



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Μελέτη Φωτοβολταϊκού Συστήματος Για Την Τροφοδοσία  
Θερμαντικών-Ψυκτικών Εγκαταστάσεων Εργοστασίου**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Σταματίνα Ε. Πετρή

**Επιβλέπων:** Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Μελέτη Φωτοβολταϊκού Συστήματος Για Την Τροφοδοσία Θερμαντικών-Ψυκτικών Εγκαταστάσεων Εργοστασίου

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταματίνα Ε. Πετρή

**Επιβλέπων:** Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .... Δεκ 14

.....  
Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ηλίας Αβραμόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Παναγιώτα Βασιλείου  
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Δεκέμβριος 2014

.....  
Σταματίνα Ε. Πετρή

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

Copyright © Σταματίνα Ε. Πετρή, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και η μελέτη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος σε στέγες κτιρίων που βρίσκονται σε εργοστάσιο στην περιοχή των Αγίων Αναργύρων Αττικής. Στα πλαίσια του σχεδιασμού γίνεται μια προσπάθεια διαστασιοδότησης των συστημάτων και ηλεκτρονικών διατάξεων που απαιτούνται για την λειτουργία μιας αυτόνομης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναδρομή στην εξέλιξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στον ελλαδικό χώρο αλλά και παγκοσμίως .

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται έννοιες που σχετίζονται με την λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου όπως το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζεται η λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου και αναφέρονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη για την εγκατάσταση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος που καλείται να καλύψει μεγάλες ημερήσιες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα συμπεράσματα που αποκομίστηκαν από την εργασία.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, διαστασιοδότηση φωτοβολταϊκών συστημάτων, φωτοβολταϊκό στοιχείο, φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ισχύς, απώλειες

## ***ABSTRACT***

The objective of this thesis is the design and the study of a standalone photovoltaic system on the roofs of buildings that exist in a factory in the area of Agioi Anargiroi Attica. A part of the design is an attempt of sizing the required systems and electronic devices for the operation of a standalone photovoltaic system.

In the first chapter takes place a flashback on the evolution of photovoltaic systems in the Greek area as well as worldwide.

The second chapter analyzes concepts related to the operation of a photovoltaic element such as the photovoltaic phenomenon.

The third chapter inquires the operation of a photovoltaic module and the factors that affect its output are referred.

The fourth chapter presents the study of the construction of a standalone photovoltaic system which can cover large daily requirements for electricity.

The fifth chapter describes the conclusions drawn from this work.

## ***KEY WORDS***

Standalone photovoltaic system, sizing photovoltaic systems, photovoltaic element, photovoltaic module, power, losses

## ***ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ***

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή ΕΜΠ κ. Δέρβο Κωνσταντίνο, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο των φωτοβολταϊκών καθώς και για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε προκειμένου να βγει εις πέρας η παρούσα διπλωματική εργασία.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω αυτούς που μου έδωσαν τη δυνατότητα και τα εφόδια για να φοιτήσω στο ΕΜΠ και όλους όσους άμεσα ή έμμεσα με υποστήριξαν σε αυτή μου την προσπάθεια.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στην οικογένεια μου που αποτελεί τον οδηγό για την πορεία της ζωής μου.

---



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	5
<b>ABSTRACT</b> .....	6
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	7
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	9
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	12
<b>1. Εισαγωγή</b> .....	12
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	12
1.2 Η σημερινή κατάσταση στην παγκόσμια αγορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	14
1.3 Η ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	16
1.4 Η ελληνική νομοθεσία.....	18
1.5 Η ευρωπαϊκή ενεργειακή στρατηγική.....	19
1.6 Πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	21
1.7 Μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	23
<b>2. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο</b> .....	23
2.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	23
2.2 Λειτουργία φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	25
2.3 Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	29
2.4 Σημείο λειτουργίας φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	30
2.5 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	33
2.6 Ισχύς αιχμής .....	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	34
<b>3. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο</b> .....	34
3.1 Λειτουργία φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	34
3.1.1 Σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά.....	34
3.1.2 Σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων παράλληλα.....	37
3.2 Κατασκευή –είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	39
3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και την λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	46
3.3.1 Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	46

3.3.2	Θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	46
3.3.3	Ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου.....	46
3.3.4	Ρύπανση.....	47
3.3.5	Υγρασία.....	47
3.3.6	Γήρανση .....	47
3.3.7	Σκίαση.....	47
3.3.8	Απώλεια προσαρμογής ισχύος - Κατάσταση θερμού σημείου (HOT SPOT)	48
3.3.9	Μέθοδοι ανάκτησης απωλειών ισχύος.....	50
3.3.9.1	Στρατηγική παράλληλης/σε σειρά σύνδεσης στοιχείων.....	50
3.3.9.2	Δίοδοι παράκαμψης.....	51
3.4	Προσανατολισμός φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	52
3.5	Διάταξη φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	57
3.6	Εμβαδό οριζόντιας έκτασης εγκαταστάσεως φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	59
3.7	Ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκής συστοιχίας .....	60
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	.....	<b>64</b>
<b>4.</b>	<b>Μελέτη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.....</b>	<b>64</b>
4.1	Δεδομένα και χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος.....	64
4.2	Ενεργειακές ανάγκες .....	71
4.3	Περίοδος χρήσης και βέλτιστη κλίση .....	74
4.4	Κλιματολογικές συνθήκες περιοχής .....	74
4.4.1	Άνεμοι.....	74
4.4.2	Θερμοκρασία.....	76
4.4.3	Χιόνι-Χαλάζι-Παγετός.....	76
4.4.4	Νέφωση.....	76
4.4.5	Ηλιακό δυναμικό.....	77
4.5	Διαστασιοδότηση φωτοβολταϊκής γεννήτριας.....	78
4.6	Υπολογισμός συστήματος συσσωρευτών.....	100
4.7	Καθορισμός των τελικών αναστροφών (DC-AC) της μελέτης.....	106
4.8	Χωροταξική μελέτη.....	112
4.9	Υπολογισμός των καλωδιώσεων.....	114

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b> .....	119
<b>5. Συμπεράσματα</b> .....	119
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	121

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1. Εισαγωγή

#### 1.1 Ιστορική αναδρομή

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία ή αλλιώς «ΦΒ» στοιχεία αποτελούν προσέγγιση υψηλής τεχνολογίας για την άμεση μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Ετυμολογικά το πρώτο συνθετικό της λέξης προέρχεται από τη ελληνική λέξη φως και το δεύτερο από τον Alessandro Volta (1745-1827), έναν Ιταλό φυσικό που έγινε κυρίως γνωστός το 1800 για την ανακάλυψη της ηλεκτρικής μπαταρίας. Το 1839, ο Γάλλος φυσικός Edmund Becquerel παρατήρησε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο με μία ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν ο Adams (1836 - 1915) και ο φοιτητής του Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός Czochralski (1885 - 1953) πρόσθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) με την σχετική έρευνα του, η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα. Μια σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949 όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson. Η απόδοση του ήταν 6% εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Τέσσερα χρόνια μετά, το 1958 η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσαρτάται στον χώρο των διαστημικών εφαρμογών όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο Vanguard I. Το σύστημα αυτό λειτούργησε επιτυχώς για 8 ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα.



**Σχήμα 1.1.1: Ο δορυφόρος Vanguard I.**

[<http://www.agrocapital.gr/Category/Afieromata/Article/6855/istoria-tis-anakalypsis-toy-fwtoboltaikoy-fainomenoy>]

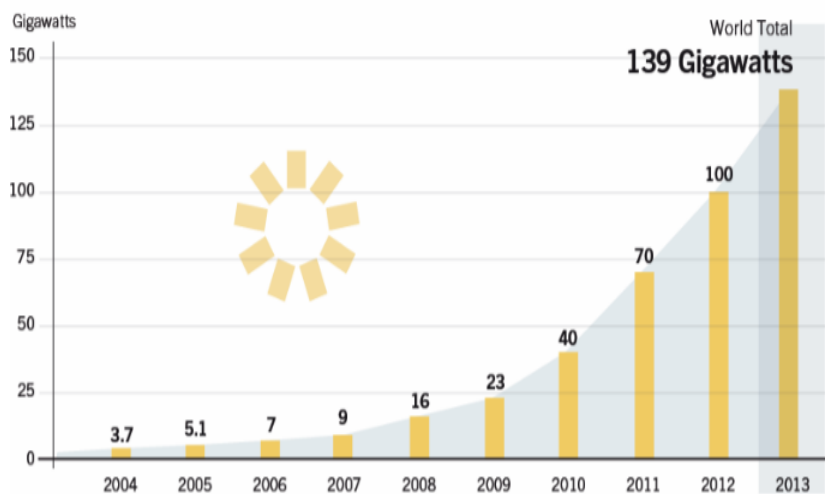
Από το χρονικό αυτό σημείο και μετά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να ενσωματώνονται σταδιακά σε διάφορες εφαρμογές και η τεχνολογία τους βελτιώνεται συνεχώς. Το 1962 η μεγαλύτερη ΦΒ εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε έναν φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242Wp. Αρχικά οι υψηλές τιμές των φωτοβολταϊκών ήταν ο σημαντικότερος λόγος που δεν υπήρχε περισσότερο ενθουσιώδης αποδοχή από την αγορά. Ενδεικτικά η τιμή τους ξεκινάει από τα 500\$ ανά εγκατεστημένο Watt το 1956, ενώ μετά από 14 χρόνια, το 1970 αγγίζει τα 100\$/Watt και το 1973 τα 50\$/Watt.

Η πρώτη εγκατάσταση PV που φτάνει στα επίπεδα του 1MW γίνεται στην Καλιφόρνια το 1980 από την ARCO Solar χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου 2 αξόνων. Η εξέλιξη αρχίζει πλέον να γίνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Το 1983 η παγκόσμια παραγωγή ΦΒ φτάνει τα 22MW και ο συνολικός τζίρος τα 250.000.000\$.

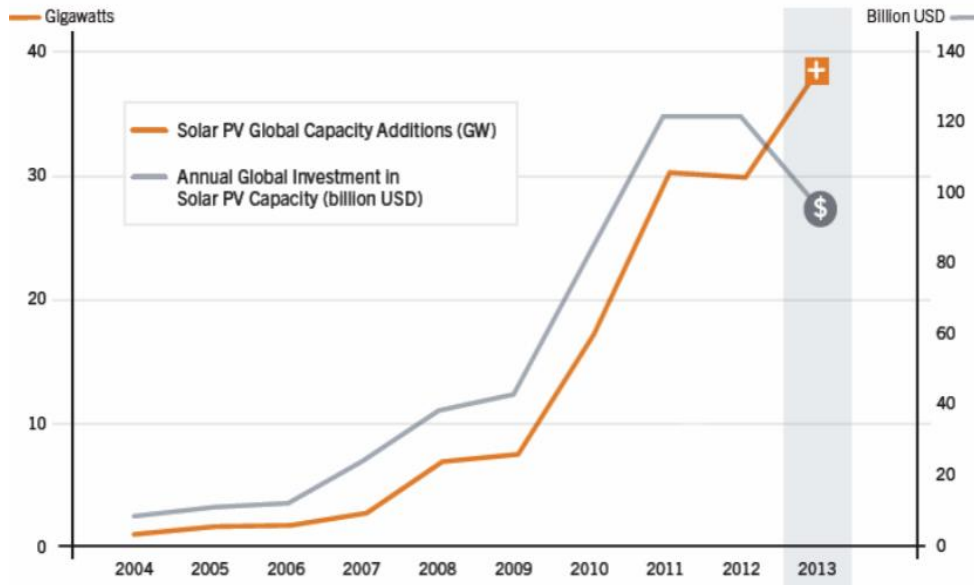
Το 1999 η εταιρία Spectrolab σε συνεργασία με το NREL αναπτύσσουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 32,3%! Το στοιχείο αυτό είναι συνδυασμός τριών υλικών (στρώσεων) και ειδικό για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά συστήματα CPV. Την ίδια χρονιά το ρεκόρ στην απόδοση των τριών στρωμάτων φτάνει στο 18.8%. Η παραγωγή όλων των τεχνολογιών των ΦΒ πάνελ φτάνει συνολικά τα 200 MW.

## 1.2 Η σημερινή κατάσταση στην παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων

Σήμερα οι φωτοβολταϊκές διατάξεις είναι πλέον ευρέως αποδεκτές και εφαρμόσιμες. Η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να προσαρμοστεί σε κάθε εφαρμογή από καταναλωτικές απαιτήσεις χαμηλής ισχύος - ρολόγια, μικρούς υπολογιστές χειρός, φορτιστές μικρών μπαταριών - μέχρι σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις όπως ηλεκτροπαραγωγή σε κεντρικούς σταθμούς επιχειρήσεων ηλεκτρισμού. Η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς παγκοσμίως φαίνεται στο σχήμα 1.2.1 και η παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη ισχύς και οι επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά στο σχήμα 1.2.2. Από τα στατιστικά στοιχεία παρατηρείται αύξηση 32% στο ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος το 2013 σε σχέση με το 2012 και ταυτόχρονα μείωση 22% των επενδύσεων σε φωτοβολταϊκά συστήματα μεταξύ των δύο αυτών ετών εξαιτίας της μείωσης στο κόστος του φωτοβολταϊκού εξοπλισμού.



Σχήμα 1.2.1: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων παγκοσμίως. [[http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats\\_greece\\_2013\\_June14.pdf](http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2013_June14.pdf)]



**Σχήμα 1.2.2: Παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη ισχύς και επενδύσεις σε φωτοβολταϊκά.** [[http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats\\_greece\\_2013\\_June14.pdf](http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2013_June14.pdf)]

### 1.3 Η ελληνική αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων

Όσον αφορά την Ελλάδα τα στατιστικά στοιχεία για το 2013 δείχνουν ότι βρέθηκε για τρίτη συνεχή χρονιά στην δεκάδα της παγκόσμιας αγοράς ως προς τη νέα ετήσια εγκατεστημένη ισχύ όπως φαίνεται στον πίνακα 1.3.1.

	Χώρα	Νέα εγκατεστημένη ισχύς το 2013(GWp)
1	Κίνα	12.9
2	Ιαπωνία	6.9
3	ΗΠΑ	4.8
4	Γερμανία	3.3
5	Βρετανία	1.55
6	Ιταλία	1.45
7	Ινδία	1.1
8	Ρουμανία	1.1
<b>9</b>	<b>Ελλάδα</b>	<b>1.04</b>
10	Αυστραλία	0.8

**Πίνακας 1.3.1: Νέα ετήσια εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων.**

[[http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats\\_greece\\_2013\\_June14.pdf](http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2013_June14.pdf)]

Το 2013 η ισχύς των νέων φωτοβολταϊκών συστημάτων που διασυνδέθηκαν έφτασε τα 1.042,5 MWp ανεβάζοντας το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος στο ελλαδικό χώρο στα 2.578,8 MWp. Η κατανομή τους ως προς το ποσό της παραγομένης ισχύος αλλά και η γεωγραφική κατανομή των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων στον ελλαδικό χώρο παρουσιάζεται στους πίνακες 1.3.2 και 1.3.3 :

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

**Πίνακας 1.3.2: Κατανομή διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων ως προς το ποσό της παραγομένης ισχύος.**

[[http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats\\_greece\\_2013\\_June14.pdf](http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2013_June14.pdf)]



Περιφέρεια	Ισχύς (MW)		
	Χαμηλή τάση	Μέση τάση	Υψηλή τάση
Ανατολική Μακεδονία & Θράκη	113	128	-
Κεντρική Μακεδονία	277	128	22
Δυτική Μακεδονία	63	55	-
Ήπειρος	68	61	-
Θεσσαλία	110	169	10
Ιόνια νησιά	27	-	-
Δυτική Ελλάδα	145	156	4
Στερεά Ελλάδα	131	199	7
Πελοπόννησος	171	149	14
Αττική	89	123	-
Νησιά Αιγαίου & Κρήτη	158	2	-
<b>Σύνολο</b>	<b>1352</b>	<b>1170</b>	<b>57</b>

**Πίνακας 1.3.3: Γεωγραφική κατανομή των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα με βάση την εγκατεστημένη ισχύ σε MW.**

[[http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats\\_greece\\_2013\\_June14.pdf](http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2013_June14.pdf)]

Την περίοδο 2008-2013 οι επενδύσεις σε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα άγγιξαν τα 5 δις ευρώ. Συγκεκριμένα η συμβολή των φωτοβολταϊκών συστημάτων στα δημόσια έσοδα μόνο το 2013 έχει ως εξής:

- Αποτέλεσαν ποσοστό 0.84% του ΑΕΠ (το 40% αφορά την εγχώρια προστιθέμενη αξία).
- Οδήγησαν στην είσπραξη ΦΠΑ 100 εκατ. ευρώ από τις νέες εγκαταστάσεις.

Επιπλέον η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά το 2013 αποσόβησε την έκλυση περίπου 2.7 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα

#### **1.4 .Η ελληνική νομοθεσία**

Στις 17 Ιουνίου 2008 δημοσιεύτηκε η Κοινή Υπουργική Απόφαση Δ6/Β/14826/2008 (ΦΕΚ 1122Β) των Υπουργών Εσωτερικών, Οικονομίας και Ανάπτυξης που αφορά στην εξειδίκευση των μέτρων του Νόμου Πλαίσιο 3661 (ΦΕΚ Α 89/19.5.2008) «Μέτρα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων» στα δημόσια κτίρια. Στην απόφαση αυτή καθορίζονται προδιαγραφές και κανονισμοί για τον έλεγχο και την συντήρηση των συστημάτων ψύξης-θέρμανσης των κτιρίων που στεγάζουν υπηρεσίες του δημοσίου τομέα καθώς επίσης και τις συνθήκες φωτισμού και αερισμού που πρέπει να επικρατούν σε αυτά.

Στις 30 Μαρτίου 2010 με Κοινή Υπουργική Απόφαση των υπουργών Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής και Οικονομικών τίθεται σε ισχύ ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιριακού Τομέα (ΚΕΝΑΚ). Με τον ΚΕΝΑΚ θεσμοθετείται ο ολοκληρωμένος ενεργειακός σχεδιασμός στον κτιριακό τομέα με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, την εξοικονόμηση της ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος.

Συγκεκριμένα ως προς την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων ο νόμος Ν.3851/2010 και η Υπουργική Απόφαση 36720/25-8-2010 (ΦΕΚ 376/6-9-2010) επιτρέπουν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων κάθε ισχύος στο δώμα ή τη στέγη νομίμως υφισταμένου κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων στεγάστρων βεραντών, προσόψεων και σκιάστρων, καθώς και βοηθητικών χώρων του κτιρίου, όπως αποθήκες και χώροι στάθμευσης. Για τα συστήματα αυτά δεν απαιτείται περιβαλλοντική αδειοδότηση, ενώ για συστήματα ισχύος έως 1 MWp δεν απαιτείται και άδεια παραγωγής ή άλλη διαπιστωτική απόφαση. Για συστήματα >1 MWp απαιτείται άδεια παραγωγής από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (η οποία συνοδεύεται και από δύο ακόμη άδειες: την άδεια εγκατάστασης και την άδεια λειτουργίας τις οποίες εκδίδει η αρμόδια Περιφέρεια).

### 1.5 Η ευρωπαϊκή ενεργειακή στρατηγική

Κύρια κατεύθυνση της νέας ευρωπαϊκής ενεργειακής στρατηγικής, όπως διαμορφώνεται σήμερα, είναι ο «εξευρωπαϊσμός» της ενεργειακής πολιτικής μέσω της αντιμετώπισης σημαντικών προκλήσεων, όπως:

- Η ενεργειακή ασφάλεια. Οι εισαγωγές της ΕΕ αυξάνονται σταθερά, ενώ η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου μειώνεται συνεχώς.
- Η κλιματική αλλαγή.
- Οι τιμές ενέργειας οι οποίες παρουσιάζουν διακυμάνσεις και επηρεάζονται από την αβεβαιότητα στην οικονομία και την πολιτική αστάθεια καθώς και τις τεχνολογικές εξελίξεις. Ταυτόχρονα επηρεάζουν όλους τους τομείς της οικονομίας.
- Οι διεθνείς εξελίξεις. Οι αναπτυσσόμενες χώρες απορροφούν ολοένα αυξανόμενο ποσοστό των παγκοσμίων αποθεμάτων σε ορυκτά καύσιμα.
- Οικονομικές εξελίξεις. Η χρηματοοικονομική κρίση θέτει σε σοβαρό κίνδυνο τις νέες επενδύσεις και τα ποσά που διατίθενται στην εξέλιξη της τεχνολογίας.

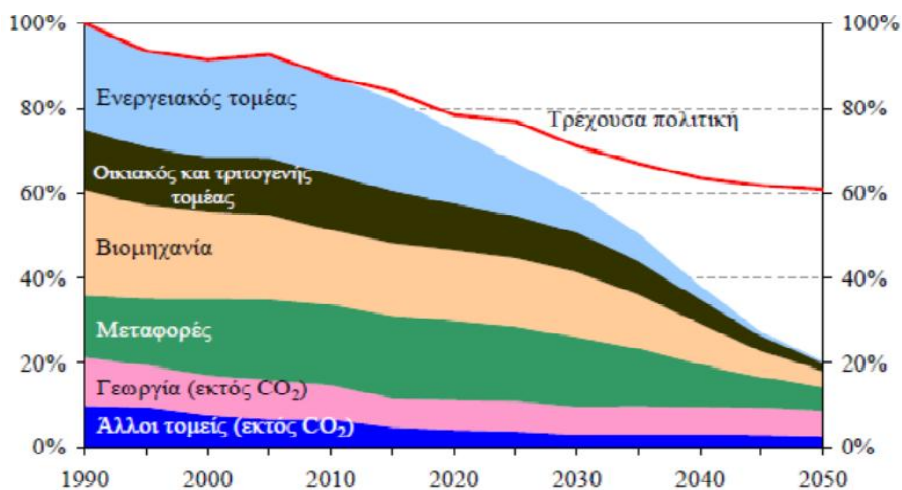
Η απελευθέρωση των εσωτερικών αγορών ενέργειας (ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου) είναι από τα θεμέλια της ενεργειακής πολιτικής που έχει υιοθετηθεί από την ΕΕ η οποία έχει θέσει ως κύρια επιδίωξή της τη δημιουργία μίας ενιαίας εσωτερικής αγοράς ενέργειας, η οποία βασίζεται πάνω από όλα στην ύπαρξη ενός ευρωπαϊκού ασφαλούς και συνεκτικού δικτύου ενέργειας. Η εισαγωγή κανόνων ανταγωνισμού είναι σταδιακή και πραγματοποιείται σε πολλά βήματα κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαπενταετίας. Οι οδηγίες 2009/72/ΕΚ και 2009/73/ΕΚ εντάσσονται στο ενιαίο ρυθμιστικό πλαίσιο της 3<sup>ης</sup> Ενεργειακής Δέσμης και θέτουν τις βάσεις για την επίτευξη του στόχου αυτού. Ένας από τους βασικούς σκοπούς είναι ο καθορισμός σε ενωτικό επίπεδο των ρυθμίσεων σχετικά με τον αποτελεσματικό διαχωρισμό των δραστηριοτήτων μεταφοράς και διανομής από τις δραστηριότητες της παραγωγής και της προμήθειας, τόσο στον τομέα ηλεκτρικής ενέργειας όσο και στον τομέα φυσικού αερίου.

Κύριο στρατηγικό ενεργειακό στόχο της νέας ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής αποτελεί η μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και η δέσμευση για μείωση σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, των εκπομπών των αερίων ρύπων του θερμοκηπίου κατά 20% μέχρι το 2020, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Αντίστοιχα έχουν συμφωνηθεί δεσμευτικοί στόχοι για τα κράτη-μέλη μέχρι το 2020, σε σχέση με τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, τη διεύρυνση των ΑΠΕ και την εξοικονόμηση ενέργειας ενώ, από το 2013 η ηλεκτροπαραγωγή επιβαρύνεται με το συνολικό κόστος αγοράς των απαραίτητων δικαιωμάτων εκπομπών (παύει να ισχύει η δωρεάν διανομή δικαιωμάτων εκπομπών) και από το 2015 πρέπει όλες οι αγορές να πληρούν τα κριτήρια του «Μοντέλου Στόχου».

Στο πλαίσιο αυτό, όλες οι σχετιζόμενες ευρωπαϊκές πολιτικές, τα προγράμματα υποστήριξης αυτών, καθώς και οι επενδυτικές προτεραιότητες από τα Διαρθρωτικά ταμεία ενσωματώνουν τις ανάγκες και κατευθύνσεις ώστε να επιτευχθεί ο κύριος αυτός περιβαλλοντικός στόχος. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την περίοδο 2014-2020, ο τομέας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και οι τεχνολογίες Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΕΞΕ) που αφορούν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, αποτελούν την κύρια προτεραιότητα σχεδιασμού και δέσμευσης πόρων και ως εκ τούτου η επεξεργασία επιχειρησιακών προγραμμάτων στους τομείς αυτούς αποτελεί βασικό στόχο.

Το Μάρτιο του 2011 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε τον "Οδικό χάρτη" για μια οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως το 2050, με σκοπό τον μετασχηματισμό της ευρωπαϊκής οικονομίας σε βιώσιμη οικονομία μέχρι το έτος 2050. Στον οδικό χάρτη περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί η οικονομική ανάπτυξη με αποδοτική χρήση των πόρων, προσδιορίζονται οι τομείς οικονομικής δραστηριότητας που καταναλώνουν τους περισσότερους πόρους και προτείνονται εργαλεία και δείκτες που θα βοηθήσουν στην καθοδήγηση της δράσης στην Ευρώπη και διεθνώς.

Η μετάβαση σε μια ανταγωνιστική οικονομία χαμηλών επιπέδων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σημαίνει ότι η ΕΕ θα πρέπει να προετοιμαστεί για μειώσεις των εγχώριων εκπομπών της μέχρι το 2050 κατά 80% σε σύγκριση με το 1990. Το σχήμα που ακολουθεί επεξηγεί την πορεία προς τη μείωση κατά 80% μέχρι το 2050, σε πενταετή στάδια.



**Σχήμα 1.5.1: Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου της ΕΕ προς την κατεύθυνση της εγχώριας μείωσης κατά 80% (100%=1990).**

[Πηγή: Λήδα Γιαννακοπούλου, «Τομέας εθνικού ενδιαφέροντος: ενέργεια», Διεύθυνση σχεδιασμού και προγραμματισμού, Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, Αθήνα, 2013]

## 1.6 Πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Ο γοργός ρυθμός ανάπτυξης της τεχνολογίας στον τομέα των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν μπορεί να θεωρηθεί συγκυριακός καθότι συγκεντρώνουν πλήθος πλεονεκτημάτων, εκ των οποίων ένα μέρος παρουσιάζεται επιγραμματικά ακολούθως:

- Δεν ρυπαίνουν. Αντιθέτως συμβάλουν στην μείωση της εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα, αιωρούμενων σωματιδίων, οξειδίων του αζώτου, ενώσεων του θείου και αερίων που επιδεινώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- Λειτουργούν αξιόπιστα για πολλά έτη αφού οι κατασκευαστές εγγυώνται για τα κρύσταλλα διάρκεια ζωής που κυμαίνεται από 20 έως 30 χρόνια.
- Έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.
- Η λειτουργία τους είναι αθόρυβη.
- Δεν έχουν κινούμενα τμήματα.
- Συνδυάζονται με ευκολία σε μικρά ή μεγάλα συστήματα και υπάρχει η δυνατότητα να επεκταθούν μελλοντικά αν αυξηθούν οι καταναλωτικές απαιτήσεις.
- Τοποθετούνται οπουδήποτε υπάρχει ηλιοφάνεια καθώς και σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές όπως η στέγη ή η πρόσοψη ενός κτιρίου.
- Ενσωματώνονται αρμονικά στο περιβάλλον χωρίς επίδραση στη λειτουργικότητα ή την αισθητική του χώρου πχ σε αρχαιολογικούς χώρους.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δασικές ή σε δυσπρόσιτες περιοχές για σκοπούς όπως η πυροπροστασία δασών ή η ηλεκτροδότηση κτηνοτροφικών μονάδων.
- Μέσω ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να επιτευχθεί η ηλεκτροδότηση θαλάσσιων εφαρμογών όπως είναι οι φάροι, οι μαρίνες και τα σκάφη.
- Παράγουν κατά μέγιστο κατά τις ώρες αιχμής ζήτησης του δικτύου οπότε συμβάλουν στην εξάλειψη του κινδύνου black-out που έχει υπολογιστεί ότι κοστίζει στην εθνική οικονομία 25-40 εκατ. ευρώ.
- Συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος στη μείωση των απωλειών μεταφοράς και στην αύξηση της αξιοπιστίας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο.
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή η οποία διατίθενται παντού χωρίς κανένα κόστος και ως εκ τούτου παρέχει ανεξαρτησία και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία.

