

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

ΑΡΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΒ ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΣΤΕΓΕΣ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τηλέμαχος Α. Τρυφωνίδης

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2015



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

ΑΡΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΗΛΙΑΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΒ ΣΕ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΣΤΕΓΕΣ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τηλέμαχος Α. Τρυφωνίδης

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Θ Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Μαρτίου 2015

.....

Κωνσταντίνος Θ Δέρβος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παναγιώτα Βασιλείου

.....

Ηρακλής Αβραμόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....

Τηλέμαχος Α. Τρυφωνίδης

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

Copyright © Τηλέμαχος Α. Τρυφωνίδης, 2015 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου 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 διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη μιας διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σε οροφή βιομηχανικού κτιρίου στην περιοχή της Λάρισας και η οικονομική αξιολόγηση αυτής.

Αρχικά γίνεται μία αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειες, την εγκατεστημένη ισχύ και την ισχύουσα νομοθεσία περί φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα. Στη συνέχεια περιγράφεται το σύστημα Ηλίου-Γης και ο καθορισμός της θέσης ενός αστρικού σώματος μέσω του οριζόντιου συστήματος. Ακολουθεί η περιγραφή του φωτοβολταϊκού φαινομένου και ο διαχωρισμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων ανάλογα με το υλικό κατασκευής. Στο 4[°] κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της γήρανσης και παρουσιάζονται οι μηχανισμοί υποβάθμισης της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Στο 5° κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μελέτη της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης και στο επόμενο αναλύεται η αντικεραυνική προστασία του κτιρίου. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο επιχειρείται η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης μέσω οικονομικών δεικτών.

Λέξεις Κλειδιά

Διασυνδεδεμένη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, ηλιακή γεωμετρία, φωτοβολταϊκό φαινόμενο, φωτοβολταϊκό στοιχείο, γήρανση, σκίαση, φαινόμενο νησίδας, αντικεραυνική προστασία.

Abstract

The purpose of this thesis is the study and the economic evaluation of an interconnected PV system on the roof of an industrial building in the area of Larissa.

Initially, a reference takes place on renewable energy sources, the installed power output and the PV concerned legislation currently in effect in Greece. A description, subsequently, follows of the Earth-Sun system as well as the definition of the position of a stellar object through the horizontal system. The photovoltaic phenomenon and the separation of photovoltaic elements depending on their material of construction are also described. The aging effect is analyzed in the 4th chapter and the downgrading mechanisms of the function of а photovoltaic frame are presented. In the 5th chapter, the study of the PV installation is presented in detail and in the following chapter the lightning protection of the building is analyzed. Finally, the 7th chapter deals with the economic evaluation of the investment through economic markers.

Key Words

Grid-tied photovoltaic system, solar geometry, photovoltaic phenomenon, photovoltaic cell, aging, shading, islanding, lightning protection system.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ

την οικογένειά μου για την υποστήριξη τους φίλους μου για την κατανόηση τους καθηγητές της σχολής για τη μεταλαμπάδευση των γνώσεών τους τον αξιότιμο Καθηγητή ΕΜΠ, κ. Δέρβο Κωνσταντίνο, επιβλέπων της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την καθοδήγησή του

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
Περιεχόμενα	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)	15
1.2 Εθνικό σχέδιο δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	
1.3 Πλεονεκτήματα Φωτοβολταϊκών	
1.4 Φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ηλιακή Γεωμετρία	
2.1 Γεωμετρία Ήλιου-Γης	21
2.2 Προσδιορισμός τοποθεσίας πάνω στη Γη	21
2.3 Ηλιακή απόκλιση και ωριαία γωνία	22
2.4 Ηλιακή ώρα	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Λειτουργία και Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Στοιχείων	
3.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	26
3.1.1 Ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού	26
3.1.2 Οπτική διέγερση	27
3.2 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία	
3.2.1 Μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία	
3.2.2 Πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία	
3.2.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων	
3.2.4 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si)	
3.3 Φωτοβολταϊκές διατάξεις ΙΙΙ-ΙV Ημιαγωγών	
3.4 Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)	
3.5 Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe2-CIS)	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Γήρανση	
4. Γήρανση	

	55
4.1 Μηχανισμοί υποβάθμισης της λειτουργίας ΦΒ πλαισίου	33

4.1.1 Διάβρωση ΦΒ πλαισίου	33
4.1.2 Αποκόλληση ΦΒ πλαισίου	34
4.1.3 Αποχρωματισμός ΦΒ πλαισίου	35
4.1.4 Θραύσεις και ρωγμές ΦΒ πλαισίου	36
4.2 PID	36
4.3 Θερμά σημεία (hot spots)	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μελέτη Διασυνδεδεμένης Φωτοβολταϊκής Εγκατάστασης	
5. Μελέτη διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης	40
5.1 Καθορισμός δεδομένων και κύριων χαρακτηριστικών του ΦΒσυστήματος	40
5.2 Βέλτιστος προσανατολισμός και κλίση των πλαισίων	41
5.2.1 Αζιμούθια γωνία συλλέκτη (θο)	41
5.2.2 Γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο (αο)	42
5.3 Προσδιορισμός θέσης Ήλιου	42
5.3.1 Ύψος Ηλίου (β)- Αζιμούθιο (Ζ)	42
5.4 Σκίαση	44
5.5 Επιλογή ΦΒ πλαισίου	45
5.5.1 Συντελεστής απόδοσης εγκατάστασης	47
5.5.2 Συντελεστής απόδοσης πλαισίου, η%	48
5.5.3 Συνολικές απώλειες φωτοβολταϊκού πεδίου, σΣΑΦΠ	48
5.5.4 Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας, σΜΗΕ	51
5.5.5 Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια	52
5.6 Επιλογή Αναστροφέα	53
5.6.1 Λειτουργία πλαισίων και αναστροφέων σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες	54
5.7 Ηλεκτρολογικό σχέδιο	56
5.7.1 DC τμήμα	57
5.7.1.1 Επιλογή διατομής καλωδίου	57
5.7.1.2 Μέσα προστασίας	58
5.7.2 ΑC τμήμα	61
5.7.2.1 Επιλογή διατομής καλωδίου	61
5.7.2.2 Μέσα προστασίας	61
5.8 Φαινόμενο νησίδας	62
5.9 Βάσεις στήριξης	64
5.9.1 Σταθερές βάσεις στήριξης	64
5.9.2 Σύστημα ιχνηλάτησης της τροχιάς του ήλιου	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αντικεραυνική Προστασία

6. Αντικεραυνική προστασία69
6.1 Συνθήκες σχηματισμού κεραυνού70
6.2 Εκτίμηση κινδύνου71
6.2.1 Πηγές βλαβών71
6.2.2 Τύποι βλαβών
6.2.3 Τύποι απωλειών72
6.2.4 Τύποι Κινδύνου
6.3 Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας75
6.4 Αντικεραυνικό Επίπεδο Προστασίας76
6.5 Εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας78
6.5.1 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας79
6.5.2 Μέθοδος της γωνίας προστασίας80
6.5.3 Μέθοδος των βρόχων81
6.5.4 Σύστημα αγωγών καθόδου82
6.5.5 Σύστημα γείωσης
6.5.6 Εξωτερικές ισοδυναμικές συνδέσεις86
6.5.7 Απόσταση διαχωρισμού ΣΑΠ86
6.6 Εσωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας87
6.6.1 Ισοδυναμικές συνδέσεις για ηλεκτρικές και τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις
6.6.2 Ισοδυναμικές συνδέσεις με απαγωγό-περιοριστή υπέρτασης (SPD)
6.7 Σύστημα προστασίας από ηλεκτρομαγνητικό παλμό89
6.8 Μελέτη αντικεραυνικής προστασίας91

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Οικονομική Αξιολόγηση Επένδυσης

7.1 Εισαγωγή	93
7.2 Οικονομικοί Δείκτες	.93
7.2.1 Καθαρή Παρούσα Αξία (NVP-ΚΠΑ)	.93
7.2.2 Εσωτερικός Δείκτης Απόδοσης (EBA-Internal Rate of Return/IRR)	94
7.2.3 Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (LCOE)	94
7.3 Καθαρές Ταμειακές Ροές (ΚΤΡ)	95
7.4 Οικονομική Αξιολόγηση της Παρούσας Επένδυσης	97
Παραρτήματα	99
Α. Σκιάσεις που προκαλούνται από τα δώματα και τους εξαερισμούς στην οροφή του υπό μελέτη κτιρίου για Tsolar=09:00-15:00	.99

Β. Τεχνικά Χαρακτηριστικά πλαισίου SunForte PM325B00	. 112
Γ. Χωροθέτηση των πλαισίων στην οροφή του κτιρίου με ταυτόχρονη απεικόνιση των σκιάσεων προκαλούν τα δώματα και οι εξαερισμοί για TSOLAR=09:00 ως TSOLAR=15:00	<i>που</i> .113
Δ. Τεχνικά χαρακτηριστικά του αναστροφέα KACO Powador 36TL3	.114
Ε. Χωροθέτηση συστοιχιών	. 115
ΣΤ. Ηλεκτρολογικά σχέδια	.116
Ζ. Προστατευμένες περιοχές από κεραυνικό πλήγμα σύμφωνα με τη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρο	ις.
	.118

Ευρετήριο Πινάκων

Κεφάλαιο 1

Πίνακας 1.1: Εγκατεστημένη ισχύς (MW) και παραγωγή ενέργειας (GWh) μονάδων ΑΠΕ/ΣΗΘΥΑ για το έτος 201416
Πίνακας 1.2: Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών μονάδων στην Ελλάδα
Πίνακας 1.3: Τιμές πώλησης της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας
Κεφάλαιο 5
Πίνακας 5.1: Αρχικά δεδομένα της μελέτης40
Πίνακας 5.2: Λάρισα –Μέση μηνιαία ακτινοβολία για οριζόντια, κάθετη επιφάνεια και επίπεδο με κλίση 45° με βάση τον προσανατολισμό41
Πίνακας 5.3: Ηλιακό δυναμικό στην επιφάνεια κεκλιμένου συλλέκτη για την πόλη της Λάρισας42
Πίνακας 5.4: Υπολογισμός ωριαίας γωνίας (ω), ύψος ηλίου (β) και αζιμούθιου (Ζ) για ηλιακή ώρα Τ _{solar} =09:00-15:0043
Πίνακας 5.5: Υπολογισμός σκίασης που προκαλείται από εμπόδια ύψους h ₁ =3.4 m, h ₂ =2.8 m και h ₃ =4.8m την 21 ^η Δεκ για την ηλιακή ώρα T _{solar} =09:00-15:00 στην πόλη της Λάρισας44
Πίνακας 5.6: Σύγκριση ΦΒ πλαισίων46
Πίνακας 5.7: Χαρακτηριστικά του πλαισίου SunForte PM 325B00 σε STC συνθήκες
Πίνακας 5.8: Μέση μηνιαία θερμοκρασία στην πόλη της Λάρισας σύμφωνα με την ΕΜΥ49
Πίνακας 5.9: Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης, σ _θ
Πίνακας 5.10: Συντελεστής γήρανσης, σ _γ 50

Περιεχόμενα

Πίνακας 5.11: Συντελεστής απόδοσης της εγκατάστασης, σ _{ΣΑΦ}
Πίνακας 5.12: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια52
Πίνακας 5.13: Τάση ανοιχτοκυκλώσεως και ρεύμα βραχυκύκλωσης σε ακραίε Θερμοκρασιακές συνθήκες54
Πίνακας 5.14: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά σε ακραίες συνθήκες
Πίνακας 5.15: Μήκη καλωδιώσεων και πτώση τάσης στον DC κλάδο
Πίνακας 5.16: Απαιτήσεις διασύνδεσης σύμφωνα με το διαχειριστή δικτύου
Πίνακας 5.17: Μήκη καλωδιώσεων και πτώση τάσης στον ΑC κλάδο
Κεφάλαιο 6
Πίνακας 6.1: Βλάβες και απώλειες σε κτίριο από διαφορετικές πηγές βλαβών73
Πίνακας 6.2: Τυπικές τιμές ανεκτού κινδύνου (R _τ)73
Πίνακας 6.3: Ερμηνεία συνιστωσών κινδύνου74
Πίνακας 6.4: Τιμή ρεύματος του κεραυνού για κάθε επίπεδο προστασίας βασισμένο στη 10/350μs κυματομορφή74
Πίνακας 6.5: Διαστάσεις βρόχων ανάλογα με τη στάθμη αντικεραυνικής προστασίας82
Πίνακας 6.6: Προτεινόμενη απόσταση αγωγών καθόδου83
Πίνακας 6.7: Επιλογή συντελεστή k _i ανάλογα με τη ΣΑΠ
Πίνακας 6.8: Επιλογή συντελεστή k _c 87
Πίνακας 6.9: Επιλογή συντελεστή k _m 87
Κεφάλαιο 7
Πίνακας 7.1: Αρχικό κόστος επένδυσης97
Πίνακας 7.2: Οικονομικοί δείκτες της επένδυσης98

Ευρετήριο Σχημάτων

Κεφάλαιο 2

Σχήμα 2.1: Ετήσια περιστροφή της Γης γύρω από τον Ήλιο	21
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση ηλιακής απόκλισης	22
Σχήμα 2.3: Γραφική παράσταση εξίσωσης χρόνου	23
Σχήμα 2.4: Γραφική αναπαράσταση ηλιακού ύψους και αζιμούθιου	24
Σχήμα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών γωνιών κεκλιμένης επιφάνειας	25

Κεφάλαιο 3

Σχήμα 3.1: Διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας ηλεκτρονίων και οπών-απόστασης, για μια
φωτιζόμενη δίοδο p-n, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας28
Κεφάλαιο 4
Σχήμα 4.1: Διάβρωση φωτοβολταϊκού πλαισίου στις άκρες του και στο κουτί διασύνδεσης
Σχήμα 4.2: Αποχρωματισμός φωτοβολταϊκών στοιχείων
Σχήμα 4.3: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με σπασμένο γυαλί
Σχήμα 4.4: Συστοιχία πλαισίων με «κυμαινόμενο» δυναμικό που παρουσιάζει PID37
Σχήμα 4.5: Φωτογραφία πλαισίου πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την υποβολή του σε δοκιμασία PID
Σχήμα 4.6: Ρεύματα διαρροής από δύο πλαίσια με διαφορετικό υλικό εγκιβωτισμού38
Κεφάλαιο 5
Σχήμα 5.1: Κάτοψη κτιρίου40
Σχήμα 5.2: Αναπαράσταση ύψους ηλίου (άξονας Υ), ηλιακού αζιμούθιου Ζ (άξονας Χ) για ηλιακές ώρες 09:00-15:00 την 21 ^η Δεκεμβρίου στη Λάρισα43
Σχήμα 5.3: Τρισδιάστατη αναπαράσταση δώματος για την εύρεση της σκίασης44
Σχήμα 5.4: Ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σειρών πλαισίων
Σχήμα 5.5: Υποπίνακας DC ενσωματωμένος στον αναστροφέα
Σχήμα 5.6: Σκυροδέτηση σταθερών βάσεων σε δοκάρι από μπετόν
Σχήμα 5.7: Σκυροδέτηση σταθερών βάσεων σε πέλμα από μπετόν
Σχήμα 5.8: Εδαφόμπηξη βάσεων στήριξης66
Κεφάλαιο 6
Σχήμα 6.1: Βήματα σχεδιασμού αντικεραυνικής προστασίας
Σχήμα 6.2: Βήματα δημιουργίας κεραυνού71
Σχήμα 6.3: Πηγές βλαβών λόγω κεραυνού σε κτίριο
Σχήμα 6.4: Ισοκεραυνικός χάρτης Ελλάδας75
Σχήμα 6.5: Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας (ΖΑΠ)

κεραυνού......79

Σχήμα 6.6: Κυματομορφή ρεύματος κεραυνού......76

Σχήμα 6.8: Απόσταση πλήγματος ή τελευταίου βήματος του καναλιού καθόδου του

Σχήμα 6.9: Εφαρμογή κυλιόμενης σφαίρας.....79

Περιεχόμενα

Σχήμα 6.10: Προστασία από συλλεκτήριες ράβδους με την εφαρμογή της κυλιόμενης σφαίρας
Σχήμα 6.11: Μέθοδος γωνίας προστασίας81
Σχήμα 6.12: Γωνία προστασίας ανάλογα με τη στάθμη αντικεραυνικής προστασίας81
Σχήμα 6.13: Μέθοδος των βρόχων82
Σχήμα 6.14: Ελάχιστο μήκος των ηλεκτροδίων γείωσης ανάλογα με τη στάθμη προστασίας
Σχήμα 6.15: Τύποι γείωσης85
Σχήμα 6.16: Μαγνητική θωράκιση και συντονισμένη προστασία με SPD
Σχήμα 6.17: Όδευση καλωδίων με τη δημιουργία βρόχου (αριστερά) και την ελάττωση
βρόχου (δεξιά)

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι οι μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλαδή η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια, τα αέρια τα εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής, από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και τα βιοαέρια, όπως ορίζει η ΟΔΗΓΙΑ 2001/77/ΕΚ.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (σύμφωνα με τον Ν 2773/1999) είναι η ηλεκτρική ενέργεια η προερχόμενη από:

• Την εκμετάλλευση αιολικής ή ηλιακής ενέργειας ή βιομάζας ή βιοαερίου.

Αιολική ονομάζεται η ενέργεια που περικλείει ο άνεμος και η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί με κατάλληλους μηχανισμούς και διατάξεις. Η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική μέσω των ανεμογεννητριών και ακολούθως σε ηλεκτρική.

Η ηλιακή ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο. Η ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιείται τόσο σε θερμικές όσο και σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Το πιο γνωστό παράδειγμα θερμικής εφαρμογής είναι ο ηλιακός θερμοσίφωνας, όπου η θερμοκρασία του νερού μπορεί να αυξάνεται μέσω της συλλογής ηλιακής ακτινοβολίας για οικιακή ή άλλη χρήση. Από την άλλη τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Οποιοδήποτε υλικό από ζωντανούς οργανισμούς (όπως είναι το ξύλο και άλλα προϊόντα του δασούς, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων κλπ) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας.

Την εκμετάλλευση γεωθερμικής ενέργειας, εφόσον το δικαίωμα εκμετάλλευσης του σχετικού γεωθερμικού δυναμικού έχει παραχωρηθεί στον ενδιαφερόμενο, σύμφωνα με τις ισχύουσες κάθε φορά διατάξεις. Η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα.

• Την εκμετάλλευση της ενέργειας από τη θάλασσα. Οι ωκεανοί μπορούν να προσφέρουν τεράστια ποσά ενέργειας. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι εκμετάλλευσης της ενέργειας της θάλασσας: από τα κύματα, από τις παλίρροιες (μικρές και μεγάλες), από τις θερμοκρασιακές διαφορές του νερού.

 Την εκμετάλλευση υδάτινου δυναμικού με μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς μέχρι 10 MW. Η κινητική ενέργεια του νερού κατά την υδατόπτωση μετατρέπεται μέσω υδροστροβίλων και γεννήτριας σε ηλεκτρική ενέργεια. Μπορεί να προέρχεται από

15

σταθμούς παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, από τις παλίρροιες, η από θαλάσσια κύματα.

• Συνδυασμό των ανωτέρω.

Τη Συμπαραγωγή, με χρήση των πηγών ενέργειας, των (1) και (2) και συνδυασμό τους.

1.2 Εθνικό σχέδιο δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η Ελληνική κυβέρνηση στο πλαίσιο υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το Νόμο 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, ο οποίος και εξειδικεύεται σε 40 % συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20 % σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης και 10 % στις μεταφορές.

Συγκεκριμένα οι εθνικοί στόχοι για το 2020, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα των ενεργειακών μοντέλων, αναμένεται να ικανοποιηθούν για τη μεν ηλεκτροπαραγωγή με την ανάπτυξη περίπου 13300MW από ΑΠΕ (από περίπου 4000MW σήμερα), όπου συμμετέχουν το σύνολο των τεχνολογιών με προεξέχουσες τα αιολικά πάρκα με 7500MW, υδροηλεκτρικά με 3000MW και τα ηλιακά με περίπου 2500MW, ενώ για τη θέρμανση και ψύξη με την ανάπτυξη των αντλιών θερμότητας, των θερμικών ηλιακών συστημάτων, αλλά και των εφαρμογών βιομάζας.

Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς και η παραγωγή ενέργειας από μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής απόδοσης (Σ.Η.Θ.Υ.Α).

Μήνας	Αιο	λικά	Φ,	/В	Φ/Β Σ	τέγες	M	ΗΥΣ	Βιοσ Βιο	αέριο- μάζα	ΣΗΘ Κατανε ΣΗ	ΥΑ & μόμενες ΘΥΑ	Σύν	Σύνολο	
	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	
Ιαν	1.827	321	2.212	190	373	35	220	67	47	18	228	103	4.907	734	
Φεβ *	1.847	294	2.212	172	374	24	220	71	47	16	228	102	4.928	678	
Μαρ	1.847	382	2.212	294	374	23	220	83	47	19	228	113	4.928	913	
Απρ	1.847	283	2.212	307	374	32	220	84	47	18	228	107	4.928	831	
Μάι	1.847	284	2.212	349	374	44	220	82	47	18	228	108	4.928	885	
Ιουν *	1.884	280	2.213	330	374	44	220	54	47	16	229	100	4.967	824	
Ιουλ	1.902	264	2.214	370	374	54	220	39	47	17	229	102	4.987	846	
Αυγ	1.902	283	2.214	375	374	57	220	33	47	17	229	102	4.987	868	
Σεπ															
Окт *															
Νοε															
Δεκ															
Σύνολο Έτους		2.391		2.387		312		513		140		837		6.580	

Πίνακας 1.1 Εγκατεστημένη ισχύς (MW) και παραγωγή ενέργειας (GWh) μονάδων ΑΠΕ/ΣΗΘΥΑ για το έτος 2014.

1.3 Πλεονεκτήματα Φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά παρουσιάζουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- μηδενική ρύπανση,
- αθόρυβη λειτουργία,
- αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής,
- απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες περιοχές,
- δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες,
- ελάχιστη συντήρηση.

Τα φωτοβολταϊκά συνεπάγονται σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον και την κοινωνία. Οφέλη για τον καταναλωτή, για τις αγορές ενέργειας και για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Τα φωτοβολταϊκά είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες της νέας εποχής που ανατέλλει στο χώρο της ενέργειας. Μιας νέας εποχής που θα χαρακτηρίζεται ολοένα και περισσότερο από τις μικρές αποκεντρωμένες εφαρμογές σε ένα περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς. Τα μικρά, ευέλικτα συστήματα που μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδο κατοικίας, εμπορικού κτιρίου ή μικρού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής αναμένεται να κατακτήσουν ένα σημαντικό μερίδιο της ενεργειακής αγοράς στα χρόνια που έρχονται.

Ένα επιπλέον κοινό αυτών των νέων τεχνολογιών είναι η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον. Η ηλιακή ενέργεια είναι καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανέναν και αποτελεί ένα ανεξάντλητο εγχώριο ενεργειακό πόρο, που παρέχει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία. Τα φωτοβολταϊκά, τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα, θεωρούνται τα ιδανικά συστήματα ενεργειακής μετατροπής καθώς χρησιμοποιούν την πλέον διαθέσιμη πηγή ενέργειας στον πλανήτη και παράγουν ηλεκτρισμό. Παρέχουν τον απόλυτο έλεγχο στον καταναλωτή και άμεση πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια. Τον καθιστούν έτσι πιο προσεκτικό στον τρόπο που καταναλώνει την ενέργειας Δεδομένου ότι η παραγωγή και κατανάλωση του ηλιακού ηλεκτρισμού γίνονται τοπικά, αποφεύγονται οι σημαντικές απώλειες της μεταφοράς και διανομής του ηλεκτρισμού και με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 10% σε σχέση με τη συμβατική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του δικτύου.

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν αθόρυβη λειτουργία, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής, δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες, δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας (στο δίκτυο ή σε συσσωρευτές) και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση.

Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών είναι αδιαμφισβήτητα. Κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από φωτοβολταϊκά, και άρα όχι από συμβατικά καύσιμα, συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης ενός περίπου κιλού διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (με βάση το σημερινό ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα και τις μέσες απώλειες του δικτύου). Ένα κιλοβάτ φωτοβολταϊκών αποτρέπει κάθε χρόνο την έκλυση 1,3 τόνων διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Χρειάζονται 2 στρέμματα δάσους ή περίπου 100 δέντρα για να απορροφήσουν αυτή την ποσότητα CO₂. Για να παραχθεί η ίδια ηλεκτρική ενέργεια με πετρέλαιο, απαιτούνται 2,2 βαρέλια πετρελαίου κάθε χρόνο. Από περιβαλλοντική άποψη, αποφεύγοντας 1.300 κιλά CO₂ ετησίως είναι σαν να κάνει ένα μέσο αυτοκίνητο 7.000 χιλιόμετρα λιγότερα κάθε χρόνο. Επιπλέον, η υποκατάσταση ρυπογόνων καυσίμων από φωτοβολταϊκά συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές άλλων επικίνδυνων ρύπων (όπως τα αιωρούμενα μικροσωματίδια, τα οξείδια του αζώτου, οι ενώσεις του θείου). Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα πυροδοτούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και αλλάζουν το κλίμα της Γης, ενώ η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον.

Η βαθμιαία αύξηση των μικρών ηλεκτροπαραγωγών μπορεί να καλύψει αποτελεσματικά τη διαρκή αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα έπρεπε να καλυφθεί με μεγάλες επενδύσεις για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Η παραγωγή ηλεκτρισμού από μικρούς παραγωγούς μπορεί να περιορίσει επίσης την ανάγκη επενδύσεων σε νέες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος μιας νέας γραμμής μεταφοράς είναι πολύ υψηλό, αν λάβουμε υπόψη μας πέρα από τον τεχνολογικό εξοπλισμό και θέματα που σχετίζονται με την εξάντληση των φυσικών πόρων και τις αλλαγές στις χρήσεις γης.

Οι διάφοροι μικροί παραγωγοί «πράσινης» ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ιδανική λύση για τη μελλοντική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιπτώσεις όπου αμφισβητείται η ασφάλεια της παροχής. Η τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν δοκιμάζεται από δαπανηρές ενεργειακές απώλειες που αντιμετωπίζει το ηλεκτρικό δίκτυο (απώλειες, οι οποίες στην Ελλάδα ανέρχονται σε 10% κατά μέσο όρο). Από την άλλη, η μέγιστη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού συμπίπτει χρονικά με τις ημερήσιες αιχμές της ζήτησης (ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες), βοηθώντας έτσι στην εξομάλυνση των αιχμών φορτίου, στην αποφυγή black-out και στη μείωση του συνολικού κόστους της ηλεκτροπαραγωγής, δεδομένου ότι η κάλυψη αυτών των αιχμών είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

Μελέτες έδειξαν ότι κάθε μεγαβάτ (MW) φωτοβολταϊκών υποκαθιστά στην Ελλάδα περίπου 0,3 MW συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Συγκεκριμένα, ο μέσος συντελεστής εγγυημένης ισχύος (capacity credit) των φωτοβολταϊκών σε ετήσια βάση είναι στην Ελλάδα 27%, όπως έδειξε σχετική μελέτη του ΑΠΘ για λογαριασμό του συνδέσμου εταιριών φωτοβολταϊκών (ΣΕΦ).

1.4 Φωτοβολταϊκά στην Ελλάδα

Το 2013, η ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών ξεπέρασε τα 1.000 μεγαβάτ (MWp) νέων εγκαταστάσεων, καλύπτοντας τον ενδεικτικό εθνικό στόχο για το 2020 επτά χρόνια

νωρίτερα. Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά έφθασε το 6,73% και η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο 6,67%. Τα ποσοστά αυτά κατατάσσουν την Ελλάδα στη δεύτερη θέση διεθνώς σε ότι αφορά στη συμβολή των φωτοβολταϊκών στη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Το 2013 η Ελλάδα βρέθηκε για τρίτη συνεχή χρονιά, στην κορυφαία δεκάδα της παγκόσμιας αγοράς σε ότι αφορά στη νέα ετήσια εγκατεστημένη ισχύ. Η επίδοση αυτή γίνεται ακόμη πιο εντυπωσιακή, όταν δει κανείς την κατά κεφαλή εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών, κατηγορία στην οποία η Ελλάδα καταλαμβάνει την 4η θέση διεθνώς. Αντί όμως να υπάρχει ένα κλίμα αισιοδοξίας για αυτή τη λαμπρή επίδοση, η αγορά βρίσκεται σε τέλμα. Πέραν των σημαντικών μειώσεων στις εγγυημένες τιμές πώλησης της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας (feed-intariffs, FiTs), η σημαντικότερη ρύθμιση που επηρεάζει τις μελλοντικές επενδύσεις είναι το πάγωμα της αδειοδοτικής διαδικασίας για νέα φωτοβολταϊκά που επιβλήθηκε τον Αύγουστο του 2012 και ίσχυσε ως τον Απρίλιο του 2014 δημιουργώντας προβλήματα συνέχειας στην αγορά.

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

	Πίνακας 1.2	Ενκατεστημένη	ισχύς φωτα	οβολταϊκών	μονάδων	στην Ελλάδα.
--	-------------	---------------	------------	------------	---------	--------------

Έτσι ουσιαστικά η αγορά καλείται να ξαναβρεί εκ νέου το ρυθμό της, στη βάση πλέον νέων κανόνων που εν τω μεταξύ έχουν τεθεί. Οι νέοι αυτοί κανόνες προβλέπουν ιδιαίτερα χαμηλές τιμές πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και ένα όριο (της τάξης των 250 MWp) στη νέα ετήσια ισχύ που μπορεί να εγκατασταθεί την περίοδο 2014-2020. Στόχος είναι το 2020 να είναι εγκατεστημένα περί τα 4500 MWp φωτοβολταϊκών.

Με απόφαση του Μαΐου του 2013 (ΥΑΠΕ/Φ1/1288/9011, ΦΕΚ 1103Β/02-05-2013), οι τιμές πώλησης της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας (για όσους αποζημιώνονται με εγγυημένες τιμές πώλησης, FiTs) καθορίζονται σύμφωνα με τον πίνακα 1.3.

