τους, τα άτομα των αποδεκτών δεσμεύουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους σχηματίζοντας αρνητικά ιόντα και οπές που κινούνται εντός του κρυσταλλικού πλέγματος, συμβάλλοντας στην αγωγιμότητα του υλικού. Οι οπές αποτελούν τους φορείς πλειονότητας στον ημιαγωγό τύπου p και βρίσκονται ενεργειακά σε τιμές κάτω από τη στάθμη E_V (κορυφή της ζώνης σθένους).

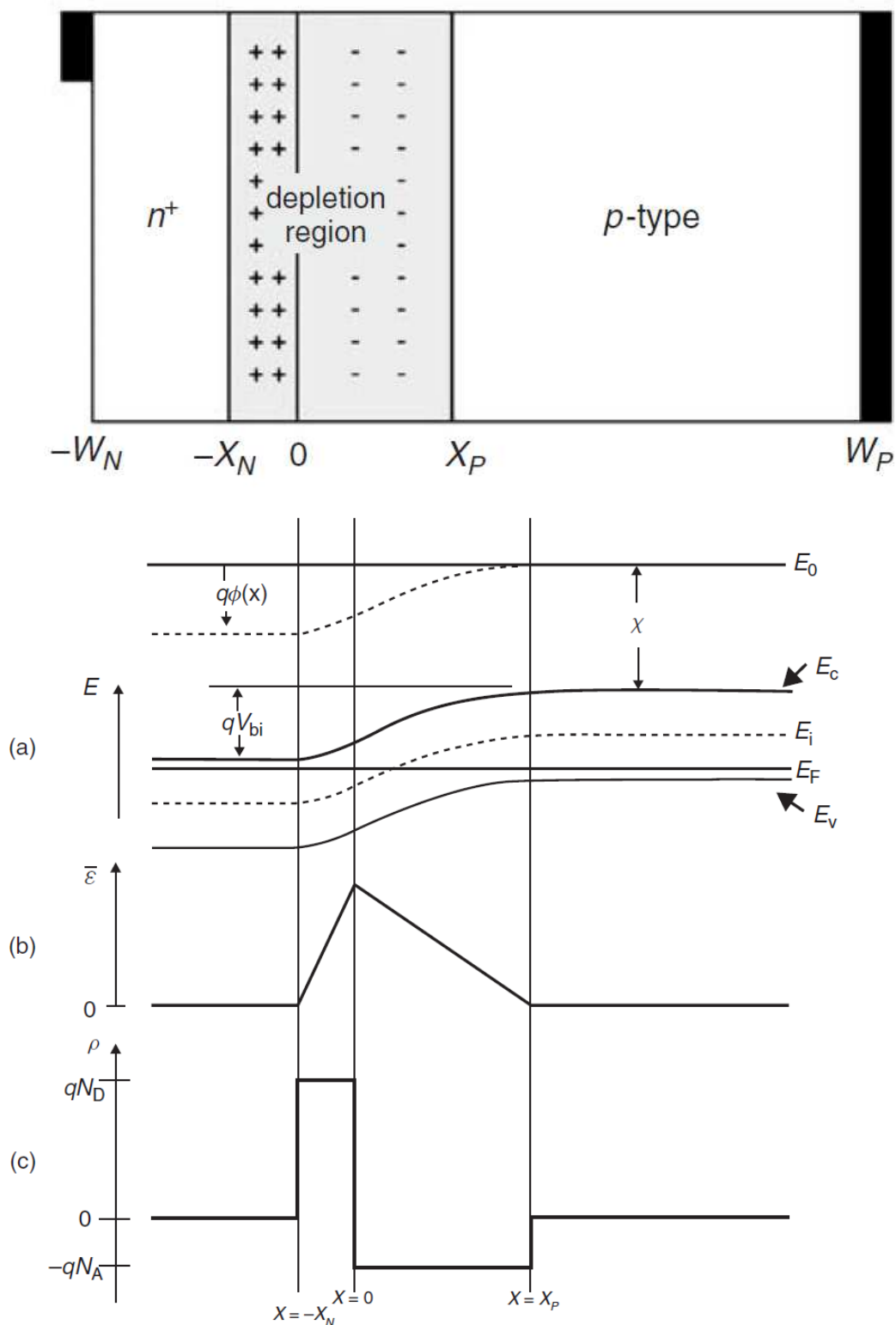
Το **ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού** δημιουργείται καθώς οι εκατέρωθεν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς στην περιοχή της επαφής αντισταθμίζονται αφήνοντας πίσω τους ασυνόδευτα τα ιόντα από όπου προήλθαν. Η αντιστάθμιση πραγματοποιείται κατά την αρχική σύνθεση της διάταξης και εκδηλώνεται ως ταχύτατη ροή ηλεκτρονίων από το υλικό

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

με την υψηλότερη στάθμη Fermi προς τη χαμηλότερη. Η ροή των φορτίων γίνεται ταχύτατα (10^{-12} s) και αποτελεί προϋπόθεση για την αποκατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας στην περιοχή της επαφής, στην οποία η στάθμη Fermi είναι ενιαία και οριζόντια. Μετά την επανασύνδεση των οπών-ηλεκτρονίων στην περιοχή της επαφής σχηματίζονται οι κατανομές φορτίου από τα ασυνόδευτα ιόντα δοτών-αποδεκτών. Συγκεκριμένα, οι δότες (θετικά φορτία) εκτείνονται σε εύρος x_n προς την πλευρά του ημιαγωγού τύπου n, ενώ οι αποδέκτες (αρνητικά φορτία) σε εύρος x_p προς την πλευρά του ημιαγωγού τύπου p.

Αυτή η κατανομή φορτίων δημιουργεί το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού στην περιοχή της επαφής p-n που χαρακτηρίζεται από το ύψος του qV_D , που μετράται σε eV και το εύρος του $w = x_n + x_p$ (μm). Το εύρος w εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των προσμείξεων δοτών και αποδεκτών. Όσο μικρότερη η συγκέντρωσή τους, τόσο πιο ευρύ είναι το ηλ/κο φράγμα δυναμικού, το οποίο τυπικά κυμαίνεται από 0,1 ως 1 μm. Στην περίπτωση έντονης νόθευσης από τη μία πλευρά (π.χ. $N_D^+ \gg N_A^-$) έχουμε επαφή τύπου $n^+ - p$ ($N_D = 10^{17} / \text{cm}^3 - 10^{19} / \text{cm}^3$).

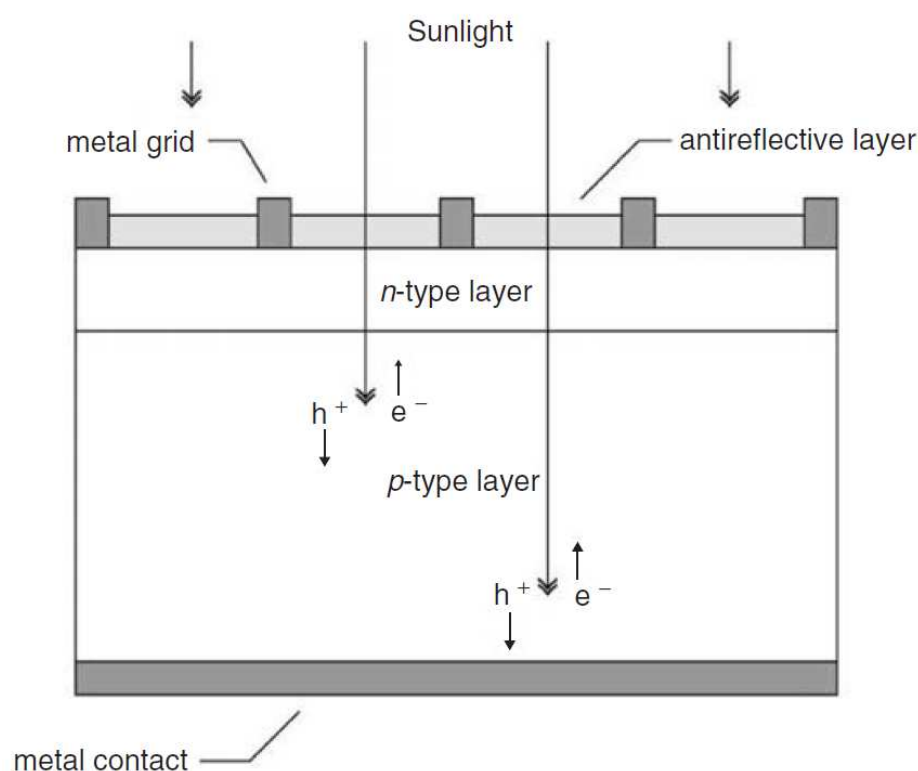
Το ενεργειακό διάκενο E_G είναι ίσο με την ενεργειακή διαφορά μεταξύ του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας E_C και της κορυφής της ζώνης σθένους E_V , $E_G = E_C - E_V$ και στο εσωτερικό του δεν υπάρχουν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς. Η τιμή του αντιστοιχεί στην ενέργεια του ομοιοπολικού χημικού δεσμού που συνδέει τα άτομα του ημιαγωγού μεταξύ τους. Στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας η στάθμη Fermi είναι ενιαία και οριζόντια μέσα στο E_G και στο εσωτερικό του ηλ/κού φράγματος δυναμικού δεν υπάρχουν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς. Για το λόγο αυτό η περιοχή w λέγεται και περιοχή απωθήσεως ηλεκτρικών φορέων (depletion region) (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1. Περιοχή αποθήσεως ηλεκτρικών φορέων (depletion region). Διαχωρισμός φορτίων στην περιοχή της επαφής p-n (Antonio Luque and Steven Hegedus, John Wiley & Sons 2011).

3.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο συνίσταται στη μετατροπή μέρους του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω, κυρίως, των διόδων p-n. Τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n, ενώ οι οπές προς τον ημιαγωγό τύπου p. Οι δημιουργούμενοι ηλεκτρικοί φορείς οδηγούνται προς τα εξωτερικά ηλεκτρόδια μέσω των ωμικών επαφών και στους ακροδέκτες του κυκλώματος εμφανίζεται τάση. Για τη δίοδο p-n, το ρεύμα καθορίζεται από τους φορείς μειονότητας που υπάρχουν στους ημιαγωγούς τύπου p και n.



Σχήμα 3.2. Δημιουργία και διαχωρισμός ζευγών οπών-ηλεκτρονίων (Antonio Luque and Steven Hegedus, John Wiley & Sons 2011)

Με το φωτισμό της δίοδου p-n, τα φωτόνια ενέργειας $E=hn$ προσπίπτουν στον ημιαγωγό τύπου n. Η ενεργός περιοχή για τη δημιουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου είναι οι περιοχές $w+L_p+L_n$ όπου τα τελευταία αντιστοιχούν στα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας, στις περιοχές τύπου n και p αντίστοιχα, εκατέρωθεν του ηλ/κού φράγματος δυναμικού, πριν επανασυνδεθούν με φορέα πλειονότητας (ηλεκτρόνια για την περιοχή n και

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

οπή για την περιοχή p) και χαθούν. Η απόδοση κατά τη μετατροπή είναι ανάλογη με το εύρος w, το οποίο μεγαλώνει μειώνοντας τα ποσοστά των προσμείξεων και αυξάνοντας την τιμή του δυναμικού διάχυσης. Οι φορείς μειονότητας της κάθε πλευράς μεταφέρονται εκατέρωθεν του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού με διάχυση, που συνιστά ένα μη κβαντομηχανικό, αργό μηχανισμό μεταφοράς ηλεκτρικών φορέων. Η διάχυση ενεργοποιείται από τη διαφορά της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στο χώρο, εκατέρωθεν του φράγματος δυναμικού.

Εφόσον η ενέργεια κάθε προσπίπτοντος φωτονίου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του ενεργειακού διακένου, κάθε φωτόνιο απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους που είναι σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Η ενέργεια του φωτονίου διεγείρει το ηλεκτρόνιο προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στο πλέγμα μια οπή (στη ζώνη σθένους). Συνεπώς, μέσω της οπτικής διέγερσης εισάγονται ταυτόχρονα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και οπές στη ζώνη σθένους, σε όλο το εύρος της επαφής p-n. Αυτά τα ζεύγη διαχωρίζονται αυτόματα από το ηλεκτροστατικό πεδίο και δεν επανασυνδέονται. Στις περιοχές Ln, Lp, οι δημιουργούμενοι φορείς μειονότητας διαχέονται προς την περιοχή w και δεν επανασυνδέονται με τον φορέα πλειονότητας.

Λόγω της συνεχούς οπτικής διαταραχής που εισάγει ηλεκτρικούς φορείς στην περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος, το υλικό δεν φθάνει σε θερμοδυναμική ισορροπία. Σύμφωνα με την προσέγγιση Quasi Equilibrium, η στάθμη Fermi διαχωρίζεται σε δύο διακριτές στάθμες, μία για τα ελεύθερα ηλεκτρόνια Φ_n και μια για τις οπές Φ_p και χρησιμοποιούνται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Μακριά από την περιοχή w οι δύο διακριτές στάθμες ταυτίζονται σε μία στάθμη E_F (όπως κατά την ΘΔ ισορροπία). Μακριά από την περιοχή w τα δημιουργούμενα ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων κινούνται με τη θερμική τους ταχύτητα γύρω από τη θέση δημιουργίας τους και επανασυνδέονται, μη συμβάλλοντας στη φωτοβολταϊκή μετατροπή ενέργειας, αλλά μειώνοντας το συντελεστή απόδοσης της διάταξης.

Όσο διαρκεί η οπτική διέγερση, τα ηλεκτρόνια που εισάγονται στην περιοχή w εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n και οι οπές προς τον ημιαγωγό τύπου p. Ο πρώτος θα αποκτήσει περισσότερα αρνητικά φορτία και ο δεύτερος περισσότερα θετικά. Οι στάθμες Φ_n , Φ_p διαχωρίζονται κατά την ενεργειακή διαφορά:

$$\Phi_n - \Phi_p = q * V_{TOTAL}$$

Όπου:

V_{TOTAL} είναι η τιμή της τάσης εξόδου στα άκρα της διόδου p-n.

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC} μιας ιδανικής διόδου p-n δίνεται από τον τύπο:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{L_n + L_p}{\left(\frac{L_n \cdot n_p}{\tau_n}\right) + \left(\frac{L_p \cdot p_n}{\tau_p}\right)} g_{opt} + 1\right)$$

Όπου

k σταθερά Boltzmann, q το στοιχειώδες φορτίο

τ_n, τ_p ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων και των οπών που συνιστούν φορείς μειονότητας

n_p , η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου p

p_n η συγκέντρωση των οπών στον ημιαγωγό τύπου n

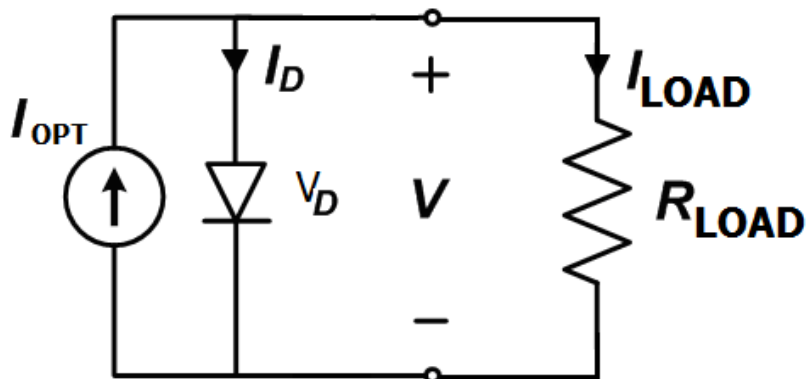
g_{opt} ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών οπών-ηλεκτρονίων λόγω της οπτικής διέγερσης

Η ένταση του φωτορεύματος I_{opt} εξαρτάται από την απορροφούμενη φωτεινή ισχύ. Διοχετεύεται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα και δίνεται από τη σχέση:

$$I_{OPT} = q \cdot A \cdot (L_n + L_p) \cdot g_{opt}$$

Όπου A το εμβαδό της επιφάνειας που δέχεται το φωτισμό. Το φωτόρευμα στα σύγχρονα φβ στοιχεία είναι της τάξης των 3-7 A.

3.3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΦΩΤΙΖΟΜΕΝΗΣ ΙΔΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΔΟΥ p-n



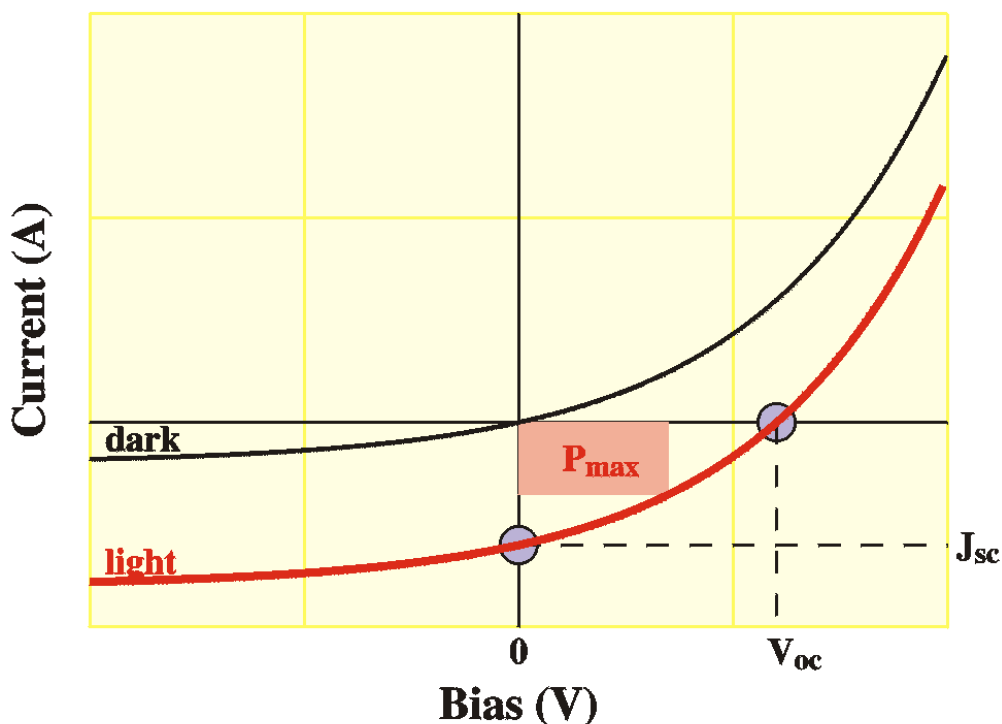
Σχήμα 3.3. Ισοδύναμο κύκλωμα φωτιζόμενης ιδανικής διόδου p-n

Οι εξισώσεις I-V ιδανικής διόδου που υπόκειται σε ηλεκτρική και οπτική διέγερση προκύπτουν από την επαλληλία ρευμάτων που αναλογούν στις περιπτώσεις που επιβάλλεται ηλεκτρική διέγερση στο σκοτάδι και στην περίπτωση που επιβάλλεται μόνο φωτισμός. Το φωτόρευμα αφαιρείται από το ρεύμα ορθής πόλωσης I_{FWD} και προστίθεται στο ρεύμα ανάστροφης πόλωσης I_{REV} .

$$I_{FWD} = I_s (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) - qA(L_n + L_p)g_{opt}$$

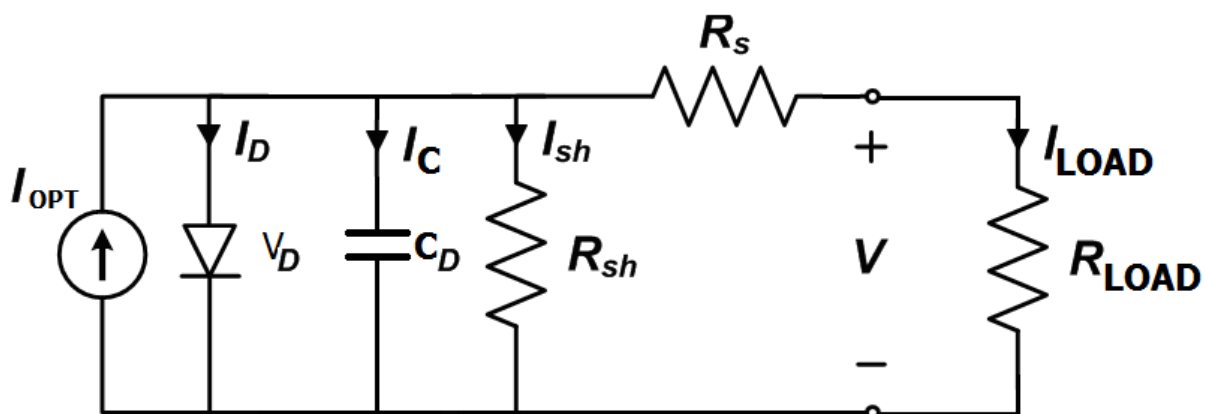
$$I_{REV} = I_s + qA(L_n + L_p)g_{opt}$$

Γενικότερα, όταν η διόδος φωτίζεται, μπορεί να επιτελέσει 2 λειτουργίες; τη ΦΒ λειτουργία (μετατροπή φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική) και τη φωτοαγώγιμη λειτουργία (ανίχνευση οπτικού σήματος). Στο τέταρτο τεταρτημόριο η ισχύς είναι αρνητική και η διάταξη αποτελεί ενεργό στοιχείο που παρέχει ισχύ στο εξωτερικό κύκλωμα (ΦΒ λειτουργία).



Σχήμα 3.4. Χαρακτηριστική ρεύματος τάσης της διάταξης της ιδανικής διόδου p-n. (<http://www.stallinga.org>)

3.4 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΦΩΤΙΖΟΜΕΝΗΣ ΜΗ ΙΔΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΔΟΥ p-n



Σχήμα 3.5. Ισοδύναμο κύκλωμα φωτιζόμενης μη ιδανικής διόδου

Η παρεχόμενη ισχύ από το φβ στοιχείο καταναλώνεται από την εξωτερική αντίσταση R_{LOAD} . Το κύκλωμα αποτελείται από την πηγή που παράγει το φωτόρευμα, παράλληλα με μια

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

ιδανική δίοδο. Το ρεύμα I_D οφείλεται στη μεταφορά των φορέων μειονότητας με διάχυση, εκατέρωθεν του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού.

Η μη ιδανική συνιστώσα της διόδου προσομοιώνεται από το παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα RC που περιέχει τη χωρητικότητα C_D της διόδου και την **αντίσταση διαρροής** R_{shunt} ($10^8 \Omega$) που αποδίδει τους πρόσθετους μηχανισμούς μεταφοράς ηλεκτρικών φορέων εκατέρωθεν του φράγματος δυναμικού (εκτός της διάχυσης) και είναι σημαντική στην ανάστροφη πόλωση. Επανασυνδέσεις μέσω βαθειών ενεργειακών καταστάσεων συμβάλλουν στη δημιουργία του ρεύματος αυτού. Η ιδανική τιμή της R_{shunt} τείνει στο άπειρο.

Η χωρητικότητα C_D λαμβάνεται υπόψη κατά τη μεταβολή της φωτεινότητας, όπου προκύπτουν χρονομεταβλητά ρεύματα. Το υπόστρωμα και οι ωμικές επαφές εισάγουν την **αντίσταση σειράς** R_S (2-5 Ω) η οποία είναι σημαντική στην ορθή πόλωση. Η ιδανική τιμή της R_S τείνει στο μηδέν. Η R_{LOAD} είναι της τάξης των 0,5 Ω . Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της διάταξης ισχύουν οι εξισώσεις:

$$I_{LOAD} = I_{OPT} - (I_D + I_{SHUNT})$$

Όπου:

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right)$$

$$V_D = I_{LOAD} \cdot R_S + V_{LOAD}$$

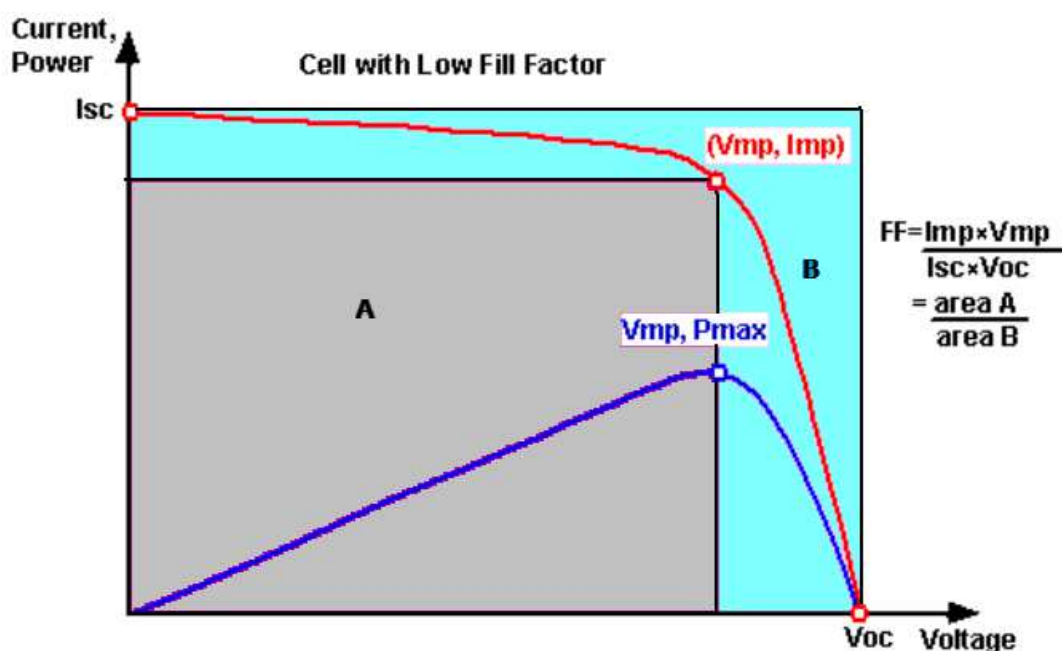
$$I_{SHUNT} = \frac{I_{LOAD} \cdot R_S + V_{LOAD}}{R_{SHUNT}}$$

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης προκύπτει για $I_{SC} = I_{LOAD}$, $V_{LOAD} = 0$ και η τάση ανοικτοκύκλωσης για $V_{OC} = V_D$, $I_{LOAD} = 0$. Τα μεγέθη I_{SC} , V_{OC} εξαρτώνται έντονα από τη θερμοκρασία του υλικού της διόδου λόγω των εκθετικών θερμοκρασιακών όρων και της θερμοκρασιακής εξάρτησης του ρεύματος κόρου I_s . Επίσης εξαρτώνται από την ένταση της ακτινοβολίας και τις συνθήκες φωτισμού, λόγω του όρου I_{OPT} .

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

Κατά τη λειτουργία της διάταξης ως ενεργό στοιχείο, η χαρακτηριστική I-V φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 3.6 (είναι το 4^ο τεταρτημόριο του προηγούμενου σχήματος, ανεστραμμένο). Από όλα τα δυνατά ζεύγη τιμών ρεύματος-τάσης λειτουργίας υπάρχει το σημείο (I_{MAX} , V_{MAX}) όπου η παρεχόμενη ισχύς είναι μέγιστη. Ο **συντελεστής πλήρωσης (FF)** είναι ίσος με

$$FF = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{I_{SC} * V_{OC}}$$



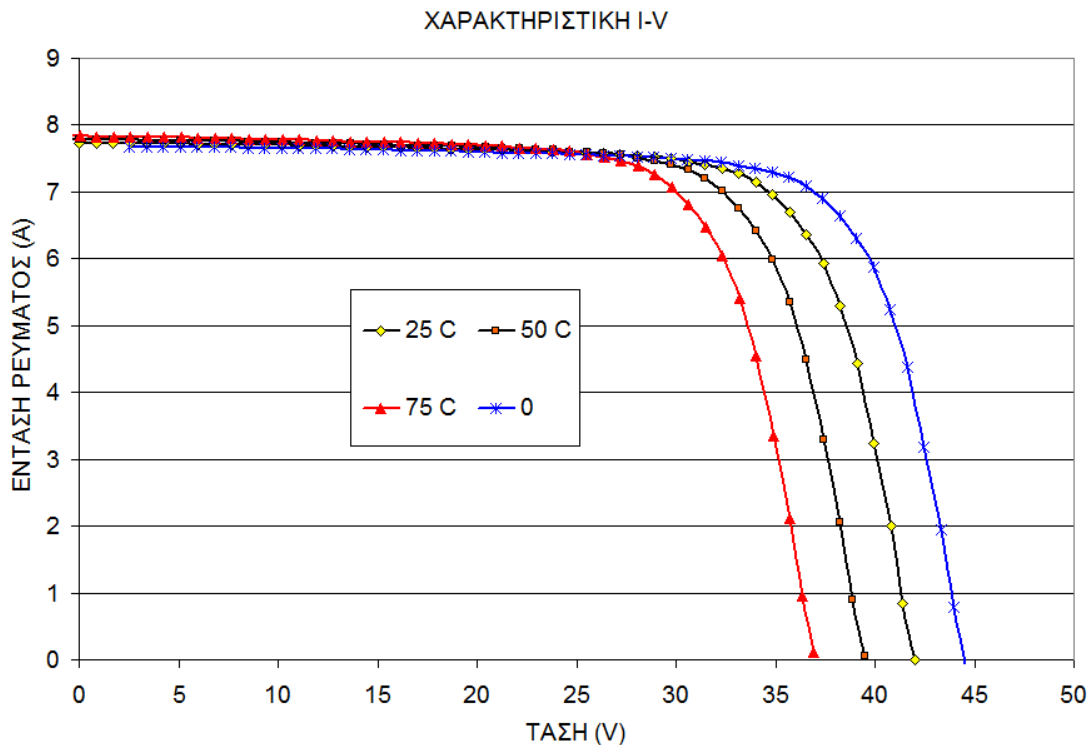
Σχήμα 3.6. Χαρακτηριστική ρεύματος τάσης της διάταξης σε ΦΒ λειτουργία (<http://www.pveducation.org>)

Για δεδομένη ένταση ακτινοβολίας H που προσπίπτει σε επιφάνεια ΦΒ στοιχείου, εμβαδού A , ο **συντελεστής απόδοσης του ΦΒ στοιχείου** δίνεται από τον τύπο

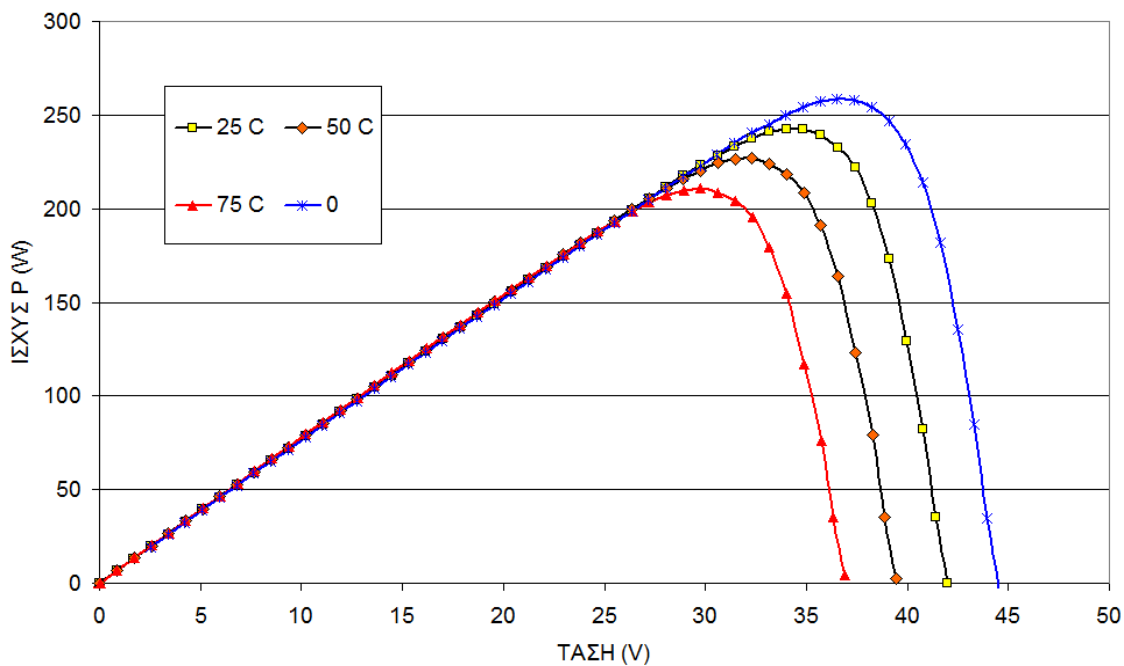
$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{ΟΠΤΙΚΗ}} = \frac{I_{MPP} * V_{MPP}}{H * A} = \frac{FF * I_{SC} * V_{OC}}{H * A}$$

Εξαρτάται από τη φασματική απόκριση της ακτινοβολίας, δηλαδή την πυκνότητα ισχύος στο κάθε μήκος κύματος. Η παρεχόμενη ισχύς από ένα ΦΒ στοιχείο εξαρτάται από τη θερμοκρασία του, την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και την αντίσταση φορτίου.

3.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ



Σχήμα 3.7. Μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V ενός ΦΒ πλαισίου συναρτήσει της θερμοκρασίας των ΦΒ στοιχείων του



Σχήμα 3.8. Μεταβολή της παρεχόμενης ισχύος από ένα ΦΒ πλαίσιο συναρτήσει της θερμοκρασίας των ΦΒ στοιχείων του.

Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση της θερμοκρασίας του υλικού του ΦΒ στοιχείου στη χαρ/κη I-V φαίνεται στο σχήμα 3.7, το οποίο προέκυψε από μετρήσεις σε ένα ΦΒ πλαίσιο. Με την αύξηση της θερμοκρασίας του ΦΒ στοιχείου, η τάση ανοικτοκύκλωσης μειώνεται σημαντικά. Για αύξηση κατά 1 °C, η τάση V_{OC} μειώνεται από 0,25 ως 0,45%. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης τείνει να αυξηθεί, αλλά με πολύ αργό ρυθμό (0,01 ως 0,12% για αύξηση κατά 1 °C). Συνέπεια της μείωσης της τάσης είναι η μείωση της παροχής ισχύος, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8. Σε σταθερές συνθήκες φωτισμού, η τιμή της μέγιστης ισχύος μειώνεται από 0,3 ως 0,5% ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας.

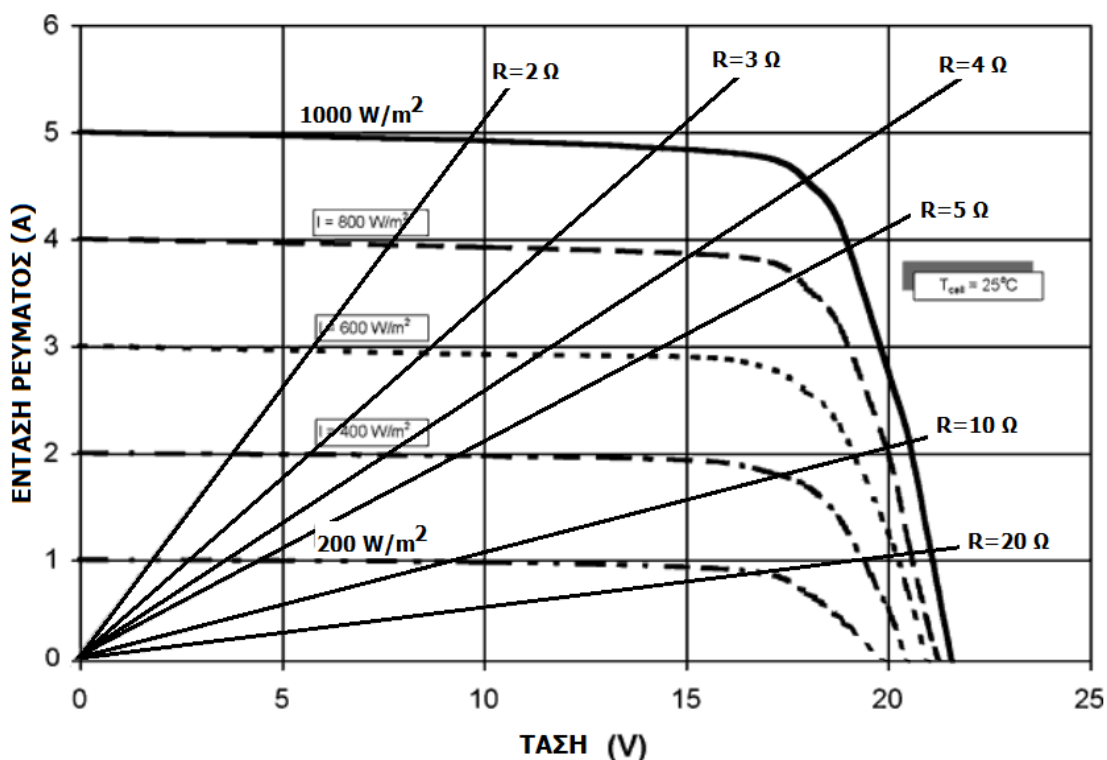
3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Η επίδραση της πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας στη χαρ/κη I-V φαίνεται στο σχήμα 3.9, το οποίο προέκυψε από μετρήσεις σε ένα ΦΒ πλαίσιο. Οι μετρήσεις έγιναν υπό σταθερή θερμοκρασία του ΦΒ πλαισίου (25 °C). Παρατηρείται σχεδόν γραμμική αύξηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η τάση ανοικτοκύκλωσης αυξάνει με πολύ αργό ρυθμό.

