



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

Εγκαταστάσεις Αυτόνομων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων για Απομονωμένα Κτίρια Ειδικών Εφαρμογών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θωμάς Κ. Κολόκας

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011



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

Εγκαταστάσεις Αυτόνομων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων για Απομονωμένα Κτίρια Ειδικών Εφαρμογών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θωμάς Κ. Κολόκας

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23 Σεπτεμβρίου 2011.

.....
Κωνσταντίνος Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Βασιλείου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011

.....
Θωμάς Κ. Κολόκας

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

Copyright © Θωμάς Κ. Κολόκας, 2011.
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 μελέτη αυτόνομών φωτοβολταϊκών συστημάτων για χρήσεις σε απομονωμένα κτίρια. Στα πλαίσια του σχεδιασμού γίνεται μια προσπάθεια διαστασιοδότησης των απαιτούμενων συστημάτων και ηλεκτρονικών διατάξεων για τη λειτουργία μιας αυτόνομης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία και τις μεταβολές της και περιγράφεται η ηλιακή γεωμετρία σε σχέση με τη γη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Επίσης γίνεται προσομοίωση κάποιων περιπτώσεων με το πρόγραμμα PVSYST και περιγράφεται με πειραματική διάταξη η επίδραση της μερικής ποσοστιαίας σκίασης.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στα είδη φωτοβολταϊκών συστημάτων, στους κύριους παράγοντες για τη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, τις απώλειες στα διάφορα υποσυστήματα μιας εγκατάστασης και περιγράφεται η θεωρητική διαδικασία διαστασιοδότησης των υποσυστημάτων μιας αυτόνομης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μελέτη για ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα μικρής ισχύος που μπορεί να καλύψει μικρές ημερήσιες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται σχεδίαση μιας αυτόνομης εγκατάστασης με μεγάλες ημερήσιες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφονται τα συμπεράσματα που αποκομίστηκαν από αυτή την εργασία.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, διαστασιοδότηση φωτοβολταϊκών συστημάτων, ηλιακή ακτινοβολία, ηλιακή γεωμετρία, φωτοβολταϊκό στοιχείο, χαρακτηριστική καμπύλη, μερική σκίαση, παρακαμπτήρια δίοδος, απώλειες.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to is the design and study of stand-alone photovoltaic systems for use in remote buildings. A part of the design is an attempt of sizing the required systems and electronic devices for the operation of an stand-alone PV system.

The first chapter refers to solar radiation and how radiation is affected and describes the solar geometry in relation to the earth.

The second chapter analyzes the electrical characteristics of a photovoltaic element with the characteristic curves at various operating conditions. There is also a simulation of some cases with the PVSYST program and an experimental part describing the effect of the percentage partial shading.

The third chapter refers to the types of photovoltaic systems, the main factors for designing a photovoltaic system, losses in the various subsystems of an installation and describes the theoretical process of sizing subsystems of a stand-alone PV system.

The fourth chapter presents a study on a low power stand-alone photovoltaic system which can cover small daily electricity needs.

The fifth chapter is designing a stand-alone system with large daily requirements for electricity.

The sixth chapter describes the conclusions drawn from this work.

KEY WORDS

Standalone photovoltaic system, sizing photovoltaic systems, solar radiation, solar geometry, solar cell, characteristic curve, partial shade, bypass diode, losses.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δέρβο Κωνσταντίνο για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο των φωτοβολταϊκών, αλλά κυρίως για την καθοδήγησή και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ένα εγκάρδιο ευχαριστώ οφείλω στο φίλο και συνάδελφο Δημάκη Γεώργιο για την υποστήριξη στο ξεκίνημα αυτής της προσπάθειας καθώς επίσης και στους Θ. Αργυρόπουλο, Μ. Αθανασοπούλου και Ι. Μέργο για την βοήθειά τους στη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω ολόψυχα την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια. Σε αυτήν οφείλεται ότι έχω πετύχει μέχρι σήμερα και σε αυτήν αφιερώνεται η παρούσα διπλωματική εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT.....	6
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	20
1. Ηλιακή ακτινοβολία.....	20
1.1 Εισαγωγή	20
1.2 Σύσταση του ηλιακού φάσματος.....	21
1.3 Η ηλιακή σταθερά G_{sc}	22
1.4 Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της γήινης ατμόσφαιρας λόγω κίνησης της γης	24
1.5 Ηλιακή γεωμετρία.....	25
1.5.1 Η ουράνια σφαίρα και η ηλιακή απόκλιση δ Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω θέσης του ήλιου	26
1.5.2 Γεωγραφικό μήκος και πλάτος.....	30
1.5.3 Ηλιακή ώρα.....	31
1.5.4 Η γωνία ώρας ω	33
1.5.5 Ύψος ηλίου και ηλιακό αζιμούθιο	35
1.6 Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας	41
1.7 Επίδραση της ατμόσφαιρας.....	43
1.8 Υπολογισμός άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας.....	45
1.9 Ακτινοβολία σε ένα κεκλιμένο επίπεδο.....	46
1.10 Γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	50
2. Λειτουργία και απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	50

2.1	Το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε συνθήκες φόρτισης.....	50
2.2	Φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά.....	52
2.2.1	Όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά	52
2.2.2	Διαφορετικά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά	55
2.3	Φωτοβολταϊκά στοιχεία σε παράλληλη σύνδεση.....	58
2.3.1	Όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία σε παράλληλη σύνδεση.....	58
2.3.2	Διαφορετικά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε παράλληλη σύνδεση.....	61
2.4	Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία και απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	64
2.4.1	Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας	64
2.4.2	Θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων	66
2.4.3	Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου	68
2.4.4	Ρύπανση	68
2.4.5	Γήρανση.....	69
2.4.6	Σκίαση.....	69
2.5	Μερική σκίαση φ/β στοιχείων	72
2.5.1	Επίδραση της σκίασης σε σχέση με τη συνδεσμολογία των Φ/Β πλαισίων και το σύστημα ανίχνευσης μέγιστης ισχύος του μετατροπέα	74
2.5.2	Σύνδεση πλαισίων εν σειρά.....	76
2.5.3	Παράλληλη σύνδεση πλαισίων.....	77
2.5.4	Σύγκριση των παραπάνω τοπολογιών	78
2.5.5	Επίδραση διόδου bypass	79
2.6	Πειραματική διάταξη και μετρήσεις για διαφορετικά ποσοστά μερικής σκίασης	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3		85
3. Σχεδίαση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....		85
3.1	Κατηγορίες και Σύνθεση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	85
3.1.1	Εκτός δικτύου ή Απομονωμένα Φ/Β συστήματα (Off-Grid ή Stand-alone Systems).	86

3.1.2	Φ/Β συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο (Grid-Connected Systems)	87
3.2	Απομονωμένα Φ/Β Συστήματα	87
3.3	Σχεδίαση Αυτόνομων Φ/Β Συστημάτων με αποθήκευση ενέργειας.....	89
3.4	Διαστασιοδότηση αυτόνομου φ/β συστήματος με αποθήκευση ενέργειας	91
3.5	Εκτίμηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης που ζητείται να ικανοποιεί το αυτόνομο σύστημα .	93
3.6	Κρίσιμης χρονικής περιόδου λειτουργίας και βέλτιστη κλίση συλλεκτών.....	95
3.7	Αξιολόγηση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας στην υπόψη τοποθεσία	96
3.8	Διαστασιοδότηση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας	98
3.8.1	Η Ισχύς αιχμής	98
3.8.2	Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης σ_{θ}	99
3.8.3	Συντελεστής ρύπανσης ατμόσφαιρας σ_{ρ}	100
3.8.4	Συντελεστής Γήρανσης σ_{γ}	101
3.8.5	Συντελεστής απωλειών διόδου σ_{δ}	101
3.8.6	Συντελεστής ανομοιογένειας σ_{α}	101
3.8.7	Συντελεστής καλωδιώσεων σ_{κ}	101
3.8.8	Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας σ_{μ}	101
3.9	Ο αριθμός των φ/β πλαισίων	104
3.9.1	Σύνδεση πλαισίων.....	105
3.9.2	Υπολογισμός του πλήθους των φ/β πλαισίων σε σειρά.....	107
3.9.3	Υπολογισμός του πλήθους των παράλληλων φ/β πλαισίων	108
3.10	Υπολογισμός του συστήματος συσσωρευτών	109
3.11	Επιλογή και διαστασιοδότηση των υπολοίπων τμημάτων του συστήματος	113
3.12	Υπολογισμός των καλωδιώσεων	115
3.13	Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία.....	118
3.14	Χωροθέτηση Φ/Β πλαισίων	120
3.15	Υπολογισμός εμβαδού οριζόντιας έκτασης τοποθέτησης των πλαισίων	122
3.16	Αποφυγή σκίασης από εμπόδια	123

3.17	Κατασκευαστικές λεπτομέρειες	125
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....		128
4. Μελέτη μικρού αυτόνομου Φ/Β συστήματος με συσσωρευτές.....		128
4.1	Δεδομένα και χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος	128
4.2	Ενεργειακές ανάγκες	129
4.3	Περίοδος χρήσης και βέλτιστη κλίση	129
4.4	Ηλιακό Δυναμικό.....	129
4.5	Διαστασιοδότηση Φ/Β γεννήτριας	130
4.6	Υπολογισμός συστήματος συσσωρευτών.....	137
4.7	Υπολογισμός Ηλεκτρονικών Διατάξεων	141
4.7.1	Σειριακός ρυθμιστής φόρτισης	141
4.7.2	Σύνδεση φ/β γεννήτριας και ρυθμιστών:	142
4.7.3	Αναστροφέας Τάσης DC-AC (inverter)	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....		149
5. Μελέτη μεγάλου αυτόνομου Φ/Β συστήματος με συσσωρευτές.....		149
5.1	Δεδομένα και χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος	149
5.2	Ενεργειακές ανάγκες	149
5.3	Περίοδος χρήσης και βέλτιστη κλίση	150
5.4	Ηλιακό Δυναμικό.....	151
5.5	Διαστασιοδότηση Φ/Β γεννήτριας	152
5.6	Υπολογισμός συστήματος συσσωρευτών.....	165
5.7	Υπολογισμός Ηλεκτρονικών Διατάξεων	171
5.8	Χωροταξική Μελέτη.....	179
5.9	Υπολογισμός καλωδιώσεων.....	180
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....		181
6. Συμπεράσματα		181

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	183
--------------------------	------------

Ευρετήριο Πινάκων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	20
------------------------	-----------

Πίνακας 1.5.5.1: Μέγιστο ύψος ήλιου στην Αθήνα σε διάφορες ημερομηνίες.....	36
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	50
------------------------	-----------

Πίνακας 2.6.1: Αποτελέσματα μετρήσεων με το πολυόργανο της Htsolar.....	82
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	85
------------------------	-----------

Πίνακας 3.5.1 Ενδεικτικές τιμές ισχύος και μέσου χρόνου λειτουργίας οικιακών συσκευών ανά ημέρα.....	93
--	----

Πίνακας 3.5.2: Φύλλο δεδομένων κατανάλωσης για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ζήτησης που πρέπει να ικανοποιήσει ένα φ/β σύστημα	94
---	----

Πίνακας 3.6.1 Περίοδος σχεδιασμού και βέλτιστη κλίση για την συγκεκριμένη περίοδο	95
---	----

Πίνακας 3.8.1.1 Απώλειες στα διάφορα υποσυστήματα	99
---	----

Πίνακας 3.8.8.1 Αριθμοί ημερών αυτονομίας που συνιστανται για φ/β συστήματα	103
---	-----

Πίνακας 3.10.1 Αντιστοιχία ισχύος αιχμής με επιλεγόμενη τάση συσσωρευτή	110
---	-----

Πίνακας 3.10.2 Αντιστοιχία ημερών αυτονομίας με βάθος εκφόρτισης	111
--	-----

Πίνακας 3.10.3: Τιμές συντελεστή απωλειών μεταφοράς ενέργειας.....	112
--	-----

Πίνακας 3.12.1 : Κύριες συνδέσεις με καλώδια σε ένα Φ/Β σύστημα	115
---	-----

Πίνακας 3.12.2 : Συνήθεις τύποι καλωδίων σε αυτόνομες Φ/Β εγκαταστάσεις	116
---	-----

Πίνακας 3.12.3 : Μέγιστες επιτρεπτές πτώσεις τάσης.....	116
---	-----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	128
------------------------	------------

Πίνακας 4.1.1: Δεδομένα προκαταρκτικής μελέτης.....	128
---	-----

Πίνακας 4.3.1 : Περίοδος σχεδιασμού και βέλτιστη κλίση	129
--	-----

Πίνακας 4.4.1 : Τιμές ηλιακής ακτινοβολίας στη Ρόδο	130
---	-----

Πίνακας 4.5.1 : Τιμές μέσων τιμών θερμοκρασίας της Ρόδου	130
--	-----

Πίνακας 4.5.3 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου:.....	133
---	-----

Πίνακας 4.5.4 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά ρυθμιστής φόρτισης	134
Πίνακας 4.6.2 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά συσσωρευτή	139
Πίνακας 4.7.1.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ρυθμιστής φόρτισης	141
Πίνακας 4.7.3.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά αναστροφέα τάσης (Inverter)	143
Πίνακας 4.8.2: Διαστάσεις επιλεγμένου φ/β πλαισίου	145
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	149
Πίνακας 5.1.1: Δεδομένα προκαταρκτικής μελέτης.....	149
Πίνακας 5.2.1: Εκτιμώμενες ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες	150
Πίνακας 5.5.1: Συγκεντρωτικά δεδομένα για υπολογισμό φ/β γεννήτριας	153
Πίνακας 5.5.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου	155
Πίνακας 5.5.3: Τεχνικά Χαρακτηριστικά φ/β ρυθμιστή φόρτισης.....	157
Πίνακας 5.5.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά αναστροφέα τάσης SMC11000TL.....	161
Πίνακας 5.6.1: Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό συσσωρευτών	167
Πίνακας 5.6.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά συσσωρευτής PVX-2580L.....	169
Πίνακας 5.10.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Sunny Island 5048	174
Πίνακας 5.11.1: Δεδομένα χωροταξικής μελέτης	180
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	181
 Ευρετήριο Σχημάτων	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	20
Σχήμα 1.1.1: Τα δομικά μέρη του ήλιου.....	20
Σχήμα 1.2.1: Σύγκριση διαφόρων φασματικών κατανομών της ηλιακής ακτινοβολίας.	21
Σχήμα 1.3.1: Σχέση Γης – Ήλιου.	22
Σχήμα 1.4.1: Ετήσια διακύμανση της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακής ακτινοβολίας.....	25
Σχήμα 1.5.1.1: Η ουράνια σφαίρα με την φαινόμενη ετήσια κίνηση του ήλιου.....	26
Σχήμα 1.5.1.2: Η μεταβολή της ηλιακής απόκλισης δ κατά τη διάρκεια ενός έτους.	27
Σχήμα 1.5.1.3: Τιμές της ηλιακής απόκλισης δ για διάφορες ημερομηνίες.	28

Σχήμα 1.5.1.4: Η τροχιά του ήλιου μια καλοκαιρινή ημέρα.....	29
Σχήμα 1.5.1.5: Η τροχιά του ήλιου μια χειμερινή ημέρα.	29
Σχήμα 1.5.2.1: Γεωγραφικό μήκος και πλάτος.....	30
Σχήμα 1.5.3.1: Η εξίσωση χρόνου E.....	33
Σχήμα 1.5.4.1: Η ωριαία γωνία ω	34
Σχήμα 1.5.5.1 Ηλιακό ύψος β και ηλιακό αζιμούθιο Z και το ζενιθ.....	35
Σχήμα 1.5.5.2: Ηλιακή ώρα ανατολής και δύσης Αθήνας ($\phi=38^\circ$).	39
Σχήμα 1.5.5.3: Ηλιακός Χάρτης περιοχής με $\phi=38^\circ$ (Αθήνα).....	40
Σχήμα 1.6.1: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας.....	41
Σχήμα 1.7.2: Η εξάρτηση της μάζας αέρα (AM) από τη θέση του ήλιου .(α) Απλοποιημένη απεικόνιση, με την ατμόσφαιρα να έχει επίπεδη ανάπτυξη σε άπειρη έκταση (β) Η πραγματική διαμόρφωση της γήινης ατμόσφαιρας, με τα στρώματά της να ορίζονται από σφαιρικές επιφάνειες, και η αντίστοιχη ατμοσφαιρική διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της μέσα στα στρώματα αυτά.	43
Σχήμα 1.9.1: Γωνίες ενός κεκλιμένου επιπέδου.	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	50
Σχήμα 2.1.1: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος (I-V) ενός Φ/Β στοιχείου με καμπύλες σταθερής ισχύος και γραμμές φόρτισης.....	50
Σχήμα 2.2.1.1: Δύο φωτοβολταϊκά συνδεδεμένα σε σειρά.	53
Σχήμα 2.2.1.2: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος δύο όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά.	54
Σχήμα 2.2.1.3: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος N όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά.	55
Σχήμα 2.2.2.1: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος δύο διαφορετικών φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά.	56
Σχήμα 2.2.2.2: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος N φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά. Τα N-1 είναι όμοια και έχουν τη χαρακτηριστική 1. Το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο έχει τη χαρακτηριστική 2.	57
Σχήμα 2.3.1.1: Δύο φωτοβολταϊκά στοιχεία σε παράλληλη σύνδεση.....	58
Σχήμα 2.3.1.2: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος δύο όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση.	59

Σχήμα 2.3.1.3: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος N όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση.	60
Σχήμα 2.3.2.1: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος δύο διαφορετικών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση.	61
Σχήμα 2.3.2.2: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος N φωτοβολταϊκών στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση. Από τα στοιχεία αυτά τα N-1 είναι όμοια και έχουν τη χαρακτηριστική 1. Το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο έχει τη χαρακτηριστική 2.....	63
Σχημα 2.4.1.1: Χαρακτηριστικές I-V για διάφορες τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας	65
Σχημα 2.4.1.2: Χαρακτηριστικές P-V για διάφορες τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας	65
Σχημα 2.4.2.1: Χαρακτηριστικές I-V για διάφορες τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας	66
Σχημα 2.4.2.2: Χαρακτηριστικές P-V για διάφορες τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας	67
Σχήμα 2.4.6.1: Μερική σκίαση φωτοβολτϊκών σε στέγη	69
Σχήμα 2.4.6.2: Φαινόμενο θερμής κηλίδας.....	70
Σχήμα 2.4.6.3: P-V χαρακτηριστικές φ/β γεννήτριας χωρίς και με μερική σκίαση πλαισίων.....	71
Σχήμα 2.5.1: Σχηματισμός θερμής κηλίδας	72
Σχήμα 2.5.2: (α) Ροή ρεύματος σε Φ/Β πλαίσιο 36 στοιχείων όταν (α) δεν υπάρχει σκίαση σε κάποιο στοιχείο και (β) ένα στοιχείο είναι σκιασμένο.	72
Σχήμα 2.5.3: Χρήση διόδου παράκαμψης για αποφυγή δημιουργίας θερμής κηλίδας.....	73
Σχήμα 2.5.4: Μεταβολή της καμπύλης I-V του πλαισίου σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας.....	74
Σχήμα 2.5.2.1: Σύνδεση πλαισίων εν σειρά και επίδραση της σκίασης στην καμπύλη I-V	76
Σχήμα 2.5.3.1: Περιπτώσεις σκίασης και χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για παράλληλη σύνδεση πλαισίων	78
Σχήμα 2.5.4.1: Απώλειες ισχύος λόγω σκίασης στην εν σειρά και στην παράλληλη συνδεσμολογία.....	79
Σχήμα 2.5.5.1: Σκίαση ενός στοιχείου με διαφορετικά ποσοστά	80
Σχήμα 2.5.5.2: Επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία 18 στοιχείων.....	80
Σχήμα 2.5.5.3: Επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε ένα σύστημα με 3 ακολουθίες των 18 στοιχείων (α) σκιασμένα στοιχεία στην ίδια ακολουθία (β) σκιασμένα στοιχεία σε διαφορετικές ακολουθίες	81
Σχήμα 2.6.1: Χαρακτηριστικές I-V με ποσοστιαία σκίαση σε φ/β στοιχείο και όλες τις παρακαμπτήριες διόδους.....	83

Σχήμα 2.6.2: Χαρακτηριστικές P-V με ποσοστιαία σκίαση σε φ/β στοιχείο και όλες τις παρακαμπτήριες διόδους.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	85
Σχήμα 3.1.1: Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών συστημάτων και τρόποι λειτουργίας τους.....	85
Σχήμα 3.2.1 Απλοποιημένο διάγραμμα αυτόνομου φ/β συστήματος με συσσωρευτές. Εάν χρησιμοποιηθεί μια βοηθητική πηγή ενέργειας, όπως φαίνεται στο σχήμα με την διακεκομμένη γραμμή, τότε το σύστημα καλείται υβριδικό φ/β σύστημα.....	89
Σχήμα 3.4.1 Απλοποιημένο διάγραμμα βημάτων σχεδίασης αυτόνομου φ/β συστήματος με συσσωρευτές.	92
Σχήμα 3.7.1: Συνολική ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στον ελλαδικό χώρο	97
Σχήμα 3.9.1.1: Σε σειρά σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων - Αύξηση της συνολικής τάσης.....	105
Σχήμα 3.9.1.2: Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων-Αύξηση του συνολικού ρεύματος	106
Σχήμα 3.9.1.3: Μικτή σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων-Αύξηση συνολικής τάσης και συνολικού ρεύματος.....	106
Σχήμα 3.12.1 : Νομογράφημα για τον υπολογισμό της διατομής ενός ηλεκτρικού αγωγού.....	118
Σχήμα 3.13.1: Γείωση ΦΒ εγκατάστασης.....	119
Σχήμα 3.13.2: Τυπική μορφή των συστημάτων γειώσεως και προστασίας από υπερτάσεις της εγκατάστασης	120
Σχήμα 3.14.1: Διάταξη Φ/Β πλαισίων σε παράλληλες σειρές	121
Σχήμα 3.14.2 Γραφική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ του λόγου α/υ και του γεωγραφικού πλάτους ϕ	122
Σχήμα 3.16.1: Ελάχιστη απόσταση για αποφυγή σκίασης από εμπόδιο	124
Σχήμα 3.16.2: Σχεδίαση γραμμής σκιασμού πάνω σε ηλιακό χάρτη	125
Σχήμα 3.17.1: Χρήση διόδων παράκαμψης και αντεπιστροφής σε Φ/Β συστοιχία συνδεδεμένη με συσσωρευτές	126
Σχήμα 3.17.2: Κεντρικό κιβώτιο σύνδεσης Φ/Β συστοιχίας με 4 κλάδους και χρήση διόδων αντεπιστροφής.....	126
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	128
Σχήμα 4.8.1: Διάγραμμα Monegon	146
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	149