Σημειωτέον ότι, από τον Φεβρουάριο του 2010, δεν υπάρχουν πια επιδοτήσεις για τα φωτοβολταϊκά από τον αναπτυξιακό νόμο, όπως ίσχυε παλιότερα ενώ με το N.4203/2013 (ΦΕΚ 235Α/1-11-2013) θεσμοθετήθηκε για πρώτη φορά η δυνατότητα των καταναλωτών να κάνουν χρήση του net-metering.

Μήνας/Έτος	Tιμή (€/MWh)		
Φεβρουάριος 2013	125,00		
Αύγουστος 2013	125,00		
Φεβρουάριος 2014	120,00		
Αύγουστος 2014	120,00		
Φεβρουάριος 2015	115,00		
Αύγουστος 2015	115,00		
Φεβρουάριος 2016	110,00		
Αύγουστος 2016	110,00		
Φεβρουάριος 2017	105,00		
Αύγουστος 2017	100,00		
Φεβρουάριος 2018	95,00		
Αύγουστος 2018	90,00		
Φεβρουάριος 2019	85,00		
Αύγουστος 2019	80,00		

Πίνακας 1.3 Τιμές πώλησης της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας.

Κεφάλαιο 2: Ηλιακή Γεωμετρία

2.1 Γεωμετρία Ήλιου-Γης

Η Γη κινείται σε μια ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο και χρειάζεται 365 ημέρες για να ολοκληρώσει μία πλήρη περιστροφή γύρω από αυτόν. Το επίπεδο που περιέχει αυτή την τροχιά ονομάζεται εκλειπτικό επίπεδο. Επίσης, η Γη περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της, πολικός άξονας, και ολοκληρώνει μια πλήρη ιδιοπεριστροφή σε 24 ώρες.



Σχήμα 2.1 Ετήσια περιστροφή της Γης γύρω από τον Ήλιο.

Κατά την περιφορά της Γης γύρω από τον Ήλιο διατηρείται σταθερός ο προσανατολισμός του πολικού άξονα ως προς το εκλειπτικό επίπεδο και με τον τρόπο αυτόν εισάγονται οι διάφορες εποχές στα δύο ημισφαίρια της Γης.

2.2 Προσδιορισμός τοποθεσίας πάνω στη Γη

Για τον προσδιορισμό μιας τοποθεσίας πάνω στη Γη απαιτούνται δύο σφαιρικές συντεταγμένες: το γεωγραφικό πλάτος (ϕ^{o}) και το γεωγραφικό μήκος (α^{o}).

Το γεωγραφικό πλάτος είναι η γωνιακή απόσταση ενός τόπου από τον Ισημερινό. Σε περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου αντιστοιχεί θετική τιμή γεωγραφικού πλάτους.

Το γεωγραφικό μήκος μιας τοποθεσίας είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου του μεσημβρινού της τοποθεσίας και του επιπέδου του μεσημβρινού του Greenwich. Το Greenwich είναι ένα προάστιο του Λονδίνου, του οποίου το γεωγραφικό μήκος έχει οριστεί ίσο με μηδέν. Σε περιοχές ανατολικά του μεσημβρινού του Greenwich, όπως η Ελλάδα, αντιστοιχεί αρνητική τιμή γεωγραφικού μήκους.

2.3 Ηλιακή απόκλιση και ωριαία γωνία

Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του ουράνιου Ισημερινού και της νοητής ευθείας η οποία ενώνει τα κέντρα της Γης και του Ηλίου ονομάζεται ηλιακή απόκλιση (δ°). Οι ακραίες της τιμές είναι +23.45° στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και -23.45° στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Η ηλιακή απόκλιση δίνεται από τον τύπο:

$$\delta(^{o})=23,45^{o} sin[\frac{360^{o}}{365}*(DoY+284)], (2.1)$$

όπου: DoY η ημέρα του έτους.



Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση ηλιακής απόκλισης.

Η ωριαία γωνία (ω^ο) ενός σημείου είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των δύο ημιεπιπέδων που ορίζονται από τον πολικό άξονα της Γης και το ζενίθ της τοποθεσίας, και τον πολικό άξονα της Γης και το σημείο που πρόκειται να περιγραφεί πάνω στην ουράνια σφαίρα. Δίνεται από τον τύπο:

ω(°)=
$$\frac{15^{\circ}}{h}$$
 * (T_{SOLAR} – 12 h), (2.2) όπου Τ_{SOLAR} η ηλιακή ώρα.

2.4 Ηλιακή ώρα

Η ηλιακή ώρα έχει ως αναφορά τον Ήλιο και δεν ταυτίζεται με την τοπική ώρα. Για τον καθορισμό της ηλιακής ώρας πρέπει να ληφθούν υπόψη διορθώσεις που οφείλονται είτε στις διαφορετικές θέσεις πάνω στην επιφάνεια της Γης, είτε στις παρεκκλίσεις που προέρχονται από την ετήσια τροχιά της Γης. Οι διορθώσεις που εφαρμόζονται είναι οι εξής:

Διόρθωση που αφορά τη θέση του παρατηρητή πάνω στην επιφάνεια της Γης.
Προκύπτει από τη διαφορά του γεωγραφικού μήκους του μεσημβρινού του παρατηρητή

 L_{LOC} και του μεσημβρινού αναφοράς L_{ST} για τον καθορισμό της τοπικής ώρας και δίνεται από τον τύπο: L_{ST} =(15°/h)* ΔT_{GTM} , (2.3).

• Η δεύτερη διόρθωση αφορά την ημέρα του έτους και εισάγεται μέσω της «εξίσωσης χρόνου». Η διόρθωση αυτή λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της χρονικής διάρκειας (min) που απαιτεί ο Ήλιος για να μεταφερθεί κατά μήκος της ηλιακής τροχιάς του στην ουράνια σφαίρα και να διανύσει τον ουρανό του παρατηρητή και αντισταθμίζει την εκκεντρότητα μεταξύ της τροχιάς της Γης και της γωνίας του άξονα της Γης ενώ δίνεται είτε τη γραφική παράσταση του σχήματος 2.3 είτε από την εμπειρική μαθηματική σχέση: E=9,87*sin(2B)-7,53*cos(2B)-1,5*sin(B), (2.4), όπου B η γωνία ημέρας η οποία δίνεται από τη σχέση $B=(360^{\circ}/364)*(DoY-81)$,(2.5).



Σχήμα 2.3 Γραφική παράσταση εξίσωσης χρόνου.

Γνωρίζοντας όλα τα παραπάνω μεγέθη η ηλιακή ώρα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_{SOLAR} = T_{LOCAL}(h) + E(min) + 4*(L_{ST} - L_{LOCAL}) \frac{min}{o}, (2.6)$$

2.5 Καθορισμός θέσης αστρικού σώματος-Οριζόντιο σύστημα

Για τον καθορισμό της θέσης ενός αστρικού σώματος από συγκεκριμένη περιοχή στην επιφάνεια της Γης χρησιμοποιείται το οριζόντιο σύστημα. Σύμφωνα με το οριζόντιο σύστημα η Γη είναι σταθερή και βρίσκεται στο κέντρο του σύμπαντος, ενώ τα αστέρια είναι στερεωμένα στην επιφάνεια της περιστρεφόμενης ουράνιας σφαίρας. Στο οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων η θέση του Ηλίου ως προς το σημείο όπου βρίσκεται ο παρατηρητής μπορεί να καθοριστεί από δύο γωνίες, το ύψος (β°) υπεράνω του ορίζοντα και το αζιμούθιο (Ζ°) ως προς το Νότο.

Το ύψος υπεράνω του ορίζοντα είναι η γωνία υπό την οποία φαίνεται ο Ήλιος ως προς το οριζόντιο τοπικό επίπεδο του παρατηρητή στη συγκεκριμένη θέση στην επιφάνεια της Γης. Το εύρος των τιμών για το ύψος του Ηλίου είναι από -90° έως +90°. Το ύψος γίνεται θετικό όταν ο Ήλιος βρίσκεται πάνω από τον ορίζοντα. Το ύψος Ηλίου δίνεται από τον τύπο:

$sin\theta$ = $sin\delta$ * $sin\phi$ + $cos\delta$ * $cos\phi$ * $cos\omega$, (2.7)

όπου: (δ) η ηλιακή απόκλιση, (φ) το γεωγραφικό πλάτος και (ω) η ωριαία γωνία.

Το αζιμούθιο (Ζ) είναι η γωνία που δημιουργείται ανάμεσα σε μία ορισμένη κατεύθυνση και την προβολή του Ηλίου πάνω στο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς. Η κατεύθυνση αναφοράς επιλέγεται να είναι ο Νότος. Οι αζιμούθιες γωνίες που κατευθύνονται προς τη δύση θεωρούνται θετικές. Το αζιμούθιο δίνεται από τον τύπο:





2.6 Βασικές γωνίες κεκλιμένης επιφάνειας

Οι γωνίες που προσδιορίζουν την τοποθέτηση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου πάνω στο οριζόντιο επίπεδο της τοποθεσίας είναι:

• Η γωνία κλίσης του πλαισίου, α^ο, που σχηματίζεται μεταξύ του ηλιακού συλλέκτη και του οριζόντιου επιπέδου αναφοράς.

Η γωνία προσανατολισμού του συλλέκτη, θ°, η οποία ορίζεται από την προβολή πάνω στο οριζόντιο επίπεδο της καθέτου επί της επιφάνειας του συλλέκτη και το Νότο.

• Η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, γ^ο, η οποία ορίζεται μεταξύ της άμεσης ηλιακής δέσμης και της καθέτου στην επιφάνεια του συλλέκτη. Δίνεται από τη σχέση:

 $cos \gamma$ =sin δ *sin φ *sin α -sin δ *cos φ *sin α *cos ϑ +cos ϑ *cos φ *cos α *cos ω ++cos δ *sin φ *sin α *cos ϑ *cos ω + cos δ *sin α *sin ϑ , (2.9).

Στο σχήμα 2.4 δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση των βασικών γωνιών μιας κεκλιμένης επιφάνειας. Σε αυτές έχουν προστεθεί το ύψος ηλίου β και το αζιμούθιο Ζ ενώ αναπαρίσταται επιπλέον και η γωνία ζενίθ του ήλιου θ_z η οποία σχηματίζεται μεταξύ της άμεσης δέσμης και της κατακόρυφου του οριζόντιου επιπέδου.

Η μέγιστη θεωρητική συλλογή ηλιακής ισχύος από ένα προσανατολισμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναμένεται όταν η επιφάνεια του πλαισίου προσανατολίζεται συνεχώς κάθετα στην προσπίπτουσα άμεση ηλιακή δέσμη. Για να επιτευχθεί πρέπει η γωνία προσανατολισμού του συλλέκτη να ταυτίζεται με το ηλιακό αζιμούθιο θ=Ζ, και η κλίση του συλλέκτη να προσαρμόζεται έτσι ώστε γ=0 δηλαδή α=θ_z.



Σχήμα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση των βασικών γωνιών κεκλιμένης επιφάνειας.

Κεφάλαιο 3: Λειτουργία και Τεχνολογία Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

3.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο συνίσταται στη μετατροπή μέρους του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η ακτινοβολία παράγεται συνεχές ρεύμα από την δίοδο, το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει ένα οποιοδήποτε φορτίο συνεχούς ρεύματος και κατά συνέπεια να έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Όταν διακοπεί η ακτινοβόληση της διόδου, σταματάει και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

3.1.1 Ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού

Η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται συνήθως με τη δίοδο p-n. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία βασίζουν τη λειτουργία τους στη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού. Το φράγμα δυναμικού βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και τοποθετείται από την πλευρά που προσπίπτει το φως. Χαρακτηρίζεται από το ύψος του (q*V_D), το οποίο μετράται σε eV, και το εύρος του w (μm).

Ο ημιαγωγός τύπου n εμπεριέχει πεντασθενή άτομα, τα οποία κατά τον ιοντισμό τους ελευθερώνουν ηλεκτρόνια προς τη ζώνη αγωγιμότητας και σχηματίζονται θετικά ιόντα. Τα σχηματιζόμενα θετικά ιόντα παραμένουν εγκλωβισμένα στον κρύσταλλο που είχαν εισαχθεί ενώ τα ηλεκτρόνια που εισάγονται στη ζώνη αγωγιμότητας είναι ελεύθερα να κινηθούν υπό την επίδραση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Αντίστοιχα ο ημιαγωγός τύπου p εμπεριέχει τρισθενή άτομα, τα οποία κατά τον ιοντισμός τους αποσπούν και δεσμεύουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους και δημιουργούνται οπές. Οι οπές μπορούν να ολισθαίνουν με την επιβολή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου.

Το φράγμα δημιουργείται καθώς οι εκατέρωθεν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς που βρίσκονται στην περιοχή επαφής αντισταθμίζονται, αφήνοντας πίσω τους τα ιόντα από τα οποία έχουν προέλθει. Οι κατανομές φορτίων που προκύπτουν από τα θετικά φορτία των ασυνόδευτων δοτών και τα αρνητικά φορτία των ασυνόδευτων αποδεκτών δημιουργούν το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού στην περιοχή επαφής p-n.

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 ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού δεν υπάρχουν ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς. Για το λόγο αυτό η περιοχή w λέγεται και περιοχή απωθήσεως ηλεκτρικών φορέων.

3.1.2 Οπτική διέγερση

Με το φωτισμό της διόδου p-n, τα φωτόνια ενέργειας E=h*v 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 ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού. 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 αυτή 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. 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 L_n, L_p, οι δημιουργούμενοι φορείς μειονότητας διαχέονται προς την ενεργό περιοχή 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 ενεργό περιοχή οι δύο διακριτές στάθμες ταυτίζονται σε μία στάθμη E_F (όπως κατά την ΘΔ ισορροπία). Μακριά από την ενεργό περιοχή (θέση ΙΙ στο σχήμα 3.1) τα δημιουργούμενα ζεύγη οπώνηλεκτρονίων 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 ενεργό περιοχή 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. Η δημιουργία αυτών των κατανομών φορτίου ισοδυναμεί με μια ορθά πολωμένη δίοδο p-n. Οι στάθμες Φ_n, Φ_p διαχωρίζονται κατά την ενεργειακή διαφορά: Φ_n – Φ_p = q * V_{TOTAL}, όπου: V_{TOTAL} είναι η τιμή της τάσης εξόδου στα άκρα της διόδου p-n.

27



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας ηλεκτρονίων και οπών-απόστασης, για μια φωτιζόμενη δίοδο p-n, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

3.2 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Το υλικό που χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων στην βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1,1 eV. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητές του δεν είναι ιδεώδεις για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή αλλά μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι το πυρίτιο είναι το κύριο υλικό των διατάξεων ηλεκτρονικής για πολλές δεκαετίες. Επομένως οι ιδιότητες του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στην αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, με ικανοποιητική χημική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής, με την χρησιμοποίηση τεχνολογικών μεθόδων δοκιμασμένων με επιτυχία. Επιπλέον τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου έχουν λειτουργήσει με απόλυτα ικανοποιητική αξιοπιστία σε ακραίες καιρικές συνθήκες, τόσο σε διαστημικές όσο και σε επίγειες εφαρμογές.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατατάσσονται ανάλογα με τα υλικό της κατασκευής τους σε στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου, λεπτών υμενίων και άμορφου πυριτίου.

3.2.1 Μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει ομοιόμορφη μοριακή δομή με αποτέλεσμα τον υψηλό βαθμό απόδοσης. Κατασκευάζεται με μια σειρά τυποποιημένων διεργασιών σε περιβάλλον εξαιρετικής καθαρότητας.

Τα υπόβαθρα πυριτίου εκτός από τη μονοκρυσταλλικότητα πρέπει να παρουσιάζουν υψηλό βαθμό χημικής καθαρότητας, υψηλό βαθμό κρυσταλλικής τελειότητας και υψηλή δομική ομοιομορφία. Για την παραγωγή ενός τόσο υψηλής ποιότητας υλικού ακολουθούνται τα εξής δύο στάδια: • ένας τύπος άμμου (quartzite) που αποτελεί την πρώτη ύλη αναβαθμίζεται με

μια διαδικασία πολλών σταδίων σε υψηλής ποιότητας πολυκρυσταλλικό πυρίτιο Electronic Grade Silicon (EGS).

• από το EGS αναπτύσσεται μονοκρυσταλλικό πυρίτιο με δύο εναλλακτικές

τεχνικές: την τεχνική Czochralski (CZ) ή την τεχνική Float Zone (FZ).

Για την παραγωγή του EGS αρχικά πρέπει να παραχθεί το MGS (Metellurgical Grade Silicon. Πρώτες ύλες για την παραγωγή του είναι το quartzite (SiO2), άνθρακας σε μορφή κάρβουνου και θρύμματα ξύλου. Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε κατάλληλο φούρνο (submerged-electrode arc furnace) και θερμαίνεται από ηλεκτρόδιο που εμβαπτίζεται μέσα της. Η διαδικασία είναι πολύπλοκη και ενεργοβόρα (13kWh/kg). Στη συνέχεια, παράγεται το τριχλωροσιλάνιο SiHCl₃, με τη μηχανική κονιορτοποίηση του MGS και την αντίδρασή του με άνυδρο υδροχλώριο παρουσία καταλύτη στους 300°C. Τελικά το EGS παράγεται από το χημικώς καθαρό τριχλωροσιλάνιο με την τεχνική εναπόθεσης ατμών (Chemical Vapor Deposition) ή με πυρόλυση σιλανίου σε έναν αντιδραστήρα CVD στους 900°C.

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο μπορεί να παραχθεί από το EGS είτε με την τεχνική Czochralski είτε με την τεχνική Float Zone. Στην τεχνική Czochralski τοποθετείται σε μια χοάνη τήξης το EGS μαζί με την κατάλληλη ποσότητα αραιού κράματος πυριτίου. Στη συνέχεια εκκενώνεται ο θάλαμος ανάπτυξης από τα υπάρχοντα αέρια και διοχετεύεται αδρανές αέριο για να αποτραπεί η είσοδος ατμοσφαιρικών αερίων στο τήγμα κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης. Ακολουθεί η τήξη του πυριτίου και η εισαγωγή στο λιωμένο πυρίτιο ενός πυρήνα κρυστάλλωσης από κρυσταλλικό πυρίτιο. Το κομμάτι πυριτίου δρα σαν πυρήνας κρυστάλλωσης και έτσι το πυρίτιο επικάθεται σε αυτό με αποτέλεσμα να μεγαλώσει και να σχηματισθεί σταδιακά ένας νέος μεγάλος κρύσταλλος πυριτίου με την συνεχή ανύψωση από το λιωμένο πυρίτιο. Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι το πυρίτιο να αποκτήσει μια κυλινδρική μορφή με διάμετρο περίπου 10cm και μήκους 1m. Εν συνεχεία ο κύλινδρος αυτός πρέπει να κοπεί σε πολύ λεπτούς δίσκους (κυλινδρικές πλάκες), πάχους που κυμαίνεται από 150μm μέχρι 500μm για τις ηλιακές εφαρμογές.

Η τεχνική float zone (FZ) πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία μια λειωμένη ζώνη διαπερνά μια ράβδο πολυκρυσταλλικού πυριτίου η οποία έχει τις ίδιες διαστάσεις με το τελικό ingot . Η καθαρότητα του μονοκρυστάλλου που παράγεται με την τεχνική FZ ξεπερνά αυτήν που επιτυγχάνεται με την τεχνική CZ. Τα βήματα της τεχνικής FZ είναι τα ακόλουθα: Μια ράβδος από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο τοποθετείται κατακόρυφα εντός ειδικού θαλάμου ο οποίος βρίσκεται υπό κενό ή είναι γεμισμένος με αδρανές αέριο. Ένα πηνίο το οποίο μπορεί να κινείται κατά μήκος του άξονα της ράβδου πολυπυριτίου τροφοδοτείται με ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και δημιουργεί μια λιωμένη ζώνη εύρους 2 cm στη ράβδο. Η λιωμένη περιοχή διατηρείται με τη βοήθεια του πηνίου σε σταθερή υγρή μορφή. Στη συνέχεια, το πηνίο κινείται κατά μήκος του άξονα της ράβδου οπότε και μετακινείται μαζί με αυτό και η λιωμένη περιοχή. Η κίνηση της λιωμένης ζώνης σε όλο το μήκος της ράβδου «καθαρίζει» τη ράβδο και σχηματίζει έναν σχεδόν τέλειο μονοκρύσταλλο. Εναλλακτικά, η τεχνική FZ μπορεί να υλοποιηθεί με στατικό πηνίο και κινούμενη ράβδο πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

3.2.2 Πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Το μεγάλο κόστος παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου λόγω των ενεργοβόρων διαδικασιών του οδήγησε στην ανάγκη εξεύρεσης λιγότερο δαπανηρών μεθόδων, όπως αυτή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποτελείται από περιοχές μονοκρυσταλλικού πυριτίου, αλλά δεν έχει την ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από τα στοιχεία που αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.

Για την παραγωγή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου αντί της μεθόδου Czochranski για την επίτευξη «τέλειας» κρυσταλλικής δομής, το υψηλής καθαρότητας πυρίτιο, απλά τήκεται και τοποθετείται σε ένα δοχείο με τετραγωνική βάση, όπου και αφήνεται να στερεοποιηθεί (μέθοδος Bridgman). Εναλλακτικά χρησιμοποιείται η μέθοδος block casting, όπου το πυρίτιο τήκεται σε ένα δοχείο και έπειτα μεταφέρεται σε ένα δεύτερο όπου και στερεοποιείται. Το στερεό πυρίτιο που δημιουργείται έχει πολυκρυσταλλική δομή. Ακολουθεί η κοπή σε λεπτά εγκάρσια φύλλα πάχους περίπου 350μm.

3.2.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων

Η χρήση λεπτών υμενίων στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών έχει ως σκοπό την ουσιαστική μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων καταλαμβάνουν πλέον σημαντικό τμήμα της αγοράς.

Λεπτό υμένιο ονομάζουμε τη μικροδομή που δημιουργείται από τα ατομικά στρώματα ενός υλικού πάνω στην επιφάνεια ενός στερεού υλικού και που η μία διάσταση του είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη από τις άλλες δύο. Τα λεπτά υμένια, με πάχος που κυμαίνεται από λίγα nm έως και μερικά μm, έχουν ιδιότητες που είναι σημαντικά διαφορετικές από αυτές των στερεών υλικών και των επιφανειών. Η ανάπτυξη μονοστρωματικών ή πολυστρωματικών δομών λεπτών υμενίων προσδίδει στο συνολικό σύστημα τις επιθυμητές φυσικές, χημικές ή βιολογικές ιδιότητες, ανάλογα με τη μετέπειτα χρήση τους, αλλά και καινούργιες εξαιρετικές ιδιότητες που μπορούν να επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογών τους, αλλά και τη διάρκεια ζωής τους.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων κατασκευάζονται από την εναπόθεση τουλάχιστον δύο λεπτών ημιαγώγιμων υμενίων πάνω σε επιφάνεια γυαλιού ή μετάλλου ή κρυστάλλου διαφορετικού ημιαγωγού τα οποία χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι η χημική εναπόθεση ατμών (Chemical Vapor Deposition) όπου κατά τη διαδικασία επίστρωσης του υμενίου λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις, η επιταξία υγρής φάσης (Liquid Phase Epitaxy) και η μοριακή επιταξία δέσμης σε ερευνητικό κυρίως επίπεδο κατά την οποία τα προϊόντα τοποθετούνται σε στερεά μορφή σε κατάλληλα κελιά και θερμαίνονται σε κατάλληλη θερμοκρασία με σκοπό την εξάχνωσή τους. Οι δέσμες των ατόμων ή μορίων θερμικών ενεργειών που παράγονται από αυτήν την εξάχνωση κατευθύνονται προς το κρυσταλλικό υπόστρωμα. Στη συνέχεια αλληλεπιδρούν κοντά και πάνω σε αυτό το υπόστρωμα το οποίο διατηρείται σε κατάλληλη θερμοκρασία με αποτέλεσμα τη δημιουργία του εκάστοτε υλικού.

3.2.4 Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si)

Το άμορφο πυρίτιο ως υλικό εμφανίζει μεγάλη αταξία στη δομή του, παρόλο αυτά βρίσκει εφαρμογή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία με τη μορφή κράματος με υδρογόνο. Η προσθήκη υδρογόνου βελτιώνει τις ηλεκτρικές ιδιότητές του και περιέχεται σε 10-40% ατομική αναλογία. Διαφέρει ουσιαστικά από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο καθώς εμφανίζει ενεργειακό διάκενο με μεταβλητή τιμή που κυμαίνεται μεταξύ 1, 2eV και 1,6eV περίπου.

Το κύριο πλεονέκτημα του είναι ότι έχει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και μάλιστα περίπου 40 φορές υψηλότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ως προς αυτή την ιδιότητά του το a-Si συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου, για αυτό μια λεπτή επίστρωση είναι αρκετή για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων. Επιπλέον το άμορφο πυρίτιο μπορεί να εναποτεθεί σε ποικίλα, χαμηλού κόστους υποστρώματα, συμπεριλαμβανομένου του χάλυβα, του γυαλιού και του πλαστικού. Η κατασκευαστική διαδικασία απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες και επομένως λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι το συνολικό κόστος του υλικού και του κόστους κατασκευής είναι χαμηλότερο ανά μονάδα επιφάνειας, συγκρινόμενο με τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου.

Δύο είναι τα κυριότερα μειονεκτήματά του. Ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 6 – 9 % για στοιχεία του εμπορίου και φτάνει το 13% για στοιχεία που έχουν φτιαχτεί στο εργαστήριο και η βαθμιαία μείωση του βαθμού απόδοσης. Μέσα σε μερικούς μήνες μπορεί η απόδοση να μειωθεί από 10% έως και 15 %.

3.3 Φωτοβολταϊκές διατάξεις ΙΙΙ-ΙV Ημιαγωγών

Ο συντελεστής απόδοσης των φωτοβολταϊκών διατάξεων πυριτίου σε ερευνητικό επίπεδο εγγίζει το 25% και εκτιμάτε ότι η μέγιστη θεωρητικά απόδοση μπορεί να φθάσει το 27% για ένταση φωτισμού ενός Ήλιου.

Μια παράμετρος που διαφοροποιεί την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι το υλικό κατασκευής τους και ειδικότερα η τιμή του ενεργειακού τους διακένου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οι ημιαγωγοί ΙΙΙ-ΙV σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές μικρής κλίμακας. Τα υλικά ΙΙΙ-ΙV κατασκευάζονται πάντοτε υπό τη μορφή λεπτών υμενίων σε κατάλληλο κρυσταλλικό υπόστρωμα.

Το αρσενικούχο γάλλιο είναι ένας ημιαγωγός με ενεργειακό διάκενο 1,43 eV, τιμή η οποία είναι στη βέλτιστη περιοχή για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας με θεωρητική απόδοση περίπου 25-30%. Επιπλέον πλεονέκτημα αποτελεί το άμεσο ενεργειακό διάκενο. Το μειονέκτημά του είναι το υψηλό κόστος παραγωγής, περίπου πενταπλάσιο από αυτό του κρυσταλλικού πυριτίου. Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος και είναι σπάνιο. Αντίθετα, το αρσενικό δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες.

Το αρσενικούχο γάλλιο έχει εφαρμογή κυρίως σε ηλιακά στοιχεία συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, όπου το υψηλό κόστος του αντισταθμίζεται από την υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας. Επίσης το GaAs συναντάται συχνά σε διαστημικές εφαρμογές λόγω της υψηλής θερμικής αδράνειάς του και του υψηλού βαθμού απόδοσης. Συγκεκριμένα η απόδοση των στοιχείων GaAs πέφτει στο μισό, σε σύγκριση με

την απόδοσή τους σε συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, όταν θερμανθούν στους 200 °C. Η αντίστοιχη μείωση στα στοιχεία πυριτίου παρατηρείται ήδη στους120 °C.

Άλλοι ημιαγωγοί ΙΙΙ-ΙV που χρησιμοποιούνται είναι το φωσφορούχο ίνδιο In-P, το αντιμονιούχο γάλλιο Ga-Sb, και το τριμερές κράμα αλουμινίου-γαλλίου-αρσενικού Al-Ga-As.

3.4 Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το τελλουριούχο κάδμιο είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό που αποτελείται από κάδμιο Cd και τελλούριο Te. Παρουσιάζει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και το ενεργειακό του διάκενο είναι κοντά στο ιδανικό.

Υπάρχουν μερικές χαμηλού κόστους τεχνικές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόθεση του CdTe και να παράγουν υλικό υψηλής ποιότητας η απόδοση του οποίου έχει φθάσει το 6%. Η διαδικασία πλεγματικής εκτύπωσης προσφέρει μια τεχνολογία χαμηλού κόστους με χαμηλό όμως ρυθμό παραγωγής. Μια ακόμα τεχνολογία είναι αυτή της ηλεκτροτυπίας. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για τα στοιχεία CdTe, λόγω της πολύ μικρή χρήσης του υλικού και του χαμηλού κόστους, με αποδόσεις γύρω στο 13%.

Μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι το γεγονός ότι το κάδμιο είναι τοξικό υλικό. Για το λόγο αυτό πρέπει να λαμβάνονται αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγή του ενώ επιβεβλημένη είναι και η ανακύκλωσή του μετά το πέρας της ζωής του.

3.5 Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe2-CIS)

Ο δισεληνιούχος ινδιούχος χαλκός έχει τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί έως σήμερα. Τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τον λόγο χαλκού-ινδίου. Οι ομοεπαφές τύπου p-n δεν είναι σταθερές ούτε αποδοτικές για αυτό και προτιμούνται οι ετεροενώσεις με θειούχο κάδμιο. Το θειούχο κάδμιο αναπτύσσεται μόνο ως υλικό τύπου-n οπότε ο δισεληνιούχος ινδιούχος χαλκός πρέπει να είναι τύπου-p. Το CIS έχει ενεργειακό διάκενο 1eV ενώ το θειούχο κάδμιο 2,4 eV με αποτέλεσμα να απορροφά την προσπίπτουσα ακτινοβολία του ορατού φάσματος.