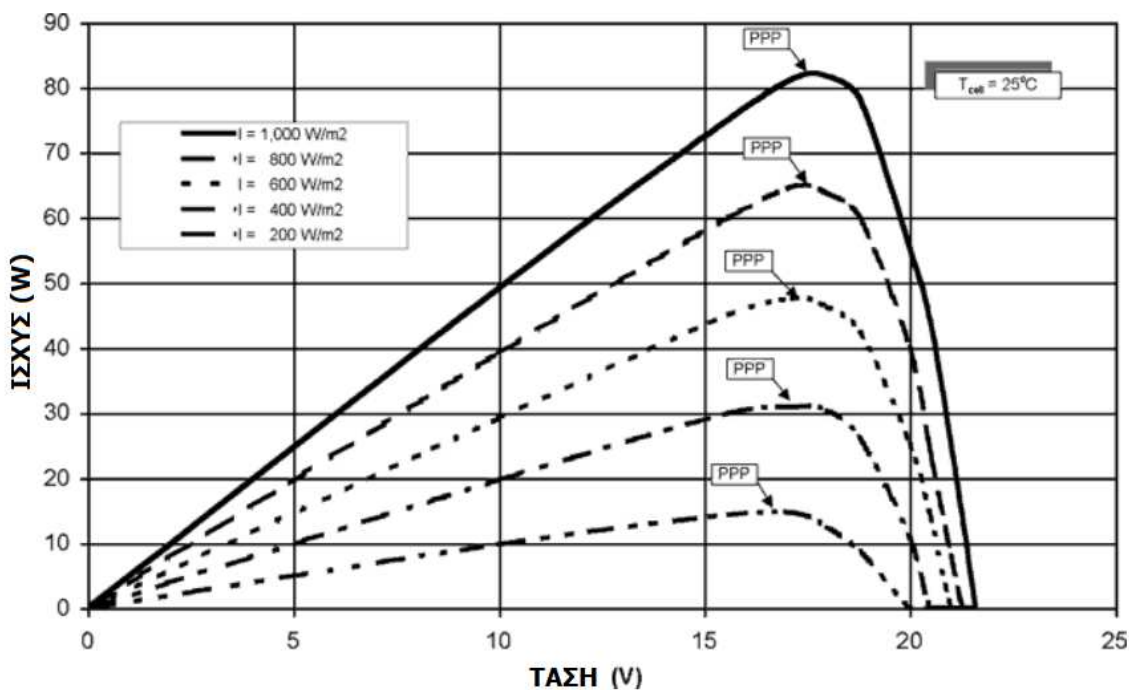
Η αντίσταση φορτίου R_{LOAD} είναι διαφορετική σε κάθε χαρ/κη I-V. Με τη μείωση της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και συνεπώς τη μείωση του ρεύματος και της τιμής μέγιστης ισχύος, η απαιτούμενη αντίσταση φορτίου R_{LOAD} , ώστε το φβ στοιχείο να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, αυξάνει. Η τιμή της αντίστασης μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση του τμήματος που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος:

$$\text{ΚΛΙΣΗ} = \frac{1}{R_{LOAD}}$$

Στο σχήμα 3.10 φαίνεται ότι η μέγιστη ισχύς παρατηρείται στην ίδια σχεδόν τάση V_{MPP} .



Σχήμα 3.9. Μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V ενός ΦΒ πλαισίου συναρτήσει της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας (<http://www.powerfromthesun.net>)



Σχήμα 3.10. Διάγραμμα ισχύος - τάσης συναρτήσει της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, υπό σταθερή θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου (25°C). (<http://www.powerfromthesun.net>)

3.7 ΔΙΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Το υλικό των ΦΒ στοιχείων θερμαίνεται με την απορρόφηση φωτονίων, τα οποία είτε έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το E_G του ημιαγωγού (1,1eV για το Si), υπεριώδες φάσμα, είτε έχουν ενέργεια μικρότερη (υπέρυθρο φάσμα). Η **διαφορά θερμοκρασίας**, έστω ΔT , εξαρτάται από:

- Την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας
- Το υλικό-γεωμετρία του ΦΒ στοιχείου

Για τα μονοκρυσταλλικά φβ στοιχεία ισχύει η εμπειρική σχέση $\Delta T = 0,34 H - 4$

Όπου H η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας σε mW/cm^2 .

Δηλαδή για $H=100 mW/cm^2$ είναι $\Delta T = 30$ °C.

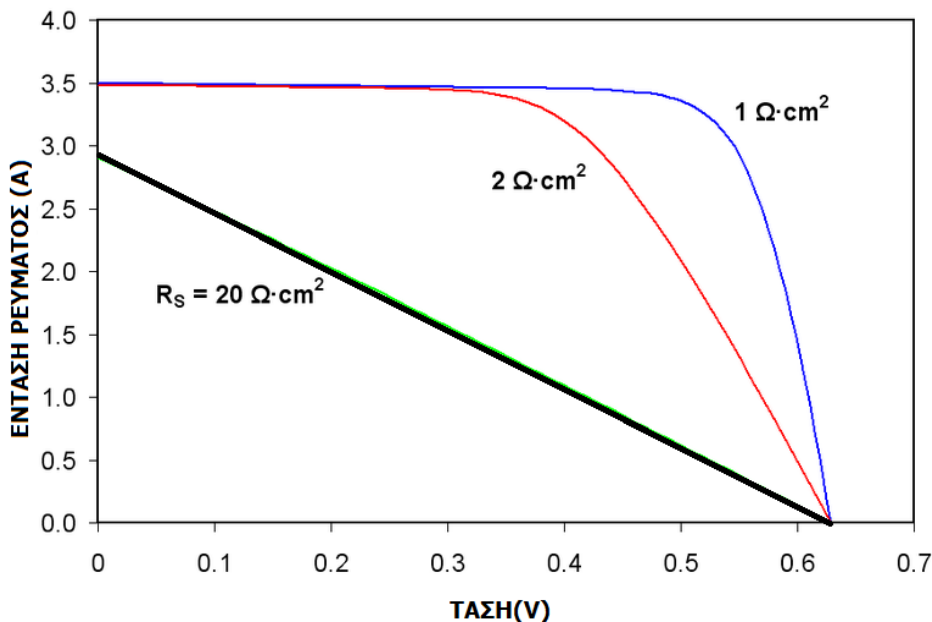
Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί και η **ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας (NOCT)** ενός φβ πλαισίου, η οποία ορίζεται ως η θερμοκρασία των φβ στοιχείων του πλαισίου, όταν αυτό είναι ανοικτοκυκλωμένο και υπόκειται στις εξής συνθήκες:

- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας: $H_o = 80 mW / cm^2$
- Θερμοκρασία αέρα: 20 °C , ταχύτητα ανέμου 1m/s

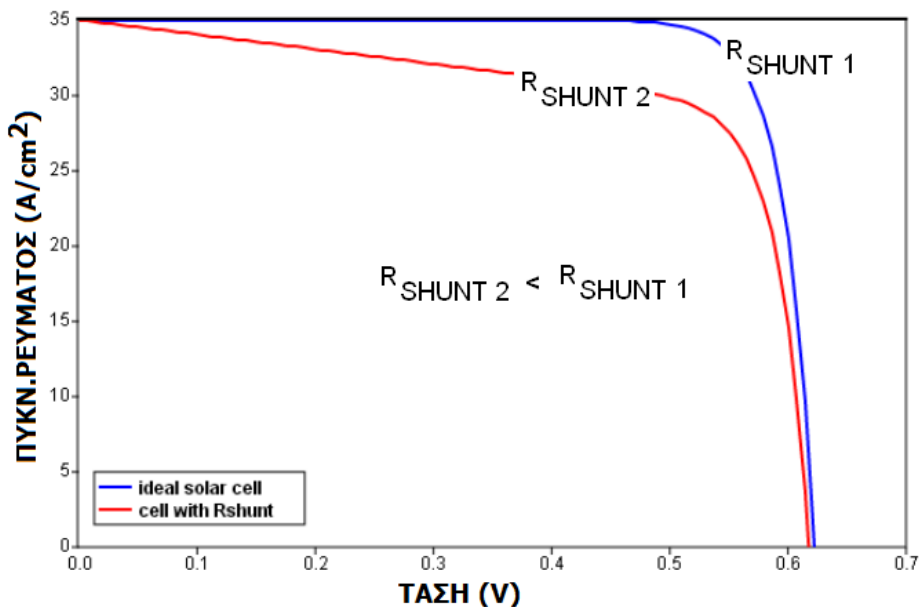
Η θερμοκρασία των φβ στοιχείων του πλαισίου μπορεί να προσδιοριστεί από τον τύπο:

$$T_{\text{ΦΒ-ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ}} = T_{\text{ΑΕΡΑ}} + \frac{NOCT - 20}{80} \cdot H_o$$

3.8 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕΙΡΑΣ R_S – ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ R_{SHUNT} ΣΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ I-V



Σχήμα 3.11. Επίδραση της αντίστασης σειράς R_S στη χαρ/κη I-V (<http://www.pveducation.org>).



Σχήμα 3.12. Επίδραση της παράλληλης αντίστασης R_{SHUNT} στη χαρ/κη I-V. (<http://www.pveducation.org>).

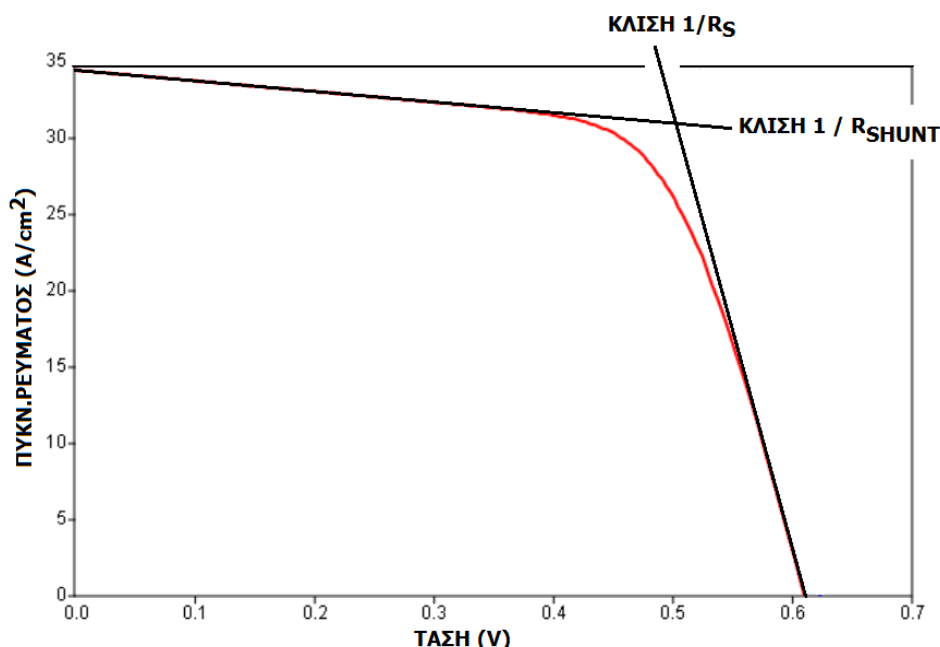
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

Η μεταβολή της αντίστασης R_S δεν επηρεάζει τις τιμές των I_{SC} , V_{OC} . Αύξηση της R_S προκαλεί τη μείωση της τιμής μεγίστης ισχύος που αποδίδει το ΦΒ στοιχείο (σχήμα 3.11). Επειδή το υλικό του ΦΒ στοιχείου αποτελεί αντίσταση στη ροή του ρεύματος, είναι καλύτερο να περιορίζεται ο αριθμός των ΦΒ στοιχείων που συνδέονται σε σειρά (<http://www.solarpower2day.net/solar-cells/efficiency/>).

Μείωση της R_{SHUNT} έχει αποτέλεσμα τη μείωση της V_{OC} . Αυτή η μείωση γίνεται αρχικά με πολύ αργό ρυθμό, αλλά μετά από κάποια τιμή, η μείωση γίνεται με γοργό ρυθμό. Μείωση της R_{SHUNT} προκαλεί τη μείωση της τιμής μεγίστης ισχύος που αποδίδει το ΦΒ στοιχείο (σχήμα 3.12).

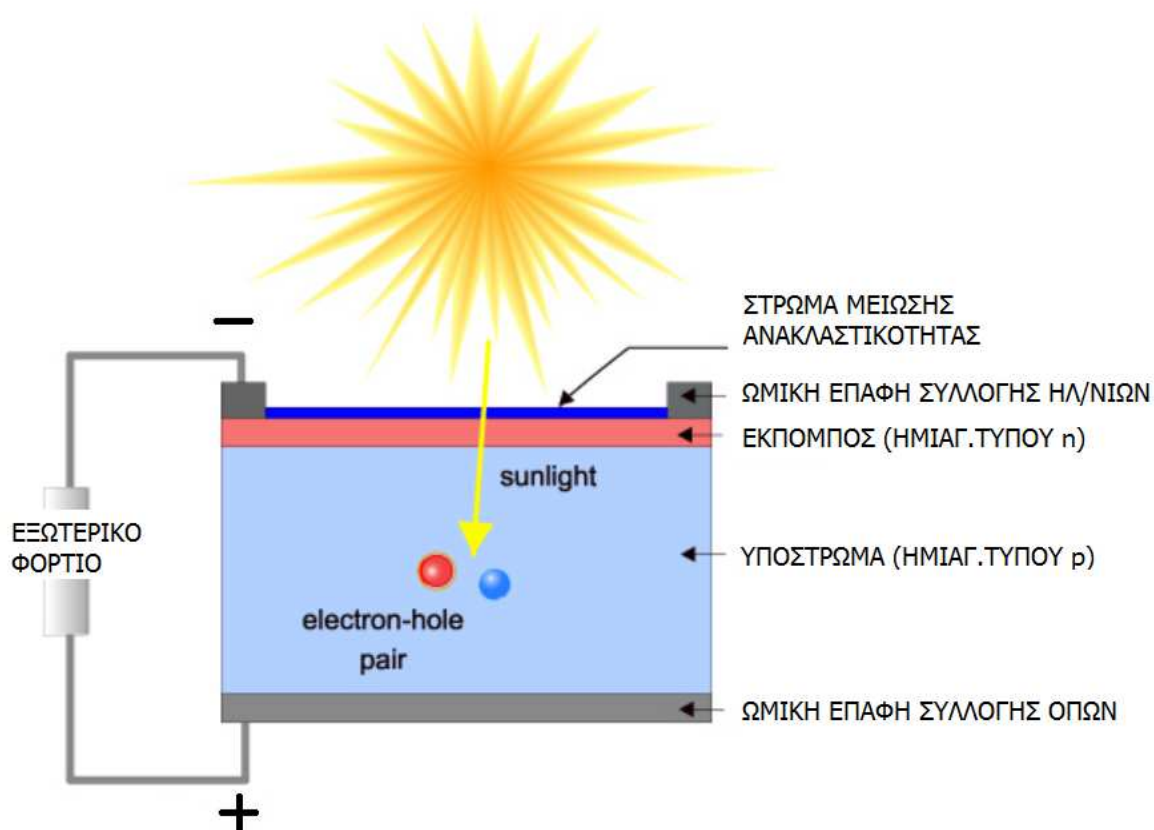
Οι τιμές των αντιστάσεων επηρεάζονται από τις συνθήκες λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου (συνθήκες φωτισμού, θερμοκρασία, επιβαλλόμενη εξωτερική πόλωση). Η R_{SHUNT} εξαρτάται από το φωτισμό, διότι το συνολικό ρεύμα για την επανασύνδεση συνδέεται και με το ρυθμό δημιουργίας των ζευγών οπών-ηλεκτρονίων. Επίσης το φως εισάγει τη φωτοαγωγιμότητα, που μεταβάλλει την αντίσταση του υποστρώματος και επηρεάζει την R_S .

Οι τιμές των αντιστάσεων R_S , R_{SHUNT} προσδιορίζονται από τις επιμέρους κλίσεις των εφαπτομένων στα σημεία $(0, I_{SC})$, $(V_{OC}, 0)$ της χαρ/κης I-V (σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13. Προσδιορισμός των τιμών των αντιστάσεων R_S , R_{SHUNT} από τις επιμέρους κλίσεις της χαρ/κης I-V.

3.9 ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ



Σχήμα 3.14. Δομή φωτοβολταϊκού στοιχείου (<http://pveducation.org>)

Στην παρούσα ενότητα αναφέρονται οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση της φωτοβολταϊκής μετατροπής (Δέρβος Κ., Παν/κές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.).

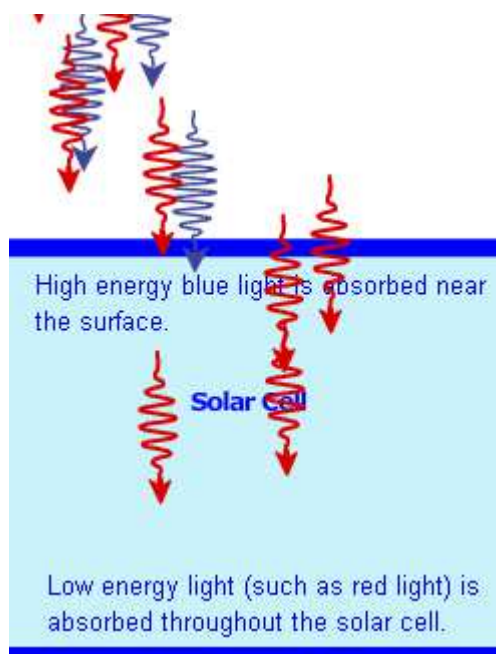
1. Βάθος απορρόφησης φωτονίων

Τα φωτόνια που απορροφούνται μακριά από την περιοχή του ηλ/κου φράγματος δυναμικού δεν συμβάλλουν στη φβ μετατροπή, διότι τα δημιουργούμενα ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων επανασυνδέονται μετά την παρέλευση του χρόνου ζωής των φορέων μειονότητας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται εκθετικά σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια (ο συντελεστής απορρόφησης της ακτινοβολίας εξαρτάται από το υλικό του ημιαγωγού και τη χροιά της ακτινοβολίας), θα πρέπει το ηλ/κο φράγμα δυναμικού να βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του φβ στοιχείου. Το πάχος του υλικού πρέπει να είναι ίσο με το αντίστροφο του συντελεστή απορρόφησης α . Τυπική τιμή

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

του συντελεστή α είναι μεταξύ 10^4 - 10^6 cm^{-1} . Συνεπώς, το πάχος του υλικού μέχρι την περιοχή του ηλ/κου φράγματος δυναμικού κυμαίνεται μεταξύ 0,01 και 1 μm .

Η σχέση μεταξύ του συντελεστή απορρόφησης και του μήκους κύματος είναι τέτοια που διαφορετικά μήκη κύματος διεισδύουν σε διαφορετικές αποστάσεις μέσα σε ένα ημιαγωγό, πριν το μεγαλύτερο μέρος του φωτός απορροφηθεί. Το βάθος απορρόφησης δίδεται από το αντίστροφο του συντελεστή απορρόφησης και αποτελεί χρήσιμη παράμετρο, η οποία δίνει την απόσταση μέσα στο υλικό κατά την οποία η ένταση του φωτός πέφτει περίπου στο 36% της αρχικής τιμής της ή εναλλακτικά έχει μειωθεί κατά ένα παράγοντα $1/e$. Δεδομένου ότι το φως υψηλής ενέργειας (μικρού μήκους κύματος), όπως το μπλε φως, έχει ένα μεγάλο συντελεστή απορρόφησης, απορροφάται σε μικρή απόσταση (για τα φβ στοιχεία πυριτίου μέσα σε λίγα μικρά) από την επιφάνεια, ενώ το κόκκινο φως (χαμηλότερη ενέργεια, μεγαλύτερο μήκος κύματος) απορροφάται λιγότερο έντονα. Ακόμη και μετά από μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα, δεν απορροφάται όλο το κόκκινο φως εντός του πυριτίου. Η διακύμανση του βάθους απορρόφησης για «μπλε» και «κόκκινα» φωτόνια δείχνεται στο παρακάτω σχήμα 3.15 (<http://pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/absorption-depth>).



Σχήμα 3.15. Απορρόφηση φωτονίων διαφορετικού μήκους κύματος σε διαφορετικές αποστάσεις από την επιφάνεια του ημιαγωγού (<http://pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/absorption-depth>).

2. Κρυσταλλικό υπόστρωμα

Αποτελείται από τον ημιαγωγό τύπου p και συνιστάται στη μηχανική υποστήριξη της διόδου και στην απαγωγή της θερμότητας (λόγω φωτονίων και διεργασιών επανασύνδεσης). Ο μονοκρυστάλλος πυριτίου τύπου p που περιέχει τρισθενείς προσμείξεις (βόριο) είναι ανώτερης ποιότητας σε σχέση με εκείνο των πεντασθενών προσμείξεων (P,As,Sb) (λόγω όμοιας ατομικής ακτίνας και μείωσης αταξιών πλέγματος. Οι αταξίες αυξάνουν την ενεργό μάζα των ελεύθερων φορέων, μειώνουν την κινητικότητα τους, αυξάνουν τις σκεδάσεις και το ρυθμό επανασύνδεσης. Επίσης $L_n > L_p$). Η συγκέντρωση των προσμείξεων είναι της τάξης των 10^{16} ατόμων ανά cm^3 . Αυτή η συγκέντρωση των ιοντισμένων αποδεκτών διασφαλίζει χαμηλό ρυθμό επανασύνδεσης στο υπόστρωμα, υψηλή αγωγιμότητα που σημαίνει χαμηλή τιμή R_s . Συνεπώς, οι οπές μεταφέρονται στην οπίσθια ωμική επαφή με χαμηλό ποσοστό απωλειών.

3. Εκπομπός

Είναι το πάνω στρώμα της διόδου που δέχεται την φωτεινή ακτινοβολία και αποτελείται από έντονα νοθευμένο ημιαγωγό πυριτίου τύπου n, με συγκέντρωση προσμείξεων της τάξης των 10^{20} ατόμων ανά cm^3 . Η αυξημένη συγκέντρωση του N_D^+ οδηγεί σε αύξηση του ύψους του φράγματος δυναμικού της διόδου, μειώνει την R_s ελαχιστοποιώντας τις απώλειες. Μειωμένη συγκέντρωση του N_D^+ οδηγεί σε μεγαλύτερο ενεργό εύρος φβ μετατροπής ($w + L_n + L_p$) και βελτιώνει την ευαισθησία στο ιώδες. Συνήθες πάχος του εκπομπού είναι $0,3\mu\text{m}$. Η έντονη νόθευση του ημιαγωγού επιτρέπει τη δημιουργία ωμικών επαφών με χρήση του κβαντομηχανικού φαινομένου σήραγγος.

4. Ενεργειακό διάκενο και υλικό

Για τη μεταφορά των οπών και ηλεκτρονίων στις ωμικές επαφές, προτιμάται υλικό που διασφαλίζει μεγάλο χρόνο ζωής, ώστε να αποφεύγεται η επανασύνδεση τους. Αυτό ικανοποιείται από υλικά με έμμεσο ενεργειακό διάκενο, όπως το πυρίτιο. Το ενεργειακό διάκενο προσδιορίζει την ικανότητα του υλικού για την απορρόφηση των φωτονίων. Για το ορατό φως, το ενεργειακό φάσμα των φωτονίων κυμαίνεται από 0,6 ως 3,5eV και ιδανική τιμή E_g του ημιαγωγού θα ήταν 1,45eV. Για ταχεία απορρόφηση φωτονίων πρέπει ο τύπος του E_g να είναι άμεσος, διότι δεν απαιτεί συγκεκριμένο ρυθμό ταλαντώσεων πλέγματος.

5. Γεωμετρία των ωμικών επαφών

Το τμήμα της επιφάνειας του εκπομπού που σκιάζεται από τις υπερκείμενες μεταλλικές επαφές δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10% της συνολικής επιφάνειας. Προτιμώνται οι λεπτοί, πυκνοί και ισχυρά αγωγίμοι μεταλλικοί δίαυλοι από αλουμίνιο. Στην πίσω όψη υπάρχει επικάλυψη από φύλλο μετάλλου (συνήθως αργύρου) που βοηθά στην απαγωγή της θερμότητας. Οι οπές φθάνουν στην οπίσθια ωμική επαφή, διαπερνώντας το κρυσταλλικό υπόστρωμα και ένα ποσοστό επανασυνδέεται με ηλεκτρόνια του μετάλλου. Η συμβατική φορά του ρεύματος είναι από τον ημιαγωγό τύπου p προς το εξωτερικό φορτίο.

6. Ελαχιστοποίηση της επανασύνδεσης στην πίσω όψη

Για να μειωθεί ο ρυθμός επανασύνδεσης των οπών με ηλεκτρόνια στην οπίσθια ωμική επαφή, εισάγεται ηλεκτροστατικό πεδίο (back surface field, BSF) στην πίσω επιφάνεια του φβ στοιχείου. Κατασκευάζεται με τη δημιουργία έντονα νοθευμένου ($p^+ = 10^{19}/\text{cm}^3$) στρώματος πάχους 0.5μm, ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στην πίσω επιφάνεια του φβ στοιχείου. Η έντονη νόθευση οδηγεί σε μείωση της αντίστασης σειράς R_s της οπίσθιας ωμικής επαφής. Εναλλακτικά, δημιουργείται λεπτό στρώμα ετεροεπαφής p^+ στην πίσω επιφάνεια, με λεπτό υμένιο από κρύσταλλο με E_g μεγαλύτερο από αυτό του Si. Η ετεροεπαφή εισάγει ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού μόνο για τα ηλεκτρόνια και αποκλείει την ύπαρξη τους στην πίσω επιφάνεια του φβ στοιχείου. Αυτή η κατασκευή λέγεται παράθυρο (window).

7. Μείωση ανακλαστικότητας

Η επιφάνεια του πυριτίου έχει ανακλαστικότητα 40% στα ορατά μήκη κύματος και για τη μείωση του ποσοστού στο 5%, εναποτίθεται υμένιο με τη μέθοδο της επιταξίας από την υγρή ή την αέριο φάση, που αποτελείται από διηλεκτρικό υλικό (TiO_2 , Ta_2O_5 , Si_3N_4) με δείκτη διάθλασης 2 και πάχος 80-100 nm. Επιπρόσθετα, το TiO_2 συμβάλλει στην παθητικοποίηση του ημιαγωγού (μείωση ελεύθερων επιφανειακών ηλεκτρονικών καταστάσεων που οφείλονται στην απότομη περάτωση του πλέγματος του κρυσταλλικού υλικού). Το πλεονέκτημα της είναι ηλεκτροχημική σταθερότητα και μείωση ρυθμού επανασύνδεσης στην επιφάνεια του φβ στοιχείου. Εναλλακτικά, η άνω επιφάνεια γίνεται αδρή με χημική προσβολή ή εγχάραξη με laser, ώστε η τελική γεωμετρία στην επιφάνεια να οδηγεί σε πολλαπλές ανακλάσεις, αυξάνοντας τη διαθλώμενη ακτινοβολία και την απορρόφηση φωτονίων. Γεωμετρίες παγίδευσης του φωτός είναι οι ανεστραμμένες

πυραμίδες, σφαιρικές κοιλότητες με ανοίγματα ανάλογα του μήκους κύματος των φωτονίων. Τα φβ στοιχεία που τις περιλαμβάνουν λέγονται black cells, λόγω του μαύρου χρώματος στην άνω όψη.

8. Περιβάλλον πλαίσιο

Τα φβ στοιχεία τοποθετούνται σε κλειστή κατασκευή που αποτελείται από το περιβάλλον πλαίσιο αλουμινίου και από γυαλί ή διαφανές οργανικό φύλλο στην άνω όψη. Η κατασκευή τα προστατεύει από την υγρασία, ενώ μπορεί να υπάρχει και υποπίεση στο εσωτερικό της για τη μείωση της μεταφοράς θερμότητας από το γυαλί προς τα φβ στοιχεία.

3.10 ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατατάσσονται ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους σε μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου, λεπτών υμενίων (ribbon), αμόρφου πυριτίου (a-Si).

3.10.1 ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Συνήθως έχουν κυκλικό σχήμα διαμέτρου 6'' κατά μέγιστο. Σε ορισμένες περιπτώσεις το κυκλικό σχήμα έχει αποκοπεί σε σχήμα παραλληλόγραμμου για πυκνότερη στοίβαση των στοιχείων ανά πλαίσιο. Ο αρχικός μονοκρύσταλλος αναπτύσσεται με τη μέθοδο Czochralski, και ακολουθεί η κοπή του σε wafers πάχους 300μm, που αποτελούν το βασικό υλικό κατασκευής. Το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας είναι 300 μm.

3.10.2 ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι κρύσταλλοι παράγονται σε μεγάλο ποσοστό από επαναχρησιμοποιημένο πυρίτιο ηλεκτρονικής καθαρότητας. Μικροκρύσταλλοι Si τοποθετούνται σε καλούπι 50x50cm και θερμαίνονται στο σημείο τήξης και δημιουργείται πολυκρύσταλλος που αποτελείται από αυτοτελείς μονοκρύσταλλους. Ο πολυκρύσταλλος κόβεται με αδαμαντοτροχούς σε ράβδους 15x15cm, που κόβονται σε wafers πάχους 350μm και αποτελούν το βασικό υλικό κατασκευής. Υπάρχει και εναλλακτική τεχνική, κατά την οποία οι μικροκρύσταλλοι Si τοποθετούνται σε λεπτό καλούπι, θερμαίνονται στο σημείο τήξης και με διεργασία πυροσυσσωμάτωσης διευρύνουν το μέγεθος τους και σχηματίζεται το wafer. Η ποιότητα του τελευταίου εξαρτάται από την ομοιομορφία των προσμείξεων, το μέγεθος των επιμέρους μονοκρυστάλλων, την κοινή περιοχή των εφαιπτόμενων μονοκρυσταλλικών περιοχών. Τα

μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας κυμαίνονται από 50 ως 280 μm (για την ανώτερη ποιότητα). Επιπρόσθετα, ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας και κατ' επέκταση ο ρυθμός επανασύνδεσης εξαρτώνται από την ποιότητα του υλικού.

3.10.3 ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ (RIBBON)

Η κατασκευή τους γίνεται με βιομηχανικές τεχνικές, μεγάλης κλίμακας παραγωγής. Τέτοιες τεχνικές είναι η επιταξία υγρής και αερίου φάσης. Ερευνητική τεχνική αποτελεί η μοριακή επιταξία δέσμης. Κατασκευάζονται από την εναπόθεση 2 λεπτών υμενίων πάχους 1 μm από ημιαγωγούς τύπου p και n (ομοεπαφή), σε υπόστρωμα από υάλινη επιφάνεια ή κρύσταλλο ημιαγωγού. Τα υμένια τοποθετούνται στην άνω επιφάνεια και εγκαθιστούν το ηλ/κό φράγμα δυναμικού. Αν τα υμένια αποτελούνται από διαφορετικούς ημιαγωγούς τότε η επαφή p-n λέγεται ετεροεπαφή. Κατά την κατασκευή τους μπορεί να χρησιμοποιούνται τοξικά υλικά, όπως το Cd και για το λόγο αυτό πρέπει να είναι γνωστή η σύσταση τους, για την εφαρμογή τους σε κατάλληλη χρήση.

3.10.4 ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΜΟΡΦΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (a-Si)

Χαρακτηριστικό τους είναι η χαμηλή απόδοση, 6%. Πλεονέκτημα τους είναι ότι διατηρούν την απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Το άμορφο πυρίτιο παρασκευάζεται από τη συμπύκνωση των προϊόντων θερμικής διάσπασης αέριων πυριτιούχων ενώσεων. Οι συνθήκες παραγωγής του επηρεάζουν την κινητικότητα ηλεκτρικών φορέων και τα μήκη διάχυσης, που έχουν μειωμένες τιμές με συνέπεια υψηλό ρυθμό επανασύνδεσης. Θετικά στοιχεία είναι ότι έχει μεγάλη τιμή ενεργειακού διακένου $E_g = 1.45 \text{ eV}$, στην οποία οφείλεται η σταθερή απόδοση του στις υψηλές θερμοκρασίες. Έχει υψηλό συντελεστή απορρόφησης με αποτέλεσμα να έχει συμπεριφορά ανάλογη με υλικά που έχουν άμεσο ενεργειακό διάκενο. Για το λόγο αυτό επιτυγχάνει πλήρη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε βάθος 1 μm από την επιφάνεια. Προσθήκη ατόμων υδρογόνου στο πλέγμα του βελτιώνει τις ηλεκτρικές του ιδιότητες (a-Si:H). Οι φωτοβολταϊκές διατάξεις από άμορφο πυρίτιο βασίζουν τη λειτουργία τους σε φράγματα δυναμικού διόδων Schottky και λεπτό στρώμα (1 μm) a-Si εναποτίθεται σε φύλλο ανοξειδωτού χάλυβα (υπόστρωμα και οπίσθια ωμική επαφή).

3.11 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Κάθε φβ στοιχείο όταν προσπίπτει σε αυτό η ηλιακή ακτινοβολία, έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

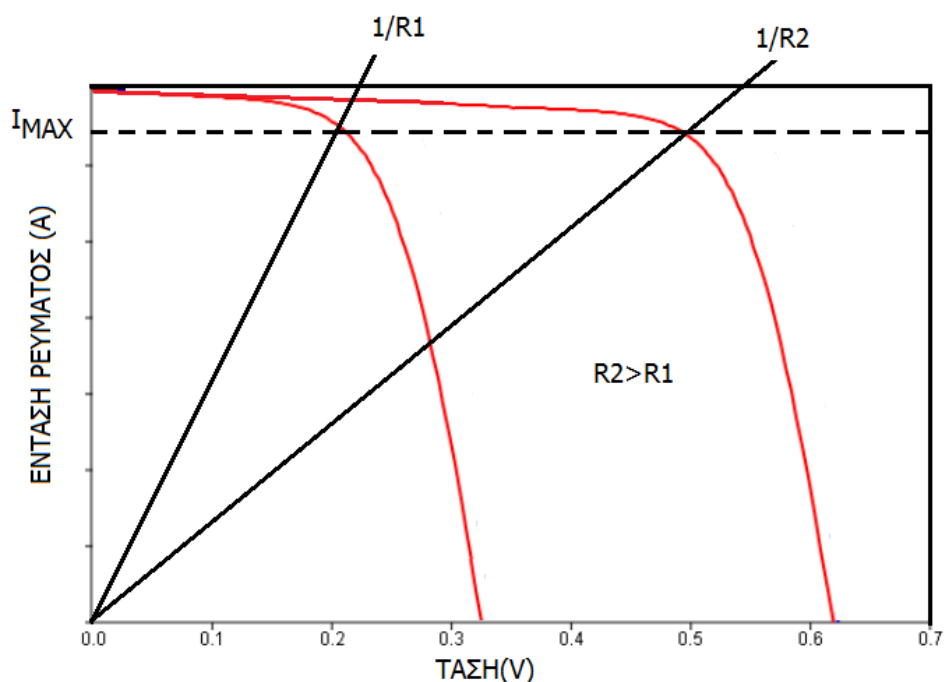
- Η τάση στα άκρα του είναι 0,5 V.
- Η ένταση του ρεύματος που το διαρρέει κυμαίνεται από 4 ως 7 A, ανάλογα την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η μέγιστη ισχύς του είναι περίπου 3 W.

Το φβ πλαίσιο (pv module) αποτελείται από πολλά φβ στοιχεία, απολύτως όμοια, τα οποία συνδέονται σε σειρά για την αύξηση της παρεχόμενης ισχύος, δημιουργώντας μια στοιχειοσειρά.

Όταν τα εν σειρά συνδεδεμένα φβ στοιχεία είναι ανόμοια λόγω κατασκευής ή για λόγους τοπικής σκίασης, τότε για μικρές τιμές της αντίστασης φορτίου, ενδέχεται τα στοιχεία που είναι λιγότερο αποδοτικά να πολωθούν ανάστροφα, οπότε θα καταναλώνουν την ισχύ που παράγεται από τα πιο αποδοτικά στοιχεία. Το αποτέλεσμα είναι η θέρμανση των στοιχείων αυτών (θερμά σημεία - hot spots) με επόμενο βήμα την υπερθέρμανση και καταστροφή τους. Συνεπώς, όλο το φβ πλαίσιο καταστρέφεται. Για την προστασία έναντι των θερμών σημείων των πλαισίων, **δίοδοι παράκαμψης** (shunt diodes) τοποθετούνται παράλληλα στη στοιχειοσειρά του φβ πλαισίου. Η δίοδος παράκαμψης πολώνεται ορθά, όταν κάποιο από τα στοιχεία πολωθεί ανάστροφα. Συνήθως σε κάθε φβ πλαίσιο υπάρχουν δύο δίοδοι παράκαμψης. Αν το φβ πλαίσιο περιέχει περιττό αριθμό στηλών, στην περίπτωση λειτουργίας της διόδου, μόνο το ένα τρίτο του συνόλου των φβ στοιχείων του πλαισίου θα λειτουργούν κανονικά. Τα υπόλοιπα θα έχουν παρακαμφθεί από τη δίοδο. Αν το φβ πλαίσιο περιέχει άρτιο αριθμό στηλών (τέσσερις στήλες), στην περίπτωση λειτουργίας της διόδου μόνο το ένα δεύτερο του συνόλου των στοιχείων του πλαισίου θα λειτουργούν κανονικά. Τα υπόλοιπα θα έχουν παρακαμφθεί από τη δίοδο. Γενικότερα, στην περίπτωση των πλαισίων με άρτιο αριθμό στηλών, το πλήθος των διόδων είναι ίσο με το λόγο του πλήθους των στηλών δια 2. Υπάρχουν όμως και πλαίσια, που για λόγους αυξημένης αξιοπιστίας διαθέτουν μία δίοδο ανά στήλη.

Τα φβ πλαίσια ονομαστικής τάσης 24 V αποτελούνται από 72 φβ στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Καθώς αυξάνει ο αριθμός των στοιχείων της στοιχειοσειράς, αυξάνει

και η τιμή της αντίστασης προσαρμογής φορτίου, που απαιτείται για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Η κλίση της ευθείας που συνδέει την αρχή των αξόνων με το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος είναι αντιστρόφως ανάλογη της **αντίστασης προσαρμογής** (σχήμα 3.16). Η αντίσταση προσαρμογής R_2 (2 φβ στοιχεία σε σειρά) είναι διπλάσια από την R_1 (1 φβ στοιχείο).



Σχήμα 3.16. Εξάρτηση της αντίστασης προσαρμογής από τον αριθμό των εν σειρά συνδεδεμένων φβ στοιχείων του πλαισίου.