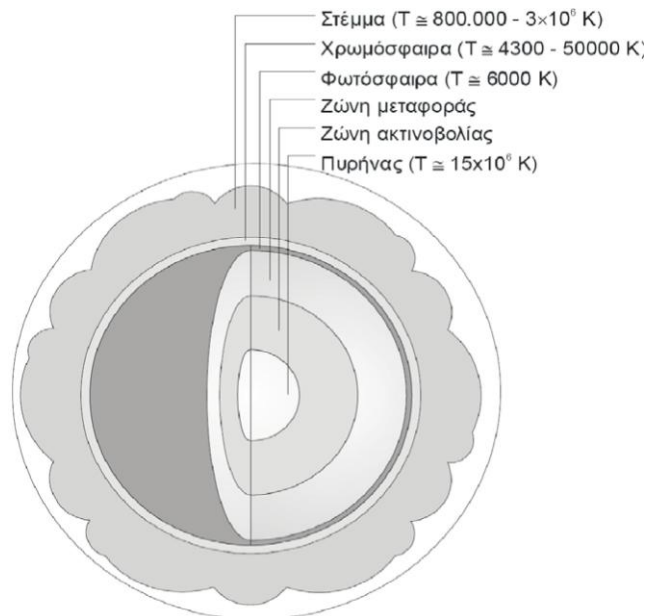
Σχήμα 5.10.1: Συνδέσεις φ/β πλαισίων και ενδιάμεσων inverter	173
Σχήμα 5.10.3: Τριφασική σύνδεση των αναστροφένων SMC 11000TL	177
Σχήμα 5.10.4: Σύνδεση των αναστροφένων SMC 11000TL με τον αγωγό σύνδεσης Smart Power Balance.....	178
Σχήμα 5.10.5: Τριφασική σύνδεση των αναστροφένων Sunny Island 5048	178
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	181

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Ηλιακή ακτινοβολία

1.1 Εισαγωγή

Ο ήλιος είναι ένας αστέρας που αποτελείται από εξαιρετικά θερμή αέρια ύλη, έχει διάμετρο περίπου $1,39 \cdot 10^9$ m και η μέση απόσταση του από τη Γη είναι $1,5 \cdot 10^{11}$ m. Αποτελείται από 74% υδρογόνο (H), 25% ήλιο (He) και το υπόλοιπο 1% είναι μείγμα άλλων χημικών στοιχείων. Η υψηλή θερμοκρασία και η ακτινοβολούμενη ενέργεια από την επιφάνειά του προέρχονται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που είναι εξώθερμες και γίνονται στο εσωτερικό του. Στις αντιδράσεις αυτές γίνεται μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο και η μάζα που χάνεται μετατρέπεται σε ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν κυρίως με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η δομή του ήλιου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



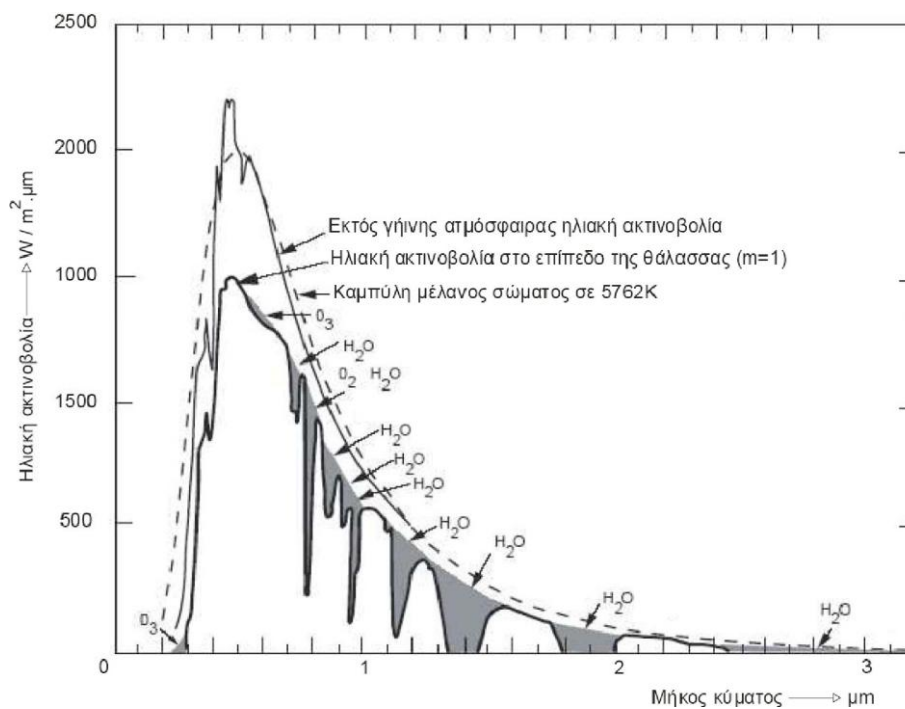
Σχήμα 1.1.1: Τα δομικά μέρη του ήλιου.

Ξεκινώντας από το εσωτερικό του ήλιου βρίσκεται ο πυρήνας με ακτίνα $0,23R$, όπου R είναι η ακτίνα του ήλιου. Ο πυρήνας περιέχει το 40% της μάζας του ήλιου και εκεί παράγεται το 90% της ενέργειας. Η θερμοκρασία του εκτιμάται ότι είναι της

τάξεως των $8 \cdot 10^6$ έως $40 \cdot 10^6$ βαθμών Kelvin και η πυκνότητά του είναι 80 έως 100 φορές μεγαλύτερη από του νερού. Από 0,23R έως 0,7R η θερμοκρασία μειώνεται όπως επίσης και η πυκνότητα. Από το 0,7R έως το R είμαστε στη μεταφορική ζώνη όπου η θερμοκρασία πέφτει και φτάνει τους 5762 K στην επιφάνεια του ήλιου. Η ανώτερη επιφάνεια της μεταφορικής ζώνης, η φωτόσφαιρα αποτελεί την πηγή ολόκληρης της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακολουθούν η επιφάνεια αναστροφής, η χρωμόσφαιρα που εκτείνεται σε ύψος 10.000Km και τέλος το ηλιακό στέμμα με χαμηλή πυκνότητα και υψηλή θερμοκρασία περίπου στους 10^6 βαθμούς Kelvin.

1.2 Σύσταση του ηλιακού φάσματος

Η φασματική κατανομή της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακής ακτινοβολίας, μοιάζει αρκετά με εκείνη του μέλανος σώματος στην θερμοκρασία των 5762K, όση είναι κατά μέσο όρο, η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ήλιου.



Σχήμα 1.2.1: Σύγκριση διαφόρων φασματικών κατανομών της ηλιακής ακτινοβολίας.

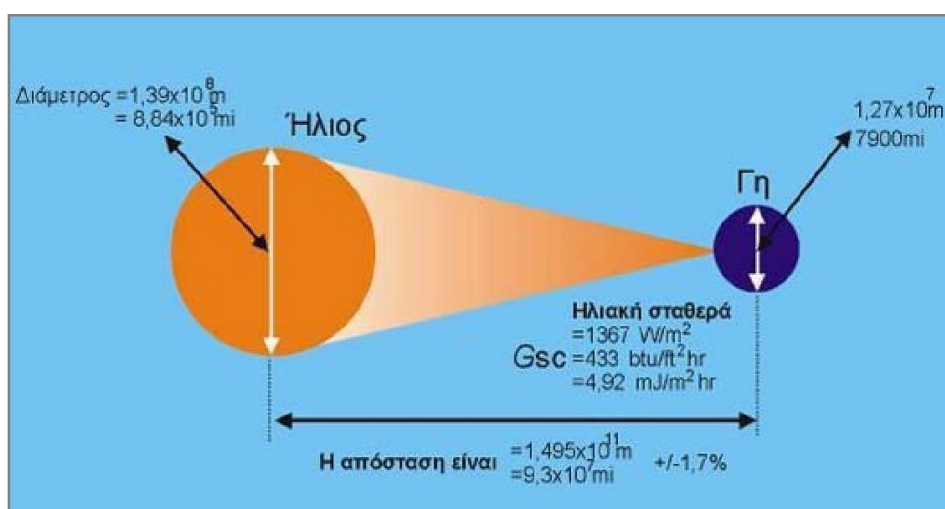
Το φάσμα συχνοτήτων της ηλιακής ακτινοβολίας περιλαμβάνει συχνότητες με μήκος κύματος από 0,3 έως 1,7μm , με μέγιστο ενεργειακό περιεχόμενο στην περιοχή των 0,5μm. Εκτός από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ο ήλιος εκπέμπει και μια ασθενή σωματιδιακή ακτινοβολία, που αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα

σωματίδια, κυρίως ηλεκτρόνια και πρωτόνια, και ονομάζεται ηλιακός άνεμος. Η ανάγκη για τη λεπτομερειακή εξέταση της φασματικής σύστασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές γίνεται φανερή στο παρακάτω σχήμα, που δείχνει τη μεγάλη διαφοροποίηση του πραγματικού φάσματος του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της θάλασσας, σε σχέση με αυτό εκτός της γήινης ατμόσφαιρας. Παρατηρείται ότι το ηλιακό φως αποκτά τελικά μία πολύ ανώμαλη φασματική κατανομή, που οφείλεται σε εκλεκτικές απορροφήσεις και σκεδάσεις στα συστατικά της ατμόσφαιρας που διασχίζει ενώ όπως φαίνεται η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο επίπεδο της θάλασσας είναι αρκετά μειωμένη.

Η μονάδα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι W/m^2 . Δηλαδή είναι ισχύς ανά μονάδα επιφανείας και η τιμή της είναι το μέτρο της έντασής της. Οι συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται παρακάτω για την ηλιακή ακτινοβολία είναι G για μία στιγμιαία τιμή, I για ωριαία τιμή και H για τιμές ημερήσιες, εβδομαδιαίες, μηνιαίες, ετήσιες κ.λ.π.

1.3 Η ηλιακή σταθερά G_{sc}

Σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάποιο σημείο της γης είναι η θέση του ήλιου ως προς το σημείο αυτό. Η τροχιά της γης γύρω από την ήλιο είναι ελαφρώς ελλειπτική. Γι' αυτό υπάρχει μεταβολή στην απόσταση των κέντρων μεταξύ γης – ήλιου η οποία είναι της τάξης του 1,7%. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται σχηματικά η γεωμετρία μεταξύ γης και ήλιου.



Σχήμα 1.3.1: Σχέση Γης – Ήλιου.

Σε μια απόσταση μιας αστρονομικής μονάδας ($1 \text{ AU} = 1,495 \cdot 10^{11} \text{ m}$), που είναι η μέση απόσταση ήλιου-γης, ο ήλιος υποτείνεται σε γωνία 32° από τη γή. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει ανά μονάδα επιφανείας και εκτός γήινης ατμόσφαιρας σε ένα επίπεδο που είναι κάθετο στις ηλιακές ακτίνες και βρίσκεται στη μέση απόσταση ήλιου – γης λέγεται ηλιακή σταθερά G_{sc} . Από πειραματικές μετρήσεις έχουν προταθεί διάφορες τιμές της ηλιακής σταθεράς με μια από αυτές να είναι η τιμή των 1353 W/m^2 με ποσοστό σφάλματος $\pm 1,5\%$. Η τιμή που έχει υιοθετηθεί από το Παγκόσμιο Κέντρο Ακτινοβολίας (World Radiation Center) είναι η τιμή των 1367 W/m^2 με αβεβαιότητα 1% . Άρα από εδώ και πέρα θεωρείται ότι:

$$G_{sc} (\text{W} / \text{m}^2) = 1367 \text{ W} / \text{m}^2$$

1.4 Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της γήινης ατμόσφαιρας λόγω κίνησης της γης

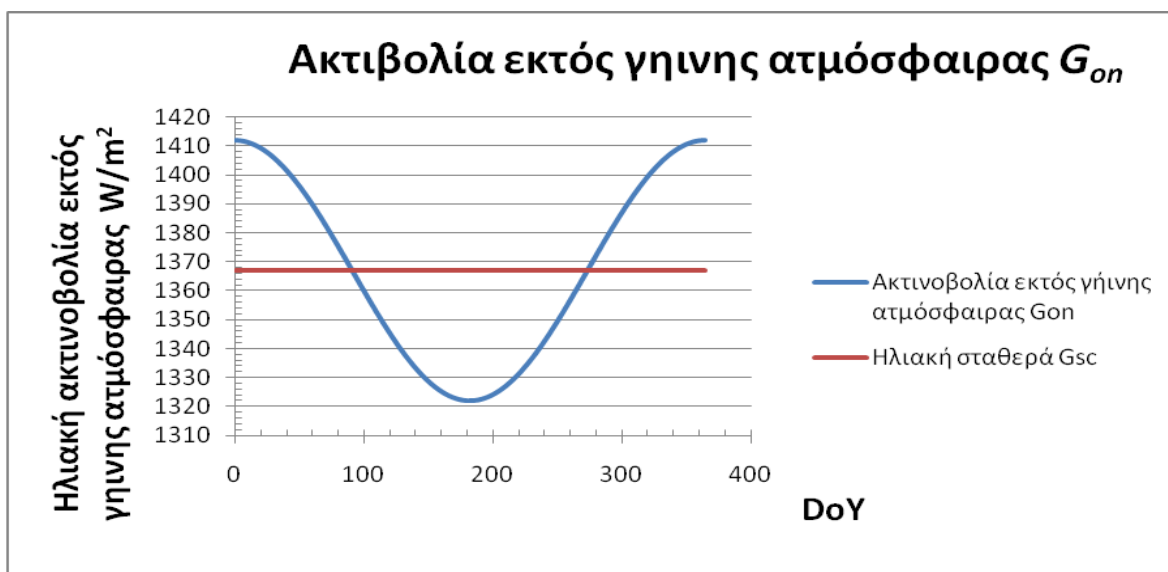
Η κίνηση της γης σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον ήλιο, έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της απόστασής της από τον ήλιο καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτό συνεπάγεται σε μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει εκτός γήινης ατμόσφαιρας σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες. Ισχύει η σχέση:

$$G_{on} (W / m^2) = G_{sc} (1 + 0,033 \cos \frac{360 \cdot DoY}{365})$$

Όπου:

- G_{on} η Εξωγήινη ακτινοβολία (W/m^2) σε κάθετη επιφάνεια ως προς την ακτινοβολία
- DoY η μέρα του χρόνου στην οποία αναφερόμαστε (π.χ. $DoY=1$ για την 1^η Ιανουαρίου και $DoY=365$ για την 31^η Δεκεμβρίου)
- G_{sc} η ηλιακή σταθερά ($G_{sc} = 1367 W/m^2$)

Η μεταβολή της εξωγήινης ακτινοβολίας ανά μήνα του έτους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.4.1: Ετήσια διακύμανση της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακής ακτινοβολίας.

Η όποια απόκλιση εμφανίζεται από την ηλιακή σταθερά οφείλεται ακριβώς στην συνεχή αλλαγή της απόστασης της γης από τον ήλιο σε όλη τη διάρκεια του έτους.

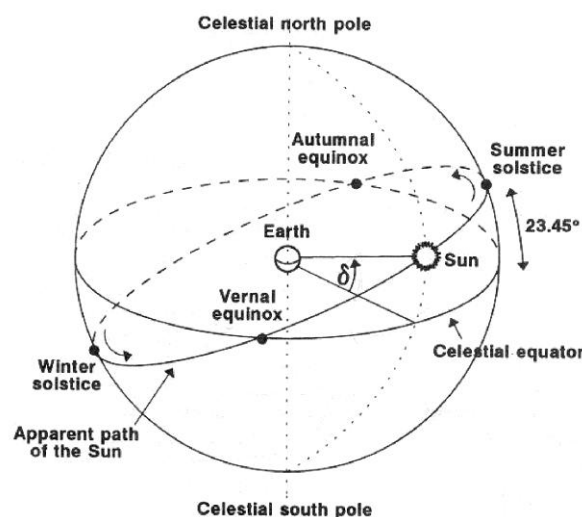
1.5 Ηλιακή γεωμετρία

Προκειμένου να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα επίπεδο στη επιφάνεια της γης, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε εκτός των άλλων και τη θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο.

1.5.1 Η ουράνια σφαίρα και η ηλιακή απόκλιση δ Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω θέσης του ήλιου

Όπως έχει ειπωθεί η γη κινείται σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τον ήλιο. Το επίπεδο που σχηματίζει η τροχιά αυτή ονομάζεται εκλειπτικό. Για την πλήρη περιστροφή της γης γύρω από τον ήλιο απαιτείται ένας χρόνος. Επιπλέον της κίνησης γύρω από τον ήλιο η γη περιστρέφεται και γύρω από τον άξονά της, τον πολικό άξονα. Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο εκλειπτικό επίπεδο και τον πολικό άξονα είναι $23,45^\circ$.

Ένας σημαντικός παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η σχετική θέση του ήλιου και της γης. Η σχετική αυτή θέση μπορεί να περιγραφεί απλούστερα με βάση την ουράνια σφαίρα, στο κέντρο της οποίας θεωρείται ότι βρίσκεται η γη. Το επίπεδο του ισημερινού της γης τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ουράνιο ισημερινό και ο πολικός άξονας της γης στους ουράνιους πόλους. Στην ουράνια σφαίρα η γη θεωρείται σταθερή στο κέντρο και ο ήλιος κινείται. Δηλαδή σε αυτή την περίπτωση η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο φαίνεται ως η κίνηση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα. Η ουράνια σφαίρα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.5.1.1: Η ουράνια σφαίρα με την φαινόμενη ετήσια κίνηση του ήλιου.

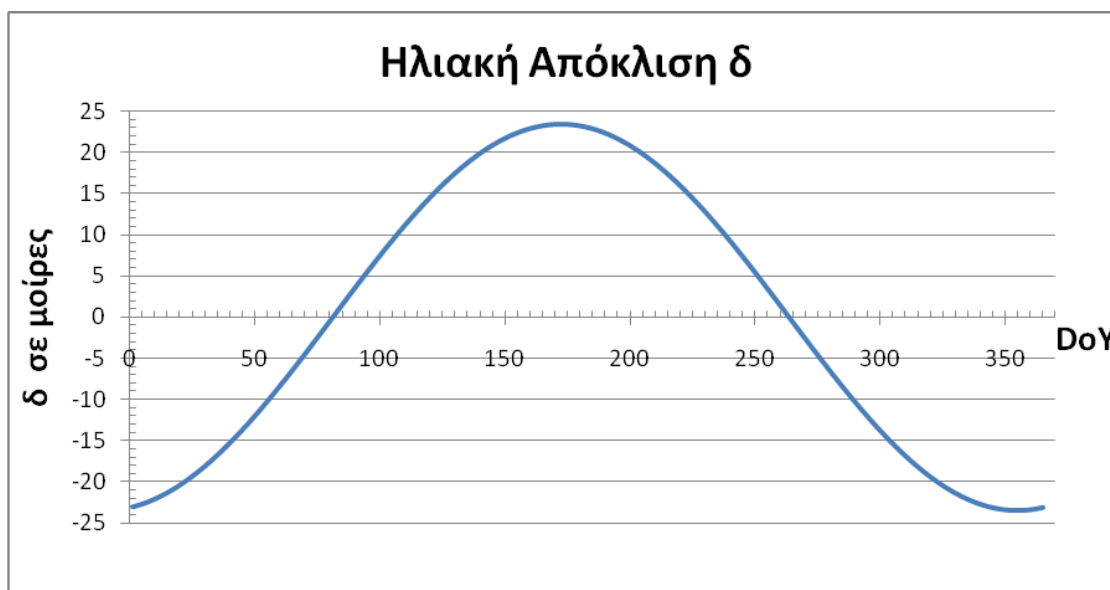
Η γωνία δ που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του ουράνιου ισημερινού (celestial equator) και της ευθείας που ενώνει τα κέντρα του ήλιου και της γης, ονομάζεται ηλιακή απόκλιση δ (declination) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \sin \frac{360(284 + DoY)}{365}$$

Όπου

- δ η ηλιακή απόκλιση
- DoY η μέρα του χρόνου στην οποία αναφερόμαστε (π.χ. $DoY = 1$ για την 1^η Ιανουαρίου και $DoY = 365$ για την 31^η Δεκεμβρίου)

Η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της ηλιακής απόκλισης δ .



Σχήμα 1.5.1.2: Η μεταβολή της ηλιακής απόκλισης δ κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Είναι $\delta=0^\circ$ κατά την εαρινή ισημερία στις 21 Μαρτίου (vernal equinox) και την φθινοπωρινή ισημερία στις 21 Σεπτεμβρίου (autumnal equinox), οπότε ο ήλιος ανατέλλει ακριβώς στην ανατολή και δύει στη δύση. Επίσης είναι $\delta=23,27^\circ$ την 21 Ιουνίου στο θερινό ηλιοστάσιο (summer solstice) και $\delta=-23,27^\circ$ την 21 Δεκεμβρίου στο χειμερινό ηλιοστάσιο (winter solstice).

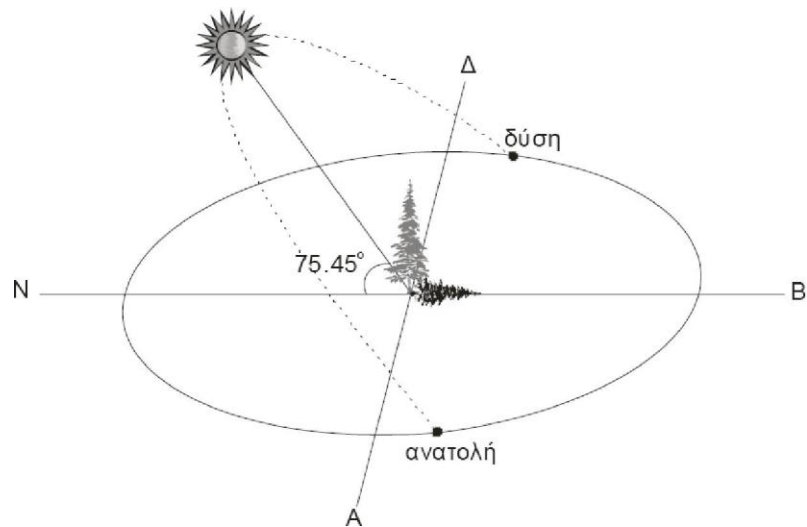
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τιμές ηλιακής απόκλισης για διάφορες ημερομηνίες του έτους.

Month	n for ith Day of Month	For the Average Day of the Month		
		Date	n, Day of Year	δ , Declination
January	i	17	17	-20.9
February	$31 + i$	16	47	-13.0
March	$59 + i$	16	75	-2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4
May	$120 + i$	15	135	18.8
June	$151 + i$	11	162	23.1
July	$181 + i$	17	198	21.2
August	$212 + i$	16	228	13.5
September	$243 + i$	15	258	2.2
October	$273 + i$	15	288	-9.6
November	$304 + i$	14	318	-18.9
December	$334 + i$	10	344	-23.0

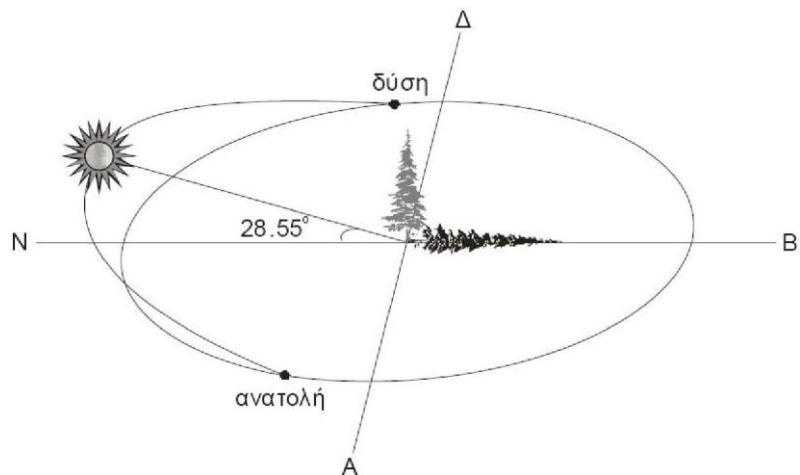
^a From Klein (1977)

Σχήμα 1.5.1.3: Τιμές της ηλιακής απόκλισης δ για διάφορες ημερομηνίες.

Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου είναι η διαμόρφωση των εποχών και κατ' επέκταση των κλιματολογικών και μετεωρολογικών συνθηκών κατά τη διάρκεια του έτους. Οι κυκλικές τροχιές του ήλιου διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερα την ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ το χειμώνα διαγράφονται νοτιότερα και συμβαίνει το αντίθετο.



Σχήμα 1.5.1.4: Η τροχιά του ήλιου μια καλοκαιρινή ημέρα.

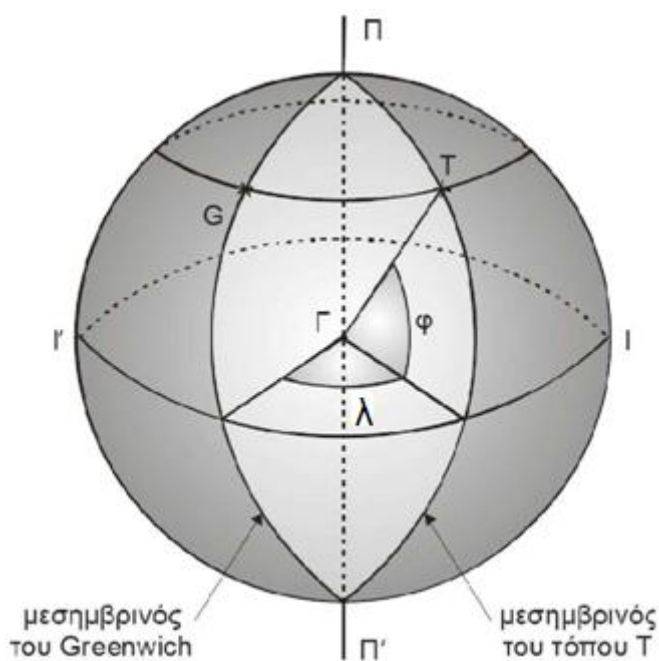


Σχήμα 1.5.1.5: Η τροχιά του ήλιου μια χειμερινή ημέρα.

Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σ' έναν τόπο, είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια που δείχνει το μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα. Επίσης, ο αριθμός των ηλιοφεγγών ημερών, στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται καθόλου από σύννεφα, καθώς και των ανήλιων ημερών, που ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα σε όλη τη διάρκεια της ημέρας.

1.5.2 Γεωγραφικό μήκος και πλάτος

Κάθε τοποθεσία στη γη καθορίζεται από δύο σφαιρικές συντεταγμένες, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Το επίπεδο αναφοράς είναι το επίπεδο του ισημερινού. Οι κύκλοι που είναι παράλληλοι στον ισημερινό ονομάζονται παράλληλοι κύκλοι (Σχήμα 1.5.2.1) και καθορίζουν το γεωγραφικό πλάτος. Τα ημικύκλια που διέρχονται από τους πόλους ονομάζονται μεσημβρινοί. Στο γεωγραφικό μήκος μηδέν βρίσκεται εξ' ορισμού ο μεσημβρινός που περνάει από το Greenwich στη Μ. Βρετανία. Από κάθε σημείο της επιφάνειας της γης περνάει ένας παράλληλος κύκλος και ένας μεσημβρινός.



Σχήμα 1.5.2.1: Γεωγραφικό μήκος και πλάτος.

Βασικός μεσημβρινός θεωρείται αυτός που περνάει από το αστροσκοπείο του Greenwich (G). Προκειμένου να καθορισθεί η θέση ενός τόπου (T) στην επιφάνεια της γης απαιτείται να ορισθεί το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος του.

Γεωγραφικό πλάτος φ ενός τόπου είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει το κέντρο της γης με τον τόπο και του ισημερινού επιπέδου. Το γεωγραφικό πλάτος παίρνει τιμές από 0° μέχρι 90° για το βόρειο ημισφαίριο και από 0° μέχρι -90° για το νότο ημισφαίριο.

Γεωγραφικό μήκος λ ενός τόπου είναι η γωνία που σχηματίζεται από το μεσημβρινό του Greenwich και το μεσημβρινό επίπεδο του τόπου. Το γεωγραφικό μήκος παίρνει τιμές από 0° μέχρι -180° για τόπους ανατολικά του Greenwich και από 0° μέχρι 180° για τόπους δυτικά του Greenwich.

1.5.3 Ηλιακή ώρα

Η ηλιακή ώρα δεν συμπίπτει με την τοπική ώρα κάθε περιοχής. Για τις διάφορες περιοχές της γης πρέπει να ληφθούν υπόψη διορθώσεις όπως επίσης και παρεκκλίσεις λόγω της τροχιάς της γης.

Η ηλιακή ώρα ορίζεται έτσι ώστε το ηλιακό μεσημέρι ή ηλιακή μεσημβρία (ηλιακή ώρα 12:00) να συμπίπτει με την χρονική στιγμή όπου ο ήλιος βρίσκεται στον μεσημβρινό του παρατηρητή. Έχει δηλαδή άμεση εξάρτηση με το γεωγραφικό μήκος της περιοχής. Επειδή σε όλες τις εξισώσεις που ακολουθούν η ώρα αναφέρεται ως ηλιακή θα ήταν χρήσιμο να μετατρέψουμε την τοπική σε ηλιακή. Η σχέση για την μετατροπή αυτή είναι:

$$T_{\text{solar}}(\text{hours}) = T_{\text{Local}}(\text{hours}) + \frac{E(\text{min})}{60} + \frac{4}{60} \left(\frac{\text{min}}{^\circ} \right) [L_{ST} (^\circ) - L_{LOC} (^\circ)]$$

Όπου:

- T_{solar} είναι η ηλιακή ώρα σε ώρες
- T_{Local} είναι η τοπική ώρα σε ώρες
- L_{ST} είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού της τοπικής ζώνης ώρας σε μοίρες και είναι $L_{ST} = \pm 15^\circ \cdot \Delta T_{GMT}$. Είναι “+” για περιοχές δυτικά του Greenwich και “-” για ανατολικά του Greenwich και ΔT_{GMT} είναι η διαφορά της τοπικής ζώνης ώρας από την ζώνη ώρας του Greenwich

(Greenwich Mean Time GMT=0). Για την Ελλάδα $\Delta T_{GMT}=+2$ ώρες οπότε $L_{ST}=-30^\circ$)

- L_{LOC} είναι το γεωγραφικό μήκος της περιοχής παρατήρησης σε μοίρες (“+” για περιοχές δυτικά του Greenwich και “-“ για ανατολικά του Greenwich)
- E είναι η εξίσωση χρόνου σε λεπτά

Η εξίσωση χρόνου είναι ένας διορθωτικός όρος που αποδίδει τις ενδεχόμενες αποκλίσεις σε λεπτά μεταξύ της ηλιακής και της τοπικής ώρας και υπολογίζεται ως εξής:

$$E(\text{min}) = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B)$$

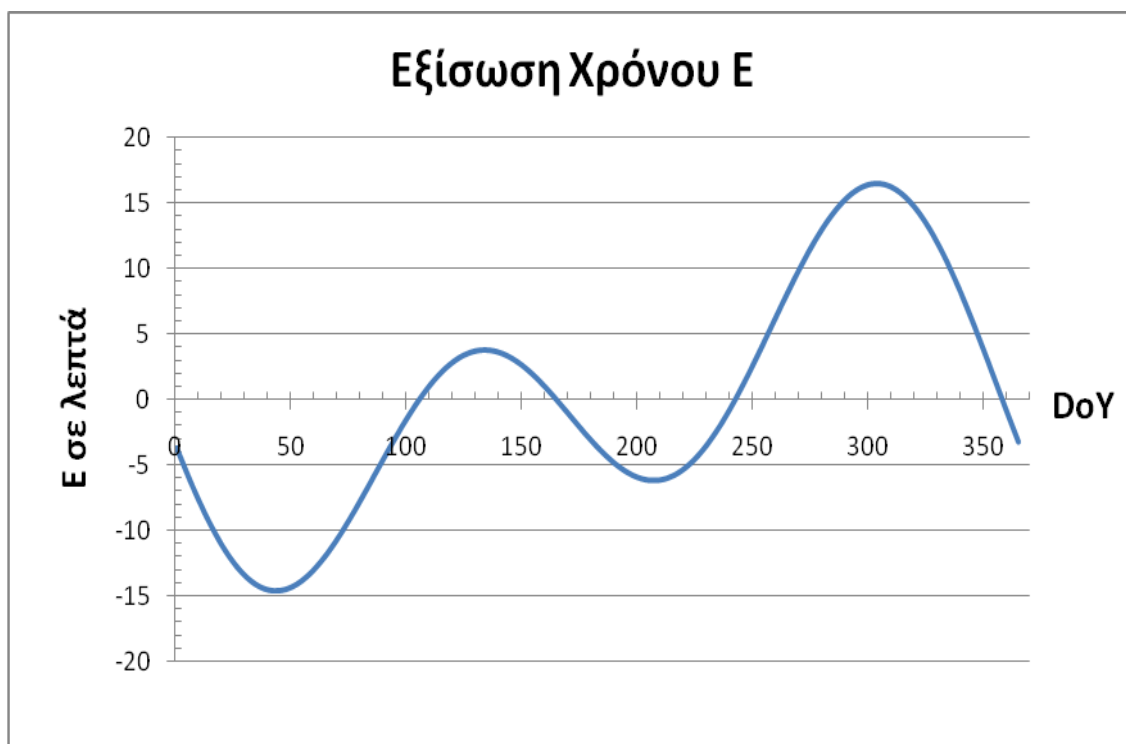
Όπου:

- B ονομάζεται γωνία ημέρας (σε μοίρες) και ισούται με:

$$B(^{\circ}) = \frac{360}{365} (DoY - 81)$$

με DoY τη μέρα του χρόνου στην οποία αναφερόμαστε (π.χ. $DoY=1$ για την 1^η Ιανουαρίου και $DoY=365$ για την 31^η Δεκεμβρίου).

Η εξίσωση χρόνου όλες τις μέρες του έτους παρουσιάζεται γραφικά στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.5.3.1: Η εξίσωση χρόνου E.

1.5.4 Η γωνία ώρας ω

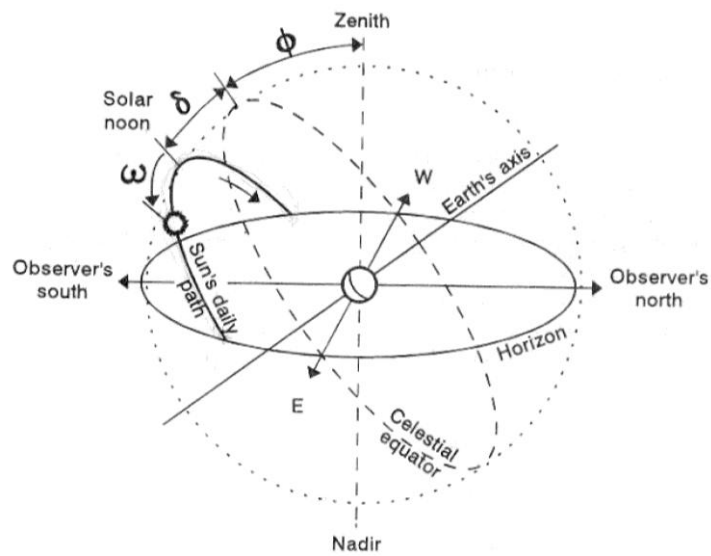
Η ημερήσια κίνηση της γης απεικονίζεται με την ημερήσια περιστροφή της ουράνιας σφαίρας περί τον πολικό άξονα και η στιγμιαία θέση του ήλιου περιγράφεται από την ωριαία γωνία ω (σχήμα 1.5.4.1), η οποία ορίζεται ως η γωνιακή απόσταση του ήλιου από την ηλιακή μεσημβρία (solar noon). Είναι $\omega=0^\circ$ κατά το ηλιακό μεσημέρι (ηλιακή ώρα=12:00) και λαμβάνεται $\omega<0$ για πμ και $\omega>0$ για μμ. Κάθε ώρα αντιστοιχεί σε 15° γεωγραφικού μήκους και άρα αυξάνει με ρυθμό $15^\circ/h=0,25^\circ/\text{min}$.

Η ωριαία γωνία του ήλιου ω υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega(^{\circ}) = [T_{solar} (hours) - 12(hours)] \frac{15^{\circ}}{hour}$$

Όπου:

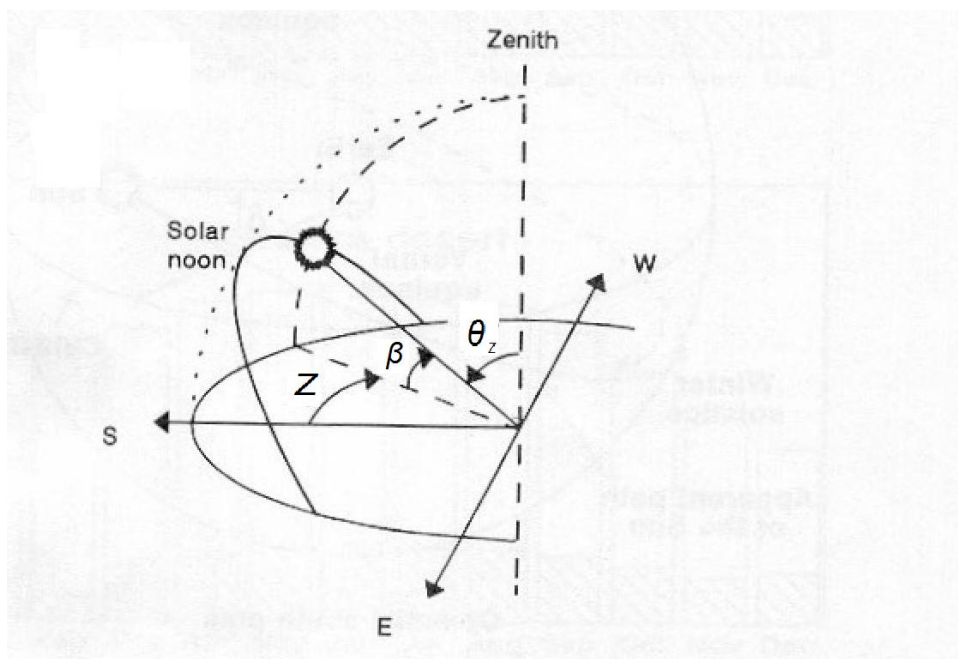
- ω η ωριαία γωνία σε μοίρες
- T_{solar} η ηλιακή ώρα εκφρασμένη σε ώρες.



Σχήμα 1.5.4.1: Η ωριαία γωνία ω .

1.5.5 Ύψος ηλίου και ηλιακό αζιμούθιο

Η θέση του ήλιου στον ουρανό από ένα παρατηρητή σε ένα σημείο της επιφάνειας της γης περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες το ύψος του ήλιου β και το ηλιακό αζιμούθιο Z (σχήμα 1.5.5.1). Το επίπεδο αναφοράς είναι το επίπεδο που εφάπτεται με την επιφάνεια της γης στην τοποθεσία του παρατηρητή. Αυτό το επίπεδο τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ορίζοντα. Η τομή της κάθετης σε αυτό το επίπεδο με την ουράνια σφαίρα ονομάζεται ζενίθ (σχήμα 1.5.5.1)



Σχήμα 1.5.5.1 Ηλιακό ύψος β και ηλιακό αζιμούθιο Z και το ζενίθ

Το ύψος του ήλιου β είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και τον ορίζοντα. Είναι η γωνία υπό την οποία φαίνεται ο ήλιος από τον παρατηρητή. Παίρνει τιμές από -90° έως $+90^\circ$ με θετικές τιμές όταν ο ήλιος είναι πάνω από τον ορίζοντα και αρνητικές όταν ο ήλιος είναι κάτω από αυτόν. Η απόσταση από το ζενίθ είναι $\theta_z(^{\circ}) = 90^{\circ} - \beta(^{\circ})$.

Γνωρίζοντας την ωριαία γωνία ω μπορούμε να υπολογίσουμε το ηλιακό ύψος β για κάθε στιγμή της ημέρας όπως φαίνεται από ένα παρατηρητή σε μια συγκεκριμένη περιοχή γεωγραφικού πλάτους φ . Έτσι το ηλιακό ύψος β σε μοίρες προκύπτει από τη σχέση:

$$\sin \beta = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega = \cos \theta_z$$

Όπου:

- β το ηλιακό ύψος σε μοίρες
- δ η ηλιακή απόκλιση σε μοίρες
- φ το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής παρατήρησης σε μοίρες
- ω η γωνία ώρας σε μοίρες
- θ_z η γωνία από το ζενίθ σε μοίρες

Ισχύει ότι για την ηλιακή μεσημβρία είναι $\omega=0^\circ$ οπότε από την προηγούμενη σχέση θέτοντας $\omega=0^\circ$ μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγιστο ύψος β_{max} του ήλιου μια συγκεκριμένη μέρα για οποιαδήποτε τοποθεσία.

Για την Αθήνα με γεωγραφικό πλάτος $\varphi=38^\circ$, το μέγιστο ύψος του ήλιου για τις ημερομηνίες των ισημεριών και των ηλιοστασίων φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.5.5.1: Μέγιστο ύψος ήλιου στην Αθήνα σε διάφορες ημερομηνίες

Μέγιστο ύψος ήλιου στην περιοχή της Αθήνας με $\varphi=38^\circ$	
Ημερομηνία	β_{max}
21 Μαρ	52°
21 Ιουν	$75,5^\circ$
21 Σεπ	52°
21 Δεκ	29°

Από τις τιμές αυτές του πίνακα συμπεραίνουμε ότι ο ήλιος στο θερινό ηλιοστάσιο φτάνει στο υψηλότερο σημείο στον ορίζοντα και το αντίθετο συμβαίνει

στο χειμερινό ηλιοστάσιο. Στην καλοκαιρινή και φθινοπωρινή ισημερία το μέγιστο ύψος είναι ίδιο όπως αναμενόταν αφού η απόκλιση δ του ήλιου είναι η ίδια για τις ημερομηνίες αυτές.

Επίσης ισχύει ότι την ώρα της ανατολής και δύσης του ηλίου στον ορίζοντα ισχύει ότι το ηλιακό ύψος είναι $\beta=0^\circ$ οπότε για μια περιοχή γεωγραφικού πλάτους φ μπορεί να υπολογιστεί η ωριαία γωνία ανατολής και δύσης ω_s :

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \delta \sin \varphi}{\cos \delta \cos \varphi} = -\tan \delta \tan \varphi$$

Όπου:

- $\omega_s(^{\circ})$ η ωριαία γωνία ανατολής ή δύσης σε μοίρες
- φ το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής παρατήρησης σε μοίρες
- δ η ηλιακή απόκλιση σε μοίρες

Και επειδή όπως είπαμε $\omega < 0$ για π.μ. και $\omega > 0$ για μ.μ. θα είναι $-I\omega_s I$ για την ανατολή του ηλίου και $+I\omega_s I$ για την δύση.

Βρίσκοντας την ωριαία γωνία ανατολής και δύσης ω_s μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε για την συγκεκριμένη περιοχή γεωγραφικού πλάτους φ , την ηλιακή ώρα ανατολής $T_{solar,sunrise}$ και δύσης $T_{solar,sunset}$ αντίστοιχα, από τη σχέση της ωριαίας γωνίας. Έτσι θα έχω:

$$T_{solar,sunrise} (hours) = 12 - \frac{|\omega_s(^{\circ})|}{15} \quad \text{και} \quad T_{solar,sunset} (hours) = 12 + \frac{|\omega_s(^{\circ})|}{15}$$

Όπου:

- $T_{solar,sunrise}$ η ηλιακή ώρα ανατολής
- $T_{solar,sunset}$ η ηλιακή ώρα δύσης
- ω_s η ωριαία γωνία ανατολής ή δύσης σε μοίρες

Κατ' επέκταση μπορούν να βρεθούν και οι τοπικές ώρες ανατολής και δύσης $T_{Local,sunrise}$ και $T_{Local,sunset}$ για την συγκεκριμένη περιοχή από την σχέση της ηλιακής ώρας με την τοπική.

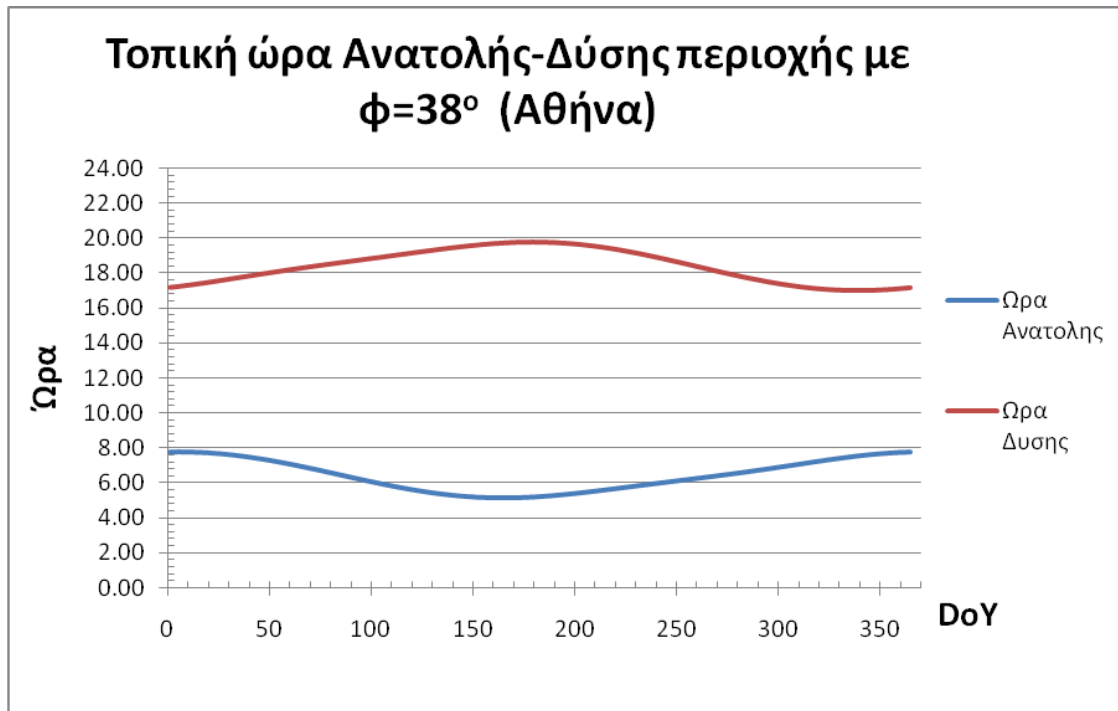
$$T_{Local,sunrise}(hours) = T_{solar,sunrise}(hours) - \frac{E(\text{min})}{60} - \frac{4}{60} \left(\frac{\text{min}}{^\circ} \right) [L_{ST}(^\circ) - L_{LOC}(^\circ)]$$

και αντίστοιχα

$$T_{Local,sunset}(hours) = T_{solar,sunset}(hours) - \frac{E(\text{min})}{60} - \frac{4}{60} \left(\frac{\text{min}}{^\circ} \right) [L_{ST}(^\circ) - L_{LOC}(^\circ)]$$

Όπου:

- $T_{Local,sunrise}$ η τοπική ώρα ανατολής σε ώρες
- $T_{Local,sunset}$ η τοπική ώρα δύσης σε ώρες
- $T_{solar,sunrise}$ η ηλιακή ώρα ανατολής σε ώρες
- $T_{solar,sunset}$ η ηλιακή ώρα δύσης σε ώρες
- L_{ST} είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού της τοπικής ζώνης ώρας σε μοίρες και είναι $L_{ST} = \pm 15^\circ \cdot \Delta T_{GMT}$. Είναι “+” για περιοχές δυτικά του Greenwich και “-“ για ανατολικά του Greenwich και ΔT_{GMT} είναι η διαφορά της τοπικής ζώνης ώρας από την ζώνη ώρας του Greenwich (Greenwich Mean Time GMT=0). Για την Ελλάδα $\Delta T_{GMT}=+2$ ώρες οπότε $L_{ST}=-30^\circ$)
- L_{LOC} είναι το γεωγραφικό μήκος της περιοχής παρατήρησης σε μοίρες (“+” για περιοχές δυτικά του Greenwich και “-“ για ανατολικά του Greenwich)
- E είναι η εξίσωση χρόνου σε λεπτά



Σχήμα 1.5.5.2: Ηλιακή ώρα ανατολής και δύσης Αθήνας ($\varphi=38^\circ$).