### 1.7 Μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα μειονεκτήματα που θα μπορούσαν να καταλογιστούν στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι τα παρακάτω:

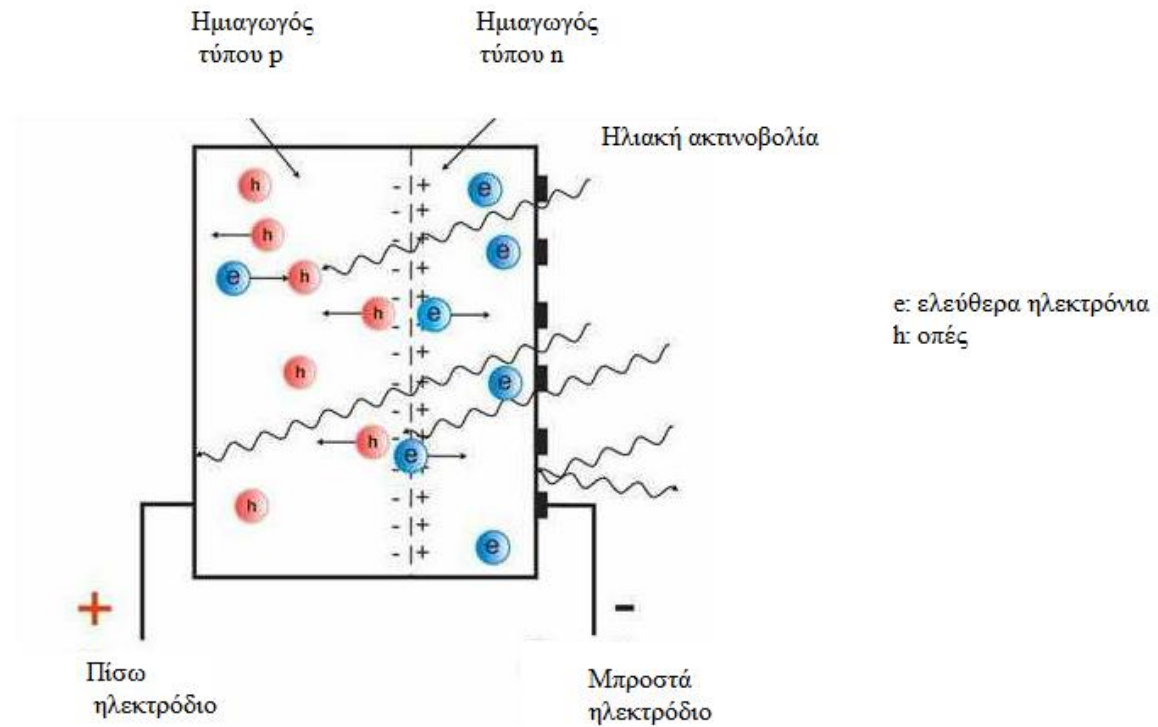
- Το υψηλό αρχικό κόστος της επένδυσης. Μια γενική ενδεικτική τιμή είναι 2000 ευρώ ανά εγκατεστημένο kW ηλεκτρικής ισχύος. Το κόστος αυτό σε καμία περίπτωση δε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο ειδικά αν λάβουμε υπόψη ότι μια οικιακή κατανάλωση απαιτεί 1,5- 3,5 kW.
- Χαμηλή πυκνότητα παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος δηλαδή το ποσό των kWh ανά τετραγωνικό μέτρο εγκατάστασης.
- Κατά τις νυχτερινές ώρες δεν υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οπότε στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα απαιτείται η χρήση συσσωρευτών, γεγονός που αυξάνει το συνολικό κόστος της εγκατάστασης.
- Οι απόψεις για την αισθητική παρέμβαση στο περιβάλλον δίστανται, παρόλο που σήμερα υπάρχει πληθώρα καινοτόμων υλικών που ικανοποιούν αρκετές παραμέτρους της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής
- Λόγω του αμείλικτου ανταγωνισμού στην αγορά παρατηρείται ότι κάποιες κατασκευαστικές εταιρείες φωτοβολταϊκών πλαισίων αθετούν τις περιβαλλοντικές δεσμεύσεις τους λόγω του υψηλού κόστους που συνεπάγονται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται περισσότερο σε χώρες με ελαστική περιβαλλοντική νομοθεσία.
- Στη χώρα μας σε μια 25ετία θα κληθούμε να αντιμετωπίσουμε χωρίς πρότερο σχεδιασμό και προδιαγραφές, έναν τεράστιο όγκο ηλεκτρονικών αποβλήτων από τα πεπαλαιωμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα ολοκληρώσουν τον κύκλο ζωής τους. Από την έναρξη του 2014 τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης υποχρεούνται να ενσωματώνουν στην εθνική τους νομοθεσία την ευρωπαϊκή οδηγία που για τα Απόβλητα των Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Συσκευών. Υπεύθυνοι για την δωρεάν παραλαβή και ανακύκλωση των παλαιών ή σπασμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι οι παραγωγοί.
- Αντίστοιχο είναι το πρόβλημα και με τους παλαιούς συσσωρευτές οι οποίοι περιέχουν εξόχως τοξικά στοιχεία, τα οποία μολύνουν τον υδροφόρο ορίζοντα και είναι επιβλαβή για τον οργανισμό. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ως χαρακτηριστικό παράδειγμα σωστής αξιοποίησης παλαιών συσσωρευτών ένα έργο που έχει επιλεγεί από το Υπουργείο Περιβάλλοντος της Ιαπωνίας ως πρότυπο σχέδιο για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα ένα μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικό σύστημα που χρησιμοποιεί παλαιές μπαταρίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων εγκαταστάθηκε και λειτουργεί σε ηλιακό σταθμό 10MW στην πόλη Οσάκα [19].
  - Λόγω της ανακλώμενης θερμικής και ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας στον περιβάλλοντα χώρο της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2****2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ**

Στο κεφάλαιο 2 αναλύονται έννοιες στενά συνδεδεμένες με την λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων όπως είναι το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο αν και είχε μελετηθεί πριν από ένα και πλέον αιώνα, μόνο τα τελευταία 30 χρόνια έχει αποτελέσει τη βάση για την ραγδαία ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Επίσης μελετάται η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

**2.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο**

Όταν μια δίοδος επαφής δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια  $h\nu$  μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του ημιαγωγού έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο λοιπόν διαρκεί η ακτινοβολία δημιουργείται μια περίσσεια από ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Όταν αυτά τα ζεύγη βρεθούν στην περιοχή της επαφής των ημιαγωγών, έχουμε εκτροπή των ηλεκτρονίων προς τον ημιαγωγό  $n$  και εκτροπή των οπών προς τον ημιαγωγό  $p$ . Δημιουργείται δηλαδή μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών των δύο τμημάτων της διόδου η οποία διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτήν. Το γεγονός αυτό ονομάζεται **φωτοβολταϊκό φαινόμενο** και απεικονίζεται στο σχήμα 2.1.1. Η διάταξη αυτή η οποία αποτελεί πηγή φωτοβολταϊκού ρεύματος ονομάζεται **φωτοβολταϊκό στοιχείο** και το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα **φωτόρευμα  $I_{ph}$**  [11].



**Σχήμα 2.1.1: Μηχανισμός εκδήλωσης φωτοβολταϊκού φαινομένου σε φωτοβολταϊκό στοιχείο [11]**

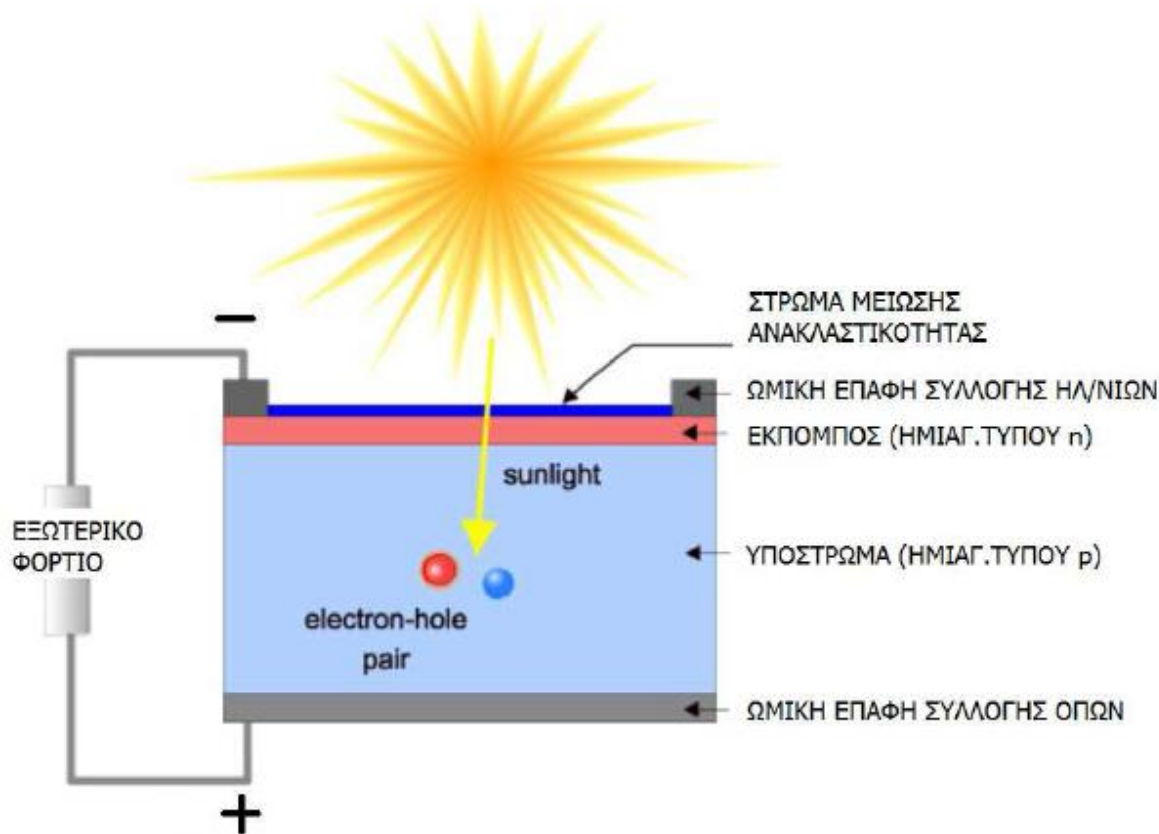
Το φωτόρευμα είναι ευθέως ανάλογο της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας  $P_{\text{HA}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$ , που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών.

Είναι προφανές ότι είναι αδύνατη η μετατροπή όλης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου και διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Από την ακτινοβολία που διεισδύει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο που αποτελείται από φωτόνια, που έχουν ενέργεια  $h \times \nu$  μικρότερη από το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, το φωτοβολταϊκό στοιχείο συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα, δηλαδή η αντίστοιχη ακτινοβολία το διαπερνά και απλά θερμαίνει το μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του. Ούτε όμως και το μέρος της ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού αξιοποιείται, γιατί μετατρέπεται σε θερμότητα. Τελικά μόνο το μέρος της ακτινοβολίας της οποίας τα φωτόνια έχουν ενέργεια  $h \times \nu = E_g$  αξιοποιείται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι μόνο τα φωτόνια αυτά απορροφώνται και αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού στοιχείου να μετακινηθούν σε άλλη θέση [11].



## 2.2 Λειτουργία φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μια ειδικά σχεδιασμένη ένωση p-n. Ένα μη φωτιζόμενο φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια από τη χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου. Η δομή ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί ποιοτικά να αναπαρασταθεί στο σχήμα 2.2.1.



Σχήμα 2.2.1: Δομικά στοιχεία φωτοβολταϊκού στοιχείου.

[<http://pveducation.org>]

Εδώ βλέπουμε ότι η επιφάνεια που επιδέχεται το φωτισμό καλύπτεται από μια αντανάκλαστική επίστρωση που προσφέρει παθητικοποίηση. Οι ωμικές επαφές στον εκπομπό έχουν τοποθετηθεί πάνω σε λείες περιοχές προκειμένου να μη δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου στην διεπιφάνεια μετάλλου-ημιαγωγού. Ο εκπομπός αποτελείται από ημιαγωγό τύπου n ενώ η βάση (το υπόστρωμα), από ημιαγωγό τύπου p. Το βάθος του εκπομπό είναι περίπου 0,3  $\mu\text{m}$  ενώ το υπόστρωμα εκτείνεται για περίπου 298  $\mu\text{m}$ . Η ωμική επαφή της πίσω πλευράς χαρακτηρίζεται από το αυξημένο πάχος μετάλλου, που συμβάλλει στην απαγωγή της θερμότητας. [1]

Όταν το στοιχείο δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, δημιουργούνται ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων υπό την επίδραση των ατόμων του στοιχείου με τα φωτόνια της ηλιακής δέσμης. Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται προκαλεί τον διαχωρισμό των οπών από τα ηλεκτρόνια, οδηγώντας τα ηλεκτρόνια στην περιοχή n της επαφής και τις οπές στην περιοχή p της επαφής. Στην ιδανική περίπτωση, η εξίσωση που συνδέει την τάση του ηλεκτρικού ρεύματος με την ένταση και μας δίνει μια προσέγγιση της συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι η εξής:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

Όπου:

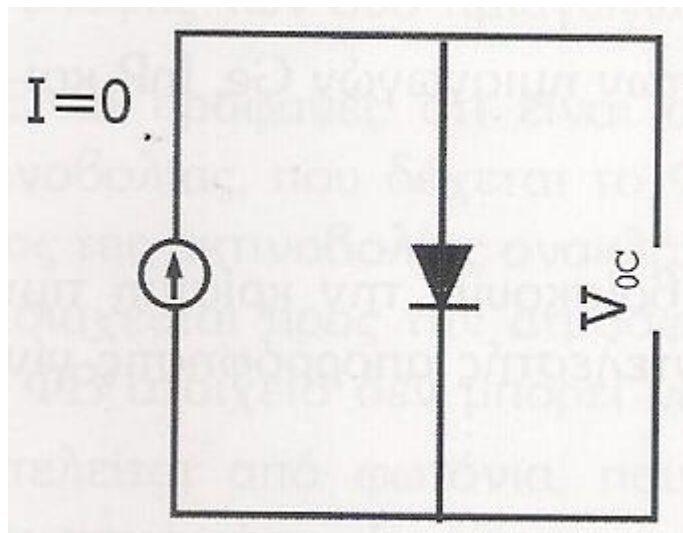
$I_{ph}$ : η συνιστώσα του ρεύματος στο στοιχείο λόγω των φωτονίων

$q = 1.6 \times 10^{-19}$  Cb

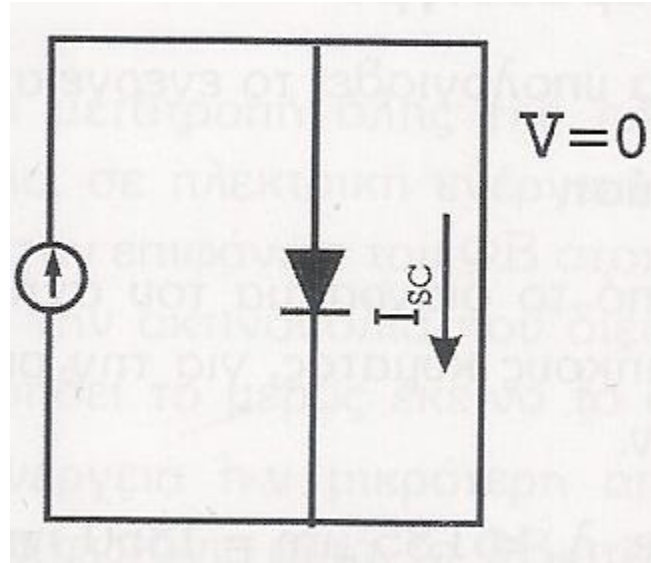
$k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/ K

T: η θερμοκρασία του στοιχείου σε βαθμούς Kelvin.

Αν στο απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα τα άκρα της επαφής συνδεθούν με χάλκινο σύρμα μεγάλης διατομής και συνεπώς μηδενικής αντίστασης, το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο. Τότε διαρρέεται από ρεύμα ίσο με το φωτόρευμα και ονομάζεται **ρεύμα βραχυκυκλώσεως**  $I_{sc}$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Σχήμα 2.2.2). Αν τα άκρα της επαφής δεν συνδέονται μεταξύ τους, δηλαδή έχουμε ανοιχτό κύκλωμα, η τάση στα άκρα ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Σχήμα 2.2.3). [11]

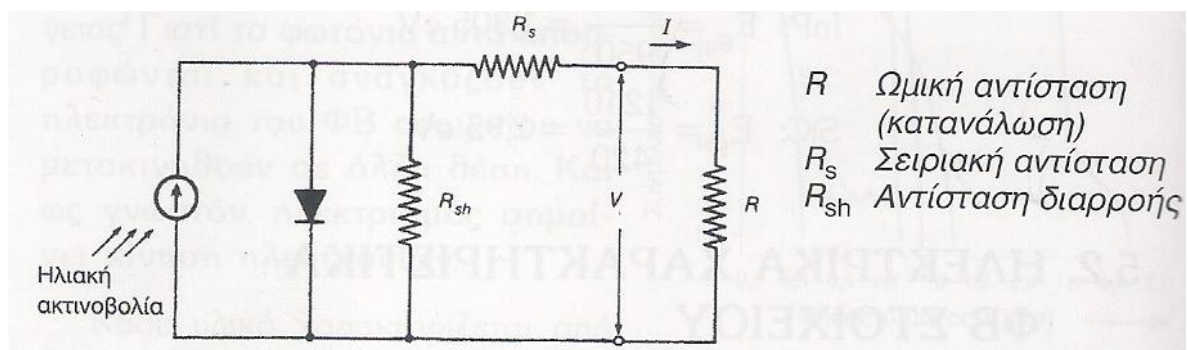


Σχήμα 2.2.2: Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου (ανοιχτό κύκλωμα). [11]



Σχήμα 2.2.3: Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου (βραχυκυκλωμένο κύκλωμα). [11]

Στην πραγματικότητα [11] όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.4 το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου περιλαμβάνει ακόμα δύο αντιστάσεις: α) την σειριακή αντίσταση  $R_s$ , η οποία συνδέεται σε σειρά με τη δίοδο επαφής και αφορά τις αντιστάσεις κατά το πέρασμα του ρεύματος μέσα από τη δίοδο και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Την αντίσταση διαρροής  $R_{sh}$ , η οποία συνδέεται παράλληλα με τη δίοδο επαφής και αφορά στη διαρροή του ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία εμπορίου έχουν συνήθως  $R_s < 5 \Omega$  και  $R_{sh} > 500\Omega$ .



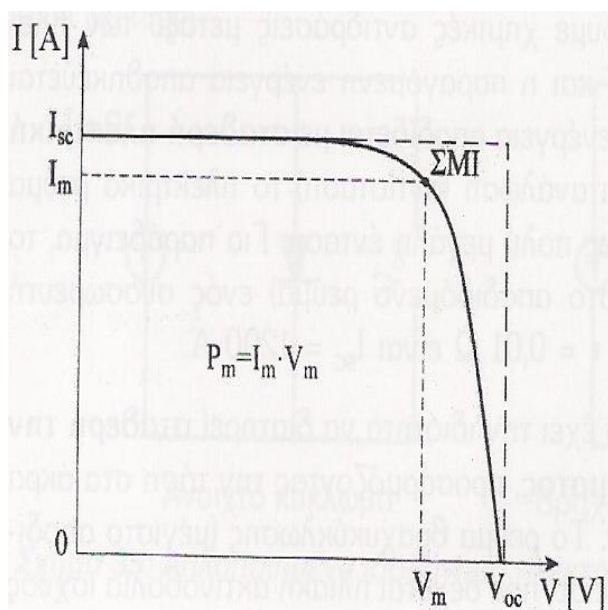
Σχήμα 2.2.3: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου. [11]

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει την ιδιότητα να διατηρεί σταθερή την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, προσαρμόζοντας την τάση στα άκρα της κατανάλωσης (αντίσταση). Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (μέγιστο αποδιδόμενο ρεύμα) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία ισχύος  $1\text{kW}/\text{m}^2$ ) είναι  $I_{sc} = 30\text{-}40\text{ mA}/\text{cm}^2$  .

### 2.3 Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκού στοιχείου

Οι μεταβολές της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος φαίνονται στην καμπύλη του σχήματος 2.3.1 η οποία αποτελεί την χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Παρατηρούμε ότι όταν το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο, η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος παίρνει τη μέγιστη τιμή  $I_{sc}$  και η τάση μηδενίζεται  $V=0$ . Αντίθετα όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό μηδενίζεται η ένταση  $I=0$  και η τάση ανοιχτοκυκλώσεως παίρνει τη μέγιστη τιμή  $V_{oc}$ . Η καμπύλη αυτή ισχύει για σταθερή τιμή ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενη αντίσταση του κυκλώματος από μηδέν μέχρι άπειρη. Το εμβαδό του ορθογωνίου παραλληλογράμμου με πλευρές  $I_m$  και  $V_m$  ισούται με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ  $P_m$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου [11].

Το ορθογώνιο με πλευρές  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$  που βρίσκεται εξωτερικά της καμπύλης I-V στο σχήμα 2.3.1 περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου ως πηγή σταθερού ρεύματος.



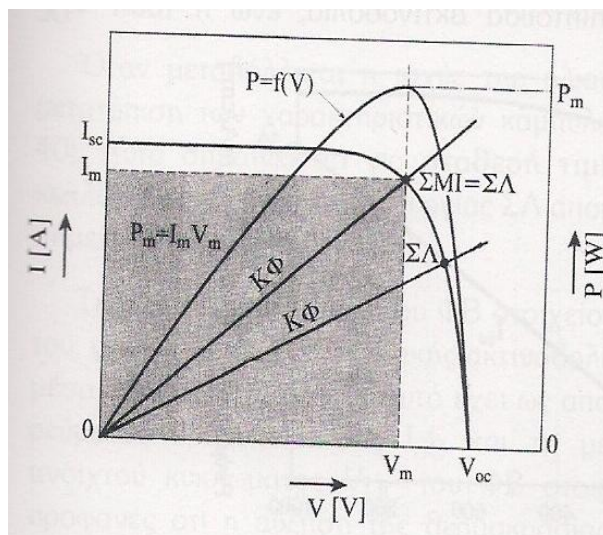
ΣΜΙ: Σημείο μέγιστης ισχύος  
 $I_{sc}$ : Ρεύμα βραχυκυκλώσεως  
 $V_{oc}$ : Τάση ανοιχτοκυκλώσεως  
 $P_m$ : Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ

Σχήμα 2.3.1: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος I -τάσης V ΦΒ στοιχείου. [11]

## 2.4 Σημείο λειτουργίας φωτοβολταϊκού στοιχείου

Όπως φάνηκε και στο σχήμα 2.3.1 η παραγόμενη ισχύς από το ΦΒ στοιχείο παρουσιάζει μια μέγιστη τιμή κοντά στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση της τιμής του ρεύματος. Συνεπώς η αντίσταση του ρεύματος που τροφοδοτείται από ένα ΦΒ στοιχείο, πρέπει να έχει κατάλληλη τιμή για να παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς από το ΦΒ στοιχείο [11].

Θεωρώντας ότι το ΦΒ στοιχείο τροφοδοτεί μια ωμική αντίσταση μπορούμε να απεικονίσουμε την καμπύλη φορτίου ΚΦ μιας αντίστασης η οποία δείχνει τη μεταβολή του ρεύματος  $I$  που τη διαρρέει σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη στα άκρα της ηλεκτρική τάση  $V$ . Το σημείο τομής της χαρακτηριστικής καμπύλης και της καμπύλης φόρτου ονομάζεται σημείο λειτουργίας ΣΛ του συστήματος και καθορίζει το ρεύμα και την τάση στην αντίσταση, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2.4.1.



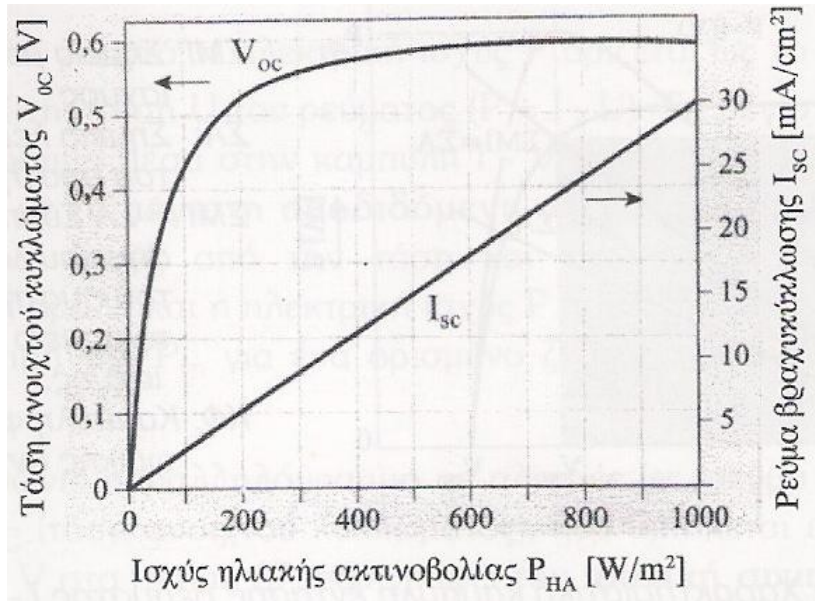
ΣΜΙ: Σημείο μέγιστης ισχύος  
 ΣΛ: Σημείο λειτουργίας του συστήματος  
 ΣΜΙ=ΣΛ Σύμπτωση του σημείου λειτουργίας με το σημείο μέγιστης ισχύος  
 ΚΦ= Καμπύλη φορτίου ωμικής αντίστασης

**Σχήμα 2.4.1: Χαρακτηριστική καμπύλη μεταβολής της παρεχόμενης ισχύος του ΦΒ στοιχείου σε συνάρτηση με την τάση  $V$  και την καμπύλη φορτίου ΚΦ. [11]**

Με τη χρήση ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων επιδιώκουμε την συνεχή σύμπτωση του ΣΛ του συστήματος με το εκάστοτε ΣΜΙ, ώστε να αποδίδεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς από το ΦΒ στοιχείο.

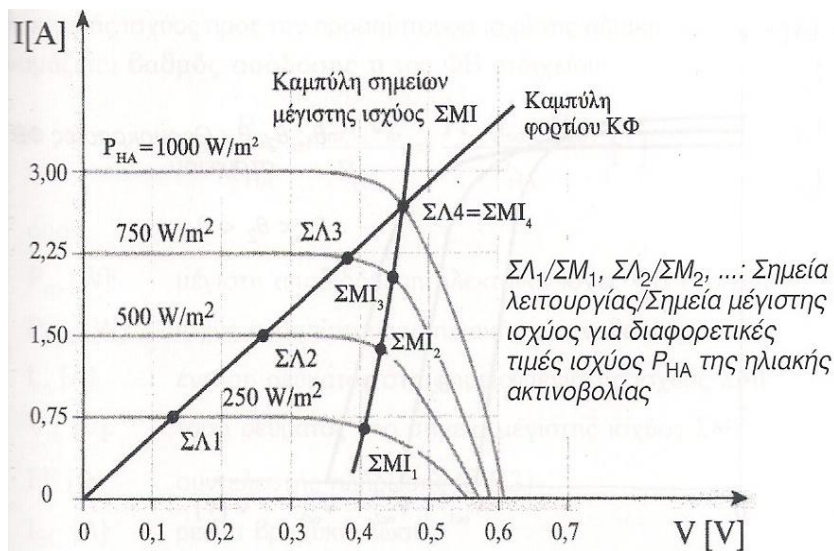
Στο σχήμα 2.4.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και της τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  σε συνάρτηση με την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας. Το ρεύμα  $I_{sc}$  μεταβάλλεται ανάλογα με την προσπίπτουσα ακτινοβολία, ενώ η τάση  $V_{oc}$  αυξάνει απότομα στην αρχή (κατά την ανατολή του ηλίου) και μετά παραμένει σχεδόν σταθερή κατά το υπόλοιπο διάστημα μιας αίθριας ημέρας (μέχρι τη δύση του ηλίου).