Οι εσωτερικές συγκολλήσεις των φβ στοιχείων πρέπει να προστατεύονται από ηλεκτροχημική διάβρωση. Για το σκοπό αυτό, αλλά και για μηχανική σταθερότητα της δομής, τα στοιχεία εγκιβωτίζονται σε **διαφανή ρητίνη** που αποκλείει την είσοδο υγρασίας στο εσωτερικό τους. Τα δύο άκρα της στοιχειοσειράς καταλήγουν στο κιβώτιο σύνδεσης κάθε πλαισίου, όπου συνδέονται και οι δίοδοι παράκαμψης του πλαισίου. Η ρητίνη με τα φβ στοιχεία εγκλείονται σε κατασκευή που περιβάλλεται περιμετρικά από μεταλλικό σκελετό από **ανοδιωμένο αλουμίνιο** και στην άνω όψη υπάρχει υάλινη επιφάνεια. Μεταξύ ρητίνης και υάλινης επιφάνειας μεσολαβεί **αντιανακλαστική επίστρωση**, που παγιδεύει την ανακλώμενη από τα στοιχεία ακτινοβολία.

Μακροπρόθεσμα, η **φυσική γήρανση** του πλαισίου με το χρόνο έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύος αιχμής του (συνήθως 1% το χρόνο) και αυτό οφείλεται κυρίως στους εξής λόγους:

- ηλεκτροχημική διάβρωση (οξειδωση) των ωμικών επαφών στην άνω όψη των στοιχείων, που αυξάνει την αντίσταση σειράς Rs.
- μεταβολή στην κατανομή των προσμείξεων εκατέρωθεν της επαφής p-n, λόγω διάχυσης, που σημαίνει μείωση του ύψους του φράγματος δυναμικού.
- Αλλοίωση των οπτικών ιδιοτήτων της ρητίνης εγκιβωτισμού λόγω της μακρόχρονης έκθεσης στη UV ακτινοβολία.

Κάθε φβ πλαίσιο ελέγχεται από τον κατασκευαστή του σε συνθήκες STC, με γρήγορη δοκιμή, γνωστή ως **flash report**, κατά την οποία το πλαίσιο δέχεται βραχύ φωτεινό παλμό 1000W/m^2 και καταγράφεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Τα δεδομένα χρησιμεύουν στον εγκαταστάτη για την ταξινόμηση των πλαισίων, έτσι ώστε κάθε συστοιχία (πλαίσια εν σειρά συνδεδεμένα) να αποτελείται από όμοια πλαίσια, κάτι απολύτως χρήσιμο για τη μεγιστοποίηση της παρεχόμενης ισχύος της εγκατάστασης.

3.12 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Θερμοκρασία φβ στοιχείων

Λόγω αύξησης της θερμοκρασίας των φβ στοιχείων, οι απώλειες της απόδοσης φθάνουν στο 10-13% για στοιχεία μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου και 8% για άμορφο πυρίτιο.

Soiling

Σκόνη που επικάθεται στα πλαίσια σε συνδυασμό με την βραδινή υγρασία σχηματίζουν ένα στρώμα που ανακλά ή απορροφά την ακτινοβολία, με συνέπεια τη μείωση της ακτινοβολίας που δέχονται τα φβ στοιχεία. Οι απώλειες είναι της τάξης του 13-15% για οριζόντια πλαίσια. Η σκόνη μπορεί να προέρχεται από πολύ μακρινές περιοχές λόγω των νότιων ανέμων, από αγροτικές εργασίες ή από τη γύρη των φυτών. Σε αστικό περιβάλλον θεωρούμε απώλειες της τάξης του 7%.

Ηλεκτρικές απώλειες

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ωμικές απώλειες (Joule) των καλωδιώσεων, αλλά και η μείωση της ισχύς παράλληλα συνδεδεμένων συστοιχιών που ελέγχονται από τον ίδιο αλγόριθμο MPPT, εξαιτίας κάποιας λιγότερο παραγωγικής συστοιχίας. Παράγοντες όπως μη καλή ταξινόμηση των πλαισίων της συστοιχίας, σκίαση, διαφοροποίηση στην εγκατάσταση των πλαισίων (κλίση, προσανατολισμός, διαφορά στο ύψος) επιδρούν στην διαφοροποίηση της παραγόμενης ισχύος από τη συστοιχία. Οι απώλειες αυτές είναι της τάξης του 5%.

3.13 ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΕΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Οι συστοιχίες που συνδέονται παράλληλα στο κιβώτιο συνδεσμολογίας (combiner box), πρέπει να είναι όμοιες. Διαφορετικά, για μεγάλες τιμές της αντίστασης φορτίου, η λιγότερο αποδοτική συστοιχία ενδέχεται να πολωθεί ανάστροφα και να καταναλώνει την παραγόμενη ισχύ από την περισσότερο αποδοτική συστοιχία. Το αποτέλεσμα είναι η θέρμανση αυτών των πλαισίων και η ενδεχόμενη καταστροφή τους. Για το λόγο αυτό τοποθετούνται **δίοδοι αντεπιστροφής** ή φραγής (blocking diodes) σε σειρά με κάθε συστοιχία. Μειονέκτημα τους είναι ότι διαρρέονται από υψηλή τιμή ρεύματος και καταναλώνουν ισχύ, μειώνοντας το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΦΒ
ΠΛΑΙΣΙΩΝ (PID)

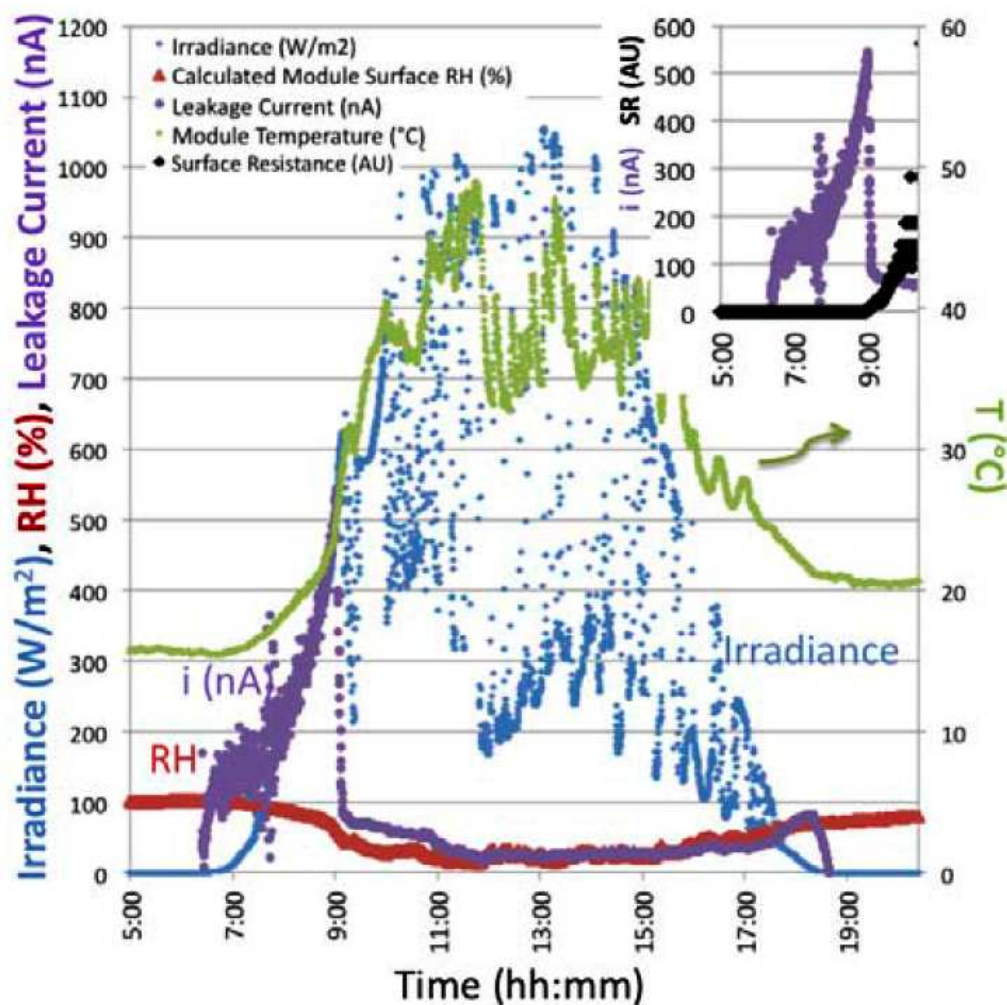
Το φαινόμενο PID προκαλείται από ανεπιθύμητα ρεύματα διαρροής στην επιφάνεια του φβ πλαισίου. Αρνητικά φορτισμένοι φορείς φορτίων διαρρέουν μέσω της ρητίνης εγκιβωτισμού και του γειωμένου ανοδιωμένου σκελετού από αλουμίνιο προς τη γη. Αυτή η διαρροή φορτίου προκαλεί σημαντικές απώλειες απόδοσης των πλαισίων και ο ρυθμός της επερχόμενης γήρανσης των φβ πλαισίων αυξάνει ανεξέλεγκτα. Το φαινόμενο PID παρατηρείται σε όλες τις τεχνολογίες φβ στοιχείων και επηρεάζεται από:

- Σχετική Υγρασία, άλατα στην επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου
- Υλικά εγκιβωτισμού των φβ στοιχείων
- Αντιανακλαστική επίστρωση (ARC) SiNx
- Τάση συστήματος

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν υποδεικνύουν αν ένα πλαίσιο είναι επιρρεπές να εμφανίσει υποβάθμιση PID και δεν δείχνουν τη διάρκεια ζωής του πλαισίου. Δοκιμές που έγιναν σε στοιχεία με επιλεκτικό και ομογενή εκπομπό δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές. Εκτός από τις καιρικές συνθήκες, τα πλαίσια δείχνουν και ένα παράγοντα “αυτοθεραπείας” που κάνει πιο απρόβλεπτη την συμπεριφορά του πλαισίου. (Koch et al.2011).

4.1 ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

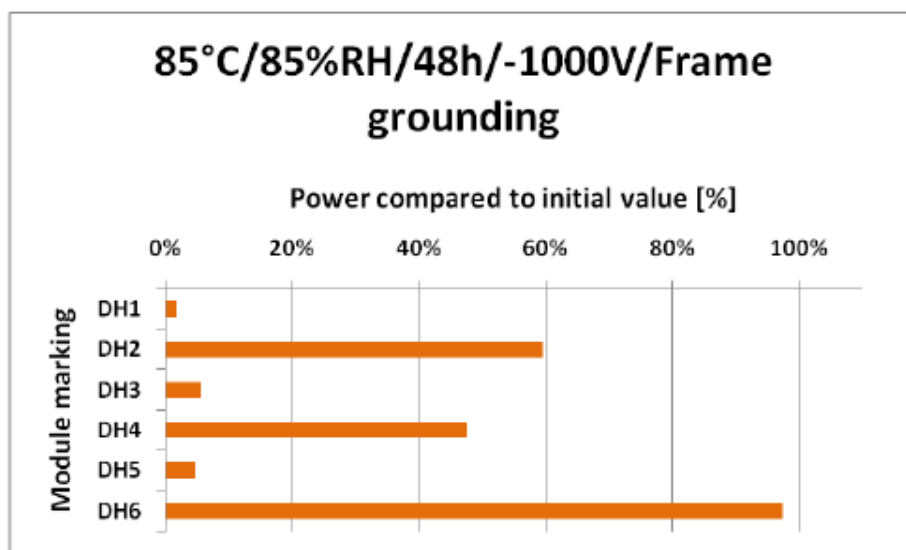
Πειραματικές μετρήσεις (Hacke et al, 2011) έδειξαν υψηλές τιμές του ρεύματος διαρροής τις πρώτες πρωινές ώρες, κατά τις οποίες η σχετική υγρασία είναι υψηλή και στρώμα υδροσταγονιδίων έχει εναποτεθεί πάνω στο φβ πλαίσιο. Το σχήμα 4.1 δείχνει το ρεύμα διαρροής ενός ΦΒ πλαισίου στη Φλόριντα, ΗΠΑ. Με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας, η τάση του φβ πλαισίου αυξάνει και το ρεύμα διαρροής επίσης αυξάνει. Έπειτα, το ρεύμα διαρροής μειώνεται με υψηλό ρυθμό, καθώς εξατμίζεται η υγρασία από την επιφάνεια του πλαισίου και στεγνώνει. Τότε αυξάνεται η επιφανειακή του αντίσταση και διακόπτεται η σύνδεση του κυκλώματος με τη γη. Παρά το γεγονός ότι η αγωγιμότητα της υάλινης επιφάνειας και του εσωτερικού αυξάνει με τη θερμοκρασία, το ρεύμα διαρροής εξαρτάται μόνο από τη σχετική υγρασία. Αυτό φαίνεται στο σχήμα από τη χαμηλή τιμή του ρεύματος διαρροής κατά τις μεσημβρινές ώρες. Συνεπώς, ένα υγρό περιβάλλον ενεργοποιεί τους μηχανισμούς υποβάθμισης του συστήματος πολύ περισσότερο σε σχέση με ένα ξηρό, ζεστό περιβάλλον (Hacke, et al,2011).



Σχήμα 4.1. Πειραματικές μετρήσεις υπό συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας (Πηγή: Hacke et al, 2011).

Όμοια με τη σχετική υγρασία, ανάλογο μηχανισμό αγωγιμότητας δημιουργούν οι αποθέσεις αλάτων, σκόνης επάνω στην επιφάνεια του φβ πλαισίου. Οι αποθέσεις αυτές μειώνουν την αντίσταση της υάλινης επιφάνειας και ευνοείται η σύνδεση του κυκλώματος με τη γη μέσω του γειωμένου σκελετού από αλουμίνιο.

Την αρνητική επίδραση της σχετικής υγρασίας υποδεικνύουν μια σειρά από μετρήσεις από τους Koch et al.2011. Φβ πλαίσια δοκιμάστηκαν υπό διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας – υγρασίας. Σε όλα γειώθηκε ο σκελετός αλουμινίου και εφαρμόστηκε τάση -1000V. Μετά από 48 ώρες, υπό σχετική υγρασία 20% και θερμοκρασία περιβάλλοντος 85°C, η απόδοση των πλαισίων σχεδόν έμεινε αμετάβλητη (Koch et al.2011). Όμως, με αύξηση της σχετικής υγρασίας στο 85% παρατηρήθηκε πολύ μεγάλη πτώση της απόδοσης, η οποία ήταν διαφορετική σε κάθε πλαίσιο (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2. Πτώση απόδοσης πλαισίων με συνθήκες υγρασίας 85% (Koch et al.2011)

Η επίδραση της υγρασίας εικάζεται ότι συμβαίνει μέσω 2 εκδοχών: είτε η διείσδυση της υγρασίας υποστηρίζει τη μεταφορά ιόντων νατρίου ή λόγω συμπύκνωσης στην επιφάνεια του πλαισίου μεταβάλλονται οι συνθήκες επαφής. Αλληλεπίδραση των δύο είναι πιθανή.

Στο επόμενο βήμα εφαρμόστηκαν διαφορετικές μέθοδοι γείωσης. Η πρώτη στο σκελετό από ανοδιωμένο αλουμίνιο και η δεύτερη σε όλη την επιφάνεια του φβ πλαισίου. Στην πρώτη μέθοδο, παρατηρήθηκε ότι επηρεάστηκαν κυρίως τα στοιχεία που ήταν στο κατώτερο μέρος του πλαισίου. Στη δεύτερη μέθοδο δεν διαπιστώθηκε κάποια συγκεκριμένη περιοχή στην οποία επηρεάστηκαν τα στοιχεία. Παρατηρήθηκε μια τυχαία κατανομή των στοιχείων που επηρεάστηκαν, σε ένα σχέδιο όπως το σχήμα του σκακιού, που υποδεικνύει τη διαφορετική συμπεριφορά κάθε στοιχείου (Koch et al. 2011).

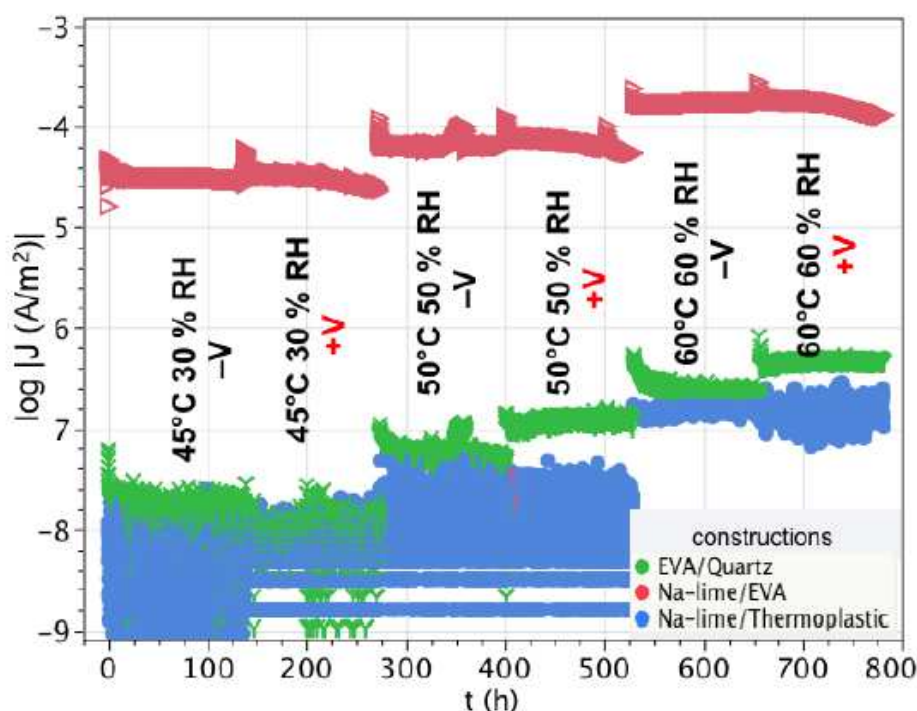
4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα φβ στοιχεία συνήθως εγκιβωτίζονται χρησιμοποιώντας υλικό (EVA-ethylene-vinyl acetate) για μηχανική υποστήριξη, ηλεκτρική μόνωση και προστασία έναντι περιβαλλοντικής έκθεσης. Το υλικό (EVA) όταν εκτεθεί σε ατμοσφαιρική υγρασία και υπεριώδη ακτινοβολία, αποσυντίθεται και παράγεται οξικό οξύ (acetic acid), μειώνοντας το pH και αυξάνοντας το ρυθμό επιφανειακής διάβρωσης των εγκιβωτισμένων φβ στοιχείων. Παρά το γεγονός ότι το οξύ παράγεται με πολύ αργό ρυθμό, δρα ως καταλύτης στις αντιδράσεις που οδηγούν σε ταχεία επιδείνωση της λειτουργίας του φβ στοιχείου.

ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ (PID)

Ένα άλλο ζήτημα είναι η μετάβαση του EVA σε ύαλο, η οποία όπως μετριέται με χρήση μηχανικών μεθόδων, ξεκινά σε θερμοκρασία περίπου -15°C , που παρατηρείται για παρατεταμένες χρονικές περιόδους σε ορισμένες κλίματα. Κάτω από αυτή τη θερμοκρασία, λόγω της υαλώδους μεταπτώσεως, το υλικό είναι πιο ευάλωτο σε μηχανική καταπόνηση από χιόνι ή ισχυρούς ανέμους (Kemp et al. 2006).

Για την επίδραση των συνθηκών θερμοκρασίας/υγρασίας σε διαφορετικά υλικά εγκιβωτισμού των φβ στοιχείων (σχήμα 4.3), δοκιμάστηκαν φβ πλαίσια που περιείχαν μόνο ένα φβ στοιχείο, αλλά διαφορετική ρητίνη εγκιβωτισμού. Συγκεκριμένα, οι τρεις συνδυασμοί που δοκιμάστηκαν ήταν: EVA / χαλαζίας, Na-lime / EVA, Na-lime / θερμοπλαστικό υλικό.



Σχήμα 4.3. Ρεύμα διαρροής σε διαφορετικά υλικά εγκιβωτισμού (Πηγή: Hacke et al, 2011).

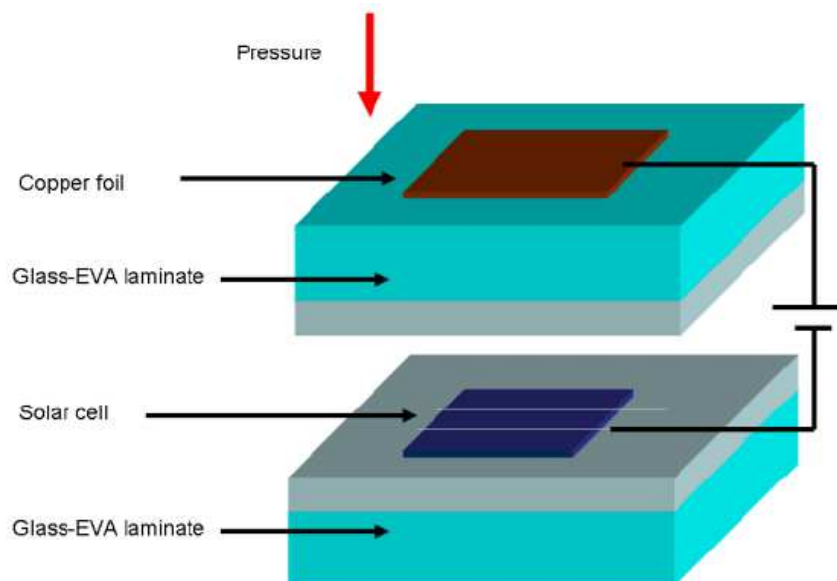
Εφαρμόστηκε εναλλάξ τάση -1000V και $+1000\text{V}$ και αυτό επαναλήφθηκε, υπό προοδευτικά αυξανόμενες συνθήκες θερμοκρασίας/υγρασίας. Η επιφάνεια των πλαισίων επικαλύφθηκε με αγωγίμη πάστα, ώστε να αυξηθεί η αγωγιμότητα της και να ενεργοποιηθούν οι μηχανισμοί υποβάθμισης, εξαιτίας ρεύματος διαρροής διαμέσου της επιφάνειας. Οι μεταβολές του συντελεστή πλήρωσης υποδεικνύουν απώλειες που σχετίζονται με την παράλληλη αντίσταση (shunt resistance) και επανασύνδεση φορέων, αλλά όχι με αντίσταση σειράς. Βρέθηκε ότι ο συντελεστής πλήρωσης (FF) δεν ανακάττει πλήρως μετά την πρώτη εφαρμογή της θετικής πόλωσης στους 45°C , 30%RH. Ο συντελεστής χειροτερεύει περαιτέρω μετά από κάθε

επόμενο κύκλο επαναφοράς +1000V, καθώς και υπό αυξανόμενη θερμοκρασία/υγρασία. Από την άλλη πλευρά, τα φβ στοιχεία που ήταν εγκιβωτισμένα σε θερμοπλαστικό υλικό υψηλής τιμής ηλεκτρικής αντίστασης ή σε χαλαζία, παρουσίασαν τιμές ρεύματος διαρροής που ήταν τρεις τάξεις μεγέθους χαμηλότερο και δεν παρουσίασαν υποβάθμιση (Hacke et al, 2011).

Μεμβράνη από θερμοπλαστικό υλικό χρησιμοποιείται στο υλικό εγκιβωτισμού των πλαισίων, αποτρέποντας την εμφάνιση ρευμάτων διαρροής. Δοκιμές έδειξαν ότι οι επιδράσεις PID (http://www.pv-tech.org/product_reviews/wackers_tectosil_enca_psulant_offers_pid_protection) μπορεί να αποτραπούν μέσω της προσθήκης αυτής της μεμβράνης κατά την κατασκευή του πλαισίου. Η μεμβράνη αυτή είναι ευλύγιστη, υψηλής διαφάνειας και ηλεκτρικά μονωτική αποτελούμενη από πολυμερές με βάση το πυρίτιο. Δεν περιέχει διαβρωτικές ουσίες και είναι κατάλληλη για όλους τους τύπους των φβ στοιχείων.

Σημαντική παρατήρηση είναι ότι η υποβάθμιση της ισχύος ενός φβ πλαισίου δεν είναι ανάλογη με την τιμή του ρεύματος διαρροής του πλαισίου, δηλαδή με το ποσό του φορτίου που διέρρευσε στη γη. Συνεχόμενη καταπόνηση του πλαισίου υπό συνθήκες αυξημένης υγρασίας και τάσης είναι πιο επιβαρυντικές στην υποβάθμιση της ισχύος του, σε σχέση με περιόδους που η καταπόνηση επιβάλλεται σε διακοπτόμενες περιόδους ή περιόδους υγρές που εναλλάσσονται με ξηρές. (Hacke et al, 2011).

Ο στόχος των πρώτων πειραμάτων από Koch et al. 2011 ήταν η εύρεση υλικού εγκιβωτισμού, το οποίο είναι ικανό να πολώσει τα φβ στοιχεία όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Τρία διαφορετικά υλικά αξιολογήθηκαν όσο αφορά τη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια των PID δοκιμών. Η διαστρωμάτωση των υλικών αρχικά ήταν στρώμα υάλου - EVA – φβ στοιχείο - EVA - οπίσθιο φύλλο, που συμπιέστηκαν μηχανικά (σχήμα 4.4), με τρόπο που επέτρεπε τη λήψη του φβ στοιχείου για εξέταση, μετά τη δοκιμή. Η δοκιμή εκτελέστηκε σε θάλαμο με θερμοκρασία 85 °C και σχετική υγρασία 85%, το οποίο αντιστοιχεί στις συνθήκες σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61215. Οι πρόσθιες επιφάνειες των δειγμάτων καλύφθηκαν πλήρως με φύλλο χαλκού και συνδέθηκαν με το θετικό πόλο ενός τροφοδοτικού 200V και οι επαφές του στοιχείου συνδέθηκαν στον αρνητικό πόλο. Τα αποτελέσματα (Πίνακας 4.1) δείχνουν τις μέσες τιμές ισχύος του φβ στοιχείου, πριν και μετά τη δοκιμή. Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι τα υλικά PVB και EVA προωθούν τη διαδικασία πόλωσης, ενώ τα δείγματα με υλικό πυριτίου εμποδίζουν την επίδραση PID. (Koch et al.2011).



Σχήμα 4.4. Δοκιμή με διαστρωμάτωση υπό μηχανική πίεση (Koch et al.2011).

Πίνακας 4.1: Μέση ισχύς του φβ στοιχείου με διαφορετικά υλικά εγκιβωτισμού (διαστρωμάτωση υπό μηχανική πίεση), μετά από 48 h PID δοκιμών με 200V (Koch et al.2011).

ΥΛΙΚΟ	Μέση αρχική ισχύς φβ στοιχείου [W]	Μέση ισχύς φβ στοιχείου [W] μετά από 48h PID δοκιμή	Απόκλιση [%]
EVA	1.71	0.15	-91.35
PVB	1.71	0.01	-99.31
Silicone	1.65	1.62	-2.08

Μετά από 48 ώρες βρέθηκε ότι τα φβ στοιχεία είχαν ανομοιογενή πόλωση, λόγω της επαφής και των ιδιοτήτων πρόσφυσης που αλλάζουν σημαντικά κάτω από τις δεδομένες συνθήκες θερμοκρασίας-υγρασίας, μηχανικής πίεσης, ενώ κατά τη συνέχιση της εφαρμογής τάσης, η ένδειξη αυτή εξαφανίστηκε. Συνεπώς, η έρευνα δεν συνεχίστηκε με τη διαστρωμάτωση υπό μηχανική πίεση (Koch et al.2011).

ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ (PID)

Δοκιμές σε δείγματα φβ πλαισίων επικαλυμένα με polyvinyl butyral (PVB) έδειξαν ότι παρουσιάζουν πολύ υψηλή επιδεκτικότητα στους μηχανισμούς υποβάθμισης PID. Το PVB έχει πολύ χαμηλή αντίσταση στην εισαγωγή υγρασίας και το υψηλό ποσοστό υγρασίας αυξάνει την αγωγιμότητα. Άλλες ρητίνες εγκιβωτισμού που είναι αδιαπέρατες στους φορείς φορτίων έδειξαν ότι δεν επηρεάζονται από τους μηχανισμούς PID (Advanced Energy Industries Inc. 2013).

Ο ρόλος των ιόντων νατρίου είναι ακόμα ασαφής, αλλά κατά τη διάρκεια των ερευνών σε επίπεδο κυττάρου έγινε σαφές ότι είναι αναγκαία η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης του κυττάρου με τα υλικά του πλαισίου και με το περιβάλλον (Koch et al. 2011). Έχει παρατηρηθεί υψηλή συγκέντρωση Na και αυξανόμενων επιπέδων χαλκού Cu στην επιφάνεια και υπο-επιφάνεια του φβ στοιχείου μετά από εφαρμογή αρνητικής πόλωσης στο ενεργό στρώμα των πολυκρυσταλλικών στοιχείων σε 85°C/85%RH με φασματοσκοπία μάζας δευτερογενών ιόντων (SIMS). (Hacke et al, 2010). Φασματοσκοπία ηλεκτρονίων Auger υποδεικνύει κατακάθιση του νατρίου στην επιφάνεια του φβ στοιχείου, στο νιτρίδιο πυριτίου. Πιστεύεται ότι διάφορα μεταλλικά ιόντα, εκτός από το Na, από τον μεγάλο όγκο των προσμείξεων, το γυαλί νατρασβέστου, έλκονται ηλεκτροστατικά προς την επιφάνεια. Το ενεργό στρώμα στα -600 V μπορεί να λειτουργήσει ως πηγή ηλεκτρονίων, έτσι ώστε τα ιόντα να μειώνονται και να αποτίθενται. Ωστόσο, δεν είναι ακόμη σαφές τι προκαλεί στην επαφή p-n, τυπικά 0,2 - 0,3 μm κάτω από την επιφάνεια του πυριτίου, να εμφανίζει διαρροή από το μηχανισμό PID (Hacke et al, 2011). Χρησιμοποιώντας διοξείδιο του πυριτίου, ως φράγμα προστασίας από τη διάχυση των ιόντων νατρίου, μεταξύ της υάλινης επιφάνειας και του ενεργού στρώματος του ημιαγωγού, έδειξε ότι αποτρέπει την εμφάνιση μηχανισμών υποβάθμισης. Παρόλα αυτά το φράγμα ενδέχεται να εμφανίσει διαρροές “pin-hole”.

4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ (ARC) SiNx

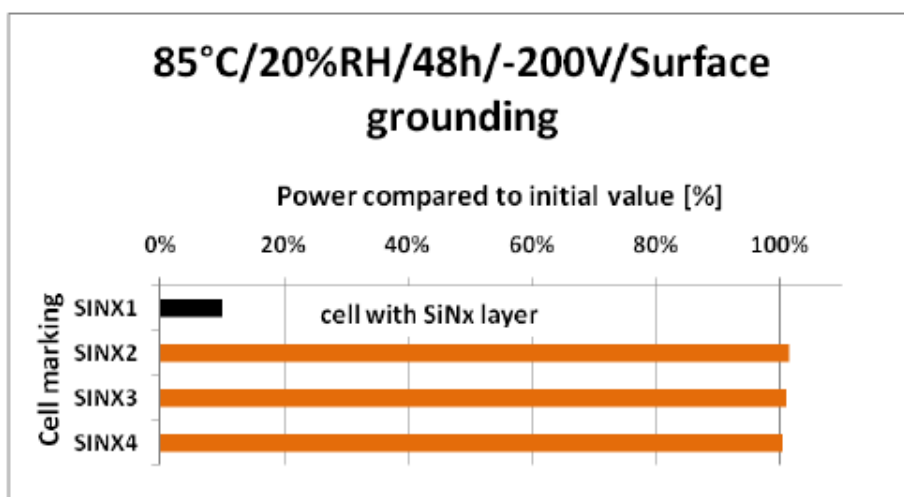
Ο αντιανακλαστικός μανδύας (ARC) αυξάνει το ποσοστό απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και συνεπώς αυξάνει την ισχύ του συστήματος. Όμως έχει παρατηρηθεί ότι κάποιες ιδιότητες του επηρεάζουν τους μηχανισμούς PID. Από μετρήσεις φασματοσκοπίας (SIMS –secondary ion mass spectrometry) βρέθηκε ότι το νάτριο που προέρχεται από την υάλινη επιφάνεια συγκεντρώνεται στα ανώτερα στρώματα του φβ στοιχείου (Advanced Energy Industries Inc. 2013).

ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ (PID)

Δοκιμές έδειξαν ότι η επίδραση PID συμβαίνει όταν το υλικό εγκιβωτισμού και το στρώμα νιτριδίου του πυριτίου (silicon nitride) βρίσκονται σε επαφή. Οι Koch et al. 2011 διαπίστωσαν ότι τα ιόντα νατρίου διαχέονται από την εμπρόσθια υάλινη επιφάνεια του φβ πλαισίου προς την επιφάνεια του στοιχείου υπό την επίδραση δυναμικού.

Η ταχύτητα των θετικά φορτισμένων ιόντων επηρεάζεται κυρίως από το υλικό εγκιβωτισμού, τη θερμοκρασία, την υγρασία και την εφαρμοζόμενη τάση. Όταν τα ιόντα νατρίου φθάσουν στην αντιανακλαστική επίστρωση (ARC) SiNx συμβαίνουν διάφορες εκδοχές; από τη μία πλευρά τα φορτισμένα ιόντα συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του στρώματος δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο που οδηγεί σε αυξημένο ρυθμό επανασύνδεσης στην επιφάνεια. Από την άλλη πλευρά, το νάτριο μπορεί να διαχέεται εντός του κρυστάλλου και να ενεργεί ως άτομο δότης. Αυτό οδηγεί σε μια αυξανόμενη συγκέντρωση των ιόντων νατρίου στον εκπομπό, οπότε το φορτίο τελικά γίνεται ουδέτερο, η επαφή p-n θα μειωθεί, το ίδιο και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Για την εξέταση αυτών των εκδοχών, φβ στοιχεία με και χωρίς μεμβράνη εξετάστηκαν επί 48 h σε ξηρές συνθήκες (85°C and 20% RH). Τα δείγματα που δεν περιείχαν το στρώμα SiNx δεν εμφάνισαν επιδράσεις PID (Σχήμα 4.5). Τα δείγματα που περιείχαν το στρώμα SiNx εμφάνισαν απώλειες απόδοσης μεγαλύτερες από 90% (Koch et al.2011).



Σχήμα 4.5: Τα στοιχεία χωρίς SiNx-ARC δεν παρουσιάζουν μείωση απόδοσης λόγω των δοκιμών PID (Koch et al.2011).

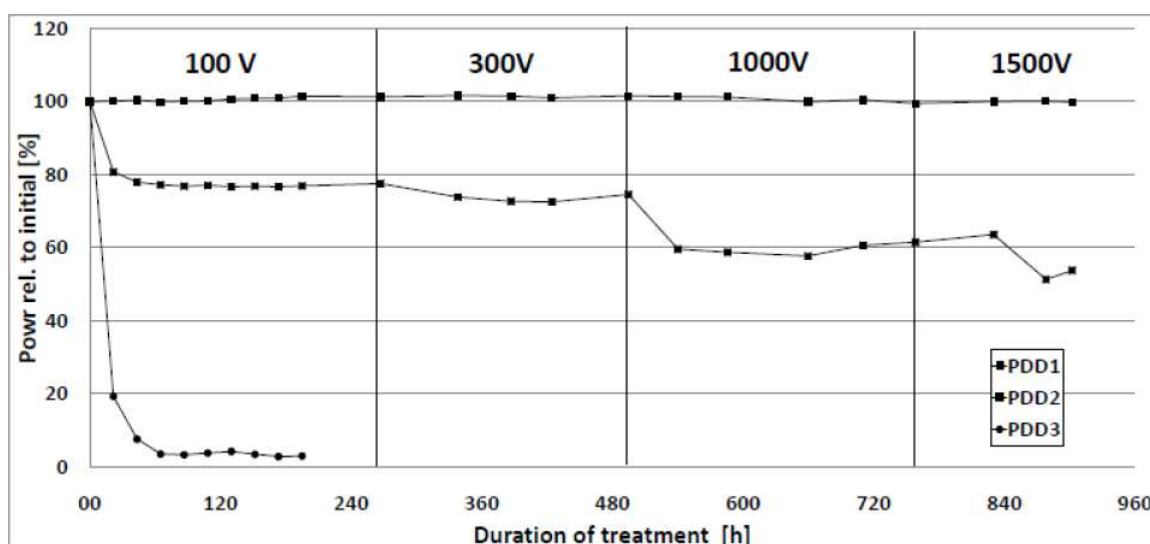
Φασματοσκοπικές αναλύσεις έδειξαν συγκέντρωση ιόντων νατρίου δέκα φορές μεγαλύτερη εκείνης των στοιχείων χωρίς SiNx-ARC. Συμπερασματικά, οι δοκιμές δείχνουν

ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ (PID)

ότι το στρώμα SiNx ευθύνεται για τις PID επιδράσεις και τα ιόντα νατρίου κατευθύνονται προς το φβ στοιχείο με την εφαρμογή τάσης (Koch et al.2011).

4.4 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΑΣΗ

Διάφορα πλαίσια εξετάστηκαν υπό συνθήκες βηματικά αυξανόμενης τάσης. Στο σχήμα 4.6 φαίνεται ότι η μείωση της απόδοσης σε μερικά πλαίσια ξεκινά σε πολύ μικρές τάσεις, άλλα δεν επηρεάζονται, ενώ σε άλλα πέφτει σταδιακά η απόδοση. Μια ερμηνεία της εξάρτησης από την τάση είναι επιδράσεις χωρητικότητας. Η κίνηση των ιόντων προκαλούμενη από ηλεκτρικό πεδίο οδηγεί σε κορεσμό του ηλεκτρικού φορτίου διατηρώντας όλες τις δυνάμεις σε θερμοδυναμική ισορροπία. Αυτά τα ηλεκτρικά φορτία επηρεάζουν τις ιδιότητες των ημιαγωγών (Koch et al.2011).