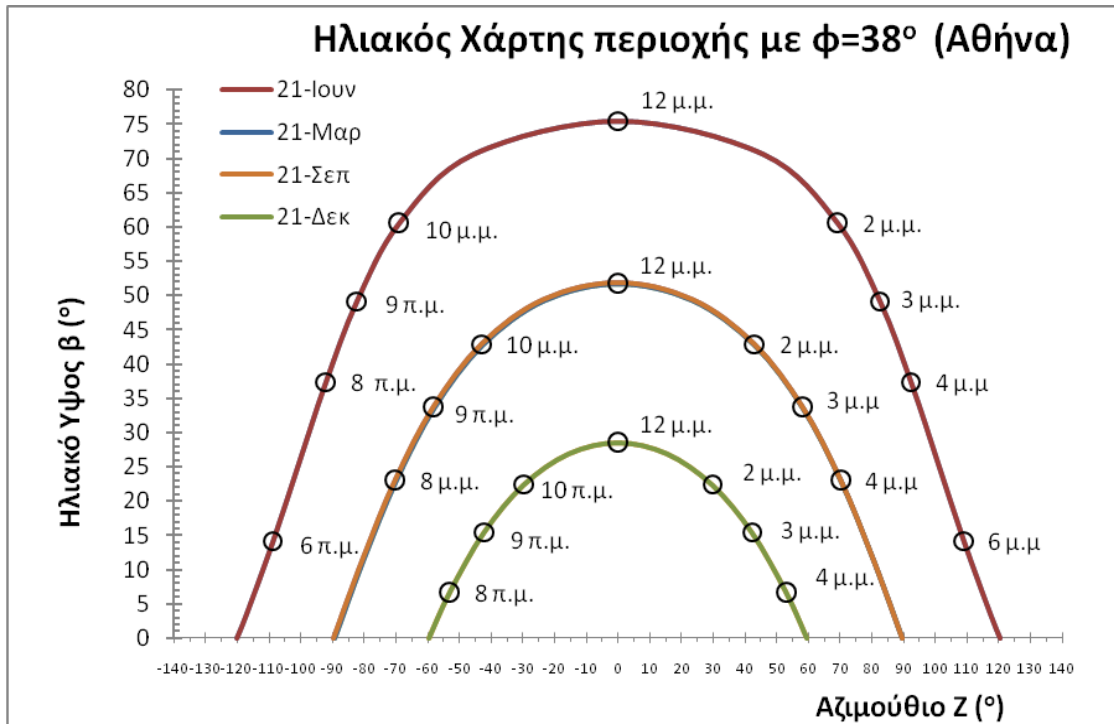
Το ηλιακό αζιμούθιο Z (σχήμα 1.5.5.1) ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στη προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στην κατεύθυνση αναφοράς που στην περίπτωσή μας είναι ο νότος. Προς τα δεξιά από το νότο, το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές ενώ προς τα αριστερά αρνητικές. Κατά την διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το ηλιακό αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό. Το ηλιακό αζιμούθιο είναι για νότιο προσανατολισμό $Z=0^\circ$. Μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

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

Όπου:

- Z το αζιμούθιο σε μοίρες
- β το ηλιακό ύψος σε μοίρες
- δ η ηλιακή απόκλιση σε μοίρες
- φ το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής παρατήρησης σε μοίρες

Η σχέση αυτή συνδέει το αζιμούθιο Z με το ηλιακό ύψος β και μπορεί να παρασταθεί γραφικά δίνοντας την θέση του ήλιου στον ορίζοντα όπως φαίνεται από παρατηρητή σε μια περιοχή γεωγραφικού πλάτους φ . Οι καμπύλες που προκύπτουν για τις διάφορες ημερομηνίες αποτελούν τον “Ηλιακό Χάρτη” της περιοχής (σχήμα 1.5.5.3).



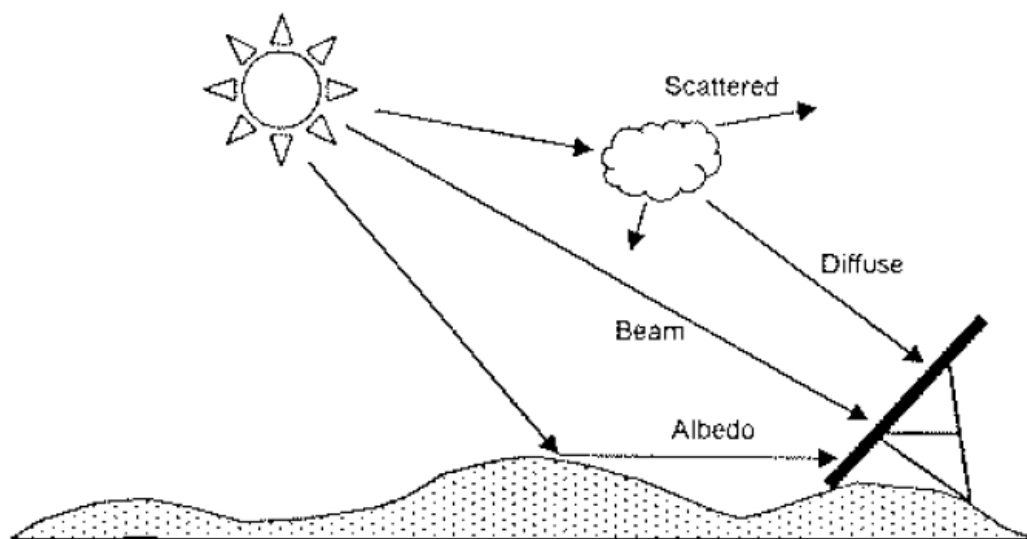
Σχήμα 1.5.5.3: Ηλιακός Χάρτης περιοχής με $\varphi=38^\circ$ (Αθήνα).

Όπως αναμενόταν η καμπύλη για το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκ) είναι η χαμηλότερη στον ορίζοντα και για το θερινό (21 Ιουν) η υψηλότερη. Επίσης οι καμπύλες για την φθινοπωρινή (21 Σεπ) και εαρινή ισημερία (21 Μαρ) συμπίπτουν.

Επίσης παρατηρούμε ότι την ηλιακή μεσημβρία (ηλιακή ώρα 12:00) ο ήλιος βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο και έχει αζιμούθιο $Z=0^\circ$ δηλαδή έχει κατεύθυνση προς το νότο.

1.6 Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Το φάσμα του ήλιου τροποποιείται πριν φτάσει στην επιφάνεια της γης. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης επιδέχεται κάποιες μετατροπές αλληλεπιδρώντας με διάφορα συστατικά της. Κάποια από αυτά, όπως τα σύννεφα, την αντανακλούν. Άλλα, όπως το όζον, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα την απορροφούν. Οι σταγόνες του νερού και τα αιωρούμενα σωματίδια σκόνης προκαλούν σκέδαση. Η απορρόφηση, η σκέδαση και η ανάκλαση είναι οι παράγοντες που τροποποιούν την ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος (δηλ. υψηλής ενέργειας) καθώς περνά μέσα από την ατμόσφαιρα της γης. Τα αποτελέσματα που επιφέρουν η απορρόφηση και η σκέδαση είναι ότι το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που διατίθεται για εφαρμογές στη γη βρίσκεται ανάμεσα στα $0,29\mu\text{m}$ και $2,5\mu\text{m}$.



Σχήμα 1.6.1: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας.

Το αποτέλεσμα όλων αυτών των διαδικασιών είναι η αποσύνθεση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα δέκτη στην επιφάνεια της γης σε καθαρά διαφοροποιούμενα συστατικά:

- Άμεση ακτινοβολία (beam radiation) : Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί διάχυση από την

ατμόσφαιρα. Η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας συχνά αναφέρεται και ως άμεση συνιστώσα.

- Διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation) : Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο αφού η κατεύθυνσή της έχει αλλάξει από τη διάχυση στην ατμόσφαιρα.
- Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία (Total solar radiation) : Το άθροισμα της ακτινικής και της διάχυτης ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια αποτελεί την ολική ακτινοβολία.
- Επί πλέον, όταν ο συλλέκτης εγκαθίσταται με κλίση προς το οριζόντιο επίπεδο, όπως και συνηθίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, προστίθεται και ένα μικρό σχετικά ποσοστό προερχόμενο από ανάκλαση σε παρακείμενα αντικείμενα (Albedo radiation=λευκαύγεια).

Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας, προέρχεται από την άμεση ακτινοβολία, σημαντική είναι όμως και η συμβολή της διάχυτης.

1.7 Επίδραση της ατμόσφαιρας

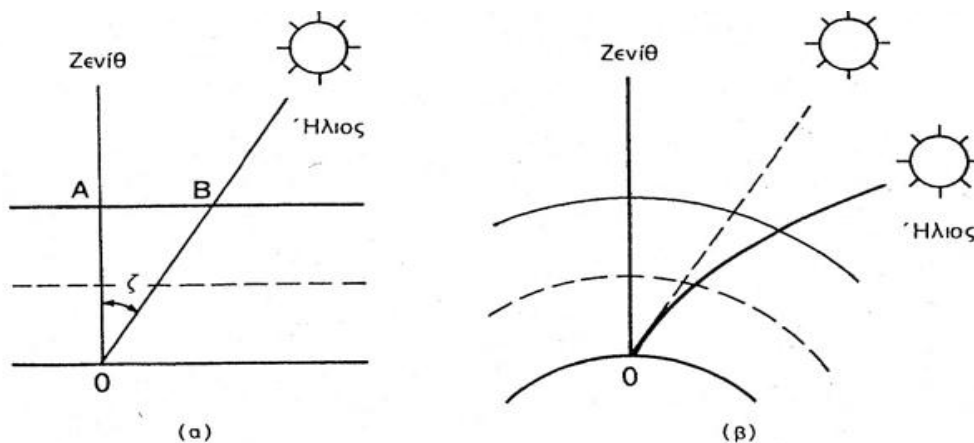
Ως στοιχείο χαρακτηρισμού της επίδρασης που έχει η ύπαρξη της ατμόσφαιρας, όταν δεν υπάρχουν σύννεφα, λαμβάνεται το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην γήινη ατμόσφαιρα, μέχρι τη στάθμη της θάλασσας και ονομάζεται αέριος μάζα AM (Air Mass). Το μήκος της αέριας μάζας, αν αγνοηθεί η καμπυλότητα της γης, ισούται με το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας δια του συνημίτονου της ζενιθιακής γωνίας θ_z δηλαδή της γωνίας που σχηματίζει η ευθεία της γης με τον ήλιο, με την κατακόρυφο (ζενίθ) στο συγκεκριμένο σημείο (Σχήμα 1.7.2). Ισχύει ότι:

$$AM = \frac{1}{\sin \theta_z} = \frac{1}{\cos(90 - \beta)}$$

Όπου:

- AM είναι η αέριος μάζα
- $\theta_z(^{\circ})$ είναι η ζενιθιακή γωνία και
- $\beta(^{\circ})$ το ηλιακό ύψος

Στη σχέση αυτή της μάζας αέρα δεν λαμβάνεται υπόψη η καμπυλότητα της γης.



Σχήμα 1.7.2: Η εξάρτηση της μάζας αέρα (AM) από τη θέση του ήλιου. (α) Απλοποιημένη απεικόνιση, με την ατμόσφαιρα να έχει επίπεδη ανάπτυξη σε άπειρη έκταση (β) Η πραγματική διαμόρφωση της γήινης ατμόσφαιρας, με τα στρώματά της να ορίζονται από σφαιρικές επιφάνειες, και η αντίστοιχη ατμοσφαιρική διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της μέσα στα στρώματα αυτά.

Η ηλιακή σταθερά G_{SC} στην κλίμακα μάζας αέρα σημειώνεται ως AM0 και συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της γης από τον ήλιο. Επίσης, ως AM1 συμβολίζεται η θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ ($\beta=90^\circ$ $\theta_z=0^\circ$), που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια, ως AM1,5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία $41,8^\circ$ από τον ορίζοντα ($\beta=41,8^\circ$ $\theta_z=48,2^\circ$), ως AM2 με τον ήλιο σε γωνία $\beta=30^\circ$ ή $\theta_z=60^\circ$ κλπ.

Η ηλιακή ακτινοβολία που σημειώνεται για AM1,5 έχει πυκνότητα περίπου 1000W/m^2 . Αυτή ονομάζεται ακτινοβολία ενός ήλιου, αντιστοιχεί δε σε μία μέγιστη ακτινοβολία που δέχεται μία κάθετη προς αυτή επιφάνεια υπό τις πιο ευνοϊκές συνθήκες (μεσημέρι καλοκαιριού, καθαρή και ξερή ατμόσφαιρα) και χρησιμοποιείται για την έκφραση της ισχύος αιχμής (W_p) των Φ/Β στοιχείων, η οποία και λαμβάνεται ως η ονομαστική ισχύς αναφοράς αυτών.

1.8 Υπολογισμός άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας

Έχει βρεθεί ότι σε μεσαίου εύρους γωνίες του ηλιακού ζενίθ (50°-65°) το μοντέλο που αποδίδει καλύτερα για τον υπολογισμό ακτινοβολίας είναι αυτό που δημοσιεύτηκε από τους Erbs et al(1982). Σύμφωνα με αυτό η άμεση ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία G_{beam} δίνεται από την εξίσωση:

$$G_{beam} = G_{glob} \frac{(1 - \Psi)}{\sin \beta}$$

Όπου:

- G_{beam} η άμεση ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία
- G_{glob} είναι η συνολική ακτινοβολία στη γη
- β είναι το ηλιακό ύψος
- Ψ είναι μια συνάρτηση η οποία εξαρτάται από το δείκτη καθαρότητας k_t που ισούται με $k_t = \frac{G_h}{G_{h,oa}}$ όπου G_h είναι η ακτινοβολία σε ένα οριζόντιο επίπεδο επί του εδάφους και $G_{h,oa}$ είναι η ακτινοβολία σε ένα οριζόντιο επίπεδο εκτός της γήινης ατμόσφαιρας.

Η συνάρτηση Ψ είναι μια εμπειρική συσχέτιση ανάμεσα στο δείκτη καθαρότητας και στην άμεση ακτινοβολία και ορίζεται από την εξίσωση:

$$\Psi = \begin{cases} 1 - 0,09k_t & \text{για } k_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388k_t^2 - 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4 & \text{για } 0,22 < k_t < 0,8 \\ 0,165 & \text{για } k_t \geq 0,22 \end{cases}$$

Η G_h μπορεί να βρεθεί από μετεωρολογικές πληροφορίες ενώ η $G_{h,oa}$ υπολογίζεται από την σχέση:

$$G_{h,oa} = E_o G_{sc} \sin \beta$$

Όπου:

- $G_{h,oa}$ είναι η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας
- G_{sc} είναι η ηλιακή σταθερά
- β είναι το ηλιακό ύψος
- E_o είναι ο παράγοντας εκκεντρότητας του ήλιου και υπολογίζεται από τον τύπο:

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

με Γ να είναι η γωνία ημέρας που ισούται με $\Gamma = 2\pi \frac{DoY - 1}{365}$ όπου DoY η μέρα του χρόνου στην οποία αναφερόμαστε (π.χ. $DoY = 1$ για την 1^η Ιανουαρίου και $DoY = 365$ για την 31^η Δεκεμβρίου).

Η ακτινοβολία διάχυσης G_{diff} είναι η διαφορά ανάμεσα στην συνολική και την άμεση ακτινοβολία:

$$G_{diff} = G_{glob} - G_{beam}$$

Όπου:

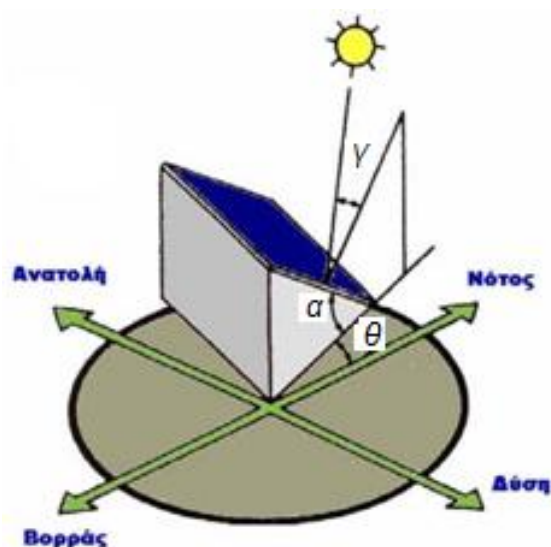
- G_{diff} είναι η ακτινοβολία διάχυσης
- G_{glob} είναι η συνολική ακτινοβολία στη γη
- G_{beam} η άμεση ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Το μοντέλο αυτό τείνει να υποτιμά ελαφρά την επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας και επιφέρει έτσι μια ελαφρά υποτίμηση στην επίδραση της φωτοσκίασης.

1.9 Ακτινοβολία σε ένα κεκλιμένο επίπεδο

Ένα μοντέλο για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας σε ένα κεκλιμένο επίπεδο είναι αυτό των Liu και Jordan [Liu/Jordan (1960)]. Είναι απλό και έχει ικανοποιητική ακρίβεια αν και υπερεκτιμά την ακτινοβολία διάχυσης αφού δεν λαμβάνει υπόψη ότι μόνο ένα κομμάτι του ουρανού είναι ορατό στην επόμενη συστοιχία φωτοβολταϊκών.

Άρα η προσπίπτουσα ακτινοβολία θα υπερεκτιμηθεί και οι επιδράσεις της φωτοσκίασης θα υποτιμηθούν.



Σχήμα 1.9.1: Γωνίες ενός κεκλιμένου επιπέδου.

Κάθε συνιστώσα της ακτινοβολίας υπολογίζεται ξεχωριστά με βάση τις τιμές του οριζόντιου επιπέδου. Για ένα πλαίσιο με κλίση α το οποίο δέχεται ακτινοβολία από τον ήλιο που βρίσκεται σε ηλιακό ύψος β (σχήμα 1.9.1) η άμεση ακτινοβολία είναι:

$$G_{beam,i} = G_{beam,h} \frac{\cos(\beta - \alpha)}{\sin \beta}$$

Όπου:

- $G_{beam,i}$ είναι η άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο
- $G_{beam,h}$ είναι η άμεση συνιστώσα που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο
- β είναι το ηλιακό ύψος
- α είναι η κλίση του κεκλιμένου επιπέδου (πλαίσιο)

Για την διάχυτη ακτινοβολία $G_{diff,i}$ που προσπίπτει σε ένα κεκλιμένο επίπεδο ισχύει:

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

Όπου:

- $G_{diff,i}$ είναι η διάχυτη ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο
- $G_{diff,h}$ είναι η διάχυτη συνιστώσα που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο
- α είναι η κλίση του κεκλιμένου επιπέδου (πλαίσιο)

Η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε μια μη σκιαζόμενη κεκλιμένη επιφάνεια θα είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης συνιστώσας.

$$G_{glob,i} = G_{beam,i} + G_{diff,i}$$

Όπου:

- $G_{glob,i}$ είναι η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο
- $G_{diff,i}$ είναι η διάχυτη ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο
- $G_{beam,i}$ είναι η άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο

1.10 Γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας

Η γωνία πρόσπτωσης γ (σχήμα 1.9.1) της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο σχηματίζεται ανάμεσα στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και τον ηλιακό συλλέκτη. Ο συλλέκτης μπορεί να μην είναι πάντοτε προσανατολισμένος προς το νότο αλλά να έχει μια απόκλιση θ έτσι ώστε να μεγιστοποιήσουμε την προσπίπτουσα ενέργεια κάποια συγκεκριμένη περίοδο της ημέρας.

Η γωνία πρόσπτωσης γ δίνεται από τη σχέση:

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

Όπου:

- δ είναι η ηλιακή απόκλιση σε μοίρες
- φ είναι το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής σε μοίρες
- α είναι η κλίση του ηλιακού συλλέκτη σε μοίρες
- θ είναι η απόκλιση από τον νότο σε μοίρες
- ω είναι η γωνία ώρας σε μοίρες

Η παραπάνω εξίσωση φαίνεται πολύπλοκη αλλά απλουστεύει αν ο συλλέκτης προσανατολιστεί προς το νότο ($\theta=0^\circ$). τότε θα έχουμε:

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

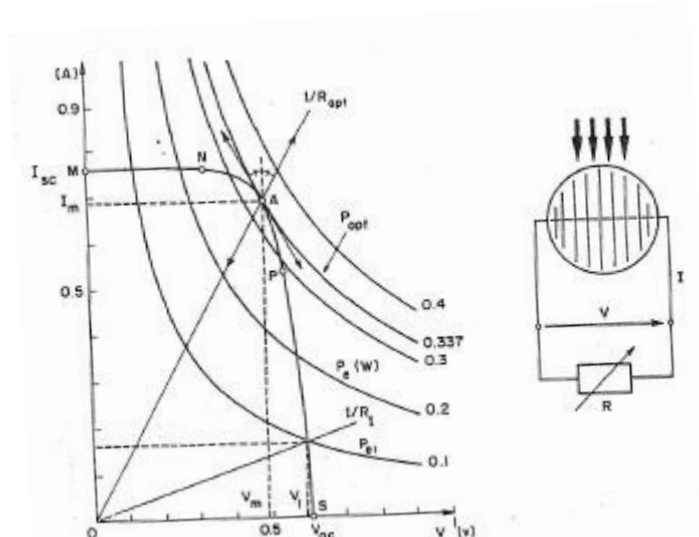
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. Λειτουργία και απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε το Φ/Β στοιχείο σε συνθήκες φόρτισης, καθώς επίσης και κυκλώματα Φ/Β στοιχείων. Στην αρχή Θα εξεταστούν δύο στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα ή σε σειρά. Στην συνέχεια θα εξεταστούν κυκλώματα με N στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα ή σε σειρά.