**Σχήμα 2.4.2:** Μεταβολή της τάσεως ανοιχτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκυκλώσεως σε συνάρτηση με την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας. [11]

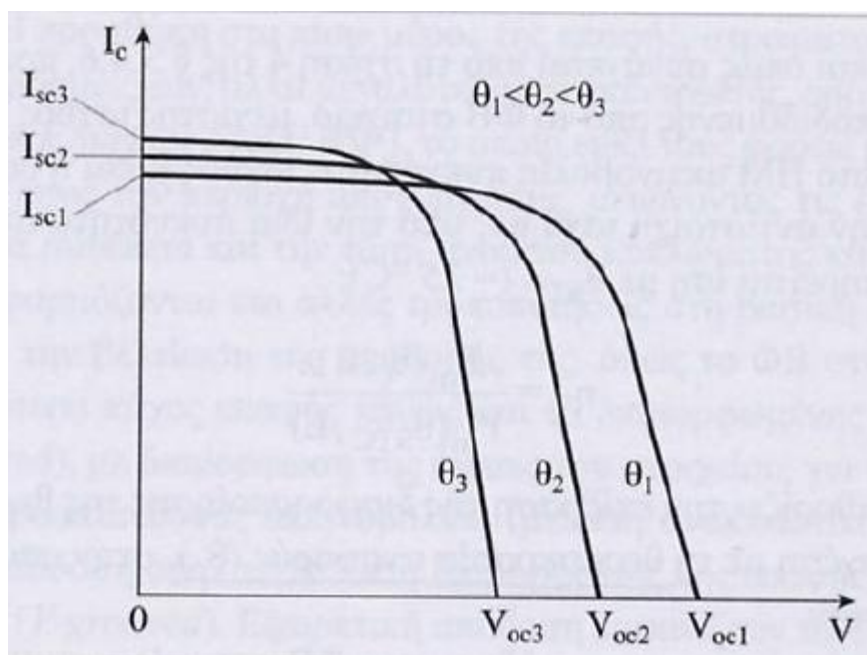
Όταν μεταβάλλεται η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας, έχουμε και μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V του ΦΒ στοιχείου όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4.3. Αυτό σημαίνει ότι για σταθερή τιμή της ωμικής αντίστασης του κυκλώματος τα σημεία λειτουργίας ΣΛ απομακρύνονται από τα σημεία μέγιστης ισχύος ΣΜΙ.



**Σχήμα 2.4.3:** Μετατόπιση των χαρακτηριστικών της εντάσεως I και της τάσεως V του ρεύματος ΦΒ στοιχείου όταν μεταβάλλεται η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας.

[11]

Επιπλέον η θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου αυξάνεται κατά τον φωτισμό του, γιατί ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στο στοιχείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή αύξηση της εντάσεως του ρεύματος βραχυκυκλώσεως και τη μεγάλη ελάττωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος. Συνεπώς προκαλείται μείωση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Η μείωση αυτή είναι περίπου 0,4% για κάθε βαθμό Κελσίου πάνω από τους 25 °C. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στο σχήμα 2.4.4.



Σχήμα 2.4.4: Μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης εντάσεως και τάσεως ρεύματος ΦΒ στοιχείου με την αύξηση της θερμοκρασίας του. [11]



## 2.5 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το πηλίκο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας ονομάζεται βαθμός απόδοσης  $\eta$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου [11].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{HA}} = \frac{I_m \times V_m}{P_{HA}} = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{HA}}$$

όπου:

$P_m$ [W]: η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς ΦΒ στοιχείου

$P_{HA}$  [W]: η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

$V_m$ [V]: τάση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ

$I_m$ [A]: ένταση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος ΣΜΙ

FF: συντελεστής πλήρωσης με  $FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}}$

$V_{oc}$  [V]: τάση ανοιχτού κυκλώματος

$I_{sc}$ [A]: ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως

## 2.6 Ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκού στοιχείου

Οι πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC (Standard Test Conditions) που έχουν καθοριστεί διεθνώς είναι οι ακόλουθες:

- Θερμοκρασία ΦΒ στοιχείου:  $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$
- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύος  $P_{STC} = 1\text{kW/m}^2$  και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με μάζα αέρα  $AM=1,5$
- Κάθετη πρόσπτωση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Ορίζεται ως ισχύς αιχμής  $P_p$  φωτοβολταϊκού στοιχείου η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται από το ΦΒ στοιχείο κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου και έχει μονάδα μέτρησης το  $W_p$  (Watt αιχμής) [11].

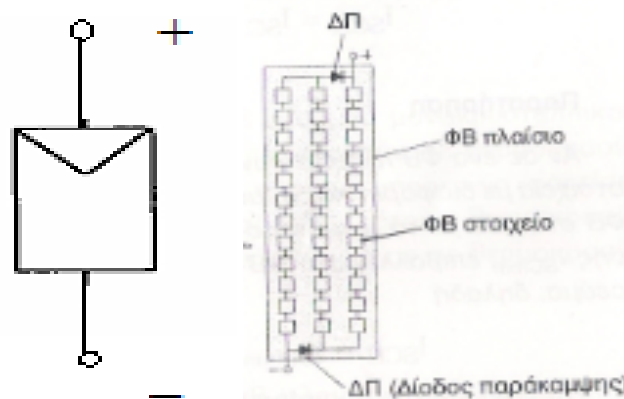
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Στο κεφάλαιο 3 εξετάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων και οι ηλεκτρικές ιδιότητες αυτών.

#### 3.1 Λειτουργία φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά αποτελεί το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module). Στο σχήμα 3.1.1 παρουσιάζεται η συμβολική παράσταση του ΦΒ πλαισίου καθώς και μια τυχαία σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά για τη δημιουργία ΦΒ πλαισίου.



Σχήμα 3.1.1: Συμβολική παράσταση ΦΒ πλαισίου και τυχαία σύνδεση σε σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων [11]

#### 3.1.1 Σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά

Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά γίνεται συνδέοντας το θετικό ηλεκτρόδιο του ενός με το αρνητικό ηλεκτρόδιο του άλλου στοιχείου. Συνεπώς κατά τη σύνδεση  $N$  όμοιων ΦΒ στοιχείων ισχύουν τα εξής:

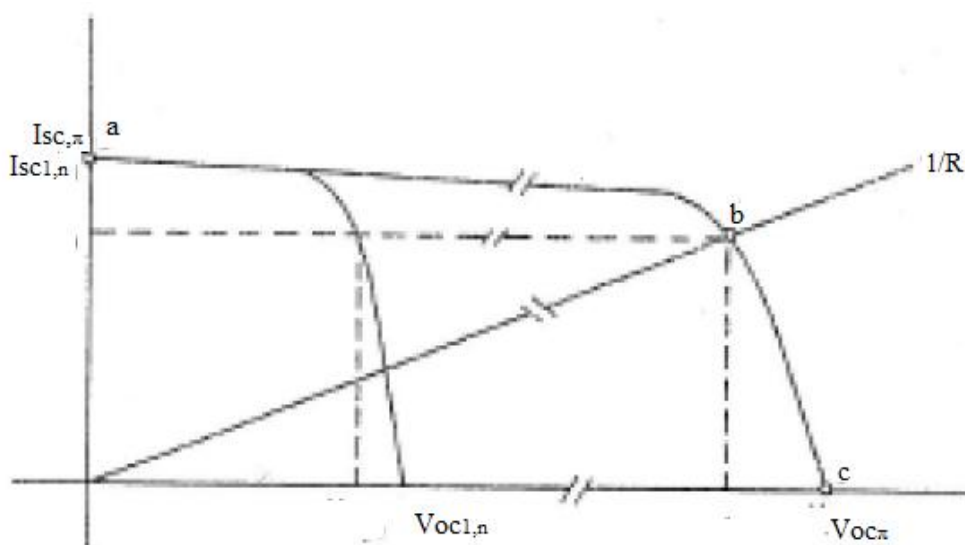
- ο Το ΦΒ πλαίσιο έχει ανάλογα πολλαπλάσια τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OCM}$  όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.1.1.

$$V_{OCΠ} = N \times V_{OC}$$

όπου:

N: αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων

$V_{OC}$ : τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου



**Σχήμα 3.1.1.1: Μεταβολή εντάσεως-τάσεως ρεύματος ΦΒ πλαισίου μετά την σύνδεση των στοιχείων σε σειρά [16]**

- Το ΦΒ πλαίσιο έχει ρεύμα βραχυκύκλωσης πλαισίου  $I_{SCΠ}$  ίσο με το αντίστοιχο  $I_{SC}$  του ενός στοιχείου.

$$I_{SCΠ} = I_{SC}$$

- Η μέγιστη ισχύς στο φορτίο είναι ίση με N φορές τη μέγιστη ισχύ του ενός στοιχείου.

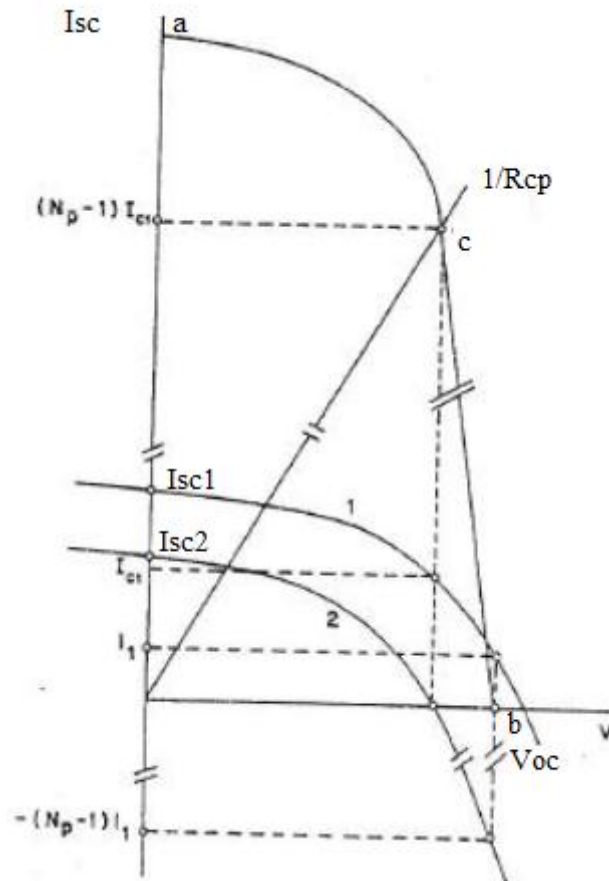
Αν σε ένα ΦΒ πλαίσιο συνδεθούν σε σειρά ΦΒ στοιχεία με διαφορετικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως τότε το ΦΒ στοιχείο με το μικρότερο ρεύμα βραχυκυκλώσεως επιβάλλει στο πλαίσιο το δικό του ρεύμα. Τότε στην περίπτωση που η αντίσταση φορτίου γίνει πολύ μικρή, το πιο αποδοτικό στοιχείο λειτουργεί ως γεννήτρια ενώ το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο ως καταναλωτής ισχύος. Έτσι το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο αρχίζει να υπερθερμαίνεται. Το φαινόμενο αυτό που ονομάζεται κατάσταση θερμού σημείου (hot

spot) προκαλεί τελικά την καταστροφή του ΦΒ στοιχείου (αναγνωρίζεται γιατί αποκτά καφέ χρώμα), αλλά μπορεί να προκαλέσει ακόμα και πυρκαγιά αν το ΦΒ πλαίσιο συνδέεται με ηλεκτρικό συσσωρευτή 24V. Ανάλυση του φαινομένου hot spot θα ακολουθήσει σε επόμενη παράγραφο γιατί είναι μεγάλης σημασίας.

### 3.1.2 Σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων παράλληλα

Αντίστοιχα αν  $N$  όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεθούν παράλληλα, έχουν ως αποτέλεσμα την πρόσθεση των επιμέρους ρευμάτων τους ενώ η τάση είναι ίδια σε όλα τα στοιχεία. Η μέγιστη ισχύς στο φορτίο, ισούται με το γινόμενο της μέγιστης ισχύος του ενός στοιχείου επί τον αριθμό  $N$  των ΦΒ στοιχείων.

Αν από τα  $N$  ΦΒ στοιχεία που έχουν συνδεθεί παράλληλα τα  $N-1$  είναι όμοια και το ένα διαφορετικό, τότε παίρνουμε την καμπύλη του σχήματος 3.1.2.1.



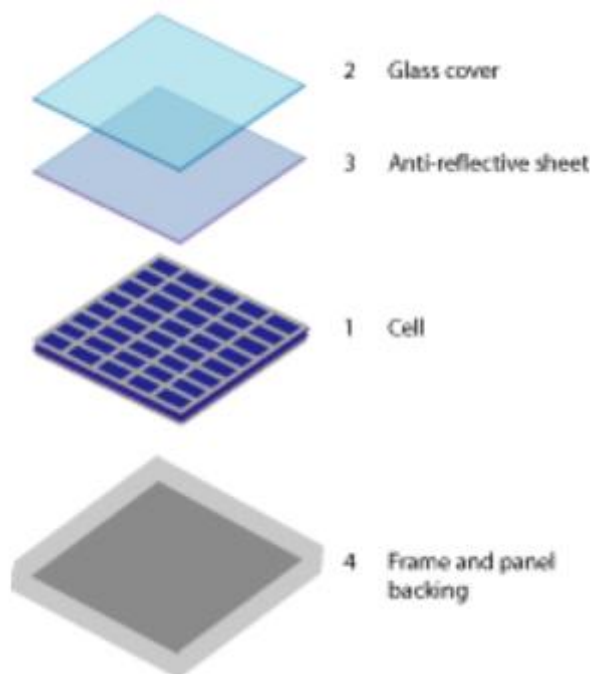
Σχήμα 3.1.2.1: Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος  $N$  φωτοβολταϊκών στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση από τα οποία τα  $N-1$  είναι όμοια και έχουν την χαρακτηριστική καμπύλη 1. Το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο έχει την χαρακτηριστική 2. [16]

Εδώ βλέπουμε τα εξής:

- Στο σημείο a όπου η αντίσταση φορτίου είναι μηδενική και τα στοιχεία βραχυκυκλωμένα  $V=0$  και το ρεύμα βραχυκυκλώσεως  $I_{sc}$  ισούται με το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων.
- Το σημείο c είναι το σημείο τομής της χαρακτηριστικής του συστήματος με τη χαρακτηριστική του περισσότερου αποδοτικού στοιχείου. Στο σημείο αυτό λειτουργεί το σύστημα όταν η αντίσταση φορτίου είναι ίση με  $R_{cp}$ . Τότε το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο δεν είναι ούτε γεννήτρια ούτε καταναλωτής ισχύος.
- Το σημείο b της χαρακτηριστικής αντιστοιχεί σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος οπότε στο σημείο αυτό το ρεύμα στην έξοδο του συστήματος είναι μηδέν.
- Για να λειτουργήσει το σύστημα στην περιοχή όπου το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο καταναλώνει ισχύ, πρέπει η αντίσταση του φορτίου να γίνει πολύ μεγάλη. Τότε το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο ονομάζεται θερμό σημείο.

### 3.2 Κατασκευή-είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατασκευάζονται ως εξής: Πάνω σε ένα μεταλλικό φύλλο συνήθως αλουμινίου ή από ενισχυμένο πλαστικό, στερεώνονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με κατάλληλη κολλητική ουσία. Το φύλλο αυτό αποτελεί την πλάτη του πλαισίου. Η εμπρόσθια όψη των στοιχείων καλύπτεται από προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Τα δύο φύλλα, εμπρός και πίσω, συγκρατούνται μεταξύ τους με τη βοήθεια ταινίας από συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Αυτή η κατασκευή εξασφαλίζει την απαραίτητη μηχανική αντοχή, τις υποδοχές στήριξης και την αυξανόμενη στεγανότητα για προστασία από την υγρασία. Σχηματικά τα βασικά μέρη ενός ΦΒ πλαισίου θα μπορούσαν να αναπαρασταθούν στο σχήμα 3.2.1.



**Σχήμα 3.2.1: Βασικά μέρη φωτοβολταϊκού πλαισίου.** [<http://www.chem-lab.gr>]

Με στόχο την καλύτερη προσαρμογή των ΦΒ πλαισίων στα κτίρια οι εταιρείες κατασκευής τους προτείνουν πολύ ενδιαφέρουσες λύσεις. Στις στέγες των παραδοσιακών κτιρίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ΦΒ πλαίσια με τη μορφή κεραμιδιών όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.2, ενώ στις πλευρές με τη μορφή ζωγραφικών πινάκων. Σε διαδρόμους μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων προτείνεται η χρήση ημιπερατών ΦΒ πλαισίων, τα οποία συνδυάζουν το ημερήσιο φυσικό φωτισμό των διαδρόμων και τον τεχνητό φωτισμό

από φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια. Χαρακτηριστική είναι η εικόνα του σχήματος 3.2.4.



**Σχήμα 3.2.2:** Ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά δεύτερης γενιάς, thin-film, με τη μορφή των παραδοσιακών κεραμιδιών φύλλων σε στέγη κτιρίου. [<http://www.4green.gr>]



**Σχήμα 3.2.3:** Φωτοβολταϊκά πλαίσια σε πρόσοψη κτιρίου. [<http://www.4green.gr>]





**Σχήμα 3.2.4: Shanghai Hongqiao Railway Station. Η ηλιακή οροφή ισχύος 6,7 MW έχει δυνατότητα παραγωγής 6,3 εκατομμυρίων kWh ετησίως. [<http://www.4green.gr>]**

Μια πρώτη κατηγοριοποίηση των ΦΒ στοιχείων θα μπορούσε να γίνει με βάση το πάχος του υλικού που χρησιμοποιείται:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου μεγάλου πάχους:
  - ο Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Το μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας". Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου.



**Σχήμα 3.2.5: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου**  
 [<http://www.selasenergy.gr>]

- ο Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20%, ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC (electromagnetic casting).



**Σχήμα 3.2.6: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου.**

[<http://www.selasenergy.gr>]

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου.

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων (thin film):
  - Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS με προσθήκη γαλλίου CIGS).

Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11%. Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8%, η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γαλλίου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της

μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκα thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8%, ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά). Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκα στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.



**Σχήμα 3.2.7: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο άμορφου πυριτίου.**

[<http://www.selasenergy.gr>]

- ο Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe).

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκα στοιχεία έχει φθάσει το 16%.

- Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs).

Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσένιο δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκα στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκα στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

- Υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία:

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών - HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer). Τα ποιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκα στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Το μειονέκτημα είναι ότι το υβριδικό φωτοβολταϊκό είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

- Άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων:
  - Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si).
  - Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία.

### ***3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση και την λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων.***

Η ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων οι οποίοι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό του φωτοβολταϊκού συστήματος. Αυτοί οι παράγοντες είτε εξαρτώνται από το ίδιο το πλαίσιο είτε από το περιβάλλον στο οποίο αυτό έχει εγκατασταθεί. Οι σημαντικότεροι αναλύονται στις επόμενες υποπαραγράφους.

#### ***3.3.1 Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας***

Η ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ετήσια βάση είναι άμεσα συνδεδεμένη με την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός συλλέκτη είναι με τη σειρά της άμεσα εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Για την μεγιστοποίηση των λαμβανομένων ποσών ενέργειας τα πλαίσια πρέπει να προσανατολίζονται κατάλληλα και να είναι τοποθετημένα στην κατάλληλη γωνία κλίσης. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και συνεπώς μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος. Χαρακτηριστικά είναι τα διαγράμματα 2.4.2 και 2.4.3 για τα οποία έχει ήδη γίνει λόγος. [16]

#### ***3.3.2 Θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων***

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων επηρεάζεται σημαντικά από την άνοδο της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, των οποίων η μέση θερμοκρασία είναι κατά 30°C περίπου μεγαλύτερη από αυτή της λειτουργίας τους σε πρότυπες συνθήκες STC, ειδικά κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Οι μεγάλες θερμοκρασίες κυττάρου έχουν δυσμενή επίδραση στην μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, αφού η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στην μείωση της διαφοράς δυναμικού του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Αυτή η αρνητική επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στην αποδιδόμενη μέγιστη ισχύ έχει αναφερθεί και στην χαρακτηριστική του σχήματος 2.4.4. Από την άλλη έχει παρατηρηθεί ότι και οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες οδηγούν στη μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. [16]

#### ***3.3.3 Ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου***

Μεγάλες ταχύτητες ανέμων συνήθως οδηγούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων οπότε αυξάνεται η απόδοση αυτών. Εξάλλου

όταν οι άνεμοι είναι βόρειοι, σε αντίθεση με τους νότιους είναι συνήθως ψυχροί και ως εκ τούτου μειώνουν τη θερμοκρασία του ΦΒ πλαισίου υπό τα ίδια ποσοστά της ηλιακής ακτινοβολίας. [16]

### **3.3.4 Ρύπανση**

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, ιδίως εκείνου που έχει μικρή κλίση μειώνεται λόγω της ρύπανσης της επιφάνειας του από παραμονή σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού θάλασσας, εντόμων, ακαθαρσιών κτλ. Η μείωση είναι εντονότερη σε βιομηχανικές και αστικές περιοχές λόγω της αιθάλης. Τότε απαιτείται περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας με απορρυπαντικό. Σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ισχυρούς ανέμους, το ΦΒ πλαίσιο πρέπει να τοποθετείται κάθετα ή με κλίση  $45^\circ$  για να μην συγκρατείται το χιόνι ή η σκόνη. Επιπλέον σε τέτοιες περιοχές θα πρέπει η δυσμενής επίδραση της ρύπανσης να υπεισέρχεται στους υπολογισμούς μας. [16]

### **3.3.5 Υγρασία**

Επειδή η στεγανοποίηση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι πολύ δύσκολη οι περισσότεροι κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι πρέπει μπορεί να αναπνέει το πλαίσιο ούτως ώστε να μην εγκλωβίζεται υγρασία στο εσωτερικό του. Είναι προφανές ότι οι υδρατμοί που εισέρχονται στο πλαίσιο μετατρέπονται σε νερό. Για την απομάκρυνση αυτού του νερού προβλέπουν μία οπή στον πίνακα συνδέσεων την οποία καλύπτουν με σήτα προκειμένου να αποτρέψουν την είσοδο μικρών ζώων. [16]

### **3.3.6 Γήρανση**

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μειώνεται λόγω της αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η φθορά αυτή παρουσιάζεται και στα υπόλοιπα μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Συνεπώς η μείωση της αποδιδόμενης ισχύος είναι γύρω στο 1%-2% για κάθε χρόνο λειτουργίας. [16]

### **3.3.7 Σκίαση**

Ο παράγοντας σκίαση είναι πολύ σημαντικός κατά την σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Το φαινόμενο της σκίασης παρουσιάζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων όπως παρακείμενα κτίρια, βλάστηση, κολώνες κτλ, είτε σε περιπτώσεις περιορισμένης έκτασης εγκατάστασης όπως είναι οι στέγες των κτιρίων, όπου προκαλείται σκίαση από καμινάδες, ηλιακοί



θερμοσίφωνες, στηθαίο δώματος, κλιμακοστάσιο, κεραίες ή ακόμα και από τη μία σειρά στην επόμενη.



**Σχήμα 3.3.7.1: Μερική σκίαση φωτοβολταϊκών σε στέγη**  
[<http://www.solarbau.gr> ]

Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από εν σειρά όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η σκίαση ή βλάβη έστω κι ενός από τα στοιχεία μπορεί να οδηγήσει στην αχρήστευση όλου του πλαισίου. Ένα σκιασμένο στοιχείο που συμπεριφέρεται κατά βάση ως μια απλή δίοδος αν σκιαστεί, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα τείνει στο μηδέν, ενώ ταυτόχρονα δέχεται το άθροισμα των τάσεων όλων των άλλων στοιχείων ανάστροφα. [16] Αν τα υπόλοιπα φωτιζόμενα στοιχεία του πλαισίου είναι πολλά στο πλήθος, τότε αυτή η τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου και να προκαλέσει την καταστροφή της. Στα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια το σκιασμένο στοιχείο λειτουργεί ως μια μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα. Παρατεταμένη σκίαση ενός στοιχείου σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης του κατεστραμμένου στοιχείου.

### **3.3.8 Απώλεια προσαρμογής ισχύος - Κατάσταση θερμού σημείου (HOT SPOT)**

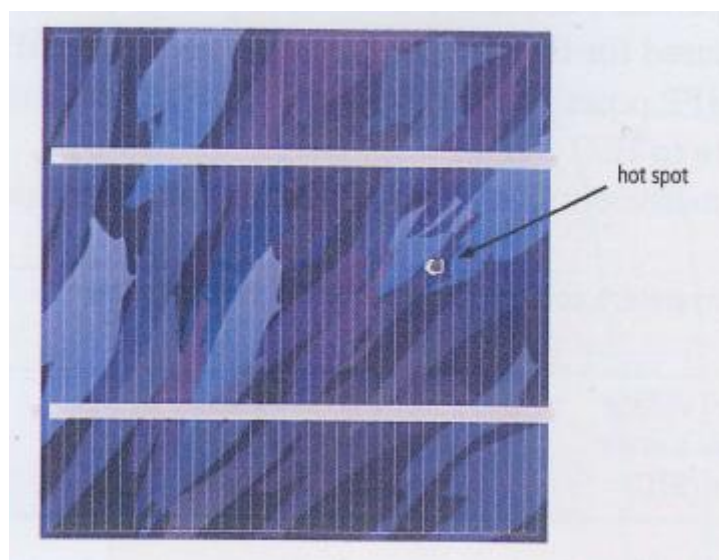
Όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες καθώς επίσης και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων κατά τη μαζικά παραγωγή τους, μπορεί να αποτελέσουν αιτία για τη μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Μεγαλύτερη δυσμενή επίδραση έχει η ολική ή μερική σκίαση αλλά έχει παρατηρηθεί και



το εξής: θραύση ενός ή περισσότερων στοιχείων, η οποία μπορεί να οφείλεται σε διαφορετική διαστολή μεταξύ του στοιχείου και του υλικού πάνω στο οποίο στηρίζεται, σε χαλάζι, σε μειωμένη αντοχή που προέκυψε κατά τη διάρκεια της κατασκευής του ή της ενσωμάτωσης του στο πλαίσιο. Ολική θραύση ενός στοιχείου ισοδυναμεί με ανοιχτό κύκλωμα.

Αν δύο στοιχεία με ανόμοια χαρακτηριστικά συνδεθούν σε σειρά, η συμπεριφορά τους που απαιτεί να διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, προκύπτει αν αθροίσουμε τις τάσεις των δύο στοιχείων για τις διάφορες τιμές ρεύματος. Ισχυρές αποκλίσεις από την προσαρμογή των χαρακτηριστικών των στοιχείων μια συστοιχίας είναι δυνατόν να προκαλέσουν απώλεια της ικανότητας παραγωγής ισχύος από τα καλύτερα από πλευράς χαρακτηριστικών στοιχεία. Αναλυτικότερα, η μη προσαρμογή των χαρακτηριστικών των στοιχείων μιας συστοιχίας, συνεπάγεται ότι η ολική ισχύς εξόδου θα είναι μικρότερη από το άθροισμα των επιμέρους ισχύων των στοιχείων. Η απώλεια αυτή ονομάζεται απώλεια προσαρμογής και αποτελεί ένα φαινόμενο με μεγάλο ενδιαφέρον, ιδιαίτερος για στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά.