Σχήμα 4.6. Επίδραση της τάσης σε διάφορα φβ πλαίσια (Koch et al.2011).

4.5 ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ-ΤΕΣΤ ΔΟΚΙΜΩΝ

Υψηλή υγρασία και κινητικότητα ιόντων στο υλικό εγκιβωτισμού προάγουν τη δημιουργία ρεύματος ιόντων μέσω της ρητίνης στο γειωμένο ανοδιωμένο πλαίσιο αλουμινίου, που οδηγεί σε ηλεκτρολυτική διάβρωση. Απλή θέρμανση του φβ πλαισίου στους 100 °C οδήγησε σε μερική επαναφορά της υποβάθμισης του. Συνεπώς, μετά από ημέρες με

ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ (PID)

υψηλή υγρασία και ρεύμα διαρροής, η θέρμανση του πλαισίου κατά τη διάρκεια των θερμών ηλιόλουστων ημερών αναμένεται να επαναφέρει ένα μέρος της ισχύος του πλαισίου. Αυτά ισχύουν για την περίπτωση που η μείωση της ισχύος του φβ πλαισίου είναι μικρότερη από 30%.

Στα πλαίσια που εφαρμόστηκε τάση -600V και εκτέθηκαν σε συνθήκες θερμοκρασίας/υγρασίας $85^\circ\text{C} / 85\%$, επί 1000 ώρες, επανήλθαν σε μικρό βαθμό, με εφαρμογή ανάστροφης τάσης, ενώ όταν η υποβάθμιση τους συνέβη υπό χαμηλή θερμοκρασία (48°C), επανήλθαν σχεδόν εξ ολοκλήρου σε 100 ώρες (Pingel et al, 2010).

Σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που διαθέτουν μετατροπείς με γαλβανική απομόνωση, το φαινόμενο PID μπορεί να προληφθεί με αξιοπιστία μέσω της γείωσης του αρνητικού πόλου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, καθώς αυτό μετατοπίζει το δυναμικό ολόκληρου του φωτοβολταϊκού πεδίου σε θετικές τιμές. Σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με μετατροπείς χωρίς μετασχηματιστή, οι οποίοι κοστίζουν σημαντικά λιγότερο και είναι περισσότερο αποδοτικοί, το επιθυμητό αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλη διάταξη (PV Offset Box-SMA), διότι δεν μπορεί να γειωθεί ο αρνητικός πόλος των φβ πλαισίων. Η διάταξη αυτή εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι η επίδραση PID είναι αναστρέψιμη και εξελίσσεται σχετικά αργά. Εάν η τάση της συστοιχίας μειωθεί κάτω από ένα καθορισμένο όριο μετά το ηλιοβασίλεμα, η διάταξη αυξάνει το δυναμικό της φωτοβολταϊκής γεννήτριας σε ένα υψηλό θετικό δυναμικό (μεταξύ $+400\text{ V}$ και $+1000\text{ V}$ σε σχέση με τη γη), αντιστρέφοντας την επίδραση της πόλωσης που συνέβη κατά τη λειτουργία του φβ πεδίου. Η ενέργεια που προέρχεται από το δίκτυο είναι αμελητέα, καθώς το ρεύμα που ρέει κατά τη διάρκεια της αναγέννησης των πλαισίων τη νύχτα είναι ελάχιστη, λόγω του περιορισμού ($P_{AC\ nom} < 3\text{ W}$), (PID-SMA Technical Information).

Με βάση την εμπειρία από δοκιμές των τελευταίων χρόνων, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία -τεστ δοκιμών- για την υπόδειξη αν κάποιο φβ πλαίσιο είναι επιρρεπές στην εμφάνιση PID υποβάθμισης.

ΠΡΟΤΥΠΗ ΔΟΚΙΜΗ (STANDARD PID TEST)

Η πρότυπη δοκιμή (PI-Berlin) αποτελείται από τα εξής στάδια (Koch et al.2011):

- I-V μετρήσεις σύμφωνα με IEC60904-1 πριν τη δοκιμή PID
- Αρχική ανάλυση ηλεκτροφωτεινότητας

ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ (PID)

- Γείωση του πλαισίου
- Θερμοκρασία 85°C.
- Σχετική υγρασία 85%.
- Εφαρμογή της μέγιστης τάσης του συστήματος μεταξύ των φβ στοιχείων και του πλαισίου.
- Περίοδος δοκιμής 48 hours.
- Τελικές I-V μετρήσεις σύμφωνα με IEC60904-1 εντός 4 ωρών από τη δοκιμή PID.
- Τελική ανάλυση ηλεκτροφωτεινότητας για την εκτίμηση της υποβάθμισης ισχύος του πλαισίου

Τα πλαίσια ταξινομούνται σε 3 κατηγορίες PID ποιότητας; A, B και C. Στην κατηγορία A ανήκουν τα πλαίσια με πτώση ισχύος μικρότερη του 5%, στην B μεταξύ 5 και 30% και στην C όλα τα υπόλοιπα πλαίσια με μεγαλύτερη απόκλιση ισχύος. Αποτελέσματα δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα δοκιμών (Koch et al.2011)

Αριθμός φβ πλαισίου	Αρχική ισχύς [W]	Ισχύς μετά από 48h PID καταπόνησης [W]	Απόκλιση ισχύος [%]	Τάξη
PID01	229.62	230.90	0.56	A
PID02	230.57	231.96	0.60	A
PID11	195.15	189.59	-2.85	A
PID21	189.93	178.02	-6.27	B
PID31	247.14	174.19	-29.52	B
PID41	237.12	122.71	-48.25	C
PID51	213.76	104.30	-51.21	C
PID52	219.08	104.05	-52.51	C
PID53	212.37	97.64	-54.02	C

JOINT PID TEST

Τα 3 γερμανικά διαπιστευμένα IEC-ιστιτούτα δοκιμών Photovoltaik-Institut Berlin, TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH και VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH

ΓΗΡΑΝΣΗ ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ (PID)

(σε συνεργασία με το Fraunhofer Ινστιτούτο για Συστήματα Ηλιακής Ενέργειας) και 3 γερμανικές εταιρείες κατασκευής φωτοβολταϊκών πλαισίων Q-Cells SE, SCHOTT Solar AG και Solon SE ανέπτυξαν μια εύκολη μεθοδολογία αποφεύγοντας την ανάγκη ύπαρξης ακριβού εξοπλισμού για τον έλεγχο των πλαισίων. Η μεθοδολογία αποτελείται από τα εξής στάδια (Koch et al.2011):

- Θερμοκρασία 25°C.
- I-V μετρήσεις σύμφωνα με IEC60904-1 πριν τη δοκιμή PID.
- Πλήρης επικάλυψη της εμπρόσθιας επιφάνειας του πλαισίου με φύλλο αλουμινίου.
- Εφαρμογή τάσης -1000 V μεταξύ της συστοιχίας των κελιών και της εμπρόσθιας επιφάνειας
- Περίοδος δοκιμής 7 ημερών
- Τελικές I-V μετρήσεις σύμφωνα με IEC60904-1 εντός 4 ωρών από τη δοκιμή PID
- Ένα μέγιστο υποβάθμισης ίσης με 5% της τιμής μεγίστης ισχύος P_{mpp} είναι ανεκτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

5.1 ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Η περιοχή όπου θα εγκατασταθεί το φβ σύστημα είναι η Παλλήνη, με γεωγραφικές συντεταγμένες (πλάτος 38,967 μοίρες, μήκος -23,733 μοίρες). Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από τα κλιματικά δεδομένα χρονικής διάρκειας 30 ετών (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010) από τον μετεωρολογικό σταθμό της Νέας Φιλαδέλφειας, της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Επιλέχθηκε αυτός ο σταθμός έναντι του Ελληνικού, διότι θεωρήθηκε πιο κοντά στα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής ενδιαφέροντος. Η χρονική κατανομή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, έχει ως εξής:

Πίνακας 5.1. Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία (kwh / m². month), στο οριζόντιο επίπεδο, στην περιοχή Νέας Φιλαδέλφειας Αττικής (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010).

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	63,3	77,7	118,9	152,7	190,4	207,4	214,5	198,6	156,0	111,1	68,1	54,4

Από το λόγο των τιμών των μετρήσεων της ολικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης και των υπολογισμένων τιμών της ολικής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας, προκύπτουν οι μηνιαίοι συντελεστές αιθριότητας:

Πίνακας 5.2. Μηνιαίοι συντελεστές αιθριότητας (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010).

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	0,45	0,46	0,49	0,52	0,56	0,60	0,61	0,63	0,61	0,55	0,47	0,43

Οι μηνιαίες τιμές της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.3. Μέση μηνιαία διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (kwh / m². month), στο οριζόντιο επίπεδο, στην περιοχή Νέας Φιλαδέλφειας Αττικής (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010).

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	25,1	32,0	50,4	65,6	81,8	85,5	85,2	73,7	55,5	40,1	26,3	21,8

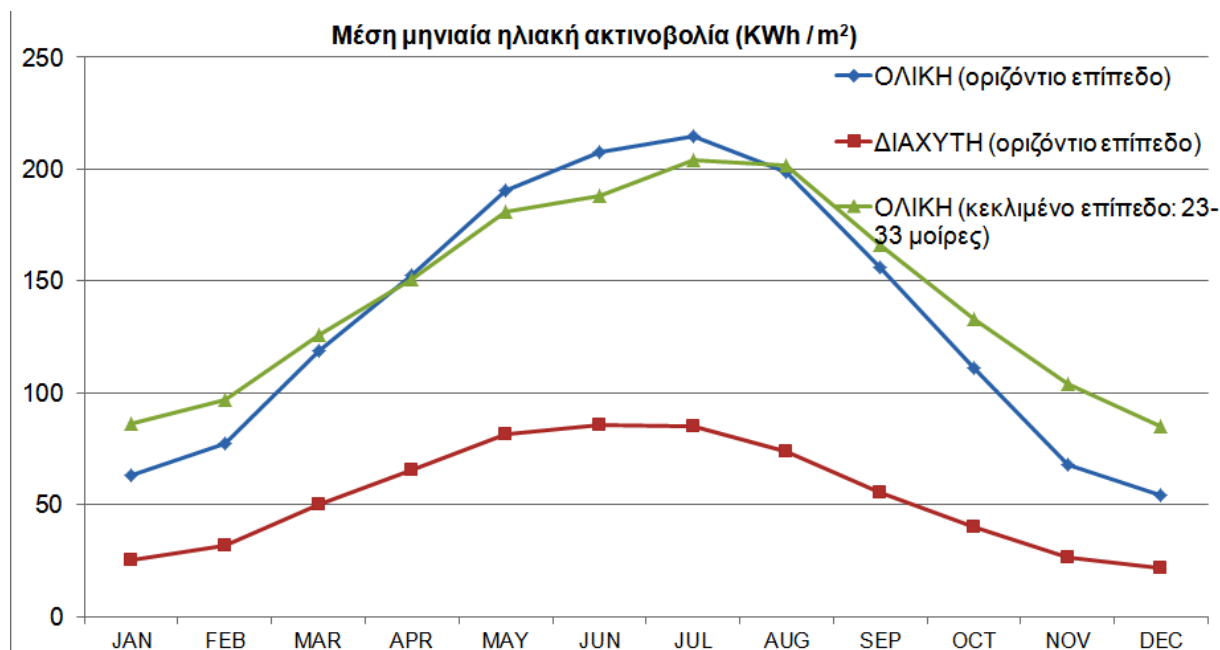
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Οι τιμές της προσπίπτουσας μηνιαίας ολικής ηλιακής ενέργειας σε κεκλιμένες επιφάνειες για τις βέλτιστες κλίσεις εγκατάστασης ηλιακού συστήματος δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι τιμές της βέλτιστης κλίσης δίνονται σε ετήσια (Ε), χειμερινή (Χ) και θερινή περίοδο (Θ). Παρατηρείται ότι η ολική ηλιακή ακτινοβολία κατά τους θερινούς μήνες είναι μεγαλύτερη στην κατηγορία κλίσεων 7-14 μοίρες σε σχέση με την κατηγορία κλίσεων 23-33 μοίρες.

Πίνακας 5.4. Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία (kwh / m². month), σε συνάρτηση με τις γωνίες κλίσης και βέλτιστες γωνίες κλίσης, σε ετήσια (Ε), χειμερινή (Χ) και θερινή περίοδο (Θ), στην περιοχή Νέας Φιλαδέλφειας Αττικής (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010).

Κλίση (°)	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Ε	Χ	Θ
7-14	70	84	118	151	190	201	217	206	158	117	84	67	1664	540	1124
23-33	86	97	126	151	181	188	204	202	166	133	104	85	1724	649	1092
42-52	98	103	124	137	154	156	171	178	159	140	118	99	1637	682	955

Για λόγους σύγκρισης, τα παραπάνω δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας απεικονίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 5.1.



Σχήμα 5.1. Διάγραμμα της μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας (ολικής σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο και διάχυτης σε οριζόντιο επίπεδο) (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010).

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η μηνιαία τιμή της ηλιακής απόκλισης δ , υπολογίζεται για κάποια συγκεκριμένη, αντιπροσωπευτική ημέρα για κάθε μήνα, η οποία δίνεται στον παρακάτω πίνακα 5.5 (οι τιμές των ημερών του έτους κυμαίνονται από 1 ως 365):

Πίνακας 5.5. Αντιπροσωπευτική ημέρα για κάθε μήνα, της μηνιαίας τιμής της ηλιακής απόκλισης δ (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010).

μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
D	17	47	75	105	135	162	198	228	258	289	320	351

Οι τιμές της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ώρες του 24ώρου (A) και μόνο τις ώρες κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας (B) φαίνονται στον πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6. Μέση μηνιαία θερμοκρασία 24ώρου (A σειρά) και περιόδου κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας (B σειρά) (Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010).

ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
8,7	9,3	11,2	15,4	20,7	25,7	28,1	27,5	23,4	18,2	13,8	10,3
9,8	10,6	12,6	16,9	22,3	27,4	29,8	29,2	25,1	19,8	15,1	11,5

5.1.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ α ΤΩΝ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Από τα διαθέσιμα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, η μέση ετήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργειας που λαμβάνεται από τα φβ πλαίσια σε κλίση μεταξύ 23 και 33 μοιρών είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες κλίσεων. Κατόπιν των παραπάνω, επιλέγεται η μέση κλίση της κατηγορίας 23-33 μοίρες, δηλαδή 28 μοίρες. Η τιμή αυτή συμφωνεί με εκείνη του τύπου $\alpha = \varphi - 10 = 39 - 10 = 29$ μοίρες, για μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας κατά τη θερινή περίοδο (σε σχέση με τις κατηγορίες κλίσεων φ , $\varphi+10$), όταν παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και η πιθανότητα σκίασης των πλαισίων λόγω νέφωσης είναι μικρότερη. Τα ικριώματα στήριξης των φβ πλαισίων θα ρυθμιστούν στις 28 μοίρες.

5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΥΣΜΕΝΕΣΤΕΡΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΎΨΟΥΣ Β ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Η ισχύς της φβ εγκατάστασης εξαρτάται από το διαθέσιμο χώρο στην ταράτσα του κτιρίου, ο οποίος θα αξιοποιηθεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό, λαμβάνοντας υπόψη τη σκίαση κάθε σειράς στήριξης φβ συστοιχιών στην επόμενη συστοιχία. Ο διαθέσιμος χώρος έχει διαστάσεις 23m (B-N) και 27m (A-Δ) και εμβαδό 621m².

Για τη βέλτιστη τοποθέτηση των πλαισίων, με τρόπο ώστε η εμπρόσθια σειρά συλλεκτών να μην παρεμποδίζει την άμεση ακτινοβολία της επόμενης σειράς, για καμία ημέρα του έτους, προσδιορίστηκε η χαμηλότερη γωνία ύψους β του Ηλίου κατά τη διάρκεια επιθυμητού χρονικού διαστήματος, τη δυσμενέστερη ημέρα όλου του έτους, ως προς τη γωνία ύψους β του Ηλίου.

Επιλέγεται η δυσμενέστερη ημέρα ύψους του Ηλίου (21^η Δεκεμβρίου), που εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές για τη γωνία β. Καθορίζεται το επιθυμητό χρονικό εύρος ηλιακής ώρας κατά το οποίο δεν πρέπει να επισκιάζεται η επόμενη σειρά των ηλιακών συλλεκτών. Θέτουμε τον περιορισμό τα πλαίσια να εκτίθενται πλήρως στην ακτινοβολία της άμεσης δέσμης τουλάχιστον 4 ώρες ημερησίως, επομένως καθορίζεται το παραπάνω χρονικό εύρος της ηλιακής ώρας T_{SOLAR} να είναι μεταξύ 10:00 h και 14:00 h.

Υπολογίστηκε ότι το ύψος του Ήλιου κατά την ηλιακή ώρα T_{SOLAR} = 10:00 h είναι β=21.27 μοίρες και όπως αναμενόταν, η ίδια τιμή υπολογίστηκε για την ηλιακή ώρα T_{SOLAR} = 14:00 h (Πίνακας 5.7) και αποτελεί το χαμηλότερο ύψος κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα των 4 ωρών, τη δυσμενέστερη ημέρα όλου του έτους, ως προς τη γωνία ύψους β του Ήλιου. Με βάση αυτό το ύψος του Ήλιου (β=21.27°) θα γίνουν οι υπολογισμοί των αποστάσεων μεταξύ των διαδοχικών σειρών των φβ συστοιχιών.

Πίνακας 5.7 : Ύψος β (μοίρες) του Ηλίου κατά το επιθυμητό χρονικό διάστημα της ηλιακής ώρας T_{SOLAR} μεταξύ 10:00 h και 14:00 h

ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΑ - T _{SOLAR} (h)	9.6	10.0	10.6	11.6	12.6	13.6	14.0	14.6
ΥΨΟΣ ΗΛΙΟΥ β(°)	19.07	21.27	24.56	27.33	27.02	23.67	21.27	17.71

5.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑ

5.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Μεταξύ των πολλών εταιρειών παραγωγής φβ πλαισίων, επιλέχθηκε η εταιρεία Conergy και πιο συγκεκριμένα δύο τύποι πλαισίων με πολυκρυσταλλικά φβ στοιχεία (σχήμα 5.2). Το φβ πλαίσιο Conergy PowerPlus 250P με πολυκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία, ονομαστικής ισχύος 250 W_P (STC), με απόδοση 15,36% και διαστάσεις 1,651m x 0.986m και το φβ πλαίσιο Conergy PX 300P με πολυκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία, ονομαστικής ισχύος 300 W_P (STC), με απόδοση 15,46% και διαστάσεις 1,956m x 0.992m. Με βάση τις διαστάσεις του φβ πλαισίου, τις διαστάσεις της προκύπτουσας συστοιχίας, σε συνδυασμό με τις διαστάσεις του διαθέσιμου χώρου γίνεται μια προκαταρκτική μελέτη για να διαπιστωθεί το πλήθος των φβ πλαισίων και η προκύπτουσα τάση και το ρεύμα στα άκρα της συστοιχίας. Με βάση τις τιμές της τάσης και του ρεύματος του φβ υποπεδίου, που αποτελείται από επιμέρους εν παραλλήλω συνδεδεμένες συστοιχίες, θα επιλεγεί ο κατάλληλος αναστροφέας.



Σχήμα 5.2. Πλαίσιο με πολυκρυσταλλικά φβ στοιχεία

Τα κύρια χαρακτηριστικά κάθε μοντέλου πλαισίου φαίνονται στον επόμενο πίνακα 5.8.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Πίνακας 5.8. Φωτοβολταϊκά Πλαίσια της εταιρείας Conergy, με πολυκρυσταλλικά φβ στοιχεία.

ΤΥΠΟΣ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	PowerPlus 250P	PX 300P
ΟΝΟΜ.ΙΣΧΥΣ STC - W_p	250 (60 φβ στοιχεία)	300 (72 φβ στοιχεία)
ΜΗΚΟΣ	1.651	1.956
ΠΛΑΤΟΣ	0.986	0.992
V_{MPP} (V)	30.46	37.2
I_{MPP} (A)	8.28	8.07
V_{OC} (V)	37.48	45.4
I_{SC} (A)	8.71	8.98
ΘΕΡΜ.ΣΥΝΤ. I_{SC} - % / C	0.059	0.05
ΘΕΡΜ.ΣΥΝΤ. V_{OC} - % / C	-0.32	-0.27
ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΡΕΥΜ.ΣΤΟΙΧΕΙΟΣΕΙΡΑΣ (A)	15	15
ΤΙΜΗ ΑΝΑΣΤΡΟΦΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (A)	20	20
ΑΠΟΔΟΣΗ%	15.36	15.46
ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ	LANDSCAPE	LANDSCAPE
ΡΕΥΜΑ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ I_{MPP} (A)	8.28	8.07
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ N_p	3	3
ΜΑΧ ΡΕΥΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ I_{MPP} ΣΤΟΝ ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑ (A)	24.84	24.21
ΠΛΗΘΟΣ ΠΛΑΙΣΙΩΝ / ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ	14	12
ΜΗΚΟΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ (m)	23.114	23.472
ΙΣΧΥΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ (W)	3500	3600
ΤΑΣΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ V_{MPP} (V)	426.44	446.4
ΠΛΗΘΟΣ ΠΛΑΙΣΙΩΝ / ΥΠΟΠΕΔΙΟ	42	36
ΙΣΧΥΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ / ΥΠΟΠΕΔΙΟ (W)	10500	10800

Επιλέχθηκε να συνδεθούν εν παραλλήλω το μέγιστο τρεις συστοιχίες φβ πλαισίων για προστασία από το ρεύμα σφάλματος σε περίπτωση διαρροής. Το πλήθος των παράλληλα συνδεδεμένων συστοιχιών έχει άμεση σχέση με το ρεύμα εισόδου του αναστροφέα.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

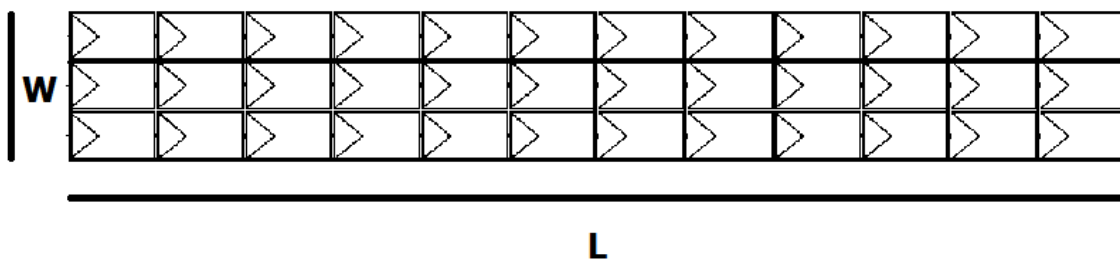
Όλα τα χαρακτηριστικά είναι σχεδόν τα ίδια και για τα δύο μοντέλα πλαισίων. Τελικά, επιλέχθηκε το φβ πλαίσιο **PX 300P** (διαστάσεις 1,956m x 0.992m), διότι προκύπτουν λιγότερα πλαίσια ανά συστοιχία και συνεπώς λιγότερες συνδεσμολογίες.

5.3.2 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΦΒ ΠΕΔΙΟΥ

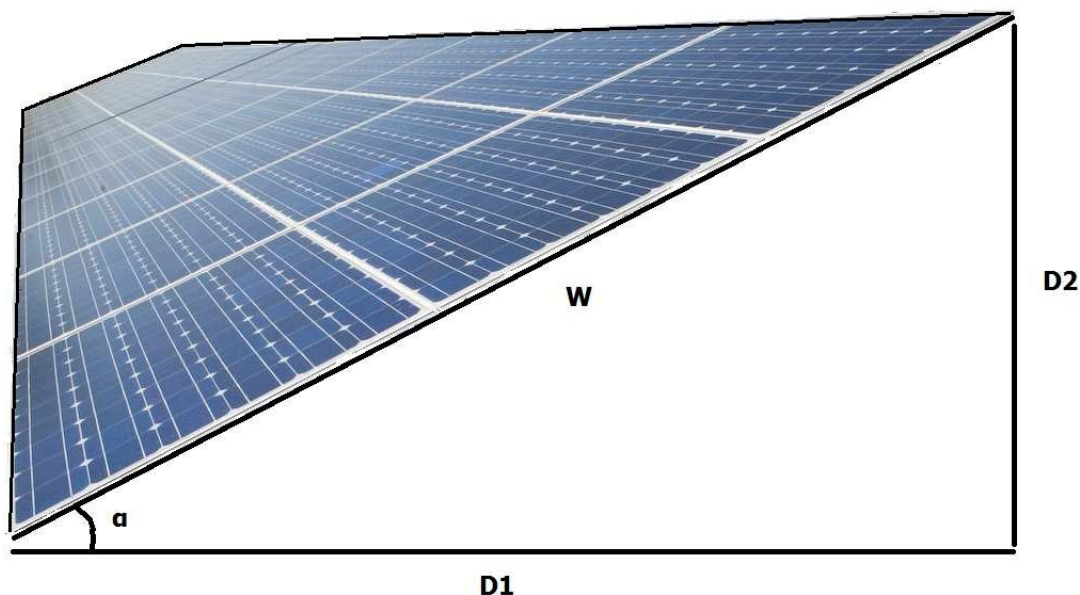
Το συνολικό διαθέσιμο μήκος στη διεύθυνση ανατολή-δύση είναι 27m. Λαμβάνοντας υπόψη το πλάτος 1 m των διαδρόμων, αριστερά και δεξιά, ο χώρος που μένει είναι 25 m. Σε αυτό μπορούν να εγκατασταθούν $25 \text{ m} / 1,956 \text{ m} = 12,7 = 12$ φβ πλαίσια στη σειρά. Συνεπώς, κάθε συστοιχία θα αποτελείται από 12 ΦΒ πλαίσια στη σειρά, που σημαίνει κάλυψη μήκους $12 * 1,956 = 23,47 \text{ m}$. Οπότε κάθε διάδρομος θα έχει πλάτος 1,75m και αυτό είναι ευνοϊκό για τη μη ύπαρξη σκίασης στα φβ πλαίσια από το στηθαίο, το οποίο είναι περιμετρικό στην ταράτσα και κατά τις προ- και μετά- μεσημβρινές ώρες θα σκίαζε τα πλησιέστερα σε αυτό φβ πλαίσια. Ακολουθεί η διαστασιολόγηση του φβ πεδίου.

Κατά την διαστασιολόγηση του φβ πεδίου, λήφθηκε υπόψη ότι θα τοποθετηθούν τρεις (3) συστοιχίες φβ πλαισίων, η μία παράλληλα στην άλλη και τα πλαίσια θα τοποθετηθούν σε διάταξη landscape. Αυτή η ομάδα των τριών εν παραλλήλω συνδεδεμένων συστοιχιών αποτελεί ένα υποπεδίο.

Οι συστοιχίες των φβ πλαισίων έχουν διεύθυνση Α-Δ και προσανατολισμό με μηδενικό αζιμούθιο ως προς το νότο. Η διάταξη των πλαισίων του υποπεδίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.3:



Σχήμα 5.3α. Φωτοβολταϊκό υποπεδίο που αποτελείται από τρεις εν παραλλήλω συνδεδεμένες συστοιχίες.



Σχήμα 5.3β. Φωτοβολταϊκό υποπεδίο που αποτελείται από τρεις εν παραλλήλω συνδεδεμένες συστοιχίες.

Υπολογισμοί αποστάσεων

Στην ταράτσα του κτιρίου υπάρχει στηθαίο ύψους 1,1 m, το οποίο λήφθηκε υπόψη στους υπολογισμούς. Επίσης, η τοποθέτηση των πλαισίων επιλέχθηκε να γίνει σε μικρή απόσταση από το επίπεδο της ταράτσας (για καλύτερες συνθήκες αερισμού), αλλά με τον περιορισμό το μέγιστο ύψος των φβ πλαισίων από το επίπεδο της ταράτσας να μην ξεπερνά τα 1.5m.

A. Υπολογισμοί μήκους προβολών του υποπεδίου στο οριζόντιο και κάθετο επίπεδο

Λαμβάνοντας υπόψη την κλίση των πλαισίων $\alpha = 28$ μοίρες, υπολογίστηκαν τα εξής:

- Το μήκος της προβολής των φβ πλαισίων στο κάθετο επίπεδο είναι:

$$D2 = (3 \cdot 0.992) \cdot \sin(28) = 1,40 \text{ m.}$$

Οπότε το μέγιστο ύψος των ΦΒ πλαισίων από την ταράτσα είναι $1,40 + 0,1$ (απόσταση από το επίπεδο της ταράτσας) = 1,50 m.

- Το μήκος της προβολής των φβ πλαισίων στο οριζόντιο επίπεδο της ταράτσας είναι:

$$D1 = (3 \cdot 0.992) \cdot \cos(28) = 2,63 \text{ m.}$$

Β. Υπολογισμός απόστασης X1 του πρώτου υποπεδίου από το στηθαίο ύψους 1,10 m.

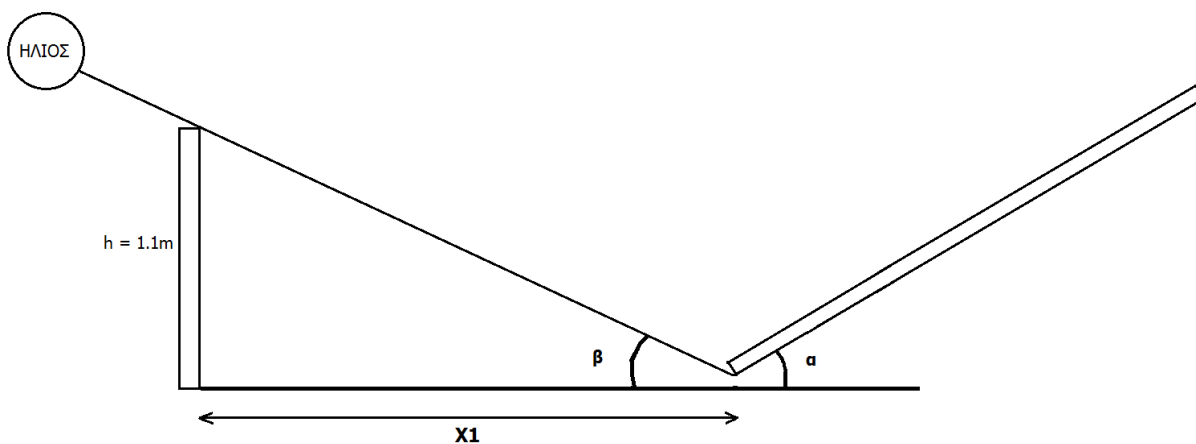
Θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος (σχήμα 5.4):

$$d = \frac{h}{\tan \beta}$$

Όπου β το δυσμενέστερο ύψος του Ήλιου ίσο με $\beta = 21,27$ μοίρες.

h είναι το ύψος του στηθαίου, $h=1,1$ m.

Οπότε $d = 1,1 / \tan(21,27^\circ) = 2,83$ m.



Σχήμα 5.4. Υπολογισμός απόστασης X1.

Η παραπάνω απόσταση ισχύει αν η τοποθέτηση των φβ πλαισίων γίνει σε απόσταση μηδενική από το επίπεδο της ταράτσας. Λόγω της ανύψωσης κατά 0,10 m των φβ πλαισίων, μπορούν να τοποθετηθούν κατά $0,1 / \tan(21,27) = 0,26$ m πιο κοντά στο στηθαίο. Συνεπώς, η απόσταση της πρώτης συστοιχίας φβ πλαισίων από το στηθαίο θα είναι:

$$X1 = 2,83 - 0,26 = 2.57 \text{ m.}$$

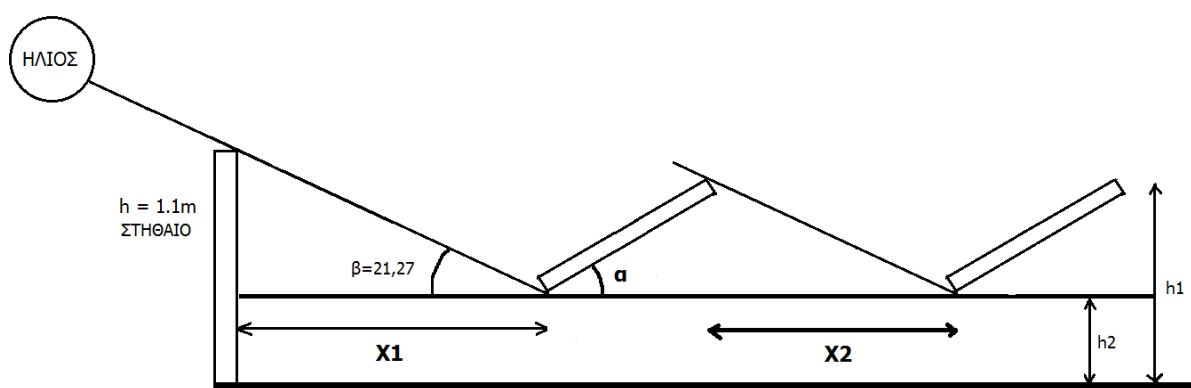
Γ. Υπολογισμός της απόστασης μεταξύ των υποπεδίων

Στο σχήμα 5.5 φαίνεται το ύψος του ανώτερου σημείου των φβ πλαισίων ($h_1=1.5\text{m}$), καθώς και η απόσταση $h_2 = 0.1\text{m}$ των πλαισίων από το επίπεδο της ταράτσας.

Θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος
$$X_2 = \frac{D_2}{\tan \beta}$$

Με αντικατάσταση προκύπτει $X_2 = 1.4 / \tan(21,27^\circ) = 3.59 \text{ m}$.

Συνεπώς, η απόσταση των υποπεδίων είναι $D_1+X_2=2.63+3.59=6.22\text{m}$.



Σχήμα 5.5. Υπολογισμός της απόστασης μεταξύ των υποπεδίων.

Λαμβάνοντας υπόψη το διαθέσιμο χώρο, μπορούν να εγκατασταθούν τρία υποπεδία και το συνολικό άθροισμα των επιμέρους αποστάσεων από το στηθαίο μέχρι και το τρίτο υποπεδίο είναι 17.63 m. Το διαθέσιμο μήκος της ταράτσας του κτιρίου στη διεύθυνση B-N είναι 23 m. Ο υπόλοιπος χώρος (περίπου 5 m) θα χρησιμοποιηθεί μελλοντικά για άλλες ανάγκες του κτιρίου.

Κάθε υποπεδίο αποτελείται από 3 συστοιχίες των 12 φβ πλαισίων, δηλαδή 36 φβ πλαίσια συνολικής ισχύος 10800 W_p (STC). Συνολικά, το ΦΒ πεδίο θα αποτελείται από 3 υποπεδία των 10800 W_p , που σημαίνει **συνολική ισχύ της εγκατάστασης $P = 3 \cdot 10800 = 32,4 \text{ kW}_p$** .

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

5.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑ

Λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ κάθε υποπεδίου της εγκατάστασης, αποφασίστηκε ότι θα εγκατασταθούν 3 αναστροφείς, ένας σε κάθε υποπεδίο. Επιλέχθηκε ο μονοφασικός αναστροφέας (κατηγορία GRID-TIED) της SMA, SUNNY MINI CENTRAL, ο οποίος δεν διαθέτει μετασχηματιστή απομόνωσης.

Ισχύς αναστροφέα

Η ονομαστική DC ισχύς του ΦΒ υποπεδίου είναι $P = 10,8 \text{ KW}_P$ (STC). Ο αναστροφέας (μοντέλο SMC 10000TL) έχει μέγιστη DC ισχύ εισόδου $10,35 \text{ KW}_P$. Η DC ισχύς του φβ υποπεδίου είναι κατά 4,3% μεγαλύτερη από την ισχύ εισόδου του αναστροφέα. Στο μοντέλο SMC 9000TL με μέγιστη DC ισχύ εισόδου $9,3 \text{ KW}_P$, το αντίστοιχο ποσοστό είναι 16%. Επίσης, το μέγιστο ρεύμα εισόδου του μοντέλου SMC 9000TL είναι 28 A έναντι 31A του SMC 10000TL. **Τελικά, επιλέχθηκε το μοντέλο SMC 10000TL.** Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο μοντέλων αναστροφέων SMC φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10. Τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο μοντέλων αναστροφέων της SMA, SUNNY MINI CENTRAL - SMC.

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Sunny Mini Central 9000TL	Sunny Mini Central 10000TL
Είσοδος (DC)		
Μέγιστη ισχύς DC (@ $\cos \varphi = 1$)	9300 W	10350 W
Μέγιστη τάση DC	700 V	700 V
Εύρος τάσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPP)	333 V - 500 V	333 V - 500 V
Ονομαστική τάση DC	350 V	350 V
Ελάχιστη τάση DC / Τάση εκκίνησης	333 V / 400 V	333 V / 400 V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου / ανά στοιχειοσειρά	28 A / 28 A	31 A / 31 A
Αριθμός ανιχνευτών MPP / Στοιχειοσειρές ανά ανιχνευτή MPP	1 / 5	1 / 5
Εξόδος (AC)		
Ονομαστική ισχύς AC (@ 230 V, 50 Hz)	9000 W	10000 W
Μέγιστη φαινόμενη ισχύς AC	9000 VA	10000 VA
Ονομαστική τάση, περιοχή τάσεων AC	220, 230, 240 V, 180 V - 260 V	220, 230, 240 V, 180 V - 260 V
Συχνότητα δικτύου, εύρος AC		50, 60 Hz, -6 Hz, +5 Hz
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	40 A	44 A
Συντελεστής ισχύος ($\cos \varphi$)	0,8 υπερδιέγερση ... 0,8 υποδιέγερση	
Φάσεις τροφοδοσίας / Φάσεις σύνδεσης / Power Balancing	1 / 1 / ●	1 / 1 / ●
Βαθμός απόδοσης		
Μέγιστος βαθμός απόδοσης / Euro-Eta (EBA)	97,7 % / 97,3 %	97,7 % / 97,2 %

DC τάση και ρεύμα εισόδου αναστροφέα

Παρακάτω συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά του φβ υποπεδίου με τα χαρακτηριστικά του αναστροφέα, για να διαπιστωθεί η ορθότητα της επιλογής του.