Οι βέλτιστες διατάξεις χρησιμοποιούν ένα πολύ λεπτό στρώμα (0,03μm) θειούχου καδμίου με στρώμα ενός υλικού με μεγάλο ενεργειακό διάκενο και υψηλή αγωγιμότητα. Το οξείδιο του ψευδαργύρου έχει βρεθεί ότι είναι ένα κατάλληλο υλικό για το στρώμα του παραθύρου

Τα εμπορικά στοιχεία CIS που χρησιμοποιούνται έχουν απόδοση έως 10%. Σε αντίθεση με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου δεν εμφανίζουν βαθμιαία πτώση της απόδοσης για μια περίοδο μερικών ετών. Από την άλλη το CIS είναι ένα πολύπλοκο υλικό με δύσκολη κατασκευή. Επίσης η ύπαρξη του σεληνιούχου υδρογόνου απαιτεί αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγή και χρήση του.

Κεφάλαιο 4: Γήρανση

4. Γήρανση

Με τον όρο γήρανση εννοείται η σταδιακή υποβάθμιση ενός υλικού ή ενός συστήματος το οποίο μπορεί να επηρεάσει την ικανότητά του να λειτουργεί εντός των ορίων των κριτηρίων αποδοχής και η οποία προκαλείται από τις συνθήκες λειτουργίας.

Η γήρανση του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι σημαντική καθώς ένας υψηλός ρυθμός οδηγεί σε απώλεια παραγόμενης ισχύος και επομένως σε μείωση της απόδοσης της επένδυσης. Η έλλειψη ακριβούς πληροφορίας σχετικά με την υποβάθμιση ενός ΦΒ συστήματος αυξάνει το οικονομικό ρίσκο. Η αξιοπιστία και η διάρκεια ζωής εξαρτώνται κυρίως από την ενεργειακή απόδοση των πλαισίων και τους διαφορετικούς τρόπους γήρανσης.

4.1 Μηχανισμοί υποβάθμισης της λειτουργίας ΦΒ πλαισίου

Ένα πλαίσιο το οποίο έχει υποστεί γήρανση συνεχίζει να εκτελεί την αρχική του λειτουργία, δηλαδή την παραγωγή ρεύματος από το φως του ήλιου, αν και η χρησιμοποίηση του δεν είναι η πλέον αποδοτική. Ωστόσο η γήρανση του πλαισίου καθίσταται προβληματική όταν ξεπερνά ένα όριο. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές το όριο είναι η μείωση της αρχικής ισχύος του πλαισίου κάτω του 80%.

Η απόδοση του πλαισίου μπορεί να μειωθεί εξαιτίας πολλών παραγόντων όπως: η θερμοκρασία, η υγρασία, η ακτινοβολία και μηχανικό σοκ. Κάθε παράγοντας μπορεί να προκαλέσει έναν ή περισσότερους μηχανισμούς υποβάθμισης του πλαισίου όπως:

- Διάβρωση
- Αποχρωματισμός
- Αποκόλληση
- Σπάσιμο ή θραύση του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

4.1.1 Διάβρωση ΦΒ πλαισίου

Η υγρασία εισχωρεί στο πλαίσιο και οδηγεί σε διάβρωση. Η παραμονή της υγρασίας στο πλαίσιο αυξάνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης λόγω της αύξησης των ρευμάτων διαρροής. Επίσης ελαττώνει την πρόσφυση μεταξύ των ΦΒ στοιχείων και του μεταλλικού σκελετού. Η υγρασία αυξάνει το ρυθμό γήρανσης σε θερμά και με υγρασία κλίματα καθώς υψηλότερα ρεύματα διαρροής παρατηρούνται σε υψηλή σχετική υγρασία.

Οι Wohlgemuth και Kurtz (2011) μελέτησαν την επίδραση της υγρασίας και θεμοκρασίας στην υποβάθμιση του ΦΒ πλαισίου. Τα πλαίσια εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 85°C και σχετικής υγρασίας 85%. Ύστερα από έκθεση 1000 ωρών στις παραπάνω συνθήκες βρέθηκε διάβρωση.

Λόγω της σχετικά γρήγορης διάχυσης του νερού στο υλικό εγκιβωτισμού (EVA, ethylene vinyl acetate), η υγρασία εντός του πλαισίου παραμένει σημαντική κατά τη διάρκεια της ζωής του πλαισίου ακόμα και αν αποτελείται από διπλό γυαλί. Σύμφωνα με μελέτες του *Kemp (2005)* ο μόνος τρόπος να αποφευχθεί η εισχώρηση της υγρασίας είναι να σφραγιστει το πλαίσιο χρησιμοποιώντας παρεμβύσματα (φλάτζες) χαμηλής διάχυσης οι οποίες περιέχουν μεγάλη ποσότητα αποξηραντικού. Τέλος ο εγκιβωτισμός της στοιχειοσειράς σε διαφανή ρητίνη αποκλείει την διείσδυση της υγρασίας στο εσωτερικό.



Σχήμα 4.1 Διάβρωση φωτοβολταϊκού πλαισίου στις άκρες του και στο κουτί διασύνδεσης.

Άλλες μελέτες δείχνουν ότι η διάβρωση και ο αποχρωματισμός είναι οι κυρίαρχοι τύποι γήρανσης των πλαισίων, Vazquez-Ignacio (2008), Realini (2003), Quintana et al. (2002). Σύμφωνα με μελέτες του Carlson et al. (2003) το νάτριο το οποίο περιέχεται στο γυαλί και αντιδρά με την υγρασία, είναι ακόμα ένας σημαντικός παράγοντας διάβρωσης στις άκρες των πλαισίων.

4.1.2 Αποκόλληση ΦΒ πλαισίου

Η απώλεια συνοχής μεταξύ του πολυμερούς εγκιβωτισμού και των ΦΒ στοιχείων ή μεταξύ του ενισχυμένου γυαλιού και των στοιχείων δημιουργεί ένα σημαντικό πρόβλημα λόγω της αύξησης της ανάκλασης του φωτός και της διείσδυσης του νερού εντός της δομής του πλαισίου, Munoz et al (2011).

Η αποκόλληση είναι πιο σοβαρή όταν συμβαίνει στις άκρες του πλαισίου καθώς εκτός από της μείωσης της ισχύος υπάρχει ηλεκτρικός κίνδυνος για το πλαίσιο και τη συνολική εγκατάσταση. Παρατηρείται και αυτή σε θερμά και υγρά κλίματα με αποτέλεσμα της εισχώρηση της υγρασίας και την πρόκληση επιδράσεων όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

Επίσης οι Jansen και Delahoy (2003) υποστηρίζουν ότι η αποκόλληση οφείλεται στη συγκέντρωση αλάτων και στη διείσδυση της υγρασίας στο πλαίσιο. Ακόμη ισχυρίζονται ότι

η επιφανειακή επαφή μπορεί να χαραχθεί από το υδροφθορικό οξύ που σχηματίζεται από το φθόριο και το οξείδιο του κασσιτέρου που περιέχονται στο ΦΒ πλαίσιο.

4.1.3 Αποχρωματισμός ΦΒ πλαισίου

Ο αποχρωματισμός είναι η αλλαγή του χρώματος του υλικού του πλαισίου σε κίτρινο ή καφέ. Συνήθως οδηγεί σε υποβάθμιση του υλικού εγκιβωτισμού του πλαισίου, EVA το οποίο είναι πολυμερές αιθυλενίου και ρητίνες οξικού βινυλίου, μεταξύ του γυαλιού και του ΦΒ στοιχείου. Μεταβάλλει την διαπερατότητα του υλικού με αποτέλεσμα το φως που φτάνει στα ΦΒ στοιχεία και επομένως η ισχύς που παράγεται από το πλαίσιο να μειώνεται.

Οι Oreski και Wallner (2009) ισχυρίζονται ότι η κύρια αιτία της υποβάθμισης του EVA είναι η υπεριώδεις ακτίνες συνδυαζόμενες με νερό σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 50°C. Μελέτη των Kojima και Yanagisawa (2004) έδειξε ότι έκθεση των πλαισίων σε υπεριώδη ακτινοβολία (280-380nm, 4000 Wm⁻²) είχε ως αποτέλεσμα την απότομη υποβάθμιση του πλαισίου με ταυτόχρονη αύξηση της φωτοευαισθησίας του ύστερα από 400 ώρες έκθεσης.

Οι Wohlgemuth και Kurtz (2011) εκτέλεσαν πειράματα με υπεριώδη ακτινοβολία σε ΦΒ πλαίσια στους 60°C. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα ο αποχρωματισμός του υλικού εγκιβωτισμού συμβαίνει μόνο όταν η παγκόσμια υπεριώδης ακτινοβολία φθάνει στις 15kWhm⁻², για εύρος μηκών κύματος μεταξύ 280 έως 385 nm, χωρίς η έκθεση να ξεπερνά τα 250Wm⁻².

Τα τελευταία χρόνια οι περισσότερες δημοσιεύσεις για την υποβάθμιση των ΦΒ πλαισίων από κρυστάλλους πυριτίου εστιάζονται στην υποβάθμιση του ΕVΑ. Διαπιστώθηκε ότι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πλαισίου σχετίζονται με τον αποχρωματισμό των υλικών εγκιβωτισμού. Το φαινόμενο του αποχρωματισμού ελαττώνει του ρεύμα βραχυκύκλωσης του πλαισίου από 6%-8% της ονομαστικής του τιμής για μερικό αποχρωματισμό και 10%-13% για πλήρη αποχρωματισμό. Τέλος βρέθηκε ότι και η μέγιστη ισχύς επίσης μειώνεται.



Σχήμα 4.2 Αποχρωματισμός φωτοβολταϊκών στοιχείων.

4.1.4 Θραύσεις και ρωγμές ΦΒ πλαισίου

Η θραύση του ενισχυμένου γυαλιού του πλαισίου είναι ένας σημαντικός παράγοντας υποβάθμισης. Μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης, συντήρησης και κυρίως κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του. Τα σπασμένα ή με ρωγμή πλαίσια μπορεί να λειτουργούν σωστά χωρίς καμία αξιοσημείωτη απώλεια ισχύος. Παρόλο αυτά ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας και διείσδυσης της υγρασίας αυξάνεται.



Σχήμα 4.3 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο με σπασμένο γυαλί.

Οι θραύσεις και ρωγμές του πλαισίου συνήθως ακολουθούνται από άλλες υποβαθμίσεις όπως διάβρωση, αποχρωματισμό και αποκόλληση. Με τη πάροδο των χρόνων οι κατασκευαστές για να μειώσουν τα έξοδα κατασκευής των πλαισίων έχουν τροποποιήσει το πάχος και την επιφάνεια του ΦΒ στοιχείου. Το πάχος του πυριτίου από 300μm έχει γίνει λιγότερο από 200μm και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα και από 100μm. Επιπλέον, η επιφάνεια έχει των ΦΒ στοιχείων έχει αυξηθεί σε 210mm x 210mm, *Dallas et al. (2007)*. Το γεγονός αυτό καθιστά το ΦΒ στοιχείο περισσότερο εύθραυστο και ευαίσθητο κατά τη διάρκεια χειρισμού του, μεταφορά και τοποθέτησή του.

Γενικά είναι αδύνατο να εντοπιστεί μια ρωγμή σε ένα ήδη λειτουργικό πλαίσιο με γυμνό μάτι. Ο εντοπισμός μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας οπτικές μεθόδους, Rueland et al. (2005).

4.2 PID

Τα ΦΒ πλαίσια συχνά εκτίθενται σε υψηλά δυναμικά σε σχέση με τη γη προκαλώντας καταπόνηση υψηλού δυναμικού (High Voltage Stress, HVS). Η υψηλή τάση
οδηγεί τα ΦΒ στοιχεία σε υποβάθμιση με πολλούς μηχανισμούς. Το μέγεθος της υποβάθμισης συνδέεται με το ρεύμα διαρροής που περνά από την ενεργό περιοχή διαμέσου του υλικού εγκιβωτισμού και του προστατευτικού γυαλιού στο γειωμένο τμήμα του πλαισίου. Όλες οι επιδράσεις του PID έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό, η υποβάθμιση εξαρτάται από την πολικότητα και το δυναμικό μεταξύ του ΦΒ στοιχείου και της γης.

Σε επίπεδο συστήματος η διαφορά δυναμικού μεταξύ ΦΒ στοιχείου και γείωσης είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας του PID. Η τάση του συστήματος εξαρτάται από τον αριθμό των πλαισίων που συνδέονται σε σειρά, την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του πλαισίου. Το δυναμικό του ΦΒ στοιχείου μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό σε σχέση με τη γη. Τρεις διαφορετικές πιθανότητες υπάρχουν, δύο από αυτές είναι η γείωση να είναι συνδεδεμένη με έναν από τους δύο πόλους του συστήματος (PV⁻/ PV⁺ - γείωση), και η τρίτη περίπτωση είναι να μην είναι γειωμένος κανένας πόλος και να υπάρχει κυμαινόμενο δυναμικό. Στην τελευταία περίπτωση ένα τμήμα της συστοιχίας έχει αρνητικό και το άλλο θετικό δυναμικό σε σχέση με τη γη.

Στην περίπτωση που το δυναμικό είναι σταθερό, σύνδεση του αρνητικού ακροδέκτη της συστοιχίας με τη γείωση, το φαινόμενο του PID εμποδίζεται. Όμως η χρήση αναστροφέων χωρίς μετασχηματιστή καθιστά μη δυνατή τη γείωση του αρνητικού ή του θετικού πόλου με αποτέλεσμα το φαινόμενο του PID να ελαττώνεται με άλλες μεθόδους.





Σε επίπεδο πλαισίου περιβαντολλογικοί παράγοντες όπως υγρασία και θερμοκρασία επηρεάζουν τα ρεύματα διαρροής μεταξύ του ΦΒ στοιχείου και της γης. Σε περίπτωση που το νερό εισχωρήσει στο πλαίσιο τα ρεύματα διαρροής αυξάνονται λόγω της αύξησης της αγωγιμότητας του στοιχείου εγκιβωτισμού.



Σχήμα 4.5 Φωτογραφία πλαισίου πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) την υποβολή του σε δοκιμασία PID, 1000V-100h.

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το πλαίσιο πριν και μετά τη δοκιμασία PID σε 1000V για 100 ώρες, *Pingel (2010)*. Στην αρχή η φωτεινότητα του πλαισίου μειώνεται, μερικά στοιχεία υποβαθμίζονται απότομα και δείχνουν να είναι βραχυκυκλωμένα ενώ άλλα παραμένουν ανέπαφα. Η αιτία για αυτή τη διαφοροποίηση πρέπει να ερευνηθεί σε επίπεδο ΦΒ στοιχείου.

Σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη ένας άλλος σημαντικός παράγοντας εμφάνισης ή μη του PID είναι το υλικό εγκιβωτισμού του πλαισίου. Στο σχήμα Ζ.6 φαίνεται το ρεύμα διαρροής σε τάση 1000V ως συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας η οποία αυξάνεται από τους -20°C στους 48°C σε σχετική υγρασία 50%. Παρατηρείται ότι δύο διαφορετικά υλικά εγκιβωτισμού δημιουργούν ρεύματα διαρροής που το πλάτος τους διαφέρει αρκετά.



Σχήμα 4.6 Ρεύματα διαρροής από δύο πλαίσια με διαφορετικό υλικό εγκιβωτισμού.

Το πλαίσιο μπορεί να θεωρηθεί σαν έναν πυκνωτή ο οποίος φορτίζεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνει. Όταν φτάσει στη μέγιστη χωρητικότητά του το ρεύμα ελαττώνεται.

Για την ελάττωση ή αποφυγή του PID σε επίπεδο πλαισίου είναι κρίσιμη η επιλογή του υλικού εγκιβωτισμού. Εκτός του EVA υπάρχουν εναλλακτικά υλικά με καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την εμφάνιση PID όμως άλλοι παράγοντες όπως η τιμή, η μακροχρόνια μηχανική αντοχή και η διαθεσιμότητά τους πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Σε επίπεδο ΦΒ στοιχείου έχει παρατηρηθεί ότι ορισμένα στάδια κατά την κατασκευή του στοιχείου καθώς και η ποιότητα του υποστρώματος συμβάλλουν στην εμφάνιση του φαινομένου PID. Φωτοβολταϊκά στοιχεία με αυξημένη αντίσταση υποστρώματος εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή στο φαινόμενο PID.

Το στάδιο δημιουργίας ανακλαστικής επίστρωσης κατά την κατασκευή του ΦΒ πλαισίου είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη δημιουργία PID φαινομένου. Η επίστρωση συνήθως περιέχει Si και N, η αναλογία των οποίων σε συνδυασμό με το πάχος και την

τεχνική εναπόθεσης καθορίζουν τα χαρακτηριστικά της επίστρωσης. Στρώματα πλούσια σε Si τείνουν να είναι λιγότερο επιρρεπή σε PID σε σχέση με στρώματα πλούσια σε Ν. Επίσης μείωση του πάχους του ανακλαστικού στρώματος οδηγεί σε μικρότερη ευαισθησία στο φαινόμενο.

Κύριοι μέθοδοι αποκατάστασης των πλαισίων που έχουν προσβληθεί από το φαινόμενο PID είναι η ανάστροφη πόλωση τους ή έκθεσή τους σε υψηλή θερμοκρασία. Για την πρώτη περίπτωση γείωση του θετικού ακροδέκτη του ΦΒ συστήματος προφυλάσσει από επιβλαβή δυναμικά και οδηγεί σε αναγέννηση των ΦΒ πλαισίων. Η διαδικασία αυτή απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα και εκτός του δυναμικού εξαρτάται από κλιματολογικές συνθήκες όπως η υγρασία και η θερμοκρασία. Η έκθεση του πλαισίου σε θερμοκρασία των 100°C για δέκα ώρες οδηγεί σε αναγέννηση του πλαισίου και θεραπεία του PID φαινομένου, όμως η ισχύς δεν επανέρχεται στα ίδια επίπεδα. Η πρακτική δυσκολία αυτής της μεθόδου είναι ότι η υψηλή θερμοκρασία επηρεάζει τα υλικά του πλαισίου.

4.3 Θερμά σημεία (hot spots)

Ένα θερμό σημείο είναι μια περιοχή στο πλαίσιο η οποία έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία και μπορεί να καταστρέψει τα ΦΒ στοιχεία ή οποιοδήποτε άλλο υλικό του πλαισίου. Η αιτία του θερμού σημείου μπορεί να οφείλεται σε μερική σκίαση, σε μεταβολή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων που επέρχονται σε μεμονωμένα ΦΒ στοιχεία καθώς και σε κακή σύνδεση μεταξύ των στοιχείων. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτοκύκλωσης υποδεικνύονται από το φβ στοιχείο που έχει τη χαμηλότερη ηλεκτρική απόδοση. Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης, όταν ένα ΦΒ στοιχείο είναι ελαττωματικό, η τάση του αναστρέφεται και γίνεται ίση και αντίθετη με την τάση των άλλων στοιχείων της σειράς. Έτσι το ελαττωματικό στοιχείο γίνεται φορτίο για τα άλλα στοιχεία και ο ρυθμός της παραγόμενης θερμότητας γίνεται μεγαλύτερος από το ρυθμό απαγωγής με αποτέλεσμα την υπερθέρμανσή του και καταστροφή του.

Κεφάλαιο 5: Μελέτη Διασυνδεδεμένης Φωτοβολταϊκής Εγκατάστασης

5. Μελέτη διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Σκοπός της μελέτης είναι η εγκατάσταση ενός ΦΒ σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διασυνδεδεμένου με το δημόσιο δίκτυο (ΔΕΗ). Η μελέτη γίνεται για εγκατάσταση στην περιοχή της Λάρισας.

5.1 Καθορισμός δεδομένων και κύριων χαρακτηριστικών του ΦΒσυστήματος

Τα δεδομένα που απαιτούνται για την έναρξη της μελέτης δίνονται στον Πίνακα 1:

Πίνακας 5.1 Αρχικά δεδομένα της μελέτης

	Λάρισα
Περιοχή Μελέτης	(φ=39,62° / α=-22,43°)
Έδαφος Εγκατάστασης	Οροφή κτιρίου

Το κτίριο έχει ΒΑ προσανατολισμό με γωνία Z=-31°. Στην οροφή του κτιρίου υπάρχουν άλλα τρία δώματα ύψους 3,4m το καθένα, εξαερισμοί και φωταγωγοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη σκίαση που προκαλούν.



Σχήμα 5.1 Κάτοψη κτιρίου

5.2 Βέλτιστος προσανατολισμός και κλίση των πλαισίων

5.2.1 Αζιμούθια γωνία συλλέκτη (θο)

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πρέπει να είναι προσανατολισμένα προς τον Ισημερινό, οπότε για το βόρειο ημισφαίριο προσανατολισμένα στο Νότο. Η διαφοροποίηση από το Νότο της αζιμούθιας γωνίας (θ) του συλλέκτη επηρεάζει τη λαμβανόμενη ημερήσια κατανομή της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας. Μεταβολή 15° της αζιμούθιας γωνίας του συλλέκτη μετατοπίζει το μέγιστο κατά μία ώρα το πρωί αν η γωνία είναι αρνητική ως προς το Νότο και το απόγευμα αν η γωνία είναι θετική. Για μέγιστη απόδοση τα πλαίσια που θα τοποθετηθούν στην οροφή του κτιρίου πρέπει να σχηματίζουν αζιμούθια γωνία με το νότο θ=0°.

Στον πίνακα 5.2 δίνεται η μέση μηνιαία ακτινοβολία σε κεκλιμένες επιφάνειες των 90°, 45° και 0° με τυχαίους προσανατολισμούς για την πόλη της Λάρισας, όπως αυτά έχουν καταγραφεί στην Τεχνική οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ο.Ε 20701-3/2010. Η κλίση των ΦΒ πλαισίων, στην παρούσα μελέτη, σαφώς και δεν θα είναι η παραπάνω αλλά με τον παρακάτω πίνακα επιβεβαιώνεται ότι με νότιο προσανατολισμό επιτυγχάνεται η μέγιστη προσφερόμενη μέση ακτινοβολία (kWh/m²).

			Κλίση Ε	Ξπιφανε	είας 90°	,	Κλίση Επιφανείας 45°				
Μήνες	Οριζόντιο Επίπεδο	В	BA/ ΒΔ	Α/Δ	NA∕ N∆	N	В	BA/ ΒΔ	Α/Δ	NA/ NΔ	Ν
IAN	55	17	19	39	68	86	21	26	52	79	93
ΦΕΒ	71	22	26	45	68	82	28	39	63	87	99
MAP	112	36	45	69	87	94	48	71	99	121	130
АПР	151	50	68	90	96	90	92	107	132	147	150
MAI	191	68	90	109	104	89	138	146	165	171	170
IOYN	211	77	100	117	107	87	161	165	180	182	178
ΙΟΥΛ	216	76	101	122	113	93	160	167	185	190	186
ΑΥΓ	194	62	88	115	116	103	125	141	170	183	184
ΣΕΠ	146	42	58	88	105	109	67	93	127	153	162
ОКТ	98	29	34	60	87	104	35	53	85	116	130
NOE	61	18	21	42	73	92	23	29	57	86	100
ΔΕΚ	48	15	16	35	65	84	18	22	46	73	87
M.O.	129,5	42,7	55,5	77,6	90,8	92,8	76,3	88,3	113,4	132,3	139

Πίνακας 5.2 Λάρισα-Μέση μηνιαία ακτινοβολία για οριζόντια, κάθετη επιφάνεια και επίπεδο με κλίση 45° με βάση τον προσανατολισμό.

5.2.2 Γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο (αο)

Η βέλτιστη ετήσια σταθερή γωνία κλίσης (α°) του συλλέκτη εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος (φ°) της περιοχής, την περίοδο ηλιοφάνειας, τη μορφολογία της περιοχής εγκατάστασης και τα φυσικά εμπόδια. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να αυξηθεί 4-6% με την μεταβολή της κλίσης ανά περίοδο.

Η κλίση του συλλέκτη (α°) ως προς το οριζόντιο επίπεδο πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος (φ°) της περιοχής. Για μεγαλύτερη απορρόφηση της ακτινοβολίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη δύο κλίσεις. Κατά τη χειμερινή περίοδο η κλίση ορίζεται ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής επαυξημένη κατά 10° (φ+ 10°), ενώ κατά τη θερινή περίοδο ελαττωμένη κατά 10° (φ- 10°).

Στον πίνακα 5.3 δίνεται το προσφερόμενο ηλιακό δυναμικό στην επιφάνεια κεκλιμένου συλλέκτη για την πόλη της Λάρισας.

Πίνακας 5.3 Ηλιακό δυναμικό στην επιφάνεια κεκλιμένου συλλέκτη για την πόλη της Λάρισας

Πεοιονή	Γωνία	Μήνας											MO	
TieptoXii	αο	Ι	Φ	Μ	А	Μ	I	I	А	Σ	0	Ν	Δ	
	0°	47	62	100	138	179	189	202	186	135	91	61	44	119
	30°	69	82	117	144	171	173	188	188	154	119	92	68	130
Λάρισα	45°	75	86	118	137	155	154	169	175	152	125	101	75	127
	60°	77	86	112	123	133	129	143	154	142	123	104	78	117
	90°	69	72	85	81	78	72	79	94	102	101	92	71	83

Από τον παραπάνω πίνακα επιλέγεται ως γωνία κλίσης α=30° καθώς για αυτή την κλίση προσφέρεται το μέγιστο κατά μέσο όρο ηλιακό δυναμικό.

5.3 Προσδιορισμός θέσης Ήλιου

Στο οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων η θέση του ήλιου προσδιορίζεται από δύο γωνίες: το ύψος (β), και το αζιμούθιο (Ζ). Θα υπολογιστούν αυτές οι δύο γωνίες από T_{solar}=09:00 ως T_{solar}=15:00 για τη δυσμενέστερη ημέρα του έτους, το χειμερινό ηλιοστάσιο (21^η Δεκεμβρίου). Στη συνέχεια με γνωστές τις γωνίες (β,Ζ) θα υπολογιστεί η σκίαση που προκαλούν τα τρία δώματα καθώς και οι εξαερισμοί που βρίσκονται στην οροφή του κτιρίου. Με αυτόν τον τρόπο θα βρεθεί η διαθέσιμη έκταση για εγκατάσταση των πλαισίων.

5.3.1 Ύψος Ηλίου (β)- Αζιμούθιο (Ζ)

Το ύψος του Ήλιου, όπως ήδη αναφέρθηκε, δίνεται από τον τύπο:

sinβ=sinδ*sinφ+cosδ*cosφ*cosω (5.1)

Όπου,

δ=-23,45° η ηλιακή απόκλιση για το χειμερινό ηλιοστάσιο, φ=39,62° το γεωγραφικό πλάτος της υπό μελέτη περιοχής, ω=15°/h (T_{solar} -12h) η ωριαία γωνία.

Το αζιμούθιο δίνεται από τον τύπο:

$$\cos Z = \frac{\sin\beta * \sin\varphi - \sin\delta}{\cos\beta * \cos\varphi}$$
(5.2)

Στον πίνακα 5.4 δίνονται η ωριαία γωνία και το ύψος ηλίου και αζιμούθιου για τις ηλιακές ώρες T_{solar}=09:00-15:00.

Πίνακας 5.4 Υπολογισμός ωριαίας γωνίας (ω), ύψος ηλίου (β) και αζιμούθιου (Ζ) για ηλιακή ώρα T_{solar}=09:00-15:00.

T _{solar}	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00
ω°	-45	-37,5	-30	-22,5	-15	-7,5	0	7,5	15	22,5	30	37,5	45
β°	14,24	17,87	20,99	23,52	25,39	26,54	26,93	26,54	25,39	23,52	20,99	17,87	14,24
Zo	-42	-36	-29	-23	-15	-7,7	0	7,7	15	23	29	36	42



Σχήμα 5.2 Αναπαράσταση ύψους ηλίου (άξονας Υ), ηλιακού αζιμούθιου (άξονας Χ) για ηλιακές ώρες 09:00-15:00 την 21^η Δεκ. στη Λάρισα.

Όπως αναμενόταν κατά το ηλιακό μεσημέρι, T_{solar}=12:00, ο ήλιος βρίσκεται στην υψηλότερη θέση του ενώ δε σχηματίζει γωνία με το νότο.

5.4 Σκίαση

Γνωρίζοντας το ύψος Ηλίου (β[°], γωνία μεταξύ πράσινης και μπλε γραμμής), το αζιμούθιο (Z[°], γωνία μεταξύ κόκκινης και μαύρης γραμμής) και το ύψος του δώματος (h=3,4m) υπολογίζουμε την σκίαση (d, πράσινη γραμμή) που προκαλεί η μία ακμή του δώματος για T_{solar}=09:00-15:00. Εκτελώντας το για όλες τις κάθετες ακμές του βρίσκουμε τελικά την σκίαση που προκαλείται από το δώμα.



Σχήμα 5.3 Τρισδιάστατη αναπαράσταση δώματος για την εύρεση της σκίασης.

Η απόσταση δίνεται από τον τύπο: d=h/tanβ. Στον πίνακα Χ.5 δίνεται το μήκος των σκιάσεων που προκαλούν τα δώματα ύψους 3,4 μέτρων (d₁) και οι εξαερισμοί ύψους 2,8 (d₂) και 4,8 (d₃) μέτρων.

Πίνακας 5.5 Υπολογισμός σκίασης που προκαλείται από εμπόδια ύψους h_1 =3,4m, h_2 =2,8m και h_3 =4,8m την 21	η
Δεκ. για ηλιακή ώρα T _{solar} =09:00-15:00 στην πόλη της Λάρισας.	