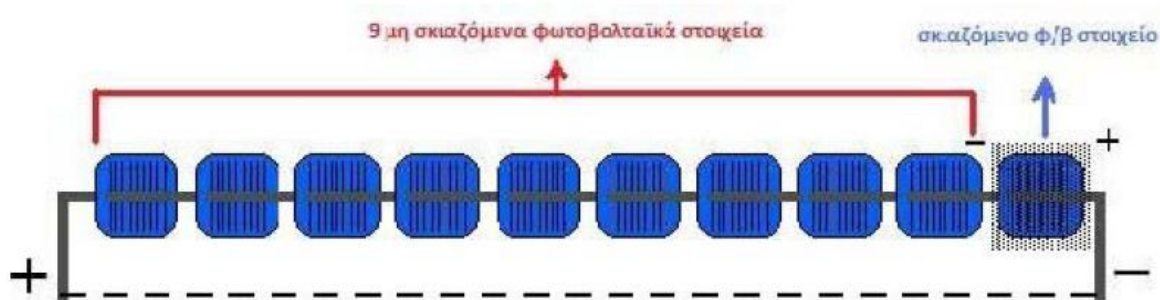
Η αδυναμία προσαρμογής των χαρακτηριστικών των στοιχείων μιας συστοιχίας, εκτός από μείωση της ισχύος εξόδου είναι δυνατό να προκαλέσει κι ένα άλλο φαινόμενο το οποίο έχει προαναφερθεί, το θερμό σημείο ή hot spot. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε ανάστροφη πόλωση ενός ή περισσότερων κυττάρων και συνεπάγεται υπερθέρμανση τους που πολλές φορές μπορεί να είναι καταστροφική.



**Σχήμα 3.3.8.1: Κατάσταση θερμού σημείου. [15]**

Πιο αναλυτικά το φαινόμενο θερμού σημείου συμβαίνει όταν υπάρχει ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία που παράγουν χαμηλότερο ηλεκτρικό ρεύμα (λόγω

σκίασης, αστοχίας υλικού, αντίθετης πολικότητας κτλ) σε σχέση με τα υπόλοιπα με τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Δηλαδή αν μια αλυσίδα από στοιχεία βραχυκυκλωθεί, τότε η ισχύς που παράγουν τα μη σκιαζόμενα στοιχεία καταναλώνεται δια μέσου του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Μία τέτοια αλυσίδα παρουσιάζεται και στο σχήμα 3.3.8.2. Το σκιαζόμενο στοιχείο μειώνει το ρεύμα προκαλώντας τα μη σκιαζόμενα στοιχεία να παράγουν υψηλότερη τάση η οποία μπορεί να προκαλέσει ανάστροφη πόλωση του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η ενέργεια που χάνεται στο σκιαζόμενο στοιχείο μετατρέπεται σε θερμότητα (υπερβολική τοπική αύξηση της θερμοκρασίας) με αποτέλεσμα τη θραύση ή και την ολική καταστροφή του πλαισίου.



Σχήμα 3.3.8.2: Διάταξη φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά με ένα σκιαζόμενο. [2]

### 3.3.9 Μέθοδοι ανάκτησης απωλειών ισχύος

Προκειμένου να μειώσουμε την επίδραση των φαινομένων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, προκειμένου να προστατέψουμε την εύρυθμη λειτουργία της συστοιχίας, ακολουθούμε συνήθως δύο στρατηγικές: είτε χρησιμοποιούμε πλεονάζουσες συνδέσεις είτε συνδέουμε παράλληλα διόδους παράκαμψης.

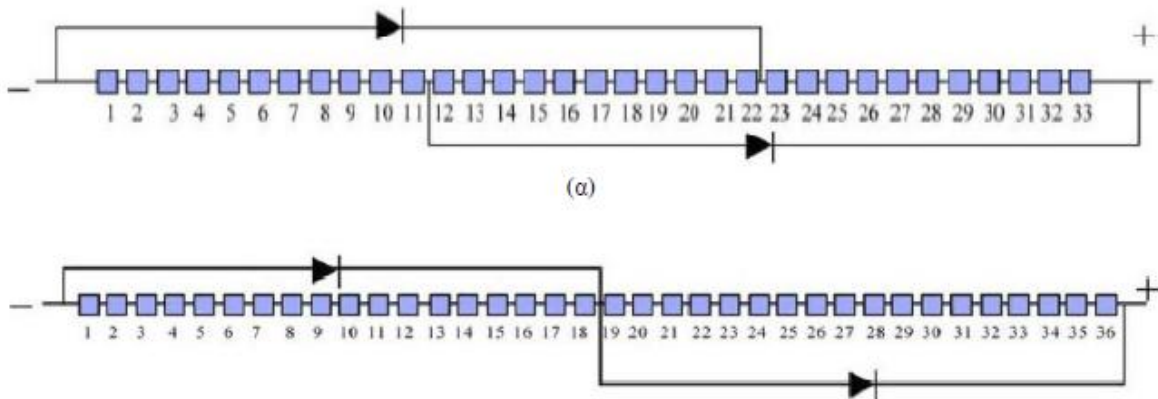
#### 3.3.9.1 Στρατηγική παράλληλης/σε σειρά σύνδεσης στοιχείων

Ένας τρόπος για να αυξήσουμε την αξιοπιστία του συστήματος είναι να χρησιμοποιήσουμε πλεονάζουσες σε σειρά και παράλληλες συνδέσεις. Είναι σκόπιμο να χωρίσουμε τη συστοιχία σε μεγάλο αριθμό παράλληλων κλάδων. Αυτό μειώνει την πιθανότητα να συμβούν πολλά βραχυκυκλώματα σε ένα κλάδο, έτσι ώστε δύο ή περισσότερα βραχυκυκλωμένα στοιχεία να μην προκαλούν αθροιστική πτώση τάσης. Αυτό έχει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι είναι δυνατός ο τμηματικός έλεγχος της συστοιχίας σε διάφορα ενδιάμεσα σημεία καθώς επίσης υπάρχει δυνατότητα απομόνωσης μικρών (επί μέρους) τμημάτων όλης της συστοιχίας για συντήρηση και επισκευή.

### 3.3.9.2 Δίοδοι παράκαμψης

Η προστασία όλης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης από την κατάσταση θερμού σημείου, εξασφαλίζεται με την παράλληλη σύνδεση μιας διόδου παράκαμψης (by-pass diode) σε κάθε ομάδα φωτοβολταϊκών στοιχείων που θέλουμε να προστατέψουμε. Η δίοδος αυτή συνδέεται με αντίθετη πόλωση. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, κάθε στοιχείο είναι ορθά πολωμένο και η δίοδος που είναι ανάστροφα πολωμένη, αποτελεί απλά ένα κομμάτι ανοιχτού ουσιαστικά κυκλώματος, με αποτέλεσμα το ρεύμα να μην επιλέγει το δρόμο αυτό. Όμως όταν ένα στοιχείο πολωθεί ανάστροφα και εμφανιστεί μια διαφορά του ρεύματος βραχυκυκλώσεως μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων της σειράς, τότε η δίοδος άγει και προστατεύει το «προβληματικό στοιχείο». [17]

Πρακτικά θα έπρεπε να είχαμε μία δίοδο για κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο. Αυτό όμως είναι ανέφικτο λόγω του υψηλού κόστους κι έτσι χρησιμοποιείται μία δίοδος κατά μήκος μιας ομάδας στοιχείων. Ο μέγιστος αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων που μπορεί να καλύπτει μία δίοδος είναι περίπου δεκαπέντε. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν δύο τρόπους τοποθέτησης διόδων κατά τους οποίους είτε παρουσιάζεται αλληλοεπικάλυψη στοιχείων είτε όχι όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3.9.2.1. [17]



Σχήμα 3.3.9.2.1: (α) στοιχεία που επικαλύπτονται (β) στοιχεία που δεν επικαλύπτονται. [17]

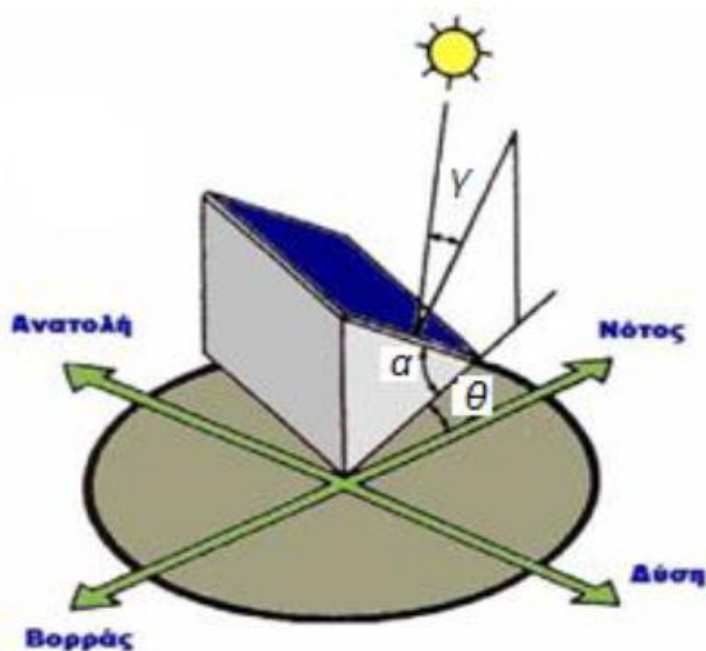
### 3.4 Προσανατολισμός φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η σωστή τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων αποτελεί βασικό παράγοντα για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Ο προσανατολισμός ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου χαρακτηρίζεται από τη γωνία κλίσης και την αζιμούθια γωνία οι οποίες μαζί με τη γωνία πρόσπτωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4.1.

- Γωνία κλίσης  $\alpha$ :  
Είναι η δίεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου και στο οριζόντιο επίπεδο.
- Αζιμούθια γωνία  $\theta$ :  
Είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακορύφου του φωτοβολταϊκού πλαισίου και τον Νότο. Η γωνία  $\theta=0^\circ$  αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του πλαισίου προς τον Νότο, η γωνία  $\theta=90^\circ$  προς τη Δύση, η γωνία  $\theta=-180^\circ$  προς τον Βορρά και η γωνία  $\theta=-90^\circ$  προς την ανατολή.

Στο βόρειο ημισφαίριο τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται προς τον Νότο

( $\theta = 0^\circ$ ), ενώ στο νότιο ημισφαίριο τοποθετούνται προς τον βορρά ( $\theta=-180^\circ$ ).

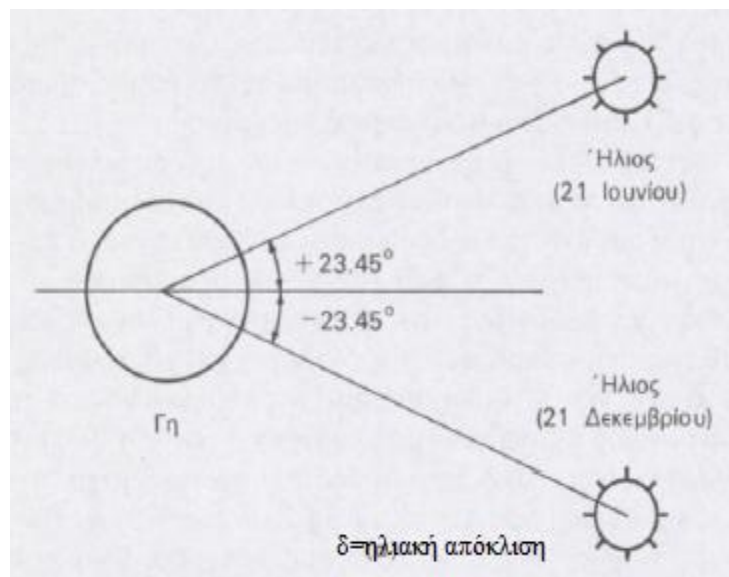


$\alpha$ : Γωνία κλίσης  
 $\theta$ : Αζιμούθια γωνία  
 $\gamma$ : Γωνία πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας

Σχήμα 3.4.1: Γωνίες προσανατολισμού ΦΒ πλαισίου στην επιφάνεια της γης. [16]

Η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια είναι μέγιστη όταν η επιφάνεια είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι  $\gamma=0^\circ$ . Δεδομένου ότι ο ήλιος μετακινείται συνεχώς στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας, η προηγούμενη συνθήκη εξασφαλίζεται μόνο με την περιστρεφόμενη βάση δύο αξόνων, που αυξάνει σημαντικά το κόστος της εγκατάστασης. Η χρήση τέτοιων μηχανικών διατάξεων που αναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (πχ με τη βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκυττάρων) ενδείκνυται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις εφαρμογών. Συνεπώς στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται με σταθερή γωνία κλίσης.

Λόγω όμως της μεταβολής της απόκλισης  $\delta$  του ηλίου, δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ηλίου και του επιπέδου του ισημερινού, στη διάρκεια του έτους η βέλτιστη γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι διαφορετική για κάθε εποχή. Η μέγιστη τιμή της απόκλισης  $\delta$  κατά το χειμερινό και το θερινό ηλιοστάσιο οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4.2.



**Σχήμα 3.4.2: Η μέγιστη απόκλιση του ηλίου κατά το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο. [11]**

Οι τιμές της απόκλισης του ηλίου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο. Πιο συγκεκριμένα η απόκλιση υπολογίζεται από την σχέση [1]:

$$\delta = 23,45 \times \sin \left( 360 \times \frac{284 + n}{365} \right)$$

Όπου:

$\delta$ = η απόκλιση του ηλίου

$n$ = η ημέρα του έτους που υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα

Μήνας	$n$ για την ισοστή μέρα του μήνα
Ιανουάριος	1
Φεβρουάριος	31+i
Μάρτιος	59+i
Απρίλιος	90+i
Μάιος	120+i
Ιούνιος	151+i
Ιούλιος	181+i
Αύγουστος	212+i
Σεπτέμβριος	243+i
Οκτώβριος	273+i
Νοέμβριος	304+i
Δεκέμβριος	334+i

**Πίνακας 3.4.1: Πίνακας υπολογισμού της ισοστής μέρα του μήνα**

Η μεταβολή των τιμών της απόκλισης του ηλίου κατά τη διάρκεια του έτους έχει ως αποτέλεσμα οι κυκλικές τροχιές να διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ το χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο. Η θέση του ηλίου σε ένα τόπο περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4.3:

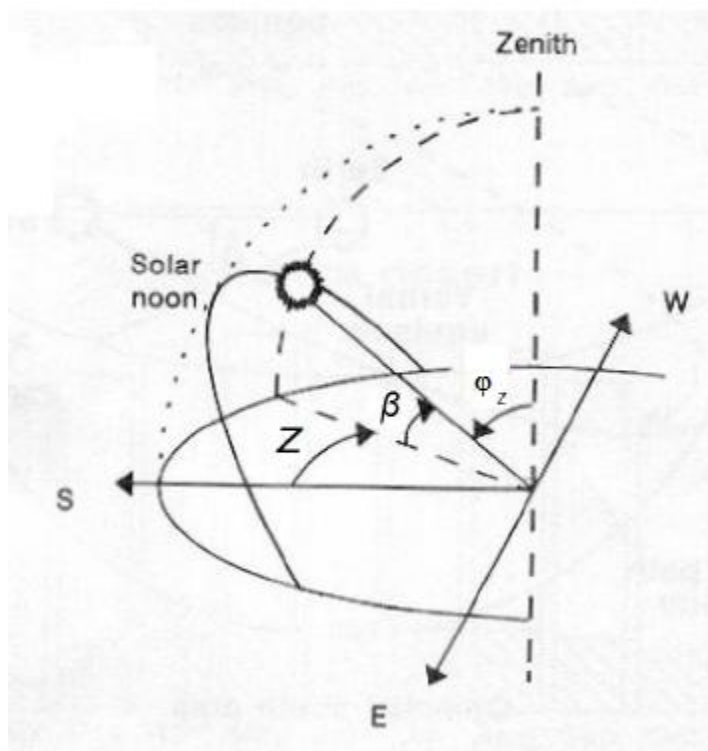
- Το ύψος του ηλίου  $\beta$ , που είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ηλίου και στον ορίζοντα.
- Το ηλιακό αζιμούθιο  $Z$ , δηλαδή η γωνία του οριζοντίου επιπέδου ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ηλίου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά – νότου. Δεξιότερα του νότου δηλαδή με κατεύθυνση προς τη Δύση το αζιμούθιο είναι θετικό ενώ αριστερότερα αρνητικό.

Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, συνδέεται με τις άλλες γωνίες ηλιακής γεωμετρίας με την παρακάτω σχέση [1]:

$$\cos\varphi_z = \sin\delta \times \sin\varphi + \cos\delta \times \cos\varphi \times \cos\omega = \sin\beta$$

Όπου:

- $\beta$ = η γωνία για το ύψος του Ηλίου στην συγκεκριμένη περιοχή και ώρα
- $\delta$  = η ηλιακή απόκλιση της συγκεκριμένης ημερολογιακής ημέρας
- $\varphi$  = το γεωγραφικό πλάτος της συγκεκριμένης περιοχής
- $\omega$  = η ηλιακή ωριαία γωνία που αντιστοιχεί στην ώρα υπολογισμού της θέσης του ηλίου
- $\varphi_z$ = η γωνία της προσπίπτουσας δέσμης ως προς το τοπικό ζενίθ, (συμπληρωματική της  $\beta$ )



Σχήμα 3.4.3: Το ύψος  $\beta$  και το ηλιακό αζιμούθιο  $Z$ . [16]

Όταν η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε ένα κτίριο δεν καθορίζεται από την κλίση της επιφάνειας πάνω στην οποία τοποθετούνται (οροφή, τοίχοι κτλ), η βέλτιστη γωνία κλίσης στο βόρειο ημισφαίριο εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος  $\phi$  του τόπου και την επιθυμητή περίοδο λειτουργίας του συστήματος. [11] Πιο αναλυτικά η βέλτιστη γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο βόρειο ημισφαίριο ισούται με:

- $\alpha = \phi$  για όλη τη διάρκεια του χρόνου
- $\alpha = \phi + 15^\circ$  για καλύτερη απόδοση το χειμώνα
- $\alpha = \phi - 15^\circ$  για καλύτερη απόδοση το καλοκαίρι
- $\alpha = \phi - 15^\circ$  σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό λόγω των σταγονιδίων νερού στην ατμόσφαιρα (το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δέχεται μεγαλύτερη διάχυτη ακτινοβολία)
- $\alpha = 5^\circ - 10^\circ$  σε περιοχές με γεωγραφικό πλάτος  $\phi \leq 20^\circ$ , δηλαδή γύρω από τον Ισημερινό.
- $\alpha = 0^\circ$  σε περιοχές με πολύ μικρή ηλιοφάνεια για να εκμεταλλευτούμε το μέγιστο της διάχυτης ακτινοβολίας.

Αν η θέση του κτιρίου δεν επιτρέπει τον προσανατολισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων προς το Νότο (για το βόρειο ημισφαίριο), τα πλαίσια τοποθετούνται προς την Ανατολή ή την Δύση αλλά ποτέ προς το Βορρά, γιατί τότε έχουν πολύ χαμηλή απόδοση. Ο



προσανατολισμός τους προς τον Βορρά επιτρέπεται μόνο για οριζόντια πλαίσια (γωνία κλίσης  $\alpha=0^\circ$ ).

### 3.5 Διάταξη φωτοβολταϊκών πλαισίων

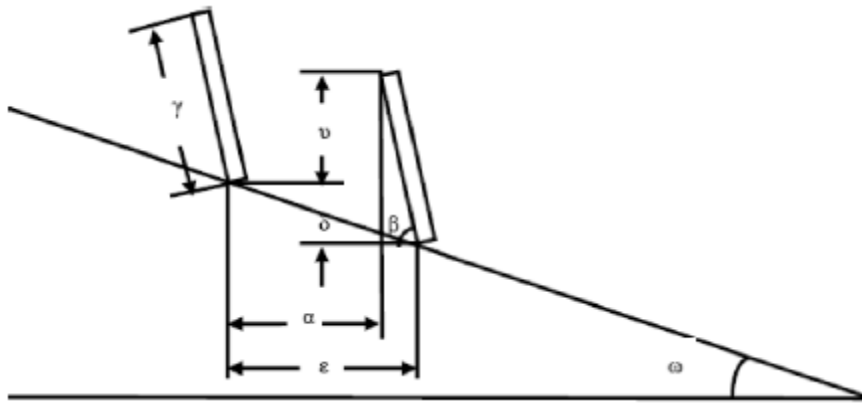
Κατά την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων μιας συστοιχίας απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή καθότι δεν πρέπει η μιας σειρά πλαισίων να σκιάζει την επόμενη. Ο υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης  $\varepsilon$  μεταξύ δύο γειτονικών σειρών όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5.1 γίνεται με τον εξής τρόπο [16] :

- Υπολογίζουμε την επικάλυψη  $v$  του ύψους της κατασκευής στήριξης από την εξίσωση:

$$v = \gamma \text{ (m)} \times \sin\beta \text{ (}^\circ\text{)} - \delta \text{ (m)}$$

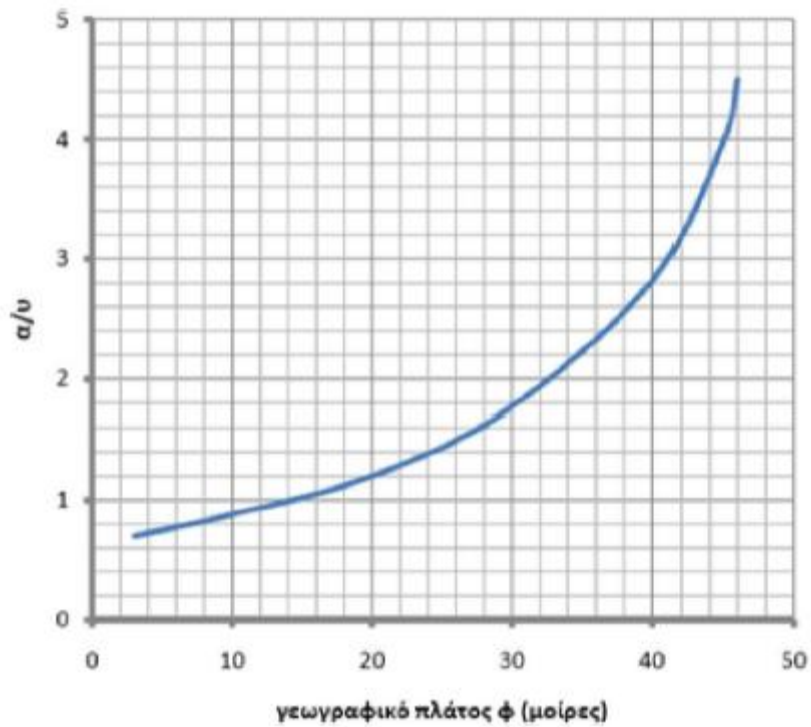
Όπου:

- $\gamma$ (m): το μήκος των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- $\beta$ ( $^\circ$ ): η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- $\delta$ (m): η υψομετρική διαφορά μεταξύ των στηριγμάτων δύο σειρών φωτοβολταϊκών πλαισίων ( $\delta = 0$  για στήριξη στο ίδιο επίπεδο).



Σχήμα 3.5.1: Υπολογισμός ελάχιστης απόστασης  $\varepsilon$  φωτοβολταϊκών πλαισίων. [16]

- Υπολογίζουμε την ελεύθερη απόσταση  $a$  μεταξύ δύο γειτονικών σειρών φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η ελεύθερη απόσταση  $a$  προκύπτει από τον λόγο  $a/v$ , τον οποίον υπολογίζουμε από το διάγραμμα του σχήματος 3.5.2.



Σχήμα 3.5.2: Καμπύλη του λόγου  $a/v$  σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος  $\phi$ . [16]

- Τελικά υπολογίζουμε την ελάχιστη απόσταση  $\epsilon$  μεταξύ των δύο γειτονικών σειρών φωτοβολταϊκών πλαισίων.

$$\epsilon(m) = a(m) + \gamma(m) \times \cos\beta(^{\circ})$$

Όπου:

- $\gamma(m)$ : το μήκος των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- $\beta(^{\circ})$ : η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- $a(m)$ : η ελεύθερη απόσταση  $a$  μεταξύ δύο γειτονικών ΦΒ πλαισίων

### 3.6 Εμβαδό οριζόντιας έκτασης εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πλαισίων

Το εμβαδό της οριζόντιας έκτασης  $S_E$  (  $m^2$  ) της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων υπολογίζεται [16] από την παρακάτω σχέση :

$$S_E = S_o \times \frac{\varepsilon}{\gamma \times \cos \beta}$$

Όπου:

- $S_o$  ( $m^2$ ): το εμβαδό οριζόντιας προβολής όλων των φωτοβολταϊκών πλαισίων με  $S_o = S_\pi \times N \times \cos \beta$
- $N$ : ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- $S_\pi$  ( $m^2$ ): εμβαδό φωτοβολταϊκού πλαισίου
- $\beta$  ( $^\circ$ ): η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- $\gamma$  (m): το μήκος των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- $\varepsilon$  (m): η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των δύο γειτονικών σειρών φωτοβολταϊκών πλαισίων

### 3.7 Ισχύς αιχμής φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Η ισχύς αιχμής μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας ορίζεται ως η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που αποδίδεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC. Προτού δοθεί η σχέση υπολογισμού της ισχύος αιχμής κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούν και να υπολογιστούν οι συντελεστές που εκφράζουν τις απώλειες που εμφανίζονται στα διάφορα τμήματα της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, όπως είναι οι συσσωρευτές, οι συνδέσεις των πλαισίων, οι καλωδιώσεις, ο αναστροφέας ΣΡ/ΕΡ, ο ρυθμιστής φόρτισης των συσσωρευτών, τα ίδια τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κτλ. Οι συντελεστές αυτών των απωλειών παρουσιάζονται στον πίνακα 3.7.1.