Η τάση στα άκρα της συστοιχίας θα είναι 12 φορές την τάση μέγιστης ισχύος του ενός ΦΒ πλαισίου, δηλαδή $V_{\text{STRING MPP}} = 12 * 37,2 = 446,4 \text{ V}$. Για την επίτευξη μέγιστης ισχύος, η ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος από τον αναστροφέα πραγματοποιείται εντός ενός εύρους DC τάσης από 333 ως 500 V.

Η τάση ανοικτοκύκλωσης του κάθε φβ πλαισίου είναι 45,4 V και για την συστοιχία είναι 545 V. Η μέγιστη τάση στην είσοδο του αναστροφέα είναι 700 V.

Το ονομαστικό ρεύμα κάθε συστοιχίας είναι $I_{\text{STRING MPP}} = 8,07 \text{ A}$ και το συνολικό ρεύμα στην είσοδο του αναστροφέα από τις τρεις παράλληλες συστοιχίες του υποπεδίου είναι 24,21 A. Λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή ασφαλείας 25% φθάνει την τιμή $3 * 8,07 * 1,25 = 30,2 \text{ A}$. Το μέγιστο DC ρεύμα εισόδου στον αναστροφέα είναι 31 A.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης του κάθε φβ πλαισίου είναι 8,98 A. Συνεπώς, το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης από τις τρεις παράλληλες συστοιχίες είναι 27 A.

5.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΦΒ ΥΠΟΠΕΔΙΟΥ ΥΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΚΡΑΙΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Δίνεται ότι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φβ πλαισίου είναι $T_{\text{NOCT}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$. Αυτή είναι η θερμοκρασία του υλικού των φβ στοιχείων, υπό καθορισμένες συνθήκες. Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας περιβάλλοντος (αέρα) $T_{\text{ΑΕΡΟΣ}}$ και θερμοκρασίας υλικού $T_{\text{ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ}}$ των φβ στοιχείων δίνεται από τον τύπο:

$$T_{\text{ΦΒΣΤΟΙΧΕΙΟΥ}} = T_{\text{ΑΕΡΟΣ}} + \frac{T_{\text{NOCT}} - 20}{80} * H_0$$

Όπου H_0 η ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φβ πλαισίου (θεωρήθηκε ίση με 80 mW/cm^2).

T_{NOCT} η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φβ πλαισίου ($45 \text{ }^\circ\text{C}$).

Από τον παραπάνω τύπο υπολογίστηκαν για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η θερμοκρασία υλικού των ΦΒ στοιχείων και δίνονται στον πίνακα 5.11.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Πίνακας 5.11. Θερμοκρασία υλικού των ΦΒ στοιχείων για διάφορες θερμοκρασίες αέρα

°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
T _{ΑΕΡΟΣ}	T _{ΦΒ ΣΤΟΙΧ}	T _{ΑΕΡΟΣ}	T _{ΦΒ ΣΤΟΙΧ}	T _{ΑΕΡΟΣ}	T _{ΦΒ ΣΤΟΙΧ}	T _{ΑΕΡΟΣ}	T _{ΦΒ ΣΤΟΙΧ}
-20	5	3	28	26	51	49	74
-19	6	4	29	27	52	50	75
-18	7	5	30	28	53	51	76
-17	8	6	31	29	54	52	77
-16	9	7	32	30	55	53	78
-15	10	8	33	31	56	54	79
-14	11	9	34	32	57	55	80
-13	12	10	35	33	58	56	81
-12	13	11	36	34	59	57	82
-11	14	12	37	35	60	58	83
-10	15	13	38	36	61	59	84
-9	16	14	39	37	62	60	85
-8	17	15	40	38	63	61	86
-7	18	16	41	39	64	62	87
-6	19	17	42	40	65	63	88
-5	20	18	43	41	66	64	89
-4	21	19	44	42	67	65	90
-3	22	20	45	43	68	66	91
-2	23	21	46	44	69	67	92
-1	24	22	47	45	70	68	93
0	25	23	48	46	71	69	94
1	26	24	49	47	72	70	95
2	27	25	50	48	73	71	96

Παρατηρούμε ότι η διαφορά των θερμοκρασιών αέρα και υλικού των φβ στοιχείων είναι 25 °C. Σε ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, δηλαδή όταν η θερμοκρασία αέρα είναι ίση έστω με -20 και + 50 °C, η θερμοκρασία του υλικού των φβ στοιχείων είναι ίση με 5 και 75 °C, αντίστοιχα.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

5.4.1 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΥΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Είναι γνωστό ότι όταν η θερμοκρασία του υλικού των φβ στοιχείων αυξάνει, η τάση των ακροδεκτών του φβ πλαισίου μειώνεται, με επακόλουθο τη μείωση της απόδοσης και της ισχύος εξόδου.

Δίνονται οι τιμές για τις τάσεις μέγιστης ισχύος και ανοικτοκύκλωσης του φβ πλαισίου, $V_{MPP} = 37,2 \text{ V}$ και $V_{OC} = 45,4 \text{ V}$ αντίστοιχα, στους $25 \text{ }^\circ\text{C}$ θερμοκρασία υλικού των φβ στοιχείων (συνθήκες STC). Επίσης, δίνεται ότι η τιμή του θερμοκρασιακού συντελεστή τάσης ανοικτοκύκλωσης V_{OC} του φβ πλαισίου είναι $VTC = -0,27 \text{ \% / }^\circ\text{C}$.

Θα εφαρμοστεί η παρακάτω εξίσωση για να υπολογιστούν οι τάσεις V_{MPP} , V_{OC} του φβ πλαισίου και του υποπεδίου, σε διάφορες θερμοκρασίες υλικού, έστω $T_X \text{ }^\circ\text{C}$ των φβ στοιχείων. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 5.12.

$$V(T_X \text{ }^\circ\text{C}) = V(25 \text{ }^\circ\text{C}) * [1 + (T_X - 25) * VTC]$$

Όπου VTC η τιμή του θερμοκρασιακού συντελεστή τάσης ανοικτοκύκλωσης του φβ πλαισίου

T_X η θερμοκρασία υλικού ($^\circ\text{C}$) των φβ στοιχείων.

Πίνακας 5.12. Διακύμανση τάσης φβ πλαισίου και συστοιχίας υπό διάφορες θερμοκρασίες υλικού των φβ στοιχείων.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ (-0.27 % / $^\circ\text{C}$)				
$T_{\text{ΑΕΡΟΣ}}$ ($^\circ\text{C}$)	-20	0	20	50
$T_{\text{ΦΒ ΣΤΟΙΧ}}$ ($^\circ\text{C}$)	5	25	45	75
V_{MPP} (ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ)	39.2	37.2	35.2	32.2
V_{OC} (ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ)	47.9	45.4	42.9	39.3
ΠΛΗΘΟΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ / ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ: 12				
V_{MPP} (ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ)	471	446	422	386
V_{OC} (ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ)	574	545	515	471

- Παρατηρείται ότι σε συνθήκες θερμοκρασίας **STC** (θερμοκρασία του υλικού των ΦΒ στοιχείων ίση με $T_{\text{ΦΒ ΣΤΟΙΧ}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$), η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $T_{\text{ΑΕΡΟΣ}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Η τάση μέγιστης ισχύος της συστοιχίας (και του φβ υποπεδίου) είναι $V_{\text{MPP}} = 446 \text{ V}$. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης της συστοιχίας είναι ίση με $V_{\text{OC}} = 545 \text{ V}$.
- Για πιο ρεαλιστικές συνθήκες θερμοκρασίας (**PTC**: $T_{\text{ΑΕΡΟΣ}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$), η θερμοκρασία του υλικού των ΦΒ στοιχείων ίση με $T_{\text{ΦΒ ΣΤΟΙΧ}} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι τάσεις μειώνονται σε $V_{\text{MPP}} = 422 \text{ V}$ και $V_{\text{OC}} = 515 \text{ V}$.
- Οι τιμές της τάσης της συστοιχίας, υπό ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, είναι:
 $V_{\text{MPP}} = 471 \text{ V}$, $V_{\text{OC}} = 574 \text{ V}$ σε $T_{\text{ΑΕΡΟΣ}} = -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και
 $V_{\text{MPP}} = 386 \text{ V}$, $V_{\text{OC}} = 471 \text{ V}$ σε $T_{\text{ΑΕΡΟΣ}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Είναι πράγματι αξιοσημείωτη η μείωση της τάσης κατά 60 V, από $V_{\text{MPP}} = 446 \text{ V}$ (STC) σε $V_{\text{MPP}} = 386 \text{ V}$ σε $T_{\text{ΑΕΡΟΣ}} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Όλες οι παραπάνω τιμές τάσης ικανοποιούν τον περιορισμό διακύμανσης της DC τάσης εισόδου του αναστροφέα (333-700V). Επίσης, βρίσκονται εντός του εύρους των τιμών (333-500V) για την ανίχνευση του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος του υποπεδίου.

5.4.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΥΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Είναι γνωστό ότι όταν η θερμοκρασία του υλικού των φβ στοιχείων αυξάνει, το ρεύμα εξόδου του φβ πλαισίου τείνει να αυξηθεί, αλλά με πολύ αργό ρυθμό. Δίνονται οι τιμές για το ρεύμα μέγιστης ισχύος και βραχυκύκλωσης του φβ πλαισίου $I_{\text{MPP}} = 8.07 \text{ A}$ και $I_{\text{SC}} = 8.98 \text{ A}$ αντίστοιχα, στους $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ θερμοκρασία υλικού των φβ στοιχείων (συνθήκες STC). Επίσης, δίνεται ότι η τιμή του θερμοκρασιακού συντελεστή ρεύματος του φβ πλαισίου είναι $\text{ITC} = 0,05 \text{ \% / }^{\circ}\text{C}$.

Θα εφαρμοστεί η παρακάτω εξίσωση για να υπολογιστούν οι τιμές της έντασης του ρεύματος I_{MPP} , I_{SC} της φβ συστοιχίας και του φβ υποπεδίου, σε διάφορες θερμοκρασίες υλικού, έστω $T_X \text{ }^{\circ}\text{C}$ των φβ στοιχείων. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 5.13.

$$I(T_X) = I(25 \text{ }^{\circ}\text{C}) * [1 + (T_X - 25) * \text{ITC}]$$

Όπου ITC η τιμή του θερμοκρασιακού συντελεστή ρεύματος του φβ πλαισίου,

T_X η θερμοκρασία υλικού ($^{\circ}\text{C}$) των φβ στοιχείων.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.13. Διακύμανση έντασης ρεύματος φβ συστοιχίας και υποπεδίου υπό διάφορες θερμοκρασίες υλικού των φβ στοιχείων

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ (0.05 % / °C)				
T_{ΑΕΡΟΣ} (°C)	-20	0	20	50
T_{ΦΒ ΣΤΟΙΧ} (°C)	5	25	45	75
I_{MPP} (ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ)	7.99	8.07	8.15	8.27
I_{SC} (ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ)	8.89	8.98	9.07	9.20
ΦΒ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΝΔΕΣΗ: 3				
I_{MPP} (ΥΠΟΠΕΔΙΟΥ)	24.0	24.2	24.5	24.8
I_{SC} (ΥΠΟΠΕΔΙΟΥ)	26.7	26.9	27.2	27.6

- Παρατηρείται ότι σε συνθήκες θερμοκρασίας (PTC: T_{ΑΕΡΟΣ} = 20 °C), είναι T_{ΦΒ ΣΤΟΙΧ} = 45 °C και το ρεύμα της συστοιχίας αυξάνει ελάχιστα σε I_{MPP} = 8.15 A, I_{SC} = 9.07 A.
- Οι τιμές της έντασης ρεύματος της συστοιχίας, υπό ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, είναι:
I_{MPP} = 7.99 A, I_{SC} = 8.89 A σε T_{ΑΕΡΟΣ} = -20 °C και
I_{MPP} = 8.27 A, I_{SC} = 9.20 A σε T_{ΑΕΡΟΣ} = 50 °C.
- Οι τιμές της έντασης ρεύματος του φβ υποπεδίου, υπό ακραίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, είναι:
I_{MPP} = 24.0 A, I_{SC} = 26.7 A σε T_{ΑΕΡΟΣ} = -20 °C και
I_{MPP} = 24.8 A, I_{SC} = 27.6 A σε T_{ΑΕΡΟΣ} = 50 °C.

Παρατηρείται ότι ακόμα και σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες, ελάχιστα μεταβάλλεται η ένταση ρεύματος I_{MPP} και I_{SC}. Το μέγιστο επιτρεπόμενο DC ρεύμα στην είσοδο του αναστροφέα είναι 31 A και συνεπώς ικανοποιείται ο περιορισμός της μέγιστης τιμής του ρεύματος εισόδου του αναστροφέα.

5.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ($\sigma_{\Sigma\Lambda\Phi}$)

Ο συντελεστής απόδοσης της φβ εγκατάστασης εξαρτάται από τρεις συνιστώσες: το συντελεστή απόδοσης του φβ πλαισίου, το συντελεστή απόδοσης των ηλεκτρικών υποσυστημάτων και το συντελεστή απόδοσης του φβ πεδίου.

$$\sigma_{\Sigma\Lambda\Phi} = \sigma_{\Phi\text{Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ}} * \sigma_{\text{ΗΣ}} * \sigma_{\Sigma\Lambda\Phi\text{Π}}$$

■ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ - $\sigma_{\Phi\text{Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ}}$

Ο βαθμός απόδοσης του φβ πλαισίου δίνεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του ότι είναι ίσος με $\sigma_{\Phi\text{Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ}} = 15,46\%$.

■ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ - $\sigma_{\text{ΗΣ}}$

Εκτός από τις απώλειες του φβ πεδίου, οι οποίες αναφέρονται στην επόμενη ενότητα, υπάρχουν και οι απώλειες στα ηλεκτρικά υποσυστήματα της φβ εγκατάστασης. Στην εγκατάσταση της παρούσας μελέτης, αυτές αποδίδονται στον αναστροφέα που μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη και αυτού του είδους οι απώλειες εκτιμώνται σε 3%. Συνεπώς ο συντελεστής λαμβάνεται ίσος με $\sigma_{\text{ΗΣ}} = 0,97$.

■ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΦΒ ΠΕΔΙΟΥ ($\sigma_{\Sigma\Lambda\Phi\text{Π}}$)

Το φβ πεδίο παρουσιάζει απώλειες. Η λειτουργική απόδοση των φβ πλαισίων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, η επίδραση των οποίων ποσοτικοποιείται με τον υπολογισμό των παρακάτω συντελεστών.

$$\sigma_{\Sigma\Lambda\Phi\text{Π}} = \sigma_{\theta} * \sigma_{\text{ΡΥΠΗΛΗΣΗΣ}} * \sigma_{\text{ΓΗΡΑΝΣΗΣ}} * \sigma_{\text{ΔΙΟΔΟΥ}} * \sigma_{\text{ΑΝΟΜΟΙΟΓ}} * \sigma_{\text{ΚΑΛΩΔ}}$$

Από αυτούς τους συντελεστές θεωρείται ότι ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης μεταβάλλεται με το μήνα, ενώ οι υπόλοιποι θεωρούνται σταθεροί κατά τη διάρκεια του έτους. Συνεπώς, ο συντελεστής απόδοσης του φβ πεδίου και ο συντελεστής απόδοσης της φβ εγκατάστασης θα υπολογιστούν ανά μήνα. Ακολουθεί η αναλυτική αναφορά σε κάθε συντελεστή.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης, σ_{θ}

Η θερμοκρασία των φβ στοιχείων των πλαισίων είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (αέρα) και η αυξημένη θερμοκρασία των φβ στοιχείων μειώνει την αναμενόμενη απόδοση τους. Ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης, σ_{θ} υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$\sigma_{\theta} = 1 - [(T_{\mu}+30)-25] * 0,004$$

όπου T_{μ} η μέση μηνιαία θερμοκρασία στην περιοχή της μελέτης.

Για να είναι πιο ρεαλιστική η τιμή του συντελεστή, χρησιμοποιήθηκε η μέση μηνιαία θερμοκρασία λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις ώρες κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας (T.O.T.E.E. 20701-3/2010) και όχι όλες τις ώρες του 24ώρου. Οι μηνιαίες τιμές του συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης, σ_{θ} φαίνονται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14. Μηνιαίες τιμές του συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης, σ_{θ}

	Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα, κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας	Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης, σ_{θ}
JAN	9.8	0.941
FEB	10.6	0.938
MAR	12.6	0.930
APR	16.9	0.912
MAY	22.3	0.891
JUN	27.4	0.870
JUL	29.8	0.861
AUG	29.2	0.863
SEP	25.1	0.880
OCT	19.8	0.901
NOV	15.1	0.920
DEC	11.5	0.934

Συντελεστής ρύπανσης, σ_{ρ}

Ο συντελεστής ρύπανσης σ_{ρ} ελαττώνεται καθώς αυξάνει η ρύπανση στην επιφάνεια του φβ πλαισίου. Επιλέγεται η τιμή 0.95, καθώς θεωρείται ότι θα γίνεται συχνός καθαρισμός της επιφάνειας των πλαισίων.

Συντελεστής γήρανσης, $\sigma_{\text{ΓΗΡΑΝΣΗΣ}}$

Λόγω γήρανσης των υλικών με την πάροδο του χρόνου, το ποσοστό μείωσης της απόδοσης για τη φβ μετατροπή αυξάνει συνήθως κατά 1% κάθε έτος λειτουργίας. Σχεδιάζοντας ότι η περίοδος λειτουργίας της εγκατάστασης θα είναι 25 έτη, λαμβάνεται μέσος συντελεστής γήρανσης $\sigma_{\text{ΓΗΡΑΝΣΗΣ}} = 0,9$.

Συντελεστής απωλειών διόδου, $\sigma_{\text{ΔΙΟΔΟΥ}}$

Η διόδος αντεπιστροφής, μεταξύ άλλων, αποτρέπει τη διαρροή ανάστροφου ρεύματος DC (ρεύμα αντεπιστροφής) προς την λιγότερο αποδοτική συστοιχία κατά τη διάρκεια της ημέρας (αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους: ελαττωματικό πλαίσιο, σκόνη, σκίαση, διαφορετικός προσανατολισμός κάθε συστοιχίας κλπ.). Λόγω απωλειών (της τάξης του 1%) συνήθως δεν τοποθετείται και δεν λήφθηκε υπόψη στην παρούσα μελέτη.

Συντελεστής ανομοιογένειας, $\sigma_{\text{ΑΝΟΜΟΙΟΓ}}$

Η ανομοιογένεια των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών I-V των φβ πλαισίων αποδίδονται είτε σε κατασκευαστικούς λόγους, είτε σε περιβαλλοντικές συνθήκες π.χ. σκίαση ή τοπική διαφοροποίηση της θερμοκρασίας. Αυτές οι διαφοροποιήσεις μειώνουν την ισχύ εξόδου μιας συστοιχίας κατά περίπου 2%. Λαμβάνεται μέσος συντελεστής ανομοιογένειας ίσος με $\sigma_{\text{ΑΝΟΜΟΙΟΓ}} = 0.98$.

Συντελεστής καλωδιώσεων, $\sigma_{\text{ΚΑΛΩΔ}}$

Εκφράζει τις απώλειες Joule στα καλώδια σύνδεσης. Συνήθεις τιμές κυμαίνονται από 1 ως 3%. Δεν αναμένεται σημαντική ηλεκτροχημική διάβρωση στις στατικές επαφές των συνδέσμων, καθώς και διεπιφανειακά στρώματα οξειδίων. Λαμβάνεται τιμή συντελεστή $\sigma_{\text{ΚΑΛΩΔ}} = 0,97$.

Συγκεντρωτικά, οι τιμές των παραπάνω συντελεστών καταγράφονται στον πίνακα 5.15.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Πίνακας 5.15. Τιμές των επιμέρους συντελεστών

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ	
$\sigma_{\text{ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ}}$	0.1546
$\sigma_{\text{ΗΣ}}$	0.97
$\sigma_{\text{ΡΥΠΑΝΣΗΣ}}$	0.95
$\sigma_{\text{ΓΗΡΑΝΣΗΣ}}$	0.9
$\sigma_{\text{ΑΝΟΜΟΙΟΓ}}$	0.98
$\sigma_{\text{ΚΑΛΩΔ}}$	0.97

Το γινόμενο των παραπάνω τεσσάρων συντελεστών $\sigma_{\text{ΡΥΠΑΝΣΗΣ}}$, $\sigma_{\text{ΓΗΡΑΝΣΗΣ}}$, $\sigma_{\text{ΑΝΟΜΟΙΟΓ}}$, $\sigma_{\text{ΚΑΛΩΔ}}$ είναι ίσο με 0.813 και η τιμή αυτή πολλαπλασιάστηκε με τον συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης, σ_{θ} για τον υπολογισμό του $\sigma_{\text{ΣΑΦΠ}}$ για κάθε μήνα. Κατόπιν ο υπολογίστηκε ο μηνιαίος συντελεστής απόδοσης της φβ εγκατάστασης $\sigma_{\text{ΣΑΦ}}$ (πίνακας 5.16).

Πίνακας 5.16. Μηνιαίες τιμές του συντελεστή απόδοσης της φβ εγκατάστασης

	Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας	Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης, σ_{θ}	Συντελεστής απόδοσης του φβ πεδίου $\sigma_{\text{ΣΑΦΠ}}$	Συντελεστής απόδοσης της φβ εγκατάστασης $\sigma_{\text{ΣΑΦ}}$
JAN	9.8	0.941	0.765	0.115
FEB	10.6	0.938	0.762	0.114
MAR	12.6	0.930	0.756	0.113
APR	16.9	0.912	0.742	0.111
MAY	22.3	0.891	0.724	0.109
JUN	27.4	0.870	0.708	0.106
JUL	29.8	0.861	0.700	0.105
AUG	29.2	0.863	0.702	0.105
SEP	25.1	0.880	0.715	0.107
OCT	19.8	0.901	0.732	0.110
NOV	15.1	0.920	0.748	0.112
DEC	11.5	0.934	0.759	0.114

5.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΝΙΑΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μηνιαία παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την φβ εγκατάσταση δίνεται από τον τύπο:

$$E_{\text{ΜΗΝ}} = H_{\text{ΜΗΝ}} * S_{\text{ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ}} * \sigma_{\text{ΣΑΦ}}$$

όπου:

- $H_{\text{ΜΗΝ}}$ η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία (kWh / m^2) που προσπίπτει στην επιφάνεια του κεκλιμένου φβ πλαισίου - (στην περίπτωση της παρούσας εγκατάστασης η κλίση των φβ πλαισίων είναι 28° και χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ακτινοβολίας από τον μετεωρολογικό σταθμό της Νέας Φιλαδέλφειας-Ε.Μ.Υ.).
- $S_{\text{ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ}}$ είναι η ολική επιφάνεια των φβ πλαισίων (στην παρούσα εγκατάσταση χρησιμοποιούνται $3 * 36 = 108$ φβ πλαίσια, με επιφάνεια φβ πλαισίου = $1,94 \text{ m}^2$ και συνολική επιφάνεια $S_{\text{ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ}} = 209,6 \text{ m}^2$).
- $\sigma_{\text{ΣΑΦ}}$ είναι ο συντελεστής απόδοσης της φβ εγκατάστασης, όπως υπολογίστηκε ανά μήνα, στην προηγούμενη ενότητα.

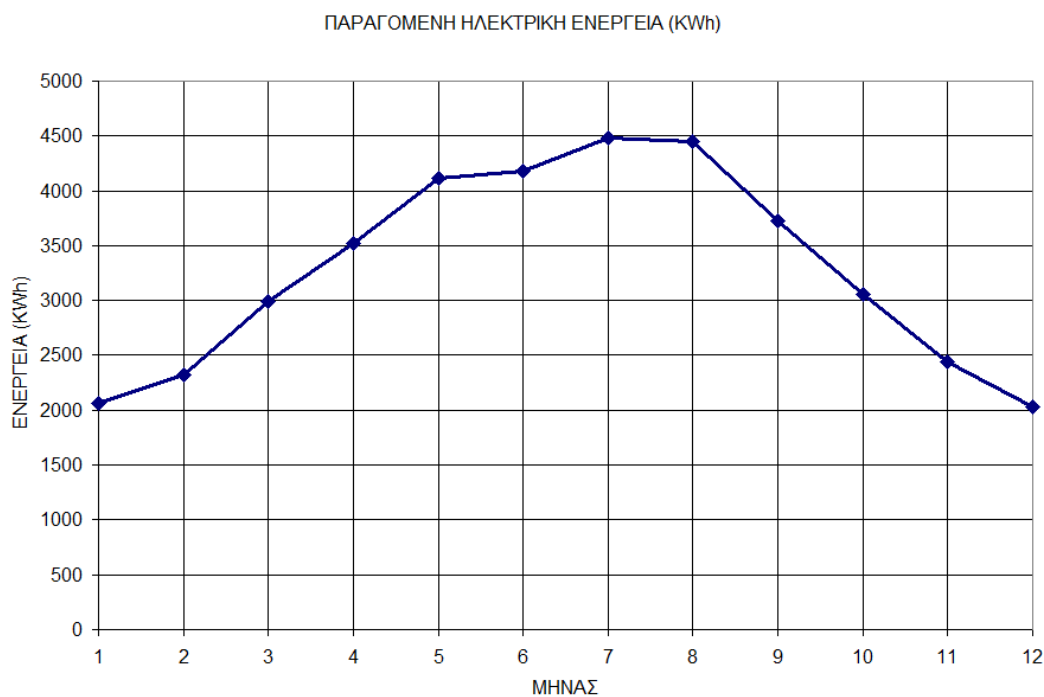
Κατόπιν των παραπάνω, οι μηνιαίες τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας φαίνονται στον πίνακα 5.17. Παρατηρείται ότι κατά τους θερινούς μήνες η παραγόμενη ενέργεια είναι ακόμα και διπλάσια σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες (σχήμα 5.6). Η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια προκύπτει από το άθροισμα των μηνιαίων τιμών και για την φβ εγκατάσταση της παρούσας μελέτης η τιμή της είναι $E_{\text{ΕΤΗΣΙΑ}} = 39405 \text{ kWh}$.

Η συνολική ισχύς των φβ πλαισίων της εγκατάστασης είναι 32.4 kWp , που σημαίνει **1216 kWh ανά εγκατεστημένο kWp**.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Πίνακας 5.17. Μηνιαία και ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια

	$H_{\text{ΜΗΝ}}$ (kwh / m ²) (κλίση φβ πλαισίων 28°)	σ ΣΑΦ	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια E(KWh)
JAN	86	0.115	2067
FEB	97	0.114	2323
MAR	126	0.113	2992
APR	151	0.111	3520
MAY	181	0.109	4119
JUN	188	0.106	4180
JUL	204	0.105	4486
AUG	202	0.105	4455
SEP	166	0.107	3730
OCT	133	0.110	3061
NOV	104	0.112	2443
DEC	85	0.114	2028
		ΕΤΗΣΙΑ	39405



Σχήμα 5.6. Μηνιαίες τιμές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

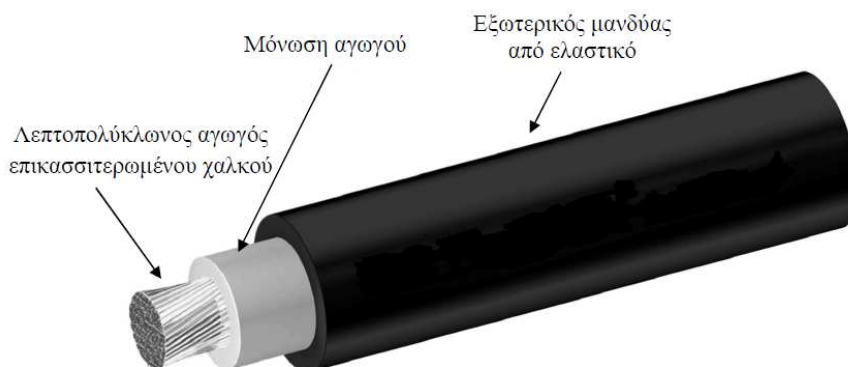
5.7 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

5.7.1 DC ΤΜΗΜΑ (ΦΒ ΠΕΔΙΟΥ)

Για τη διασύνδεση των φβ πλαισίων χρησιμοποιούνται ειδικά καλώδια εξωτερικού χώρου, τα οποία πρέπει να είναι ανθεκτικά τόσο σε μηχανικές καταπονήσεις, σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και στην ηλιακή ακτινοβολία. Το υλικό του αγωγού θα είναι επικασσιτερωμένος ηλεκτρολυτικός χαλκός, με ειδική αγωγιμότητα $\sigma = 56 \cdot 10^6 \text{ } [\Omega^{-1}\text{m}^{-1}]$. Τα υλικά μόνωσης των αγωγών του καλωδίου συνήθως είναι PE (ethylene propylene) ή PVC και ο μανδύας του καλωδίου είναι EVA (ethylene vinyl acetate) ή Nylon. Ο ρόλος του μανδύα είναι η προστασία της μόνωσης του αγωγού από την UV ακτινοβολία. Η τελευταία προκαλεί τη φωτόλυση του υλικού της κύριας μόνωσης και επιταχύνεται η καταστροφή της (Δέρβος Κ., Παν/κές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.).

Επιλέχθηκε το καλώδιο **H07RN-F** (σχήμα 5.7). Γενικά είναι καλώδιο για χρήση σε ξηρούς, υγρούς ή βρεγμένους χώρους, στο ύπαιθρο. Για μέσες μηχανικές καταπονήσεις στις βιομηχανίες, σε εργοτάξια και αγροτικά έργα, για κινητές ή σταθερές εγκαταστάσεις. Έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές (Κακαβούλης, 2009):

- H: το καλώδιο ακολουθεί εναρμονισμένο πρότυπο
- 07: για τάσεις 450/750 φασική/πολική.
- R: η μόνωση του αγωγού είναι από φυσικό λάστιχο
- N: ο εξωτερικός μανδύας είναι από ελαστικό πολυχλωροπρένιο, υλικό ανθεκτικό στην ηλιακή ακτινοβολία που δεν αποικοδομείται.
- F: ο αγωγός είναι λεπτοπολύκλωνος και σε πολλές περιπτώσεις επικασσιτερωμένος.



Σχήμα 5.7. Καλώδιο DC για τη διασύνδεση των φβ πλαισίων

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

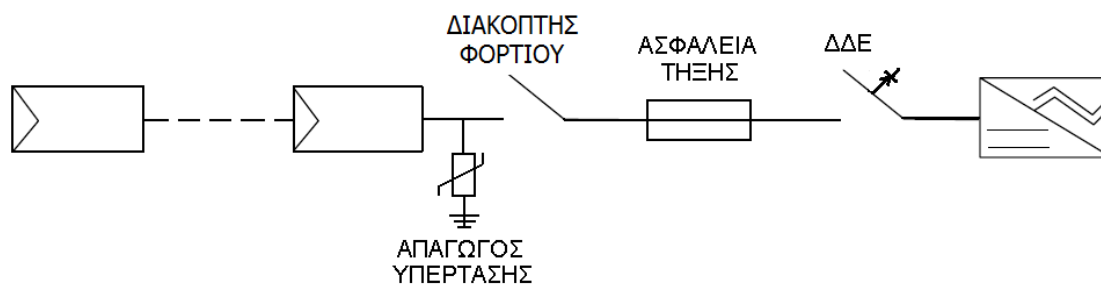
Η διατομή των αγωγών διασύνδεσης των πλαισίων της κάθε συστοιχίας θα είναι **6 mm²**. Όταν χρησιμοποιούνται μεγάλες διατομές αγωγών, μειώνεται η τιμή της πτώσης τάσης, οι απώλειες Joule είναι μικρότερες και η θερμική απαγωγή από τις διεπιφάνειες των συνδέσμων αυξάνεται.

Το μήκος των αγωγών κάθε συστοιχίας εξαρτάται από το πλήθος των φβ πλαισίων και το σημείο εγκατάστασης του αναστροφέα του κάθε υποπεδίου, που στην παρούσα περίπτωση είναι στο τέλος της κάθε συστοιχίας, στα ικριώματα στήριξης των φβ πλαισίων. Η θέση αυτή προφυλάσσει τον αναστροφέα από την βροχή και από την άμεση δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας, ώστε να μη μειώνεται η απόδοση του λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του. Παράλληλα, θα επιτρέπεται ο αερισμός για την ψύξη του. Το πλήθος των φβ πλαισίων είναι 12 που σημαίνει ότι το μήκος της συστοιχίας είναι 23,5 m. Υπολογίστηκε ότι για κάθε συστοιχία το μήκος του καλωδίου πρέπει να είναι 50 m.

Στην παρούσα εγκατάσταση δεν είναι δυνατή η γείωση του DC(-) ακροδέκτη των φβ πλαισίων, διότι μετά τον αναστροφέα δεν παρεμβάλλεται μετασχηματιστής απομόνωσης. Γενικότερα, η γείωση του DC(-) ακροδέκτη εξασφαλίζει προστασία των πλαισίων έναντι των ατμοσφαιρικών υπερτάσεων, μείωση του ρυθμού γήρανσης των φβ πλαισίων, μέσω της μείωσης του βαθμού ηλεκτροχημικής διάβρωσης στο εσωτερικό των φβ στοιχείων των πλαισίων. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι στο κουτί συνδεσμολογίας κάθε φβ πλαισίου συνδέεται δίοδος παράκαμψης, η οποία προστατεύει τα φβ στοιχεία από την ανάπτυξη θερμών σημείων σε περίπτωση τοπικής σκίασης.

Διατάξεις προστασίας σε κάθε φβ συστοιχία

Συνοπτικά, οι επιμέρους διατάξεις σε κάθε φβ συστοιχία φαίνονται στο διάγραμμα (σχήμα 5.8) και ακολουθεί η διαστασιολόγηση τους.



Σχήμα 5.8. Διατάξεις προστασίας σε κάθε φβ συστοιχία

Ο αναστροφέας διαθέτει πέντε εισόδους. Κάθε μία από τις τρεις συστοιχίες του φβ υποπεδίου θα συνδεθεί σε κάθε είσοδο του αναστροφέα. Πριν τη σύνδεση αυτή, θα τοποθετηθεί υποπίνακας στον οποίο είναι απαραίτητη η εγκατάσταση των παρακάτω διατάξεων προστασίας.

- **Διάταξη αντικεραυνικής προστασίας (απαγωγός υπερτάσεως)**

Το εσωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας συνίσταται από απαγωγούς υπερτάσεως (βαρίστορ). Πρόκειται για διάταξη χαρακτηριζόμενη από μεγάλη εσωτερική αντίσταση, η οποία είναι εξαρτώμενη από την τάση και στην περίπτωση παλμού υπέρτασης καθίσταται αγώγιμη διοχετεύοντας το ρεύμα προς τη γη, μειώνοντας τον παλμό τάσεως. Στον απαγωγό υπερτάσεως συνδέονται οι DC ακροδέκτες (+) και (-) της κάθε φβ συστοιχίας και ο ζυγός της γείωσης. Θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι και ο αναστροφέας είναι εξοπλισμένος στο εσωτερικό του με θερμικά επιτηρούμενα βαρίστορ. Μπορεί να φθαρούν λόγω παλαιώσης και επανειλημμένης καταπόνησης από υπερτάσεις και να χάσουν την προστατευτική τους λειτουργία. Ο μετατροπέας αναγνωρίζει τότε είναι ελαττωματικό ένα από τα βαρίστορ και τότε σηματοδοτεί ένα σφάλμα (SMA SMC installation manual). Τα βαρίστορ κατασκευάζονται ειδικά για τη χρήση στον κάθε μετατροπέα.

Κατόπιν, ο ακροδέκτης θετικής (+) πολικότητας, από κάθε φβ συστοιχία, συνδέεται κατά σειρά με:

- **Διακόπτης φορτίου**

Είναι χρήσιμος για την απομόνωση του κυκλώματος, για λόγους συντήρησης του αναστροφέα κλπ. Η τιμή του επιλέγεται να είναι **40 A**.

- **Ασφάλεια τήξης**

Ο ρόλος της ασφάλειας τήξης είναι η προστασία του DC καλωδίου διατομής 6 mm² των φβ πλαισίων, αλλά και του αναστροφέα από υπερένταση-βραχυκύκλωμα. Επιλέγεται ασφάλεια τήξης των **15 A**, διότι, όπως αναγράφεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του φβ πλαισίου, η ασφάλεια ρεύματος στοιχειοσειράς είναι 15 A.

- **Διαφορικός διακόπτης διαρροής έντασης (ΔΔΕ)**

Προστατεύει από την ηλεκτροπληξία. Η διαρροή ρεύματος εμφανίζεται όταν υπάρχει αστοχία στο καλώδιο ή στο φβ πλαίσιο. Όταν το ρεύμα διαρροής ξεπεράσει

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

μια καθορισμένη τιμή (30 mA), τότε η διάταξη ανοίγει και διακόπτεται το κύκλωμα. Το ονομαστικό ρεύμα του ΔΔΕ θα είναι ίσο με αυτό του διακόπτη φορτίου.

Υπολογισμός πτώσης τάσης

Με βάση την επιλεγθείσα διατομή των $S = 6 \text{ mm}^2$, θα υπολογιστεί και η πτώση τάσης ΔV στο άκρο της κάθε συστοιχίας (μήκος κλάδου $L=25\text{m}$), για τις συνθήκες μέγιστης ισχύος. Χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$S = \frac{2 * L * I_N * 10^6}{\sigma * \Delta V} [\text{mm}^2]$$

Όπου I_N το ονομαστικό ρεύμα μέγιστης ισχύος της συστοιχίας, $I_{MPP} = 8,07\text{A}$.

σ η ειδική αγωγιμότητα $= 56 * 10^6 [\Omega^{-1}\text{m}^{-1}]$.