T _{solar}	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00
d ₁ (m)	13,40	10,55	8,86	7,81	7,16	6,81	6,69	6,81	7,16	7,81	8,86	10,55	13,40
d₂ (m)	11,04	8,69	7,30	6,43	5,90	5,61	5,51	5,61	5,90	6,43	7,30	8,69	11,04
d₃ (m)	18,92	14,89	12,51	11,03	10,11	9,61	9,449	9,61	10,11	11,03	12,51	14,89	18,92

Στη συνέχεια στην κάτοψη του κτιρίου σχεδιάζονται οι σκιάσεις που προκαλούν τα εμπόδια, Παράρτημα Α. Παρατηρείται ότι ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας σκιάζεται. Επομένως η μη σκιασμένη επιφάνεια μειώνεται αρκετά εφόσον η αρχική μας απαίτηση είναι τα πλαίσια να εκτίθενται πλήρως στην ακτινοβολία της άμεσης δέσμης για όσες περισσότερες ώρες ημερησίως, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Τελικά γίνεται συμβιβασμός μεταξύ των ωρών πλήρους έκθεσης στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία και της επιφάνειας που θα καλυφθεί από ΦΒ πλαίσια. Έτσι επιλέγεται η απαίτηση των τριών ωρών ημερησίως για πλήρη έκθεση στην άμεση ακτινοβολία. Επομένως πρέπει να εξεταστούν οι σκιάσεις των εμποδίων από T_{solar} =10:30-13:30 για την 21^η Δεκεμβρίου. Όπως φαίνεται στο παράρτημα Α για το παραπάνω διάστημα (10:30-13:30) η μεγαλύτερη σε μήκος σκίαση συμβαίνει για τις οριακές τιμές της. Όμως λόγω του ηλιακού αζιμούθιου και του γεγονότος ότι το κτίριο δεν έχει προσανατολισμό προς το νότο παρατηρείται ότι η σκίαση που προκαλείται στις 10:30 είναι αυτή που τελικά θα καθορίσει την χωροθέτηση των πλαισίων. Για το λόγο αυτό θα μελετηθεί η δυνατότητα τοποθέτησης των πλαισίων με βάση τη σκίαση που προκαλείται για T_{solar} =10:30. Τα ΦΒ πλαίσια θα τοποθετηθούν στα πεδία Ι,ΙΙ και ΙΙΙ. Λόγω των πολλών εξαερισμών οι οποίοι βρίσκονται στην οροφή του 1^{ου} δώματος και των σκιάσεων που προκαλούν καθ΄ όλη τη διάρκεια της ημέρας δεν θα τοποθετηθούν πλαίσια στο 1° δώμα.

5.5 Επιλογή ΦΒ πλαισίου

Τα κριτήρια για την επιλογή του πλαισίου που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι ηλεκτρικά όπως τα αποδιδόμενα Wp και τα Wp ανά εμβαδό, οικονομοτεχνικά όπως το κόστος των πλαισίων, η γήρανση, η απόδοσή τους και τέλος η συμβατότητα με το διαχειριστή του συστήματος.

Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζονται τα προς επιλογή φωτοβολταϊκά πλαίσια. Με βάση τις διαστάσεις τους προσδιορίζεται ο αριθμός των πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν ώστε να μη σκιάζονται την 21^η Δεκεμβρίου από T_{solar}=10:30-13:30. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να ληφθεί υπόψη η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σειρών πλαισίων ώστε να μην υπάρχει σκίαση. Για τη διάταξη «portrait» το μήκος του πλαισίου είναι L (κάθε πλαισίου κάθε φορά), η γωνία κλίσης α=30°, και το ύψος ηλίου για T_{solar}=10:30 την 21^η Δεκ. είναι β=23,52°. Η απόσταση μεταξύ δύο σειρών πλαισίων δίνεται από τον τύπο: $X_2 = \frac{h2 - h1}{\tan \beta}$, όπου h₂-h₁=L*sinα.



Σχήμα 5.4 Ελάχιστη απόσταση (X₂) μεταξύ δύο διαδοχικών σειρών πλαισίων.

Το κόστος των πλαισίων προκύπτει από τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ και την τιμή ανά Wp. Ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

Πλαίσια	Ισχύς (Wp)	Τιμή (€/Wp)	Αριθμός Πλαισίων	Συνολική Ισχύς (Wp)	Κόστος Πλαισίων (€)	Παραγόμενη Ενέργεια (25 έτη) (kWh)
Qcells- QPRO250G3	250	0,60	214	53500	32100	1394667,9
Qcells- QPRO255G3	255	0,61	214	54570	33287,7	1422561,2
Qcells- QPRO260G3	260	0,63	214	55640	35053,2	1450454,6
Qcells- QPRO265G3	265	0,64	214	56710	36294,4	1478347,9
HY-P250MG	250	0,59	220	55000	32450	1438528,5
ECOPLUS240P	240	0,6	211	50640	30384	1376809,0
ECOPLUS250P	250	0,61	211	52750	32177,5	1432251,0
ECOPLUS260P	260	0,65	211	54860	35659	1487692,9
DESIGN B 250P	250	0,68	211	52750	35870	1376809,0
LG250S1C	250	0,69	210	52500	36225	1366471,5
LG255S1C	255	0,69	210	53550	36949,5	1445815,0
LG290N1C	290	0,82	209	60610	49700,2	1582763,1
LG300N1C	300	0,86	209	62700	53922	1636416,1
LG265S1K	265	0,71	209	55385	39323,35	1448630,6
BQ- PM250P00	250	0,595	211	52750	31386,25	1374669,7
BQ- PM265M01B	265	0,66	211	55915	36903,9	1454489,2
BQ- PM285M01B	285	0,69	211	59080	40765,2	1543177,6
BQ- PM325B00	325	0,96	216	70200	67392	1899678,2
VBHN240SE10	240	0,93	278	66720	62049,6	1740156,2
VBHN240SJ25	240	0,92	278	66720	61382,4	1737412,9

Πίνακας 5.6 Σύγκριση ΦΒ πλαισίων.

Πλαίσια	Ισχύς (Wp)	Τιμή (€/Wp)	Αριθμός Πλαισίων	Συνολική Ισχύς (Wp)	Κόστος Πλαισίων (€)	Παραγόμενη Ενέργεια (25 έτη) (kWh)
VBHN245SJ25	245	0,98	278	68110	66747,8	1773990,1
SP250P	250	0,525	212	53000	27825	1622748,8

Πίνακας 5.6 Σύγκριση ΦΒ πλαισίων.

Επιλέγεται το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο της εταιρίας BENQ «SunForte PM325B00». Το παραπάνω πλαίσιο επιλέχθηκε γιατί αποδίδει τα περισσότερα Wp και παράγει την περισσότερη ενέργεια στο χρονικό διάστημα των 25 ετών σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Το υψηλό κόστος τοποθέτησης του πλαισίου αντισταθμίζεται καθώς τελικά αποδίδει τα περισσότερα έσοδα σε βάθος εικοσιπενταετίας.

Για το επιλεγμένο πλαίσιο η ελάχιστη απόσταση είναι X₂=1,791m. Η προβολή του πλαισίου στο επίπεδο είναι s=L*cosα=1,35m. Με αυτές τις διαστάσεις είναι δυνατή η εγκατάσταση 216 ΦΒ πλαισίων συνολικής ισχύος W_p=70200 W.

Στο παράρτημα Γ παρουσιάζεται η χωροθέτηση των πλαισίων στην οροφή του κτιρίου με ταυτόχρονη απεικόνιση των σκιάσεων που προκαλούν τα δώματα και οι εξαερισμοί για T_{SOLAR}=09:00 ως T_{SOLAR}=15:00.

Τα χαρακτηριστικά του πλαισίου φαίνονται στον πίνακα 5.7 ενώ τα συνολικά τεχνικά χαρακτηριστικά στο Παράρτημα Β.

Ονομαστική Ισχύς	W _p	325
Τάση λειτουργίας	V _{mpp}	54,7
Ρεύμα λειτουργίας	I _{mpp}	5,94
Τάση ανοιχτοκυκλώσεως	V _{oc}	64,9
Ρεύμα βραχυκύκλωσης	I _{sc}	6,39
Απόδοση	η	19,9%
NOCT		45±2°C
Συντελεστής θερμοκρασίας V _{oc}		-0,27%/K
Συντελεστής θερμοκρασίας I _{sc}		0,06%/K
Μήκος-Πλάτος-Βάθος		1559-1046-46 mm

Πίνακας 5.7 Χαρακτηριστικά του πλαισίου SunForte PM325B00 σε STC συνθήκες.

5.5.1 Συντελεστής απόδοσης εγκατάστασης

Ο συντελεστής απόδοσης της εγκατάστασης, σεικ εξαρτάται από:

α. τον συντελεστή απόδοσης του πλαισίου, η%

β. τις συνολικές απώλειες φωτοβολταϊκού πεδίου, σ_{ΣΑΦΠ}

γ. και τον συντελεστή απωλειών μεταφοράς ενέργειας, σ_{ΜΗΕ}.

σ_{ΕΓΚ}=η* σ_{ΣΑΦΠ}* σ_{ΜΗΕ},(5.3)

5.5.2 Συντελεστής απόδοσης πλαισίου, η%

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Για το ιδανικό ΦΒ στοιχείο οι ηλεκτρικές παράμετροι που καθορίζουν τον συντελεστή απόδοσης είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}, η τάση ανοιχτοκυκλώσεως V_{oc} και ο συντελεστής πλήρωσης FF. Ως συντελεστής πλήρωσης ορίζεται η αναλογία μεταξύ του εμβαδού του ορθογωνίου μέγιστης ισχύος (I_{MAX}*V_{MAX}) προς το εμβαδόν του μέγιστου ορθογωνίου (I_{sc}*V_{oc}) που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας.

Ο συντελεστής απόδοσης κάθε πλαισίου παρέχεται από τον κατασκευαστή. Στην παρούσα μελέτη ο συντελεστής απόδοσης λαμβάνεται η=19,9%

5.5.3 Συνολικές απώλειες φωτοβολταϊκού πεδίου, σΣΑΦΠ

Οι συνολικές απώλειες εξαρτώνται από το συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης σ_{θ} , το συντελεστή ρύπανσης σ_{ρ} , το συντελεστή γήρανσης σ_{γ} , το συντελεστή απωλειών διόδου σ_{δ} , το συντελεστή ανομοιογένειας σ_{α} και το συντελεστή καλωδιώσεων σ_{κ} .

$$σ_{ΣAΦΠ} = σ_θ^* \sigma_ρ^* \sigma_γ^* \sigma_\delta^* \sigma_\alpha^* \sigma_\kappa$$
, (5.4)

α. Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης, σ_{\theta}

Η θερμοκρασία λειτουργίας των ΦΒ στοιχείων αυξάνεται με την έκθεση του πλαισίου στην ηλιακή ακτινοβολία. Το γεγονός αυτό λαμβάνεται υπόψη στη βαθμονόμηση των ΦΒ πλαισίων στις συνθήκες PTC (πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας 100 mW/cm², θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C με ροή ανέμου 1m/s σε ύψος 10m από το έδαφος) και όχι σε αυτές του STC. Τα ηλιακά στοιχεία αποκτούν θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος κατά 25 °C ως 35 °C, ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου στην περιοχή. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την απόδοση των πλαισίων. Η μεγαλύτερη μείωση αναλογεί στα πλαίσια πυριτίου mono και poly, ενώ μικρότερη αναλογεί στα πλαίσια τύπου α-Si.

Ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sigma_{\theta}$$
= 1- [T_µ+30°C)-25 °C]*0,004/ °C, (5.5)

όπου Τμ η μέση μηνιαία θερμοκρασία στην περιοχή μελέτης. Στον πίνακα 5.8 δίνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία για τη Λάρισα.

1 ⁰ Εξάμηνο	IAN	ΦΕΒ	MAP	АПР	MAI	IOYN
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	0.7	1.3	3.3	6.2	10.9	15.2
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία	5.2	6.8	9.4	13.8	19.7	25.0
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	9.8	12.0	14.7	19.6	25.7	31.0
2 ⁰ Εξάμηνο	ΙΟΥΛ	АҮГ	ΣΕΠ	окт	NOE	ΔΕΚ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	17.7	17.3	14.0	10.0	5.8	2.0
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία	27.2	26.2	21.8	16.2	10.8	6.6
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	33.1	32.6	28.4	22.2	15.8	11.1

Πίνακας 5.8 Μέση μηνιαία θερμοκρασία στη Λάρισα σύμφωνα με στοιχεία της ΕΜΥ.

Με βάση τις μηνιαίες θερμοκρασίες και τον τύπο 5.5 υπολογίστηκε ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης για κάθε μήνα.

Πίνακας 5.9 Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης, σθ

Μήνας	IAN	ФЕВ	MAP	АПР	MAI	IOYN	ΙΟΥΛ	АҮГ	ΣΕΠ	ОКТ	NOE	ΔEK
σ_{θ}	0,959	0,953	0,942	0,925	0,901	0,880	0,871	0,875	0,893	0,915	0,937	0,954

β. Συντελεστής ρύπανσης, σ $_{\rho}$

Η απόδοση των ΦΒ πλαισίων μειώνεται με την επικάθιση ρύπων όπως σκόνης, γύρης, φύλλων. Η υγρασία συμβάλλει στην προσκόλληση των ρύπων στο πάνω μέρος του πλαισίου με αποτέλεσμα την ανάκλαση ή απορρόφηση της ακτινοβολίας λόγω των ρύπων.

Η κλίση του πλαισίου επηρεάζει τη ρύπανση των πλαισίων. Όσο μικρότερη είναι η κλίση τόσο μεγαλύτερη αναμένεται η επίδραση της ρύπανσης. Οι βροχοπτώσεις συμβάλλουν στη μείωση των απωλειών. Επίσης σε αγροτικές περιοχές με δραστηριότητα καλλιέργειας, σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές η ρύπανση των πλαισίων είναι εντονότερη.

Ο συντελεστής ρύπανσης ανάλογα με τις περιοχές είναι:

 σ_{ρ} =0,95 για καθαρή περιοχή ή για πλαίσια που καθαρίζονται συχνά.

 σ_{ρ} =0,9 για ελαφρώς σκονισμένα πλαίσια.

σ_ρ=0,8 για ακάθαρτα ή οριζόντια πλαίσια.

Στην παρούσα μελέτη επειδή η εγκατάσταση βρίσκεται σε βιομηχανική περιοχή επιλέγεται σ_ρ=0,9.

γ. Συντελεστής γήρανσης, σ_γ

Τα υλικά κατασκευής των πλαισίων υπόκεινται σε γήρανση με την πάροδο του χρόνου λειτουργίας, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της φωτοβολταϊκής μετατροπής. Ο συντελεστής γήρανσης κάθε πλαισίου παρέχεται από τον κατασκευαστή. Συνήθως κυμαίνεται στο 90%-92% για τα πρώτα δέκα χρόνια και φθάνει στο 80% με τη συμπλήρωση του εικοστού πέμπτου έτους.

Στην παρούσα μελέτη, ο κατασκευαστής εγγυάται λειτουργία στο 95% της ονομαστικής ισχύος για τα πέντε πρώτα χρόνια και στη συνέχεια γραμμική μείωση που φθάνει στο 87% το εικοστό πέμπτο έτος λειτουργίας του πλαισίου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο συντελεστής γήρανσης για κάθε έτος λειτουργίας του πλαισίου.

Έτος	σγ	Έτος	σγ	Έτος	σγ	Έτος	σγ	Έτος	σγ
1°	0,99	6°	0,946	11 [°]	0,926	16 [°]	0,906	21 [°]	0,886
2°	0,98	7°	0,942	12°	0,922	17 [°]	0,902	22°	0,882
3°	0,97	8°	0,938	13°	0,918	18 [°]	0,898	23°	0,878
4°	0,96	9°	0,934	14 [°]	0,914	19 [°]	0,894	24 [°]	0,874
5°	0,95	10 [°]	0,930	15°	0,910	20 [°]	0,890	25°	0,870

Πίνακας 5.10 Συντελεστής γήρανσης, σ_γ.

δ. Συντελεστής απωλειών διόδου, σδ

Η δίοδος αντεπιστροφής χρησιμοποιείται στα συστήματα με αποθήκευση ώστε να εμποδίσει την εκφόρτιση των συσσωρευτών διαμέσου των ΦΒ πλαισίων κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι δίοδοι εισάγουν απώλειες της τάξης του 1%. Στην μελέτη λαμβάνεται σ_δ=1 καθώς δεν χρησιμοποιούνται δίοδοι.

ε. Συντελεστής ανομοιογένειας, σ_α

Όλα τα πλαίσια δεν είναι εντελώς όμοια μεταξύ τους οπότε η ισχύς κάθε συστοιχίας μπορεί να διαφέρει. Η ανομοιογένεια μπορεί να οφείλεται σε εγγενείς κατασκευαστικούς λόγους, σε επιλεκτική σκίαση, σε διαφοροποίηση της θερμοκρασίας των πλαισίων της συστοιχίας και άλλες περιβαντολλογικές συνθήκες. Έτσι η λιγότερη παραγωγική συστοιχία θα καθορίσει τη μείωση της παρεχόμενης ισχύος όλων των υπόλοιπων συστοιχιών που ελέγχονται από τον ίδιο MPPT.

Τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν είναι η αξιοποίηση των δεδομένων των «flash reports» και η ταξινόμηση των πλαισίων ανά παράλληλη ομάδα συστοιχιών σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή.

Ο συντελεστής ανομοιογένειας λαμβάνεται σ_α=0,98.

στ. Συντελεστής καλωδιώσεων, σ_κ

Ο συντελεστής καλωδιώσεων εκφράζει τις απώλειες Joule στα καλώδια σύνδεσης των κλάδων των πλαισίων. Οι συνήθεις τιμές των απωλειών κυμαίνονται από 1% ως 3%. Σε περιπτώσεις μακρόχρονης λειτουργίας σε βιομηχανικό ή θαλάσσιο περιβάλλον το ποσοστό απωλειών μπορεί να φτάσει ως 5%. Στη μελέτη ο συντελεστής καλωδιώσεων λαμβάνεται σ_κ=0,97.

5.5.4 Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας, σΜΗΕ

Οι απώλειες του ΦΒ συστήματος που μεσολαβούν από την έξοδο του πεδίου μέχρι την κατανάλωση εξαρτώνται από το είδος των διατάξεων που υπάρχουν στο σύστημα. Τέτοιες διατάξεις είναι ο ρυθμιστής φόρτισης των συσσωρευτών, οι συσσωρευτές, ο αναστροφέας, ο μετατροπέας DC-DC αν υπάρχει καθώς και οι καλωδιώσεις που συνδέουν τις διάφορες ηλεκτρικές διατάξεις.

Στην παρούσα εγκατάσταση υπάρχει ΦΒ σύστημα χωρίς αποθήκευση σε συσσωρευτές που περιλαμβάνει αναστροφέα τάσεως DC-AC οπότε λαμβάνεται σ_{MHE}=0,97.

Στον πίνακα 5.11 συνοψίζεται ο συντελεστής απόδοσης της εγκατάστασης.

	Έτος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
	1	0,1568	0,1558	0,1540	0,1511	0,1473	0,1437	0,1424	0,1430	0,1459	0,1496	0,1531	0,1560
	2	0,1552	0,1542	0,1525	0,1495	0,1459	IouvΙouλAuγΣεπOkt30,14370,14240,14300,14590,149690,14230,14090,14160,14440,148140,14080,13950,14010,14300,146590,13940,13810,13870,14150,146590,13790,13660,13720,14000,1429140,13790,13600,13670,13940,1429150,13680,13550,13610,13880,1429160,13500,13490,13550,13820,1417170,13560,13430,13490,13760,1417160,13500,13370,13440,13710,1405170,13500,13220,13380,13550,1387180,13210,13090,13150,13410,1375190,13100,12970,13030,13290,1363160,13040,12970,13030,13290,1363160,13040,12910,12970,13180,1315160,13040,12910,12920,13180,1315	0,1416	0,1444	0,1481	0,1515	0,1544	
	3	0,1537	0,1526	0,1509	0,1480	0,1444		0,1465	0,1500	0,1528			
	4	0,1521	0,1511	0,1493	0,1465	0,1429	0,1394	0,1381	0,1387	0,1415	0,1450	0,1485	0,1512
	5	0,1505	0,1495	0,1478	0,1450	0,1414	0,1379	0,1366	0,1372	0,1400	0,1435	0,1469	0,1497
	6	0,1499	0,1489	0,1472	0,1444	0,1408	0,1374	0,1360	0,1367	0,1394	0,1429	0,1463	0,1490
	7	0,1492	0,1482	0,1465	0,1437	0,1402	0,1368	0,1355	0,1361	0,1388	0,1423	0,1457	0,1484
	8	0,1486	0,1476	0,1459	0,1431	0,1396	0,1362	0,1349	0,1355	0,1382	0,1417	0,1451	0,1478
ΣεΓκ	9	0,1480	0,1470	0,1453	0,1425	0,1390	0,1356	0,1343	0,1349	0,1376	0,1411	0,1444	0,1472
	10	0,1473	0,1463	0,1447	0,1419	0,1384	0,1350	0,1337	0,1344	0,1371	0,1405	0,1438	0,1465
	11	0,1467	0,1457	0,1441	0,1413	0,1378	0,1345	0,1332	0,1338	0,1365	0,1399	0,1432	0,1459
	12	0,1461	0,1451	0,1434	0,1407	0,1372	0,1339	0,1326	0,1332	0,1359	0,1393	0,1426	0,1453
	13	0,1454	0,1444	0,1428	0,1401	0,1366	0,1333	0,1320	0,1326	0,1353	0,1387	0,1420	0,1446
	14	0,1448	0,1438	0,1422	0,1395	0,1360	0,1327	0,1314	0,1320	0,1347	0,1381	0,1413	0,1440
	15	0,1442	0,1432	0,1416	0,1389	0,1354	0,1321	0,1309	0,1315	0,1341	0,1375	0,1407	0,1434
	16	0,1435	0,1426	0,1409	0,1383	0,1348	0,1315	0,1303	0,1309	0,1335	0,1369	0,1401	0,1427
	17	0,1429	0,1419	0,1403	0,1376	0,1342	0,1310	0,1297	0,1303	0,1329	0,1363	0,1395	0,1421
	18	0,1422	0,1413	0,1397	0,1370	0,1336	0,1304	0,1291	0,1297	0,1323	0,1357	0,1389	0,1415
	19	0,1416	0,1407	0,1391	0,1364	0,1331	0,1298	0,1286	0,1292	0,1318	0,1351	0,1382	0,1408
	20	0,1410	0,1400	0,1385	0,1358	0,1325	0,1292	0,1280	0,1286	0,1312	0,1345	0,1376	0,1402

Πίνακας 5.11 Συντελεστής απόδοσης της εγκατάστασης, σ_{ΣΑΦ}.

Έτος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
21	0,1403	0,1394	0,1378	0,1352	0,1319	0,1286	0,1274	0,1280	0,1306	0,1339	0,1370	0,1396
22	0,1397	0,1388	0,1372	0,1346	0,1313	0,1281	0,1268	0,1274	0,16300	0,1332	0,1364	0,1390
23	0,1391	0,1382	0,1366	0,1340	0,1307	0,1275	0,1263	0,1268	0,1294	0,1326	0,1358	0,1383
24	0,1384	0,1375	0,1360	0,1334	0,1301	0,1269	0,1257	0,1263	0,1288	0,1320	0,1352	0,1377
25	0,1378	0,1369	0,1353	0,1328	0,1295	0,1263	0,1251	0,1257	0,1282	0,1314	0,1345	0,1371

Πίνακας 5.11 Συντελεστής απόδοσης της εγκατάστασης, σ_{ΣΑΦ}.

Από τον πίνακα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η απόδοση της εγκατάστασης είναι μεγαλύτερη κατά τους χειμερινούς μήνες, γεγονός που οφείλεται στις μικρές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και επομένως στο μεγαλύτερο θερμοκρασιακό συντελεστή διόρθωσης, σ_θ. Επίσης όπως αναμενόταν με την πάροδο των χρόνων μειώνεται ο συντελεστής απόδοσης λόγω του συντελεστή γήρανσης.

5.5.5 Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια δίνεται από τον τύπο:

$$E_{\pi\alpha\rho} = H^* \sigma_{E\Gamma K} S_{\Pi \Lambda}$$
, (5.6)

Όπου, Η: το ηλιακό δυναμικό στην επιφάνεια κεκλιμένου συλλέκτη για την πόλη της Λάρισας όπως δίνεται στον πίνακα 5.3,

ΣεΓκ: ο συντελεστής απόδοσης της εγκατάστασης,

 $S_{\Pi\Lambda}$: το συνολικό εμβαδό των πλαισίων της εγκατάστασης, όπου στην παρούσα μελέτη είναι: $S_{\Pi\Lambda}$ =216*1,559*1,046=352,234 m².

Γνωρίζοντας, πλέον, όλες τις παραμέτρους με τον τύπο 5.6 υπολογίζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, πίνακας 5.12.

	Έτος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Σύνολο
	1	3811,4	4499,3	6347,0	7662,4	8874,6	8759,2	9427,8	9471,1	7914,3	6269,1	4961,1	3735,8	81733,2
	2	3772,9	4453,9	6282,9	7585,0	8785,0	8670,7	9332,5	9375,4	7834,4	6205,8	4911,0	3698,1	80907,6
ΕΠΑΡ	3	3734,5	4408,4	6218,8	7507,6	8695,3	8582,3	9237,3	9279,7	7754,4	6142,4	4860,9	3660,4	80082,0
(KWh)	4	3696,0	4363,0	6154,7	7430,2	8605,7	8493,8	9142,1	9184,1	7674,5	6079,1	4810,8	3622,6	79256,5
	5	3657,5	4317,5	6090,6	7352,8	8516,0	8405,3	9046,8	9088,4	7594,5	6015,8	4760,7	3584,9	78430,9
	6	3642,1	4299,4	6064,9	7321,9	8480,2	8369,9	9008,7	9050,1	7562,5	5990,5	4740,6	3569,8	78100,6
	7	3626,7	4281,2	6039,3	7290,9	8444,3	8334,5	8970,6	9011,9	7530,6	5965,1	4720,6	3554,7	77770,4

Πίνακας 5.12 Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια

Πίνακας 5.12 Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια

Έτος	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Σύνολο
8	3611,3	4263,0	6013,6	7260,0	8408,5	8299,1	8932,6	8973,6	7498,6	5939,8	4700,6	3539,6	77440,2
9	3595,9	4244,8	5988,0	7229,0	8372,6	8263,8	8894,5	8935,3	7466,6	5914,5	4680,5	3524,5	77109,9
10	3580,5	4226,6	5962,3	7198,0	8336,8	8228,4	8856,4	8897,1	7434,6	5889,2	4660,5	3509,4	76779,7
11	3565,1	4208,5	5936,7	7167,1	8300,9	8193,0	8818,3	8858,8	7402,7	5863,8	4640,4	3494,3	76449,5
12	3549,7	4190,3	5911,0	7136,1	8265,0	8157,6	8780,2	8820,5	7370,7	5838,5	4620,4	3479,2	76119,2
13	3534,3	4172,1	5885,4	7105,2	8229,2	8122,2	8742,1	8782,3	7338,7	5813,2	4600,3	3464,1	75789,0
14	3518,9	4153,9	5859,8	7074,2	8193,3	8086,8	8704,0	8744,0	7306,7	5787,8	4580,3	3449,1	75458,8
15	3503,5	4135,7	5834,1	7043,2	8157,5	8051,4	8665,9	8705,7	7274,8	5762,5	4560,2	3434,0	75128,5
16	3488,1	4117,6	5808,5	7012,3	8121,6	8016,0	8627,8	8667,5	7242,8	5737,2	4540,2	3418,9	74798,3
17	3472,7	4099,4	5782,8	6981,3	8085,8	7980,6	8589,7	8629,2	7210,8	5711,8	4520,1	3403,8	74468,0
18	3457,3	4081,2	5757,2	6950,4	8049,9	7945,2	8551,6	8590,9	7178,8	5686,5	4500,1	3388,7	74137,8
19	3441,9	4063,0	5731,5	6919,4	8014,0	7909,8	8513,5	8552,7	7146,8	5661,2	4480,1	3373,6	73807,6
20	3426,5	4044,8	5705,9	6888,4	7978,2	7874,5	8475,5	8514,4	7114,9	5635,9	4460,0	3358,5	73477,3
21	3411,1	4026,7	5680,2	6857,5	7942,3	7839,1	8437,4	8476,1	7082,9	5610,5	4440,0	3343,4	73147,1
22	3395,7	4008,5	5654,6	6826,5	7906,5	7803,7	8399,3	8437,9	7050,9	5585,2	4419,9	3328,3	72816,9
23	3380,3	3990,3	5629,0	6795,6	7870,6	7768,3	8361,2	8399,6	7018,9	5559,9	4399,9	3313,2	72486,6
24	3364,9	3972,1	5603,3	6764,6	7834,8	7732,9	8323,1	8361,3	6987,0	5534,5	4379,8	3298,1	72156,4
25	3349,5	3954,0	5577,7	6733,6	7798,9	7697,5	8285,0	8323,1	6955,0	5509,2	4359,8	3283,0	71826,2
											Σύν	ολο	1899678,2

5.6 Επιλογή Αναστροφέα

Στην οροφή του υπό μελέτη κτιρίου προέκυψε η δυνατότητα εγκατάστασης 216 ΦΒ πλαισίων συνολικής ισχύος 70,2 kWp. Αποφεύγεται η χρήση ενός μόνο αναστροφέα καθώς σε περίπτωση βλάβης τίθεται εκτός λειτουργίας όλη η εγκατάσταση. Επίσης η χρήση περισσοτέρων αναστροφέων θα ανέβαζε αρκετά το κόστος καθώς πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντικατάστασή τους μετά την έλευση περίπου δέκα ετών.

Τελικά, θα χρησιμοποιηθούν δύο τριφασικοί αναστροφείς KACO Powador 36.0 TL3 τύπου XL-SPD 1+2 ονομαστικής ισχύος 36 kW ο καθένας. Στο παράρτημα Δ παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αναστροφέα.

Σε κάθε αναστροφέα στη λειτουργία ΧL μπορούν να συνδεθούν μέχρι 4 συστοιχίες σε έναν ανιχνευτή MPP. Η τάση λειτουργίας πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ V_{mpp}=350÷800V, η τάση ανοιχτοκυκλώσεως να μην υπερβαίνει την τιμή V_{oc}≤1000V και το ρεύμα εισόδου στον αναστροφέα να μην ξεπερνά την τιμή I_{input}≤34A. Η επιλογή του αριθμού των πλαισίων που θα αποτελούν μια συστοιχία θα μελετηθεί σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία και σε συνήθεις θερμοκρασιακές συνθήκες.

5.6.1 Λειτουργία πλαισίων και αναστροφέων σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες.