$\sigma_{\alpha}$	<p><u>Συντελεστής ανομοιογένειας</u>: εκφράζει την ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών I-V των ΦΒ πλαισίων. Αυτές οι διαφορές μπορεί να δημιουργηθούν από εξωτερικούς παράγοντες (πχ σκίαση ενός ΦΒ πλαισίου), ή από διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες (πχ διαφορετική ψύξη ΦΒ πλαισίων λόγω γειτνίασης με τοίχο περίφραξης) ή μπορεί να υπάρχουν και εκ κατασκευής. Λαμβάνεται <math>\sigma_{\alpha}=0,98</math></p>
$\sigma_{\mu}$	<p><u>Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας</u>: περιλαμβάνει όλες τις απώλειες του ΦΒ συστήματος από την έξοδο της ΦΒ συστοιχίας μέχρι την έξοδο προς την κατανάλωση. Εξαρτάται από το είδος των διατάξεων που υπάρχουν στο σύστημα και διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Χωρίς ηλεκτρικό συσσωρευτή             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Με μετατροπέα τάσεως DC-AC inverter και DC-DC converter: <math>\sigma_{\mu}=0,85-0,90</math></li> <li>✓ Μόνο με μετατροπέα τάσεως DC-AC inverter: <math>\sigma_{\mu}=0,96-0,98</math></li> <li>✓ Χωρίς μετατροπείς τάσεως: <math>\sigma_{\mu}=0,99</math></li> </ul> </li> <li>○ Με ηλεκτρικό συσσωρευτή             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Με μετατροπέα τάσεως DC-AC inverter και DC-DC converter: <math>\sigma_{\mu}=0,75-0,80</math></li> <li>✓ Μόνο με μετατροπέα τάσεως DC-AC inverter: <math>\sigma_{\mu}=0,85-0,90</math></li> <li>✓ Χωρίς μετατροπείς τάσεως: <math>\sigma_{\mu}=0,92</math></li> </ul> </li> </ul>

$\sigma_{\kappa}$	<u>Συντελεστής καλωδιώσεων</u> : Εκφράζει τις απώλειες στα καλώδια σύνδεσης της ΦΒ συστοιχίας. Λαμβάνεται: $\sigma_{\kappa}=0,98$
$\sigma_{\theta}$	<u>Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης</u> : Εκφράζει τις απώλειες στην απόδοση των ΦΒ πλαισίων λόγω της ανόδου της θερμοκρασίας. Λαμβάνεται από την εξίσωση: $\sigma_{\theta}= 1-[(t_a+30)-25]\times 0,25$ Όπου: $t_a$ =μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα που λαμβάνεται από πίνακες
$\sigma_{\gamma}$	<u>Συντελεστής γήρανσης</u> : Η απόδοση των ΦΒ πλαισίων μειώνεται λόγω της αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των ΦΒ πλαισίων. Η μείωση είναι 1% για κάθε έτος λειτουργίας και εκφράζεται με το συντελεστή γήρανσης που κατά μέσο όρο ισούται με : $\sigma_{\gamma}=0,9$
$\sigma_{\rho}$	<u>Συντελεστής ρύπανσης</u> : Εκφράζει το λόγο της ηλεκτρικής ισχύος που παρήγαγε το πλαίσιο που λειτουργεί σε συνθήκες ρύπανσης προς την ισχύ που θα παρήγαγε αν η επιφάνεια του ήταν καθαρή. Συνεπώς θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Οι τιμές που παίρνει είναι: $\sigma_{\rho}=0,95$ για πλαίσια που καθαρίζονται συχνά $\sigma_{\rho}=0,90$ για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα $\sigma_{\rho}=0,80$ για πλαίσια οριζόντια και ακάθαρτα
$\sigma_{\delta}$	<u>Συντελεστής απωλειών διόδου</u> : Εκφράζει τις απώλειες ηλεκτρικής ισχύος κατά τη λειτουργία της διόδου αντεπιστροφής, που εμποδίζει την εκφόρτιση του συσσωρευτή δια μέσου του ΦΒ πλαισίου, όταν αυτό δε φωτίζεται. Οι απώλειες αυτές είναι της τάξεως του 1% και ο συντελεστής παίρνει την τιμή: $\sigma_{\delta}=0,99$

**Πίνακας 3.7.1.: Συντελεστές απωλειών που μειώνουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.**

Μετά τον προσδιορισμό των απωλειών ακολουθεί η σχέση υπολογισμού της ηλεκτρικής ισχύος αιχμής της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για την κάλυψη των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων [1]:

$$P_a(W_p) = \sigma_{\gamma M} \times \frac{E_T(\text{Wh/d}) \times P_{\text{STC}} (\text{kW/m}^2)}{\Pi(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \times d) \times \sigma_{\text{ΑΣ}} \times \sigma_{\mu}}$$

- ✓ Όπου:  $P_a(W_p)$  = η ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης
- ✓  $E_T(\frac{\text{Wh}}{\text{d}})$  = η απαιτούμενη συνολική ημερήσια ενέργεια
- ✓  $P_{\text{STC}} (\text{kW/m}^2)$  = η ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες και είναι ίση με  $P_{\text{STC}} = 1(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2})$
- ✓  $\Pi(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \times d)$  = η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στην περιοχή εγκατάστασης
- ✓  $\sigma_{\text{ΑΣ}}$  = το γινόμενο των συντελεστών απωλειών  
 $\sigma_{\text{ΑΣ}} = \sigma_{\theta} \times \sigma_{\rho} \times \sigma_{\gamma} \times \sigma_{\delta} \times \sigma_{\alpha} \times \sigma_{\kappa}$
- ✓  $\sigma_{\mu}$  = συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας
- ✓  $\sigma_{\gamma M}$  = συντελεστής υπερεκτίμησης της μελέτης

Σε περίπτωση που το φωτοβολταϊκό σύστημα που μελετάμε είναι αυτόνομο θα πρέπει να οριστεί ένας αριθμός ημερών που θα λειτουργεί το φωτοβολταϊκό σύστημα χωρίς την πλήρη ηλιακή ακτινοβολία. Οι μέρες αυτονομίας η αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των συνεχόμενων ημερών που μπορεί να προκύψουν όπου λόγω καιρικών συνθηκών τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν παράγουν σχεδόν καθόλου ενέργεια. Τότε καταναλώνεται η αποθηκευμένη στους συσσωρευτές ενέργεια, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται το ποσοστό φόρτισης τους. Συνεπώς κατά τη σχεδίαση του αυτόνομου συστήματος είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι μέρες αυτονομίας. Στον πίνακα 3.7.2 [16] παρουσιάζονται οι ενδεικτικές ημέρες αυτονομίας (ελάχιστες και μέγιστες) ανάλογα με τον σκοπό που εξυπηρετεί η ΦΒ εγκατάσταση. Πέρα από αυτές τις οδηγίες, ο αριθμός των ημερών αυτονομίας καθορίζονται από τον εκάστοτε μηχανικό αναλόγως των ενεργειακών απαιτήσεων του σχεδιαζόμενου συστήματος και των ειδικών παραμέτρων που προκύπτουν.

Τύπος συστήματος	Ελάχιστος αριθμός ημερών αυτονομίας	Μέγιστος αριθμός ημερών αυτονομίας
Ηλεκτροδότηση οικιών	5	10
Σύστημα εξωτερικού φωτισμού	5	10
Συστήματα για τη γεωργία και την κτηνοτροφία	5	10
Σύστημα για τηλεπικοινωνίες	10	Επαφίεται στην κρίση του μηχανικού
Συστήματα για σηματοδότηση	10	Επαφίεται στην κρίση του μηχανικού

**Πίνακας 3.7.2: Ενδεικτικός αριθμός ημερών αυτονομίας [16]**

Συνεπώς η σχέση υπολογισμού της ισχύος αιχμής της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα με n ημέρες αυτονομίας παίρνει την ακόλουθη μορφή [1]:

$$P_a(W_p) = \sigma_{\gamma M} \times \frac{E_T(\text{Wh/d}) \times P_{\text{STC}} (\text{kW/m}^2)}{\Pi(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \times d) \times \sigma_{\text{ΑΣ}} \times \sigma_{\mu}} \times \frac{N(d)}{N(d) - n(d)}$$

Οι όροι της εξίσωσης είναι όπως προηγουμένως, εκτός από τον λόγο  $\frac{N(d)}{N(d) - n(d)}$  όπου:

- ✓  $N$  = η χρονική περίοδος αναφοράς σε ημέρες (πχ  $N=31$  ημέρες για έναν μήνα)
- ✓  $n$  = οι εκτιμώμενες ημέρες αυτονομίας, δηλαδή ο αριθμός συνεχόμενων ημερών χωρίς την πλήρη ηλιακή ακτινοβολία (νέφωση, βροχή κτλ), κατά τις οποίες τα φ/β πλαίσια δεν παράγουν καθόλου ενέργεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καταναλώνεται η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στον συσσωρευτή, γεγονός που ελαττώνει γρήγορα την κατάσταση φόρτισης του.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **4. Μελέτη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη εγκατάστασης αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος με συσσωρευτές σε στέγες κτιρίων στρατιωτικού εργοστασίου στον νομό Αττικής. Η εν λόγω μελέτη γίνεται για τρία κτίρια του εν λόγω εργοστασίου οπότε θα διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις για κάθε κτίριο ξεχωριστά.

#### **4.1 Δεδομένα και χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος.**

Το στρατιωτικό εργοστάσιο βρίσκεται στο Δήμο των Αγίων Αναργύρων Αττικής σε κοντινή απόσταση από τους κύριους οδικούς και σιδηροδρομικούς άξονες Αθηνών-Θεσσαλονίκης και Αθηνών-Κορίνθου. Οι συντεταγμένες του είναι: 38°1'23"N και 23°42'53"E. Οι κτιριακές εγκαταστάσεις του καλύπτουν επιφάνεια 40 στρεμμάτων σε συνολική έκταση στρατοπέδου 240 στρέμματα. Κατασκευάσθηκαν κυρίως τις δεκαετίες 1940-1960, ενώ παράλληλα προστέθηκαν και νέες σύγχρονες εγκαταστάσεις για τις παραγωγικές ανάγκες του εργοστασίου. Τα τρία κτίρια στα οποία θα γίνει η εν λόγω μελέτη θα αναφέρονται από εδώ κι εμπρός ως ΚΤΙΡΙΟ Α, ΚΤΙΡΙΟ Β και ΚΤΙΡΙΟ Γ. Οπουδήποτε απαιτείται οι υπολογισμοί θα γίνονται για κάθε κτίριο ξεχωριστά.



Το κτίριο Α χρησιμοποιείται ως χώρος διδασκαλίας και διαμονής προσωπικού. Η οροφή στην οποία πρόκειται να τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια φαίνεται στο σχήμα 4.1.1 και η κάτοψη και ο προσανατολισμός της στο σχήμα 4.1.2. Οι τοιχοποιία του κτιρίου είναι από τούβλα και δεν υπάρχει κάποια υγρομόνωση στην οροφή. Το εμβαδό της στέγης είναι  $454\text{m}^2$ . Το ύψος του κτιρίου είναι αρκετό ώστε η οροφή δεν σκιάζεται από κανένα εμπόδιο περιμετρικά.



**Σχήμα 4.1.1: Στέγη κτιρίου Α**



**Σχήμα 4.1.2: Κάτοψη κτιρίου Α**

Το κτίριο Β χρησιμοποιείται ως ιατρείο. Η τοιχοποιία είναι από τούβλα και η στέγη είναι καλυμμένη με κεραμίδια. Μια φωτογραφία της πρόσοψης του κτιρίου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1.3 και η κάτοψη και ο προσανατολισμός του στο σχήμα 4.1.4. Γύρω από το κτίριο Β υπάρχει πυκνή βλάστηση από κωνοφόρα δέντρα τα οποία προτού τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα πρέπει να αφαιρεθούν καθολικά καθότι σκιάζουν σε μεγάλο ποσοστό την οροφή του κτιρίου όλη τη διάρκεια της ημέρας.



**Σχήμα 4.1.3 : Κτίριο Β**



**Σχήμα 4.1.4 : Κάτοψη κτίριο Β**

Το κτίριο Γ χρησιμοποιείται ως χώρος ελέγχου συσκευών. Με εξαίρεση τα δέντρα δεν υπάρχει κανένα εμπόδιο περιμετρικά, με συνέπεια αν αυτά αφαιρεθούν το ποσοστό της σκίασης να είναι μηδενικό. Η οροφή του κτιρίου έχει εμβαδό 180 m<sup>2</sup> και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1.5. Η κάτοψη και ο προσανατολισμός του στο σχέδιο 4.1.6. Η τοιχοποιία του κτιρίου είναι από τούβλα και δεν υπάρχει υγρομόνωση στην οροφή, το οποίο είναι θετικό διότι σε αντίθετη περίπτωση τα στηρίγματα από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα μπουν θα την κατέστρεφαν. Αναλυτικότερα, αν υπήρχε ήδη υγρομόνωση, μετά την τοποθέτηση των ΦΒ πλαισίων θα έπρεπε να επιδιορθωθεί τοπικά με αποτέλεσμα να προέκυπτε πιθανότητα πρόκλησης φθοράς της μόνωσης στα σημεία των παρεμβάσεων.



**Σχήμα 4.1.5: Οροφή κτιρίου Γ**





**Σχήμα 4.1.7: Κάτοψη κτιρίου Γ**

Στον πίνακα 4.1.1 συνοψίζονται επιγραμματικά τα δεδομένα της προκαταρκτικής μελέτης:

<b>Δεδομένα προκαταρκτικής μελέτης</b>	
Περιοχή Μελέτης	Άγιοι Ανάργυροι Αττικής (Γεωγραφικό Πλάτος = $38^{\circ}1'$ )
Απαραίτητη αυτοδυναμία συστήματος σε ημέρες	2 ημέρες

**Πίνακας 4.1.1 Δεδομένα προκαταρκτικής μελέτης**

#### 4.2 Ενεργειακές ανάγκες

Η καταγραφή της ημερήσιας ενεργειακής ζήτησης για κάθε κτίριο παρουσιάζεται στους παρακάτω πίνακες. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη δεν συμπεριλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρικού θερμοσίφωνα που θα πρέπει να αντικατασταθεί από ηλιακό, διότι η συσκευή αυτή καταναλώνει εξαιρετικά μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας.

#### ΚΤΙΡΙΟ Α

Εκτιμώμενη Κατανάλωση Ενέργεια ημερησίως			
	Κατανάλωση × Αριθμός συσκευών	Ώρες λειτουργίας	Ημερήσια Κατανάλωση
Φωτισμός εσωτερικού χώρου	36×70+40×4	5	13.400
Φωτισμός εξωτερικών χώρων	120×2	7	1.680
Τηλεόραση	90×3	1	270
Ψυγείο κουζίνας	160×2	10	3.200
Καυστήρας Πετρελαίου	150	5	750
Κλιματιστικά	900×5	5	22.500
Καφετιέρα	900	0,5	450
Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές	200×4	5	4.000
Συσκευή αναπαραγωγής DVD	50	1	50
Προβολικά μηχανήματα	400	3	1.200
Εκτυπωτές	50	1	50
Άλλες μικρές συσκευές	160	1	160
<b>Σύνολο τιμών</b>			<b>E<sub>T</sub>=47.710 Wh/ημέρα</b>

Πίνακας 4.2.1 Εκτιμώμενη Κατανάλωση Ενέργειας Κτιρίου Α

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι η εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας για το κτίριο Α είναι E<sub>T</sub>=47.710 Wh/ημέρα.

**ΚΤΙΡΙΟ Β**

<b>Εκτιμώμενη Κατανάλωση Ενέργεια ημερησίως</b>			
	<b>Κατανάλωση × Αριθμός συσκευών</b>	<b>Ώρες λειτουργίας</b>	<b>Ημερήσια Κατανάλωση</b>
Φωτισμός εξωτερικού χώρου	120×2	8	1.920
Φωτισμός εσωτερικών χώρων	36×42	5	7.560
Τηλεόραση	90	5	450
Ψυγείο κουζίνας	160	10	1.600
Καυστήρας Πετρελαίου	150	5	750
Κλιματιστικά	900×2	5	9000
Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές	200×2	5	2000
Εκτυπωτές	50	1	50
Άλλες μικρές συσκευές	150	1	150
<b>Σύνολο τιμών</b>			<b><math>E_T=23.480</math> Wh/ημέρα</b>

**Πίνακας 4.2.2: Εκτιμώμενη Κατανάλωση ενέργειας Κτιρίου Β**

Η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου Β εκτιμάται ότι είναι  $E_T=23.480$  Wh/ημέρα.



**ΚΤΙΡΙΟ Γ**

<b>Εκτιμώμενη Κατανάλωση Ενέργεια ημερησίως</b>			
	<b>Αριθμός συσκευών × Κατανάλωση</b>	<b>Ώρες λειτουργίας</b>	<b>Ημερήσια Κατανάλωση</b>
Φωτισμός εσωτερικού-εξωτερικού χώρου	1500	5	7.500
Ψυγείο κουζίνας	2×160	10	3.200
Καυστήρας Πετρελαίου	150	2	300
Κλιματιστικά	1×900+1×1700+ 1×2300	4	19.600
Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές	2×200	5	2.000
Συσκευές Ελέγχου	500	5	2.500
<b>Σύνολο τιμών</b>			<b>E<sub>τ</sub>=35.100 Wh/ημέρα</b>

**Πίνακας 4.2.3: Εκτιμώμενη Κατανάλωση Ενέργειας κτιρίου Γ**

Στο κτίριο Γ η εκτιμώμενη ενέργεια που καταναλώνεται ημερησίως είναι E<sub>τ</sub>=35.100 Wh/ημέρα.

### 4.3 Περίοδος χρήσης και βέλτιστη κλίση

Το φωτοβολταϊκό σύστημα θα εγκατασταθεί στην περιοχή των Αγίων Αναργύρων Αττικής και προορίζεται για ετήσια λειτουργία.

Εφόσον το φωτοβολταϊκό σύστημα σχεδιάζεται για σταθερή ετήσια λειτουργία, η κλίση των πλαισίων θα ισούται με γεωγραφικό πλάτος (σε μοίρες) των Αγίων Αναργύρων και φυσικά ο προσανατολισμός τους θα είναι προς το Νότο

Περίοδος λειτουργίας	12 μήνες
Κλίση	$\beta=38^{\circ}$

Πίνακας 4.3.1: Περίοδος σχεδιασμού και βέλτιστη κλίση φωτοβολταϊκών πλαισίων

### 4.4 Κλιματολογικές συνθήκες περιοχής

Τα κλιματολογικά στοιχεία που προκύπτουν από το μετεωρολογικό σταθμό της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας στη Νέας Φιλαδέλφεια παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο αυτή.

#### 4.4.1 Άνεμοι

Οι άνεμοι που επικρατούν στην περιοχή είναι οι βορειοανατολικοί, οι νοτιοδυτικοί και ακολουθούν οι βόρειοι, οι βορειοδυτικοί, οι δυτικοί και οι ανατολικοί ενώ σπανίζουν οι νοτιοανατολικοί και οι νότιοι. Η συχνότερη ένταση των ανέμων είναι 2-4 Beaufort. Στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών δεν πνέουν συχνά άνεμοι μεγάλης εντάσεως γι' αυτό και άνεμοι μεγαλύτεροι των 7 Beaufort χαρακτηρίζονται ως εξαιρετικά σπάνιοι (συχνότητα εμφάνισης <1%). Στον πίνακα 4.4.1.1 παρουσιάζεται ανά μήνα η μέση ταχύτητα των ανέμων που πνέουν στην περιοχή .

Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Ταχύτητα ανέμου (m/s)	2,9	3,1	3,1	2,7	2,6	2,8	3,4	3,4	3,0	2,9	2,4	2,5

Πίνακας 4.4.1.1: Μέση ταχύτητα ανέμου (m/s) στο μετεωρολογικό σταθμό της Νέας Φιλαδέλφειας Αττικής. [12]

#### 4.4.2 Θερμοκρασία

Στον πίνακα 4.4.2.1 φαίνεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία στην περιοχή των Αγίων Αναργύρων κατά τη διάρκεια του 24ωρου [12]. Τα στοιχεία έχουν ληφθεί από το μετεωρολογικό σταθμό της Νέας Φιλαδέλφειας που απέχει περί τα 5χλμ από τους Αγίους Αναργύρους. Ο θερμότερος μήνας παρατηρείται ότι είναι ο Ιούλιος, ενώ ο ψυχρότερος είναι ο Δεκέμβριος. Η μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία που έχει σημειωθεί είναι 36,4 °C και η μέση απολύτως ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία είναι -1.1 °C.

Μήνες	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Μέση Θερμοκρασία	10,3	10,6	12,3	16,0	20,7	25,4	28,1	28,0	24,3	19,6	15,4	12,0

Πίνακας 4.4.2.1 Μέση θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του 24ωρου (°C).  
[12]

#### 4.4.3 Χιόνι-Χαλάζι-Παγετός

Στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών η χιονόπτωση είναι σπάνια. Ο μέσος αριθμός ημερών με χιονόπτωση κατά τη διάρκεια του έτους είναι 3,6 ενώ ο μέσος αριθμός ημερών παγετού ετησίως αγγίζει τις 49.

#### 4.4.4 Νέφωση

Η μέση μηνιαία νέφωση είναι ο μέσος όρος των μηνιαίων τιμών νέφωσης όλων των ετών της εξεταζόμενης περιόδου. Μέσες μηνιαίες νέφωσης για τους δυσμενέστερους μήνες της θερινής και χειμερινής περιόδου κατά τη διάρκεια των ετών 1995-2000 δίνονται στον πίνακα 4.4.4.1.

Μήνες	Ιουλ	Αυγ	Ιαν	Φεβ
Νέφωση	1,2	1,1	4,8	4,6

Πίνακας 4.4.4.1: Μέση μηνιαία νέφωση (σε όγδοα).

#### 4.4.5 Ηλιακό δυναμικό

Στον πίνακα 4.4.5.1 [11] παρουσιάζεται η διαθέσιμη προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας των φ/β πλαισίων με νότιο προσανατολισμό και τη βέλτιστη κλίση  $\beta=38^\circ$

Κλίση	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
$30^\circ$	87	99	129	152	179	184	202	203	170	136	105	85

**Πίνακας 4.4.5.1: Ετήσια ακτινοβολία στους Αγίους Αναργύρους Αττικής (kWh/m<sup>2</sup>). [11]**

Η σχεδίαση θα γίνει με βάση το κριτήριο του «λιγότερου ευνοϊκού μήνα» ο οποίος αντιστοιχεί στο μήνα ελάχιστης ακτινοβολίας, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο Δεκέμβριος. Συνεπώς η Ημερήσια τιμή ηλιακής ακτινοβολίας είναι:

$$\Pi = \frac{85 \text{ kWh/m}^2}{31 \text{ ημέρες}} = 2,7 \text{ kWh/m}^2 \times d$$

#### 4.5 Διαστασιοδότηση φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Προκειμένου να υπολογίσουμε την απαιτούμενη ισχύ αιχμής είναι απαραίτητο να υπολογίσουμε τις απώλειες που εμφανίζονται στα διάφορα υποσυστήματα που είναι κομμάτια του Φ/Β συστήματος. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται απώλειες λόγω λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας σε θερμοκρασία υψηλότερη από την πρότυπη, απώλειες στις συνδέσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων, στον αναστροφέα κατά τη μετατροπή της συνεχούς τάσης της φ/β γεννήτριας και των συσσωρευτών σε εναλλασσόμενη, στο ρυθμιστή φόρτισης των συσσωρευτών καθώς και στις καλωδιώσεις που συνδέουν το σύστημα με τα υποσυστήματα και τις καταναλώσεις. Αυτές οι απώλειες φτάνουν ένα ποσοστό της τάξεως του 20-30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και συνεπώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην μελέτη. Τέλος λόγω της φθοράς στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και τα άλλα μέρη του συστήματος αναμένεται με την πάροδο του χρόνου μια μικρή βαθμιαία πτώση στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που κυμαίνεται από 1-2%.

Υπολογισμός συντελεστών απωλειών:

- Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης  $\sigma_{\theta}$ :  

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

Εφόσον υπολογίζουμε με βάση το κριτήριο του δυσμενέστερου μήνα που είναι ο Δεκέμβριος όπως είδαμε στον πίνακα 4.4.2.1,  $\theta_{\mu}=12,0$  οπότε

$$\sigma_{\theta}=1-[(12,0 + 30)-25)]\times 0,004=0,932$$

- Συντελεστής ρύπανσης της ατμόσφαιρας  $\sigma_{\rho}$ :

Επειδή πρόκειται για μια αστική περιοχή με μεγάλη ατμοσφαιρική ρύπανση με συνέπεια η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου να μειώνεται λόγω και της αιθάλης του περιβάλλοντος ο αδιάστατος αυτός συντελεστής καθαρότητας θα πάρει την τιμή:

$$\sigma_{\rho}=0,90$$

- Συντελεστής γήρανσης  $\sigma_{\gamma}$ :

Η μείωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων λόγω της αλλοίωσης των υλικών κατασκευής τους εκφράζεται μέσω του συντελεστή γήρανσης. Στην τρέχουσα μελέτη επιλέγουμε μία μέση τιμή συντελεστή γήρανσης:

$$\sigma_{\gamma}=0,9$$

- Συντελεστής απωλειών διόδου  $\sigma_{\delta}$ :

Οι απώλειες στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη δίοδο αντεπιστροφής όταν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεν φωτίζεται εκφράζεται μέσω του συντελεστή απωλειών διόδου που λαμβάνεται:

$$\sigma_{\delta}=0,99$$

- Συντελεστής ανομοιογένειας  $\sigma_{\alpha}$ :

Ο συντελεστής ανομοιογένειας των ηλεκτρικών μεγεθών έντασης-τάσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων παίρνει την τιμή:

$$\sigma_{\alpha}=0,98$$

- Συντελεστής καλωδιώσεων  $\sigma_{\kappa}$ :

Ο συντελεστής καλωδιώσεων που εκφράζει τις απώλειες στα καλώδια σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων της συστοιχίας ισούται με:

$$\sigma_{\kappa}=0,98$$

Συνεπώς υπολογίζουμε συγκεντρωτικά συντελεστή απωλειών  $\sigma_{\text{ΑΣ}}$ :

$$\sigma_{\text{ΑΣ}}=\sigma_{\theta} \times \sigma_{\rho} \times \sigma_{\gamma} \times \sigma_{\delta} \times \sigma_{\alpha} \times \sigma_{\kappa}=0,932 \times 0,9 \times 0,9 \times 0,99 \times 0,98 \times 0,98=0,72$$

- Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας  $\sigma_{\mu}$ :

Επειδή πρόκειται για φωτοβολταϊκό σύστημα με A/C καταναλώσεις, χρήση συσσωρευτών, ελεγκτή φόρτισης και αναστροφέα επιλέγουμε:

$$\sigma_{\mu}=0,85$$

- Συντελεστής υπερεκτίμησης της μελέτης  $\sigma_{\gamma\text{Μ}}$ :

Οι συνολικές αποκλίσεις στην εκτίμηση των συντελεστών ενδέχεται να κυμαίνεται από 15%-25%. Η ενδεχόμενη προσαύξηση των θεωρητικά υπολογισμένων ημερήσιων αναγκών αντισταθμίζεται από τον συντελεστή υπερεκτίμησης της μελέτης που στην περίπτωση μας επιλέγεται:

$$\sigma_{\gamma\text{Μ}}=1,2$$

Αφού προσδιορίστηκαν οι απώλειες εφαρμόζοντας την παρακάτω σχέση υπολογίζουμε τη απαιτούμενη ισχύ αιχμής της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης για την κάλυψη των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων:

$$P_a(W_p) = \sigma_{\gamma M} \times \frac{E_T(\text{Wh/d}) \times P_{\text{STC}} (\text{kW/m}^2)}{\Pi(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \times d) \times \sigma_{\text{ΑΣ}} \times \sigma_{\mu}} \times \frac{N(d)}{N(d) - n(d)}$$

Όπου:

- ✓  $P_a(W_p)$  = η ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης
- ✓  $E_T \left( \frac{\text{Wh}}{d} \right)$  = η απαιτούμενη συνολική ημερήσια ενέργεια
- ✓  $P_{\text{STC}} (\text{kW/m}^2)$  = η ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες και είναι ίση με  $P_{\text{STC}} = 1 \left( \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right)$
- ✓  $\Pi \left( \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \times d \right)$  = η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στην περιοχή εγκατάστασης
- ✓  $\sigma_{\text{ΑΣ}}$  = το γινόμενο των συντελεστών απωλειών  
 $\sigma_{\text{ΑΣ}} = \sigma_{\theta} \times \sigma_{\rho} \times \sigma_{\gamma} \times \sigma_{\delta} \times \sigma_{\alpha} \times \sigma_{\kappa}$
- ✓  $\sigma_{\mu}$  = συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας
- ✓  $\sigma_{\gamma M}$  = συντελεστής υπερεκτίμησης της μελέτης
- ✓  $N$  = η χρονική περίοδος αναφοράς σε ημέρες (πχ  $N=31$  ημέρες για έναν μήνα)
- ✓  $n$  = οι εκτιμώμενες ημέρες αυτονομίας, δηλαδή ο αριθμός συνεχόμενων ημερών χωρίς την πλήρη ηλιακή ακτινοβολία (νέφωση, βροχή κτλ), κατά τις οποίες τα φ/β πλαίσια δεν παράγουν καθόλου ενέργεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καταναλώνεται γη ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στον συσσωρευτή, γεγονός που ελαττώνει γρήγορα την κατάσταση φόρτισης του.

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας 4.5.1 με τα δεδομένα για τον υπολογισμό της φωτοβολταϊκής γεννήτριας για κάθε κτίριο ξεχωριστά.