Με αντικατάσταση των τιμών, η πτώση τάσης ΔV υπολογίστηκε ίση με $\Delta V = 1,2\text{V}$. Αυτή η τιμή, αναφορικά με την τάση $V_{MPP} = 446,4 \text{ V}$ στο άκρο της συστοιχίας, αντιστοιχεί σε ποσοστό πτώσης τάσης $u = \Delta V / V_{MPP} = 0,27\%$ που είναι αποδεκτό.

5.7.2 AC ΤΜΗΜΑ (ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑΣ – ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ PILLAR)

Μετά τον κάθε αναστροφέα θα τοποθετηθεί υποπίνακας, ο οποίος περιλαμβάνει διατάξεις προστασίας για το **τριπολικό καλώδιο XLPE/PVC**, το οποίο θα συνδέει κάθε αναστροφέα με τον εξωτερικό πίνακα Pillar. Το καλώδιο XLPE/PVC έχει αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Οι αγωγοί χαλκού του καλωδίου είναι πολύκλωνοι, έχουν μόνωση από XLPE και ο μανδύας είναι από PVC. Χρησιμοποιείται σε ξηρούς ή υγρούς χώρους, στον αέρα ή στο έδαφος (σχήμα 5.9). Η όδευση κάθε καλωδίου θα γίνει μέσα σε σιδερένιο σωλήνα για τη μηχανική προστασία του καλωδίου, αλλά και την προστασία του από την ηλιακή ακτινοβολία, που επιταχύνει τη γήρανση του.

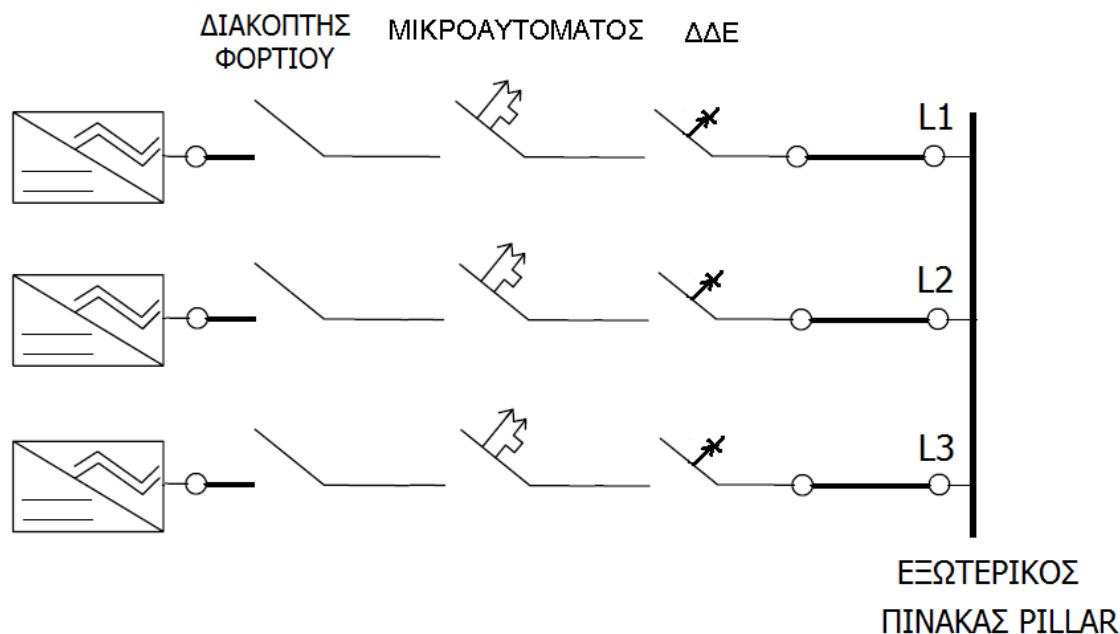


Σχήμα 5.9. Καλώδιο XLPE/PVC..

Ο εξωτερικός πίνακας Pillar συγκεντρώνει τις εξόδους όλων των αναστροφέων σε ένα πίνακα χαμηλής τάσης, στον οποίο ομαδοποιούνται οι φάσεις. Οι πίνακες εξωτερικού χώρου – Pillar είναι πίνακες διανομής, τροφοδότησης κινητήρων, φωτισμού για υπαίθρια εγκατάσταση (δρόμοι, εργοτάξια), όπου λόγω αντίξοων περιβαλλοντικών συνθηκών απαιτείται μεγάλη στεγανότητα και εύκολη επεκτασιμότητα. Κατασκευάζονται από χαλυβδοέλασμα γαλβανιζέ πάχους 2mm σε διάφορες διαστάσεις, ενώ ο βαθμός προστασίας τους είναι IP40 ή ανάλογα με τις προδιαγραφές μέχρι και IP66 ([http://www.ilviokat.gr/products/panels/pillarPanels .asp#](http://www.ilviokat.gr/products/panels/pillarPanels.asp#)). Στην περίπτωση μας δεν υπάρχει ομαδοποίηση αγωγών της ίδιας φάσης, καθώς υπάρχουν μόνο τρεις αναστροφείς, οι οποίοι ρυθμίζονται ο καθένας να παρέχει μία από τις τρεις φάσεις.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Οι διατάξεις προστασίας που περιλαμβάνει κάθε AC υποπίνακας, φαίνονται στο σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10. Διατάξεις προστασίας για το τμήμα αναστροφέας – εξωτερικός πίνακας Pillar.

- **Διακόπτης φορτίου**

Είναι χρήσιμος για την απομόνωση του αναστροφέα από την AC τάση του δικτύου ΔΕΗ, για λόγους συντήρησης του κλπ. Η τιμή του διακόπτη επιλέγεται να είναι **63 A**.

- **Ασφάλεια (μικροαυτόματος)**

Για προστασία του αγωγού από υπερφόρτιση, υπερένταση-βραχυκύκλωμα, θα τοποθετηθεί ασφάλεια (μικροαυτόματος). Το ονομαστικό ρεύμα του αναστροφέα ισχύος εξόδου 10KVA είναι 44 A υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Θεωρείται $\cos\phi = 1$, ώστε να ληφθεί υπόψη η μέγιστη τιμή ρεύματος. Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω τιμή έντασης ρεύματος, η διατομή του AC αγωγού επιλέγεται ίση με 10 mm² και θα ελεγχθεί ως προς την πτώση τάσης. Η επιτρεπόμενη συνεχής φόρτιση για το καλώδιο **XLPE/PVC των 3x10mm²** είναι 75 A (<http://www.cablel.gr>) και η ασφάλεια (μικροαυτόματος) που θα τοποθετηθεί είναι 50 A.

- **Διαφορικός διακόπτης διαρροής έντασης (ΔΔΕ)**

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Προστατεύει από την ηλεκτροπληξία. Όταν το ρεύμα διαρροής ξεπεράσει μια καθορισμένη τιμή (30mA), τότε η διάταξη ανοίγει και διακόπτεται το κύκλωμα. Το ονομαστικό ρεύμα του ΔΔΕ θα είναι ίσο με αυτό του διακόπτη φορτίου.

Υπολογισμός πτώσης τάσης

Για την τελική επιλογή της διατομής των αγωγών του καλωδίου και της ασφάλειας, θα γίνουν υπολογισμοί της πτώσης τάσης, αφού ληφθεί υπόψη το μήκος του κλάδου από τον αναστροφέα ως τον εξωτερικό πίνακα, η μέγιστη τιμή του οποίου είναι $L = 10\text{m}$. (Ο εξωτερικός πίνακας Pillar θα εγκατασταθεί δίπλα από το μεσαίο υποπεδίο, ώστε να είναι μικρό το μήκος των καλωδίων και συμμετρικό).

Με βάση την διατομή των $S = 10\text{ mm}^2$, θα υπολογιστεί η πτώση τάσης ΔV στο άκρο του κλάδου για τις συνθήκες μέγιστης ισχύος. Χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$S = \frac{2 * L * I_{MAX} * \cos \phi * 10^6}{\sigma * \Delta V} [mm^2]$$

Όπου:

το ονομαστικό AC ρεύμα στην έξοδο του αναστροφέα είναι $I_{NOM} = 44\text{ A}$

σ η ειδική αγωγιμότητα $= 56 * 10^6 [\Omega^{-1} \text{m}^{-1}]$.

Θεωρείται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος, $\cos \phi = 1$.

Μήκος του κλάδου $L = 10\text{m}$ και διατομή $S = 10\text{ mm}^2$.

Με αντικατάσταση των τιμών, η **πτώση τάσης ΔV** υπολογίστηκε ίση με $\Delta V = 1,57\text{V}$. Αυτή η τιμή, αναφορικά με την ονομαστική τάση κυκλώματος $V_{ΕΞΟΔΟΥ} = 230\text{ V}$, αντιστοιχεί σε ποσοστό πτώσης τάσης $u = \Delta V / V_{ΕΞΟΔΟΥ} = 0,683\%$ που είναι αποδεκτό. Το επιτρεπόμενο ποσοστό πτώσης τάσης είναι $u = 1\%$ που αντιστοιχεί σε τιμή πτώσης τάσης: $\Delta V = V_{NOM} * u = 2,3\text{ V}$.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

5.7.3 AC ΤΜΗΜΑ (ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ PILLAR – ΜΕΤΡΗΤΗΣ Δ.Ε.Η.)

Μετά τον εξωτερικό πίνακα Pillar, με **πενταπολικό καλώδιο XLPE/PVC**, η εγκατάσταση συνδέεται στο μετρητή εξερχόμενης ενέργειας της Δ.Ε.Η. Το καλώδιο XLPE/PVC έχει αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Οι αγωγοί χαλκού του καλωδίου είναι πολύκλωνοι, έχουν μόνωση από XLPE και ο μανδύας είναι από PVC. Χρησιμοποιείται σε ξηρούς ή υγρούς χώρους, στον αέρα ή στο έδαφος.

Ο μετρητής εξερχόμενης ενέργειας βρίσκεται στο ισόγειο και το μήκος του κλάδου από τον εξωτερικό πίνακα Pillar μέχρι τον μετρητή είναι 20m. Συνοπτικά, οι επιμέρους διατάξεις προστασίας φαίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 5.11.



Σχήμα 5.11. Διατάξεις προστασίας για το τμήμα εξωτερικός πίνακας Pillar – Μετρητής Δ.Ε.Η.

Υπολογισμοί της διατομής για ένταση ρεύματος 44 A και μήκος κλάδου 20m και επιτρεπτό ποσοστό πτώσης τάσης από τον εξωτερικό πίνακα Pillar ως τον μετρητή της ΔΕΗ ίσο με 1%, δείχνουν ότι ο αγωγός κάθε φάσης πρέπει να έχει διατομή 14 mm². Συνεπώς, θα χρησιμοποιηθεί **πενταπολικό καλώδιο XLPE/PVC των 5x16mm²**. Για την προστασία του καλωδίου στο τμήμα αυτό, ο εξωτερικός πίνακας Pillar θα περιλαμβάνει τις εξής διατάξεις προστασίας:

- **Τριπολικός Διακόπτης φορτίου**

Η τιμή του θα είναι **80 A**.

- **Ασφάλεια (μικροαυτόματος)**

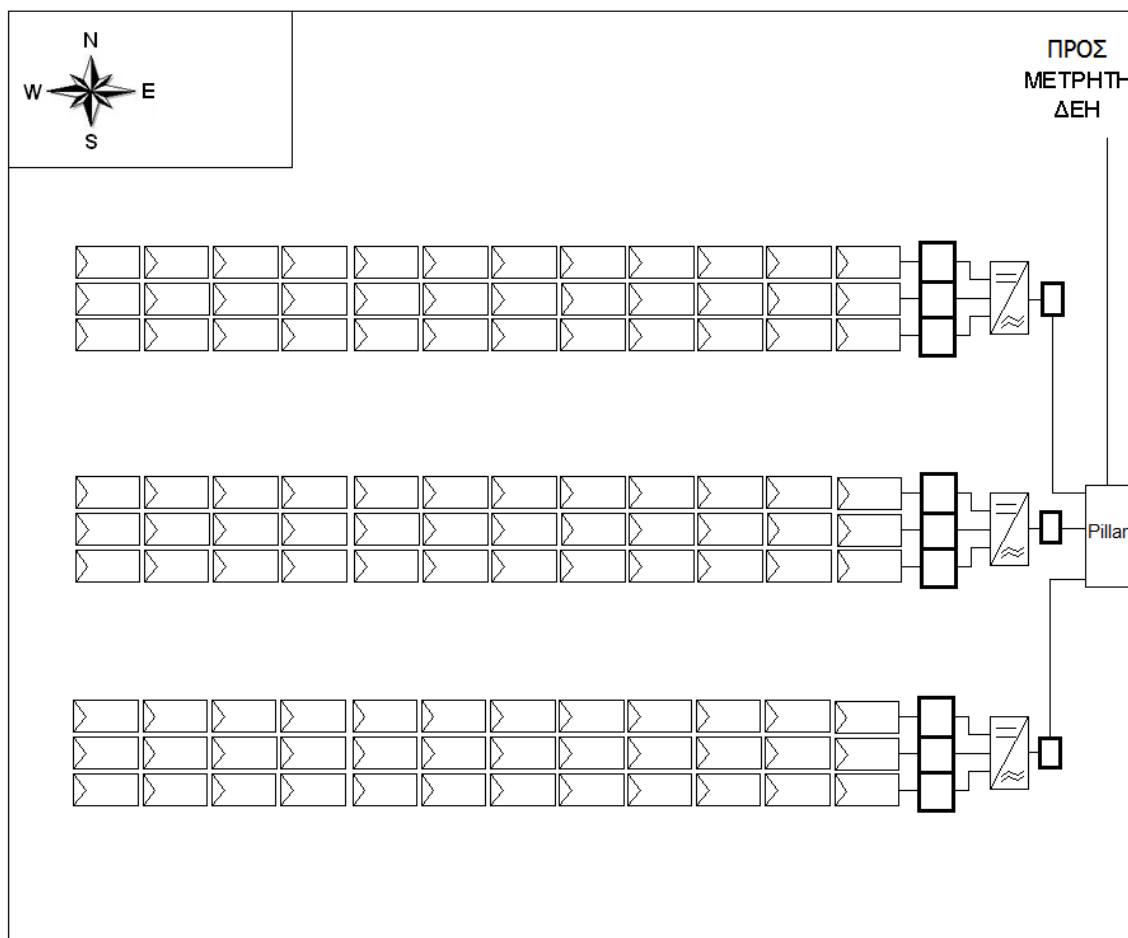
Η επιτρεπόμενη ένταση ρεύματος για το καλώδιο XLPE/PVC των 5x16mm² είναι 73 A στο έδαφος. Επιλέγεται ασφάλεια (μικροαυτόματος) των 50 A.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗΣ ΦΒ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

- **Διαφορικός διακόπτης διαρροής έντασης (ΔΔΕ)**

Προστατεύει από την ηλεκτροπληξία. Όταν το ρεύμα διαρροής ξεπεράσει μια καθορισμένη τιμή (30mA), τότε η διάταξη ανοίγει και διακόπτεται το κύκλωμα. Το ονομαστικό ρεύμα του ΔΔΕ θα είναι ίσο με αυτό του διακόπτη φορτίου.

Μετά το μετρητή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθεί το κιβώτιο φραγής και το κιβώτιο προστασίας της ΔΕΗ. Το πρώτο αποτελεί τον κόμβο, όπου συνδέονται με το δίκτυο διανομής, οι επιμέρους μετρητές της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης του κτιρίου και της φβ εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας. Το κιβώτιο προστασίας της ΔΕΗ περιλαμβάνει τον αυτόματο διακόπτη φορτίου, βαρίστορ για προστασία έναντι υπερτάσεων δικτύου, τη σύνδεση με τη κεντρική γείωση της εγκατάστασης. Ακολουθεί το χωροταξικό διάγραμμα της ΦΒ εγκατάστασης (σχήμα 5.12).



Σχήμα 5.12. Χωροταξικό διάγραμμα της ΦΒ εγκατάστασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΣΤΗΜΑ
ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Ο κεραυνός αποτελεί ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό φαινόμενο, από τα παλαιότερα παρατηρημένα φυσικά φαινόμενα στη Γη, αλλά και ένα από τα λιγότερο κατανοητά. Δεν είναι κατανοητό ακόμα πως αλληλεπιδρά με τις ηλιακές εκλάμψεις στην ανώτερη ατμόσφαιρα ή με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της Γης. Έρευνα από εικόνες των δορυφόρων της NASA έδειξε ότι ανά πάσα στιγμή, σε όλη τη γη, μπορεί να είναι σε εξέλιξη 2000 καταιγίδες, στις οποίες παρατηρούνται συνολικά περίπου 40 κεραυνοί ανά δευτερόλεπτο (σχήμα 6.1). Υπάρχουν δύο κατηγορίες κεραυνών, η διαδικασία για το σχηματισμό των οποίων, είναι περίπου η ίδια (NOAA - National Weather Service JetStream - Online School for Weather, http://www.srh.noaa.gov/jetstream/lightning/lightning_intro.htm):

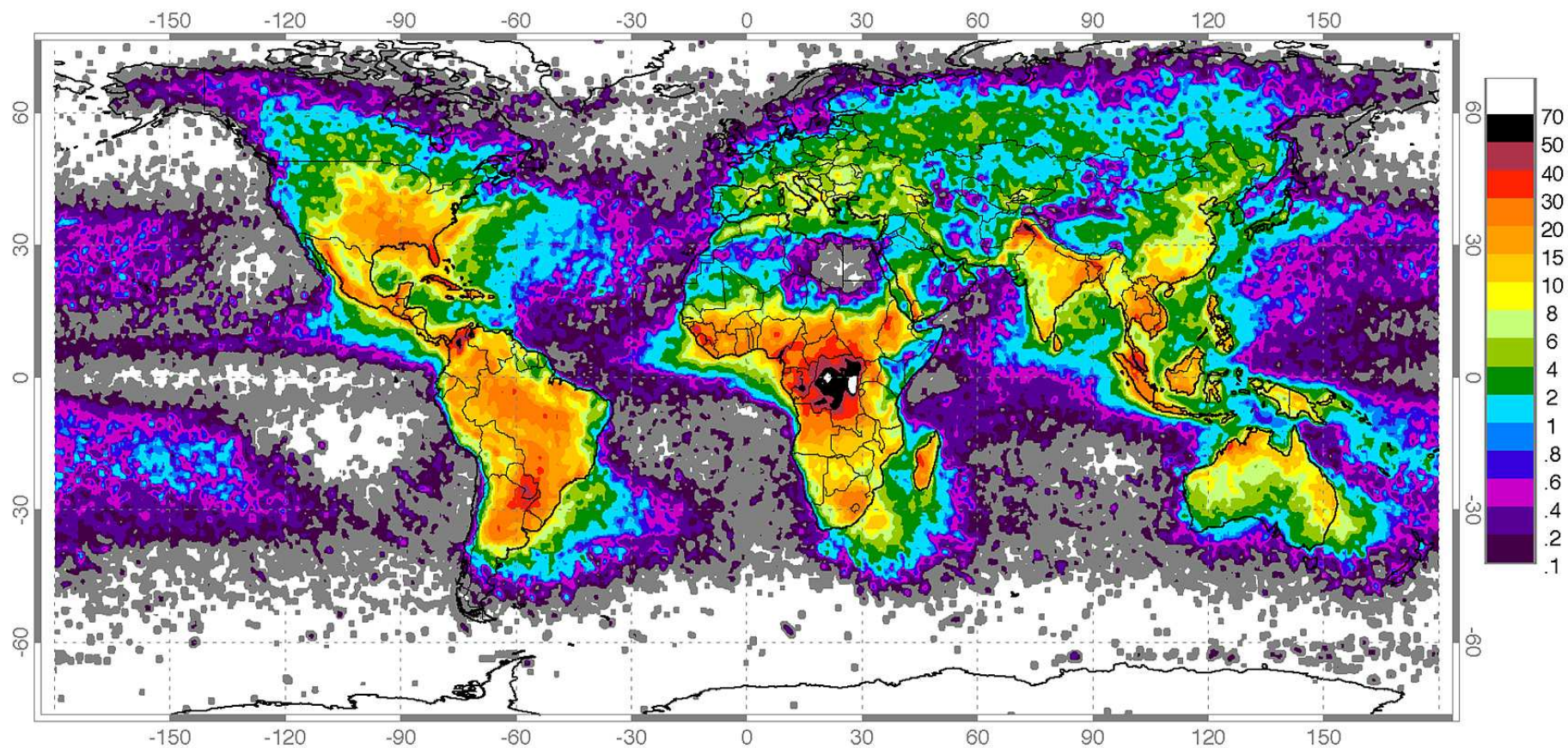
- Οι κεραυνοί με τουλάχιστον ένα κανάλι που συνδέει το σύννεφο με τη γη, γνωστοί ως "σύννεφου-εδάφους" αποφορτίσεις (CG), οι οποίοι αναλύονται παρακάτω και
- Κεραυνοί χωρίς κανάλι προς το έδαφος, γνωστοί ως "μέσα στο σύννεφο" (IC), "σύννεφο σε σύννεφο" (CC), ή "σύννεφου-αέρα" (CA).

6.1 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΕΡΑΥΝΟΥ

Οι συνθήκες που απαιτούνται για τη δημιουργία του κεραυνού είναι γνωστές, αλλά όχι και ο ακριβής τρόπος σχηματισμού. Κορυφαίες θεωρίες επικεντρώνονται γύρω από το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων και δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν επίσης ότι ο πάχος, το χαλάζι, και ημι-παγωμένες σταγόνες νερού (graupel) είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη του κεραυνού. Καταιγίδες στη διάρκεια των οποίων δεν παράγονται μεγάλες ποσότητες πάγου, συνήθως δεν εμφανίζουν κεραυνούς. Η πρόγνωση της τοποθεσίας και του χρόνου που θα χτυπήσει ο κεραυνός, δεν είναι ακόμα δυνατή και το πιο πιθανό είναι ότι δεν θα είναι ποτέ δυνατή.

Τα ψηλά αντικείμενα, όπως δέντρα και ουρανοξύστες είναι σύνηθες να πλήττονται από κεραυνό. Τα βουνά είναι επίσης καλοί στόχοι, διότι οι κορυφές τους είναι πιο κοντά στη βάση του καταιγιδόφορου σύννεφου και το πάχος της ατμόσφαιρας (μονωτή) είναι μικρότερο. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει πάντα ότι τα ψηλά αντικείμενα θα χτυπηθούν από κεραυνό. Όλα εξαρτώνται από την τοπική συγκέντρωση του φορτίου. Ο κεραυνός μπορεί να χτυπήσει στο ανοιχτό πεδίο, ακόμη και αν υπάρχουν δέντρα πολύ κοντά.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ



Σχήμα 6.1. Παγκόσμια μέση ετήσια εμφάνιση κεραυνών (τα δεδομένα ελήφθησαν από δύο αισθητήρες στο διάστημα: Lightning Imaging Sensor (LIS), (καταγράφει όλους τους τύπους κεραυνών στις τροπικές περιοχές) και Optical Transient Detector (OTD) (οπτικός αισθητήρας) http://www.srh.noaa.gov/jetstream/lightning/lightning_intro.htm.

Διαχωρισμός φορτίου

Μέσα σε μια καταιγίδα επικρατούν έντονες αναταράξεις του αέρα, ισχυρά ανοδικά και καθοδικά ρεύματα αέρα σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Τα ανοδικά ρεύματα μεταφέρουν υδροσταγονίδια από τις χαμηλότερες περιοχές της καταιγίδας σε ύψη μεταξύ 35.000 και 70.000 πόδια, σε μεγάλη απόσταση πάνω από το επίπεδο δημιουργίας πάγου. Εν τω μεταξύ, τα καθοδικά ρεύματα μεταφέρουν χαλάζι και πάγο από τα παγωμένα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα της καταιγίδας. Όταν αυτά τα ρεύματα αέρα συγκρούονται, τα υδροσταγονίδια παγώνουν και απελευθερώνεται θερμότητα. Η θερμότητα αυτή, με τη σειρά της διατηρεί την επιφάνεια των χαλαζόκοκκων και του πάγου ελαφρώς θερμότερη σε σχέση με το γύρω περιβάλλον, και σχηματίζεται ένα "μαλακό χαλάζι" (graupel). Όταν το μαλακό χαλάζι (graupel) συγκρούεται με επιπλέον υδροσταγονίδια και σωματίδια πάγου, ένα κρίσιμο φαινόμενο συμβαίνει: Τα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από τα ανοδικά κινούμενα σωματίδια και συγκεντρώνονται στα σωματίδια που κινούνται καθοδικά. Επειδή τα ηλεκτρόνια φέρουν αρνητικό φορτίο, το αποτέλεσμα είναι ένα σύννεφο με αρνητικά φορτισμένη βάση και θετικά φορτισμένη κορυφή.

Δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου

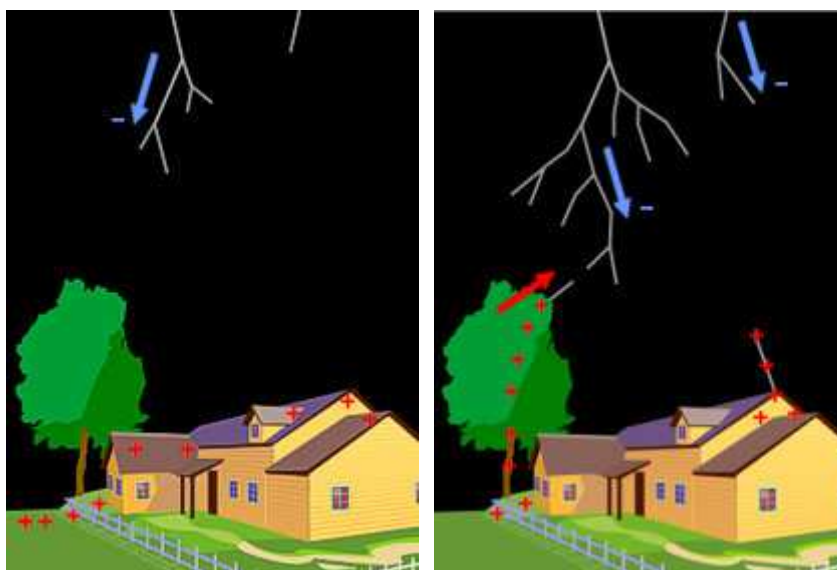


Λόγω του συνεχούς διαχωρισμού των θετικών και αρνητικών φορτίων μέσα στο σύννεφο, δημιουργείται ολοένα και αυξανόμενης έντασης ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ της κορυφής και της βάσης του. Η ατμόσφαιρα είναι ένας πολύ καλός μονωτής που αναστέλλει τη ροή φορτίων, οπότε ένα τεράστιο ποσό φορτίου πρέπει να συσσωρευτεί πριν συμβεί ο κεραυνός. Όταν το φορτίο φθάσει σε ένα όριο, η δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου ξεπερνά τις μονωτικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας και συμβαίνει κεραυνός.

Το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του σύννεφου δεν είναι το μόνο που αναπτύσσεται. Κάτω από την αρνητικά φορτισμένη βάση του σύννεφου, θετικό φορτίο αρχίζει να συγκεντρώνεται στην επιφάνεια της γης (βλέπε αριστερή εικόνα). Αυτό το θετικό φορτίο συνοδεύει την καταιγίδα, όπου και αν πηγαίνει, και είναι υπεύθυνο για τον κεραυνό σύννεφου-εδάφους. Ωστόσο, το ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο σύννεφο είναι πολύ ισχυρότερο από εκείνο μεταξύ σύννεφου και της επιφάνειας της γης, έτσι οι περισσότεροι κεραυνοί (75-80%) συμβαίνουν μέσα στο ίδιο το σύννεφο.

6.2 ΒΗΜΑΤΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΚΕΡΑΥΝΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΝΝΕΦΟΥ ΚΑΙ ΓΗΣ

Το κινούμενο καταιγιδοφόρο νέφος συνοδεύεται από μια συγκέντρωση θετικού φορτίου στην επιφάνεια της γης. Αυτό το θετικό φορτίο, καθώς ελκύεται από το αρνητικό φορτίο στη βάση του σύννεφου, ανεβαίνει σε υψηλότερα υψομετρικά σημεία στην επιφάνεια της γης, όπως δέντρα και ψηλά κτίρια. Αναλυτικά, τα βήματα για τη δημιουργία του κεραυνού παρουσιάζονται παρακάτω (NOAA - National Weather Service JetStream - Online School for Weather, http://www.srh.noaa.gov/jetstream/lightning/lightning_intro.htm):



Σχήμα 6.2. Βήματα 1 και 2 για τη δημιουργία κεραυνού (<http://www.srh.noaa.gov>).

Βήμα 1

Κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ του νέφους και του εδάφους, ένα κανάλι αρνητικού φορτίου που ονομάζεται "stepped leader", αόρατο στο ανθρώπινο μάτι, ξεκινά από τη βάση του σύννεφου και διαδίδεται προς το έδαφος σε μια σειρά από βήματα μήκους περίπου 50 μέτρων και χρονικής διάρκειας 1 μ s. Αυτή η «χιονοστοιβάδα των ηλεκτρονίων», συνήθως διακλαδίζεται σε πολλές κατευθύνσεις, καθώς πλησιάζει το έδαφος, μεταφέροντας ένα εξαιρετικά ισχυρό ηλεκτρικό δυναμικό: περίπου 100 εκατομμύρια βολτ σε σχέση με το έδαφος και περίπου 5 coulombs αρνητικού φορτίου. Ανάμεσα σε κάθε βήμα, υπάρχει μια παύση περίπου 50 μ s, κατά την οποία το κανάλι "stepped leader" ψάχνει αντικείμενο για να χτυπήσει. Αν δεν "δει" τίποτα, κάνει ένα ακόμη βήμα και επαναλαμβάνει

τη διαδικασία μέχρι να βρει στόχο. Ο χρόνος για την πλήρη ανάπτυξη του είναι περίπου 50ms και μπορεί να αποτελείται από 10000 βήματα.

Βήμα 2

Καθώς το αρνητικά φορτισμένο κανάλι "stepped leader" προσεγγίζει το έδαφος, το ισχυρό αρνητικό φορτίο του απωθεί όλα τα αρνητικά φορτία στην άμεση ζώνη χτυπήματος της επιφάνειας της γης, ενώ προσελκύει τεράστιες ποσότητες θετικού φορτίου. Η εισροή θετικού φορτίου στη ζώνη του κεραυνικού πλήγματος είναι τόσο ισχυρή, ώστε το αρνητικά φορτισμένο κανάλι προκαλεί τη δημιουργία θετικά φορτισμένων καναλιών που ξεκινούν από το έδαφος προς τον αέρα και είναι γνωστά ως "streamers". Όταν ένα από αυτά τα θετικά φορτισμένα κανάλια συνδεθεί με ένα αρνητικά φορτισμένο κανάλι, οπουδήποτε σε μια απόσταση από 30 έως 100 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της γης, τότε τα επόμενα βήματα συμβαίνουν σε λιγότερο από 100 μs.

Βήμα 3

Το ηλεκτρικό δυναμικό του "stepped leader" συνδέεται με το έδαφος και το αρνητικό φορτίο αρχίζει να μεταφέρεται προς τα κάτω, κατά μήκος του καναλιού.



Σχήμα 6.3. Βήματα 3 και 4 για τη δημιουργία κεραυνού (<http://www.srh.noaa.gov>).

Βήμα 4

Ένα κύμα ηλεκτρικού ρεύματος, που ονομάζεται "return stroke", κινείται ανοδικά στο κανάλι, σαν λαμπρός παλμός. Πίσω από το μέτωπο του κύματος, το ηλεκτρικό φορτίο ρέει προς τα πάνω στο κανάλι και δημιουργείται ρεύμα στη γη, το οποίο φθάνει τη μέγιστη τιμή του (περίπου 30000 A) σε 1 μ s. Το κύμα αυτό παράγει περισσότερο από το 99% της φωτεινότητας του κεραυνού. Ο κεραυνός κινείται στην πραγματικότητα από το έδαφος προς το σύννεφο, αλλά επειδή λαμβάνει χώρα τόσο γρήγορα, με γυμνό μάτι φαίνεται το αντίθετο.

Βήμα 5

Μετά από την παύση του κύματος ρεύματος "return stroke", υπάρχει μια παύση των περίπου 20 έως 50 ms. Μετά από αυτό το χρόνο, εάν υπάρχει διαθέσιμο εναπομείναν φορτίο μέσα στο σύννεφο, και άλλο αρνητικά φορτισμένο κανάλι "leader" μπορεί να μεταδοθεί προς το έδαφος. Αυτό ονομάζεται κανάλι "dart leader" επειδή χρησιμοποιεί την ήδη υπάρχουσα συνεχή διαδρομή. Τα κανάλια "dart leader" δίνουν στον κεραυνό τη flicker εμφάνιση και συνήθως δεν διακλαδίζονται, όπως το αρχικό "stepped leader". Δεν συμβαίνουν πάντοτε, διότι πρέπει να υπάρχει διαθέσιμο αρκετό εναπομείναν φορτίο εντός περίπου 100 ms μετά από το αρχικό "stepped leader". Το κανάλι "dart leader" μεταφέρει επιπλέον ηλεκτρικό δυναμικό στο έδαφος και προκαλεί ένα νέο κανάλι "streamer" από το έδαφος. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος του "dart leader" είναι συνήθως μικρότερη από εκείνη του αρχικού "stepped leader" και το επόμενο κύμα ηλεκτρικού ρεύματος έχει μικρότερη διάρκεια από το αρχικό.

Υπάρχει περίπτωση το κανάλι "dart leader" και το επιστρέφων κύμα ρεύματος να μη χρησιμοποιήσουν την ίδια διαδρομή με το αρχικό κανάλι "stepped leader". Τότε, ο κεραυνός εμφανίζεται να κινείται από το ένα μέρος στο άλλο και ονομάζεται διχαλωτός "forked lightning".

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει και ο κεραυνός που ξεκινά από το ανώτερο τμήμα του καταιγιδοφόρου σύννεφου (5% όλων των τύπων) και χτυπάει στο έδαφος. Λόγω του θετικού φορτίου στο τμήμα αυτό, λέγεται θετικός κεραυνός. Χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή τιμή ρεύματος που μπορεί να φθάσει τα 300 KA (10 φορές πιο πολύ από την τυπική τιμή) και δυναμικό 10^9 V. Μπορεί να χτυπήσει σε μακρινή περιοχή (ακόμα και 10 μίλια) από την περιοχή της καταιγίδας.

6.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΙΩΣΗΣ

Η γείωση ορίζεται ως η αγώγιμη σύνδεση με το έδαφος των προς γείωση τμημάτων μιας εγκαταστάσεως ή του ουδέτερου κόμβου μετασχηματιστών και γεννητριών. Σκοπός της γείωσης είναι η εκφόρτιση των ηλεκτρικών ρευμάτων προερχόμενων από σφάλμα στη γη (Βάρλα, 2004). Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες γειώσεων:

Γείωση λειτουργίας

Καλείται η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους ή για την αποφυγή υπερτάσεων. Διακρίνεται σε άμεση εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης και έμμεση εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.

Γείωση προστασίας

Καλείται η αγώγιμη σύνδεση των μεταλλικών μερών μιας εγκατάστασης που δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά. Στην περίπτωση της παρούσας εγκατάστασης, η γείωση του κύριου ηλεκτρολογικού πίνακα του κτιρίου αποτελείται από επιμέρους χαλύβδινες θερμά επιψευδαργυρωμένες πλάκες St/tZn.

Γείωση ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας

Η γείωση ασφαλείας χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκόμενων στον περιβάλλοντα χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις αντιστατικών δαπέδων. Οι γειώσεις των αλεξικέραυνων ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Στην περίπτωση της παρούσας εγκατάστασης, το σύστημα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας θα αποτελείται από περιμετρική του κτιρίου χάλκινη επικασσιτερωμένη (Cu/eSn) ταινία διαστάσεων 40x3 mm (σχήμα 6.4), η οποία τοποθετείται εντός του εδάφους, σε χαντάκι. Στην επιφάνεια του εδάφους θα υπάρχουν απολήξεις σύνδεσης σε θέσεις όπου αναμένεται να συνδεθούν οι αγωγοί καθόδου. Ο ζυγός γείωσης του κύριου ηλεκτρολογικού πίνακα του κτιρίου θα συνδεθεί και με την περιμετρική γείωση.

Ισοδυναμικές συνδέσεις - Διμεταλλική επαφή – Σπινθηριστής απομόνωσης

Τα ικριώματα στήριξης από αλουμίνιο, των επιμέρους φβ συστοιχιών συνδέονται ισοδυναμικά μεταξύ τους και όλη η διάταξη συνδέεται με την περιμετρική γείωση. Διμεταλλική επαφή θα χρησιμοποιηθεί για την παρεμβολή μεταξύ μεταλλικών επιφανειών

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

αλουμινίου ή χάλυβα με χαλκό για την αποφυγή ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Επίσης, όλα τα ανοδιωμένα πλαίσια αλουμινίου των φβ πλαισίων θα συνδεθούν ισοδυναμικά μεταξύ τους και με το ζυγό γείωσης.

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Θέση εγκατάστασης	➤ Σε εξωτερικό χώρο, εντός εδάφους, εντός σκυροδέματος
Επιτρεπτή σύνδεση σε εξωτερικό χώρο με	➤ Al, Cu, Cu/eSn, Stainless steel, St/tZn.
Περιβαλλοντική γήρανση σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 50164-2 ⁽¹⁾	➤ Ατμόσφαιρα αλατομίχλης (3 ημέρες). ➤ Όξινη ατμόσφαιρα διοξειδίου του Θείου (7 ημέρες).
Διαφορά στην ηλεκτρική αντίσταση πριν και μετά την περιβαλλοντική γήρανση.	➤ <50%
Τάση θραύσεως (εφελκυσμός) ⁽²⁾	➤ 200 - 450N/mm ²
Επιμήκυνση ⁽²⁾	➤ >7%
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση	➤ <0,019μΩm

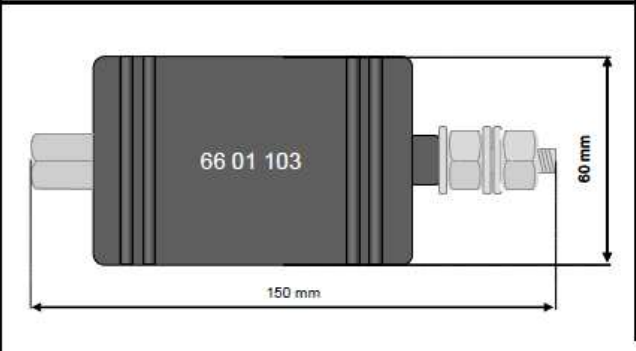



Σχήμα 6.4. Χάλκινη επικασσιτερωμένη ταινία 40x3 mm, Cu/eSn (<http://www.elemko.gr>).