2.1 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε συνθήκες φόρτισης

Η χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου έχει την μορφή που φαίνεται στο σχήμα 2.1.1. Η χαρακτηριστική περνά από τρία σημαντικά σημεία : το σημείο M που δίνει το ρεύμα βραχυκύκλωσης, που συμβολίζεται με I_L ή I_{SC} , το σημείο S που δίνει την τάση ανοιχτού κυκλώματος που συμβολίζεται με V_{OC} , και από το σημείο A που είναι το σημείο της μέγιστης ισχύος που συμβολίζεται με P_{max} ή P_{opt} .



Σχήμα 2.1.1: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος (I-V) ενός Φ/Β στοιχείου με καμπύλες σταθερής ισχύος και γραμμές φόρτισης.

Αν το Φ/Β στοιχείο είναι συνδεδεμένο με ένα φορτίο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.1, τότε το σημείο λειτουργίας καθορίζεται από την τομή της χαρακτηριστικής Τάσης-Ρευματος του στοιχείου και της χαρακτηριστικής Τάσης-Ρευματος του φορτίου. Για ένα ωμικό φορτίο R η χαρακτηριστική Τάσης-Ρευματος είναι μία ευθεία με κλίση $1/R$ ($I/V = 1/R$). Για την περίπτωση ωμικού φορτίου :

- Η ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο εξαρτάται μόνο από την αντίσταση R .
- Η μέγιστη ισχύς αποδίδεται για $R = R_{opt}$ (σημείο Α στο σχήμα 2.1.1)
όπου :
$$R_{opt} = \frac{V_m}{I_m}$$
- Αν η R είναι μικρή, το στοιχείο λειτουργεί στην περιοχή MN της χαρακτηριστικής. Στην περιοχή αυτή το στοιχείο συμπεριφέρεται σαν πηγή σταθερού ρεύματος, με ρεύμα σχεδόν ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης.
- Αν η R είναι μεγάλη, το στοιχείο λειτουργεί στην περιοχή PS της χαρακτηριστικής. Στην περιοχή αυτή το στοιχείο συμπεριφέρεται σαν πηγή σταθερής τάσης, με τάση σχεδόν ίση με την τάση ανοιχτού κυκλώματος

Στο σχήμα 2.1.1 φαίνονται και οι καμπύλες (υπερβολές) σταθερής ισχύος. Για το στοιχείο του σχήματος αυτού η μέγιστη ισχύς είναι 0,337 W. Η υπερβολή για $P=0,337$ W και η χαρακτηριστική του στοιχείου εφάπτονται στο σημείο A. Στο σχήμα υπάρχει και η υπερβολή για $P=0,4$ W. Η παροχή τέτοιας ισχύος στο φορτίο είναι έξω από τις δυνατότητες του συγκεκριμένου στοιχείου αφού η χαρακτηριστική του δεν τέμνεται με την υπερβολή αυτή. Για αντίσταση $R_1=0,36\Omega$ το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στην τομή της χαρακτηριστικής και της ευθείας με κλίση $1/R_1$. Στο σημείο αυτό $I = 0,1666$ A και $V = 0,6$ V και $P=0,1$ W. Στο σημείο αυτό τέμνονται η χαρακτηριστική του στοιχείου και η υπερβολή σταθερής ισχύος. $P=0,1$ W, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.1.

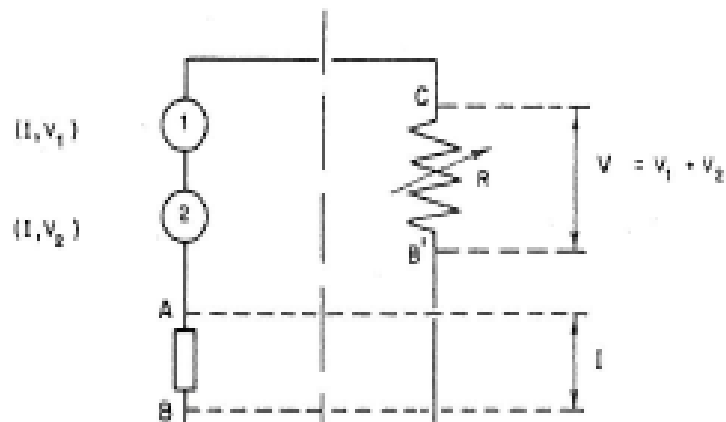
2.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά

Αρχικά θα εξεταστούν δύο όμοια Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και N όμοια Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Είναι όμως συνηθισμένο το φαινόμενο κάποιο από τα στοιχεία να μην είναι όμοιο με τα υπόλοιπα, να έχει δηλαδή διαφορετική χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος,. Η διαφορά αυτή μπορεί να προέρχεται από κάποιο πρόβλημα στις διεργασίες κατασκευής του στοιχείου, από κακές συνθήκες χρήσης (π.χ. κακές κολλήσεις), αλλά και από μερική ή πλήρη σκίαση του στοιχείου. Η σκίαση ενός στοιχείου προκαλεί μείωση της ισχύος εισόδου και φυσικά της ισχύος εξόδου. Για τον λόγο αυτό θα εξεταστούν δύο διαφορετικά Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και N στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά όπου όμως το ένα από αυτά δεν είναι όμοιο με το υπόλοιπα.

2.2.1 Όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά

Στο σχήμα 2.2.1.1 φαίνονται δύο όμοια Φ/Β στοιχεία σε σειρά τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα μεταβλητό φορτίο R. Στην διάταξη αυτή το ρεύμα είναι το ίδιο και στα δύο στοιχεία και η τάση στο φορτίο ίση με το άθροισμα των, τάσεων των δύο

στοιχείων. Ανάμεσα στα σημεία A και B του κυκλώματος είναι τοποθετημένο ένα αμπερόμετρο.



Σχήμα 2.2.1.1: Δύο φωτοβολταϊκά συνδεδεμένα σε σειρά.

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος στα άκρα του συστήματος των δύο όμοιων στοιχείων είναι ίση με το διπλάσιο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του ενός στοιχείου:

$$I = 0, \quad V_{oc} = 2V_{oc1} = 2V_{oc2}$$

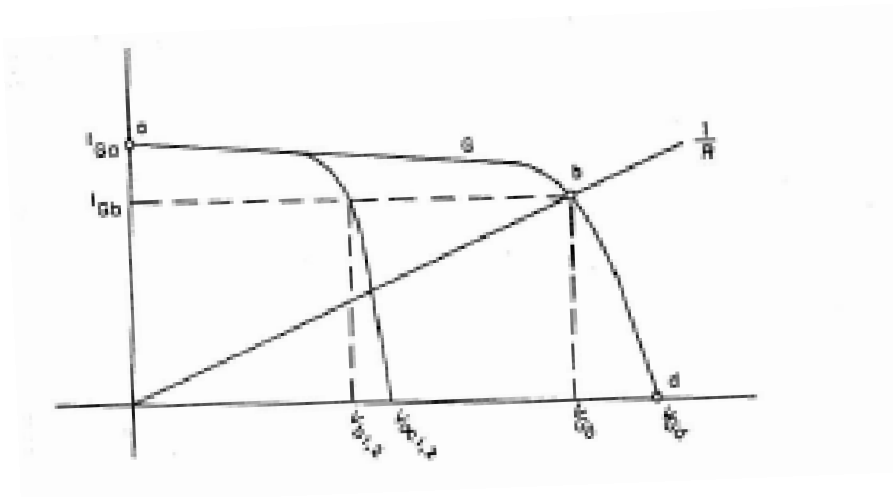
Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ($R=0$) οι τάσεις στα άκρα των στοιχείων είναι μηδέν και το ρεύμα βραχυκύκλωσης έσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης του ενός στοιχείου:

$$V = V_1 = V_2 = 0, \quad I_{sc} = I_{sc1} = I_{sc2}$$

Και τα δύο στοιχεία λειτουργούν σαν γεννήτριες και η ισχύς στο καθένα είναι θετική. Η χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος του συστήματος των δύο όμοιων στοιχείων προέρχεται από τις χαρακτηριστικές του καθενός με πρόσθεση των τάσεων για την ίδια τιμή ρεύματος. Στο σχήμα 2.2.1.2 φαίνεται η χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος του συστήματος. Ο δείκτης G στα σύμβολα του σχήματος δείχνει ότι τα μεγέθη αυτά είναι μεγέθη ενός συστήματος Φ/Β στοιχείων, όπου τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα με οποιοδήποτε τρόπο. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η χαρακτηριστική του ενός στοιχείου. Το σημείο b είναι το σημείο μέγιστης ισχύος όπου:

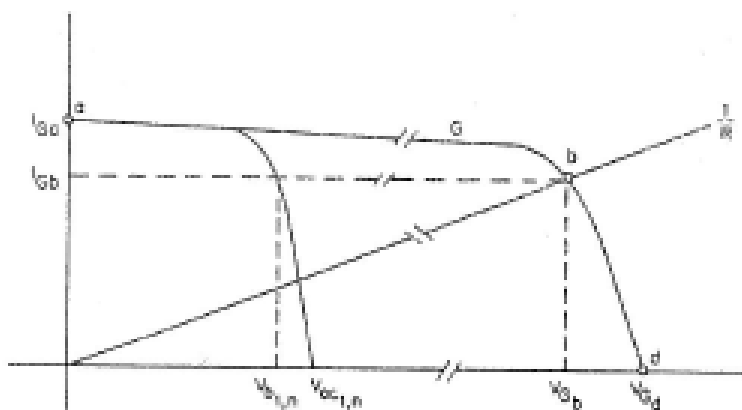
$$I_{Gm} = I_{m1} = I_{m2} \quad \text{και} \quad V_{Gm} = V_{m1} + V_{m2} = 2V_m$$

Η ολική μέγιστη ισχύς στο φορτίο είναι διπλάσια από την μέγιστη ισχύ του κάθε στοιχείου.



Σχήμα 2.2.1.2: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος δύο όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά.

Με την ίδια λογική γίνεται και η ανάλυση του κυκλώματος με N όμοια Φ/Β στοιχεία σε σειρά. Στο σχήμα 2.2.1.3 φαίνεται η χαρακτηριστική N όμοιων Φ/Β στοιχείων σε σειρά. Το ρεύμα είναι ίδιο σε όλα τα στοιχεία ενώ η τάση στο φορτίο είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των στοιχείων, Η μέγιστη ισχύς στο φορτίο είναι. ίση με N φορές τη μέγιστη ισχύ του ενός στοιχείου.



Σχήμα 2.2.1.3: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος N όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά.

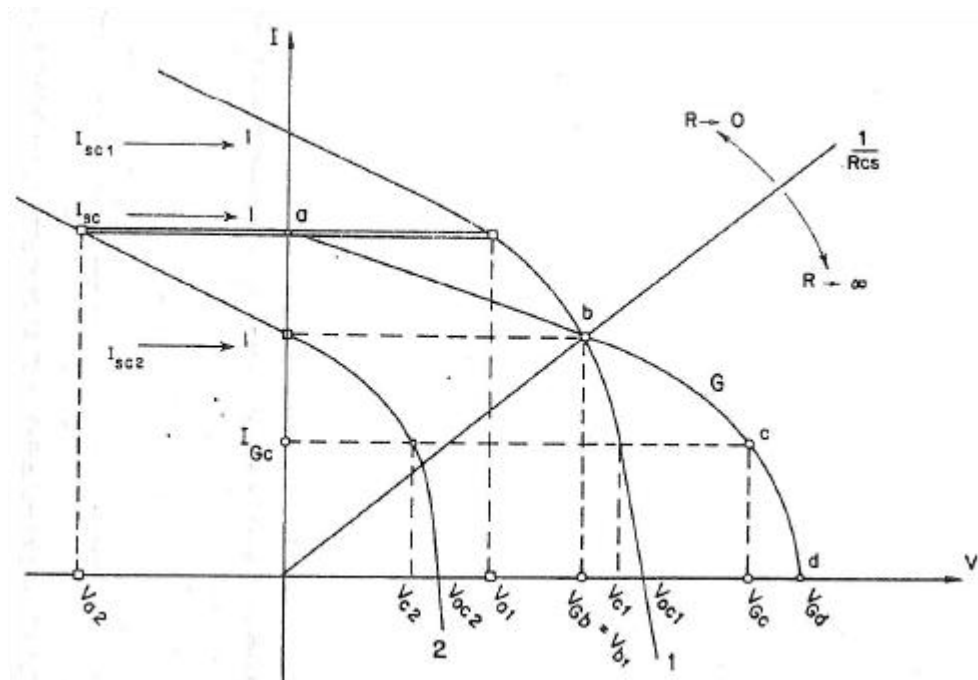
2.2.2 Διαφορετικά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά

Στο σχήμα 2.2.2.1 φαίνονται οι χαρακτηριστικές Τάσης - Ρεύματος δύο διαφορετικών Φ/Β στοιχείων (καμπύλες 1 και 2) και η χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος του συστήματος των δύο στοιχείων σε σειρά (καμπύλη G). Η καμπύλη 2 είναι η χαρακτηριστική του λιγότερο αποδοτικού στοιχείου.

Η λειτουργική συμπεριφορά του συστήματος περιγράφεται παρακάτω :

- Στο σημείο d το σύστημα βρίσκεται σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος. Το ολικό ρεύμα είναι ίσο με το μηδέν και η τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{Gd} του συστήματος είναι το άθροισμα των τάσεων ανοιχτού κυκλώματος των δύο στοιχείων.
- Σε κάθε σημείο ανάμεσα στα σημεία d και b, π.χ. στο σημείο c, και τα δύο στοιχεία λειτουργούν σαν γεννήτριες.

- Το σημείο b είναι το σημείο τομής της χαρακτηριστικής του συστήματος και της χαρακτηριστικής του πιο αποδοτικού στοιχείου. Η αντίσταση φορτίου που αντιστοιχεί σ' αυτό το σημείο λειτουργίας είναι η R_{cs} . Η χαρακτηριστική ευθεία της αντίστασης αυτής φαίνεται στο σχήμα. Στο σημείο αυτό το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο διαρρέεται από το ρεύμα βραχυκύκλωσής του και δεν είναι ούτε γεννήτρια ούτε καταναλωτής ισχύος.

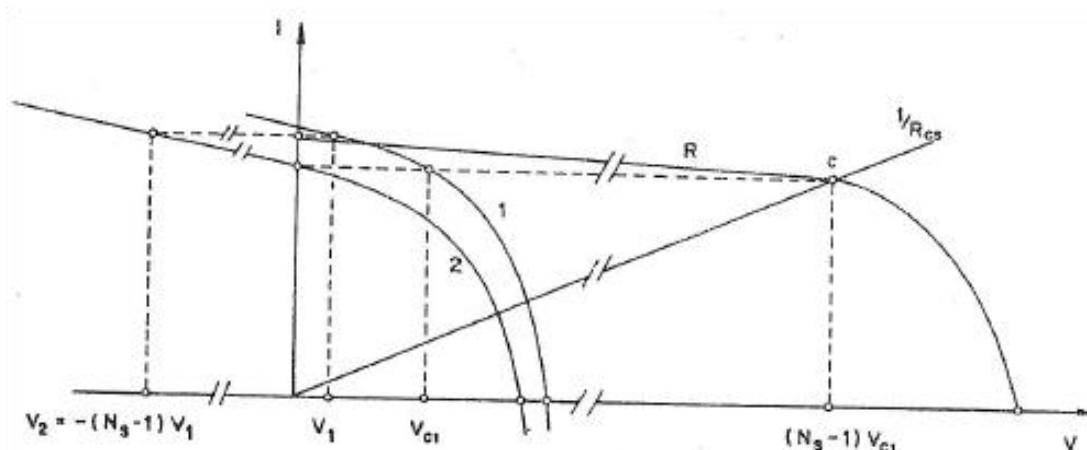


Σχήμα 2.2.2.1: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος δύο διαφορετικών φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά.

- Αν η αντίσταση του φορτίου γίνει μικρότερη από R_{cs} τότε το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται μεταξύ των σημείων a και b. Στην περιοχή αυτή το πιο αποδοτικό στοιχείο λειτουργεί σαν γεννήτρια ενώ το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο λειτουργεί σαν καταναλωτής ισχύος. Η ισχύς που παράγεται, στο πιο αποδοτικό στοιχείο καταναλώνεται από το φορτίο και από το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο. Το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο θερμαίνεται συνεχώς και όταν η θερμοκρασία του φτάσει πάνω από το όριο αντοχής του, καταστρέφεται. Ένα στοιχείο που λειτουργεί σαν καταναλωτής ισχύος συνδεδεμένο με άλλα στοιχεία που λειτουργούν σαν γεννήτριες, ονομάζεται θερμό σημείο (hot spot).

- Το σημείο a της χαρακτηριστικής αντιστοιχεί στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του συστήματος.

Στο σχήμα 2.2.2.2 φαίνεται η χαρακτηριστική ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου (καμπύλη 1), ενός λιγότερα αποδοτικού στοιχείου (καμπύλη 2) και η χαρακτηριστική ενός συστήματος που αποτελείται από N στοιχεία από τα οποία τα $N-1$ είναι όμοια και έχουν χαρακτηριστική ίδια με αυτήν της καμπύλης 1. Τώρα, για να λειτουργήσει το σύστημα στην περιοχή όπου το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο καταναλώνει ισχύ, πρέπει η αντίσταση του φορτίου να γίνει πολύ μικρή.



Σχήμα 2.2.2.2: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος N φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά. Τα $N-1$ είναι όμοια και έχουν τη χαρακτηριστική 1. Το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο έχει τη χαρακτηριστική 2.

2.3 Φωτοβολταϊκά στοιχεία σε παράλληλη σύνδεση

2.3.1 Όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία σε παράλληλη σύνδεση

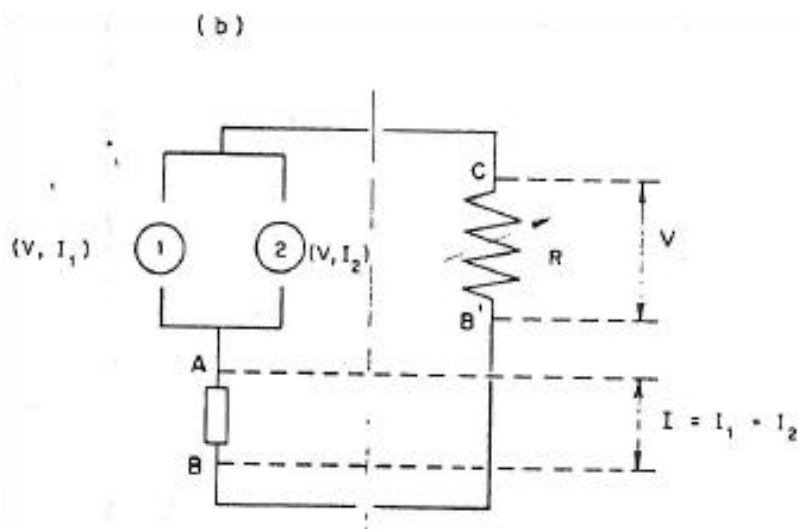
Στο σχήμα 2.3.1.1 φαίνονται δύο όμοια Φ/Β στοιχεία σε παράλληλη σύνδεση, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα μεταβλητό φορτίο R. Στην διάταξη αυτή η τάση είναι ίδια και στα δύο στοιχεία, και το ρεύμα στο φορτίο ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων των δύο στοιχείων. Ανάμεσα στα σημεία A και B του κυκλώματος είναι τοποθετημένο ένα αμπερόμετρο.

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος στα άκρα του συστήματος των δύο όμοιων στοιχείων είναι ίση με την τάση ανοιχτού κυκλώματος του ενός στοιχείου:

$$I = 0, \quad V_{oc} = V_{oc1} = V_{oc2}$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ($R=0$) οι τάσεις στα άκρα των στοιχείων είναι μηδέν και το ρεύμα βραχυκύκλωσης ίσο με το διπλάσιο του ρεύματος βραχυκύκλωσης του ενός στοιχείου:

$$V = V_1 = V_2 = 0, \quad I_{sc} = 2I_{sc1} = 2I_{sc2}$$



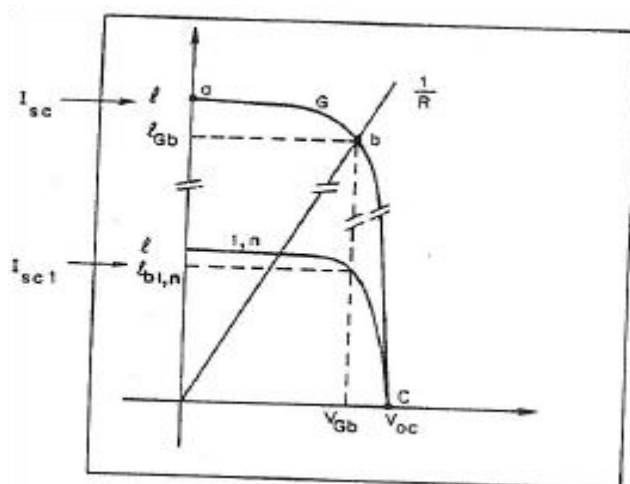
Σχήμα 2.3.1.1: Δύο φωτοβολταϊκά στοιχεία σε παράλληλη σύνδεση.

Και τα δύο στοιχεία λειτουργούν σαν γεννήτριες και η ισχύς στο καθένα είναι θετική. Η χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος του συστήματος των δύο όμοιων

στοιχείων προέρχεται από τις χαρακτηριστικές του καθενός με πρόσθεση των ρευμάτων για την ίδια τιμή τάσης. Στο σχήμα 2.2.3.2 φαίνεται η χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος του συστήματος. Ο δείκτης G στα σύμβολα του σχήματος δείχνει ότι τα μεγέθη αυτά είναι μεγέθη ενός συστήματος Φ/Β στοιχείων, όπου τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα με οποιοδήποτε τρόπο. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η χαρακτηριστική του ενός στοιχείου. Το σημείο b είναι το σημείο μέγιστης ισχύος όπου:

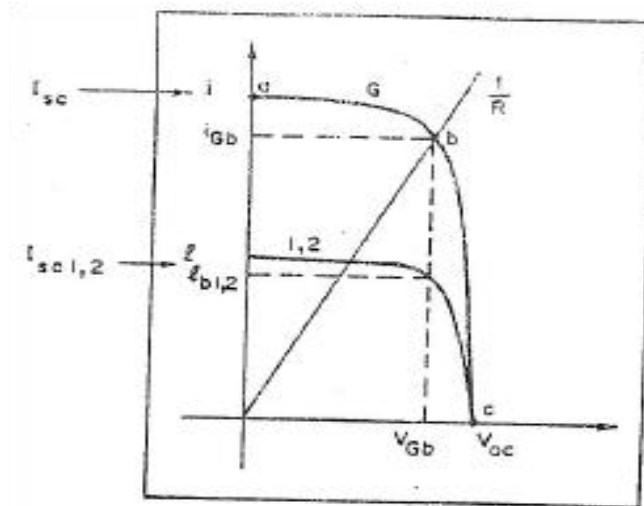
$$I_{Gm} = I_{m1} + I_{m2} = 2I_m \quad \text{και} \quad V_{Gm} = V_{m1} = V_{m2}$$

Η ολική μέγιστη ισχύς στο φορτίο είναι διπλάσια από τη μέγιστη ισχύ του κάθε στοιχείου.