	<b>ΚΤΙΡΙΟ Α</b>	<b>ΚΤΙΡΙΟ Β</b>	<b>ΚΤΙΡΙΟ Γ</b>
<b>Ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες</b>	$E_T=47.710 \text{ Wh/d}$	$E_T=23.480 \text{ Wh/d}$	$E_T=35.100 \text{ Wh/d}$
<b>Διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια</b>	$\Pi= 2,7 \text{ kWh/m}^2 \times d$	$\Pi= 2,7 \text{ kWh/m}^2 \times d$	$\Pi= 2,7 \text{ kWh/m}^2 \times d$
<b>Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης</b>	$\sigma_\theta=0,932$	$\sigma_\theta=0,932$	$\sigma_\theta=0,932$
<b>Συντελεστής ρύπανσης</b>	$\sigma_\rho=0,90$	$\sigma_\rho=0,90$	$\sigma_\rho=0,90$
<b>Συντελεστής γήρανσης</b>	$\sigma_\gamma =0,9$	$\sigma_\gamma =0,9$	$\sigma_\gamma =0,9$
<b>Συντελεστής απωλειών διόδου</b>	$\sigma_\delta=0,99$	$\sigma_\delta=0,99$	$\sigma_\delta=0,99$
<b>Συντελεστής ανομοιογένειας</b>	$\sigma_\alpha=0,98$	$\sigma_\alpha=0,98$	$\sigma_\alpha=0,98$
<b>Συντελεστής καλωδιώσεων</b>	$\sigma_\kappa=0,98$	$\sigma_\kappa=0,98$	$\sigma_\kappa=0,98$
<b>Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας</b>	$\sigma_\mu=0,85$	$\sigma_\mu=0,85$	$\sigma_\mu=0,85$
<b>Συντελεστής υπερεκτίμησης της μελέτης</b>	$\sigma_{\gamma M}=1,2$	$\sigma_{\gamma M}=1,2$	$\sigma_{\gamma M}=1,2$
<b>Γινόμενο των συντελεστών απωλειών</b>	$\sigma_{\Lambda\Sigma}= 0,72$	$\sigma_{\Lambda\Sigma}= 0,72$	$\sigma_{\Lambda\Sigma}= 0,72$
<b>Ημέρες αναφοράς</b>	$N=31$	$N=31$	$N=31$
<b>Ημέρες αυτονομίας</b>	$n=2$	$n=2$	$n=2$

**Πίνακας 4.5.1: Συγκεντρωτικά δεδομένα για τον υπολογισμό της ισχύος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας**

Οπότε η ισχύς της φωτοβολταϊκής γεννήτριας που θα τοποθετηθεί ξεχωριστά σε κάθε κτίριο υπολογίζεται ως εξής:

• **ΚΤΙΡΙΟ Α:**

$$P_{\alpha}(W_p) = \sigma_{\gamma M} \times \frac{E_T \left( \frac{Wh}{d} \right) \times P_{STC} \left( \frac{kW}{m^2} \right)}{\Pi \left( \frac{kWh}{m^2} \times d \right) \times \sigma_{AS} \times \sigma_{\mu}} \times \frac{N(d)}{N(d) - n(d)} \text{ οπότε}$$

$$P_{\alpha}(W_p) = 1,2 \times \frac{47.710 \times 1}{2,7 \times 0,72 \times 0,85} \times \frac{31}{31-2} = 37.037,3 W_p$$

• **ΚΤΙΡΙΟ Β:**

$$P_{\alpha}(W_p) = \sigma_{\gamma M} \times \frac{E_T (Wh/d) \times P_{STC} (kW/m^2)}{\Pi \left( \frac{kWh}{m^2} \times d \right) \times \sigma_{AS} \times \sigma_{\mu}} \times \frac{N(d)}{N(d) - n(d)} \text{ οπότε}$$

$$P_{\alpha}(W_p) = 1,2 \times \frac{23.480 \times 1}{2,7 \times 0,72 \times 0,85} \times \frac{31}{31-2} = 18.227,5 W_p$$

• **ΚΤΙΡΙΟ Γ:**

$$P_{\alpha}(W_p) = \sigma_{\gamma M} \times \frac{E_T (Wh/d) \times P_{STC} (kW/m^2)}{\Pi \left( \frac{kWh}{m^2} \times d \right) \times \sigma_{AS} \times \sigma_{\mu}} \times \frac{N(d)}{N(d) - n(d)} \text{ οπότε}$$

$$P_{\alpha}(W_p) = 1,2 \times \frac{35.100 \times 1}{2,7 \times 0,72 \times 0,85} \times \frac{31}{31-2} = 27.248,1 W_p$$

❖ Επιλογή Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Τα κριτήρια για την επιλογή το φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι κατά κύριο λόγο τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του, η λειτουργική αξιοπιστία του, η γήρανση κατά την λειτουργία του, η συμβατότητα με τον διαχειριστή του συστήματος, αλλά και το κόστος του. Ο τύπος του φωτοβολταϊκού πλαισίου που θα επιλέξουμε και για τις τρεις στέγες είναι: Sharp ND-R245A5 (245W). Το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο παρά την σχετικά υψηλή τιμή του ( $\cong$  235ευρώ/τεμάχιο) [18], χαρακτηρίζεται από υψηλή τιμή ισχύος με αποτέλεσμα να μην δεσμεύεται πολύς χώρος από το ΦΒ πεδίο.

Στον πίνακα 4.5.2 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλαισίου.

Τύπος Πλαισίου	Sharp ND-R245A5 (245W)
<b>STC Power rating</b>	245W
<b>Imp</b>	7,99A
<b>Vmp</b>	30,7V
<b>Isc</b>	8,62A
<b>Voc</b>	37,3V
<b>Temperature Coefficient of Power</b>	-0,440%/C
<b>Temperature Coefficient of Voltage</b>	-0,329%/C
<b>Over Current Protection</b>	15A
<b>Maximum System Voltage</b>	1000V DC

<b>Length</b>	1,652 mm (+/-3.0 mm)
<b>Width</b>	994 mm (+/-2.0 mm)
<b>Depth</b>	46 mm (+/-0.8 mm)

**Πίνακας 4.5.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Πλαισίου**

❖ Αριθμός Φωτοβολταϊκών Πλαισίων (θεωρητικά)

Για να υπολογιστεί ο τελικός αριθμός των απαιτούμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων αρχικά θα πρέπει να υπολογίσουμε τον απαιτούμενο θεωρητικά αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$N_{\text{ΠΛΑΙΣΙΩΝ}_\theta} = \frac{P_\alpha(W_p)}{P_{\text{ΠΛΑΙΣΙΟΥ}}(W_p)}$$

Όπου:

- ✓  $N_{\text{ΠΛΑΙΣΙΩΝ}_\theta}$  = ο ελάχιστος συνολικά αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων που απαιτείται θεωρητικά για να αποδοθεί η προβλεπόμενη ισχύς αιχμής από το πεδίο.
- ✓  $P_\alpha(W_p)$  = η απαιτούμενη συνολική ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης
- ✓  $P_{\text{ΠΛΑΙΣΙΟΥ}}(W_p)$  = η ονομαστική ισχύς σε συνθήκες (STC) που αποδίδει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Συνεπώς για κάθε στέγη ξεχωριστά ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι:

• **ΚΤΙΡΙΟ Α:**

$$N_{\text{ΠΛΑΙΣΙΩΝ}_\theta} = \frac{P_\alpha(W_p)}{P_{\text{ΠΛΑΙΣΙΟΥ}}(W_p)} = \frac{37.037,3 W_p}{245 W_p} = 151 \text{ πλαίσια}$$

• **ΚΤΙΡΙΟ Β:**

$$N_{\text{ΠΛΑΙΣΙΩΝ}_\theta} = \frac{P_\alpha(W_p)}{P_{\text{ΠΛΑΙΣΙΟΥ}}(W_p)} = \frac{18.227,5 W_p}{245 W_p} = 74 \text{ πλαίσια}$$

• **ΚΤΙΡΙΟ Γ:**

$$N_{\text{ΠΛΑΙΣΙΩΝ}_\theta} = \frac{P_\alpha(W_p)}{P_{\text{ΠΛΑΙΣΙΟΥ}}(W_p)} = \frac{27.248,1 W_p}{245 W_p} = 111 \text{ πλαίσια}$$

❖ Ονομαστική τάση φωτοβολταϊκής γεννήτριας  $V_N$ :

Η επιλογή της ονομαστικής τάσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας καθορίζει και την επόμενη ηλεκτρονική συσκευή που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και τον τρόπο σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

• **ΚΤΙΡΙΟ Α:**

Η τιμή της ονομαστικής τάσεως εξόδου ενός ΦΒ πεδίου προσδιορίζεται κυρίως από την εγκατεστημένη ισχύ του πεδίου και τον τρόπο σύνδεσης μεταξύ των ΦΒ πλαισίων. Επίσης εξαρτάται και από την επόμενη βαθμίδα που θα χρησιμοποιηθεί που στην περίπτωση μας είναι ρυθμιστής φόρτισης συσσωρευτών εφόσον πρόκειται για αυτόνομο ΦΒ πεδίο. Η ισχύς της φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι 37kW, τιμή αρκετά μεγάλη. Για να αποφύγω τον μεγάλο αριθμό καλωδιώσεων που θα είχα αν χρησιμοποιούσα πολλούς παράλληλους ρυθμιστές φόρτισης διότι θα απαιτούνταν μεγάλος αριθμός ρυθμιστών προκειμένου να καλύψω την ισχύ της ΦΒ γεννήτριας επιλέγω την χρήση ενδιάμεσων αναστροφέων τάσεως σε συνδυασμό με τελικούς αναστροφείς. Αναλυτικότερα, στην έξοδο του ΦΒ πεδίου επιλέγω να συνδέσω τον ηλιακού μετατροπέα Sunny Mini Central 11000TL. Κατά τη διάρκεια της ημέρας οπότε τα φωτοβολταϊκά παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο, σε περίπτωση που η παρεχόμενη ενέργεια είναι περισσότερη από την καταναλισκόμενη φορτίζουν τους συσσωρευτές. Αντίθετα αν η παρεχόμενη ενέργεια είναι λιγότερη από αυτή που ζητείται, τότε παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ο μετατροπέας παρέχει ισχύ στο δίκτυο. Να σημειωθεί ότι βασική λειτουργία του μετατροπέα είναι επίσης όχι μόνο να κρατάει σταθερές την τάση και την συχνότητα του αυτόνομου δικτύου με το να ελέγχει την φόρτιση-εκφόρτιση συσσωρευτών σύμφωνα με το ενεργειακό ισοζύγιο του μικροδικτύου αλλά και να ελέγχει άλλες συσκευές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως γεννήτριες ντήζελ και ανεμογεννήτριες σε περίπτωση που η αποθηκευμένη ενέργεια των συσσωρευτών δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση. Αντίθετα όταν οι συσσωρευτές είναι πλήρως φορτισμένοι και η παραγόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από αυτή που καταναλίσκεται, ο μετατροπέας μπορεί να θέσει σε λειτουργία ένα φορτίο για να απορροφήσει την υπερπαραγωγή (πχ ηλεκτρικές αντλίες) ή και να διακόψει την λειτουργία των φωτοβολταϊκών συλλεκτών.

Στο σχήμα 4.5.1 παρουσιάζεται μία εικόνα του Sunny Mini Central 11000TL και στον πίνακα 4.5.3 τα χαρακτηριστικά του

**Τεχνικά Χαρακτηριστικά Sunny Mini  
Central 11000TL**

**Είσοδος (DC)**

Μέγιστη ισχύς DC ( $\cos\phi=1$ ) 11400W

Μέγιστη τάση DC 700V

Εύρος τάσης σημείου μέγιστης ισχύος  
(MPP) 333V-500V

Ονομαστική τάση DC 350V

Ελάχιστη τάση DC/Τάση εκκίνησης 333V/400V

Μέγιστο ρεύμα εισόδου/ανά στοιχειοσειρά 34A/34A

Αριθμός ανιχνευτών MPP/Στοιχειοσειρές  
ανά ανιχνευτή MPP 1/5

**Έξοδος (AC)**

Ονομαστική ισχύς AC (230V,50Hz) 11000W

Μέγιστη φαινόμενη ισχύς AC 11000VA

Ονομαστική τάση/ περιοχή τάσεων 220V, 230V, 240V/  
180V-265V

Συχνότητα δικτύου, εύρος AC 50,60Hz $\pm$ 4,5Hz

Μέγιστο ρεύμα εξόδου 48A

Ονομαστική συχνότητα δικτύου, 50Hz/230V  
Ονομαστική τάση δικτύου

Συντελεστής ισχύος ( $\cos\phi$ ) 1

Φάσεις τροφοδοσίας/Φάσεις  
σύνδεσης/Power Balancing 1/1/ναι

**Βαθμοί απόδοσης**

Μέγιστος βαθμός απόδοσης/Euro-Eta  
(EBA) 97,7%/97,2%

**Συστήματα προστασίας**

Προστασία αντιστροφής πόλων DC  
/προστασία από ανάστροφη τάση Ναι/προαιρετικά

Ενσωματωμένος διακόπτης ESS απόζευξης  
φορτίου DC Ναι

Αντοχή σε βραχυκύκλωμα AC Ναι

Επιτήρηση βραχυκυκλώματος γης	Ναι
Επιτήρηση δικτύου (SMA grid guard)	Ναι
Ενσωματωμένη διάταξη προστασίας από σφάλματα ρεύματος RCD ευαίσθητη σε όλα τα ρεύμα	Ναι
Κατηγορία προστασίας/Κατηγορία υπέρτασης	I/III
<b>Γενικά Χαρακτηριστικά</b>	
Διαστάσεις (Πλάτος / Ύψος / Βάθος)	468 / 613 / 242 mm
Βάρος	35kg
Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας	-25°C ... + 60°C
Εκπομπή θορύβου, τυπική	42 dB(A)
Ιδία κατανάλωση: Λειτουργία (Αναμονής) / νυχτερινή	0,25W
Τοπολογικά στοιχεία	Χωρίς μετασχηματιστή

**Πίνακας 4.5.3: Χαρακτηριστικά Sunny Mini Central 11000TL**

[<http://files.sma.de/dl/5710/SMC11000TLRP-DEL104420W.pdf>]



**Σχήμα 4.5.1: Ο μετατροπέας Sunny Mini Central 11000TL**

[<http://files.sma.de/dl/5710/SMC11000TLRP-DEL104420W.pdf>]



Αυτός ο ενδιάμεσος αναστροφέας αναλαμβάνει την μετατροπή της συνεχούς τάσεως στην έξοδο της ΦΒ γεννήτριας σε εναλλασσόμενη, η οποία στην συνέχεια θα μετατραπεί ξανά σε συνεχή από τον τελικό αναστροφέα προκειμένου να αποθηκευτεί στους συσσωρευτές. Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνεται ότι η ισχύς DC εισόδου του μετατροπέα είναι 11400W οπότε θα απαιτηθούν τρεις μετατροπείς. Αυτοί στην συνδεσμολογία 3Φ, συνολικά δέχονται ηλεκτρική ισχύς 34.200W<sub>p</sub>. Παρατηρούμε ότι υπολείπεται της ισχύος αιχμής της φωτοβολταϊκής γεννήτριας που μελετάμε. Παρά το γεγονός αυτό η λύση είναι αποδεκτή διότι τα 37kW<sub>p</sub> αποδίδονται μόνο σε ιδανικές συνθήκες STC ενώ στην πραγματικότητα η αποδιδόμενη ισχύς είναι κατά 20% περίπου μικρότερη της πραγματικής. Επιπλέον οι αναστροφείς μπορούν να λειτουργούν και σε συνθήκες υπερφόρτισης +10% για ορισμένα χρονικά διαστήματα, χωρίς αυτό να συνεπάγεται και αύξηση της πιθανότητας εκδήλωσης σφάλματος. Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αναστροφέα προκύπτει ότι η μέγιστη τάση εισόδου του είναι 700V, το εύρος τάσης μέγιστου σημείου ισχύος 333V-500V και η ελάχιστη τάση εισόδου/τάση εκκίνησης 333V/400V αντίστοιχα.

Επιλέγω ονομαστική τάση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας  $V_N=500V$ .

- Ο αριθμός των πλαισίων που θα είναι συνδεδεμένα σε σειρά ανά συστοιχία είναι:

$$N_s = \frac{V_N(V)}{V_{\max}(V)} = \frac{500V}{30,7V} \cong 16,3 = 16 \text{ πλαίσια}$$

Έλεγχος περιορισμού τάσεως συστοιχίας:

$N_s \times V_{OC} \leq V_{NEXT INPUT}$  το οποίο ικανοποιείται αφού πραγματικά

$16 (\text{πλαίσια}) \times 37,3 (V/\text{πλαίσιο}) = 596,8V < 700V$

- Ο αριθμός των πλαισίων που θα είναι συνδεδεμένα παράλληλα είναι:

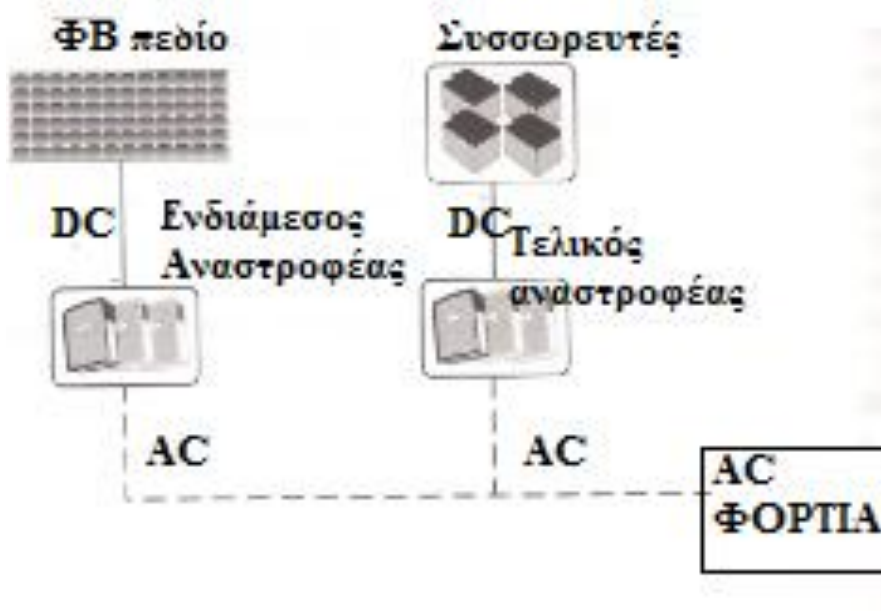
$$N_p = \frac{N_{\text{ΠΛΑΙΣΙΩΝ}_\theta}}{N_s} = \frac{151}{16} \cong 9,4 = 9 \text{ πλαίσια}$$

Δηλαδή θα έχω 9 παράλληλες συστοιχίες.

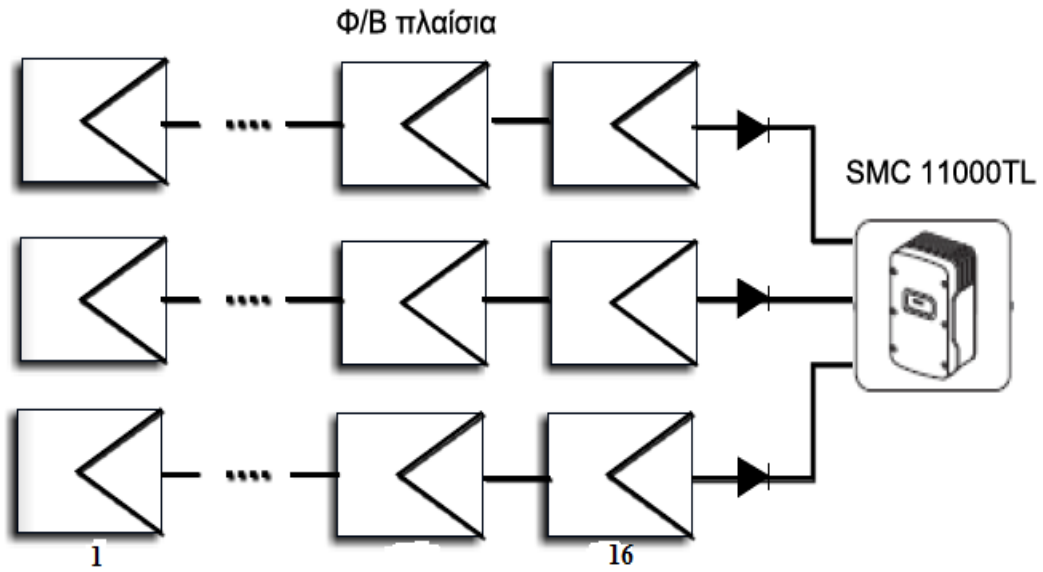
➤ Οπότε ο τελικός αριθμός πλαισίων θα είναι:

$$N_{\text{ΠΛΑΙΣΙΩΝ}} = N_s \times N_p = 16 \times 9 = 144 \text{ πλαίσια}$$

Συνεπώς συνδέω με τριφασική συνδεσμολογία 3 από τις 9 παράλληλες στοιχειοσειρές ανά ένα αναστροφέα με αποτέλεσμα στο ΦΒ πεδίο να διακρίνουμε 3 όμοια υποπεδία. Στα σχήματα 4.5.2 και 4.5.3 παρουσιάζεται η εικόνα ολόκληρης της ΦΒ εγκατάστασης αλλά και του ενός φωτοβολταϊκού υποπεδίου.



Σχήμα 4.5.2: Η ΦΒ εγκατάσταση με ενδιάμεσο και τελικό αναστροφέα [1]



Σχήμα 4.5.3: Οι συνδέσεις των ΦΒ πλαισίων στην είσοδο των ενδιάμεσων αναστροφέων ενός ΦΒ υποπεδίου [16]

• **ΚΤΙΡΙΟ Β:**

Προτού προχωρήσουμε παραπέρα στον καθορισμό των δεδομένων της φωτοβολταϊκής γεννήτριας κρίνεται σκόπιμο να ελέγξουμε αν η στέγη του κτιρίου είναι κατάλληλη για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων διότι ο προσανατολισμός της μιας πλευράς της στέγης είναι νοτιοδυτικός και της άλλης βορειοανατολικός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων να είναι πολύ μικρή. Θα υπολογίσουμε τη διάχυτη ακτινοβολία στην στέγη του κτιρίου Β για την 21 Δεκεμβρίου και ηλιακή ώρα 12 πμ. Ο υπολογισμός θα γίνει και για τις δύο πλευρές της στέγης δηλαδή για αζιμούθια γωνία των φωτοβολταϊκών πλαισίων  $\theta_1=60^\circ$  και  $\theta_2=-120^\circ$ . Αρχικά θα υπολογίσουμε τα δεδομένα που είναι κοινά και για τις δύο γωνίες [1] καθώς και την άμεση, τη διάχυτη και την συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιώντας το μοντέλο κατάτμησης ακτινοβολίας των Erbs-klein-Duffie [1].

✚ Γωνία ημέρας Β:

$$B=360^\circ \times \frac{DoY-1}{365}=349^\circ$$

✚ Εκκεντρότητα του ηλίου:

$$E_o=1,0001+0,034221 \times \cos B+0,00128 \times \sin B+0,000719 \times \cos 2B+0,000077 \times \sin 2B=1,034$$

✚ Ακτινοβολία στο Διάστημα:

$$G_{EXTRA\ TRRESTRIAL}=E_o \times G_{sc}=1413,478 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Ηλιακή σταθερά } G_{sc}=1367 \text{ W/m}^2$$

✚ Ύψος ηλίου β για την 21 Δεκεμβρίου και ηλιακή ώρα  $T_{SOLAR}=12\pi\mu$ :

$$\text{Ωριαία γωνία: } \omega=15^\circ/h \times (T_{SOLAR}-12h)=0^\circ$$

$$\text{Ηλιακή απόκλιση } \delta=23,45^\circ \times \sin\left[\frac{360^\circ}{365} \times (DoY-81)\right]=-23,45^\circ$$

$$\text{Ύψος ηλίου } \beta: \sin\beta=\sin\delta \times \sin\varphi+\cos\delta \times \cos\varphi \times \cos\omega=\cos\varphi_z=0,478$$

- ✚ Ακτινοβολία που προσπίπτει στο παράλληλο στο οριζόντιο του εδάφους έξω από την ατμόσφαιρα της Γης, στο διάστημα  $G_{GLOBAL,h,oa}$ :

$$G_{GLOBAL,h,oa} = E_o \times G_{sc} \times \sin\beta = 675,64 \text{ W/m}^2$$

- ✚ Δείκτης αιθριότητας  $k_t$ :

Για το μήνα Δεκέμβριο ο μέσος δείκτης αιθριότητας είναι [12]:

$$k_t = 0,43$$

- ✚ Κλάσμα διάχυσης  $k_d$ :

$$k_d = 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388k_t^2 - 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4 = 0,7924$$

- ✚ Συνολική ηλιακή ακτινοβολία  $G_{GLOBAL,h}$  που δέχεται οριζόντιο επίπεδο στο έδαφος, για την συγκεκριμένη περιοχή, στην καθορισμένη ημέρα και ώρα:

$$G_{GLOBAL,h} = k_t \times G_{GLOBAL,h,oa} = 290,5252 \text{ W/m}^2$$

- ✚ Άμεση ηλιακή ακτινοβολία  $G_{BEAM,h}$  που δέχεται οριζόντιο επίπεδο στο έδαφος, για την συγκεκριμένη περιοχή, στην καθορισμένη ημέρα και ώρα:

$$G_{BEAM,h} = G_{GLOBAL,h} \times \frac{1-k_d}{\sin\beta} = 126,178 \text{ W/m}^2$$

- ✚ Συνιστώσα διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο την συγκεκριμένη μέρα και ώρα:

$$G_{DIFF,h} = G_{GLOBAL,h} - G_{BEAM,h} = 164,35 \text{ W/m}^2$$

Στην συνέχεια θα πρέπει να υπολογίσουμε τη γωνία πρόσπτωσης  $\gamma$ , δηλαδή τη γωνία ανάμεσα στην άμεση ηλιακή δέσμη  $G_{BEAM}$  και στην επιφάνεια του συλλέκτη καθώς επίσης και την συνολική, την άμεση και τη διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη στο έδαφος. Οι υπολογισμοί θα γίνουν για κάθε αζιμούθια γωνία  $\theta$  ξεχωριστά. Η γωνία κλίσης του συλλέκτη δηλαδή η γωνία κλίσης της στέγης είναι  $\alpha = 30^\circ$ .

$$\theta_1 = 60^\circ$$

- ✚ Γωνία πρόσπτωσης  $\gamma$ :

$$\cos\gamma = \sin\delta \times \sin\varphi \times \cos\alpha - \sin\delta \times \cos\varphi \times \sin\alpha \times \cos\theta + \cos\delta \times \cos\varphi \times \cos\alpha \times \cos\omega + \cos\delta \times \sin\varphi \times \sin\alpha \times \cos\theta \times \cos\omega + \cos\delta \times \sin\alpha \times \sin\omega \times \sin\theta \text{ οπότε}$$

$$\cos\gamma = 0,63349$$

- ✚ Συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας  $G_{\text{BEAM},i}$  που προσπίπτει κάθετα στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη την συγκεκριμένη μέρα και ώρα:

$$G_{\text{BEAM},i} = G_{\text{BEAM},h} \times \frac{\cos\gamma}{\sin\beta} = 167,22 \text{ W/m}^2$$

- ✚ Συνιστώσα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη την συγκεκριμένη μέρα και ώρα:

$$G_{\text{DIFF},i} = 0,5 \times G_{\text{DIFF},h} \times (1 + \cos\alpha) = 153,34 \text{ W/m}^2$$

$$\theta_1 = -120^\circ$$

- ✚ Γωνία πρόσπτωσης  $\gamma$ :

$$\cos\gamma = \sin\delta \times \sin\varphi \times \cos\alpha - \sin\delta \times \cos\varphi \times \sin\alpha \times \cos\theta + \cos\delta \times \cos\varphi \times \cos\alpha \times \cos\omega + \cos\delta \times \sin\varphi \times \sin\alpha \times \cos\theta \times \cos\omega + \cos\delta \times \sin\alpha \times \sin\omega \times \sin\theta \text{ οπότε}$$

$$\cos\gamma = 0,1943$$

- ✚ Συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας  $G_{\text{BEAM},i}$  που προσπίπτει κάθετα στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη την συγκεκριμένη μέρα και ώρα:

$$G_{\text{BEAM},i} = G_{\text{BEAM},h} \times \frac{\cos\gamma}{\sin\beta} = 51,29 \text{ W/m}^2$$

- ✚ Συνιστώσα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη την συγκεκριμένη μέρα και ώρα:

$$G_{\text{DIFF},i} = 0,5 \times G_{\text{DIFF},h} \times (1 + \cos\alpha) = 153,34 \text{ W/m}^2$$

Συμπέρασμα: Και στις δύο περιπτώσεις δηλαδή και στις δύο πλευρές της στέγης, το ποσό της διάχυτης ακτινοβολίας στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη συγκριτικά με το ποσό της άμεσης ακτινοβολίας σε αυτό είναι αξιοσημείωτα μεγάλο. Ειδικά στην περίπτωση που η αζιμούθια γωνία  $\theta = -120^\circ$ , δηλαδή ο προσανατολισμός των πλαισίων είναι βορειοανατολικός παρατηρούμε ότι η διάχυτη ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη είναι τριπλάσια από την άμεση. Συνεπώς η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων θα είναι πολύ μικρή. Για τους παραπάνω λόγους η στέγη του κτιρίου Β δεν κρίνεται κατάλληλη για τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων.