Η ονομαστική θερμοκρασία ενός πλαισίου ορίζεται ως η θερμοκρασία που αποκτούν τα ΦΒ στοιχεία του (Nominal Operating Cell Temperature, NOCT) όταν το πλαίσιο παραμένει ανοικτοκυκλωμένο και υπόκειται στις ακόλουθες συνθήκες λειτουργίας:

α. Ακτινοβολία στην επιφάνεια των στοιχείων:80 mW/cm²,

β. Θερμοκρασία αέρα:20°C, ταχύτητα ανέμου: 1m/s,

γ. Τοποθέτηση πλαισίου: η πίσω όψη ελεύθερη.

Η ονομαστική θερμοκρασία του πλαισίου δίνεται από τον τύπο:

$$\mathsf{T}_{\sigma \tau \circ \iota \chi \epsilon i \circ \upsilon} = \mathsf{T}_{\alpha \epsilon \rho \circ \varsigma} + \frac{T NOCT - 20}{80} * Ho (5.7)$$

Από την ΕΜΥ για την περιοχή της Λάρισας παίρνω τις ακραίες θερμοκρασίες: -21,6 και 45,2°C. Με βάση αυτές τις θερμοκρασίες και τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι η ονομαστική θερμοκρασία του πλαισίου είναι 5,4 και 71,2 °C αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

 $V(T_{\sigma \tau \circ \iota \chi \epsilon i \circ \upsilon}^{o}C) = V(25 \ ^{o}C) * [1 + (T_{\sigma \tau \circ \iota \chi \epsilon i \circ \upsilon} - 25) * \beta_{Voc}] (5.8)$

υπολογίζω την τάση ανοιχτοκυκλώσεως για τους -21,6 και 45,2 °C, όπου β_{νοc} ο θερμοκρασιακός συντελεστής του πλαισίου για την τάση ανοιχτοκυκλώσεως. Χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους θερμοκρασιακούς συντελεστές υπολογίζω παρόμοια το ρεύμα βραχυκύκλωσης, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.13 Τάση ανοιχτοκυκλώσεως και ρεύμα βραχυκύκλωσης σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες.

T _{NOCT}	T _{AEPA}	ΤΠΛΑΙΣΙΟΥ	β _{Voc}	α_{lsc}	V _{oc}	I _{sc}
45	-20,6	4,4	-0,0027	0,0006	68,51	6,31
45	45,2	70,2	-0,0027	0,0006	56,98	6,56

Όπως αναμενόταν με αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται μικρή αύξηση του ρεύματος και μεγαλύτερη μείωση της τάσεως. Με αυτές πλέον τις τιμές τάσεων και ρευμάτων υπολογίζονται οι αντίστοιχες των συστοιχιών ώστε να διαπιστωθεί η ομαλή λειτουργία του αναστροφέα και σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες. Η τάση λειτουργίας του πλαισίου είναι V_{mmp} =54,7V και όπως αναφέρθηκε παραπάνω η τάση λειτουργίας της συστοιχίας πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ V_{mpp} =350÷800V.

Το DC ρεύμα βραχυκυκλώσεως από I_{sc25}=6,39Α για STC συνθήκες, γίνεται I_{sc-20,6}=6,31Α και I_{sc45,2}=6,56Α ενώ το μέγιστο ρεύμα εισόδου του αναστροφέα που είναι I=34Α. Η τάση ανοιχτοκυκλώσεως από V_{oc25}=64,9 V για STC συνθήκες γίνεται V_{oc-20,6}=68,51 V και V_{oc45,2}=56,98 V για θερμοκρασία T=-20,6°C και T=45,2°C αντίστοιχα. Πολλαπλασιάζοντας αυτές τις τάσεις με τον αριθμό πλαισίων σε κάθε συστοιχία υπολογίζεται η συνολική τάση ανοιχτοκυκλώσεως. Σε κάθε περίπτωση η τάση

ανοιχτοκυκλώσεως παραμένει μικρότερη της μέγιστης τιμής τάσης ανοιχτοκυκλώσεως του αναστροφέα V_{oc}=1000 V.

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς προκύπτει ότι κάθε συστοιχία μπορεί να αποτελείται από επτά πλαίσια ως και δεκατέσσερα πλαίσια. Για λόγους συμμετρίας σε κάθε αναστροφέα συνδέονται 108 πλαίσια. Σε καθένα από τους τρεις ανιχνευτές MPP συνδέονται τρεις συστοιχίες των 12 πλαισίων. Σημειώνεται ότι η σύνδεση τριών συστοιχιών σε έναν ανιχνευτή δίνει συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης μικρότερο του ρεύματος εισόδου στον αναστροφέα.

Στον πίνακα 5.14 δίνονται οι τάσεις ανοιχτοκυκλώσεως και λειτουργίας και το ρεύμα βραχυκυκλώσεως για κάθε συστοιχία σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες.

,	A				Ακραί	ες Συνθήκε	S	
	Ανιχνευτης	# #)augi(wy		-20,6°C			45,2 °C	
	1 ^{ος} ΜΡΡΤ	πλαισίων	V _{oc}	l _{sc}	V _{mmp}	V _{oc}	l _{sc}	V _{mmp}
	1 ^η συστ.	12	822,12	6,31	656,4	683,76	6,56	656,4
	2 ^η συστ.	12	822,12	6,31	656,4	683,76	6,56	656,4
	3 ^η συστ.	12	822,12	6,31	656,4	683,76	6,56	656,4
	Σύνολο	36	822,12	18,93	656,4	683,76	19,68	656,4
	2 ^{°¢} MPPT	# πλαισίων	V _{oc}	I _{sc}	V _{mmp}	V _{oc}	I _{sc}	V _{mmp}
1°,-2°,	1 ^η συστ.	12	822,12	6,31	656,4	683,76	6,56	656,4
Αναστροφεας	2 ^η συστ.	12	822,12	6,31	656,4	683,76	6,56	656,4
	3 ^η συστ.	12	822,12	6,31	656,4	683,76	6,56	656,4
	Σύνολο	36	822,12	18,93	656,4	683,76	19,68	656,4
	3 ^{oç} MPPT	# πλαισίων	V _{oc}	I _{sc}	V _{mmp}	V _{oc}	I _{sc}	V _{mmp}
	1 ^η συστ.	12	822,12	6,31	656,4	683,76	6,56	656,4
	2 ^η συστ.	12	822,12	6,31	656,4	683,76	6,56	656,4
	3 ^η συστ.	12	822,12	6,31	656,4	683,76	6,56	656,4
	Σύνολο	36	822,12	18,93	656,4	683,76	19,68	656,4

Πίνακας 5.14 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά σε ακραίες συνθήκες. Σε κάθε περίπτωση η τάση βρίσκεται ανάμεσα στο εύρος λειτουργίας του ανιχνευτή (350-800V) και το ρεύμα είναι μικρότερο του μέγιστου ρεύματος εισόδου (34 A).

Τέλος στο Παράρτημα Ε παρουσιάζονται οι θέσεις των αναστροφέων καθώς και του ΑC υποπίνακα ενώ γίνεται και σαφής διαχωρισμός κάθε συστοιχίας. Οι συστοιχίες επισημαίνονται με τρεις αριθμούς (X-Y-Z) οι οποίοι υποδηλώνουν τον αναστροφέα (1° ή 2°), τον ανιχνευτή MPP (1°, 2° ή 3°) και τη συστοιχία (1^η, 2^η ή 3^η).

5.7 Ηλεκτρολογικό σχέδιο

Το υλικό του αγωγού των καλωδίων ΦΒ εγκαταστάσεων αποτελείται συνήθως από πολύκλωνο επικασσιτερωμένο ηλεκτρολυτικό χαλκό ειδικής αγωγιμότητας, σ=56*10⁶ Ω⁻¹ m⁻¹. Η μόνωση του καλωδίου στον πυρήνα αποτελείται από EP (ethylene propylene), ενώ ο εξωτερικός μανδύας που περιβάλλει τη μόνωση για προστασία συνήθως κατασκευάζεται από EVA (ethylene-vinyl/acetate).

Τα καλώδια που τοποθετούνται σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις πρέπει να ικανοποιούν ειδικές απαιτήσεις και προδιαγραφές. Όλα τα καλώδια τα οποία είναι εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να είναι ανθεκτικά σε υπεριώδη ακτινοβολία. Επίσης πρέπει να είναι ανθεκτικά σε όζον, αμμωνία, λάδι, αμμωνία, μικρόβια και μικροοργανισμούς. Τέλος πρέπει να είναι ελεύθερα αλογόνων και να μην προωθούν τη φλόγα.

Οι μονώσεις πρέπει να αντέχουν σε θερμοκρασίες από -40°C ως 120°C. Η επιλογή του κατάλληλου είδους καλωδίου είναι σημαντική για την ασφάλεια και τη διάρκεια της εγκατάστασης όπως και την ικανοποίηση της απαίτησης για μόνωση ισοδύναμης κλάσης ΙΙ. Για τις συνδέσεις των καλωδίων μεταξύ τους συνίσταται η χρησιμοποίηση κατάλληλων ειδικών συνδέσμων ταχείας σύνδεσης. Τα εργοστασιακά καλώδια των ΦΒ πλαισίων δεν πρέπει να αφαιρούνται και να αντικαθίστανται από καλώδια άλλης διατομής ή τύπου.

Οι αγωγοί των καλωδίων εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούνται είτε από καθαρό χαλκό είτε από αλουμίνιο. Το κύριο υλικό της μόνωσης είναι XLPE (cross-linked polyethylene) ή PVC. Οι αγωγοί χαλκού του καλωδίου είναι πολύκλωνοι, έχουν μόνωση από XLPE και ο μανδύας είναι από PVC. Η όδευση των καλωδίων γίνεται μέσα σε προστατευτικό σωλήνα για την επίτευξη μηχανικής προστασίας αλλά και προστασίας από την ακτινοβολία του ήλιου.

Για την επιλογή των καλωδίων και των μέσων προστασίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το είδος του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό (DC-AC), η τάση λειτουργίας της εγκατάστασης στο συγκεκριμένο σημείο και η μέγιστη αποδεκτή πτώση τάσης στα άκρα του αγωγού κατά τη λειτουργία λόγω απωλειών Joule. Οι διατομές των αγωγών δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

> α. DC ρεύμα: $S = \frac{2*L*I}{\sigma*\Delta V} * 10^6$ (5.9) β. ΑC τριφασικό ρεύμα: $S = \frac{\sqrt{3}*L*I*\cos \varphi}{\sigma*\Delta V} * 10^6$ (5.10), όπου

S: η ελάχιστη δυνατή διατομή του αγωγού (mm²),

L: το μήκος του εξεταζόμενου κλάδου (m),

I: το μέγιστο ρεύμα, το ονομαστικό ρεύμα προσαυξημένο για λόγους ασφαλείας κατά 1,25, που διαρρέει τον αγωγό (Α),

σ: η ειδική αγωγιμότητα του υλικού του αγωγού ($\Omega^{-1}m^{-1}$),

ΔV: η μέγιστη αποδεκτή τιμή πτώσης τάσης (V) για όλο το μήκος του αγωγού,

cosφ: συντελεστής ισχύος του αναστροφέα. Μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο του φορτίου, αλλά προτιμάται η τιμή της μονάδας για λόγους ασφαλείας.

5.7.1 DC τμήμα

5.7.1.1 Επιλογή διατομής καλωδίου

Η διατομή του καλωδίου που συνδέει τα ΦΒ πλαίσια είναι 4mm² όπως περιγράφεται από το φυλλάδιο του ΦΒ πλαισίου που έχει επιλεγεί. Στη συνέχεια υπολογίζονται τα μήκη από κάθε συστοιχία ως τον αναστροφέα και με τη χρήση του τύπου 5.9 υπολογίζεται η διατομή. Για λόγους ασφαλείας αν η υπολογιζόμενη διατομή προκύψει μικρότερη από τη διατομή των εργοστασιακά ενσωματωμένων αγωγών σύνδεσης που συνδέει τα ΦΒ πλαίσια, επιλέγεται η τελευταία.

Για το DC τμήμα επιλέγεται η διατομή S=4mm². Για αυτή τη διατομή πρέπει να ελεγχθεί ότι η πτώση τάσης από τα πλαίσια ως τον DC υποπίνακα δεν είναι μεγαλύτερη από u=ΔV/V=3%. Στον πίνακα 5.15 παρουσιάζονται τα μήκη των καλωδιώσεων καθώς και η πτώση τάσης. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι η πτώση τάσης παραμένει μικρότερη από επιτρεπόμενο όριο.

1 ^{ος} Ανα	αστροφέας	L	I _{max}	S	σ	Δ٧	u=(ΔV/V)% <3%
	1 ^η συστ.	26	7,425	4	56	0,86	0,13
1 ^{ος} MPPT	2 ^η συστ.	21	7,425	4	56	0,7	0,11
	3 ^η συστ.	21	7,425	4	56	0,7	0,11
	1 ^η συστ.	22	7,425	4	56	0,73	0,11
2 ^{ος} MPPT	2 ^η συστ.	14	7,425	4	56	0,46	0,07
	3 ^η συστ.	10	7,425	4	56	0,33	0,05
	1 ^η συστ.	17	7,425	4	56	0,56	0,09
3 ^{oç} MPPT	2 ^η συστ.	12	7,425	4	56	0,4	0,06
	3 ^η συστ.	16	7,425	4	56	0,53	0,08
2 ^{ος} Ανα	χστροφέα ς	L	I _{max}	S	σ	Δ٧	u=(ΔV/V)% <3%
	1 ^η συστ.	44	7,425	4	56	1,46	0,22
1 ^{ος} MPPT	2 ^η συστ.	33	7,425	4	56	1,09	0,17
	3 ^η συστ.	14	7,425	4	56	1,46	0,07
2 ^{oç} MPPT	1 ^η συστ.	10	7,425	4	56	0,33	0,05
	2 ^η συστ.	1	7,425	4	56	0,03	0,005

Πίνακας 5.15 Μήκη καλωδιώσεων και πτώση τάσης στον DC κλάδο.

	3 ^η συστ.	11	7,425	4	56	0,36	0,06
	1 ^η συστ.	12	7,425	4	56	0,4	0,06
3 ^{ος} MPPT	2 ^η συστ.	15	7,425	4	56	0,5	0,08
	3 ^η συστ.	20	7,425	4	56	0,66	0,1

5.7.1.2 Μέσα προστασίας

Η επιλογή του τρόπου σύνδεσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στο ηλεκτρικό δίκτυο Χ.Τ, πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην παραβιάζονται τα όρια διαταραχών που τίθενται από τους Διαχειριστές του Δικτύου.

Αν και η ένταξη περιορισμένου αριθμού μικρών ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων δεν είναι δυνατό να επηρεάσει αισθητά την ποιότητα ισχύος του Ελληνικού ΣΗΕ, δε συμβαίνει το ίδιο στην περίπτωση ευρείας χρήσης των παραπάνω μονάδων. Έτσι, τα κριτήρια που εξετάζονται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση νέων εγκαταστάσεων παραγωγής σε συγκεκριμένο σημείο του δικτύου Χ.Τ. είναι η διαμόρφωση των προστασιών της διασύνδεσης εγκαταστάσεων-δικτύου, οι αργές και ταχείες μεταβολές της τάσης, οι εκπομπές αρμονικών, η επάρκεια του δικτύου και η συμβολή των νέων μονάδων στη στάθμη βραχυκύκλωσης. Τα κριτήρια και οι μέθοδοι αξιολόγησης της εφαρμογής αυτών στο Ελληνικό ΣΗΕ, βασίζονται στις καθιερωμένες διαδικασίες και πρακτικές που εφαρμόζονται από τη ΔΕΗ για τη σύνδεση των παραγωγών, την πρακτική χωρών οι οποίες έχουν να επιδείξουν σημαντική εμπειρία στον τομέα των διεσπαρμένων ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων, τη σειρά προτύπων 61000 της ΙΕC τα οποία έχουν σήμερα διεθνή αποδοχή και σε σημαντικό βαθμό έχουν υιοθετηθεί ως Ευρωπαϊκά (EN) και εθνικά (ΕΛΟΤ) πρότυπα και τέλος το ευρωπαϊκό πρότυπο ΕΝ 50160, το οποίο έχει ήδη υιοθετηθεί από την ΔΕΗ και τον ΕΛΟΤ. Ο έλεγχος πληρότητας των παραπάνω κριτηρίων γίνεται στο πλησιέστερο προς τις εγκαταστάσεις του παραγωγού σημείο του δικτύου, στο οποίο συνδέεται άλλος καταναλωτής ή παραγωγός (Σημείο Κοινής Σύνδεσης στο Δίκτυο). Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο η ενέργεια που αποδίδεται από τον παραγωγό στο δίκτυο όσο και αυτή που απορροφά από αυτό ως καταναλωτής, μεταφέρεται πάντα μέσω της ίδιας παροχής.

Τα μέσα ζεύξεως και προστασίας πρέπει αφενός να έχουν την ικανότητα διακοπής εντάσεων φορτίου και βραχυκυκλώματος, αφετέρου να εξασφαλίζουν την έγκαιρη απόζευξη της ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας. Η ρύθμιση των τιμών χρονικής καθυστέρησης των μέσων προστασίας χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, διότι αρκετά μικρές τιμές αυτής μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη συχνότητα ανεπιθύμητων αποζεύξεων της εγκατάστασης παραγωγής, ενώ αντίθετα μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις μπορούν να προκαλέσουν βλάβες, τόσο στην ίδια την εγκατάσταση όσο και σε παρακείμενα φορτία ή παραγωγούς. Οι απαιτήσεις οι οποίες πρέπει να καλύπτονται για την διασύνδεση ενός Φ/Β συστήματος με το δίκτυο, σύμφωνα και με τις οδηγίες του Διαχειριστή Δικτύου, συνοψίζονται στον Πίνακα 5.16.

58

Πίνακας 5.16 Απαιτήσεις	διασύνδεσης	σύμφωνα με τον	νδιανειοιστή	δικτύου
nivaras 3.10 Analijuzis	υιαυυνυευης	υσμφωνα με τον	σιαχειριστη	Olklood.

Παράμετρος	Απαίτηση
Τάση	Η τιμή της εναλλασσόμενης τάσης στα άκρα του ηλεκτρονικού αναστροφέα δεν πρέπει να υπερβαίνει το -20% (184V) ή το +15% (264.5V) της ονομαστικής τιμής της τάσης του δικτύου. Σε περίπτωση υπέρβασης των παραπάνω ορίων, η απόζευξη πρέπει να πραγματοποιείται εντός 0.5 s.
Συχνότητα	Η συχνότητα των ηλεκτρικών μεγεθών εξόδου του αναστροφέα δεν πρέπει να υπερβαίνει περισσότερο από ±0.5Hz την ονομαστική τιμή της συχνότητας του δικτύου. Σε περίπτωση υπέρβασης των παραπάνω ορίων, η απόζευξη θα πρέπει να πραγματοποιείται εντός 0.5 s.
Αυτόματη Επανάζευξη	Η επανάζευξη πρέπει να πραγματοποιείται μετά από τουλάχιστον 3 λεπτά.
Αρμονικές	Η ολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5%.
Έγχυση Συνεχούς Ρεύματος	Η μέγιστη τιμή εγχεόμενου συνεχούς ρεύματος πρέπει να είναι το πολύ ίση με το 0.5% του ονομαστικού ρεύματος της εγκατάστασης.

Τα μέσα προστασίας, τα οποία τοποθετούνται στον DC υποπίνακα εντός του αναστροφέα, είναι τα εξής:



Υπόμνημα									
1	Ακροδέκτες σύνδεσης ΑC	3	Ακροδέκτες σύνδεσης DC (Μ: 3x1, XL: 3x5) 3α) χωρίς ασφάλεια, 3β) με ασφάλεια						
2	Διακόπτης διαχωρισμού DC	4	Προστασία από υπερβολική τάση Τύπου ΙΙ						

Σχήμα 5.5 Υποπίνακας DC ενσωματωμένος στον αναστροφέα.

α. Ασφάλεια ή μικροαυτόματος διακόπτης ισχύος: στο κύκλωμα συνεχούς τάσης προστατεύει κάθε συστοιχία από ρεύματα ανάστροφης φοράς καθώς και από την έγχυση εναλλασσόμενου ρεύματος στο κύκλωμα συνεχούς σε περίπτωση βλάβης του αναστροφέα. Κάθε συστοιχία πρέπει να προστατεύεται ξεχωριστά ώστε να εξασφαλίζεται ο περιορισμός του σφάλματος μόνο σε αυτή τη συστοιχία που αντιμετωπίζει το πρόβλημα, επιτρέποντας την κανονική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την υπόλοιπη εγκατάσταση.

Τοποθετείται ασφάλεια 20Α όπως ορίζει ο κατασκευαστής του πλαισίου.

β. Απαγωγός υπέρτασης: προστατεύει τα ΦΒ πλαίσια και τους αναστροφείς από μεταβατικές υπερτάσεις και στιγμιαία κρουστικά ρεύματα που δημιουργούνται από κεραυνούς ή από το χειρισμό διακοπτών μεγάλης ισχύος και επιπλέον περιορίζει την τιμή της υπέρτασης σε αποδεκτά επίπεδα για την ομαλή λειτουργία του εξοπλισμού.

γ. Διακόπτης φορτίου DC: χρησιμοποιείται σαν γενικός διακόπτης ελέγχου ώστε να μπορεί να απομονωθεί με ασφάλεια όλο το κύκλωμα συνεχούς τάσης.

Τοποθετείται διακόπτης φορτίου 32Α-1000V.







5.7.2 ΑC τμήμα

5.7.2.1 Επιλογή διατομής καλωδίου

Σύμφωνα με το τεχνικό εγχειρίδιο του αναστροφέα η τάση εξόδου είναι 230/400 V και το ονομαστικό ρεύμα **43,5A**. Από τον τύπο X.10 υπολογίζεται η διατομή των καλωδιώσεων που θα χρησιμοποιηθεί από τους αναστροφείς ως τον AC υποπίνακα και στη συνέχεια από τον υποπίνακα ως τον μετρητή. Από πίνακα με πολυπολικά καλώδια AC παρατηρείται ότι καλώδιο διατομής 10mm² αντέχει σε επιτρεπόμενη φόρτιση των 61A και οι απώλειες δεν υπερβαίνουν το 3% της ονομαστικής τάσεως λειτουργίας του κλάδου. Παρόμοια, καλώδιο διατομής 25 mm² έχει δυνατότητα επιτρεπόμενης φόρτισης ρεύματος έντασης I=108A και οι απώλειες δεν υπερβαίνουν το 3% της ονομαστικής του 3% της ονομαστικής τάσεως λειτουργίας του κλάδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο κατασκευαστής του αναστροφέα προτείνει τοποθέτηση καλωδίου διατομής 16 mm². Για το λόγο αυτό, τελικά, επιλέγονται διατομές S=16mm² και S=25mm² αντίστοιχα. Στον πίνακα X.17 παρουσιάζονται αναλυτικά τα μήκη των καλωδιώσεων καθώς και η πτώση τάσης.

Τμήμα καλωδίου	L	I _{max}	S	σ	ΔV	u=(ΔV/V)% <3%
1 ^{ος} Αναστροφέας- Πίνακας ΑC	22	43,5	16	56	1,85	0,8
2 ^{ος} Αναστροφέας- Πίνακας ΑC	20	43,5	16	56	1,51	0,66
Πίνακας ΑC- Μετρητής	47	87	25	56	5,06	2,2

Πίνακας 5.17	Μήκη καλωδιώσεων και	πτώση τάσης στον	ΑС κλάδο.
--------------	----------------------	------------------	-----------

5.7.2.2 Μέσα προστασίας

Στον ΑC υποπίνακα πλησίον των αναστροφέων τοποθετούνται:

α. **Μικροαυτόματοι 63A**, οι οποίοι προστατεύουν την ηλεκτρική εγκατάσταση από υπερφόρτιση ή βραχυκύκλωμα εξασφαλίζοντας έτσι την ομαλή λειτουργία στους. Η τοποθέτηση μικροαυτόματου 63A προτείνεται από τον κατασκευαστή του αναστροφέα αν και ασφάλεια παρέχει επίσης και μικροαυτόματος 50A.

β. Ακολουθεί ο διακόπτης διαρροής ρεύματος τύπου Α, σύμφωνα με υπόδειξη του κατασκευαστή του αναστροφέα, ονομαστικού ρεύματος **I**n=100 **A** και παραμένοντος ρεύματος μέτρησης 300 mA. Οι διακόπτες διαρροής διασφαλίζουν την προστασία των ανθρώπων και του εξοπλισμού μιας εγκατάστασης από ατυχήματα, όπως ηλεκτροπληξία ή εκδήλωση πυρκαγιάς, που οφείλονται στη διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος προς τη γη.

Οι διατάξεις διαφορικού ρεύματος Τύπου «Α» ενδείκνυνται για τον εντοπισμό ημιτονοειδών εναλλασσόμενων ρευμάτων διαρροής καθώς επίσης και για παλμικά ρεύματα διαρροής με συνεχή συνιστώσα.

γ. Διακόπτης φορτίου **AC 100A-230V**, όπως και στο DC τμήμα έτσι και στο AC ο διακόπτης φορτίου χρησιμοποιείται σαν γενικός διακόπτης απομονώνοντας με ασφάλεια το κύκλωμα υπό πλήρες φορτίο.

δ. Επίσης, μικροαυτόματος **100Α** τοποθετείται για την προστασία του καλωδίου μεταξύ του πίνακα AC και του μετρητή.

Μετά τον υποπίνακα AC ακολουθεί ο μετρητής καταγραφής της ροής ενέργειας. Ο αμφίδρομος μετρητής συνυπολογίζει για κάθε χρονική στιγμή την παρεχόμενη ισχύ από το ΦΒ πεδίο προς το δίκτυο, εξαιρουμένης της αντλούμενης ισχύος από το δίκτυο προς το ΦΒ πεδίο. Στη συνέχεια ο αμφίδρομος μετρητής συνδέεται με το κιβώτιο φραγής στο οποίο από τη μία πλευρά βρίσκεται ο υπάρχων μετρητής εισόδου της εγκατάστασης και από την άλλη το κιβώτιο προστασίας της ΔΕΗ. Στο κιβώτιο προστασίας της ΔΕΗ υπάρχουν ο εξωτερικός αυτόματος διακόπτης δικτύου, η προστασία έναντι υπερτάσεων του δικτύου και ο κόμβος γείωσης της εγκατάστασης.

Εκτός των μέσων προστασίας που τοποθετούνται στους DC και AC πίνακες υπάρχουν εκ κατασκευής και στον αναστροφέα. Σύμφωνα, λοιπόν, με το εγχειρίδιο εγκατάστασής του ο αναστροφέας διαθέτει καλώδια απαγωγής υπέρτασης/βαρίστορ για την προστασία των ημιαγωγών ισχύος σε μεταβάσεις ενέργειας στην πλευρά του ηλεκτρικού δικτύου και της γεννήτριας, σύστημα επιτήρησης της θερμοκρασίας της ψήκτρας, φίλτρο HMΣ για την προστασία του μετατροπέα από μετατροπέα από υψηλής συχνότητας παρεμβολές του ηλεκτρικού δικτύου, βαρίστορ στην πλευρά ηλεκτρικού δικτύου προς τη γείωση για την προστασία του μετατροπέα από παλμούς αιχμής ή κυματισμού, και τέλος αναγνώριση απομονωμένου ηλεκτρικού δικτύου κατά VDE 0126-1-1.

Στο παράρτημα ΣΤ δίνεται το ηλεκτρολογικό σχέδιο του ΑC κυκλώματος.

5.8 Φαινόμενο νησίδας

Με τον όρο "φαινόμενο νησίδας" ορίζεται μια μη επιθυμητή κατάσταση κατά την οποία ένα τμήμα του ηλεκτρικού δικτύου, όπου εμπεριέχονται τόσο ηλεκτρικά φορτία όσο και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, παραμένει ηλεκτροδοτημένο, λόγω των παραπάνω μονάδων, παρότι το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο είναι ανενεργό.

Αιτίες εμφάνισης αυτού του φαινομένου μπορεί να είναι η ηθελημένη αποσύνδεση ενός μέρους του δικτύου από τα μέσα προστασίας αυτού εξαιτίας της ανίχνευσης κάποιου σφάλματος, η προγραμματισμένη διακοπή του δικτύου για λόγους συντήρησης, η διακοπή της ηλεκτροδότησης λόγω εξωγενών περιβαλλοντικών αιτιών, η πιθανή αστοχία ενός μέρος του εξοπλισμού του Σ.Η.Ε. αλλά και το ανθρώπινο λάθος.

Η ανίχνευση του «φαινομένου νησίδας», αποτελεί ένα από τα βασικά κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση ενός κτηριακού Φ/Β συστήματος στο Ελληνικό ΣΗΕ, όπως εν γένει και των υπολοίπων διεσπαρμένων πηγών ενέργειας. Οι λόγοι που επιβάλλουν την ανίχνευση αυτών των καταστάσεων έγκειται στη διασφάλιση υψηλής ποιότητας παρεχόμενης ενέργειας στους καταναλωτές και κυρίως η ασφάλεια εγκαταστάσεων και προσώπων. Αναλυτικότερα, σε περιπτώσεις προγραμματισμένης συντήρησης, ενώ οι Διαχειριστές Δικτύου θέτουν ηθελημένα εκτός λειτουργίας τμήματα του ηλεκτρικού συστήματος για να τελεστούν οι εργασίες συντήρησης, η ενδεχόμενη ηλεκτροδότηση αυτού του τμήματος από διεσπαρμένες πηγές ενέργειας (λόγω αδυναμίας ανίχνευσης της διακοπής), θέτει σε κίνδυνο το προσωπικό που διενεργεί τις απαραίτητες εργασίες. Επιπρόσθετα, εάν οι προστασίες ενός Σ.Η.Ε. ανοίξουν τους διακόπτες προστασίας μιας γραμμής (λόγω ανίχνευσης τυχαίων σφαλμάτων, πιθανής βλάβης του εξοπλισμού, εξωγενών περιβαλλοντικών αιτιών, ανθρώπινων λαθών χειρισμού), και δεν καταστεί εφικτό οι διεσπαρμένες πηγές να εντοπίσουν τη διακοπή της ηλεκτροδότησης, θα συνεχίσουν να τροφοδοτούν τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στην ίδια με αυτές γραμμή. Το γεγονός αυτό μπορεί να επιφέρει δύο πολύ σημαντικά προβλήματα:

α. Κατά το χρονικό διάστημα της διακοπής, στο κομμάτι της γραμμής που τέθηκε εκτός λειτουργίας δεν υφίσταται κάποιος κεντρικός έλεγχος της συχνότητας και της τάσης, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημιές στους υπόλοιπους συνδεόμενους χρήστες σε περίπτωση που οι διεσπαρμένες πηγές δε μπορέσουν να τροφοδοτήσουν τα φορτία με τα απαραίτητα ποσά ενεργού και άεργου ισχύος.