Σχήμα 2.3.1.2: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος δύο όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση.

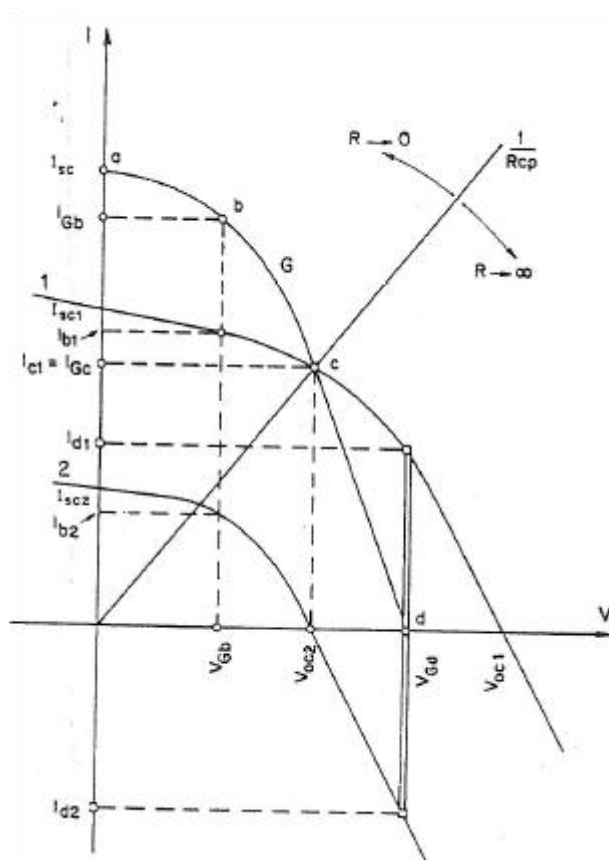
Με την ίδια λογική γίνεται και η ανάλυση τού κυκλώματος με N όμοια Φ/Β στοιχεία σε παράλληλη σύνδεση. Στο σχήμα 2.3.1.3 φαίνεται η χαρακτηριστική N όμοιων Φ/Β στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση. Η τάση είναι ίδια σε όλα τα στοιχεία ενώ το ρεύμα στο φορτίο είναι ίσα με το άθροισμα των ρευμάτων των στοιχείων. Η μέγιστη ισχύς στο φορτίο είναι ίση με N φορές τη μέγιστη ισχύ του ενός στοιχείου.



Σχήμα 2.3.1.3: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος N όμοιων φωτοβολταϊκών στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση.

2.3.2 Διαφορετικά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε παράλληλη σύνδεση

Στο σχήμα 2.3.2.1 φαίνονται οι χαρακτηριστικές Τάσης - Ρεύματος δύο διαφορετικών Φ/Β στοιχείων (καμπύλες 1 και 2) και η χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος του συστήματος των δύο στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση (καμπύλη G). Η καμπύλη 2 είναι η χαρακτηριστική του λιγότερο αποδοτικού στοιχείου.



Σχήμα 2.3.2.1: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος δύο διαφορετικών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση.

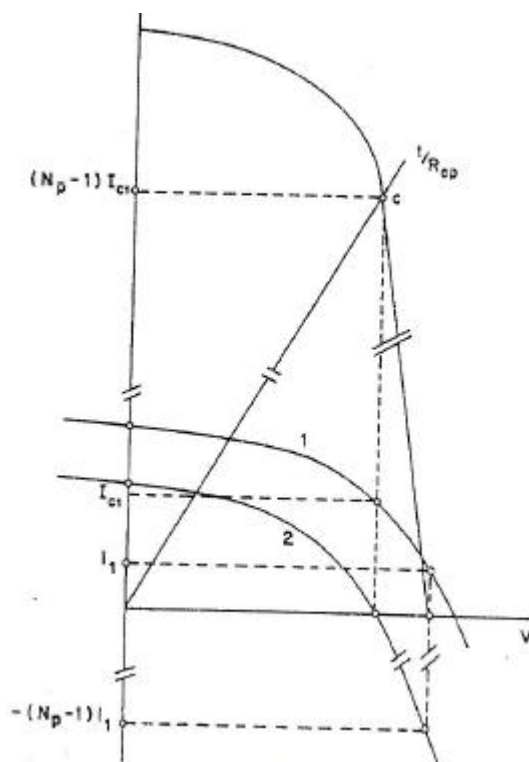
Η λειτουργική συμπεριφορά του συστήματος περιγράφεται παρακάτω :

- Στο σημείο a η αντίσταση φορτίου είναι μηδέν και τα στοιχεία είναι βραχυκυκλωμένα:

$$V = 0, \quad I_{Gsc} = I_{Gsc1} + I_{Gsc2}$$

- Στα σημεία μεταξύ των a και c., π.χ. στο σημεία b, και τα δύο στοιχεία λειτουργούν σαν γεννήτριες.
- Το σημείο c είναι το σημείο τομής της χαρακτηριστικής του συστήματος με τη χαρακτηριστική του περισσότερο αποδοτικού στοιχείου. Στο σημείο αυτό λειτουργεί το σύστημα όταν η αντίσταση φορτίου είναι ίση με R_{cp} . Στο σημείο αυτό το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο δεν είναι ούτε γεννήτρια ούτε καταναλωτής ισχύος.
- Αν η αντίσταση του φορτίου γίνει μεγαλύτερη από R_{cp} τότε το σημείο λειτουργίας του συστήματος βρίσκεται μεταξύ των σημείων c και d. Στην περιοχή αυτή το πιο αποδοτικό στοιχείο λειτουργεί σαν γεννήτρια ενώ το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο λειτουργεί σαν καταναλωτής ισχύος. Η ισχύς που παράγεται στο πιο αποδοτικό στοιχείο καταναλώνεται, από το φορτίο και από το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο. Το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο είναι ένα θερμό σημείο.

- Το σημείο d της χαρακτηριστικής αντιστοιχεί σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, οπότε το ρεύμα στην έξοδο του συστήματος είναι μηδέν.



Σχήμα 2.3.2.2: Χαρακτηριστική Τάσης-Ρεύματος N φωτοβολταϊκών στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση. Από τα στοιχεία αυτά τα $N-1$ είναι όμοια και έχουν τη χαρακτηριστική 1. Το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο έχει τη χαρακτηριστική 2.

Στο σχήμα 2.3.2.2 φαίνεται η χαρακτηριστική ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου (καμπύλη 1), ενός λιγότερο αποδοτικού στοιχείου (καμπύλη 2) και η χαρακτηριστική ενός συστήματος που αποτελείται από N στοιχεία από τα οποία τα $N-1$ είναι όμοια και έχουν χαρακτηριστική ίδια με αυτήν της καμπύλης 1. Τώρα, για να λειτουργήσει το σύστημα στην περιοχή όπου το λιγότερο αποδοτικό στοιχείο καταναλώνει ισχύ, πρέπει η αντίσταση του φορτίου να γίνει πολύ μεγάλη.

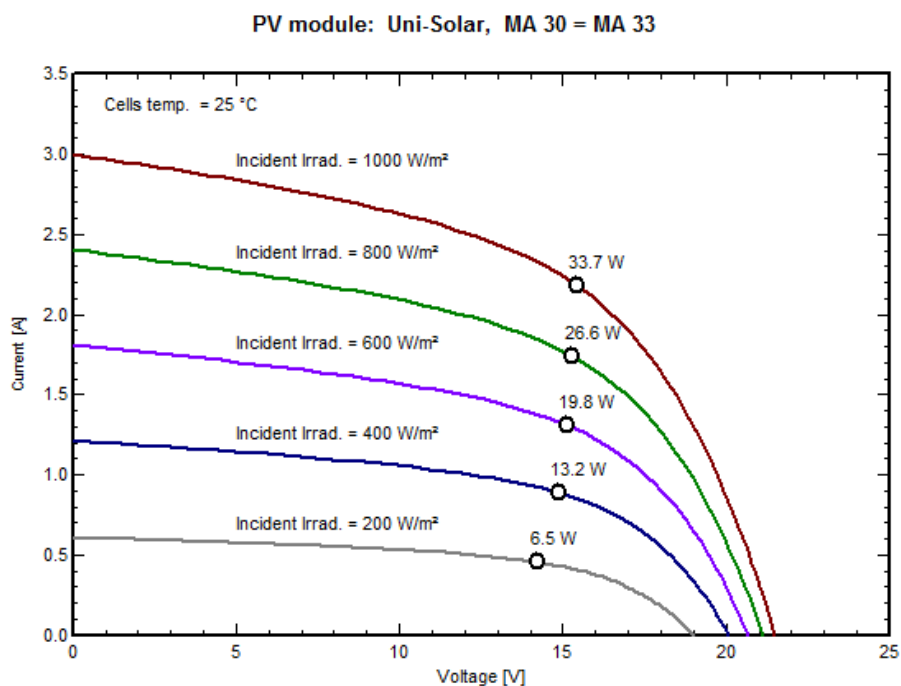
2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία και απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και κατ' επέκταση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, δεν λαμβάνει υπόψη μία σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων που πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετάζονται κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος. Αυτοί οι παράγοντες επίδρασης μπορεί να σχετίζονται με το ίδιο το πλαίσιο ή με τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς αναλύονται στη συνέχεια.

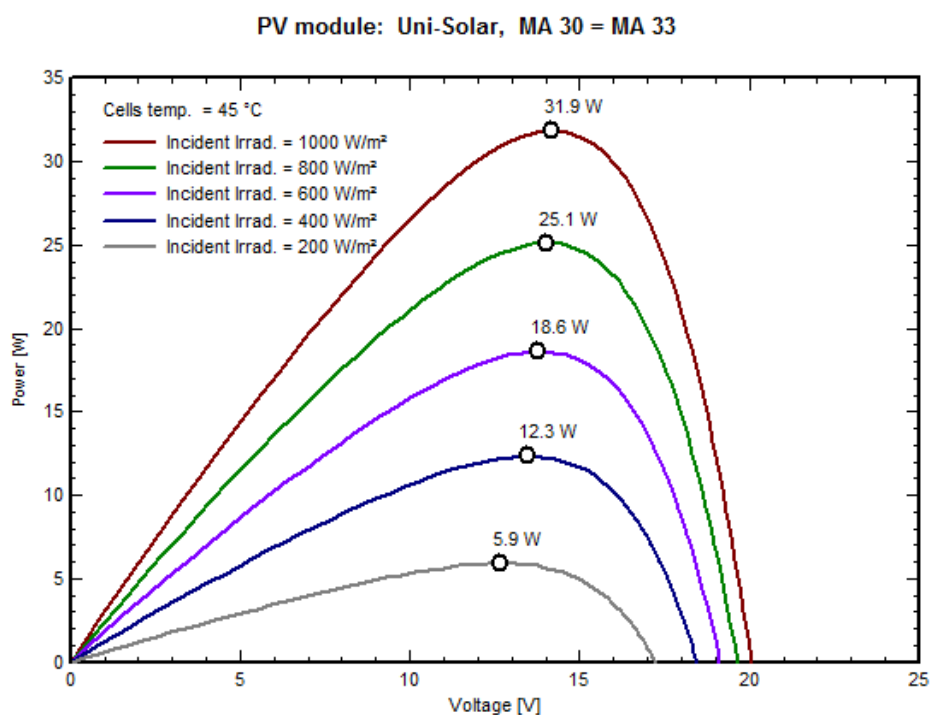
2.4.1 Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ετήσια βάση, είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Η 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 τα μεγαλύτερα λαμβανόμενα ποσά της ηλιακής ενέργειας τα πλαίσια πρέπει να προσανατολίζονται κατάλληλα και να είναι τοποθετημένα στη βέλτιστη γωνία κλίσης. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και ως εκ τούτου, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ.

Στα επόμενα σχήματα προσημειώθηκαν στο πρόγραμμα PVSYST οι χαρακτηριστικές I-V και P-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου 33W/12V για διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας (1000W/m² , 800 W/m² , 600 W/m² ,400 W/m² και 200 W/m²).



Σημια 2.4.1.1: Χαρακτηριστικές I-V για διάφορες τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας



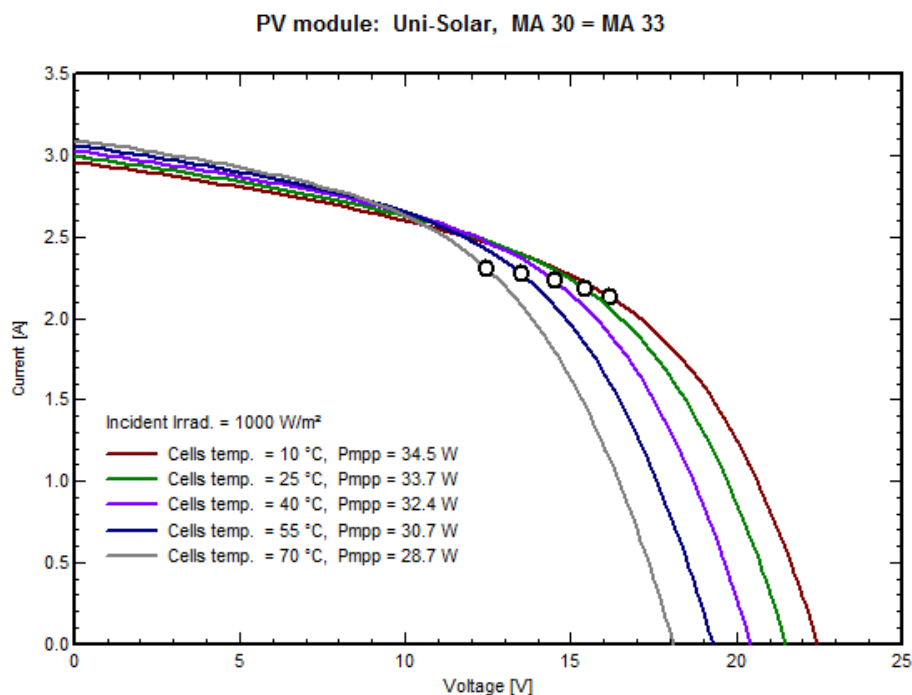
Σημια 2.4.1.2: Χαρακτηριστικές P-V για διάφορες τιμές έντασης ηλιακής ακτινοβολίας

Παρατηρείται ότι η λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, και η συμπεριφορά που παρατηρείται είναι η εξής:

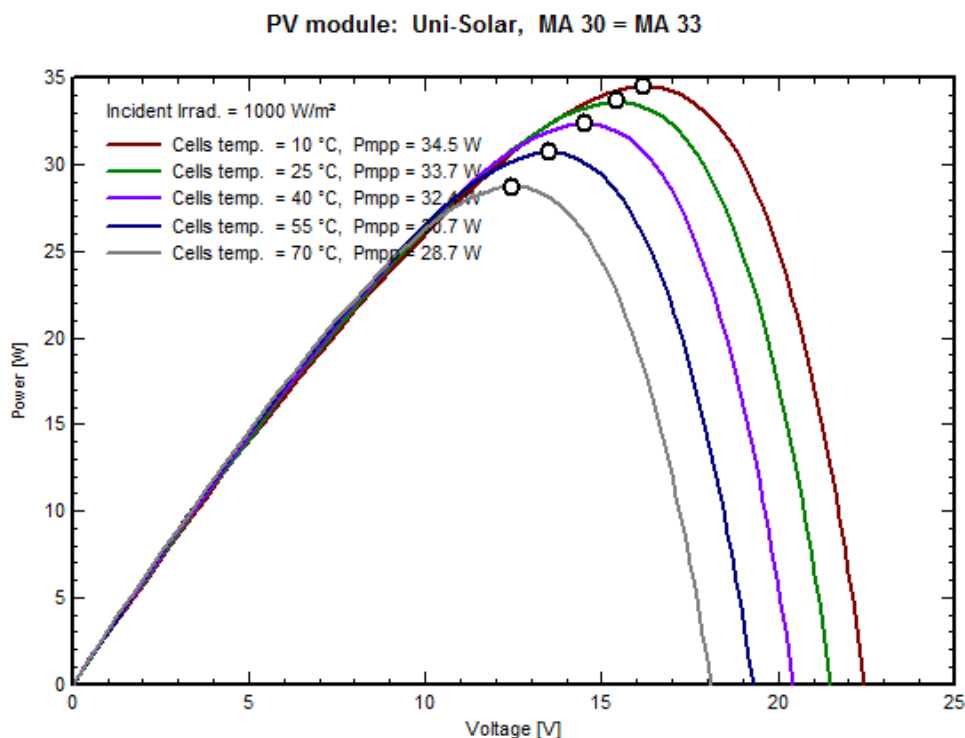
- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνει γραμμικά με την αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυξάνει λογαριθμικά.
- Αντίστοιχα μετατοπίζεται και το σημείο μέγιστης ισχύος και αυξάνεται η αποδιδόμενη μέγιστη ισχύς με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας.

2.4.2 Θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών, επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Ο βαθμός απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία, αναφέρονται σε δοκιμές που έγιναν σε θερμοκρασίες κυττάρου 25°C. Τις περισσότερες φορές όμως, η θερμοκρασία του στοιχείου υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας διαφέρουν σημαντικά κυρίως τους θερινούς μήνες. Οι μεγάλες θερμοκρασίες κυττάρου έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς δυναμικού του φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχημα 2.4.2.1: Χαρακτηριστικές I-V για διάφορες τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας



Σχημα 2.4.2.2: Χαρακτηριστικές P-V για διάφορες τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας

Υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας μειώνουν της απόδοση και την αποδιδόμενη μέγιστη ισχύ. Στα προηγούμενα σχήματα προσημειώθηκαν στο πρόγραμμα PVSYST οι χαρακτηριστικές I-V και P-V του ίδιου με την προηγούμενη παράγραφο φωτοβολταϊκού πλαισίου 33W/12V για δεδομένη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (1000W/m²) και για διάφορες τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας (10°C, 25°C, 40°C, 55°C και 70°C).

2.4.3 Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του στοιχείου καθότι μεγάλες ταχύτητες, έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Όταν οι άνεμοι είναι βόρειοι είναι συνήθως κρύοι, με αποτέλεσμα τα φωτοβολταϊκά να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν εάν υπήρχε άπνοια, υπό τα ίδια ποσοστά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αντίθετα συμβαίνει για θερμούς ανέμους.

2.4.4 Ρύπανση

Η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί από ρύπανση της επιφάνειάς τους, από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° (κάθετοι) για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη. Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια βρίσκεται σε μία περιοχή που εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

2.4.5 Γήρανση

Λόγω της φθοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων (και των υπολοίπων μερών ενός φωτοβολταϊκού συστήματος), αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μία μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, που συνήθως υπολογίζεται από 1% ως 2% για κάθε έτος.

2.4.6 Σκίαση

Ένας άλλος παράγοντας επίδρασης της DC ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων όπως παρακείμενα κτήρια, βλάστηση κολώνες κλπ, είτε σε περιπτώσεις περιορισμένης έκτασης εγκατάστασης όπως για παράδειγμα στις στέγες κτηρίων, όπου προκαλείται σκίαση από καμινάδες, κεραίες ή ακόμα και από τη μία σειρά στην επόμενη.

Μια χαρακτηριστική εικόνα σκίασης σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σε στέγη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

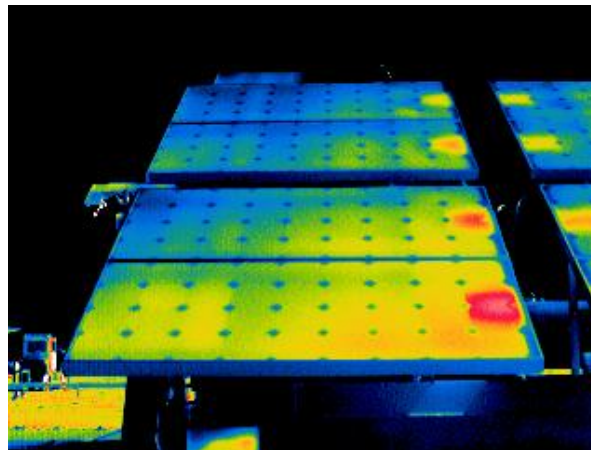


Σχήμα 2.4.6.1: Μερική σκίαση φωτοβολταϊκών σε στέγη

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, η σκίαση ή η βλάβη ενός και μόνο φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα μπορούσε να επιφέρει ολική αχρήστευση του πλαισίου. Ένα σκιασμένο κύτταρο, συμπεριφέρεται κατά βάση όπως η απλή διόδος p-n, η οποία, όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τα υπόλοιπα υγιή κύτταρα μία υψηλή ανάστροφη τάση. Αν τα υπόλοιπα φωτιζόμενα ηλιακά στοιχεία του πλαισίου είναι μεγάλου πλήθους, αυτή η τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας την καταστροφή της.

Στην πράξη, για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, το σκιασμένο κύτταρο λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα. Παρατεταμένος σκιασμός ενός στοιχείου σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου στοιχείου.

Το φαινόμενο αυτό αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο και είναι γνωστό ως φαινόμενο hot spot (κατάσταση “θερμής κηλίδας”). Παρακάτω φαίνεται μια θερμική εικόνα και αναπαριστά αυτό το φαινόμενο.



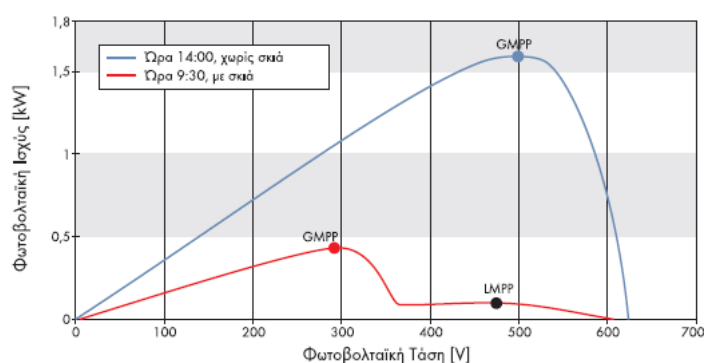
Σχήμα 2.4.6.2: Φαινόμενο θερμής κηλίδας

Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους (διόδοι παράκαμψης), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των κυττάρων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του

φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμα και αν κάποιο φωτοβολταϊκό στοιχείο του υστερεί ή καταστραφεί.