- **ΚΤΙΡΙΟ Γ:**

Όπως και στην περίπτωση του Κτιρίου Α λόγω της υψηλής τιμής της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος [ $P_{\alpha}(W_p)= 27.248,1W_p$ ] καταφεύγουμε στην χρήση των ενδιάμεσων αναστροφέων τάσεως σε συνδυασμό με τελικούς αναστροφείς, οι οποίοι στην είσοδο τους λαμβάνουν τάση AC και αναλαμβάνουν την λειτουργία φόρτισης των συσσωρευτών μέσω γραμμής DC. Αυτός ο ενδιάμεσος αναστροφέας αναλαμβάνει την μετατροπή της συνεχούς τάσεως στην έξοδο της ΦΒ γεννήτριας σε εναλλασσόμενη, η οποία στην συνέχεια θα μετατραπεί ξανά σε συνεχή από τον τελικό αναστροφέα προκειμένου να αποθηκευτεί στους συσσωρευτές. Ως ενδιάμεσο αναστροφέα επιλέγουμε τώρα τον Sunny Mini Central 9000TL τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5.4.



**Τεχνικά Χαρακτηριστικά Sunny Mini  
Central 9000TL**

**Είσοδος (DC)**

Μέγιστη ισχύς DC ( $\cos\phi=1$ ) 9300W

Μέγιστη τάση DC 700V

Εύρος τάσης σημείου μέγιστης ισχύος  
(MPP) 333V-500V

Ονομαστική τάση DC 350V

Ελάχιστη τάση DC/Τάση εκκίνησης 333V/400V

Μέγιστο ρεύμα εισόδου/ανά στοιχειοσειρά 28A/28A

Αριθμός ανιχνευτών MPP/Στοιχειοσειρές  
ανά ανιχνευτή MPP 1/5

**Έξοδος (AC)**

Ονομαστική ισχύς AC (230V,50Hz) 9000W

Μέγιστη φαινόμενη ισχύς AC 9000VA

Ονομαστική τάση/ περιοχή τάσεων 220V, 230V, 240V/  
180V-265V

Συχνότητα δικτύου, εύρος AC 50,60Hz $\pm$ 4,5Hz

Ονομαστική συχνότητα  
δικτύου/Ονομαστική τάση δικτύου 50Hz/230V

Μέγιστο ρεύμα εξόδου 40A

Συντελεστής ισχύος ( $\cos\phi$ ) 1

Φάσεις τροφοδοσίας/Φάσεις  
σύνδεσης/Power Balancing 1/1/ναι

**Βαθμοί απόδοσης**

Μέγιστος βαθμός απόδοσης/Euro-Eta  
(EBA) 97,7%/97,3%

**Συστήματα προστασίας**

Προστασία αντιστροφής πόλων DC  
/προστασία από ανάστροφη τάση Ναι/προαιρετικά

Ενσωματωμένος διακόπτης ESS απόζευξης  
φορτίου DC Ναι

Αντοχή σε βραχυκύκλωμα AC Ναι

Επιτήρηση βραχυκυκλώματος γης	Ναι
Επιτήρηση δικτύου (SMA grid guard)	Ναι
Ενσωματωμένη διάταξη προστασίας από σφάλματα ρεύματος RCD ευαίσθητη σε όλα τα ρεύμα	Ναι
Κατηγορία προστασίας/Κατηγορία υπέρτασης	I/III
<b>Γενικά Χαρακτηριστικά</b>	
Διαστάσεις (Πλάτος / Ύψος / Βάθος)	468 / 613 / 242 mm
Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας	-25°C ... + 60°C
Βάρος	35kg
Θόρυβος	42dB(A)
Ιδία κατανάλωση: Λειτουργία (Αναμονής) / νυχτερινή	0,25W
Τοπολογικά στοιχεία	Χωρίς μετασχηματιστή

**Πίνακας 4.5.4: Χαρακτηριστικά Sunny Mini Central 9000TL**

[<http://files.sma.de/dl/5710/SMC11000TLRP-DEL104420W.pdf>]

Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνεται ότι η ισχύς DC εισόδου του μετατροπέα είναι 9300W οπότε θα απαιτηθούν τρεις μετατροπείς. Αυτοί στην συνδεσμολογία 3Φ, συνολικά δέχονται ηλεκτρική ισχύς 27.900W<sub>p</sub> οπότε είμαστε ικανοποιημένοι από πλευράς ισχύος. Επίσης φαίνεται ότι η μέγιστη τάση εισόδου του είναι 700V, το εύρος τάσης μέγιστου σημείου ισχύος 333V-500V και η ελάχιστη τάση εισόδου/τάση εκκίνησης 333V/400V αντίστοιχα.

Επιλέγω ονομαστική τάση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας  $V_N=400V$ .

- Ο αριθμός των πλαισίων που θα είναι συνδεδεμένα σε σειρά ανά συστοιχία είναι:

$$N_s = \frac{V_N(V)}{V_{\max}(V)} = \frac{400V}{30,7V} \cong 13,03 = 13 \text{ πλαίσια}$$

Έλεγχος περιορισμού τάσεως συστοιχίας:

$N_s \times V_{OC} \leq V_{NEXT\ INPUT}$  το οποίο ικανοποιείται αφού πραγματικά

$13 (\text{πλαίσια}) \times 37,3 (V/\text{πλαίσιο}) = 484,9V < 700V$

➤ Ο αριθμός των πλαισίων που θα είναι συνδεδεμένα παράλληλα είναι:

$$N_p = \frac{N_{\text{ΠΛΑΙΣΙΩΝ}_\theta}}{N_s} = \frac{111}{13} \cong 8,5 = 9 \text{ πλαίσια}$$

Δηλαδή θα έχω 9 παράλληλες συστοιχίες.

➤ Οπότε ο τελικός αριθμός πλαισίων θα είναι:

$$N_{\text{ΠΛΑΙΣΙΩΝ}} = N_s \times N_p = 13 \times 9 = 117 \text{ πλαίσια}$$

Συνεπώς συνδέω με τριφασική συνδεσμολογία 3 από τις 9 παράλληλες στοιχειοσειρές ανά ένα αναστροφέα με αποτέλεσμα στο ΦΒ πεδίο να διακρίνουμε 3 όμοια υποπεδία. Ο MPPT που έχει ο κάθε ενδιάμεσος αναστροφέας μπορεί να επιτηρήσει στην είσοδο του μέχρι 5 παράλληλες συστοιχίες. Οπότε εδώ που συνδέονται 3 συστοιχίες ικανοποιείται η παραπάνω προδιαγραφή. Η κάθε μια από τις παράλληλες συστοιχίες παρέχει θεωρητικά μέγιστο ρεύμα  $1,25 \times 7,99A = 9,987A$ . Συνεπώς το συνολικό ρεύμα στην είσοδο του αντιστροφέα γίνεται  $3 \times 9,987A = 29,961A$ . Από τα χαρακτηριστικά του αναστροφέα προκύπτει ότι υπερβαίνει το όριο μέγιστου ρεύματος εισόδου που είναι 28A. Όμως τεχνικά είναι αποδεκτή αυτή η προσέγγιση αφού τα 29,961A αποδίδονται μόνο σε ιδανικές συνθήκες. Συνήθως υπάρχει μείωση της αποδιδόμενης ισχύος οπότε και ρεύματος κατά 20%.

#### 4.6 Υπολογισμός συστήματος συσσωρευτών

Η χωρητικότητα του συστήματος των συσσωρευτών υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση [1] :

$$C(Ah) = \sigma_{\gamma M} \times \frac{E_T \left( \frac{Wh}{d} \right) \times (n + I_D)(d)}{\sigma_{\Gamma\Sigma} \times \sigma_{MHE} \times V_B(V) \times DOD}$$

Όπου:

- C(Ah) = η χωρητικότητα των συσσωρευτών
- $E_T \left( \frac{Wh}{d} \right)$  = οι ημερήσιες ανάγκες σε ενέργεια
- $\sigma_{\gamma M} = 1,2$ , ο συντελεστής ενεργειακών καταναλώσεων
- n = οι ημέρες αυτονομίας
- $I_D$  = το ποσοστό των φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας
- $\sigma_{\Gamma\Sigma}$  = ο συντελεστής γήρανσης των συσσωρευτών
- $\sigma_{MHE}$  = ο συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας
- $V_B(V)$  = η ονομαστική τάση των συσσωρευτών
- DOD = το βάθος εκφόρτισης

Για κάθε κτίριο θα γίνει ξεχωριστός υπολογισμός, όμως υπάρχουν κοινά και για τα τρία κτίρια χαρακτηριστικά που εκφράζονται από τους παρακάτω συντελεστές:

Οι επιθυμητές ημέρες αυτονομίας είναι **n=2** οπότε το επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης είναι **DOD=0,4**.

Εφόσον στις ημέρες αυτονομίας το σύστημα καλύπτεται αποκλειστικά από τους συσσωρευτές, το ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας  $I_D$  ισούται με τη μονάδα δηλαδή  **$I_D=1$** .

Ο συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων επιλέγεται  **$\sigma_{\gamma M}=1,2$** .

Εφόσον χρησιμοποιείται αντιστροφείας επιλέγεται ο συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας  **$\sigma_{MHE}=0,91$** .

Η απώλεια της χωρητικότητας των συσσωρευτών εκφράζεται με το συντελεστή γήρανσης που ισούται με  **$\sigma_{\Gamma\Sigma} = 0,8$** .

Επειδή η μέση θερμοκρασία ετησίως είναι 18,55 °C λαμβάνεται και ένας συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης της χωρητικότητας των συσσωρευτών [1], όπου:

$$k_{\theta} = 1 - \frac{\Delta\theta}{160^{\circ}\text{C}} = 0,9625$$

➤  $\Delta\theta$  = η διαφορά της θερμοκρασίας κάτω από τους 25°C

• **ΚΤΙΡΙΟ Α:**

Επιλέγω ονομαστική τάση συσσωρευτών  $V_B=48V$  λόγω της μεγάλης ισχύος του συστήματος.

Οπότε τα συγκεντρωτικά δεδομένα για τον υπολογισμό της χωρητικότητας των συσσωρευτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

<p style="text-align: center;"><b>Δεδομένα για τον υπολογισμό των συσσωρευτών</b></p> <p style="text-align: center;">Ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες  <math>E_T = 47.710 \left( \frac{Wh}{d} \right)</math></p> <p style="text-align: center;">Ονομαστική τάση συστήματος συσσώρευσης  <math>V_B = 48V</math></p> <p style="text-align: center;">Ημέρες αυτονομίας  <math>n = 2</math></p> <p style="text-align: center;">Μέγιστο βάθος εκφόρτισης  <math>DOD = 0,4</math></p> <p style="text-align: center;">Ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας  <math>I_D = 1</math></p> <p style="text-align: center;">Συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων  <math>\sigma_{YM} = 1,2</math></p> <p style="text-align: center;">Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας  <math>\sigma_{MHE} = 0,91</math></p> <p style="text-align: center;">Συντελεστής γήρανσης  <math>\sigma_{\Gamma\Sigma} = 0,8</math></p> <p style="text-align: center;">Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης  <math>k_{\theta} = 0,9625</math></p>
--

**Πίνακας 4.6.1: Δεδομένα κτιρίου Α για τον υπολογισμό των συσσωρευτών.**

Αντικαθιστώντας στη γενική εξίσωση της χωρητικότητας των συσσωρευτών προκύπτει:

$$C(Ah) = 1,2 \times \frac{47.710 \times (2+1)}{0,8 \times 0,91 \times 48 \times 0,4} = 12.287,95Ah$$

Η διορθωμένη χωρητικότητα λόγω της θερμοκρασιακής αναπροσαρμογής [1] θα είναι:

$$C_{\theta} = \frac{C(Ah)}{k_{\theta}} = 12.766,7 Ah$$

Επιλέγω τους συσσωρευτές PVX-2580L (VRLA) των 12V-258Ah (τιμή 650ευρώ/τεμ) των οποίων τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο σχήμα 4.6.1 και η εικόνα του στο σχήμα 4.6.2. Θα συνδέσω 4 συσσωρευτές σε σειρά οπότε:

$$V_B = 4 \times 12 = 48 V.$$

Η χωρητικότητα θα καθοριστεί με την παράλληλη σύνδεση αυτών ώστε να έχω τελικά 12.766,7Ah. Ο απαιτούμενος αριθμός των παράλληλων συστοιχιών συσσωρευτών είναι:

$$N_P = \frac{12.766,7h}{258Ah/συστοιχία} = 49 \text{ συστοιχίες}$$

Δεδομένου ότι κάθε συστοιχία περιλαμβάνει τέσσερις συσσωρευτές σε σειρά ( $N_S=4$ ), ο συνολικός αριθμός μπαταριών προκύπτει ότι είναι:

$$N_{BAT} = N_P \times N_S = 196$$

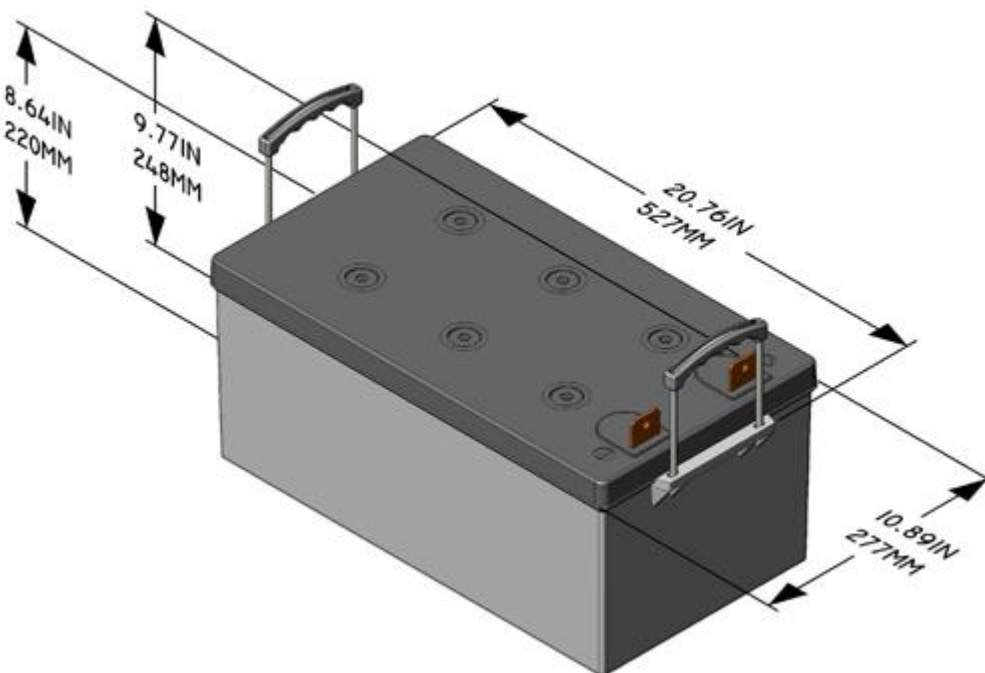
Για την στέγαση αυτών των συσσωρευτών απαιτείται ελάχιστος οριζόντιος χώρος με εμβαδόν  $S_{BAT} = 0,527(m) \times 0,277(m) \times 196 = 28,61 \text{ m}^2$ . Δεδομένου ότι θα απαιτηθούν και διάδρομοι διέλευσης μεταξύ των συσσωρευτών ο απαιτούμενος χώρος εκτιμάται ότι είναι 40-45 τμ προκειμένου να τοποθετηθούν όλοι οι συσσωρευτές επί δαπέδου. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να τοποθετηθούν σε ράφια προκειμένου να μειωθεί ο συνολικός χώρος εγκατάστασης τους. Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να φροντίσουμε ώστε ο χώρος αυτός να αερίζεται επαρκώς. Επιπλέον θα πρέπει να υπάρξει μέριμνα για την αντισεισμική προστασία ολόκληρης της κατασκευής όπου θα τοποθετηθούν τελικά οι συσσωρευτές, ειδικά αν λάβουμε υπόψη και το βάρος τους που κυμαίνεται στα 72,1kg έκαστος όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.1. Το δάπεδο θα πρέπει να στρωθεί με το κατάλληλο πλαστικό για να αποφευχθεί ο κίνδυνος εισροής οξέων.

**PVX-2580L**

Voltage	12v							
Industry Reference	8D							
Battery Series	<a href="#">12 Volt Sun Xtender Series</a>							
Nominal Capacity Ampere Hours @ 25° C (77° F) to 1.75 Volts per cell - 24 Hour Rate	258 Ah							
Weight	159 lb / 72.1 kg							
Sun Xtender® Solar Battery Part Number	Length		Width		Height			
	in	mm	in	mm	in	mm		
PVX-2580L	20.76	527	10.89	277	9.77	248		
Nominal Capacity Ampere Hours @ 25° C (77° F) to 1.75 volts per cell								
1 Hr Rate	2 Hr Rate	4 Hr Rate	8 Hr Rate	24 Hr Rate	48 Hr Rate	72 Hr Rate	100 Hr Rate	120 Hr Rate
165 Ah	209 Ah	214 Ah	236 Ah	258 Ah	285 Ah	295 Ah	300 Ah	305 Ah

**Σχήμα 4.6.1: Χαρακτηριστικά συσσωρευτή PVX-2580L**

[<http://www.sunxtender.com/solarbattery.php?id=11>]



**Σχήμα 4.6.2: Ο συσσωρευτής PVX-2580L**

[<http://www.sunxtender.com/solarbattery.php?id=11>]

• **ΚΤΙΡΙΟ Γ:**

Επιλέγω και εδώ ονομαστική τάση συσσωρευτών  $V_B=48V$  λόγω της μεγάλης ισχύος του συστήματος.

Οπότε τα συγκεντρωτικά δεδομένα για τον υπολογισμό της χωρητικότητας των συσσωρευτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

<p><b>Δεδομένα για τον υπολογισμό των συσσωρευτών</b></p> <p>Ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες  <math>E_T = 35.100 \left( \frac{Wh}{d} \right)</math></p> <p>Ονομαστική τάση συστήματος συσώρευσης  <math>V_B = 48V</math></p> <p>Ημέρες αυτονομίας  <math>n = 2</math></p> <p>Μέγιστο βάθος εκφόρτισης  <math>DOD = 0,4</math></p> <p>Ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας  <math>I_D = 1</math></p> <p>Συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων  <math>\sigma_{\gamma M} = 1,2</math></p> <p>Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας  <math>\sigma_{MHE} = 0,91</math></p> <p>Συντελεστής γήρανσης  <math>\sigma_{\Gamma\Sigma} = 0,8</math></p> <p>Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης  <math>k_{\theta} = 0,9625</math></p>
---

**Πίνακας 4.6.2: Δεδομένα κτιρίου Γ για τον υπολογισμό των συσσωρευτών.**

Αντικαθιστώντας στη γενική εξίσωση της χωρητικότητας των συσσωρευτών προκύπτει:

$$C(Ah) = 1,2 \times \frac{35.100 \times (2 + 1)}{0,8 \times 0,91 \times 48 \times 0,4} = 9.040,18Ah$$

Η διορθωμένη χωρητικότητα λόγω της θερμοκρασιακής αναπροσαρμογής [1] θα είναι:

$$C_{\theta} = \frac{C(Ah)}{k_{\theta}} = 9.392,4 Ah$$

Επιλέγω και εδώ τους συσσωρευτές PVX-2580L των 12V-258Ah (τιμή 650ευρώ/τεμ) των οποίων τα χαρακτηριστικά έχουν παρουσιαστεί ήδη στο σχήμα 4.6.1. Θα συνδέσω 4 συσσωρευτές σε σειρά οπότε:

$$V_B = 4 \times 12 = 48 V.$$



Η χωρητικότητα θα καθοριστεί με την παράλληλη σύνδεση αυτών ώστε να έχω τελικά 9.392,4Ah. Ο απαιτούμενος αριθμός των παράλληλων συστοιχιών συσσωρευτών είναι:

$$N_P = \frac{9.392,4Ah}{258Ah/συστοιχία} = 36,4 \approx 36 \text{ συστοιχίες}$$

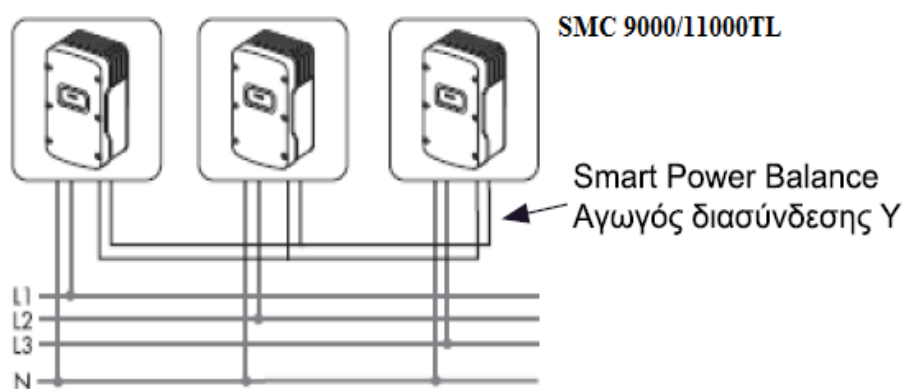
Δεδομένου ότι κάθε συστοιχία περιλαμβάνει τέσσερις συσσωρευτές σε σειρά ( $N_S=4$ ), ο συνολικός αριθμός μπαταριών προκύπτει ότι είναι:

$$N_{BAT} = N_P \times N_S = 144$$

Για την στέγαση αυτών των συσσωρευτών απαιτείται ελάχιστος οριζόντιος χώρος με εμβαδόν  $S_{BAT} = 0,527(m) \times 0,277(m) \times 140 = 21,02 \text{ m}^2$ . Δεδομένου ότι θα απαιτηθούν και διάδρομοι διέλευσης μεταξύ των συσσωρευτών ο απαιτούμενος χώρος εκτιμάται ότι είναι 35-40 τμ προκειμένου να τοποθετηθούν όλοι οι συσσωρευτές επί δαπέδου. Αν τοποθετηθούν σε ράφια προκειμένου να μειωθεί ο συνολικός χώρος εγκατάστασης τους θα πρέπει να φροντίσουμε ώστε ο χώρος αυτός να αερίζεται επαρκώς

#### 4.7 Καθορισμός των τελικών αναστροφέων (DC-AC) της μελέτης

Και στις δύο φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις η ονομαστική τάση του συστήματος των συσσωρευτών είναι  $V_B = 48V$ . Οι ενδιάμεσοι αναστροφείς επιτελούν τον έλεγχο μέγιστης παροχής ισχύος των ΦΒ πλαισίων και παρέχουν στην έξοδο τους τάση AC με την οποία τροφοδοτούνται το φορτίο και οι τελικοί αναστροφείς του συστήματος [1]. Λόγω της μεγάλης ισχύος του ΦΒ συστήματος και στις δύο περιπτώσεις, οι ενδιάμεσοι αναστροφείς συνδέονται μεταξύ τους με τριφασική συνδεσμολογία αστέρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.7.1.

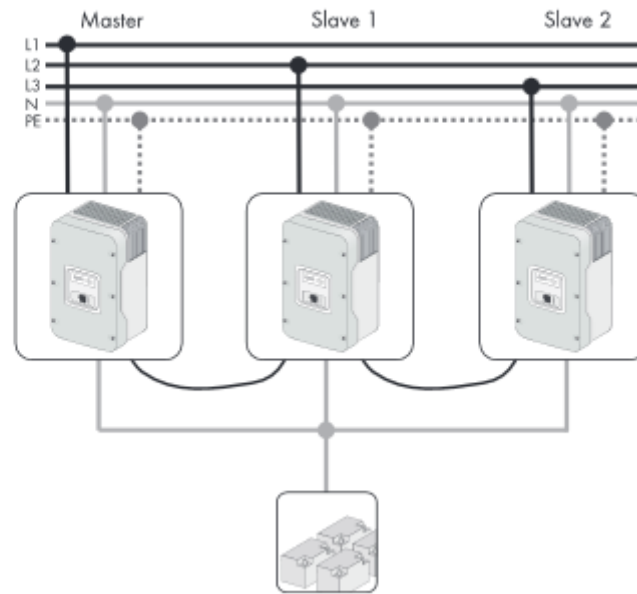


**Σχήμα 4.7.1: Τριφασική συνδεσμολογία αστέρα των ενδιάμεσων αναστροφέων (Φάσεις  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  και ουδέτερος N) [16]**

Οι τελικοί αναστροφείς τροφοδοτούνται από την AC ισχύ που παρέχεται από τους ενδιάμεσους αναστροφείς και χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν το σύστημα φόρτισης των συσσωρευτών. Λόγω της μεγάλης ισχύος της εγκατάστασης και επειδή η συνδεσμολογία είναι τριφασική επιλέχθηκε η μορφή λειτουργίας master-slave η οποία περιγράφεται στα τεχνικά εγχειρίδια των αναστροφέων. Η τριφασική συνδεσμολογία των τελικών αναστροφέων φαίνεται στο σχήμα 4.7.2.

Απαιτείται να γίνει έλεγχος της καταλληλότητας του συνδυασμού επιλογής πλαισίων-αναστροφήα για κάθε κτίριο και της συμβατότητας μεταξύ ενδιάμεσου και τελικού αναστροφήα..

Σύστημα 3 φάσεων (Πλέγμα):



Σχήμα 4.7.2: Τριφασική συνδεσμολογία των τελικών αναστροφέων

(Φάσεις  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , ουδέτερος  $N$  και  $PE$  δυναμικό της γης )

[<http://files.sma.de/dl/5612/SI5048-TB-TGR110340.pdf>]

- **ΚΤΙΡΙΟ Α:**

Η ισχύς που αναμένεται να καταναλώσουν όλες οι συσκευές AC αν λειτουργήσουν ταυτόχρονα σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 4.2.1 είναι 10.520W. Στην πράξη η αναμενόμενη μέγιστη ισχύς θα είναι σίγουρα μικρότερη. Οι τελικοί αναστροφείς θα πρέπει να είναι κατάλληλοι για χρήση σε αυτόνομα ΦΒ πεδία αλλά και να παρέχουν τη δυνατότητα σύνδεσης βοηθητικής πηγής εισόδου AC. Ο τελικός αναστροφέας που θα επιλεγεί είναι ο Sunny Island 6.0H. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Sunny Island 6.0H φαίνονται στον πίνακα 4.7.1.

**Sunny Island 6.0H**

**Έξοδος (AC)**

Ονομαστική τάση AC (ρυθμιζόμενη) 230V (202V-253V)

Συχνότητα δικτύου AC (ρυθμιζόμενη) 50Hz (45Hz-65Hz)

Συνεχής ισχύς AC στους 25°C/ 45°C 4600W/3700W

Ισχύς AC στους 25°C για 30 min/5 min/3 s 6000W/6800W/11000W

Ονομαστικό ρεύμα AC/μέγ. Ρεύμα AC (peak) 20A/120A

Συντελεστής παραμόρφωσης τάσης εξόδου/  
συντελεστής ισχύος (cosφ) <4%/-1 έως +1

**Είσοδος (AC) (γεννήτρια ή δίκτυο)**

Τάση εισόδου AC (εύρος) 230V (172,5V-264,5V)

Συχνότητα εισόδου AC (εύρος) 50Hz (40Hz-70Hz)

Μέγ. Ρεύμα εισόδου (ρυθμιζόμενο)/ Μέγ.  
Ισχύς εισόδου 50A /11,5kW

**Είσοδος συσσωρευτή DC**

Τάση συσσωρευτή (εύρος) 48V (41V-63V)

Μέγ. Ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή/ ρεύμα  
διαρκούς φόρτισης στους 25°C 110A/100V

Τύπος συσσωρευτή/ χωρητικότητα  
συσσωρευτή (εύρος) FRLA, VRLA/100-10.000Ah

Ρύθμιση φόρτισης Μέθοδος IUoU

**Βαθμοί απόδοσης/ Ιδιοκατανάλωση**

Μέγιστος βαθμός απόδοσης 95%

Ιδιοκατανάλωση άνευ φορτίου/ κατάσταση  
αναμονής 26W/4W

<b>Γενικά στοιχεία</b>	
Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	-25°C...+60°C
Κατηγορία προστασίας (κατά IEC 60529)	Εσωτερική τοποθέτηση (IP54)
Βάρος	63kg
Διαστάσεις (Π/Υ/Β)	467/612/242mm
<b>Εξοπλισμός/λειτουργία</b>	
Τριφασικά συστήματα/ παράλληλη σύνδεση	ναι/ναι
Ενσωματωμένη παράκαμψη/λειτουργία Multicluster	-/ναι
Υπολογισμός κατάστασης φόρτισης/πλήρης φόρτιση/Φόρτιση αντιστάθμισης	ναι/ναι/ναι
Ενσωματωμένη ομαλή εκκίνηση/Υποστήριξη γεννήτριας	ναι/ναι
Αισθητήρας θερμοκρασίας συσσωρευτή/αγωγοί επικοινωνίας	ναι/ναι

#### Πίνακας 4.7.1: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Sunny Island 6.0H

[<http://www.sma-hellas.com/el/proionta/metatropheis-aytonomon-diktyon/sunny-island-60h-80h.html> ]

Το θεωρητικά μέγιστο ρεύμα AC των ενδιάμεσων αναστροφών είναι:

$$I_{EA(AC)} = \frac{P_{NOM-ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑ (AC)}}{V_{NOM (AC)}} \times 1,25 = \frac{11.000W \times \cos\varphi}{230V} \times 1,25 = 59,79A$$

Το ρεύμα αυτό μοιράζεται του φορτίου AC και των τελικών αναστροφών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ισχύς που θα οδηγηθεί τελικά στο φορτίο θα είναι στο 1/3 της ισχύος αιχμής των ενδιάμεσων αναστροφών, προκύπτει ότι η τιμή του ρεύματος που θα οδηγηθεί στην είσοδο AC του τελικού αναστροφέα θα είναι:

$$I_{TA} = \frac{59,79A}{3} = 19,93 A$$

Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή καθώς όπως φαίνεται στον πίνακα 4.7.1 το ονομαστικό ρεύμα της εξόδου AC μπορεί να ανέλθει στα 20 A.