β. Στην περίπτωση που οι διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής μπορέσουν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των φορτίων, όταν οι διακόπτες των συστημάτων προστασίας επανασυνδέσουν την εν λόγω γραμμή στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο ενδέχεται να υπάρξουν σημαντικές διαφορές μεταξύ της τάσης στους ακροδέκτες των διεσπαρμένων πηγών και αυτής του υπολοίπου Σ.Η.Ε. (διαφορά φάσης και πλάτους, απώλεια συγχρονισμού με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο). Οι διαφορές αυτές είναι δυνατό να έχουν καταστροφικές συνέπειες τόσο στην ίδια την εγκατάσταση όσο στους υπόλοιπους συνδεόμενους καταναλωτές. Οι αναστροφείς των κτηριακών φωτοβολταϊκών συστημάτων θα πρέπει να διαθέτουν προστασία έναντι νησιδοποίησης κατά VDE 0126-1-1 ή ισοδύναμης μεθόδου κατά IEC 62116. Στην περίπτωση ανίχνευσης απομονωμένης λειτουργίας (ανεξαρτήτως της χρησιμοποιούμενης μεθόδου), η απόζευξη των Φ/Β μονάδων από το ηλεκτρικό δίκτυο πρέπει να γίνεται σε χρονικό διάστημα μικρότερο του ενός δευτερολέπτου (απαιτούμενος χρόνος εκκαθάρισης τυχαίων μη σοβαρών σφαλμάτων), έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι συνέπειες που μπορούν να προκληθούν από ενδεχόμενη ταχεία επαναφορά της τάσης του δικτύου. Στη Γερμανία η Φ/Β γεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο αν παραβιαστούν τα όρια για την τάση και τη συχνότητα. Η προστασία αντινησιδοποίησης κατά VDE 0126-1-1 είναι υποχρεωτική για Φ/Β συστήματα ισχύος έως 30kVA μόνο όταν το σημείο σύνδεσης της πηγής με το δίκτυο δεν είναι

63

προσβάσιμο από το διαχειριστή του δικτύου. Η συμμόρφωση με το πρότυπο VDE 0126-1-1 αποδεικνύεται με πιστοποιητικό τύπου από ανεξάρτητο εργαστήριο.

5.9 Βάσεις στήριξης

Οι βάσεις στήριξης κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα (χάλυβα γαλβανισμένο εν θερμώ) γεγονός που το καθιστά αδιάβρωτο σε κάθε είδους συνθήκες περιβάλλοντος, ακόμη και σε παραθαλάσσιες περιοχές ή περιοχές με υψηλή βιομηχανική ρύπανση. Για τοποθέτηση σε τέτοιου είδους περιοχές συστήνεται η επιλογή της ανοδίωσης στα προφίλ αλουμινίου. Συνήθως κατασκευάζονται μετά από τεχνική μελέτη ώστε να διαπιστωθεί η στατική τους επάρκεια και η αντοχή τους σε ανεμοπιέσεις ή φορτία χιονιού. Διακρίνονται στις σταθερές βάσεις στήριξης και στα συστήματα ιχνηλάτησης του ήλιου.

5.9.1 Σταθερές βάσεις στήριξης

Οι σταθερές βάσεις αποτελούν τον απλούστερο και οικονομικότερο τρόπο έδρασης Φ/Β πάνελ. Η αρχή σχεδιασμού τους είναι απλή: οι ακτίνες του ήλιου θα πρέπει να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια των πάνελ κατά το μεσημέρι. Έτσι οι βάσεις κατασκευάζονται ώστε να επιτρέπουν την τοποθέτηση των πάνελ σε σταθερή κλίση, περί τις 30 μοίρες. Η κλίση αυτή θεωρείται ως μία ικανοποιητική μέση τιμή για τα ελληνικά δεδομένα.

Οι βάσεις τοποθετούνται είτε με σκυροδέτηση είτε απευθείας με εδαφόμπηξη ή με ειδικές βιδωτές βάσεις. Η σκυροδέτηση των βάσεων γίνεται συνήθως σε δοκάρι (δηλαδή σε όλη τη σειρά των βάσεων) από οπλισμένο σκυρόδεμα, είτε σε πέλματα από σκυρόδεμα, τοποθετημένα κατάλληλα ώστε να επιτρέπουν το βίδωμα των υποδοχών των βάσεων. Η εδαφόμπηξη γίνεται συνήθως σε βάθη τυπικά του 0,5-1,5 μέτρα, όπου τοποθετούνται πάσσαλοι, επί των οποίων στη συνέχεια εδράζεται η βάση. Η σκυροδέτηση των βάσεων αυξάνει το κόστος εγκατάστασης σε σχέση με την απλή εδαφόμπηξη. Ωστόσο, συστήνεται να διενεργείται αυτοψία και γεωτεχνική μελέτη για να διαπιστωθεί κατά πόσο ο τύπος του εδάφους επιτρέπει την εδαφόμπηξη χωρίς να δημιουργούνται θέματα στατικής επάρκειας των βάσεων. Επιπλέον, ο μελετητής μηχανικός θα πρέπει να είναι προσεκτικός στη χρήση παρελκόμενων υλικών όπως βίδες ή σύνδεσμοι Φ/Β πάνελ, καθώς πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αποφυγή οξειδώσεων ή ηλεκτρόλυσης. Πρέπει επίσης να λαμβάνεται μάριμνα για τη δυνατότητα όδευσης καλωδίων καθώς και για τη στήριξη πινάκων ή αναστροφέων, σε περίπτωση που τεχνικά διαπιστωθεί ότι αυτή είναι η βέλτιστη λύση.

Οι σταθερές βάσεις αποτελούνται συνήθως από τεμάχια τα οποία συναρμολογούνται επί το έργω. Κάθε τεμάχιο χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη επιφάνεια τοποθέτησης, η οποία συνήθως υπολογίζεται λαμβάνοντας κάποιες μέσες τιμές διαστάσεων πάνελ (τυπικά 1,6 χ 1 μέτρο για κρυσταλλικά πάνελ). Τα πάνελ μπορούν να τοποθετηθούν ανά απλή (μονή) σειρά ή (συνηθέστερα) σε διπλή σειρά ή ακόμη και σε

64

τριπλή ή τετραπλή σειρά. Επίσης είναι δυνατή η τοποθέτηση τους είτε κατά τη μικρή διάσταση (portrait) είτε κατά τη μεγάλη διάσταση (landscape).



Σχήμα 5.6 Σκυροδέτηση σταθερών βάσεων σε δοκάρι από μπετόν.



Σχήμα 5.7 Σκυροδέτηση σταθερών βάσεων σε πέλμα από μπετόν.



Σχήμα 5.8 Εδαφόμπηξη βάσεων στήριξης.

5.9.2 Σύστημα ιχνηλάτησης της τροχιάς του ήλιου

Η ιχνηλατήση της τροχιάς του ήλιου αποτελεί μία τεχνική η οποία στοχεύει στην μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της προσπάθειας κίνησης των βάσεων των πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας ώστε να επιτυγχάνεται συνεχώς η κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τα συστήματα ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου (tracker) χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα σε σχέση με τα συστήματα βάσεων, παρέχοντας ωστόσο αυξημένες αποδόσεις, κατά μέσο όρο της τάξης του 30%. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Συστήματα μονού άξονα (single axis): πρόκειται για συστήματα στα οποία λαμβάνει χώρα κίνηση των πάνελ σε έναν άξονα, αυτόν της Ανατολής-Δύσης κατά τη διάρκεια μίας μέρας. Τυπικά, τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν αύξηση της παραγωγής κατά 20-25% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.
- Συστήματα διπλού άξονα (dual axis): πρόκειται για συστήματα στα οποία είναι επιπλέον δυνατή η ρύθμιση της κλίσης των πάνελ ως προς την οριζόντιο. Η επιπλέον αυτή δυνατότητα παρέχει αυξημένη απόδοση κατά τυπικά 25-40% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.

Η κίνηση στα συστήματα αυτά επιτυγχάνεται με συνήθως με ηλεκτρομηχανικά ή ήλεκτροϋδραυλικά μέσα. Κατά συνέπεια, όλα τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από ιδιοκαταναλώσεις, οι οποίες είναι μικρές καθώς η κίνηση δεν είναι συνεχής αλλά

περιοδική, τυπικά μία κίνηση ανά 10 λεπτά. Ωστόσο, είναι σκόπιμο η ενέργεια αυτή να προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ και όχι από τα ΦΒ πλαίσια λόγω της διαφοράς τιμής.

Η ανίχνευση της πορείας του ήλιου γίνεται συνήθως με δύο τρόπους: ο πρώτος τρόπος είναι με ηλιακούς αισθητήρες, οι οποίοι αντιλαμβάνονται τη θέση του ήλιου. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω λογισμικού, από αστρονομικά δεδομένα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η θέση και πορεία του ήλιου για κάθε μέρα του έτους, ανάλογα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής.

Λόγω της ανάγκης κίνησης σημαντικού αριθμού πάνελ, τα συστήματα ιχνηλάτησης χαρακτηρίζονται από επίπεδες επιφάνειες τοποθετημένες σε μία κάθετη ως προς το έδαφος βάση στήριξης. Στη βάση στήριξης τοποθετείται συνήθως και ο αναστροφέας ή αν αυτό δεν είναι δυνατόν, γίνεται η αναχώρηση καλωδίων προς ένα κεντρικό σημείο συλλογής όπου βρίσκονται και οι αναστροφείς. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε κατασκευές σημαντικού ύψους το οποίο κυμαίνεται από 2,5 έως 10-12 μέτρα, αναλόγως της κατασκευής. Το ύψος της κατασκευής συνήθως αυξάνει με την αύξηση της επιφάνειες των πλαισίων.

Το σημαντικό μέγεθος της κατασκευής καθιστά πολυπλοκότερη και την έδραση. Συνήθως οι βάσεις στήριξης εδράζονται σε οπλισμένο σκυρόδεμα σημαντικού όγκου (από 2-3 έως και περίπου 20-30 m³) ώστε να εξασφαλίζεται η στατική τους επάρκεια. Επιπλέον, αυξάνονται τα κόστη εγκατάστασης σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.

Το σημαντικό μέγεθος των συστημάτων αυτών, κυρίως το ύψος τους, αυξάνει τις απαιτήσεις χώρου σε σχέση με ένα σύστημα σταθερών βάσεων, συνήθως κατά 1,5-2 φορές, λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων μεταξύ τους για την αποφυγή σκιάσεων. Επιπλέον, το μέγεθος των τράκερ τους καθιστά περισσότερο ευάλωτους (σε σχέση με συστήματα σταθερών βάσεων) σε ανεμοπιέσεις. Η συνηθέστερη τεχνική που χρησιμοποιείται είναι να χρησιμοποιείται ένα ανεμόμετρο και όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει ένα όριο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το σύστημα κίνησης να λαμβάνει εντολή να θέτει την επιφάνεια των πάνελ σχεδόν παράλληλα με το έδαφος, μία διαδικασία γνωστή ως «οριζοντίωση» για λόγους προστασίας. Η ταχύτητα αυτή κυμαίνεται ανάλογα με τον κατασκευαστή, αλλά μπορεί να είναι και χαμηλή και να αντιστοιχεί σε άνεμο έντασης 5-6 Bf. Κατά συνέπεια, κάθε μελετητής μηχανικός θα πρέπει να εκτιμά τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασης προτού προχωρήσει στην επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου τέτοιου συστήματος.

Πέραν των παραπάνω, κάθε μελετητής μηχανικός και εν δυνάμει ιδιοκτήτης ενός Φ/Β πάρκου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τα εξής πρακτικά ζητήματα που αφορούν την τοποθέτηση των συστημάτων ιχνηλάτησης:

> Όλα τα συστήματα ιχνηλάτησης χρήζουν συντήρησης λόγω της ύπαρξης ήλεκτρο-μηχανικών ή ήλεκτρο-υδραυλικών μέσων κίνησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να καταστεί απαραίτητος ο επαναπρογραμματισμός του λογισμικού του συστήματος κίνησης, λόγω απώλειας δεδομένων.

 Λόγω του σημαντικού τους ύψους, είναι απαραίτητη η έκδοση οικοδομικής άδειας και όχι έγκρισης εργασιών μικρής κλίμακας, όπως ισχύει για τα συστήματα σταθερών βάσεων. Το γεγονός αυτό αυξάνει το κόστος εγκατάστασης και επηρεάζει τον χρόνου υλοποίησης της κατασκευής του σταθμού.

Κεφάλαιο 6: Αντικεραυνική Προστασία

6. Αντικεραυνική προστασία

Σκοπός κάθε συστήματος αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) είναι η ελαχιστοποίηση των πιθανών επιπτώσεων σε κτήρια και ζωντανούς οργανισμούς από άμεσο ή έμμεσο πλήγμα κεραυνού. Φυσικά, απόλυτη προστασία δεν είναι πότε εφικτή, οπότε υπάρχει πάντα ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην επιθυμητή προστασία και στο κόστος της κατασκευής.

Στις αρχές του 2006 εκδόθηκαν τα νέα ΙΕC πρότυπα για την αντικεραυνική προστασία ΙΕC 62305. Σχεδόν ταυτόχρονα υιοθετήθηκαν ως τα νέα ευρωπαϊκά αντικεραυνικά πρότυπα. Υπόψη πρέπει επίσης να ληφθούν και τα πρότυπα ΕΝ 50164-1 και 2 τα οποία περιγράφουν τις απαιτήσεις για τα υλικά σύνδεσης, τους αγωγούς και τα ηλεκτρόδια γείωσης, το πρότυπο ΕΝ 61643-11 και 23 το οποίο περιγράφει τις προστατευτικές διατάξεις για συσκευές που συνδέονται σε συστήματα χαμηλής τάσης καθώς και σε συστήματα τηλεπικοινωνίας και μετάδοσης πληροφορίας.

Ο σχεδιασμός αντικεραυνικής προστασίας βασίζεται σε μια σειρά βημάτων όπως αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1 Βήματα σχεδιασμού αντικεραυνικής προστασίας.

6.1 Συνθήκες σχηματισμού κεραυνού

Η αστραπή σχηματίζεται λόγω διαχωρισμού του ηλεκτρικού φορτίου το οποίο συγκεντρώνεται στα σύννεφα. Υπάρχουν δύο τύποι καταιγίδων που παράγουν στατικό ηλεκτρικό φορτίο, οι θερμές και μετωπικές καταιγίδες.

Οι θερμές καταιγίδες κυριαρχούν σε τροπικές και ορεινές περιοχές. Σε μία ζεστή ημέρα, θερμός αέρας ανεβαίνει από το έδαφος και αντικαθίσταται από ψυχρότερο. Η διαδικασία αυτή σταδιακά ψυχραίνει τον ανερχόμενο αέρα και σχηματίζει σύννεφα, αρχικά ως σταγόνες και στη συνέχεια σε μεγαλύτερα ύψη ως κρυστάλλους πάγου. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα σύννεφο το υψηλότερο σημείο του οποίου μπορεί να φτάσει ως τα 12.000 μέτρα.

Οι μετωπικές καταιγίδες, οι οποίες κυριαρχούν σε εύκρατα κλίματα, δημιουργούνται από την επίδραση ενός μετώπου ψυχρού αέρα με μια μάζα θερμού αέρα η οποία ανυψώνεται πάνω από την ψυχρή μάζα. Καθώς οι θερμές αέριες μάζες ανυψώνονται δημιουργούνται σύννεφα που εκτείνονται σε δεκάδες χιλιόμετρα σε πλάτος και 7,5 ως 18 χιλιόμετρα σε ύψος.



Σε ένα σύννεφο οι κρύσταλλοι πάγου είναι θετικά φορτισμένοι και τα σωματίδια νερού αρνητικά. Αυτή η κατανομή των σωματιδίων οδηγεί σε αύξηση της συσσώρευσης του αρνητικού φορτίου στη βάση του σύννεφου η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε αύξηση του θετικού φορτίου στο έδαφος. Η συσσώρευση αυτή συνεχίζεται μέχρι η διαφορά δυναμικού μεταξύ εδάφους και σύννεφου γίνει τόσο μεγάλη ώστε να υπάρξει κατάρρευση του διηλεκτρικού του αέρα με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικής εκκένωσης.

Οι κεραυνοί διακρίνονται σε αυτούς που έχουν κατεύθυνση από το σύννεφο προς τη γη και σε αυτούς με την αντίθετη κατεύθυνση. Ο πιο συνηθισμένος τύπος κεραυνού είναι οι «αρνητικοί» κεραυνοί στους οποίους ένα κανάλι με αρνητικό φορτίο κινείται από το σύννεφο προς το έδαφος, σχήμα Υ.2. Όταν το κανάλι φτάσει κοντά στο έδαφος το αρνητικό του φορτίο επάγει θετικό φορτίο στο έδαφος. Καθώς τα αντίθετα φορτία έλκονται το θετικό φορτίο προσπαθεί να ενωθεί με το προς τα κάτω αρνητικά κινούμενο κανάλι σχηματίζοντας ένα κανάλι προς τα επάνω, σχήμα Υ.2. Τα δύο κανάλια συναντιούνται και δημιουργούν ένα αγώγιμο μονοπάτι στο οποίο ένα ισχυρό ρεύμα ρέει ώστε να εξισορροπήσει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ σύννεφου και εδάφους. Αυτό ονομάζεται «κεραυνός επιστροφής-return stroke» και σε αυτό οφείλεται η αστραπή την οποία βλέπουμε. Στην πραγματικότητα ο κεραυνός κινείται από το έδαφος προς το σύννεφο όμως επειδή λαμβάνει χώρα τόσο γρήγορα το γυμνό μάτι αντιλαμβάνεται το αντίθετο.



Σχήμα 6.2 Βήματα δημιουργία κεραυνού.

6.2 Εκτίμηση κινδύνου

Το πρώτο βήμα της αντικεραυνικής προστασίας είναι η εκτίμηση του κινδύνου από κεραυνικό πλήγμα. Με τη διαδικασία εκτίμησης κινδύνου παρέχεται ένα ανεκτό όριο κινδύνου, μέθοδοι για τον υπολογισμό του πραγματικού κινδύνου και στη συνέχεια υποδεικνύονται οι απαιτούμενοι μέθοδοι προστασίας ώστε ο πραγματικός κίνδυνος να είναι μικρότερος ή ίσος του ανεκτού κινδύνου. Με τον τρόπο αυτό καθορίζεται τελικά το ελάχιστο επίπεδο αντικεραυνικής προστασίας (LPL-lightning protection level). Η παραπάνω διαδικασία ορίζεται επακριβώς από το πρότυπο IEC 62305-2.

Για την εκτίμηση κινδύνου πρέπει να καθοριστούν οι πηγές βλαβών, οι τύποι βλαβών, και οι τύποι απωλειών καθώς αποτελούν παραμέτρους υπολογισμού της εκτίμησης.

6.2.1 Πηγές βλαβών

Ανάλογα με το σημείο που θα πλήξει ο κεραυνός διακρίνονται οι πηγές βλαβών:

- **S**₁, κεραυνικό πλήγμα στο κτίριο,
- S₂, κεραυνικό πλήγμα κοντά στο κτίριο,
- S₃, κεραυνικό πλήγμα σε υπηρεσία που συνδέεται στο κτίριο και
- S₄, κεραυνικό πλήγμα κοντά σε υπηρεσία που συνδέεται στο κτίριο.



Σχήμα 6.3 Πηγές βλαβών λόγω κεραυνού σε κτίριο.

6.2.2 Τύποι βλαβών

Οι τύποι βλαβών διακρίνονται σε:

- **D**₁, τραυματισμοί σε έμβια ζώντα (άνθρωποι ή ζώα) λόγω βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής,
- D₂, φυσική καταστροφή όπως φωτιά, έκρηξη, μηχανική καταστροφή και απελευθέρωση χημικών,
- D₃, καταστροφή των εσωτερικών ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων λόγω του κεραυνικού ηλεκτρομαγνητικού παλμού (LEMP).

6.2.3 Τύποι απωλειών

Οι τύποι απωλειών διακρίνονται σε:

- L₁, απώλεια ανθρώπινης ζωής,
- L₂, απώλεια υπηρεσίας στο κοινό οι οποίες διακρίνονται σε L'₂ απώλεια της υπηρεσία στο κοινό και L'₄ οικονομική απώλεια,
- L₃, απώλεια της πολιτιστικής κληρονομιάς και
- L₄, οικονομική απώλεια

Η σχέση των παραπάνω συνοψίζεται στον πίνακα 6.1.
Κεφάλαιο 6: Αντικεραυνική προστασία

Πηγή βλάβης	Τύπος βλάβης	Τύπος απώλειας	
	D ₁	L ₁ -L ₄	
S ₁	D ₂	L ₁ -L ₂ (L' ₂ , L' ₄)-L ₃ -L ₄	
	D ₃	L ₁ -L ₂ (L' ₂ , L' ₄)-L ₄	
S ₂	D ₃	L ₁ -L ₂ (L' ₂ , L' ₄)-L ₄	
	D ₁	L ₁ -L ₄	
S ₃	D ₂	L ₁ -L ₂ (L' ₂ , L' ₄)-L ₃ -L ₄	
	D ₃	L ₁ -L ₂ (L' ₂ , L' ₄)-L ₄	
S ₄	D_3	L ₁ -L ₂ (L' ₂ , L' ₄)-L ₄	

|--|

6.2.4 Τύποι Κινδύνου

Κίνδυνος (Risk-R) είναι η τιμή της πιθανής μέσης ετήσιας απώλειας. Για κάθε τύπο απώλειας που μπορεί να εμφανιστεί σε ένα κτίριο υπάρχει και ο αντίστοιχος κίνδυνος:

- **R**₁, κίνδυνος απώλειας ανθρώπινης ζωής,
- **R**₂, κίνδυνος απώλειας υπηρεσίας στο κοινό ο οποίος διακρίνεται σε R'₂ κίνδυνος απώλειας της υπηρεσία στο κοινό και R'₄ κίνδυνος οικονομικής απώλειας,
- R₃, κίνδυνος απώλειας της πολιτιστικής κληρονομιάς και
- **R**₄, κίνδυνος οικονομικής απώλειας

Η τιμή του ανεκτού κινδύνου όπως ορίζεται από το IEC 62305-2 δίνονται στον πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2 Τυπικές τιμές ανεκτού κινδύνου (R_T).

Απώλεια ζωής, L ₁	10 ⁻⁵
Απώλεια υπηρεσίας στο κοινό, L $_2$	10 ⁻³
Απώλεια πολιτιστικής κληρονομιάς, L ₃	10 ⁻³

Η ανάγκη για αντικεραυνική προστασία προκύπτει αν ο κίνδυνος R είναι μεγαλύτερος από μια ανεκτή τιμή R_T (tolerable risk).

Κάθε κύριος κίνδυνος αποτελείται από επιμέρους συνιστώσες. Κάθε συνιστώσα συνδέεται με μια διαφορετική σχέση μεταξύ της πηγής βλάβης (S), και του τύπου βλάβης (D) όπως παρακάτω:

 $R_{1}=R_{A}+R_{B}+R_{C}^{(1)}+R_{M}^{(1)}+R_{U}+R_{V}+R_{W}^{(1)}+R_{Z}^{(1)}, (6.1)$ $R_{2}=R_{B}+R_{C}+R_{M}+R_{V}+R_{W}+R_{Z}, (6.2)$

$$R_{3}=R_{B}+R_{V}, (6.3)$$

$$R_{4}=R_{A}^{(2)}+R_{B}+R_{C}+R_{M}+R_{U}+R_{V}+R_{W}+R_{Z}, (6.4)$$

(1) Μόνο για κατασκευές με κίνδυνο έκρηξης και για νοσοκομεία ή κατασκευές όπου η καταστροφή των εσωτερικών συστημάτων θέτει άμεσα σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή.

(2) Μόνο για περιπτώσεις όπου ζώα μπορούν να χαθούν.

Η ερμηνεία κάθε συνιστώσας παρουσιάζεται στον πίνακα 6.3

Πίνακας 6.3 Ερμηνεία συνιστωσών κινδύνου.

R _x	Πηγή βλάβης	Τύπος βλάβης	
R _A	Κεραυνός στο κτίριο (S ₁)	Τραυματισμός ζωντανών όντων (D ₁)	
R _B	Κεραυνός στο κτίριο (S ₁)	Φυσική βλάβη λόγω σπινθηρισμών στο εσωτερικό της κατασκευής (D₂)	
R _C	Κεραυνός στο κτίριο (S ₁)	Καταστροφή εσωτερικών συστημάτων λόγω ηλεκτρομαγνητικού παλμού (D₃)	
R _M	Κεραυνός κοντά στο κτίριο (S₂)	Καταστροφή εσωτερικών συστημάτων λόγω ηλεκτρομαγνητικού παλμού (D₃)	
R _U	Κεραυνός σε υπηρεσία που συνδέεται με το κτίριο (S₃)	Τραυματισμός ζωντανών όντων (D ₁)	
R _v	Κεραυνός σε υπηρεσία που συνδέεται με το κτίριο (S₃)	Φυσική βλάβη λόγω σπινθηρισμών στο εσωτερικό της κατασκευής (D₂)	
R _w	Κεραυνός σε υπηρεσία που συνδέεται με το κτίριο (S₃)	Καταστροφή εσωτερικών συστημάτων λόγω ηλεκτρομαγνητικού παλμού (D₃)	
Rz	Κεραυνός σε υπηρεσία κοντά στο κτίριο (S₄)	Καταστροφή εσωτερικών συστημάτων λόγω ηλεκτρομαγνητικού παλμού (D₃)	

Η γενική σχέση για τον υπολογισμό κάθε συνιστώσας είναι:

 $R_X = N_X * P_X * L_X$, (6.5)

Όπου: N_X ο ετήσιος αριθμός επικίνδυνων γεγονότων και εξαρτάται από την κεραυνική πυκνότητα N_g , τα φυσικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, τα παρακείμενα κτίρια και το έδαφος

P_X η πιθανότητα βλάβης σε ένα κτίριο η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κτιρίου και τα μέτρα προστασίας και

L_x το ποσό απώλειας στην κατασκευή η οποία καθορίζεται από την προοριζόμενη χρήση του κτιρίου, την παρουσία ανθρώπων, την αξία των αγαθών και τα λαμβανόμενα μέτρα

Η κεραυνική πυκνότητα N_g είναι ο αριθμός των κεραυνών στο έδαφος ανά km² και ανά έτος. Όταν δεν είναι διαθέσιμη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$N_q = 0.04 * T_d^{1.25}$$
, (6.6)

όπου T_d είναι ο αριθμός ημερών καταιγίδας ανά έτος και δίνεται από τους ισοκεραυνικούς χάρτες (σχήμα 6.4)



Σχήμα 6.4 Ισοκεραυνικός χάρτης Ελλάδας

6.3 Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας

Οι ζώνες αντικεραυνικής προστασίας (ΖΑΠ) καθορίζουν το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον. Οι ζώνες δεν είναι απαραίτητο να έχουν φυσικά όρια όπως για παράδειγμα τοίχους. Οι ζώνες είναι περιοχές που διαχωρίζονται ανάλογα με την απειλή άμεσου ή έμμεσου κεραυνικού πλήγματος και ολόκληρου ή μερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Οι ζώνες διακρίνονται σε:

- ΖΑΠ 0_A: Ζώνη που είναι εκτεθειμένη σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα και στο κεραυνικό ρεύμα ενώ οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις είναι μη περιορισμένες.
- ΖΑΠ 0_B: Ζώνη που δεν είναι εκτεθειμένη σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα. Το ρεύμα όμως του κεραυνού είτε άμεσο είτε επαγόμενο μπορεί μερικώς να ρέει στη ζώνη. Επίσης οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις είναι μη περιορισμένες.
- ΖΑΠ 1: Ζώνη που δεν είναι εκτεθειμένη σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, το ρεύμα του κεραυνού περιορίζεται ενώ είναι μερικώς εκτεθειμένη στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

 ΖΑΠ 2: Ζώνη που δεν είναι εκτεθειμένη σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα ενώ τόσο το ρεύμα όσο και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο περιορίζονται περισσότερο σε σχέση με τη ΖΑΠ 1.



Σχήμα 6.5 Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας (ΖΑΠ).

6.4 Αντικεραυνικό Επίπεδο Προστασίας

Ενώ η κυματομορφή του ρεύματος του κεραυνού διαφέρει από γεγονός σε γεγονός, μελέτες συγκλίνουν προς αυτή του σχήματος 6.6.



Σχήμα 6.6 Κυματομορφή ρεύματος κεραυνού

Η περίοδος ανόδου είναι 10μs και η τιμή όπου η τιμή φτάνει στο μισό της είναι 350μs.

Έχουν υιοθετηθεί τέσσερα επίπεδα αντικεραυνικής προστασίας (Lightning protection level-LPL) τα όρια των οποίων καθορίζονται ανάλογα με το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα του κεραυνού. Στον πίνακα 6.4 φαίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές ρεύματος για κάθε επίπεδο.

Πίνακας 6.4 Τιμή ρεύματος του κεραυνού για κάθε επίπεδο προστασίας βασισμένο στην 10/350 με κυματομορφή.

LPL	I	II	III	IV
Μέγιστο ρεύμα (kA)	200	150	100	100
Ελάχιστο ρεύμα (kA)	3	5	10	16

Οι μέγιστες τιμές χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό της τοποθέτησης προϊόντων όπως υλικών αντικεραυνικής προστασίας και διατάξεων προστασίας έναντι υπερτάσεων (SPD). Θεωρείται ότι το 50% του ρεύματος ρέει μέσω του εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας και της γείωσης στη γη και το άλλο 50% κατευθύνεται προς τις υπηρεσίες της κατασκευής. Όταν υπάρχει μόνο τριφασική παροχή (τρεις φάσεις και ο ουδέτερος) τα ρεύματα είναι:

- LPL I: 25 kA
- LPL II: 18,75 kA
- LPL III: 12,5 kA
- LPL IV: 12,5 kA

Βέβαια αυτή είναι μια μη ρεαλιστική υπόθεση καθώς στο κτίριο υπάρχουν και άλλες υπηρεσίες όπως τηλεπικοινωνίες, αγωγοί νερού και φυσικού αερίου. Επομένως το ρεύμα διαιρείται σε περισσότερους αγωγούς και η τιμή του μειώνεται.