Οι ισοδυναμικές συνδέσεις μεταξύ των μεταλλικών (χαλύβδινων) σωλήνων του κτιρίου (παροχές νερού κλπ) και της γείωσης γίνονται μόνον με τη χρήση σπινθηριστή απομόνωσης (σχήμα 6.5). Οι σπινθηριστές απομόνωσης έχουν κύριο σκοπό τη γαλβανική απομόνωση γειώσεων ή μεταλλικών εγκαταστάσεων που λειτουργικές ανάγκες δεν επιτρέπουν την άμεση ισοδυναμική σύνδεση που απαιτεί μία ολοκληρωμένη και ασφαλής εγκατάσταση συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Οι σπινθηριστές απομόνωσης παρεμβάλλονται μεταξύ των προς σύνδεση εγκαταστάσεων ή γειώσεων και όταν η μεταξύ τους τάση υπερβεί την τάση διάσπασης του σπινθηριστή, τότε αυτός ενεργοποιείται εξισώνοντας με τον τρόπο αυτό το δυναμικό στιγμιαία. Με τη λειτουργία αυτή, αποτρέπεται η ανάπτυξη επικίνδυνων σπινθηρών σε τυχαίες θέσεις της εγκατάστασης του προστατευομένου χώρου, καθώς επίσης και επικίνδυνων τάσεων επαφής. Μετά την αποκατάσταση ισορροπίας

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

των δυναμικών ο σπινθηριστής επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση αποκαθιστώντας την αρχική γαλβανική απομόνωση (<http://www.elemko.gr>).

Τεχνικά χαρακτηριστικά	
DC τάση διάσπασης σε 100V/s	500V ± 20%
AC τάση διάσπασης σε 50Hz	350V ± 20%
Τάση διάσπαση σε κύμα 1kV/μs	1300V
Κεραυνικό ρεύμα 10/350μs, I_{imp}	1 x 100kA +
DC Ακόλουθο ρεύμα μετά το I_{imp}	200A / 0,5s
Κρουστικό ρεύμα 8/20μs	10 x 100kA
Κρουστικό ρεύμα μεγάλης ενέργειας 10/45μs	20 x 60kA
AC ρεύμα 50Hz, t=1s	5 x 100A _{rms}
AC ρεύμα 50Hz, t=0,5s	1 x 200A _{rms}
AC ρεύμα 50Hz, t=0,3s	1 x 3000A _{rms}
Σβέση ακόλουθου ρεύματος	Σε 230V < 100A _{rms}
Αντίσταση μόνωσης σε 100V DC	1GΩ
Χωρητικότητα σε 1kHz	4pF
Διαστάσεις (Διάμετρος / μήκος)	60 x 150 mm
Ακροδέκτες σύνδεσης	Σπείρωμα M8 (ροπή σύσφιξης 10Nm)
Υλικό περιβλήματος	Metal, Ceramic, PVC
Προστασία περιβλήματος	IP 67
Πρότυπα	EN 50164-3
Σχέδιο	Φωτογραφία
	

Σχήμα 6.5. Σπινθηριστής απομόνωσης (<http://www.elemko.gr>).

Ηλεκτροχημική συμβατότητα

Σχετικά με την επαφή διαφορετικών μετάλλων, ηλεκτρόλυση συμβαίνει μεταξύ όλων των μετάλλων με μεγάλη διαφορά ηλεκτρολυτικής τάσης, η οποία είναι συνάρτηση του «μέσου» (περιβάλλον) μέσα στο οποίο έρχονται σε επαφή. Όταν χάλκινα και χαλύβδινα υλικά έρχονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους μέσα σε ένα περιβάλλον με υγρασία, σύντομα θα υπάρξει διάβρωση του χαλύβδινου λόγω ηλεκτρόλυσης με τα συνεπαγόμενα αρνητικά

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

αποτελέσματα. Στην περίπτωση των γειώσεων, όπου χαλκός και χάλυβας συνδέονται εντός εδάφους συμβαίνει ηλεκτρόλυση λόγω του ότι βρίσκονται στο ίδιο μέσον, το χώμα, μέσω του οποίου ο χάλυβας με αρνητική ηλεκτρολυτική τάση διαβρώνεται ταχύτατα από το χαλκό (θετική τάση). Αντίθετα με την παραπάνω περίπτωση, σε μία θεμελιακή γείωση όπου χαλκός και χάλυβας είναι συνδεδεμένοι ηλεκτρικά μέσα σε σκυρόδεμα, δεν παρουσιάζεται καμία διάβρωση, μία που μέσα στο συγκεκριμένο μέσον οι ηλεκτρολυτικές τους τάσεις είναι πάρα πολύ κοντά. Στην περίπτωση που το ίδιο υλικό διατρέχει δύο διαφορετικά μέσα και πιο συγκεκριμένα όταν ο χάλυβας από το σκυρόδεμα εξέρχεται στο έδαφος (χώμα), ο ίδιος ο χάλυβας που στο σκυρόδεμα παρουσιάζει θετική ηλεκτρολυτική τάση διαβρώνει τον "εαυτό" του που στο χώμα έχει αρνητική ηλεκτρολυτική τάση. Το γυμνό αλουμίνιο σαν υλικό δεν επιτρέπεται να θάβεται ούτε στο έδαφος ούτε στο σκυρόδεμα. (<http://www.elemko.gr>). Στον πίνακα 6.1 φαίνονται οι επιτρεπόμενες και μη άμεσες συνδέσεις μετάλλων στο έδαφος και στο σκυρόδεμα.

Πίνακας 6.1. Επιτρεπόμενες και μη άμεσες συνδέσεις μετάλλων στο έδαφος και στο σκυρόδεμα (<http://www.elemko.gr>).

		ΥΛΙΚΟ ΑΓΩΓΟΥ ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ				ΥΛΙΚΟ ΑΓΩΓΟΥ ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ			
		Cu	Cu/PVC	St/tZn	SS	Cu	Cu/PVC	St/tZn	SS
ΥΛΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	Cu	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	St/tZn	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
	SS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ΥΛΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	Cu	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	St/tZn	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
	SS	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓

Όπου Cu = Γυμνός χαλκός, Cu/PVC = Μονωμένος χαλκός, St/tZn = Γαλβανισμένος ή κοινός χάλυβας, SS = Ανοξείδωτος χάλυβας.

Η αντικεραυνική προστασία της φβ εγκατάστασης περιλαμβάνει το εξωτερικό σύστημα προστασίας (συλλεκτήριο σύστημα, σύστημα αγωγών καθόδου) και το εσωτερικό σύστημα που αποτελείται από τις διατάξεις προστασίας έναντι υπερτάσεων.

6.4 ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

6.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΛΙΟΜΕΝΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ

Αποτελεί τεχνική που χρησιμοποιείται συνήθως σε κατασκευές με πολύπλοκη γεωμετρία για να προσδιοριστούν οι θέσεις που πρέπει να προστατευτούν από πιθανό κεραυνικό πλήγμα. Το σημείο του κεραυνικού πλήγματος προσδιορίζεται από το σημείο εκκίνησης του ανερχόμενου θετικά φορτισμένου καναλιού. Πιο συγκεκριμένα, καθώς το αρνητικά φορτισμένο κανάλι (stepped leader) κατέρχεται και προσεγγίζει το έδαφος, αυξάνει και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της γης. Σε κάποια στιγμή, η ένταση του πεδίου ξεπερνά την τιμή διάσπασης του ατμοσφαιρικού αέρα και από την επιφάνεια της γης εκκινούν τα ανερχόμενα θετικά φορτισμένα κανάλια. Το άκρο του stepped leader μπορεί να κατέλθει μέχρι μια καθορισμένη απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους, πριν ενωθεί με το ανερχόμενο θετικά φορτισμένο κανάλι. Αυτή η απόσταση καθορίζεται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Η μικρότερη απόσταση μεταξύ της άκρης του stepped leader και του σημείου εκκίνησης των ανερχόμενων θετικά φορτισμένων καναλιών είναι γνωστή ως απόσταση πλήγματος (<http://www.dehn-international.com/en/lightning-protection-guide>).

Υπάρχει μια αναλογία μεταξύ της τιμής αιχμής του κεραυνικού ρεύματος και του ηλεκτρικού φορτίου του κατερχόμενου καναλιού stepped leader. Επίσης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους συνδέεται γραμμικά με το παραπάνω φορτίο. Οπότε υπάρχει μια αναλογία μεταξύ της τιμής αιχμής του κεραυνικού ρεύματος και της απόστασης πλήγματος (ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας), η οποία εκφράζεται από τη σχέση:

$$R = 10 * I^{0.65}$$

όπου: οι μονάδες του R (ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας) είναι σε m

οι μονάδες του I (τιμή αιχμής του κεραυνικού ρεύματος) είναι σε kA.

Στον παρακάτω πίνακα 6.2 δίνεται η ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας, η τιμή αιχμής του κεραυνικού ρεύματος και το επίπεδο προστασίας.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Πίνακας 6.2. Ακτίνα κυλιόμενης σφαίρας συναρτήσει του επιπέδου προστασίας

ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	ΑΚΤΙΝΑ(m) ΚΥΛΙΟΜΕΝΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ (ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΠΛΗΓΜΑΤΟΣ)	ΤΙΜΗ ΑΙΧΜΗΣ ΚΕΡΑΥΝΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ I (kA)
4	60	16
3	45	10
2	30	5
1	20	3

Παρατηρείται ότι για το πρώτο επίπεδο προστασίας, το κατερχόμενο κανάλι πλησιάζει την επιφάνεια του εδάφους σε μικρή απόσταση και το κεραυνικό ρεύμα έχει τη μικρότερη σχετικά τιμή αιχμής. Για την εκτέλεση της μεθόδου, είναι απαραίτητο ένα μοντέλο του υπό μελέτη κτιρίου σε κλίμακα 1:100, καθώς και μιας ανάλογης κλίμακας και διάστασης, σφαίρα που θα συμφωνεί με το επιθυμητό επίπεδο προστασίας. Η σφαίρα κυλιέται επάνω στο υπό κλίμακα κτίριο και μαρκάρονται τα σημεία επαφής, τα οποία υποδεικνύουν πιθανά σημεία κεραυνικού πλήγματος.

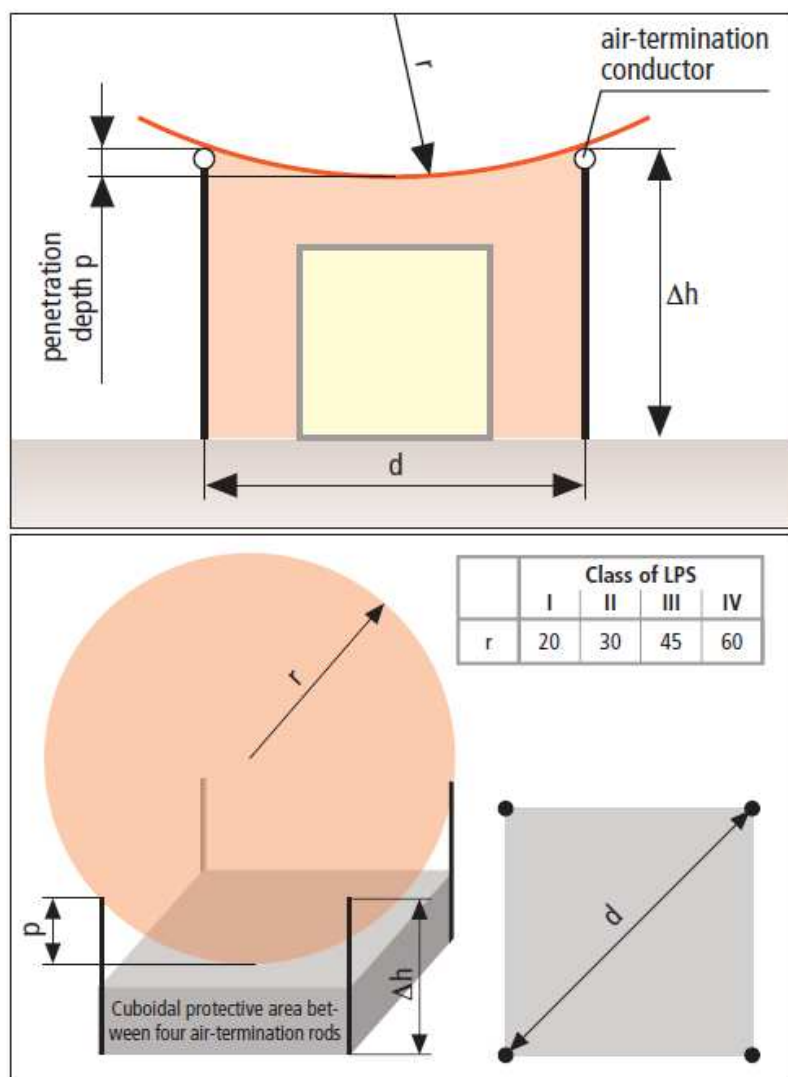
Έστω η περίπτωση που σε μια εγκατάσταση τοποθετούνται ακίδες (αλεξικέραυνα) του ίδιου ύψους. Το βάθος διείσδυσης (η κοιλία) της κυλιόμενης σφαίρας μεταξύ των δύο ακίδων δίνεται από τον τύπο:

$$p = r - [r^2 - (d/2)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Όπου: p το βάθος διείσδυσης

d η μεταξύ των ακίδων απόσταση (σχήμα 6.6)

Στην περίπτωση της παρούσας εγκατάστασης, επιλέγεται το επίπεδο προστασίας III. Η ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας θα είναι $r = 45$ m. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το κτίριο έχει διαστάσεις 23x27m, η διαγώνιος του κτιρίου θα είναι $d = 35,47$ m. Αντικαθιστώντας στον τύπο, το βάθος διείσδυσης είναι $p = 3,642$ m. Το ύψος κάθε φβ συστοιχίας είναι 1,5 m, οπότε το ύψος κάθε ακίδας θα είναι $1,5 + 3,64 = 5,14$ m.



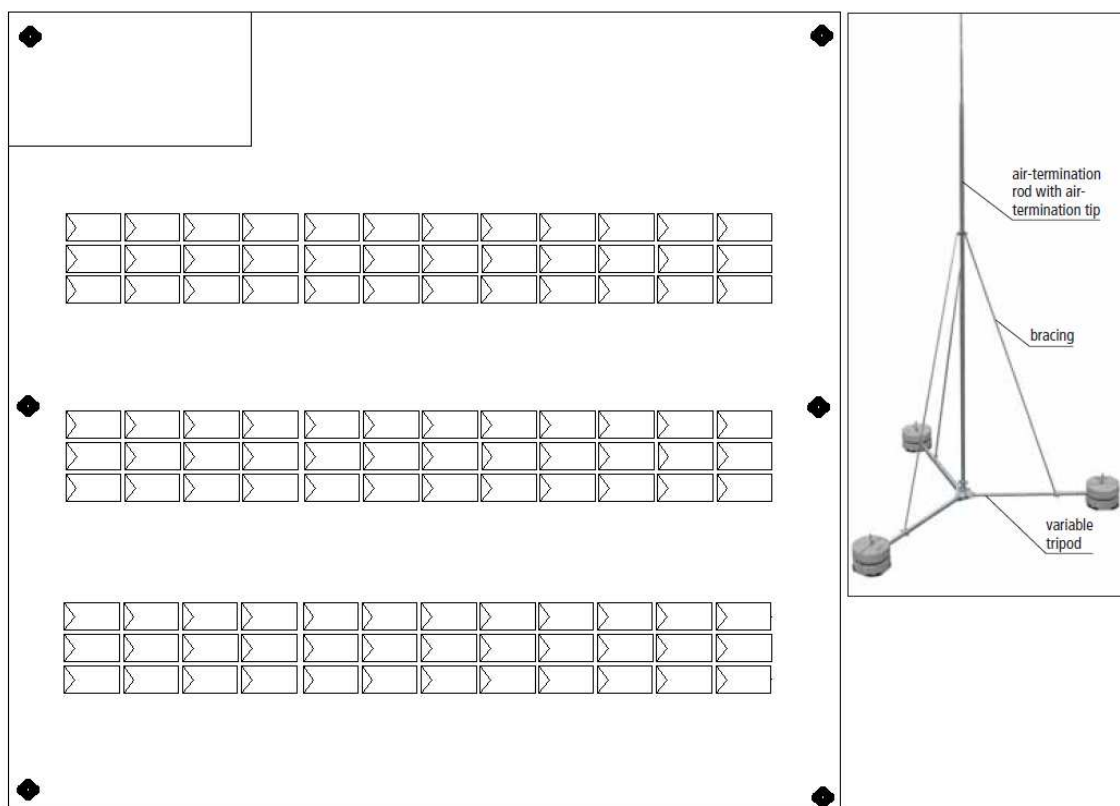
Σχήμα 6.6. Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας (<http://www.dehn-international.com>).

Για να μειωθεί αυτό το ύψος, ώστε να μη προκαλείται σκίαση στα φβ πλαίσια, αλλά και να μην αποτελεί αντιαισθητικό σημείο, εξετάστηκε το ενδεχόμενο να μπουν άλλες δύο ακίδες στο μέσο της πλευράς B-N. Τώρα, η διαγώνιος d είναι ίση με $d = 29,34\text{m}$. Αντικαθιστώντας στον τύπο, το βάθος διείσδυσης p είναι $p = 2,46\text{ m}$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ύψος κάθε φβ συστοιχίας είναι $1,5\text{ m}$, το ύψος κάθε ακίδας θα είναι $1,5+2,46= 3,96\text{ m}$. Αυτές οι έξι ακίδες (αλεξικέραυνα), ύψους $3,96\text{m}$, θα τοποθετηθούν στην περίμετρο της ταράτσας του κτιρίου και μέσω ισάριθμων αγωγών καθόδου θα συνδεθούν με την περιμετρική γείωση (σχήμα 6.7).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει και ο εναλλακτικός, φθηνότερος τρόπος να τοποθετηθούν μικρές ακίδες ύψους περίπου $0,5\text{ m}$ σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, στο

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

ανώτερο τμήμα κάθε βάσης στήριξης των φβ πλαισίων. Έπειτα, κάθε βάση στήριξης συνδέεται με την περιμετρική γείωση μέσω των αγωγών καθόδου.



Σχήμα 6.7. Ακίδα αντικεραυνικής προστασίας και σημεία εγκατάστασης των 6 ακίδων στην ταράτσα του κτιρίου.

6.4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΓΩΓΩΝ ΚΑΘΟΔΟΥ

Πρόκειται για την ηλεκτρικά αγωγήμη σύνδεση μεταξύ των ακίδων και της περιμετρικής γείωσης. Ο σκοπός του συστήματος είναι να άγει το κεραυνικό ρεύμα στη γη χωρίς σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών που μπορεί να προκαλέσει ζημιά σε υποδομές στο κτίριο. Ο πίνακας 6.3 παρέχει την αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού καθόδου σε βαθμούς Κ, για διάφορα υλικά αγωγών. Για το λόγο αυτό οι αγωγοί καθόδου σχεδιάζονται έτσι ώστε να υπάρχουν εναλλακτικές, παράλληλες διαδρομές ρεύματος, η κατανομή τους να είναι όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφη, το μήκος τους όσο το δυνατό μικρότερο, χωρίς βρόχους και να τηρείται η απόσταση ασφαλείας από αγωγήμα μέρη της εγκατάστασης του κτιρίου. Στην παρούσα εγκατάσταση θα χρησιμοποιηθούν χάλκινοι αγωγοί καθόδου, διατομής 16 mm².

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Πίνακας 6.3. Αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού καθόδου σε βαθμούς Κ, για διάφορα υλικά αγωγών (<http://www.dehn-international.com>).

q mm ²	Ø	Type of lightning protection system											
		Aluminium			Iron			Copper			Stainless steel		
		III + IV	II	I	III + IV	II	I	III + IV	II	I	III + IV	II	I
16		146	454	*	1120	*	*	56	143	309	*	*	*
50	8 mm	12	28	52	37	96	211	5	12	22	190	460	940
78	10 mm	4	9	17	15	34	66	3	5	9	78	174	310

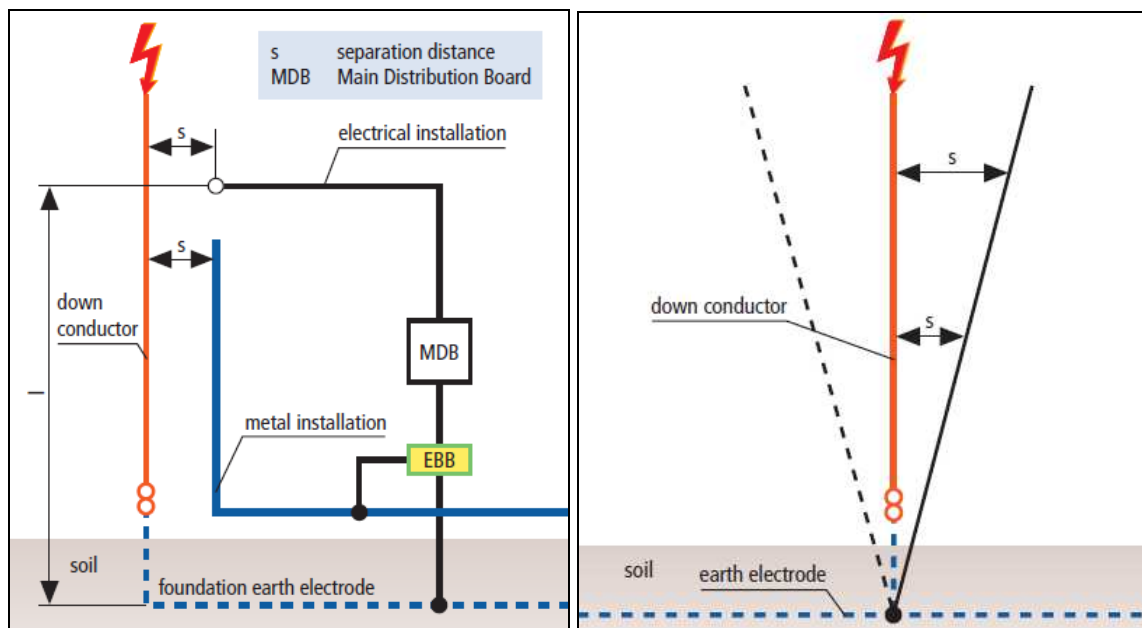
* melting / vaporising

Η απόσταση μεταξύ των αγωγών εξαρτάται από το επίπεδο προστασίας (πίνακας 6.4). Το πλήθος των αγωγών καθόδου εξαρτάται από την περίμετρο της στέγης (κάθετη προβολή της) και από την απόσταση ασφαλείας s . Αν η απόσταση αυτή δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί, τότε αυξάνει το πλήθος των αγωγών καθόδου. Οι παράλληλες διαδρομές ρεύματος αυξάνουν το συντελεστή διαχωρισμού ρεύματος k_c , (τύπος προσδιορισμού απόστασης ασφαλείας s , που αναλύεται στην επόμενη ενότητα). Με την αύξηση του πλήθους των αγωγών καθόδου, μειώνεται το ρεύμα ανά αγωγό και η απόσταση ασφαλείας μπορεί να τηρηθεί. Επίσης, διασυνδέοντας τους αγωγούς καθόδου στην κοινή περιμετρική γείωση, ισορροπείται η κατανομή του κεραυνικού ρεύματος, γεγονός που μειώνει την απόσταση ασφαλείας s . Στην παρούσα εγκατάσταση, η απόσταση μεταξύ των αγωγών καθόδου είναι περίπου 12 m.

Πίνακας 6.4. Απόσταση μεταξύ των αγωγών καθόδου συναρτήσει του επιπέδου προστασίας (<http://www.dehn-international.com>).

ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	Απόσταση (m) μεταξύ των αγωγών καθόδου
4	20
3	15
2	10
1	10

6.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ S



Σχήμα 6.8. Απόσταση ασφαλείας s (<http://www.dehn-international.com>).

Λόγω του υψηλού κεραυνικού ρεύματος, υπάρχει το ρίσκο να υπάρξει μετάδοση του κεραυνικού ρεύματος σε κοντινά αγωγίμα τμήματα της ηλεκτρικής εγκατάστασης ή της γενικότερης υποδομής του κτιρίου, όπως σωλήνες νερού, κλιματιστικών, κλπ. Επιπλέον, σε μεταλλικές κατασκευές, βρόχους, αναπτύσσεται υπέρταση από επαγωγή, λόγω του ισχυρού μαγνητικού πεδίου που οφείλεται στο κεραυνικό ρεύμα και μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή της υποδομής. Συνεπώς, θα πρέπει να τηρείται μια απόσταση ασφαλείας s , μεταξύ του εξοπλισμού αντικεραυνικής προστασίας (ακίδες, αγωγοί καθόδου) και των αγωγίμων τμημάτων της γενικότερης υποδομής του κτιρίου. Αυτή η απόσταση s υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$s = k_i \cdot \frac{k_c}{k_m} \cdot L$$

Όπου:

k_i είναι ο συντελεστής επαγωγής και εξαρτάται από το επίπεδο της αντικεραυνικής προστασίας

k_c είναι ο συντελεστής διαχωρισμού ρεύματος και εξαρτάται από το διαχωρισμό του κεραυνικού ρεύματος στο σύστημα των αγωγών καθόδου.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

K_m είναι ο συντελεστής υλικού και εξαρτάται από το μονωτικό υλικό που μεσολαβεί μεταξύ της ακίδας και του σημείου ενδιαφέροντος

L είναι η απόσταση (σε m) από το σημείο ενδιαφέροντος ως την ισοδυναμική επιφάνεια της γείωσης. Η απόσταση s μειώνεται όσο το σημείο ενδιαφέροντος πλησιάζει τη γη, διότι η διαφορά δυναμικού μειώνεται όσο μικραίνει η απόσταση με τη γη.

Στην περίπτωση του υπό μελέτη συστήματος, υπολογίστηκε η απόσταση ασφαλείας από μια ακίδα. Οι τιμές των παραμέτρων είναι:

$K_i = 0,04$ λόγω του επιπέδου προστασίας III.

$K_c = 1$, διότι από τη στιγμή που ο κεραυνός χτυπήσει την ακίδα, το ρεύμα εισέρχεται στη γη μέσω ενός αγωγού καθόδου.

$K_m = 1$, διότι μεταξύ της ακίδας και του σημείου ενδιαφέροντος υπάρχει αέρας.

$L = 8$ m, διότι αυτή είναι η απόσταση μεταξύ της ισοδυναμικής επιφάνειας της γείωσης και του σημείου ενδιαφέροντος, το οποίο είναι η βάση της ακίδας.

Αντικαθιστώντας στον τύπο, η απόσταση ασφαλείας s είναι ίση με $s = 0,32$ m. Αυτή η απόσταση ασφαλείας ικανοποιείται στην υπό μελέτη εγκατάσταση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΣΤΗΜΑ UPS & Η/Ζ

ΣΥΣΤΗΜΑ UPS & Η/Ζ

7.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΩΝ ΚΤΙΡΙΟΥ

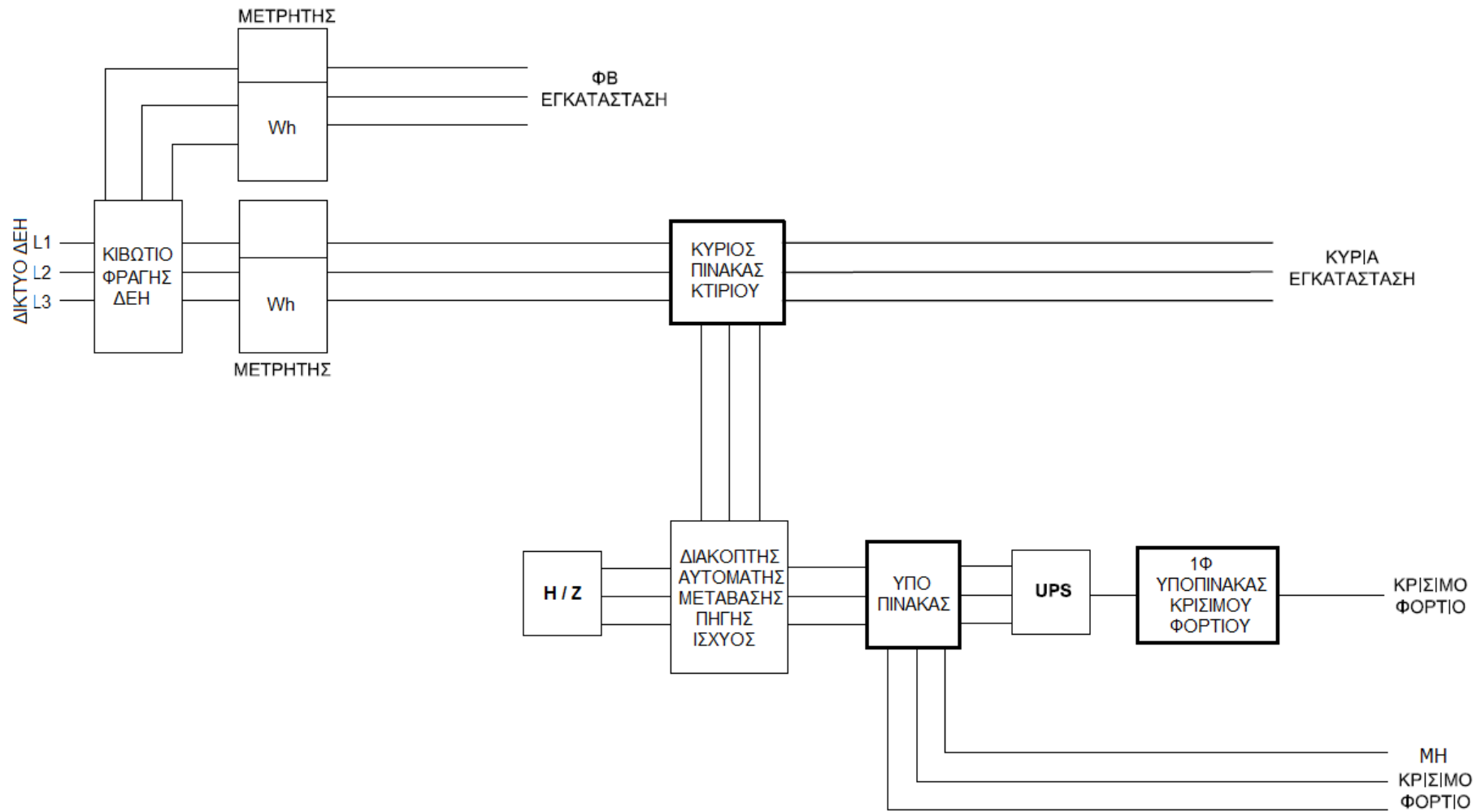
Το κτίριο αποτελείται από καταναλώσεις AC. Σε αυτές υπάρχουν και ευαίσθητα φορτία που σχετίζονται με ηλεκτρονικό εξοπλισμό βάσης δεδομένων, που είναι ενεργός όλο το 24ωρο. Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται αναλυτικά όλα τα φορτία της ηλεκτρικής εγκατάστασης του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένου του κρίσιμου φορτίου.

Πίνακας 7.1. Φορτία της ηλεκτρικής εγκατάστασης

ΦΟΡΤΙΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ			
ΦΟΡΤΙΟ	ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ S (KVA)	ΧΡΟΝΟΣ ΧΡΗΣΗΣ (ώρες/ημέρα)	ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (KWh/ημέρα)
ΦΩΤΙΣΜΟΣ	2	10	20
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ	3	10	30
ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ	4	10	40
ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ	1	24	24
ΚΡΙΣΙΜΟ ΦΟΡΤΙΟ - ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ	2.5	24	60
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ	12.5	-	-
ΣΥΝΟΛΟ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ (KWh / ημέρα)			174.0

Για την προστασία του κρίσιμου φορτίου της εγκατάστασης από απώλεια της παροχής ισχύος από το δίκτυο διανομής, θα εγκατασταθεί σύστημα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS), σε συνδυασμό με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (Η / Ζ). Το σύστημα UPS θα αναλαμβάνει την παροχή ισχύος στο φορτίο για περιορισμένο χρονικό διάστημα, μέχρι το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος να τεθεί σε λειτουργία. Το διάγραμμα διάταξης του εξοπλισμού (UPS, Η / Ζ) στην ηλεκτρολογική εγκατάσταση του κτιρίου φαίνεται στο σχήμα 7.1. Διευκρινίζεται ότι το μη κρίσιμο φορτίο που τροφοδοτείται από τον ίδιο υποπίνακα με εκείνο του UPS, αποτελείται από κλιματιστικό για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του ευαίσθητου εξοπλισμού σε σταθερή τιμή. Το φορτίο αυτό είναι ανενεργό από τη στιγμή της απώλειας παροχής του δικτύου διανομής μέχρι τη σύνδεση με το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.

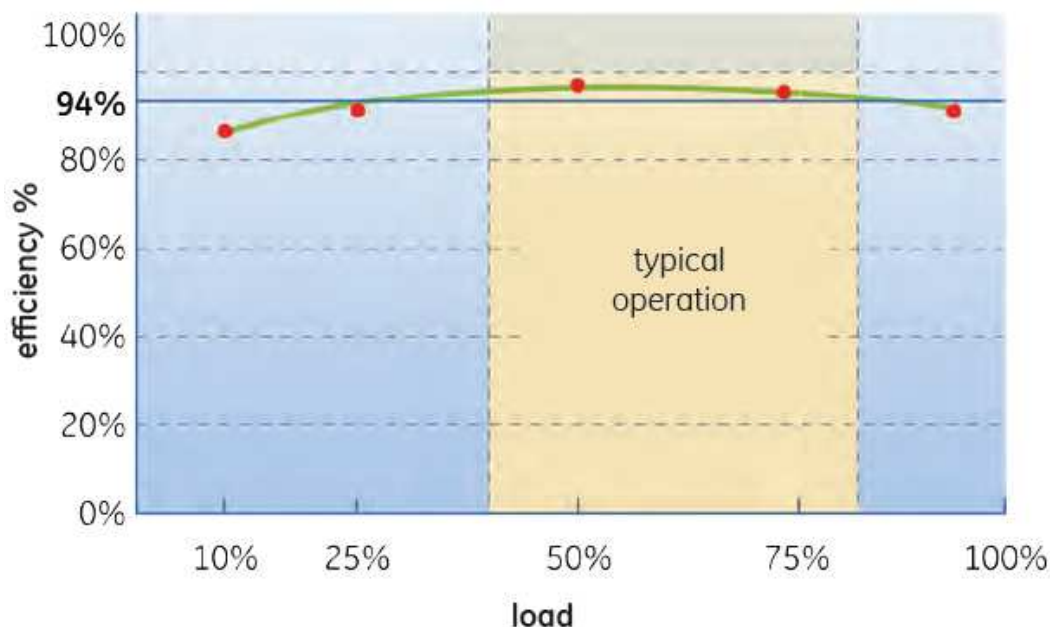
ΣΥΣΤΗΜΑ UPS & Η/Ζ



Σχήμα 7.1. Διάγραμμα διάταξης του εξοπλισμού (UPS, Η / Ζ) στην ηλεκτρολογική εγκατάσταση του κτιρίου

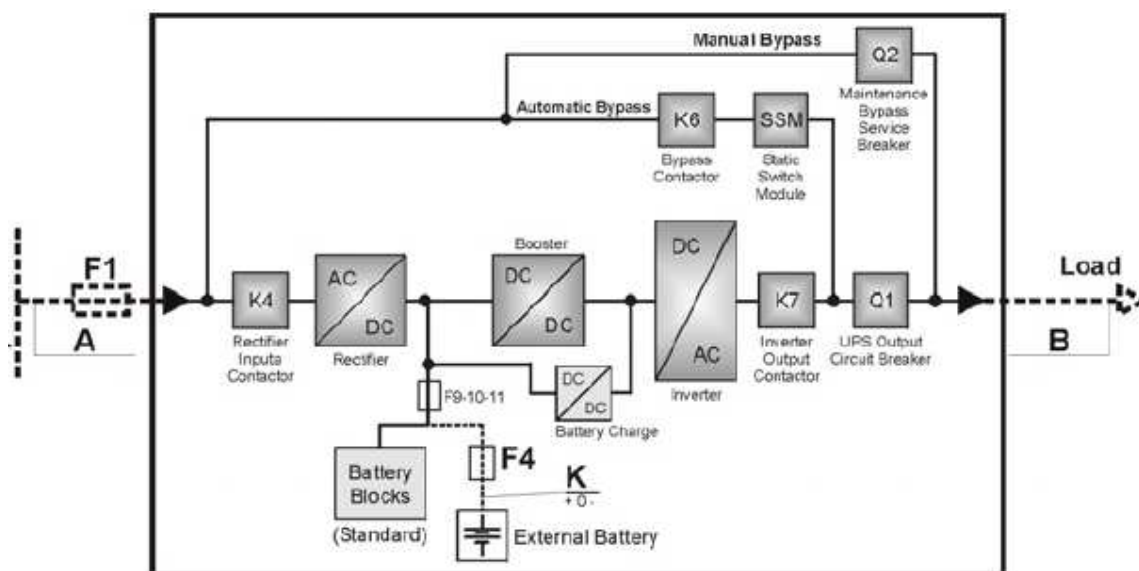
7.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ UPS

Γενικότερα, πλήθος συστημάτων αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS) έχουν βέλτιστη αποδοτικότητα όταν το φορτίο κυμαίνεται μεταξύ 50 και 75% της ισχύος του UPS (σχήμα 7.2).