Το φαινόμενο αυτό επιδρά αρνητικά στην απόδοση ενός φ/β πλαισίου με αποτέλεσμα την μείωση της αποδιδόμενης ισχύος. Κάθε φωτοβολταϊκή γεννήτρια έχει ένα ξεχωριστό σημείο λειτουργίας, στο οποίο μπορεί να δώσει τη μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύ, το σημείο μέγιστης ισχύος. Το πόσο μεγάλη θα είναι η ισχύς αυτή, εξαρτάται πρωτίστως από το ύψος της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε περίπτωση σκίασης μεμονωμένων φωτοβολταϊκών μονάδων μίας στοιχειοσειράς του εσωτερικού της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, τότε αλλάζουν παρά πολύ τα ηλεκτρονικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας που πλέον διαθέτει περισσότερα του ενός και διαφορετικά μεταξύ τους "καλά" σημεία λειτουργίας, το ολικό σημείο μέγιστης ισχύος (GMPP) και το τοπικό σημείο μέγιστης ισχύος (LMPP).

Ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα ισχύος-τάσης στην περίπτωση με σκιά και χωρίς σκιά φαίνεται παρακάτω όπου ξεχωρίζουν τα δυο σημεία μέγιστης ισχύος στην περίπτωση με σκιά.

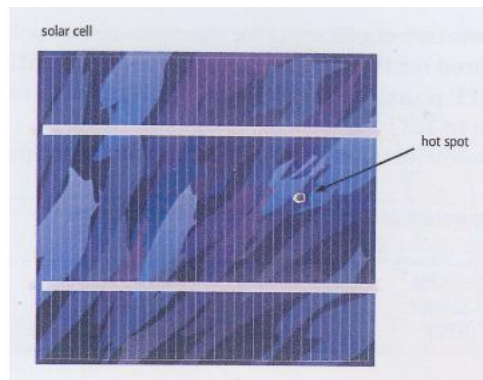


Σχήμα 2.4.6.3: P-V χαρακτηριστικές φ/β γεννήτριας χωρίς και με μερική σκίαση πλαισίων

Το φαινόμενο των θερμών κηλίδων μπορεί να εμφανιστεί από αστοχία υλικού ενός από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που απαρτίζουν μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, από λανθασμένη σύνδεση της πολικότητας των στοιχείων ή από μερική σκίαση. Πάντως και στις τρεις περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι ακριβώς τα ίδια, δηλαδή οδηγούμαστε στην υπερθέρμανση των “κακών” φωτοβολταϊκών στοιχείων και τελικά στην ολική τους καταστροφή. Το φαινόμενο λοιπόν των θερμών κηλίδων (hot – spot effect) συμβαίνει όταν υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που δίνει χαμηλό ρεύμα σε σχέση με τα υπόλοιπα που είναι ενωμένα σε μια σειρά.

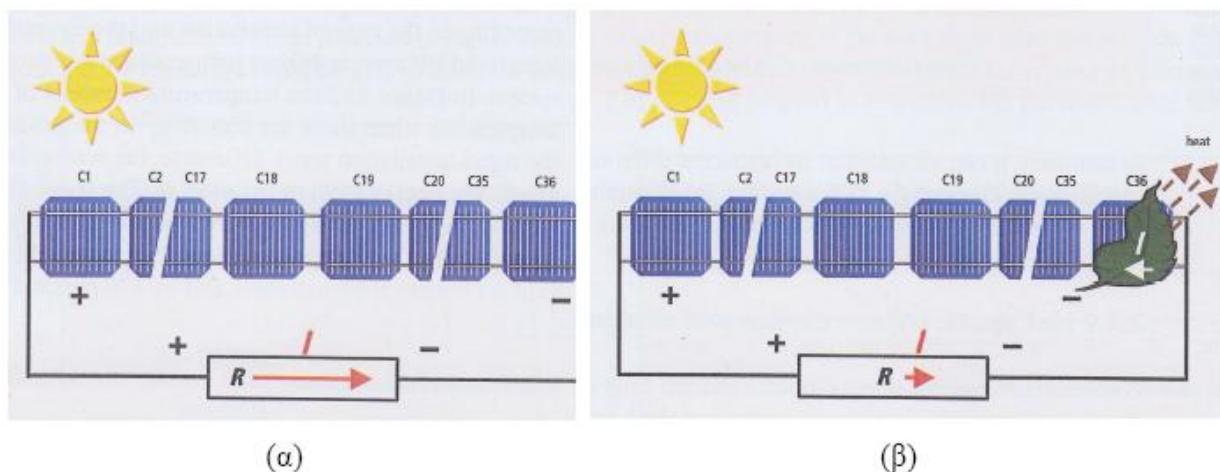
2.5 Μερική σκίαση φ/β στοιχείων

Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, σκίαση ενός Φ/Β στοιχείου είναι ικανή να προκαλέσει αύξηση της θερμότητας του σε τέτοιο βαθμό έτσι ώστε να προκληθούν μόνιμες βλάβες στον ίδιο τον ημιαγωγό. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως θερμή κηλίδα (hot spot) και φαίνεται έντονα στο ακόλουθο σχήμα:



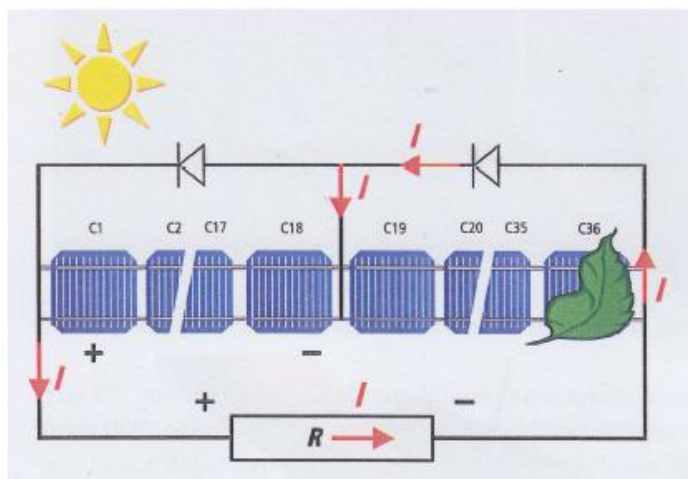
Σχήμα 2.5.1: Σχηματισμός θερμής κηλίδας

Η δημιουργία μιας θερμής κηλίδας μειώνει ελάχιστα την ισχύ αιχμής του Φ/Β στοιχείου, αυξάνει όμως την πιθανότητα καταστροφής του κάθε φορά που το στοιχείο σκιάζεται. Στο σχήμα 2.5.2(α) βλέπουμε την ομαλή λειτουργία 36 Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά υπό φορτίο αντίστασης R .



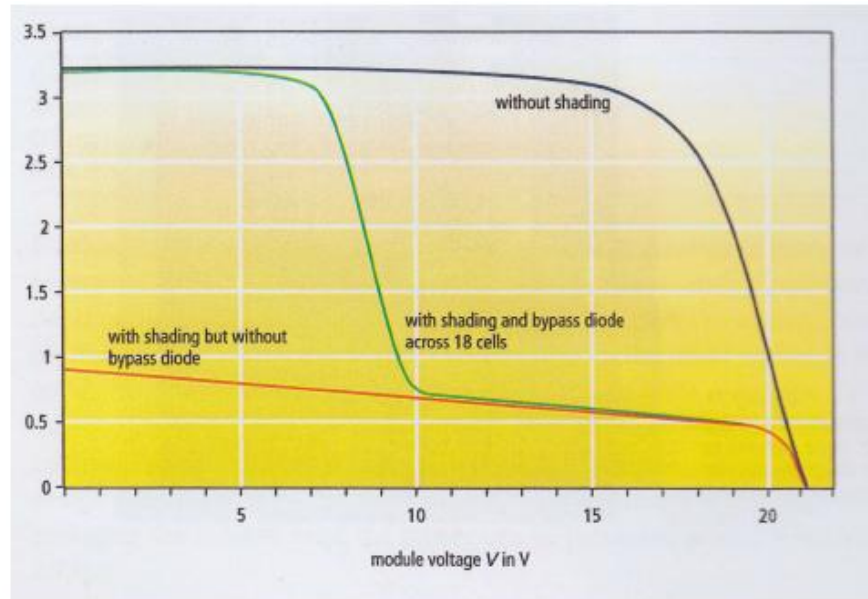
Σχήμα 2.5.2: (α) Ροή ρεύματος σε Φ/Β πλαίσιο 36 στοιχείων όταν (α) δεν υπάρχει σκίαση σε κάποιο στοιχείο και (β) ένα στοιχείο είναι σκιασμένο.

Αν για κάποιο λόγο σκιαστεί ένα στοιχείο, αυτόματα αυτό συμπεριφέρεται σαν ηλεκτρικό φορτίο πολύ μεγάλης αντίστασης και σταματά να παράγει ενέργεια. Το ρεύμα που ρέει μέσα από αυτό έχει ως συνέπεια την αντιστροφή της πολικότητάς της τάσης στα άκρα του. Η ροή αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα και αν η ένταση του ρεύματος είναι αρκετά μεγάλη έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμής κηλίδας. Η παρεμπόδιση του φαινομένου αυτού γίνεται με τη χρήση διόδου παράκαμψης.



Σχήμα 2.5.3: Χρήση διόδου παράκαμψης για αποφυγή δημιουργίας θερμής κηλίδας

Το σκιασμένο στοιχείο παρακάμπτεται και το ρεύμα ρέει μέσω της διόδου όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5.3. Βλέπουμε ότι η διάδος αυτή συνδέεται παράλληλα με τα στοιχεία C19 έως C36, επομένως, αν για κάποιο λόγο υπάρξει σκίαση, για παράδειγμα στο C36, παράκαμψη όλων αυτών των στοιχείων συνεπάγεται αυτόματα ότι η παραγωγή του πλαισίου θα μειωθεί στο μισό. Πιο κατανοητό γίνεται το φαινόμενο μέσω της μεταβολής της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V.



Σχήμα 2.5.4: Μεταβολή της καμπύλης I-V του πλαισίου σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας

Παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια της σκίασης και με τη χρήση διόδου, αλλάζει το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος του πλαισίου. Η V_{mpp} γίνεται σχεδόν μισή κάτι που μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στο σύστημα ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος του μετατροπέα

2.5.1 Επίδραση της σκίασης σε σχέση με τη συνδεσμολογία των Φ/B πλαισίων και το σύστημα ανίχνευσης μέγιστης ισχύος του μετατροπέα

Όπως αναφέρθηκε πιο πριν, σκίαση ενός τμήματος του Φ/B πλαισίου έχει ως συνέπεια τη μεταβολή της καμπύλης I-V. Παρόμοιο φαινόμενο συμβαίνει όταν τα πλαίσια είναι συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα. Μεταβολή στην καμπύλη συνεπάγεται και μετατόπιση του σημείου μέγιστης λειτουργίας της συστοιχίας. Έτσι, το σημείο λειτουργίας του μετατροπέα μετατοπίζεται συνεχώς ώστε να ανιχνευτεί το νέο σημείο μέγιστης ισχύος (της σκιασμένης συστοιχίας). Η διαδικασία αυτή σχετίζεται άμεσα με τις απώλειες ισχύος και ενέργειας μιας σκιασμένης συστοιχίας σε σχέση με μια ασκίαστη.

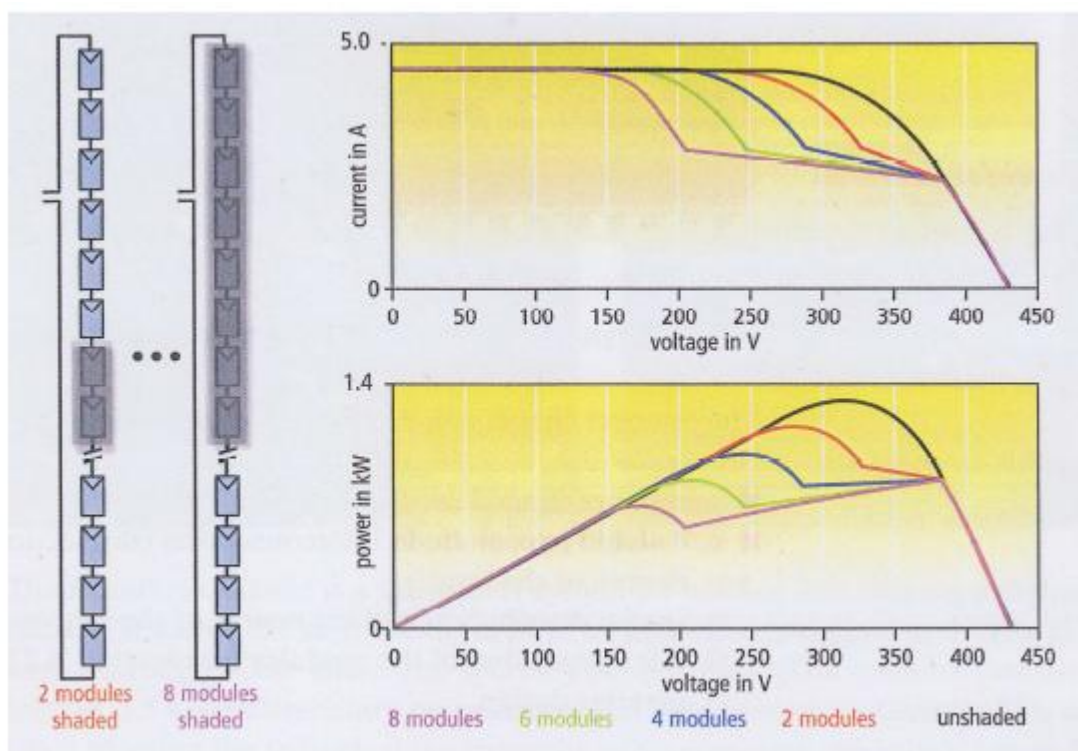
Μια επιστημονική προσέγγιση του προβλήματος της σκίασης έχει διεξαχθεί στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Βερολίνου για διάφορες τοπολογίες συστημάτων. Με προσομοίωση στο πρόγραμμα PSpice προσδιορίστηκαν οι καμπύλες I-V καθώς και οι

απώλειες ενέργειας σε διαφορετικές περιπτώσεις σκίασης. Μια Φ/Β συστοιχία 20 πλαισίων συνδεδεμένα σε σειρά συγκρίνεται με μια άλλη που αποτελείται από 4 στοιχειοσειρές των 5 πλαισίων. Με πυκνότητα ακτινοβολίας $1000\text{W}/\text{m}^2$, δύο, τέσσερα, έξι και οκτώ πλαίσιο σκιάζονται μειώνοντας την πυκνότητα ακτινοβολίας στα $500\text{W}/\text{m}^2$. Αν η συνδεσμολογία είναι εν σειρά, η μεταβολή της καμπύλης I-V δεν εξαρτάται από το ποιο πλαίσιο σκιάζεται σε αντίθεση με την παράλληλη συνδεσμολογία όπου διαφορετικές περιπτώσεις σκίασης επιδρούν και διαφορετικά στη μεταβολή της καμπύλης.

Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύονται με λεπτομέρεια οι δύο περιπτώσεις που περιγράψαμε. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε καμπύλες I-V με σκίαση εμφανίζονται δύο διαφορετικά μέγιστα. Ένα για μικρές και ένα για μεγάλες τάσεις. Το βασικό θέμα είναι κατά πόσο τα μέγιστα αυτά εμφανίζονται έντονα στις καμπύλες ή όχι αλλά και σε ποιο από τα δύο μέγιστα μετατοπίζεται το σημείο λειτουργίας του μετατροπέα.

2.5.2 Σύνδεση πλαισίων εν σειρά

Η σκίαση και τα αποτελέσματά της στην καμπύλη I-V φαίνονται στο σχήμα 2.5.2.1. Στη συγκεκριμένη τοπολογία εμφανίζονται δύο μέγιστα τα οποία είναι πιθανά σημεία λειτουργίας του μετατροπέα αν βρίσκονται μέσα στο παράθυρο ανίχνευσης MPP. Το ποιο από τα δύο τελικά θα επιλεγεί εξαρτάται από τη μεταβολή της σκιάς σε σχέση με τον χρόνο και από το ηλεκτρονικό σύστημα ανίχνευσης. Στην αρχή τα πλαίσια είναι ασκίαστα και ο μετατροπέας λειτουργεί στο μοναδικό μέγιστο που παρουσιάζει η καμπύλη. Καθώς η σκιά εμφανίζεται και σταδιακά αυξάνει, το αριστερό μέγιστο, το οποίο αρχικά ήταν το σημείο λειτουργίας, ολισθαίνει προς χαμηλότερες τάσεις. Η λειτουργία του μετατροπέα παραμένει στο αριστερό μέγιστο ακόμα και αν το σημείο μέγιστης ισχύος βρίσκεται στο δεξί.



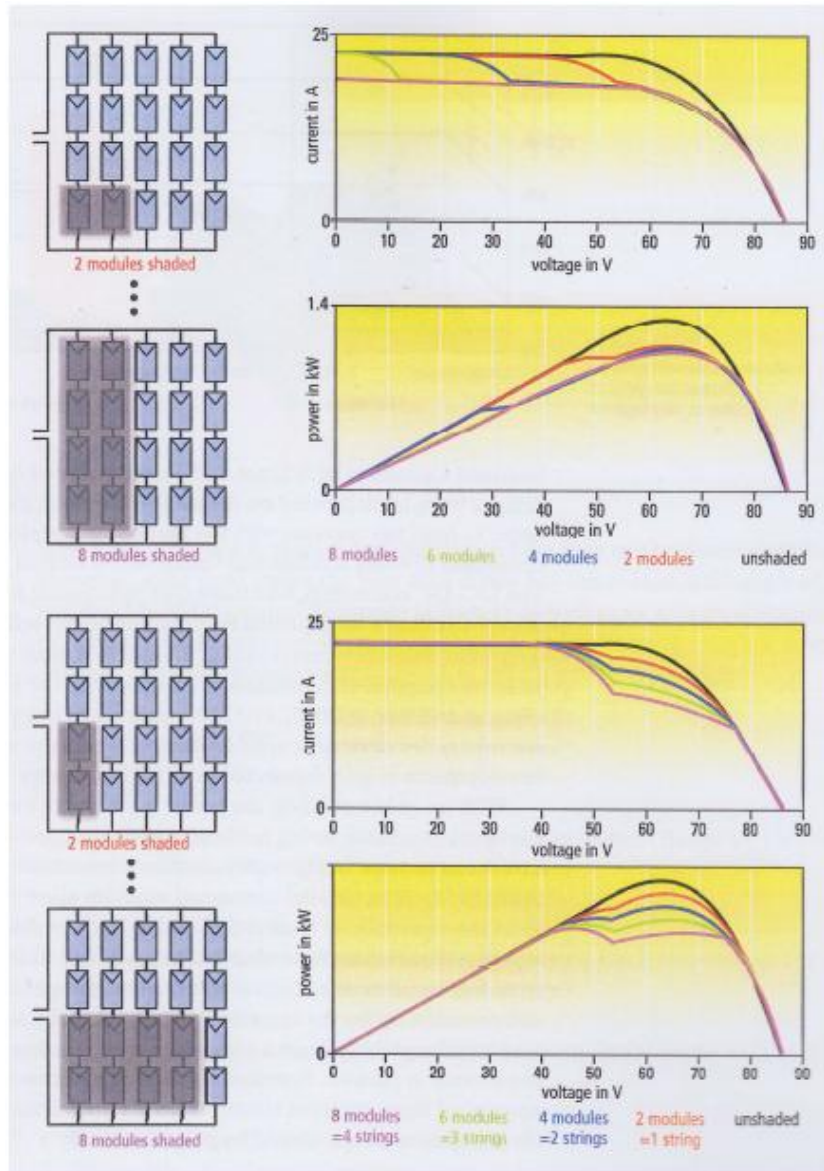
Σχήμα 2.5.2.1: Σύνδεση πλαισίων εν σειρά και επίδραση της σκίασης στην καμπύλη I-V

Κατά τη διάρκεια των πρωινών ωρών υπάρχει ήδη σκίαση στα πλαίσια. Καθώς ενεργοποιείται ο μετατροπέας, το σύστημα MPPT αρχίζει την ανίχνευση από την τάση ανοιχτού κυκλώματος προς το δεξί μέγιστο της καμπύλης. Το σημείο λειτουργίας του

θα παραμείνει σε αυτό το μέγιστο ανεξάρτητα αν αυτό είναι το σημείο MPP. Η τάση στο δεξί μέγιστο είναι ελαφρώς μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή σε ασκίαστα πλαίσια

2.5.3 Παράλληλη σύνδεση πλαισίων

Για παράλληλη συνδεσμολογία, διαφορετικός τρόπος σκίασης προκαλεί τελείως διαφορετικά αποτελέσματα στις καμπύλες. Τα πιο ευνοϊκά αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν τα σκιασμένα πλαίσια βρίσκονται στην ίδια στοιχειοσειρά. Η τάση στην οποία βρίσκεται το αριστερό μέγιστο είναι συνήθως η μισή, ή και μικρότερη, της τάσης Voc με αποτέλεσμα να βρίσκεται έξω από την περιοχή ανίχνευσης του μετατροπέα. Επιπλέον είναι ελάχιστα διακριτό με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να λειτουργεί κατά κανόνα στο δεξί μέγιστο που συνήθως είναι και το MPP.

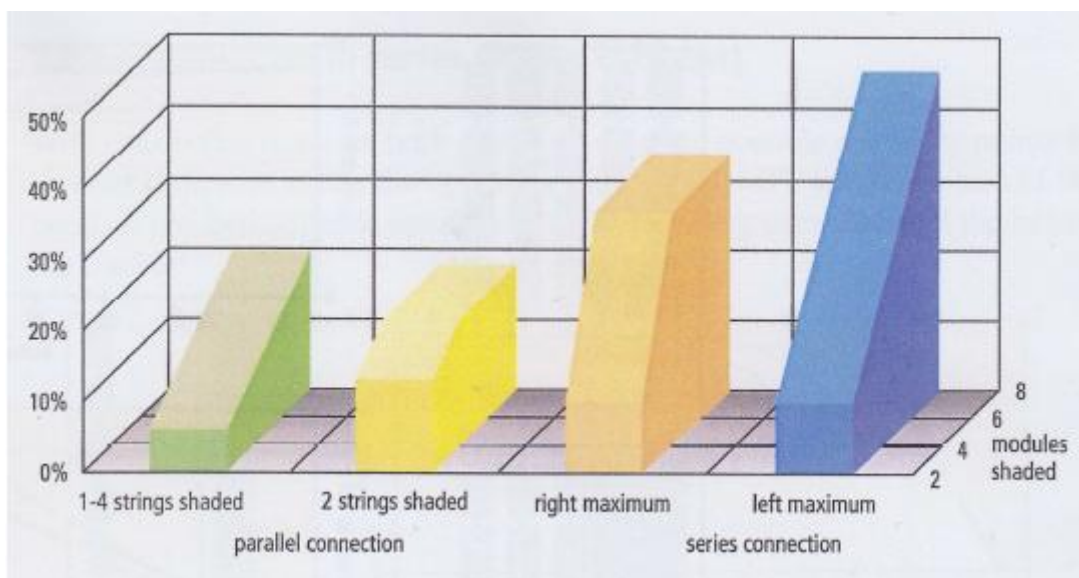


Σχήμα 2.5.3.1: Περιπτώσεις σκίασης και χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για παράλληλη σύνδεση πλαισίων

2.5.4 Σύγκριση των παραπάνω τοπολογιών

Με σύνδεση εν σειρά, και τα δύο μέγιστα εμφανίζονται έντονα στην καμπύλη I-V. Όσο πιο λίγα πλαίσια είναι σκιασμένα, τόσο οι τάσεις των δύο μεγίστων βρίσκονται στην περιοχή ανίχνευσης του μετατροπέα. Έτσι, και τα δύο σημεία λειτουργίας πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν. Στην παράλληλη σύνδεση, ο μετατροπέας μπορεί αν ανιχνεύσει αποτελεσματικά μόνο το δεξί μέγιστο διότι το αριστερό εμφανίζεται αμυδρά και σε περιοχή χαμηλής τάσης. Για σκίαση δύο στοιχειοσειρών, ανεξάρτητα εάν έχουν σκιαστεί δύο, τέσσερα, έξι ή οκτώ πλαίσια, οι απώλειες ισχύος

παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες και σε χαμηλότερα επίπεδα από τις εν σειρά απώλειες. Τέλος, αν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στο αριστερό μέγιστο, οι απώλειες αυξάνουν έντονα με κάθε επιπλέον σκιασμένο πλαίσιο σε αντίθεση με το δεξί μέγιστο όπου οι απώλειες είναι σχεδόν σταθερές.