Οι ελάχιστες τιμές του ρεύματος λόγω του κεραυνού χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της ακτίνας της κυλιόμενης σφαίρας, μέθοδος που θα αναλυθεί παρακάτω, για κάθε επίπεδο προστασίας. Η σχέση μεταξύ του ελάχιστου ρεύματος και της ακτίνας της κυλιόμενης σφαίρας είναι:

$$r=10*l^{0,65}$$
, (6.7)

όπου r: η ακτίνα κυλιόμενης σφαίρας και

Ι: η ελάχιστη κορυφή του ρεύματος κεραυνού.

6.5 Εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

Στο σημείο που ο κεραυνός πλήττει το κτίριο πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο οι θερμικές όσο και οι τυχόν εκρηκτικές επιδράσεις. Οι συνέπειες αυτές καθορίζουν τον τύπο του εξωτερικού συστήματος προστασίας σε:

- Απομονωμένο
- Μη απομονωμένο

Ένα απομονωμένο σύστημα επιλέγεται όταν το κτίριο είναι κατασκευασμένο από εύφλεκτα υλικά ή υπάρχει μεγάλη πιθανότητα έκρηξης. Αντίθετα ένα μη απομονωμένο σύστημα επιλέγεται όταν δεν διατρέχουν οι παραπάνω κίνδυνοι. Το μη απομονωμένο σύστημα αποτελείται από:

- Συλλεκτήριο σύστημα (ακίδες-ιστούς, αγωγοί πλέγματος, τεταμένα σύρματα)
- Σύστημα αγωγών καθόδου
- Σύστημα γείωσης

Τρεις βασικές μέθοδοι προτείνονται για τον καθορισμό της θέσης του συλλεκτήριου συστήματος. Αυτές είναι:

- Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας
- Μέθοδος της γωνίας προστασίας και
- Μέθοδος βρόχων.



Σχήμα 6.7 Συλλεκτήριο σύστημα για απομονωμένο και μη απομονωμένο σύστημα.

6.5.1 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας

Η θέση με τη μεγαλύτερη πυκνότητα πεδίου στο έδαφος ή στο κτίριο θα είναι εκείνα τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στο τέλος του καναλιού καθόδου. Η απόσταση μεταξύ του τελευταίου βήματος του καναλιού καθόδου και του σημείου πλήγματος καλείται απόσταση πλήγματος και καθορίζεται από την τιμή του ρεύματος του κεραυνού. Για παράδειγμα, σημεία που ισαπέχουν από το κανάλι καθόδου του κεραυνού έχουν ίσες πιθανότητες να πληγούν από τον κεραυνό, ενώ πιο απομακρυσμένα σημεία έχουν λιγότερες πιθανότητες. Η απόσταση πλήγματος.



Σχήμα 6.8 Απόσταση πλήγματος ή τελευταίο βήμα του καναλιού καθόδου του κεραυνού.

Χρησιμοποιώντας μία υπό κλίμακα κυλιόμενη σφαίρα γίνεται φανερό ποια σημεία του κτιρίου είναι προστατευμένα. Όπου η σφαίρα εφάπτεται με το κτίριο απαιτείται αντικεραυνική προστασία.



Σχήμα 6.9 Εφαρμογή κυλιόμενης σφαίρας.

Η ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας εξαρτάται από το αντικεραυνικό επίπεδο προστασίας και είναι:

- LPL I: 20m
- LPL II: 30 m
- LPL III: 45 m
- LPL IV: 60 m

Αφού βρεθούν οι περιοχές που χρήζουν προστασίας μπορεί να σχεδιαστεί το συλλεκτήριο σύστημα. Αυτό μπορεί να αποτελείται μόνο από ακίδες, τεταμένα σύρματα και πλέγμα ή να είναι ένας συνδυασμός αυτών. Αφού τοποθετηθούν εφαρμόζοντας ξανά τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας διαπιστώνεται η προστασία που παρέχουν, σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10 Προστασία από συλλεκτήριες ράβδους με την εφαρμογή της κυλιόμενης σφαίρας.

Το ύψος των συλλεκτήριων ράβδων είναι συνάρτηση της ακτίνας της κυλιόμενης σφαίρας (r) και της απόστασης μεταξύ των ακίδων (d). Αν οι ακίδες τοποθετούνται σε τετράγωνο η απόσταση που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η διαγώνιος του τετραγώνου. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να υπολογισθεί το βάθος διείσδυσης (p) της σφαίρας.

$$p=r-\sqrt{r^2-(rac{d}{2})^2}$$
, (6.8)

6.5.2 Μέθοδος της γωνίας προστασίας

Η μέθοδος της γωνίας προστασίας είναι μια μαθηματική απλούστευση της μεθόδου κυλιόμενης σφαίρας. Η γωνία προστασίας εξάγεται από την κυλιόμενη σφαίρα και μία συλλεκτήρια ράβδο, (AB). Στη συνέχεια από το σημείο που η σφαίρα εφάπτεται με τη ράβδο (A) φέρεται ευθεία γραμμή που τέμνει το επίπεδο στο σημείο (C). Η ευθεία πρέπει να τέμνει τη σφαίρα ώστε η περιοχή προστασίας να είναι ίση με αυτή που θα προέκυπτε με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας. Η γωνία (α) μεταξύ της ράβδου και του ευθύγραμμου τμήματος (AC) είναι η γωνία προστασίας.



Σχήμα 6.11 Μέθοδος γωνίας προστασίας.

Η γωνία προστασίας ανάλογα με τη στάθμη αντικεραυνικής προστασίας δίνεται στο σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12 Γωνία προστασίας ανάλογα με τη στάθμη αντικεραυνικής προστασίας.

6.5.3 Μέθοδος των βρόχων

Η μέθοδος των βρόχων είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος κυρίως σε επίπεδες επιφάνειες. Και σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικές διαστάσεις βρόχων ανάλογα με τη στάθμη αντικεραυνικής προστασίας, πίνακας 6.5.

Στάθμη αντικεραυνικής προστασίας	Διαστάσεις βρόχων (m)	
I	5x5	
II	10x10	
III	15x15	
IV	20x20	

Πίνακας 6.5 Διαστάσεις βρόχων ανάλογα με τη στάθμη αντικεραυνικής προστασίας.

Η προστατευόμενη περιοχή είναι αυτή που περικλείεται από τον βρόχο. Η προστατευόμενη περιοχή εκτός του βρόχου προκύπτει από τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας ή της γωνίας προστασίας.



Σχήμα 6.13 Μέθοδος των βρόχων.

6.5.4 Σύστημα αγωγών καθόδου

Οι αγωγοί καθόδου οδηγούν το άμεσο κεραυνικό ρεύμα από το συλλεκτήριο σύστημα στη γείωση. Η χωροθέτηση τους εξαρτάται από το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας:

α. Απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

 Αν το συλλεκτήριο σύστημα αποτελείται από τεταμένα σύρματα απαιτείται τουλάχιστον ένας αγωγός καθόδου για κάθε άκρο των συρμάτων.

- Αν το συλλεκτήριο σύστημα σχηματίζει ένα δίκτυο από αγωγούς, απαιτείται ένας τουλάχιστον αγωγός καθόδου για κάθε κατασκευή στήριξης του δικτύου.
- Αν το συλλεκτήριο σύστημα αποτελείται από ράβδους σε ανεξάρτητους ιστούς απαιτείται τουλάχιστον ένας αγωγός καθόδου για κάθε ιστό. Στην περίπτωση ιστών από μέταλλο ή από ενδοσυνδεδεμένο χαλύβδινο οπλισμό δεν είναι αναγκαίος επιπρόσθετος αγωγός καθόδου.

β. Μη απομονωμένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

- Αν το συλλεκτήριο σύστημα αποτελείται από μία ράβδο απαιτείται τουλάχιστον της αγωγός καθόδου. Αν το συλλεκτήριο σύστημα αποτελείται από ανεξάρτητες ράβδους, απαιτείται τουλάχιστον της αγωγός καθόδου για κάθε ράβδο.
- Αν το συλλεκτήριο σύστημα αποτελείται από τεταμένα σύρματα απαιτείται τουλάχιστον της αγωγός καθόδου για κάθε άκρο των συρμάτων.
- Αν το συλλεκτήριο σύστημα αποτελείται από πλέγμα αγωγών απαιτούνται τουλάχιστον δύο αγωγοί καθόδου κατανεμημένοι στην περίμετρο της κατασκευής που χρήζει προστασίας.

Ανάλογα με την επιλεγμένη στάθμη αντικεραυνικής προστασίας η απόσταση μεταξύ των αγωγών μεταβάλλεται, πίνακας 6.6. Οι αγωγοί πρέπει να τοποθετούνται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις γωνίες του κτιρίου και πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους στη στάθμη του εδάφους.

Στάθμη αντικεραυνικής προστασίας	Τυπικές αποστάσεις (m)	
I	10	
II	10	
III	15	
IV	20	

Πίνακας 6.6 Προτεινόμενη απόσταση αγωγών καθόδου.

Οι αγωγοί καθόδου πρέπει να τοποθετούνται ευθείς και κατακόρυφοι ώστε να εξασφαλίζεται η συντομότερη και άμεση όδευση προς τη γη. Δεν πρέπει να εγκαθίστανται μέσα σε οριζόντιες ή κατακόρυφες υδρορροές ακόμα και αν καλύπτονται από μονωτικό υλικό. Η υγρασία που υπάρχει στις υδρορροές επιτείνει τη διάβρωση των αγωγών καθόδου. Επίσης συνίσταται να μην τοποθετούνται κοντά σε πόρτες ή παράθυρα.

Ως αγωγοί καθόδου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και φυσικά στοιχεία όπως:

83

- Μεταλλικές εγκαταστάσεις με την προϋπόθεση ότι η ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ των διαφόρων τμημάτων είναι αξιόπιστη και οι διαστάσεις τους είναι τουλάχιστον ίσες με τους τυποποιημένους αγωγούς καθόδου.
- Μεταλλικός σκελετός της κατασκευής και
- Ενδοσυνδεδεμένος χαλύβδινος σκελετός της κατασκευής.

6.5.5 Σύστημα γείωσης

Το σύστημα γείωσης είναι απαραίτητο για τη διάχυση του κεραυνικού ρεύματος στο έδαφος. Η γενική απαίτηση του συστήματος γείωσης είναι να έχει τη μικρότερη δυνατή τιμή αντίστασης. Εκτός της μικρής αντίστασης πρέπει να ληφθούν υπόψη η ελαχιστοποίηση της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής καθώς επίσης και η μακρόχρονη καλή λειτουργία του συστήματος η οποία εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα των υλικών και των συνδέσεων.

Για συστήματα γειώσεων εφαρμόζονται δύο βασικοί τύποι διατάξεων ηλεκτροδίων γείωσης:

Διάταξη τύπου Α

Η διάταξη αυτού του τύπου περιλαμβάνει οριζόντια ή κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης συνδεδεμένα σε κάθε αγωγό καθόδου. Υπάρχει περιμετρικός δακτύλιος που συνδέει τους αγωγούς καθόδου και έρχεται σε επαφή με το έδαφος σε μήκος λιγότερο από το 80% του συνολικού μήκους.

Στη διάταξη τύπου Α ο ελάχιστος αριθμός ηλεκτροδίων γείωσης πρέπει να είναι δύο. Το ελάχιστο μήκος κάθε ηλεκτροδίου είναι *Ι*₁ για ακτινικά οριζόντια ηλεκτρόδια ή *Ι*₁/2 για κατακόρυφα ή κεκλιμένα ηλεκτρόδια, όπου *Ι*₁ είναι το ελάχιστο μήκος ακτινικού ηλεκτροδίου, σχήμα 6.14.



Σχήμα 6.14 Ελάχιστο μήκος των ηλεκτροδίων γείωσης ανάλογα με τη στάθμη προστασίας.

Διάταξη τύπου Β

Η διάταξη αυτού του τύπου αποτελείται από περιμετρικό ηλεκτρόδιο γείωσης, εξωτερικά της κατασκευής, με τουλάχιστον το 80% του συνολικού μήκους του σε επαφή με το έδαφος ή από ένα ηλεκτρόδιο θεμελιακής γείωσης.

Για περιμετρική ή θεμελιακή γείωση η μέση ακτίνα *r* της περιοχής που περικλείεται από την περιμετρική ή τη θεμελιακή γείωση δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή *l*₁, σχήμα 6.14.

Όταν η απαιτούμενη τιμή του I_1 είναι μεγαλύτερη από την πρόσφορη τιμή του r, πρέπει να προστεθούν επιπλέον ακτινικά I_r ή κατακόρυφα I_v ηλεκτρόδια που τα μήκη τους δίνονται από τις σχέσεις: $I_r = I_1$ - r και $I_v = (I_1 - r)/2$.

Ο αριθμός των επιπρόσθετων ηλεκτροδίων δεν πρέπει να είναι μικρότερος από τον αριθμό των αγωγών καθόδου με ελάχιστο πλήθος δύο.



Σχήμα 6.15 Τύποι γείωσης.

Ο εξωτερικός δακτύλιος γείωσης πρέπει να τοποθετείται κατά προτίμηση μέσα στο έδαφος σε βάθος τουλάχιστον 0,5m και σε απόσταση τουλάχιστον 1m από τους τοίχους. Τα ηλεκτρόδια γείωσης πρέπει να εγκαθίστανται έξω από τον χώρο που χρήζει προστασίας, σε βάθος τουλάχιστον 0,5m και να είναι κατανεμημένα όσο το δυνατόν ομοιόμορφα για να ελαχιστοποιούνται τα φαινόμενα ηλεκτρικής σύζευξης μέσα στο έδαφος. Τα θαμμένα ηλεκτρόδια γείωσης πρέπει να εγκαθίστανται έτσι ώστε να επιτρέπεται ο έλεγχος κατά τη διάρκεια της κατασκευής του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Το βάθος τοποθέτησης και ο τύπος των ηλεκτροδίων γείωσης πρέπει να ειναι άστε να ειναι τέτοια ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις από διάβρωση, ξήρανση ή πάγωμα του εδάφους, για να σταθεροποιείται η ισοδύναμη αντίσταση γείωσης. Το πρώτο μέτρο ενός κατακόρυφου ηλεκτροδίου γείωσης συνίσταται να μη θεωρείται ενεργό σε συνθήκες πάγου. Για απομονωμένο συμπαγή βράχο συνίσταται μόνο η διάταξη τύπου Β.

Ο αριθμός των συνδέσεων κατά μήκος των αγωγών πρέπει να είναι ο ελάχιστος δυνατός. Οι συνδέσεις πρέπει να εξασφαλίζονται με μπρουτζοκόλληση, ηλεκτροσυγκόλληση, συμπίεση ή βίδωμα. Οι συλλεκτήριοι αγωγοί και οι αγωγοί καθόδου πρέπει να στερεώνονται καλά ώστε ηλεκτροδυναμικές ή τυχόν μηχανικές καταπονήσεις να μην προκαλούν θραύση ή χαλάρωση των αγωγών.

6.5.6 Εξωτερικές ισοδυναμικές συνδέσεις

Η εξίσωση δυναμικών επιτυγχάνεται την γεφύρωση της εξωτερικής αντικεραυνικής προστασίας με τον μεταλλικό σκελετό της κατασκευής, με τις μεταλλικές εγκαταστάσεις με τα εξωτερικά αγώγιμα τμήματα και με τις ηλεκτρικές και τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις που βρίσκονται στο εσωτερικό της κατασκευής που χρήζει προστασίας.

Η ισοδυναμική σύνδεση πραγματοποιείται με:

- Συνδετήριους αγωγούς, όπου η ηλεκτρική συνέχεια δεν εξασφαλίζεται με φυσικές συνδέσεις και
- Περιοριστή υπέρτασης (SPD), όπου δεν επιτρέπεται άμεση γεφύρωση.

Η ισοδυναμική σύνδεση για μεταλλικές εγκαταστάσεις πρέπει να γίνεται στο υπόγειο ή περίπου στη στάθμη του εδάφους. Οι συνδετήριοι αγωγοί πρέπει να συνδέονται σε ένα ζυγό εξίσωσης δυναμικών εύκολα επισκέψιμο. Ο ζυγός πρέπει να συνδέεται στο σύστημα γείωσης. Σε μεγάλες κατασκευές μπορούν να εγκατασταθούν περισσότεροι ζυγοί υπό την προϋπόθεση ότι συνδέονται. Όπου δεν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις μόνωσης η ισοδύναμη σύνδεση πρέπει να γίνεται μόνο στη στάθμη του εδάφους. Για εξωτερικά τμήματα η ισοδυναμική σύνδεση γίνεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο εισόδου της κατασκευής που χρήζει προστασίας.

6.5.7 Απόσταση διαχωρισμού ΣΑΠ

Η απόσταση απομόνωσης μεταξύ του ΣΑΠ και των αγώγιμων μεταλλικών επιφανειών ελαχιστοποιεί κάθε πιθανότητα διάχυσης του κεραυνικού ρεύματος στο κτίριο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί τοποθετώντας τους αγωγούς καθόδου σε απόσταση ασφαλείας από κάθε αγώγιμο υλικό. Η απόσταση διαχωρισμού ή απομόνωσης δίνεται από τη σχέση:

$$s = k_i * \frac{kc}{km} * l$$
, (6.9)

όπου, k;εξαρτάται από την επιλεγόμενη στάθμη προστασίας, πίνακας 6.6,

Πίνακας 6.7 Επιλογή	συντελεστή	k _i ανάλογα	με τη ΣΑΠ.
----------------------------	------------	------------------------	------------

Στάθμη αντικεραυνικής προστασίας	ki
I	0,08
II	0,06
III & IV	0,04

 k_c εξαρτάται από το ρεύμα του κεραυνού που ρέει στους αγωγούς καθόδου, πίνακας 6.7, ή πιο αναλυτικά από τον τύπο: $k_c = \frac{1}{2n} + 0,1 + 0,2 * \sqrt[3]{\frac{c}{h}}$, όπου *n* ο αριθμός των αγωγών καθόδου, *c* η απόσταση μεταξύ των αγωγών καθόδου και *h* η απόσταση από τους περιμετρικούς αγωγούς.

Πίνακας 6.8 Επιλογή συντελεστή k_c.

Αριθμός αγωγών καθόδου-η	kc	
1	1	
2	0,5÷1	
4 και περισσότεροι	1÷1/n	

k_m εξαρτάται από το διαχωριστικό υλικό, πίνακας 6.8 και

Πίνακας 6.9 Επιλογή συντελεστή k_m.

Διαχωριστικό Υλικό	k _m
Αέρας	1
Μπετόν, τούβλα	0,5

/ είναι το μήκος του αγωγού καθόδου από το σημείο που πρόκειται να ελεγχθεί η γειτνίαση μέχρι το πλησιέστερο σημείο ισοδυναμικής σύνδεσης.

6.6 Εσωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας

Το εσωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να αποκλείει τη δημιουργία επικίνδυνου σπινθήρα μέσα στην κατασκευή που χρήζει προστασίας λόγω της ροής του ρεύματος του κεραυνού στο εξωτερικό σύστημα προστασίας. Οι επικίνδυνοι σπινθήρες αποφεύγονται με τη βοήθεια ισοδυναμικών συνδέσεων και της μόνωσης μεταξύ τμημάτων.

6.6.1 Ισοδυναμικές συνδέσεις για ηλεκτρικές και τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις.

Οι ισοδυναμικές συνδέσεις για ηλεκτρικές και τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις με συνδετήριους αγωγούς πρέπει να γίνονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο εισόδου της κατασκευής που χρήζει προστασίας και μόνο όταν πρόκειται για θωρακισμένα καλώδια η καλώδια που οδεύουν μέσα σε μεταλλικό περίβλημα. Οι ισοδυναμικές συνδέσεις είναι απαραίτητες αν η διατομή των θωρακίσεων είναι μικρότερη από την ελάχιστη διατομή S_{Cmin}. Η διατομή δίνεται από τον τύπο:

$$S_{Cmin} = \frac{I_{f*\rho_C*L_C}}{U_W} * 10^6$$
, (6.9)

Όπου: Ιf το ρεύμα που διαρρέει την ηλεκτρική θωράκιση σε kA

 ρ_{c} η ειδική αντίσταση της ηλεκτρικής θωράκισης

L_c το μήκος του καλωδίου σε μέτρα και

Uw η κρουστική τάση διάσπασης του καλωδίου σε kV.

6.6.2 Ισοδυναμικές συνδέσεις με απαγωγό-περιοριστή υπέρτασης (SPD).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ισοδυναμικές συνδέσεις με SPD πραγματοποιούνται εκεί όπου δεν επιτρέπεται άμεση γεφύρωση. Ο απαγωγός υπέρτασης είναι μια συσκευή η οποία περιορίζει τις παροδικές υπερτάσεις και ρεύματα τα οποία μπορούν να δημιουργηθούν από πλήγμα κεραυνού.

Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας ο απαγωγός υπέρτασης χαρακτηρίζεται από μία πολύ υψηλή αντίσταση μεταξύ των άκρων του. Όταν στο δίκτυο που είναι συνδεδεμένος εφαρμοστεί μία κρουστική τάση, ο απαγωγός βραχυκυκλώνει τα άκρα του, σε χρόνο της τάξης των ns, μειώνοντας έτσι τις διαφορές δυναμικού μεταξύ των ηλεκτρικά μονωμένων αγωγών και μεταξύ των γειωμένων μερών, σε στάθμη που πρέπει να είναι χαμηλότερη της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών της εγκατάστασης. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση προστασίας *U_p* και είναι το βασικότερο κριτήριο επιλογής του SPD. Όταν η τάση επανέλθει στα φυσιολογικά επίπεδα ο SPD επανέρχεται με τη σειρά του στην αρχική φυσιολογική του θέση.

Εξαιτίας της ρευματικής ποικιλότητας του κεραυνικού πλήγματος και τη διαφορετική ικανότητα των SPD για προστασία, τοποθετούνται δύο ή περισσότερες συσκευές στο ίδιο κύκλωμα ώστε να διαμοιράζεται η ενέργεια μεταξύ τους ανάλογα με την ικανότητα απορρόφησης. Η διάταξη αυτή καλείται συντονισμένη διάταξη SPD.

6.7 Σύστημα προστασίας από ηλεκτρομαγνητικό παλμό.

Με τον όρο κεραυνικό ηλεκτρομαγνητικό παλμό (Lightning Electromagnetic Impulse-LEMP) συνοψίζονται τα παροδικά ρεύματα και υπερτάσεις καθώς και οι επιδράσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που οφείλονται στον κεραυνό.

Ένα σύστημα προστασίας από ηλεκτρομαγνητικό παλμό (LPMS) ορίζεται ένα σύνολο προστατευτικών μέτρων για την προστασία των εσωτερικών ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων της κατασκευής από ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Τα απαραίτητα μέτρα συνοψίζονται σε:

- Γείωση και ισοδυναμική σύνδεση, όπως αναλύθηκε παραπάνω
- Μαγνητική θωράκιση και δρομολόγηση καλωδιώσεων

Η μαγνητική θωράκιση μειώνει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και το μέγεθος των εσωτερικών υπερτάσεων και η δρομολόγηση ελαχιστοποιεί τις υπερτάσεις αυτές. Για την ικανότητα προστασίας των συσκευών από μαγνητικά πεδία εφαρμόζονται δοκιμές σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 61000-4-9 και IEC 61000-4-10. Εξοπλισμός που δεν συμμορφώνεται με τις δοκιμές ραδιοσυχνοτήτων και ατροσίας από παρεμβολές όπως ορίζονται από τα σχετικά πρότυπα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), ενδεχομένως κινδυνεύουν από απευθείας μαγνητικά πεδία.

Η χωρική θωράκιση ορίζει την προστατευόμενη ζώνη η οποία μπορεί να είναι όλο το κτίριο ή μέρος αυτού. Μπορεί να είναι δικτυωτές ή συνεχείς μεταλλικές θωρακίσεις ή ακόμα και φυσικά μεταλλικά μέρη του κτιρίου.



Σχήμα 6.16 Μαγνητική θωράκιση και συντονισμένη προστασία με SPD.

Στην πράξη θωράκιση δημιουργείται από φυσικά στοιχεία του κτιρίου όπως ο οπλισμός στα πατώματα και οροφές, το μεταλλικό σκελετό, μεταλλικές οροφές και μεταλλικές προσόψεις. Αποτελεσματική θωράκιση απαιτεί άνοιγμα πλέγματος μικρότερο από 5m. Για εσωτερικές LPZ θωράκιση επιτυγχάνεται είτε τοποθετώντας επί τούτου θωράκιση είτε χρησιμοποιώντας μεταλλικά περιβλήματα ή το μεταλλικό περίβλημα των ίδιων των συσκευών.

Η θωράκιση των εσωτερικών καλωδιώσεων ενδεχομένως να μην επιτρέπεται ή να υπάρχει. Για το λόγο αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταλλικοί οδηγοί και το μεταλλικό περίβλημα των συσκευών. Μέσα σε αυτού του είδους τα κανάλια πρέπει να διαχωρίζονται οι ηλεκτρικές γραμμές από τις γραμμές πληροφορίας για την αποφυγή παρεμβολών.

Μια σωστά μελετημένη όδευση των καλωδίων περιορίζει σημαντικά τις περιοχές επαγόμενων τάσεων που δημιουργούν οι σχηματιζόμενοι από τα καλώδια βρόχοι. Έτσι, κλειστές περιοχές καλωδίων πρέπει να περιορίζονται κατά το δυνατό περισσότερο και οι αγωγοί πρέπει να οδηγούνται όσο το δυνατό πιο κοντά στους προστατευτικούς αγωγούς συνδέσεων. Τα μέτρα που λαμβάνονται για την όδευση των καλωδίων είναι πολύ σημαντικά για τον περιορισμό υπερτάσεων από κεραυνικό πλήγμα.

Στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος στα φωτοβολταϊκά πλαίσια μια τάση δημιουργείται μεταξύ της θετικής και της αρνητικής γραμμής του συστήματος. Στις περισσότερες δυσμενείς περιπτώσεις μια παραγόμενη τάση δημιουργείται σε κάθε πλαίσιο που είναι επιπρόσθετη στην τάση του βρόχου όλης της σειράς. Αυτή η προκληθείσα τάση μεταβιβάζεται άμεσα στην DC είσοδο των ηλεκτρικών τμημάτων και μπορεί να προκαλέσει ζημιά.





Σχήμα 6.17 Όδευση καλωδίων με τη δημιουργία βρόχου (αριστερά) και την ελάττωση του βρόχου (δεξιά).

• Συντονισμένη προστασία SPD, όπως αναλύθηκε παραπάνω.

6.8 Μελέτη αντικεραυνικής προστασίας

Το επίπεδο αντικεραυνικής προστασίας του κτιρίου στην οροφή του οποίου θα τοποθετηθούν τα ΦΒ πλαίσια είναι LPL III. Η ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας για αυτό το επίπεδο προστασίας είναι r=45m. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας βρίσκονται οι περιοχές της οροφής που θεωρούνται προστατευμένες, Παράρτημα Ζ. Όπως φαίνεται στο παράρτημα το μεγαλύτερο τμήμα της οροφής προστατεύεται λόγω των δωμάτων που βρίσκονται σε αυτή. Οι εξαερισμοί που βρίσκονται πάνω στα δώματα διαθέτουν αλεξικέραυνα οπότε θεωρούνται προστατευμένα τα δώματα (1) και (2).

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των βρόχων τοποθετείται πλέγμα διαστάσεων 15x15m (LPL III) τόσο στην οροφή του κτιρίου όσο και στα δώματα. Στο σχήμα έχουν τοποθετηθεί και οι αγωγοί καθόδου (πράσινες τελείες). Η απόστασή τους είναι περίπου 15m σύμφωνα με τον πίνακα Y.6 όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Η τοποθέτηση αλεξικέραυνων θεωρείται υπερβολική για την προστασία των πλαισίων που βρίσκονται εκτός της προστατευμένης περιοχής καθώς η πιθανότητα κεραυνικού πλήγματος είναι μικρή. Παρόλο αυτά στο παράρτημα Ζ παρατίθεται η χωροθέτηση τους.

Τα αλεξικέραυνα 1,2,3 έχουν ύψος h=3m. Η απόσταση 1-2 είναι d=17,414m και το βάθος εισχώρησης:

$$p_{1-2} = R - \sqrt{R^2 - (\frac{d}{2})^2} = 0.85 \text{ m},$$

άρα το ύψος που μπορεί να φτάσει το κεραυνικό πλήγμα είναι:

αρκετά υψηλότερο από τα 1,4m που θεωρώ ως το ψηλότερο σημείο του Φ/Β πλαισίου. Με τον ίδιο τρόπο βρίσκω ότι το βάθος εισχώρησης για τα αλεξικέραυνα 2-3 (d=22,676m) είναι p₂₋₃=1,45m. Άρα το κεραυνικό πλήγμα φτάνει ως το ύψος

*s*₂₋₃=3-1,45=1,55m>1,4m του πλαισίου.

Το 4° αλεξικέραυνο τοποθετείται πάνω στον εξαερισμό ύψους 4,8m. Η απόσταση του πιο απομακρυσμένου πλαισίου που πρέπει να προστατέψει είναι d/2=19,82m. Χρησιμοποιώ d/2 και όχι d γιατί υπολογίζω την προστατευμένη επιφάνεια με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας από ένα και όχι δύο αλεξικέραυνα. Σε αυτή την περίπτωση το βάθος εισχώρησης είναι:

 $p=45-\sqrt{45^2-19,82^2}=4,6m$, άρα το ύψος της ακίδας πρέπει να είναι τουλάχιστον: h+(4,8-4,6)>1,4 δηλαδή h>1,6m. Με τον κόκκινο κύκλο επισημαίνονται οι περιοχές που προστατεύονται από τα αλεξικέραυνα που τοποθετούνται.