Σχήμα 7.2. Περιοχή τυπικής λειτουργίας φόρτισης UPS (<http://www.geindustrial.com/products/critical-power>).

Εσωτερικά, ένα online σύστημα UPS αποτελείται από τις παρακάτω διατάξεις (σχήμα 7.3):



Σχήμα 7.3. Επιμέρους διατάξεις στο εσωτερικό online UPS (<http://www.geindustrial.com/products/critical-power>).

ΣΥΣΤΗΜΑ UPS & Η/Ζ

Κύριο κριτήριο για την επίλογη του συστήματος αδιάλειπτης παροχής ισχύος είναι η ισχύς του κρίσιμου φορτίου που θα εξυπηρετείται. Το κρίσιμο φορτίο της εγκατάστασης είναι φαινόμενης ισχύος $S = 2.5 \text{ KVA}$. Μετά από έρευνα αγοράς, επιλέχθηκε το Online / Double Conversion μοντέλο UPS, LP5-31T, της General Electric, τα χαρακτηριστικά του οποίου δίνονται στον πίνακα 7.2. Το μοντέλο αυτό διαθέτει τριφασική παροχή εισόδου και μονοφασική παροχή εξόδου και είναι φαινόμενης ισχύος $S = 5 \text{ KVA}$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το φορτίο είναι ισχύος $S=2.5 \text{ KVA}$, το σύστημα θα λειτουργεί εντός των πλαισίων της ισχύος που του διασφαλίζουν καλή αποδοτικότητα, ενώ θα υπάρχει και η δυνατότητα μελλοντικής προσθήκης κρίσιμου φορτίου.

Πίνακας 7.2. Χαρακτηριστικά του συστήματος αδιάλειπτης παροχής ισχύος (<http://www.geindustrial.com/products/uninterruptible-power-supplies-ups-single-phase>).

Model	LP 5-31T
Rating (kVA / kW)	5/4
Battery (V/Ah)	240/7
Typical backup time 50 / 100% load (min.)	25/10
Enclosure	A/B*
Net weight incl. batt. (kg)	180*
Input voltage (Vac)	340-470*
Input power factor	.99
Input frequency (Hz)	40-70
Output voltage (Vac)	220/230/240 (user selectable)
Output voltage regulation	+/- 1%
Output frequency (Hz)	50/60
Environment	IP20 (IEC 60529)
Humidity	95% non-condensing
Ambient operating temperature	0 - 40 °C (32 - 104 °F)
Audible noise	40-55 dB(A) load and temperature dependent
Standards safety	EN 50091-1; EN 60950; IEC 950
Protection degree	IP20
Standards EMC	EN 50091-2 / IEC 62040-2

7.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥ ΖΕΥΓΟΥΣ (Η / Ζ)



Σχήμα 7.4. Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος FGWILSON

Η επιλογή της ισχύος του Η/Ζ έγινε με βάση την ισχύ του κρίσιμου φορτίου, την ισχύ του UPS (το οποίο είναι δυνατό να εξυπηρετήσει μελλοντικά και μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο), καθώς και τα απαραίτητα μη κρίσιμα φορτία (κλιματισμός) για την διατήρηση της θερμοκρασίας της αίθουσας του ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε σταθερή ελεγχόμενη τιμή. Το κρίσιμο φορτίο είναι ισχύος $S = 2.5 \text{ KVA}$, το κλιματιστικό $S = 1 \text{ KVA}$, ενώ για τους καλοκαιρινούς μήνες πιθανόν να είναι απαραίτητη η λειτουργία και επιπλέον κλιματιστικού. Κατόπιν έρευνας, επιλέχθηκε ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος της εταιρείας FGWILSON, υψηλού βαθμού αξιοπιστίας και συγκεκριμένα το μοντέλο P9.5-4, τριφασικής ισχύος εξόδου $S = 9.5 \text{ KVA}$. Τα χαρακτηριστικά του δίνονται στον πίνακα 7.3, σύμφωνα με τα οποία, έχει τη δυνατότητα συνεχούς παροχής ισχύος 9.5 kVA (7.6 KW υπό 0.8 συντελεστή ισχύος). Η χωρητικότητα της δεξαμενής πετρελαίου είναι 62 λίτρα και η κατανάλωση καυσίμου είναι 2.9 λίτρα ανά ώρα. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να λειτουργεί υπό πλήρη ισχύ για 21 ώρες πριν χρειαστεί επαναπλήρωση της δεξαμενής πετρελαίου.

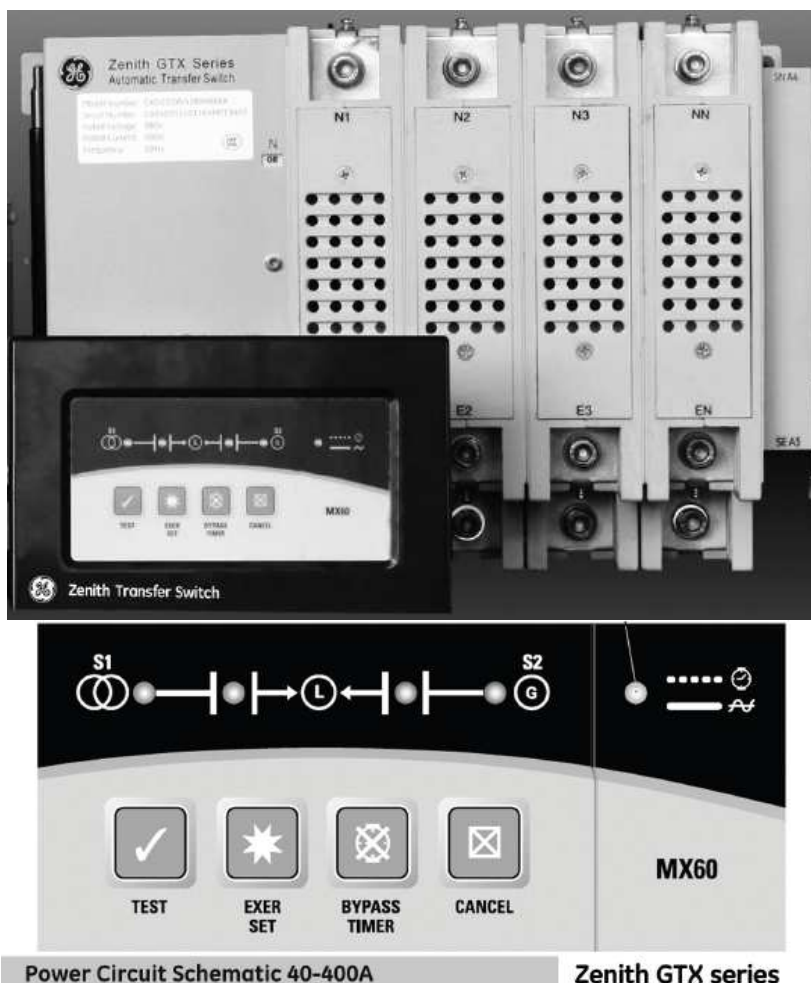
Πίνακας 7.3. Τεχνικά χαρακτηριστικά Η/Ζ.

Output Ratings		
Generating Set Model	Prime	Standby
380-415V,50Hz	8.5 kVA / 6.8 kW	9.5 kVA / 7.6 kW
Ratings at 0.8 power factor.		
Ratings and Performance Data		
Engine Make & Model:	Perkins™ 403D-11G	
Alternator manufactured for FG Wilson by:	Leroy Somer	
Alternator Model:	LL1114B	
Control Panel:	DCP-10	
Base Frame:	Heavy Duty Fabricated Steel	
Circuit Breaker Type:	3 Pole MCB	
Frequency:	50 Hz	
Engine Speed: RPM	1500	
Fuel Tank Capacity: litres (US gal)	62 (16.4)	
Fuel Consumption: l/hr (US gal/hr)		
(100% Load)	- Prime	2.6 (0.7)
	- Standby	2.9 (0.8)

7.4 ΔΙΑΚΟΠΤΗΣ ΑΥΤΟΜΑΤΗΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΠΗΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

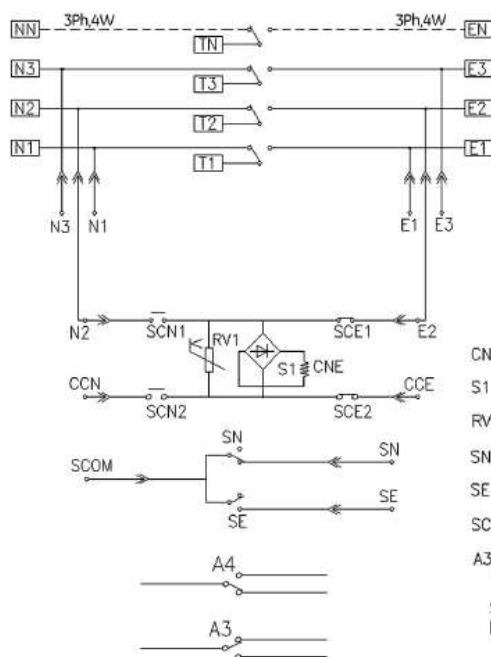
Στην περίπτωση της απώλειας παροχής ισχύος από το δίκτυο της ΔΕΗ, θα πρέπει η μετάβαση στην παροχή ισχύος από το Η/Ζ να πραγματοποιηθεί ελεγχόμενα με κάποιο αυτόματο διακόπτη. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε ο διακόπτης ZENITH GTX SERIES 40-400A της General Electric, για την αυτόματη μετάβαση στην πηγή ισχύος που είναι διαθέσιμη και παρουσιάζει τα καλύτερα χαρακτηριστικά όσο αφορά την τάση και τη συχνότητα (σχήμα 7.5).

ΣΥΣΤΗΜΑ UPS & H/Z



Power Circuit Schematic 40-400A

Zenith GTX series
40-400 Amps
Automatic Transfer
Switches



CNE=MAIN TRANSFER OPERATOR
S1 =RECTIFIER
RV1=VOLTAGE DEPENDENT RESISTOR
SN =NORMAL POSITION LIMIT SWITCH
SE =EMERGENCY POSITION LIMIT SWITCH
SCN/SCE=CNE LIMIT SWITCHES
A3/A4=AUXILIARY SWITCH (10A@250VAC,
8A@415VAC)
SWITCH SHOWN IN NORMAL
POSITION NO POWER AVAILABLE.

Σχήμα 7.5. Διακόπτης αυτόματης μετάβασης πηγής ισχύος (General Electric – ZENITH GTX SERIES 40-400A, <http://www.geindustrial.com>).

ΣΥΣΤΗΜΑ UPS & Η/Ζ

Ο διακόπτης αποτελείται από τον ηλεκτρονόμο που διαθέτει δύο τριφασικές παροχές εισόδου και μία τριφασική παροχή εξόδου προς το φορτίο. Επίσης, από ένα μικροεπεξεργαστή που ελέγχει την τάση και τη συχνότητα της πηγής ισχύος στις εισόδους του. Όταν το δίκτυο της ΔΕΗ διαθέτει αποδεκτή παροχή ισχύος, όσο αφορά την τάση και τη συχνότητα (90-100% των ονομαστικών τιμών), το LED S1 στον πίνακα ελέγχου του διακόπτη είναι ενεργοποιημένο (σχήμα 7.5). Όταν ο διακόπτης είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο της ΔΕΗ, τότε είναι ενεργοποιημένο και το δεύτερο κατά σειρά LED.

Σε περίπτωση απώλειας της παροχής ισχύος από το δίκτυο της ΔΕΗ, από τη στιγμή της απώλειας, άμεσα ενεργοποιείται χρονόμετρο (P Timer) που μετρά χρονικό διάστημα ίσο με 3 sec (Πίνακας 7.4), πριν γίνει η εκκίνηση του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους.

Πίνακας 7.4. Τιμές χρονομέτρων και επιτρεπτών αποκλίσεων της τάσης και της συχνότητας του διακόπτη αυτόματης μετάβασης πηγής ισχύος (<http://www.geindustrial.com>).

ATS Timing Cycle

Action	P Timer	W Timer	T Timer	U Timer
S1 Fail or Test or Exerciser	3 sec.	3 sec.	10 min.	5 min.
	Time Delay S2 Start	Time Delay S2 Stable	Time Delay S1 Stable	Time Delay S2 Stop
	→		→	
	Transfer to S2		Retransfer to S1	Engine Cool-Down
	S1 returns or Test/Exerciser Ends			

Preset Settings

Source 1(S1)		Source 2(S2)	
S1 Fail Voltage	80% Nominal Line Voltage	S2 Fail Voltage	80% Nominal Line Voltage
S1 Restore	90% Nominal Line Voltage	S2 Restore Voltage	90% Nominal Line Voltage
S1 Fail Frequency	80%	S2 Fail Frequency	90%
S1 Restore Frequency	90%	S2 Restore Frequency	95%
Timers			
P Timer	W Timer	T Timer	U Timer
3 sec.	3 sec.	10min.	5min.

Κατόπιν της εκκίνησης του Η/Ζ, απαιτείται ένα μικρό χρονικό διάστημα μέχρι να φθάσει στην ονομαστική τάση και συχνότητα (επιτρέπονται αποκλίσεις της τάσης ως 10% της V_N και της συχνότητας ως 5%). Αφού φθάσει το Η/Ζ στις ονομαστικές τιμές, ενεργοποιείται το LED S2 στον πίνακα ελέγχου, που σημαίνει ότι αυτή η πηγή ισχύος είναι διαθέσιμη και ενεργοποιείται χρονόμετρο (W Timer) που μετρά χρονικό διάστημα ίσο με 3 sec πριν συνδεθεί ο διακόπτης με το Η/Ζ. Μετά τα 3 sec, πραγματοποιείται η σύνδεση με το Η/Ζ και

ΣΥΣΤΗΜΑ UPS & H/Z

ενεργοποιείται το τρίτο κατά σειρά LED στον πίνακα ελέγχου, ενώ απενεργοποιείται το δεύτερο LED, που έδειχνε σύνδεση με το δίκτυο της ΔΕΗ.

Στην περίπτωση αποκατάστασης της παροχής ισχύος από το δίκτυο της ΔΕΗ, άμεσα ενεργοποιείται χρονόμετρο (T Timer) που μετρά χρονικό διάστημα ίσο με 10 min, πριν ο διακόπτης συνδεθεί με το δίκτυο της ΔΕΗ. Αυτό το σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα οφείλεται στο ότι πραγματοποιείται η σύνδεση στο δίκτυο διαφόρων φορτίων και υπάρχει μια σχετική κύμανση των τιμών V, f. Μετά το δεκάλεπτο, ο διακόπτης μεταβαίνει στις επαφές του δικτύου και ενεργοποιείται το δεύτερο LED στον πίνακα ελέγχου, απενεργοποιείται το τρίτο LED και ενεργοποιείται χρονόμετρο (U Timer) που μετρά χρονικό διάστημα ίσο με 5 min, πριν απενεργοποιηθεί το H/Z (απενεργοποίηση του LED S2), το οποίο λειτουργεί χωρίς φορτίο κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

8.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν κάποια απαραίτητα οικονομικά μεγέθη, οι ορισμοί των οποίων δίνονται παρακάτω (Σημειώσεις Οικονομικής Αξιολόγησης Επενδύσεων Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, Παπαθανασίου 2012). Να σημειωθεί ότι η αξιολόγηση επένδυσης ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ γίνεται για χρονικό διάστημα ίσο με τη διάρκεια της σύμβασης πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ίσο με τη διάρκεια ζωής της επένδυσης.

8.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΚΟΧΡΕΟΛΥΣΙΩΝ ΔΑΝΕΙΟΥ

Ο υπολογισμός των τόκων (T_t) και των χρεολυσίων (X_t) διαφοροποιείται ανάλογα με την εφαρμοζόμενη μέθοδο εξόφλησης του δανείου. Σε κάθε περίπτωση, η δόση του δανείου του έτους t ($\Delta\Delta_t$) ή αλλιώς το τοκοχρεολύσιο, ισούται με το άθροισμα των τόκων και των χρεολυσίων. Θεωρώντας εξόφληση με σταθερά τοκοχρεολύσια, στο τέλος κάθε έτους καταβάλλεται σταθερή δόση $\Delta\Delta_t$ και από έτος σε έτος ο τόκος μειώνεται, ενώ το χρεολύσιο αυξάνει.

- Τα τοκοχρεολύσια κάθε έτους ($\Delta\Delta_t$) είναι ίσα μεταξύ τους και υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\Delta\Delta_t = \left(k_d + \frac{k_d}{(1+k_d)^{N_d} - 1} \right) \cdot K_d$$

- Τα χρεολύσια (X_t) κάθε έτους υπολογίζονται από τον τύπο:

$$X_t = \frac{k_d}{(1+k_d)^{N_d} - 1} \cdot K_d \cdot (1+k_d)^{t-1}$$

όπου k_d : το επιτόκιο του δανείου

N_d : η περίοδος εξόφλησης του δανείου σε έτη

K_d : το δανειακό κεφάλαιο (Loan Capital)

- Οι τόκοι κάθε έτους (T_t) μπορούν να υπολογιστούν με απλή αφαίρεση:

$$T_t = \Delta\Delta_t - X_t$$

8.1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Μια συνηθισμένη μέθοδος απόσβεσης των επενδύσεων είναι η γραμμική. Σύμφωνα με αυτή, αν ο χρόνος απόσβεσης είναι N_A έτη, η ετήσια απόσβεση A_t είναι το $1/N_A$ του αρχικού κόστους (K_0) της επένδυσης:

$$A_t = \frac{K_{0,total}}{N_A}$$

8.1.3 ΦΟΡΟΣ

Ο υπολογισμός του ετήσιου φόρου που πληρώνει η επιχείρηση γίνεται αφού από τα ακαθάριστα έσοδα της επιχείρησης αφαιρεθούν οι λειτουργικές δαπάνες και οι αποσβέσεις. Δεν αφαιρούνται οι τόκοι των δανείων. Έτσι, ο ετήσιος φόρος δίνεται από τον τύπο:

$$\Phi_t = (E_t - \Lambda\Delta_t - A_t) \cdot \Phi\Sigma$$

όπου

Φ_t : ο ετήσιος φόρος

E_t : τα ετήσια έσοδα

$\Lambda\Delta_t$: οι ετήσιες λειτουργικές δαπάνες

A_t : η ετήσια απόσβεση

$\Phi\Sigma$: ο φορολογικός συντελεστής

8.1.4 ΚΑΘΑΡΕΣ ΤΑΜΕΙΑΚΕΣ ΡΟΕΣ (ΚΤΡ)

Οι καθαρές ταμειακές ροές κάθε έτους ($ΚΤΡ_t$) δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$ΚΤΡ_t = E_t - \Lambda\Delta_t - \Phi_t$$

8.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ

Αξιολόγηση ως προς το σύνολο της επένδυσης

Η σημαντικότερη διαφοροποίηση της αξιολόγησης ως προς το σύνολο της επένδυσης σε σχέση με την αξιολόγηση της επένδυσης ως προς τα ίδια κεφάλαια, είναι ότι στο επιτόκιο αναγωγής θα πρέπει να ληφθεί υπόψη όχι μόνο η απόδοση των ιδίων κεφαλαίων που κρίνει ο

επενδυτής ως ικανοποιητική, αλλά και το επιτόκιο των δανειακών κεφαλαίων της επιχείρησης, αφού το αρχικό κόστος της επένδυσης καλύπτεται τόσο από τα ίδια, όσο και από δανειακά κεφάλαια. Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε η αξιολόγηση ως προς το σύνολο της επένδυσης.

Για την οικονομική αξιολόγηση μιας επένδυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι δείκτες με πιο συνηθισμένους την Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ-NPV), τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (ΕΒΑ-IRR), την Έντοκη Περίοδο Αποπληρωμής (ΕΠΑ-DPP) και το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (LCOE). Οι πιο αντιπροσωπευτικοί από αυτούς τους δείκτες, οι οποίοι προτείνεται να χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των διαφόρων επενδύσεων, είναι η ΚΠΑ και ο ΕΒΑ (Σημειώσεις Οικονομικής Αξιολόγησης Επενδύσεων Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, Παπαθανασίου 2012).

8.2.1 ΚΑΘΑΡΗ ΠΑΡΟΥΣΑ ΑΞΙΑ (ΚΠΑ)

Η καθαρή παρούσα αξία μιας επένδυσης είναι η αξία αυτής ανηγμένη στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής της λειτουργίας. Δίνεται από τον τύπο:

$$NPV = -K_{0,tot} + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1+k_{tot})^t} + \frac{YA_N}{(1+k_{tot})^N}$$

Όπου:

K_0 : το αρχικό κόστος της επένδυσης,

KTP_t : η Καθαρή Ταμειακή Ροή του έτους t ,

N : η διάρκεια ζωής της επένδυσης,

YA_N : η υπολειμματική αξία της επένδυσης στο N -οστό έτος (θεωρήθηκε ότι η αξία της επένδυσης είναι ίση με μηδέν μετά τη διάρκεια ζωής της).

k_{tot} : το μέσο σταθμικό κόστος των ιδίων και ξένων κεφαλαίων της επιχείρησης, το οποίο δίνεται από τον τύπο:

$$k_{tot} = P_d \cdot k_d (1 - \Phi\Sigma) + P_{Eq} \cdot k_{Eq}$$

Όπου:

P_d : η συμμετοχή (%) των δανειακών κεφαλαίων στο σύνολο της επένδυσης,

P_{Eq} : η συμμετοχή (%) των ιδίων κεφαλαίων στο σύνολο της επένδυσης,

k_d : το επιτόκιο δανεισμού,

k_{Eq} : το κόστος ιδίων κεφαλαίων της επιχείρησης,

$\Phi\Sigma$: ο φορολογικός συντελεστής

8.2.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (IRR)

Ο δείκτης IRR (Internal Rate of Return – Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης) είναι η τιμή του επιτοκίου αναγωγής, που κάνει την ΚΠΑ της επένδυσης, για τη διάρκεια της οικονομικής αξιολόγησης, ίση με το μηδέν. Ειδικότερα, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης εκφράζει την απόδοση κεφαλαίου της αρχικής επένδυσης κατά τη διάρκεια του οικονομικού κύκλου ζωής της. Συνεπώς, ο IRR της επένδυσης προσδιορίζεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$-K_0 + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1 + IRR)^t} = 0$$

Όπου:

K_0 είναι το αρχικό κόστος της επένδυσης,

N : η διάρκεια ζωής της.

8.2.3 ΕΝΤΟΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΑΠΟΠΛΗΡΩΜΗΣ (ΕΠΑ)

Μία τρίτη μέθοδος αξιολόγησης της επένδυσης είναι η Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (ΕΠΑ, DPP), δηλαδή η περίοδος επανάκτησης του αρχικού κόστους της επένδυσης (K_0) από τις ΚΤΡ. Ειδικότερα, είναι ο αριθμός των ετών που απαιτούνται ώστε να καλυφθεί η αρχική δαπάνη, με την θεώρηση ότι η υπολειμματική αξία της επένδυσης είναι μηδενική. Ο αριθμός των ετών x υπολογίζεται από τον τύπο:

$$-K_{0,tot} + \sum_{t=1}^x \frac{KTP_t}{(1 + k_{tot})^t} = 0$$

8.2.4 ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (LCOE)

Για τη σύγκριση εναλλακτικών επενδύσεων (πολλές φορές διαφορετικής κλίμακας, χρονικού ορίζοντα κλπ.), συχνά χρησιμοποιείται ο δείκτης του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας (Levelised Cost of Energy – LCOE) ο οποίος αφορά συνήθως το σύνολο της επένδυσης και υπολογίζει το σταθμισμένο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. € / kWh) κατά τη διάρκεια ζωής μιας επένδυσης σταθμού παραγωγής, ενσωματώνοντας όλα τα επί μέρους κόστη (επένδυσης, λειτουργίας, καυσίμου, ασφάλισης, παροπλισμού κλπ.) εκφρασμένα σε παρούσα αξία. Ειδικότερα, ως Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (LCOE) ορίζεται η τιμή που θα πρέπει να αποζημιωθεί η παραγόμενη από τον σταθμό ενέργεια, ώστε να αποπληρώσει τον επενδυτή για το συνολικό του κόστος (κεφαλαίου, συντήρησης και λειτουργίας) και υπολογίζεται ως το πηλίκο του συνολικού κόστους (δαπανών) καθ' όλη την οικονομική διάρκεια ζωής της επένδυσης (total lifetime expenses) προς τη συνολική παραγωγή ενέργειας του σταθμού, εκφρασμένα σε όρους παρούσας αξίας. Δίνεται από τον τύπο:

$$LCOE = \frac{K_{0,tot} + \left(\sum_{t=1}^N \frac{\Lambda \Delta_t}{(1+k_{tot})^t} \right) - \frac{YA_N}{(1+k_{tot})^N}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_{gen,t}}{(1+k_{tot})^t}}$$

8.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Θεωρήθηκε ότι η διάρκεια ζωής της φβ εγκατάστασης είναι 25 έτη. Η αναμενόμενη μέση διάρκεια ζωής του αναστροφέα είναι 10 έτη, και το συνολικό κόστος αντικατάστασης του ανέρχεται σε 2500 ευρώ. Το συνολικό κόστος των απαιτούμενων αναστροφέων (δαπάνη 5000 ευρώ για 2 αντικαταστάσεις) ισοκατανεμήθηκε σε κάθε έτος. Λόγω γήρανσης των υλικών με την πάροδο του χρόνου, το ποσοστό μείωσης της απόδοσης για τη φβ μετατροπή αυξάνει συνήθως κατά 1% κάθε έτος λειτουργίας και έχει ληφθεί υπόψη κατά τη διαδικασία υπολογισμού του συνολικού συντελεστή απόδοσης της φβ εγκατάστασης.

Αρχικά υπολογίστηκε το συνολικό κόστος της επένδυσης (Πίνακας 8.1). Για τον υπολογισμό των εσόδων, σύμφωνα με το Υ.ΠΕ.Κ.Α. ([http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=362&snid\[524\]=1535&language=el-GR](http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=362&snid[524]=1535&language=el-GR)), οι τιμές πώλησης της παραγόμενης ενέργειας

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

για εγκαταστάσεις <100 kW και Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, σε €/MWh, δίνονται στον Πίνακα 8.2.

Πίνακας 8.1. Υπολογισμός του αρχικού κόστους της επένδυσης

ΥΛΙΚΑ	ΤΕΜΑΧΙΑ / ΜΕΤΡΑ	ΤΙΜΗ ΜΟΝΑΔΑΣ (ΕΥΡΩ)	ΚΟΣΤΟΣ (ΕΥΡΩ)
ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑΣ SMA Sunny Mini Central 10000TL	3	2500	7500
ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ CONERGY PX 300P	108	450	48600
ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ	-	-	9000
DC Καλώδιο ΦΒ πλαισίων	500	2	1000
AC Καλώδια	-	-	500
ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ, ΓΕΙΩΣΕΙΣ, ΥΠΟΠΙΝΑΚΕΣ, ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	-	-	8000
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ	-	-	5400
ΜΕΛΕΤΗ-ΕΞΟΔΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	-	-	10000
		ΣΥΝΟΛΟ	90000

Πίνακας 8.2. Τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας (€/MWh)

Μήνας / Έτος	Υφιστάμενη κατάσταση	Νέα τιμή	Ποσοστό μείωσης 12,5% επί της προβλεπόμενης τιμής του Ν.3734/2009 και 7% επί της νέας τιμής ανά εξάμηνο
Φεβρουάριος 2014	302,56	245,81	
Αύγουστος 2014	293,59	228,60	

Συνεπώς, κατά την οικονομική αξιολόγηση θεωρήθηκε ότι η τιμή της αποδιδόμενης kWh στο δίκτυο διανομής είναι ίση με **0,228 €/KWh** για ολή την περίοδο λειτουργίας του έργου.

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Τα οικονομικά στοιχεία της επένδυσης φαίνονται στον Πίνακα 8.3 και ακολουθεί η κατάρτιση του αναλυτικού Πίνακα 8.4.

Πίνακας 8.3. Οικονομικά στοιχεία της επένδυσης

ΙΣΧΥΣ ΦΒ ΠΕΔΙΟΥ STC (KWp)	32.4
ΑΡΧΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (ευρώ)	90000
ΔΑΝΕΙΑΚΑ ΚΕΦΑΛΑΙΑ (ευρώ)	45000
ΙΔΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΑ (ευρώ)	45000
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ N (έτη)	25
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΞΟΦΛΗΣΗΣ ΔΑΝΕΙΟΥ	15
ΑΣΦΑΛΙΣΤΙΚΕΣ ΕΙΣΦΟΡΕΣ ΑΝΑ ΕΤΟΣ (ευρώ)	400
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΕΞΟΔΑ ΑΝΑ ΕΤΟΣ (ευρώ)	200
ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΒ ΣΤΑΘΜΟΥ - ΚWH	39405
ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ ΗΛ.ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ευρώ / ΚWH)	0.228
ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΤΗΣΙΑΣ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΙΜΗΣ ΠΩΛΗΣΗΣ ΗΛ.ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	0.025
ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΔΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ ΣΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ-Pd	0.5
ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΙΔΙΩΝ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ ΣΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ-Peq	0.5
ΕΠΙΤΟΚΙΟ ΔΑΝΕΙΣΜΟΥ-kd	0.07
ΚΟΣΤΟΣ ΙΔΙΩΝ ΚΕΦΑΛΑΙΩΝ-keq	0.07
ΦΟΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ-ΦΣ	0.2
ΜΕΣΟ ΣΤΑΘΜΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ-ktot	0.0630

Από τον υπολογισμό των οικονομικών δεικτών προέκυψαν τα παρακάτω στοιχεία:

- Η καθαρή παρούσα αξία είναι ίση με ΚΠΑ = 25499 ευρώ. Συνεπώς **η επένδυση είναι συμφέρουσα**, αφού ΚΠΑ>0.
- Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης είναι ίσος με EBA= 8.85 %.
- Η έντοκη περίοδος αποπληρωμής του συνόλου της επένδυσης, δηλαδή το χρονικό διάστημα απόσβεσης είναι ίσο με 17 έτη.
- Το σταθμισμένο κόστος ενέργειας είναι ίσο με LCOE = 0.2 ευρώ / kwh.

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

ΕΤΟΣ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - [ΚΩΗ / ΕΤΟΣ]	ΑΚΑΘ. ΕΞΟΔΑ	ΕΝΟΙΚΙΟ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΛΕΙΟΥΡΓΙΚΑ ΕΞΟΔΑ	ΣΥΝΟΛΟ ΕΞΟΔΩΝ	ΔΟΣΗ ΔΑΝΕΙΟΥ (ΤΟΚΟΧΡΕΩΛΥΣΙΟ)	ΧΡΕΩΛΥΣΙΟ	ΤΟΚΟΙ	ΑΝΕΞΟΦΛΗΤΟ ΥΠΟΛΟΙΠΟ	ΑΠΟΣΒΕΣΕΙΣ	ΦΟΡΟΛΟΓΗΤΟ ΕΙΣΟΔΗΜΑ	ΦΟΡΟΣ	ΚΤΡ - ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ	ΚΤΡ (ΣΕ ΟΡΟΥΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΑΞΙΑΣ)	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ [IRR]	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - [ΚΩΗ / ΕΤΟΣ] (ΣΕ ΟΡΟΥΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΑΞΙΑΣ)	ΣΥΝ.ΕΞΟΔΑ (ΣΕ ΟΡΟΥΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΑΞΙΑΣ)
1	39405	8984	0	450	200	650	4941	1791	3150	43209	3600	4734	947	7387	6950	6787	37069	611
2	39405	9209	0	450	200	650	4941	1916	3025	41293	3600	4959	992	7567	6697	6387	34872	575
3	39405	9439	0	450	200	650	4941	2050	2891	39243	3600	5189	1038	7751	6453	6010	32806	541
4	39405	9675	0	450	200	650	4941	2194	2747	37049	3600	5425	1085	7940	6219	5656	30861	509
5	39405	9917	0	450	200	650	4941	2347	2593	34702	3600	5667	1133	8134	5993	5323	29032	479
6	39405	10165	0	450	200	650	4941	2512	2429	32190	3600	5915	1183	8332	5775	5009	27312	451
7	39405	10419	0	450	200	650	4941	2687	2253	29503	3600	6169	1234	8535	5565	4714	25693	424
8	39405	10679	0	450	200	650	4941	2876	2065	26627	3600	6429	1286	8744	5363	4437	24170	399
9	39405	10946	0	450	200	650	4941	3077	1864	23550	3600	6696	1339	8957	5169	4176	22738	375
10	39405	11220	0	450	200	650	4941	3292	1649	20258	3600	6970	1394	9176	4981	3930	21390	353
11	39405	11501	0	450	200	650	4941	3523	1418	16735	3600	7251	1450	9401	4800	3699	20123	332
12	39405	11788	0	450	200	650	4941	3769	1171	12966	3600	7538	1508	9631	4626	3481	18930	312
13	39405	12083	0	450	200	650	4941	4033	908	8933	3600	7833	1567	9866	4459	3276	17808	294
14	39405	12385	0	450	200	650	4941	4315	625	4618	3600	8135	1627	10108	4297	3084	16753	276
15	39405	12695	0	450	200	650	4941	4618	323	0	3600	8445	1689	10356	4142	2902	15760	260
16	39405	13012	0	450	200	650	0	0	0	0	3600	8762	1752	10610	3992	2732	14826	245
17	39405	13337	0	450	200	650	0	0	0	0	3600	9087	1817	10870	3847	2571	13947	230
18	39405	13671	0	450	200	650	0	0	0	0	3600	9421	1884	11137	3708	2420	13120	216
19	39405	14012	0	450	200	650	0	0	0	0	3600	9762	1952	11410	3574	2278	12343	204
20	39405	14363	0	450	200	650	0	0	0	0	3600	10113	2023	11690	3445	2144	11611	192
21	39405	14722	0	450	200	650	0	0	0	0	3600	10472	2094	11977	3320	2018	10923	180
22	39405	15090	0	450	200	650	0	0	0	0	3600	10840	2168	12272	3200	1900	10276	170
23	39405	15467	0	450	200	650	0	0	0	0	3600	11217	2243	12574	3085	1788	9667	159
24	39405	15854	0	450	200	650	0	0	0	0	3600	11604	2321	12883	2973	1683	9094	150
25	39405	16250	0	450	200	650	0	0	0	0	3600	12000	2400	13200	2866	1584	8555	141
		306883	0	11250	5000	16250	74111	45000	29111		90000		40127		115498	89989	489680	8077

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010. Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας. **Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών**. Αθήνα, Απρίλιος 2012.
- Παπαθανασίου, **Σημειώσεις Οικονομικής Αξιολόγησης Επενδύσεων Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ**, 2012.
- Δήμητρα Π. Βάρλα, **Υπολογιστική μελέτη συστημάτων γείωσης**, Διπλωματική εργασία, Οκτ.2004.
- Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης, **Μελέτη Διαμόρφωσης Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού Ισχύος 2MW**, Διπλωματική εργασία, Οκτ.2009.
- Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, **ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ από τη θεωρία στην πράξη**, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

- Benjamin Y.H. Liu, Richard C. Jordan, **The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation**, Solar Energy, Volume 4, Issue 3, Pages 1–19, July 1960.
- P. Hacke, et al, **System Voltage Potential-Induced Degradation Mechanisms in PV Modules and Methods for Test**, NREL, 37TH IEEE. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 37), Seattle, Washington, 19-24 June 2011.
- S. Pingel et al., **“Potential Induced Degradation of Solar Cells and Panels,”** 35th IEEE PVSC, Honolulu, 2010, pp. 2817–2822.
- M.D. Kempe, G.J. Jorgensen, K.M. Terwilliger, T.J. McMahon, and C.E. Kennedy. National Renewable Energy Laboratory. T.T. Borek Sandia National Laboratories. **“Ethylene-Vinyl Acetate Potential Problems for Photovoltaic Packaging”**. Presented at the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-4) Waikoloa, Hawaii May 7–12, 2006.
- P. Hacke *et al.*, **“Characterization of Multicrystalline Silicon Modules with System Bias Voltage Applied in Damp Heat,”** 25th European Photovoltaic Solar Energy

Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6–10 September 2010, Valencia, Spain, pp. 3760–3765.

- Koch Simon, Christian Seidel, Paul Grunow, Stefan Krauter and Michael Schoppa. **POLARIZATION EFFECTS AND TESTS FOR CRYSTALLINE SILICON CELLS.** 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 5-8 September 2011, Hamburg, Germany.
- Photovoltaik Institut Berlin AG, Wrangelstr. 100, D-10977 Berlin, Germany, University of Paderborn, Institute for Electrical Engineering - Sustainable Energy Concepts, Pohlweg 55, 33098 Paderborn, Germany.
- Advanced Energy Industries Inc. (2013). **Understanding Potential Induced Degradation.**
- Electrical Characterization of Organic Electronic Materials and Devices Peter Stallinga, Wiley, ISBN: 978-0-470-75009-4, Hardcover, 316 pages. <http://www.stallinga.org/ElectricalCharacterization/2terminal/index.html>
- Antonio Luque and Steven Hegedus, 2011. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-72169-8.
- SMA Technical Information, **PID - The Problem and How to Solve It.** Module Regeneration with the PV Offset Box .

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

[http://www.ilviokat.gr/products/panels/pillarPanels .asp#](http://www.ilviokat.gr/products/panels/pillarPanels.asp#)

<http://www.pveducation.org>

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/countries/countries-europe.htm>

<http://helapco.gr>

<http://www.solarpower2day.net/solar-cells/efficiency/>

<http://www.crh.noaa.gov/fsd/?n=season>

<http://www.stallinga.org>

<http://www.powerfromthesun.net>

http://www.srh.noaa.gov/jetstream/lightning/lightning_intro.htm

http://www.pv-tech.org/product_reviews/wackers_tectosil_encapsulant_offers_pid_protection

<http://www.cablel.gr>

<http://www.dehn-international.com/en/lightning-protection-guide>

<http://www.elemko.gr>

<http://www.geindustrial.com/products/critical-power>