• **ΚΤΙΡΙΟ Γ:**

Η ισχύς που αναμένεται να καταναλώσουν όλες οι συσκευές AC αν λειτουργήσουν ταυτόχρονα σύμφωνα με τα δεδομένα του πίνακα 4.2.1 είναι 7.770W. Και στην περίπτωση αυτή ο τελικός αναστροφέας που θα επιλεγεί είναι ο Sunny Island 6.0H. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Sunny Island 6.0H έχουν ήδη παρουσιαστεί στον πίνακα 4.7.1. Η συνδεσμολογία όπως και στο κτίριο A θα είναι τριφασική υπό μορφή master-slave.

Εδώ το θεωρητικά μέγιστο ρεύμα AC των ενδιάμεσων αναστροφέων είναι:

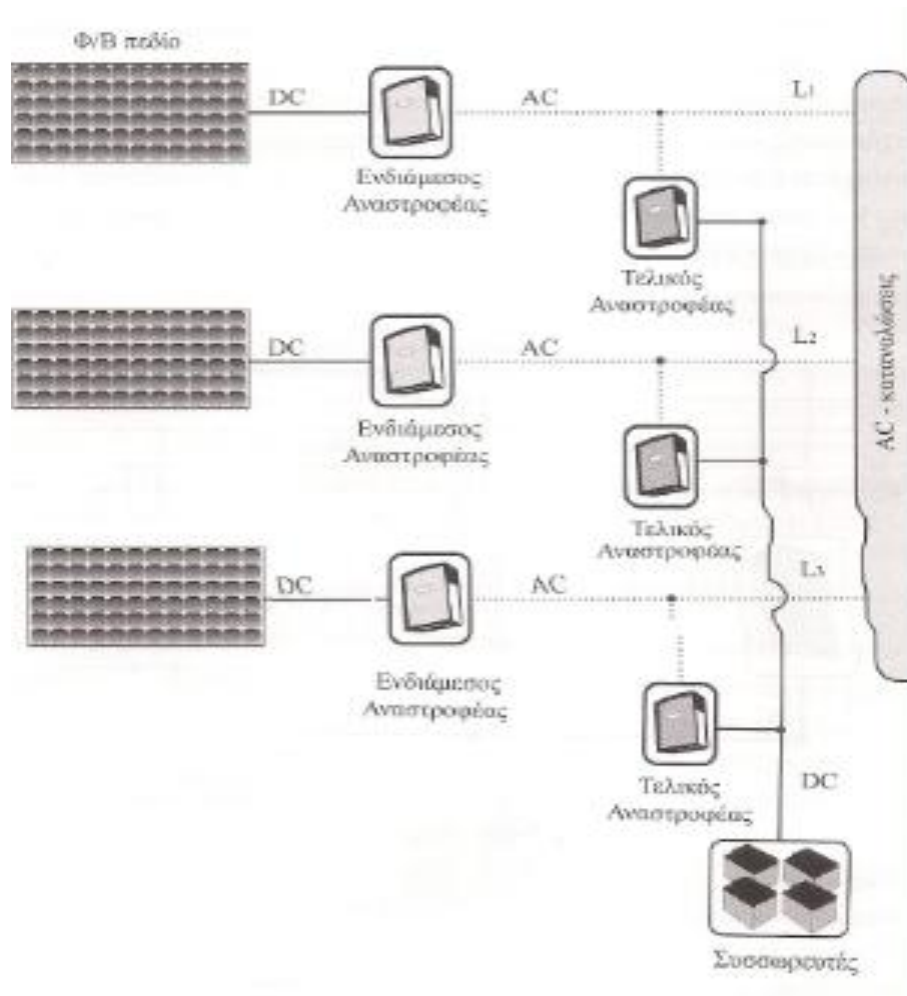
$$I_{EA(AC)} = \frac{P_{NOM-ANASTROΦEA(AC)}}{V_{NOM(AC)}} \times 1,25 = \frac{9.000W \times \cos\phi}{230V} \times 1,25 = 48,913A$$

Το ρεύμα αυτό μοιράζεται του φορτίου AC και των τελικών αναστροφέων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ισχύς που θα οδηγηθεί τελικά στο φορτίο θα είναι στο 1/3 της ισχύος αιχμής των ενδιάμεσων αναστροφέων, προκύπτει ότι η τιμή του ρεύματος που θα οδηγηθεί στην είσοδο AC του τελικού αναστροφέα θα είναι:

$$I_{TA} = \frac{48,913A}{3} = 16,3 A$$

Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή καθώς όπως φαίνεται στον πίνακα 4.7.1 το ονομαστικό ρεύμα της εξόδου AC μπορεί να ανέλθει στα 20 A.

Η συνδεσμολογία μεταξύ των φωτοβολταϊκών συστοιχιών και του ενδιάμεσου και τελικού αναστροφέα απεικονίζεται στο σχήμα 4.7.3 και είναι ίδια και για τα δύο φωτοβολταϊκά συστήματα.



Σχήμα 4.7.3: Συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών υποπεδίων με ενδιάμεσους και τελικούς αναστροφείς [1]

#### 4.8 Χωροταξική μελέτη

Και στα δύο κτίρια τα ΦΒ πλαίσια που χρησιμοποιούνται είναι τα ίδια και διατάσσονται σε εννιά παράλληλες συστοιχίες με νότιο προσανατολισμό. Η κάθε ΦΒ συστοιχία θα τοποθετηθεί ως μια ανεξάρτητη και ενιαία σειρά πλαισίων. Με τον τρόπο αυτό, η κάθε συστοιχία θα δέχεται παρόμοιες συνθήκες φωτισμού (άμεση-διάχυτη-ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία) [1]. Εφόσον θα υπάρχει η μικρότερη δυνατή ανομοιογένεια στις συνθήκες λειτουργίας των πλαισίων, το ρεύμα ανά συστοιχία μεγιστοποιείται και παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ισχύς. Η κλίση  $\beta$  των πλαισίων είναι  $\beta = 38^\circ$ .

Η ελάχιστη απόσταση για αποφυγή σκίασης υπολογίζεται ως εξής [16]:

- Υπολογισμός της επικάλυψης του ύψους της κατασκευής στήριξης.

Η τοποθέτηση γίνεται σε επίπεδη επιφάνεια οπότε  $\delta=0$  και το μήκος των ΦΒ πλαισίων  $\gamma=1,652\text{m}$ . Οπότε:

$$u = \gamma \times \sin\beta - \delta = 1,652 \times \sin 38 - 0 = 1,017\text{m}$$

- Υπολογισμός της ελεύθερης απόστασης μεταξύ δύο γειτονικών σειρών φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Ο λόγος  $a/u$  από το διάγραμμα του σχήματος 3.5.2 για γεωγραφικό πλάτος  $38^\circ$  προκύπτει ότι είναι:

$$\frac{a}{u} = 2,6 \rightarrow a = 2,6 \times 1,017 = 2,64\text{m}$$

- Υπολογισμός ελάχιστης απόστασης μεταξύ δύο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων.

$$\varepsilon = a + \gamma \times \cos\beta = 2,64 + 1,652 \times \cos 38^\circ = 3,94\text{m}$$

Το εμβαδό των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών πλαισίων υπολογίζεται από την σχέση:

$$S_E = S_o \times \frac{\varepsilon}{\gamma \times \cos\beta}$$

όπου:  $S_o = S_\pi \times N \times \cos\beta$  το οποίο υπολογίζεται για κάθε κτίριο ξεχωριστά:

#### **ΚΤΙΡΙΟ Α:**

$N=144 \rightarrow S_o = S_\pi \times N \times \cos\beta = 1,652 \times 0,994 \times 144 \times 0,788 = 186,33\text{m}^2$  οπότε:

$$S_E = 186,33\text{m}^2 \times \frac{3,94\text{m}}{1,652\text{m} \times 0,788} = 563,95\text{m}^2$$



**ΚΤΙΡΙΟ Γ:**

$$N=117 \rightarrow S_o = S_{\pi} \times N \times \cos\beta = 1,652 \times 0,994 \times 117 \times 0,788 = 151,39\text{m}^2 \text{ \textit{οπότε:}}$$

$$S_E = 151,39\text{m}^2 \times \frac{3,94\text{m}}{1,652\text{m} \times 0,788} = 458,21\text{m}^2$$

Συγκεντρωτικά τα δεδομένα για την χωροθέτηση της μελέτης αποτυπώνονται στον πίνακα 4.8.1. Στο απαιτούμενο συνολικό εμβαδόν έχει συνυπολογιστεί και 80m<sup>2</sup> για το οίκημα στέγασης των συσσωρευτών και των τελικών αναστροφέων.

	<b>ΚΤΙΡΙΟ Α</b>	<b>ΚΤΙΡΙΟ Γ</b>
<b>Γεωγραφικό πλάτος περιοχής</b>	Άγιοι Ανάργυροι (φ= 38°1')	Άγιοι Ανάργυροι (φ= 38°1')
<b>Επιφάνεια διάταξης πλαισίων</b>	Επίπεδη επιφάνεια χωρίς κλίση	Επίπεδη επιφάνεια χωρίς κλίση
<b>Άνεμοι</b>	Μέτριοι	Μέτριοι
<b>Εμπόδια</b>	Δεν υπάρχουν	Δέντρα τα οποία θα αφαιρεθούν
<b>Διαστάσεις ΦΒ πλαισίου (l-w-t)</b>	1,652m-0,994m-0,05m	1,652m-0,994m-0,05m
<b>Γωνία εγκατάστασης πλαισίων</b>	β =38°	β =38°
<b>Αζιμούθιο πλαισίων ως προς Νότο</b>	θ=0°	θ=0°
<b>Συνολικός αριθμός πλαισίων</b>	144	117
<b>Αριθμός πλαισίων συστοιχίας</b>	16	13
<b>Αριθμός παράλληλων συστοιχιών</b>	9	9
<b>Ελάχιστη απόσταση για αποφυγή σκίασης</b>	3,94m	3,94m
<b>Εμβαδό οριζόντιας έκτασης</b>	563,95m <sup>2</sup>	458,21m <sup>2</sup>
<b>Συνολικό απαιτούμενο εμβαδόν</b>	750m <sup>2</sup>	650m <sup>2</sup>

**Πίνακας 4.8.1: Δεδομένα χωροταξικής μελέτης**

#### 4.9 Υπολογισμός των καλωδιώσεων

Αρχικά υπολογίζονται οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των επιμέρους υποσυγκροτημάτων της ΦΒ εγκατάστασης που συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους. Για όλες τις συνδέσεις θα χρησιμοποιηθούν πολύκλινα καλώδια επικασσιτερωμένου χαλκού με υλικό μόνωσης και προδιαγραφές κατάλληλες για λειτουργία σε περιοχές υψηλής θερμοκρασίας και ακτινοβολίας UV. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 4.9.1 [1].

Υποσυγκροτήματα	Μήκος σύνδεσης	Ποσοστό πτώσης τάσης
ΦΒ γεννήτρια-Ενδιάμεσος αναστροφέας	55m	3%
Ενδιάμεσος αναστροφέας-Τελικός αναστροφέας	50m	1%
Τελικός αναστροφέας-συσσωρευτής	5m	1%
Τελικός αναστροφέας-Φορτίο κατανάλωσης	50m	3%

**Πίνακας 4.9.1: Ελάχιστες αποστάσεις επιμέρους υποσυγκροτημάτων [1]**

Οπότε οι απαιτούμενες διατομές για τα καλώδια που θα επιλεγούν προκύπτουν από τους παρακάτω τύπους:

- για συνεχές ρεύμα (DC):  $S[mm^2] = \frac{2 \times L \times I}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6$
- για μονοφασικό ρεύμα (AC):  $S[mm^2] = \frac{2 \times L \times I \times \cos\phi}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6$
- για τριφασικό ρεύμα (AC):  $S[mm^2] = \frac{\sqrt{3} \times L \times I \times \cos\phi}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6$

όπου:

- S= η ελάχιστη διατομή του αγωγού
- l =το μήκος του αγωγού
- σ = η τιμή της ειδικής αγωγιμότητας του υλικού (για τον επικασσιτερωμένο χαλκό  $\sigma = 56 \times 10^6 \times \Omega^{-1} \times m^{-1}$ )
- ΔV= η πτώση τάσεως που αναλογεί στην μέγιστη αποδεκτή τιμή απωλειών
- cosφ= προσδιορίζεται από τις προδιαγραφές του αναστροφέα

Ο συντελεστής προσαύξησης του ρεύματος ορίζεται στο 25%. Οι διατομές των καλωδιώσεων υπολογίζονται ακολούθως:

❖ ΦΒ γεννήτρια-Ενδιάμεσος αναστροφέας

**ΚΤΙΡΙΟ Α:**

Ονομαστική τάση γεννήτριας:  $V_{\text{NOM}} = 500V_{\text{DC}}$

Επιτρεπόμενο ποσοστό πτώσης τάσης:  $u = 3\%$

Επιτρεπτή πτώση τάσης:  $\Delta V = V_{\text{NOM}} \times u = 15V$

Μέγιστη ένταση ρεύματος για τον κλάδο μεταξύ κιβωτίων συνδεσμολογίας και ενδιάμεσων αναστροφέων:  $I_{\text{ΚΣΕΑ}} = I_{\text{συστοιχίας}} \times 1,25 = 7,99A \times 1,25 = 9,9875A$

Ελάχιστη διατομή καλωδίου σύνδεσης κάθε μιας από τις τρεις παράλληλες συστοιχίες προς τον ενδιάμεσο αναστροφέα (πρόκειται για συνεχές ρεύμα):

$$S [\text{mm}^2] = \frac{2 \times L \times I}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6 = \frac{2 \times 55 \times 9,9875}{56 \times 10^6 \times 15} \times 10^6 = 1,308\text{mm}^2$$

**ΚΤΙΡΙΟ Γ:**

Ονομαστική τάση γεννήτριας:  $V_{\text{NOM}} = 400V_{\text{DC}}$

Επιτρεπόμενο ποσοστό πτώσης τάσης:  $u = 3\%$

Επιτρεπτή πτώση τάσης:  $\Delta V = V_{\text{NOM}} \times u = 12V$

Μέγιστη ένταση ρεύματος για τον κλάδο μεταξύ κιβωτίων συνδεσμολογίας και ενδιάμεσων αναστροφέων:  $I_{\text{ΚΣΕΑ}} = I_{\text{συστοιχίας}} \times 1,25 = 7,99A \times 1,25 = 9,9875A$

Ελάχιστη διατομή καλωδίου σύνδεσης κάθε μιας από τις τρεις παράλληλες συστοιχίες προς τον ενδιάμεσο αναστροφέα (πρόκειται για συνεχές ρεύμα):

$$S [\text{mm}^2] = \frac{2 \times L \times I}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6 = \frac{2 \times 55 \times 9,9875}{56 \times 10^6 \times 12} \times 10^6 = 1,635\text{mm}^2$$

Επειδή και στα δύο κτίρια οι διατομή των καλωδίων είναι πολύ μικρή θα χρησιμοποιηθούν διπολικά καλώδια που η διατομή τους είναι ίδια με αυτή των καλωδίων που συνήθως παρέχονται εργοστασιακά στα ΦΒ πλαίσια για τη μεταξύ τους σύνδεση δηλαδή  $2 \times 6\text{mm}^2$ .

❖ Συσσωρευτές – Τελικός αναστροφέας

Τα δεδομένα είναι ίδια και για τα δύο κτίρια

**ΚΤΙΡΙΟ Α - Γ:**

Ονομαστική τάση γεννήτριας:  $V_{\text{NOM}} = 48V_{\text{DC}}$

Επιτρεπόμενο ποσοστό πτώσης τάσης:  $u = 1\%$

Επιτρεπτή πτώση τάσης:  $\Delta V = V_{\text{NOM}} \times u = 0,48V$

Η μέγιστη ένταση ρεύματος που μπορεί θεωρητικά να αντλήσει ο κάθε τελικός αναστροφέας από τους συσσωρευτές είναι :

$$I_{\text{ΣΤΑ}} = \frac{P_{\text{NOM\_ΤΕΛ\_ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑ}}}{V_{\text{NOM}}} \times 1,25 = \frac{4.600W}{48V} \times 1,25 = 119,79A$$

Ελάχιστη διατομή καλωδίου σύνδεσης (πρόκειται για μονοφασικό ρεύμα):

$$S [\text{mm}^2] = \frac{2 \times L \times I \times \cos\phi}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6 = \frac{2 \times 5m \times 119,79 A \times 1}{56 \times 10^6 \Omega^{-1} \times m^{-1} \times 0,48V} \times 10^6 = 44,56\text{mm}^2$$

Επιλέγουμε την αμέσως μεγαλύτερη διατομή μονοπολικού καλωδίου του εμπορίου δηλαδή  $50\text{mm}^2$ .

- ❖ Ενδιάμεσος αναστροφέας – Τελικός αναστροφέας (Γραμμή AC)

### **ΚΤΙΡΙΟ Α:**

Ονομαστική τάση γεννήτριας:  $V_{\text{NOM}} = 230V_{\text{AC}}$

Επιτρεπόμενο ποσοστό πτώσης τάσης:  $u = 1\%$

Επιτρεπτή πτώση τάσης:  $\Delta V = V_{\text{NOM}} \times u = 2,3V$

Μέγιστη ένταση ρεύματος που μπορεί θεωρητικά να αποδώσει ο ενδιάμεσος αναστροφέας προς τον τελικό αναστροφέα (για  $\cos\phi=1$ ):

$$I_{\text{ΕΑΤΑ(AC)}} = \frac{P_{\text{NOM-ΕΝΔ.ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑ (AC)}}}{V_{\text{NOM (AC)}}} \times 1,25 = \frac{11.000W \times \cos\phi}{230V} \times 1,25 = 59,79A$$

Ελάχιστη διατομή των δύο μονοπολικών καλωδίων σύνδεσης μεταξύ του ενδιάμεσου και του τελικού αναστροφέα:

$$S [\text{mm}^2] = \frac{2 \times L \times I \times \cos\phi}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6 = \frac{2 \times 50\text{m} \times 59,79 \text{ A} \times 1}{56 \times 10^6 \Omega^{-1} \times \text{m}^{-1} \times 2,3V} \times 10^6 = 46,42\text{mm}^2$$

Επιλέγουμε την αμέσως μεγαλύτερη διατομή μονοπολικού καλωδίου του εμπορίου δηλαδή  $50\text{mm}^2$ .

### **ΚΤΙΡΙΟ Γ:**

Ονομαστική τάση γεννήτριας:  $V_{\text{NOM}} = 230V_{\text{AC}}$

Επιτρεπόμενο ποσοστό πτώσης τάσης:  $u = 1\%$

Επιτρεπτή πτώση τάσης:  $\Delta V = V_{\text{NOM}} \times u = 2,3V$

Μέγιστη ένταση ρεύματος που μπορεί θεωρητικά να αποδώσει ο ενδιάμεσος αναστροφέας προς τον τελικό αναστροφέα (για  $\cos\phi=1$ ):

$$I_{\text{ΕΑΤΑ(AC)}} = \frac{P_{\text{NOM-ΕΝΔ.ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΑ (AC)}}}{V_{\text{NOM (AC)}}} \times 1,25 = \frac{9.000W \times \cos\phi}{230V} \times 1,25 = 48,91A$$

Ελάχιστη διατομή των δύο μονοπολικών καλωδίων σύνδεσης μεταξύ του ενδιάμεσου και του τελικού αναστροφέα:

$$S [\text{mm}^2] = \frac{2 \times L \times I \times \cos\phi}{\sigma \times \Delta V} \times 10^6 = \frac{2 \times 50\text{m} \times 48,91 \text{ A} \times 1}{56 \times 10^6 \Omega^{-1} \times \text{m}^{-1} \times 2,3V} \times 10^6 = 37,97\text{mm}^2$$

Επιλέγουμε την αμέσως μεγαλύτερη διατομή μονοπολικού καλωδίου του εμπορίου δηλαδή  $50\text{mm}^2$ .

Στον πίνακα 4.9.2 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των καλωδίων που θα επιλεγούν για τις συνδεσμολογίες των διαφόρων υποσυστημάτων.

Κύκλωμα	Διατομή καλωδίου	Μέγιστη ένταση ρεύματος καλωδίου		Τύπος καλωδίου
		ΚΤΙΡΙΟ Α	ΚΤΙΡΙΟ Γ	
ΦΒ γεννήτρια-Ενδιάμεσος αναστροφέας (Κλάδος DC)	6mm <sup>2</sup>	9,9875A	9,9875A	Διπολικό
Συσσωρευτές-Τελικός αναστροφέας (Κλάδος DC)	50mm <sup>2</sup>	119,79A	119,79A	Μονοπολικά
Ενδιάμεσος-Τελικός αναστροφέας (Κλάδος AC)	50mm <sup>2</sup>	59,79A	48,91A	Μονοπολικά

**Πίνακας 4.9.2: Προτεινόμενοι τύποι καλωδίων για τις ηλεκτρικές συνδεσμολογίες της ΦΒ εγκατάστασης**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή αρχικά έγινε μια αναφορά στην εξέλιξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων, στην κατάσταση που επικρατεί στην ελληνική και στην παγκόσμια αγορά καθώς και μια κριτική στις επιπτώσεις της χρήσης τους. Στην συνέχεια έγινε προσπάθεια να παρουσιασθούν βασικά στοιχεία της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας όπως η λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου και του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Αναλύθηκαν επίσης οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και μεγιστοποιούν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Στο επόμενο κομμάτι της εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη διαστασιοδότησης τριών φωτοβολταϊκών συστημάτων που πρόκειται να εγκατασταθούν σε στέγες τριών κτιρίων εργοστασίου. Το εργοστάσιο βρίσκεται στους Αγίους Αναργύρους Αττικής και οι απαιτούμενες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγάλες.

Οι κύριες πηγές των σφαλμάτων και των περιορισμών στην σχεδίαση του φωτοβολταϊκού συστήματος οφείλονται στις πηγές συλλογής των δεδομένων που είναι απαραίτητα για την ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα τα κλιματολογικά δεδομένα όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ένταση των ανέμων, η ηλιακή ακτινοβολία και η νέφωση πηγάζουν από βιβλιογραφία που αναφέρεται σε αποτελέσματα μετρήσεων σε μετεωρολογικούς σταθμούς που έλαβαν χώρα σε παρελθόντα έτη και ως εκ τούτου μπορεί να μην είναι ακριβή σήμερα.

Επίσης η μέθοδος υπολογισμού των καθημερινών ενεργειακών αναγκών εγείρει συζητήσεις μέχρι σήμερα καθότι οι απόψεις περί του ορθού τρόπου ποικίλουν. Στην πράξη οι απαιτήσεις σε ηλεκτρισμό δεν είναι κάθε μέρα οι ίδιες ενώ οι προδιαγραφές των συσκευών και η καθημερινή τους χρήση έγινε κατά προσέγγιση. Γενικότερα η διαστασιοδότηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ένα απαιτητικό έργο για το οποίο ο μηχανικός καλείται να λάβει υπόψη πλήθος παραγόντων καθώς πρέπει να γίνουν οι σωστές προβλέψεις ώστε το σύστημα να είναι αποτελεσματικό να μπορέσουν να αντιμετωπιστούν πιθανές δυσχέρειες. Το φωτοβολταϊκό σύστημα που θα εγκατασταθεί πρέπει να μην ξεφεύγει των ορίων ως προς την υποτίμηση αλλά και ως προς την υπερτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια του προσδιορισμού των απωλειών κατά την σχεδίαση του συστήματος, τόσο θα αυξάνει η απόδοση του στην πράξη.

Στην εν λόγω μελέτη όσον αφορά το κτίριο Β, κατεδείχθη ότι ο προσανατολισμός του το καθιστά ακατάλληλο για την εγκατάσταση πλαισίων στην στέγη του καθώς στην αντίθετη περίπτωση ο βαθμός απόδοσης θα ήταν πολύ χαμηλός.

Τα κτίρια Α και Γ έχουν Νότιο προσανατολισμό με αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς. Το μειονέκτημα τους όμως είναι η μικρή συνολική έκταση της στέγης, αφού ο αριθμός τα απαιτούμενων πλαισίων είναι μεγάλος. Για το λόγο αυτό θα πρέπει είτε να μειωθεί το μέγεθος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, είτε να εξευρεθούν χώροι κατάλληλοι δίπλα από τα κτίρια ώστε να γίνει η εγκατάσταση.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κ.Θ. Δέρβος, «Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη Θεωρία στην Πράξη», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, (2013)
- [2] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, «Φωτοβολταϊκά συστήματα», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, (2007)
- [3] [http://www.cres.gr/kape/education/ODHGOS\\_TERESs.pdf](http://www.cres.gr/kape/education/ODHGOS_TERESs.pdf)
- [4] <http://www.selasenergy.gr/history.php>
- [5] <http://helapco.gr>
- [6] <http://www.ren21.net/ren21activities/globalstatusreport.aspx>
- [7] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος /Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας «Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων», (2011)
- [8] [http://www.gsrt.gr/Financing/ProPeFiles42/TOMEIS\\_PROTERAIOTHTAS\\_ESPEK\\_ENERGY](http://www.gsrt.gr/Financing/ProPeFiles42/TOMEIS_PROTERAIOTHTAS_ESPEK_ENERGY)
- [9] [http://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό\\_σύστημα](http://el.wikipedia.org/wiki/Φωτοβολταϊκό_σύστημα)
- [10] Ι. Φραγκιαδάκης, «Φωτοβολταϊκό πάρκο», Εργαστήριο Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας και Εφαρμογών, (2008)
- [11] Σταμάτης Δ. Περδίας, «Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις», Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ-4Μ ΕΠΕ, Αθήνα, (2011)
- [12] [http://helapco.gr/pdf/TOTEE\\_20701\\_3\\_Final\\_TEE\\_2nd.pdf](http://helapco.gr/pdf/TOTEE_20701_3_Final_TEE_2nd.pdf)
- [13] <http://www.chem-lab.gr>
- [14] Αμαλία-Μαρία Κουτσογιάννη, «Ενεργειακή εξοικονόμηση σε δημόσια κτίρια. Μελέτη περίπτωσης δημοσίου κτιρίου μεικτής χρήσης με συνοπτική ενεργειακή επιθεώρηση», Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Αθήνα, (2010)
- [15] Στέφανος Δημήτριος Κ. Κακαβούλης, «Μελέτη Διαμόρφωσης Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού Ισχύος 2MW», Διπλωματική εργασία, Αθήνα, (2009)
- [16] Θωμάς Κ. Κολόκας, «Εγκαταστάσεις Αυτόνομων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων για Απομονωμένα Κτίρια Ειδικών Εφαρμογών», Διπλωματική εργασία, Αθήνα, (2011)
- [17] Γεώργιος Προδρομίδης, «Απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων και φωτοβολταϊκών συστημάτων υπό συνθήκες και χαμηλής έντασης ακτινοβολίας», Διατριβή Μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης, Πάτρα, (2009)
- [18] <http://www.greenenergyparts.com>

[19] <http://www.4green.gr>