Η ελάχιστη απόσταση των αλεξικέραυνων από τα πλαίσια ή οποιοδήποτε άλλο αγώγιμο μέσο ώστε σε περίπτωση πλήγματος το ρεύμα να μην «εισχωρήσει» σε αυτά δίνεται από τον τύπο $s=k_i*\frac{kc}{km}*I$, όπου $k_i=0,04$, $k_c=1$, $k_m=1$ και l=20m.

Με τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει, s=0,8m απόσταση που τηρείται μεταξύ των ακίδων και των πλαισίων.

Κεφάλαιο 7: Οικονομική Αξιολόγηση Επένδυσης

7.1 Εισαγωγή

Επένδυση είναι η δέσμευση ενός χρηματικού ποσού (κεφάλαιο) για ένα χρονικό διάστημα με σκοπό αυτό να αποφέρει πρόσθετα κεφάλαια (κέρδος) στον επενδυτή. Κάθε επενδυτικό σχέδιο πρέπει να εξετασθεί ως προς τη βιωσιμότητά του πριν πραγματοποιηθεί. Για το λόγο αυτό προηγείται η χρηματοοικονομική ανάλυση η οποία στοχεύει στην αποδοχή ή απόρριψη του σχεδίου.

Η εκτίμηση για τη βιωσιμότητα της επένδυσης γίνεται για διάστημα ίσο με τη διάρκεια ζωής της επένδυσης. Η χρηματοοικονομική αξιολόγηση βασίζεται σε οικονομικές, εμπορικές και παραγωγικές παραδοχές και περιλαμβάνει δύο βασικές διαδικασίες. Η πρώτη είναι ο εντοπισμός όλων των εσόδων και εξόδων που σχετίζονται με την επένδυση και η δεύτερη είναι η χρήση μεθόδων και κριτηρίων με τα οποία αξιολογούνται.

7.2 Οικονομικοί Δείκτες

Για την οικονομική αξιολόγηση μιας επένδυσης χρησιμοποιούνται διάφοροι δείκτες με πιο δημοφιλείς την Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV-KΠΑ), τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR-EBA) και το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (LCOE).

7.2.1 Καθαρή Παρούσα Αξία (NVP-KΠΑ)

Η Καθαρή Παρούσα Αξία μιας επένδυσης είναι η αξία αυτής ανηγμένη στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής της λειτουργίας. Εκφράζει την αξία που προκύπτει από την προεξόφληση στο παρόν όλων των ετήσιων καθαρών χρηματορροών που προβλέπονται σε ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα ζωής μίας επένδυσης. Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος και εφαρμόζοντας τις τεχνικές της κεφαλαιοποίησης και προεξόφλησης υπολογίζεται η παρούσα χρηματική αξία μελλοντικών χρηματικών ροών που προκύπτουν από μία επένδυση.

Κρίσιμη παράμετρος είναι το επιτόκιο προεξόφλησης. Το επιτόκιο προεξόφλησης είναι μια επενδυτική παράμετρος που αντανακλά την ελάχιστη αποδεκτή απόδοση μιας επένδυσης. Ενσωματώνει το επιθυμητό επενδυτικό επιτόκιο μια ασφαλούς επένδυσης (κόστος ευκαιρίας) προσαυξημένο με έναν αποδεκτό συντελεστή ασφαλείας (κόστος ρίσκου).

Αν η καθαρή παρούσα αξία είναι μεγαλύτερη του μηδενός (NVP>0) η απόδοση της επένδυσης είναι μεγαλύτερη από το επιτόκιο προεξόφλησης και η επένδυση εγκρίνεται.

Αν η καθαρή παρούσα αξία είναι μικρότερη του μηδενός (NVP<0) η απόδοση της επένδυσης είναι μικρότερη από το επιτόκιο προεξόφλησης και η επένδυση απορρίπτεται.

Αν η καθαρή παρούσα αξία είναι ίση με μηδέν (NVP=0) η επένδυση είναι οριακή και απαιτούνται αναλύσεις ευαισθησίας και άλλα κριτήρια πλην του δείκτη NVP.

Η Καθαρή Παρούσα Αξία δίνεται από τη σχέση:

$$NVP = -K_o + \sum_{t=1}^{N} \frac{KTP_t}{(1+k)^t} + \frac{YA_N}{(1+k)^N}$$
, (7.1)

Όπου Κο: το κόστος της επένδυσης,

ΚΤΡ_t: η Καθαρή Ταμειακή Ροή του έτους t,

k: το επιτόκιο προεξόφλησης

Ν: η διάρκεια της επένδυσης σε έτη και

ΥΑ_N: η υπολειμματική αξία της επένδυσης στο N-οστό έτος.

7.2.2 Εσωτερικός Δείκτης Απόδοσης (EBA-Internal Rate of Return/IRR)

Ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης είναι το επιτόκιο αναγωγής ή προεξόφλησης στο οποίο Η Καθαρή Παρούσα Αξία μηδενίζεται. Με αυτή την τεχνική αναζητείται εκείνο το κόστος κεφαλαίου που θα καθιστούσε μηδενική την παρούσα αξία της επένδυσης. Ο δείκτης συσχετίζει δηλαδή την απόδοση της επένδυσης σε σχέση με το κόστος κεφαλαίου. Ο Εσωτερικός Δείκτης Απόδοσης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$-K_o + \sum_{t=1}^{N} \frac{KTP_t}{(1+IRR)^t} = 0$$
, (7.2)

Με βάση τον δείκτη αυτόν η επένδυση αξιολογείται θετικά αν ο δείκτης προκύπτει μεγαλύτερος από το κόστος κεφαλαίου.

Στα θετικά της μεθόδου του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης περιλαμβάνεται το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη την χρονική αξία του χρήματος και στηρίζεται στην έννοια της προεξόφλησης των καθαρών εισροών και εκροών της επένδυσης. Από την άλλη πλευρά, το σημαντικότερο μειονέκτημά του είναι ότι σε ορισμένες περιπτώσεις παρέχει πολλαπλές λύσεις, δηλαδή περισσότερα του ενός εσωτερικά επιτόκια απόδοσης.

Γενικά, η μέθοδος του εσωτερικού δείκτη απόδοσης συνιστάται στις περιπτώσεις που η επιλογή ή απόρριψη επενδυτικών σχεδίων βασίζονται στο κόστος του κεφαλαίου.

7.2.3 Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (LCOE)

Ο δείκτης του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας (Levelised Cost of Energy-LCOE) εκφράζει τη μέση τιμή με την οποία πρέπει να αποζημιώνεται η παραγωγή του σταθμού ώστε να αποσβένυται το αρχικό κόστος επένδυσης και το σύνολο των λειτουργικών εξόδων. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην ελάχιστη αποδεκτή τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, προκειμένου η επένδυση να είναι βιώσιμη.

Ο δείκτης του σταθμισμένου κόστους ενέργειας υπολογίζεται ως το πηλίκο των συνολικών δαπανών προς την ολική παραγωγή ενέργειας για όλη την διάρκεια ζωής της επένδυσης, εκφρασμένα σε παρούσες αξίες. Συνήθως για τον υπολογισμό του γίνεται ανάλυση ως προς το σύνολο της επένδυσης, οπότε μια ευρέως χρησιμοποιούμενη σχέση είναι η εξής:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^{N} \frac{I_t + A\Delta_t}{(1+k_t)^t} - \frac{YA_N}{(1+k_t)^N}}{\sum_{t=1}^{N} \frac{E_t}{(1+k_t)^t}}, (7.3)$$

Όπου It: το κόστος της επένδυσης κατά το έτος t,

 $\Lambda \Delta_t$: οι λειτουργικές δαπάνες κατά το έτος t,

YAN: η υπολειμματική αξία της επένδυσης στο N-οστό έτος και

Et: η ετήσια παραγωγή ενέργειας.

Όταν το μόνο επενδυόμενο κεφάλαιο είναι το αρχικό κόστος της εγκατάστασης ο δείκτης του σταθμισμένου κόστους ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$LCOE = \frac{Ko + \sum_{t=1}^{N} \frac{\Delta \Delta_{t}}{(1+k_{t})^{t}} - \frac{YA_{N}}{(1+k_{t})^{N}}}{\sum_{t=1}^{N} \frac{E_{t}}{(1+k_{t})^{t}}}, (7.4)$$

Όταν περιλαμβάνεται το συνολικό επενδυτικό κόστος, τα ετήσια λειτουργικά έξοδα, η τελική υπολειμματική αξία καθώς και τα φορολογικά έξοδα της επιχείρησης το σταθμισμένο κόστος ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$LCOE = \frac{Ko + \sum_{t=1}^{N} \frac{-A_t * \Phi \Sigma + A\Delta_t (1 - \Phi \Sigma)}{(1 + k_t)^t} - \frac{YA_N}{(1 + k_t)^N}}{(1 - \Phi \Sigma) * \sum_{t=1}^{N} \frac{E_t}{(1 + k_t)^t}}, (7.5)$$

Όπου Κο: το κόστος της επένδυσης,

Α_t: η απόσβεση της επένδυσης,

ΦΣ: ο φορολογικός συντελεστής,

ΛΔ: οι λειτουργικές δαπάνες

YAN: η υπολειμματική αξία της επένδυσης στο N-οστό έτος και

E_t: η ετήσια παραγωγή ενέργειας.

7.3 Καθαρές Ταμειακές Ροές (ΚΤΡ)

Η αξιολόγηση επενδύσεων χρησιμοποιεί την έννοια των Καθαρών Ταμειακών Ροών (KTP). Η KTP κάθε έτους είναι η διαφορά μεταξύ των εσόδων της επιχείρησης από τις πωλήσεις (ταμειακές εισροές) και των πληρωμών για τους διάφορους συντελεστές παραγωγής και τη διάθεση των προϊόντων, καθώς επίσης και για την πληρωμή του φόρου εισοδήματος (ταμειακές εκροές). Οι Καθαρές Ταμειακές Ροές δίνονται από τη σχέση:

KTP_t $=E_t-ΛΔ_t-Φ_t-ΔΔ_t=E_t-ΛΔ_t-Φ_t-T_t-X_t, (7.6) όπου:$

 E_t : Τα έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας.

ΛΔ_t: Οι λειτουργικές δαπάνες της επένδυσης που περιλαμβάνουν τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης (O&M – Operation and Maintenance), τα ασφαλιστικά κόστη, τα μισθολογικά κόστη και την καταβολή του 3% των ετήσιων ακαθάριστων εσόδων στην τοπική αυτοδιοίκηση και κοινωνία (απαλλάσσονται οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί) σύμφωνα με τον υφιστάμενο νόμο.

 A_t : Οι προβλεπόμενες αποσβέσεις για την επένδυση.

ΦΣ: Ο φορολογικός συντελεστής για τον υπολογισμό του φόρου εισοδήματος.

Φτ: Οι φόροι που καταβάλλει η επιχείρηση,

ΔΔt: Η δόση του δανείου σε περίπτωση ύπαρξης δανειακών κεφαλαίων,

Tt: Ο τόκος που καταβάλλεται ετησίως σε περίπτωση ύπαρξης δανειακών κεφαλαίων.

X_t: Το χρεολύσιο που καταβάλλεται ετησίως σε περίπτωση ύπαρξης δανειακών κεφαλαίων.

Θεωρώντας εξόφληση με σταθερά τοκοχρεολύσια, στο τέλος κάθε έτους καταβάλλεται σταθερή δόση ΔΔ_t και από έτος σε έτος ο τόκος μειώνεται ενώ το χρεολύσιο αυξάνει. Τα χρεολύσια (X_t) κάθε έτους υπολογίζονται ως εξής:

$$X_t = \frac{k_d}{(1+k_d)^{N_d}-1} * K_d * (1+k_d)^{t-1}$$
, (7.7) όπου:

 k_d το επιτόκιο του δανείου, N_d η περίοδος εξόφλησης του δανείου σε έτη και K_d το δανειακό κεφάλαιο.

Τα τοκοχρεολύσια κάθε έτους (ΔΔ_t) είναι ίσα μεταξύ τους και υπολογίζονται από την εξίσωση: $\Delta \Delta_t = \left(k_d + \frac{k_d}{(1+k_d)^{N_t}-1}\right) * K_d$, (7.8).

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

$$\boldsymbol{T_t}=\Delta\Delta_t-\boldsymbol{X_t},\ (7.9)$$

Ο υπολογισμός των φόρων που πληρώνει η επιχείρηση γίνεται αφού από τα ακαθάριστα έσοδά της επιχείρησης αφαιρεθούν οι λειτουργικές δαπάνες, οι αποσβέσεις και οι τόκοι των δανείων. Έτσι οι φόροι δίνονται από τον τύπο:

$$\boldsymbol{\Phi}_t = (E_t - \Lambda \Delta_t - A_t - T_t)^* \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\Sigma} (7.10)$$

Όταν η μέθοδος απόσβεσης είναι γραμμική, η ετήσια απόσβεση (A_t) δίνεται από τον τύπο: $A_t = \frac{K_o}{N_A}$, (7.11) όπου N_A τα έτη απόσβεσης.

Τελικά οι Καθαρές Ταμειακές Ροές δίνονται από τη σχέση:

KTP_t=(E_t - $\Lambda \Delta_t$ - A_t - T_t)(1- $\Phi \Sigma$)+ A_t - X_t , (7.11)

7.4 Οικονομική Αξιολόγηση της Παρούσας Επένδυσης

Για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης θεωρήθηκε ότι η διάρκεια ζωής της είναι 25 έτη, δεν καταβάλλει φόρους διαθέτει ολόκληρο το κεφάλαιο χωρίς δανεισμό και η υπολειμματική αξία της επένδυσης στο 25° έτος είναι μηδενική. Οι αναστροφείς θεωρείται ότι αντικαθίστανται στα δώδεκα χρόνια ενώ το ετήσιο κόστος συντήρησης ανέρχεται στα 500€. Το συνολικό αρχικό κόστος της επένδυσης φαίνεται στον πίνακα 7.1.

Υλικό	Τεμάχιο	Τιμή Μονάδας (€)	Σύνολο (€)
ΦΒ πλαίσιο	216	0.065/\//p	67202
"SunFortePM325B00"	210	0,90€/ wp	07592
Αναστροφέας ΚΑCΟ	2	E12E	10270
Powador 36TL3	2	5155	10270
Βάσεις στήριξης	-	-	10000
Καλώδια	-	-	1400
Ηλεκτρολογικός			5000
εξοπλισμός	-	-	5000
Λοιπά	-	-	15000
		Σύνολο	109062

Πίνακας 7.1 Αρχικό κόστος επένδυσης

Στον πίνακα 1.3 φαίνονται οι τιμές πώλησης της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μικρότερες των 100kWp. Η τιμή πώλησης σε περίπτωση σύναψης συμβολαίου τον Φεβρουάριο του 2015 είναι 0,115 €/kWh. Επίσης, στον πίνακα 5.12 καταγράφεται η παραγόμενη ηλιακή ενέργεια για τα 25 έτη. Θεωρείται επιτόκιο προεξόφλησης k=4%.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω οι καθαρές ταμειακές ροές δίνονται από τη σχέση *KTP_t=E_t-ΛΔ_t*. Οι οικονομικοί δείκτες της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NVP), του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (IRR) και του Σταθμισμένου Κόστους Ενέργειας (LCOE) υπολογίζονται με την εφαρμογή των τύπων (7.1), (7.2) και (7.4) και παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2.

Προκύπτει, λοιπόν, ότι η Καθαρή Παρούσα Αξία είναι NVP= 14027,22 € και η επένδυση εγκρίνεται. Ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης και το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας είναι IRR=5% και LCOE=0,103€/kWh αντίστοιχα.

Πίνακας 7.2 Οικονομικοί	. Δείκτες της Επένδυσης
--------------------------------	-------------------------

Έτος (t)	Παραγόμενη Ενέργεια (kWh)	Τιμή Πώλησης (€/kWh)	Έσοδα (E _t)	Λειτουργικές Δαπάνες (ΛΔ _t)	Καθαρή Ταμειακή Ροή (ΚΤΡ _t)	Καθαρή Παρούσα Αξία (NVP)	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR)	Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (LCOE)
1	81733,22	_	9399,32	1090602 (αρχικό κόστος) 500,00	8899,32			
2	80907,63		9304,38	500,00	8804,38			
3	80082,04		9209,44	500,00	8709,44			
4	79256,46		9114,49	500,00	8614,49			
5	78430,87		9019,55	500,00	8519,55			
6	78100,63		8981,57	500,00	8481,57			
7	77770,40		8943,60	500,00	8443,60			
8	77440,16		8905,62	500,00	8405,62			
9	77109,93		8867,64	500,00	8367,64	-		
10	76779,69		8829,66	500,00	8329,66			
11	76449,46		8791,69	500,00	8291,69			
12	76119,22	0,115	8753,71	10770,00	-2016,29	14027,22€	5%	0,103€/kWh
13	75788,99		8715,73	500,00	8215,73			
14	75458,75		8677,76	500,00	8177,76			
15	75128,52		8639,78	500,00	8139,78			
16	74798,28		8601,80	500,00	8101,80			
17	74468,05		8563,83	500,00	8063,83			
18	74137,81		8525,85	500,00	8025,85			
19	73807,57		8487,87	500,00	7987,87			
20	73477,34		8449,89	500,00	7949,89	-		
21	73147,10		8411,92	500,00	7911,92			
22	72816,87		8373,94	500,00	7873,94			
23	72486,63		8335,96	500,00	7835,96			
24	72156,40		8297,99	500,00	7797,99			
25	71826,16		8260,01	500,00	7760,01			

Α. Σκιάσεις που προκαλούνται από τα δώματα και τους εξαερισμούς στην οροφή του υπό μελέτη κτιρίου για Tsolar=09:00-15:00.



Σκίαση για Τ_{solar}=09:00.



Σκίαση για Τ_{solar}=09:30.



Σκίαση για Τ_{solar}=10:00.



102



Σκίαση για T_{solar}=11:00.



Σκίαση για T_{solar}=11:30.





Σκίαση για T_{solar}=12:30.



Σκίαση για T_{solar}=13:00.


Παραρτήματα



Σκίαση για T_{solar}=14:00.

Παραρτήματα



Σκίαση για T_{solar}=14:30.

Παραρτήματα



Σκίαση για T_{solar}=15:00.

Β. Τεχνικά Χαρακτηριστικά πλαισίου SunForte PM325B00.

SunForte PM096B00 (320~330 Wp)

Electrical Data

Typ. Nominal Power PN	320 W	325W	327 W	330 W
Typ. Module Efficiency	19.6%	19.9%	20.1%	20.3%
Typ. Nominal Voltage Vmp (V)	54.7	54.7	54.7	54.7
Typ. Nominal Current Imp (A)	5.86	5.94	5.98	6.04
Typ. Open Circuit Voltage Voc (V)	64.8	64.9	64.9	64.9
Typ. Short Circuit Current Isc (A)	6.27	6.39	6.46	6.52
Maximum Tolerance of PN		0 / +39	6	

Above data are the effective measurement at Standard Test Conditions (STC)
STC: imadance 1000 V/m³, spectral distribution AM 1.5, temperature 25.4.2 °C, in accordance with EN 6090H-3
The given detrictual data are nominal values within account for basic measurements and manufacturing tolerances of ±10%, with the exception of Pix. The classifications is performed according to Pi

Temperature Coefficient

NOCT	45 ± 2 °C
Typ.Temperature Coefficient of P _N	-0.38 % / K
Typ.Temperature Coefficient of Voc	-0.27 % / K
Temperature Coefficient of lsc	0.06 % / K

NOCT: Normal Operation Cell Temperature, measuring conditions: irradiance 800 W/m², AM 1.5, air temperature 20 °C, wind speed 1 m/s

Mechanical Characteristics

Dimensions (L x W x H)	1559 x 1046 x 46 mm (61.38 x 41.18 x 1.81 in)
Weight	18.6 kg (41.0 lbs)
Front Glass	High transmission tempered glass with AR-Tech, 3.2 mm (0.13 in)
Cell	96 high efficiency back contact cells,125 x 125 mm (5"x5")
Back Sheet	Composite film
Frame	Anodized aluminum frame
Junction Box	IP-67 rated with 3 bypass diodes
Cables	I x 4 mm²(0.04 x 0.16 inch²), length: each 1.0 m (39.37 in)
Connector Type	MC4 compatible



Voltage (V) Current/voltage characteristics with dependence on irradiance and module temperature

Operating Conditions

1 0	
Operating Temperature	-40 ~ +80 °C
Ambient Temperature Range	-40 ~ +45 °C
Max. System Voltage IEC	1000 V
Serial Fuse Rating	20A
Maximum Surface Load Capacity	Tested up to 5400 Pa according to IEC 61215 (advanced test)

Warranties and Certifications

Product Warranty	Maximum 10 years for material and workmanship
Performance Guarantee	Guaranteed output of 95% for 5 years and linear degradation to 87% for 25 year
Certifications	According to IEC 61215, IEC 61730 and UL 1703 guidelines *

Please confirm other certifications with official dealers

Packing configuration

0 0			
Container	20' GP	40' GP	40' HQ
Pieces per pallet	22	22	22
Pallets per container	6	14	28
Pieces per container	132	308	616



6.0 5.0 800 W/r

Current (A) 4.0 3.0 500 2.0 1.0 0.0



AU Optronics Corporation

No. I, Li-Hsin Rd. 2, Hsinchu Science Park, Hsinchu 30078, Taiwan Tel: +886-3-500-8899 www.BenQSolar.com

BenQ Solar is a division of AU Optronics This datasheet is printed with Soy Ink



Γ. Χωροθέτηση των πλαισίων στην οροφή του κτιρίου με ταυτόχρονη απεικόνιση των σκιάσεων που προκαλούν τα δώματα και οι εξαερισμοί για TSOLAR=09:00 ως TSOLAR=15:00.



Δ. Τεχνικά χαρακτηριστικά του αναστροφέα KACO Powador 36TL3.

Technical data

Powador 30.0 TL3 | 33.0 TL3 | 36.0 TL3 | 39.0 TL3 | 40.0 TL3 | 60.0 TL3

Electrical data	30.0 TL3	33.0 TL3	36.0 TL3	
Input variables				
Max. recommended PV generator power	30 000 W	33000 W	36 000 W	
MPP range	200 V 800 V ¹⁾	200 V 800 V ¹⁾	200 V 800 V ¹⁾	
Starting voltage	250 V	250 V	250 V	
No-load voltage	1000 V	1 000 V	1 000 V	
Max. input current	3x34.0 A	3x34.0 A	3x34.0 A	
Number of MPP trackers	3	3	3	
Max. power/tracker	20 kW	20 kW	20 kW	
Number of strings	3x1 based on design M 3x4 based on design XL	3x1 based on design M 3x4 based on design XL	3x1 based on design M 3x4 based on design XL	
Output variables				
Rated output (@ 230 V)	25000 VA	27 500 VA	30 000 VA	
Line voltage	acc. to local requirements	acc. to local requirements	acc. to local requirements	
Rated current	3x36.2 A	3x39.9 A	3x43.5 A	
Rated frequency	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz	
cos phi	0.80 inductive 0.80 capacitive	0.80 inductive 0.80 capacitive	0.80 inductive 0.80 capacitive	
Number of grid phases	3	3	3	
General electrical data				
Max. efficiency	98.0 %	98.0 %	98.0 %	
European efficiency	97.8 %	97.8 %	97.8 %	
Night consumption	1.5 W	1.5 W	1.5 W	
Switching plan	transformerless	transformerless	transformerless	
Grid monitoring	acc. to local requirements	acc. to local requirements	acc. to local requirements	
Mechanical data				
Display	graphical display + LEDs	graphical display + LEDs	graphical display + LEDs	
Control units	4-way navigation + 2 buttons	4-way navigation + 2 buttons	4-way navigation + 2 buttons	
Interfaces	Ethernet, USB, RS485, S0 output, digital input "inverter off"			
Fault signalling relay	Potential	I-free NO contact, max. 30 V DC/1A or	230 V AC/1 A	
Connections	AC connection via screw terminals, bushing 1xM50, max cross section: 50 mm ² (flexible); DC connection of M version: spring-type terminals 6-35 mm ² ³ ; DC connection of XL version: screw and spring-type terminals 10 mm ² , bushing 6xM32			
Ambient temperature	-20 °C +60 °C 4)	-20 °C +60 °C ⁴⁾	-20 °C +60 °C 4)	
Cooling	fan, max. 600 m ³ / h	fan, max. 600 m³ / h	fan, max. 600 m³ / h	
Protection class	IP54	IP54	IP54	
Noise emission	58 dB (A) (only fan noise)	58 dB (A) (only fan noise)	58 dB (A) (only fan noise)	
DC switch	integrated	integrated	integrated	
H x W x D	1 360 x 840 x 355 mm	1 360 x 840 x 355 mm	1 360 x 840 x 355 mm	
Weight	151 kg	151 kg	151 kg	
Product variants				
Version M	DC switch			
Version XL	DC switch / fuse protection DC input plus / overvoltage protection type 2			
Version XL-SPD 1+2	DC switch / fuse protection DC input plus / overvoltage protection type 1 + 2			
Version XL-F	DC switch / fuse protection DC input plus and minus / overvoltage protection type 2			

¹⁰ The possible input power is reduced at voltages lower than 350 V. The input current is limited to 34.0 A per input. ²⁰ The possible input power is reduced at voltages lower than 480 V. The input current is limited to 36.0 A per input. ³¹ Only in conjunction with external Powador Mini-Argus ⁴⁰ Power derating at high ambient temperatures. ⁵¹ Possible power derating at temperatures above 40 °C. Conforms to the country-specific standards and regulations according to the country version that has been set.

Ε. Χωροθέτηση συστοιχιών



ΣΤ. Ηλεκτρολογικά σχέδια



Ηλεκτρολογικό σχέδιο στο τμήμα συνεχούς ρεύματος. Έχουν σχεδιαστεί μόνο οι συστοιχίες του 1^{ου} ανατροφέα που καταλήγουν στον 1° ανιχνευτή MPP.



Η Ηλεκτρολογικό σχέδιο στο ΑC τμήμα της εγκατάστασης.



Ζ. Προστατευμένες περιοχές από κεραυνικό πλήγμα σύμφωνα με τη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρας.



Τοποθέτηση αλεξικέραυνων και περιοχή προστασίας αυτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, 2013, Φωτοβολταϊκά Συστήματα από τη θεωρία στην πράξη, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Πολυτεχνείου.
- 2. Σ. Παπαθανασίου, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας- Σημειώσεις Παραδόσεων, Εκδόσεις ΕΜΠ
- 3. Φωτοβολταϊκά και Περιβάλλον, Μύθοι θεωρίες συνομωσίας και επιστημονική πραγματικότητα, Ιαν 2011, Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών.
- 4. Φωτοβολταϊκά, ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός, Αυγ 2013, Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών.
- 5. Ένας πρακτικός οδηγός για επενδύσεις στα φωτοβολταϊκά, Απρ 2014, Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών.
- 6. Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2013, 10-6-14, Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών.
- 7. Lawrence L. Kazmerski, 1997, Photovoltaics: A review of cell and module technologies, renewable and sustainable energy reviews, Vol. 1, No ½, pp 71-170.
- 8. Peter Hacke, Kent Terwilliger, Ryan Smith, Stephen Glick, Joel Pankow, Michael Kempe, Sarah Kurtz, National Renewable Energy Laboratory.
- Peter Hacke, Kent Terwilliger, Sarah Kurtz, In situ measurement of crystalline silicon modules undergoing potential induced degradation, Presented at the 23rd Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes Breckenridge, Colorado July 28–31, 2013.
- 10. S. Pingel, Q Frank. M. Winkler, S. Daryan, T. Geipel, H. Hoehne, J. Berghold, Potential induced degradation of solar cells and panels.
- 11. M. Schütze, M. Junghänel, M.B. Koentopp, S. Cwikla, S. Friedrich, J.W. Müller, and P. Wawer, Laboratory study of potential induced degradation of silicon photovoltaic modules.
- 12. Stephan Hoffmann and Michael Koehl, Effects of humidity and temperature on the potential induced degradation, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS Prog. Photovolt: Res. Appl. 2014; 22:173–179.
- Ababacar Ndiaye , Abderafi Charki , Abdessamad Kobi , Cheikh M.F. Kebe , Pape A. Ndiaye , Vincent Sambou, Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review, Solar Energy 96 (2013) 140–151
- 14. J. Berghold, O. Frank, H. Hoehne, S. Pingel, B. Richardson*, M. Winkler, Potential Induced Degradation of solar cells and panels
- 15. A guide to BS EN 62305, Protection against lightning, 2006, Furse
- 16. Lightning protection guide, DEHN
- 17. Lightning protection handbook, Designing to the IEC 62305, Series of lightning protection standard

- 18. Jesús C. Hernández, Pedro G. Vidal, and Francisco Jurado, Senior Member, IEEE, Lightning and Surge Protection in Photovoltaic Installations, IEEE transactions on power delivery, VOL. 23, NO. 4, October 2008
- 19. EAOT 1197,2002
- 20. Practical guide for the protection against surges, ABB
- 21. Ολοκληρωμένες λύσεις αντικεραυνικής προστασίας φωτοβολταϊκών συστημάτων, ΕΛΕΜΚΟ
- 22. IEC 62305-3
- 23. Joe K. Smith, Joel G. Siegel, Διοικητική Οικονομική, 1998
- 24. A guide to photovoltaic (PV) system design and installation, California Energy Commission

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- 1. <u>www.rae.gr</u>
- 2. <u>www.lagie.gr</u>
- 3. <u>www.helapco.gr</u>
- 4. <u>www.ypeka.gr</u>
- 5. new.abb.com/gr
- 6. www.dehn-international.com
- 7. <u>www.furse.com</u>
- 8. <u>www.cablel.gr</u>
- 9. <u>www.siemens.com</u>
- 10. <u>www.nexans.gr</u>
- 11. www.proinso.net/
- 12. www.schneider-electric.com
- 13. <u>www.yinglisolar.com/gr/</u>
- 14. www.trinasolar.com
- 15. <u>www.aleo-solar.gr</u>
- 16. Global.kyocera.com/
- 17. <u>www.bengsolar.com</u>
- 18. www.q-cells.com
- 19. www.coenergia.com
- 20. Eu-solar.panasonic.net/
- 21. www.fronius.com
- 22. Kaco-newenergy.com/gr/
- 23. <u>www.steca.com</u>
- 24. www.sma-hellas.com