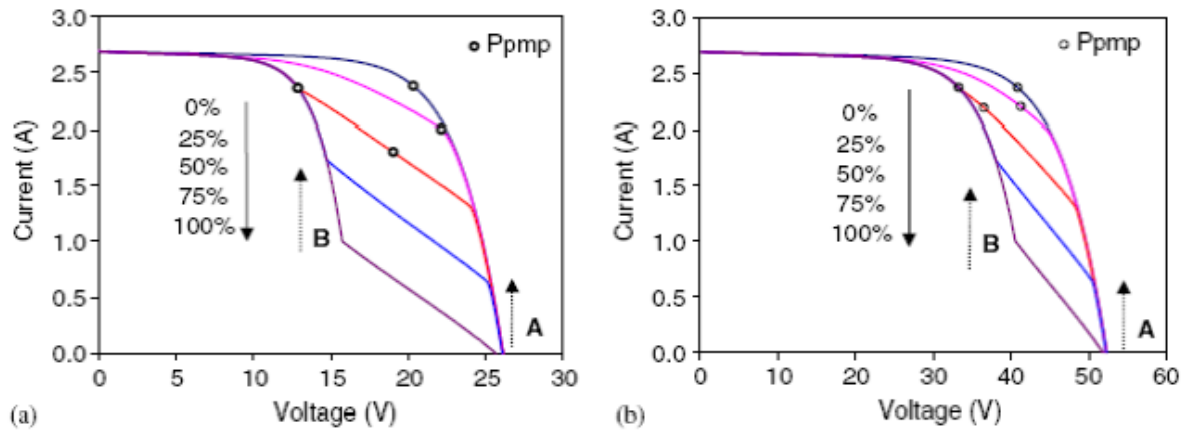


Σχήμα 2.5.4.1: Απώλειες ισχύος λόγω σκίασης στην εν σειρά και στην παράλληλη συνδεσμολογία

Με ελάχιστη ή και καθόλου σκίαση, η απολαβή είναι ανεξάρτητη από τη συνδεσμολογία των πλαισίων. Έτσι, πιο εύκολη και αποδοτική οικονομικά λύση αποτελούν οι μετατροπείς τύπου string. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σχεδόν αδύνατον να μην υπάρχει σκίαση. Εκεί η παράλληλη συνδεσμολογία είναι επιτακτική σε συνδυασμό με την προσεκτική σχεδίαση του Φ/Β σταθμού ώστε να έχουμε σκίαση μόνο σε λίγες στοιχειοσειρές.

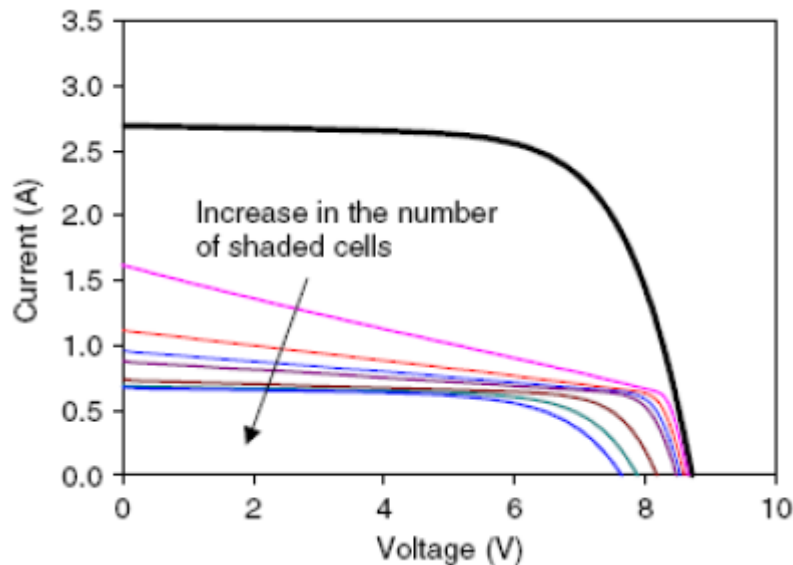
2.5.5 Επίδραση διόδου bypass

Στη συνέχεια μελετώνται οι αντίστοιχες με τις προαναφερθείσες επιδράσεις στην περίπτωση ύπαρξης bypass διόδου. Θεωρείται μια ακολουθία 18 σειριακά συνδεδεμένων στοιχείων, με την υπόθεση ότι ένα από τα στοιχεία σκιάζεται σε ποσοστό 25%, 50%, 75% ή 100%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 2.5.5.1(α,β). Η μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης του σκιασμένου στοιχείου είναι φανερή στο σημείο που οι επιδράσεις σκίασης αρχίζουν να ενεργούν (σημείο Α) και στο σημείο στο οποίο ενεργοποιείται η bypass διάδος (σημείο Β).



Σχήμα 2.5.5.1: Σκίαση ενός στοιχείου με διαφορετικά ποσοστά

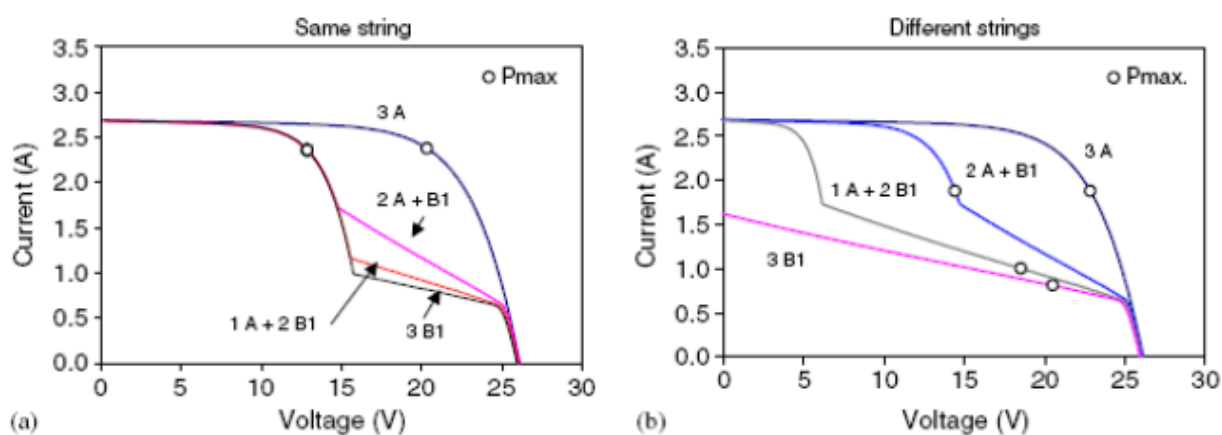
Ένα άλλο επακόλουθο της σκίασης είναι η μετατόπιση του σημείου μέγιστης ισχύος σε τάσεις χαμηλότερες από τις αναμενόμενες για τις εκάστοτε διατάξεις. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη σε περιπτώσεις συστημάτων συνδεδεμένων σε μετατροπείς που ανιχνεύουν το σημείο μέγιστης ισχύος (MPPT), καθώς αυτό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



Σχήμα 2.5.5.2: Επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία 18 στοιχείων

Το σχήμα 2.5.5.2 παρουσιάζει την επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία 18 σειριακά συνδεδεμένων στοιχείων. Η επίδραση αυτή απεικονίζεται στην περίπτωση που συνδέονται περισσότερες ακολουθίες, όπως εκτιμάται στο σχήμα 2.5.5.3. Το σχήμα αυτό δείχνει ένα σύστημα

που αποτελείται από τρεις ακολουθίες των 18 στοιχείων, σε κάθε μια από τις οποίες δύο ή τρία στοιχεία από κάθε ακολουθία σκιάζονται κατά 75%. Η παραμόρφωση της I-V χαρακτηριστικής αυξάνεται με τον αριθμό των σκιασμένων στοιχείων, κάτι που οφείλεται στη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης της ακολουθίας, όταν ο αριθμός των σκιασμένων στοιχείων αυξάνεται. Στην περίπτωση ενός συστήματος που λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, η αύξηση του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε μια ακολουθία δεν έχει καμιά επίδραση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5.5.3, όπου το σημείο μέγιστης ισχύος είναι το ίδιο και για τις τρεις χαρακτηριστικές.



Σχήμα 2.5.5.3: Επίδραση της αύξησης του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων σε ένα σύστημα με 3 ακολουθίες των 18 στοιχείων (α) σκιασμένα στοιχεία στην ίδια ακολουθία (β) σκιασμένα στοιχεία σε διαφορετικές ακολουθίες

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι εντελώς διαφορετικά όταν τα στοιχεία που σκιάζονται ανήκουν σε διαφορετικές ακολουθίες, καθώς σε αυτή την περίπτωση η αύξηση του αριθμού των σκιασμένων στοιχείων προκαλεί μια σημαντική μείωση στο MPP. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 2.5.5.3(β), όπου η μείωση της ισχύος είναι της τάξης του 61% για την περίπτωση στην οποία ίδια επίπεδα σκίασης εμφανίζονται σε όλες τις ακολουθίες της συστοιχίας. Μια τέτοια η περίπτωση θα πρέπει να αποφεύγεται, καθώς προκαλεί σημαντική μείωση στην παραγόμενη ισχύ.

2.6 Πειραματική διάταξη και μετρήσεις για διαφορετικά ποσοστά μερικής σκίασης

Στην πειραματική μας διάταξη χρησιμοποιήθηκε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο τύπου AG SM36-18H1 12V/33W της Siemens αποτελούμενο από 36 φ/β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Στο πλαίσιο αυτό ήταν συνδεδεμένες όλες οι διόδοι παράκαμψης. Οι μετρήσεις έγιναν στην ταράτσα των παλαιών κτιρίων ΗΜΜΥ του ΕΜΠ. Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις ήταν ένα πολυόργανο της Htsolar, το οποίο καταγράφει δεδομένα τάσης, ρεύματος, θερμοκρασίας και έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, από ένα φ/β πλαίσιο και αποδίδει με κατάλληλο πρόγραμμα τις χαρακτηριστικές του.

Από τα δεδομένα του πολυοργάνου σχεδιάστηκαν οι χαρακτηριστικές I-V και P-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτήσει της ποσοστιαίας μερικής σκίασης και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των χαρακτηριστικών αυτών καμπυλών με τις αντίστοιχες θεωρητικές.

Για να επιτευχθεί η ποσοστιαία σκίαση σε ένα από τα φ/β στοιχεία του πλαισίου και να γίνουν οι μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκε μαύρο χαρτόνι κυκλικού σχήματος ώστε να καλύπτει ολόκληρη την επιφάνεια του φ/β στοιχείου, και αντίστοιχου σχήματος χρωματιστές διαφάνειες (πράσινη και μπλε).

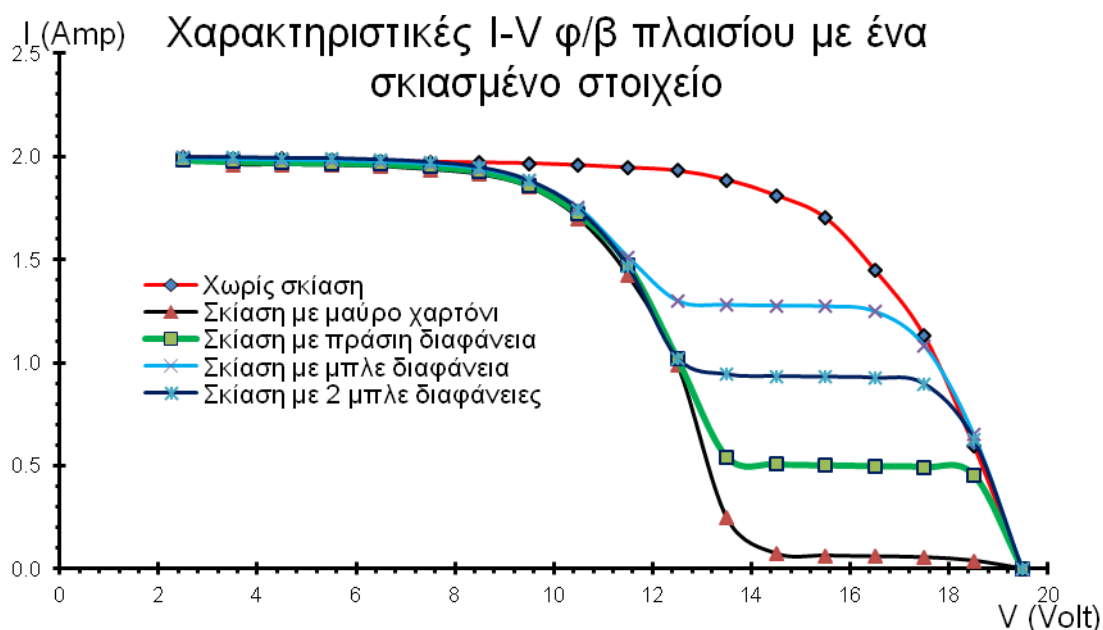
Αρχικά έγιναν μετρήσεις χωρίς να σκιάζεται κάποιο στοιχείο του πλαισίου, συνεχίστηκαν μόνο με το μαύρο χαρτόνι να καλύπτει ένα φ/β στοιχείο το οποίο στη συνέχεια αντικαταστάθηκε διαδοχικά από την πράσινη διαφάνεια, την μπλε διαφάνεια και τέλος δύο μπλε διαφάνειες τη μια πάνω στην άλλη. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων με το πολυόργανο της Htsolar φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.6.1: Αποτελέσματα μετρήσεων με το πολυόργανο της Htsolar

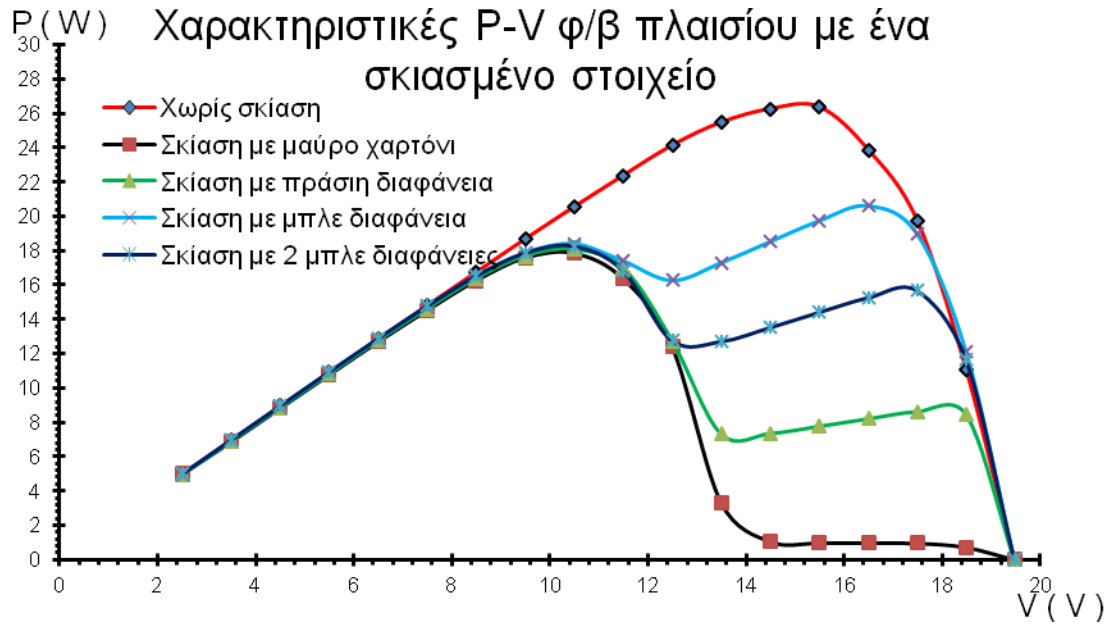
V	I _{χωρίς}	I _{μπλε}	I _{2 μπλε}	I _{πράσινο}	I _{μαύρο}	P _{χωρίς}	P _{μπλε}	P _{2 μπλε}	P _{πράσινο}	P _{μαύρο}
2.500	1.996	1.993	1.996	1.981	1.996	4.990	4.983	4.990	4.953	4.990
3.500	1.991	1.989	1.995	1.974	1.961	6.969	6.962	6.983	6.909	6.864
4.500	1.988	1.985	1.991	1.970	1.960	8.946	8.933	8.960	8.865	8.820
5.500	1.984	1.984	1.990	1.967	1.957	10.912	10.912	10.946	10.819	10.764
6.500	1.977	1.977	1.983	1.963	1.951	12.851	12.851	12.892	12.760	12.682
7.500	1.973	1.966	1.972	1.949	1.936	14.798	14.745	14.787	14.618	14.520
8.500	1.969	1.942	1.946	1.926	1.912	16.737	16.507	16.543	16.371	16.252
9.500	1.966	1.882	1.882	1.861	1.850	18.677	17.879	17.876	17.680	17.575
10.500	1.957	1.752	1.740	1.720	1.699	20.549	18.396	18.270	18.060	17.840
11.500	1.945	1.513	1.465	1.476	1.422	22.368	17.400	16.842	16.974	16.353
12.500	1.930	1.301	1.021	1.020	0.991	24.125	16.263	12.762	12.750	12.388
13.500	1.886	1.281	0.942	0.542	0.246	25.461	17.294	12.715	7.317	3.321

14.500	1.810	1.277	0.933	0.507	0.073	26.245	18.517	13.529	7.352	1.059
15.500	1.701	1.273	0.930	0.501	0.063	26.366	19.732	14.417	7.766	0.977
16.500	1.447	1.249	0.925	0.497	0.059	23.876	20.609	15.266	8.201	0.974
17.500	1.129	1.084	0.896	0.492	0.055	19.758	18.970	15.678	8.610	0.963
18.500	0.599	0.653	0.629	0.456	0.039	11.082	12.081	11.640	8.436	0.722
19.483	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν οι καμπύλες I-V και P-V των σχημάτων 2.6.1 και 2.6.2 .



Σχήμα 2.6.1: Χαρακτηριστικές I-V με ποσοστιαία σκίαση σε φ/β στοιχείο και όλες τις παρακαμπτήριες διόδους



Σχήμα 2.6.2: Χααρακτηριστικές P-V με ποσοστιαία σκίαση σε φ/β στοιχείο και όλες τις παρακαμπτήριες διόδους

Παρατηρούμε στις χααρακτηριστικές I-V, όπως αναμενόταν, ότι για μεγαλύτερο ποσοστό σκίασης τόσο χαμηλότερη γίνεται η καμπύλη στο τέλος της, όταν πλησιάζει την V_{oc} . Τα αποτελέσματα συμφωνούν με τα αντίστοιχα θεωρητικά που είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Η διαφορά ανάμεσα στην αρχική καμπύλη χωρίς σκίαση και αυτή με κάποιο ποσοστό σκίασης είναι η απώλεια σε ισχύ που εμφανίζεται στο πλαίσιο.

Στις χααρακτηριστικές P-V είναι εμφανή τα δύο σημεία μέγιστης ισχύος (GMPP και LMPP) όταν υπάρχει σκίαση σε σχέση με την καμπύλη χωρίς σκίαση. όπου έχουμε ένα σημείο ολικής μέγιστης ισχύος (GMPP). Η αποδιδόμενη ισχύς φαίνεται και εδώ ότι μειώνεται όσο αυξάνει το ποσοστό σκίασης.

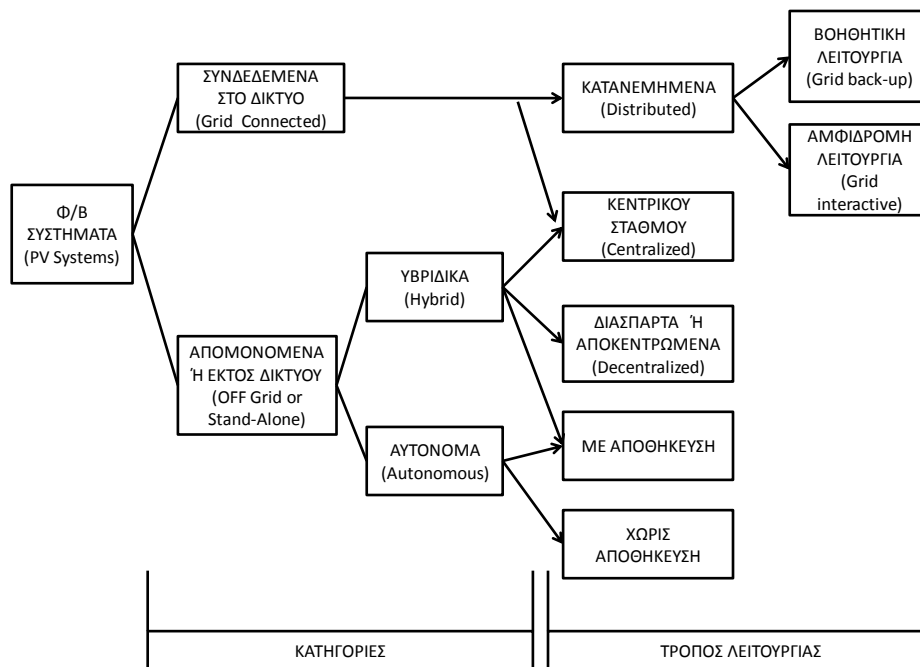
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. Σχεδίαση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

3.1 Κατηγορίες και Σύνθεση Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα απομονωμένα και τα συνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα. Ο όρος δίκτυο αναφέρεται στο διακρατικό, εθνικό ή τοπικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικές πηγές.

Οι δυο αυτές μεγάλες κατηγορίες μπορούν να διαιρεθούν σε επιμέρους συστήματα ανάλογα με τη χρήση τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.1.1: Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών συστημάτων και τρόποι λειτουργίας τους

3.1.1 Εκτός δικτύου ή Απομονωμένα Φ/Β συστήματα (Off-Grid ή Stand-alone Systems).

Χαρακτηρίζονται έτσι τα Φ/Β συστήματα τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Διακρίνονται σε αυτόνομα, στα οποία η Φ/Β συστοιχία αποτελεί την αποκλειστική πηγή ενέργειας και σε υβριδικά, στα οποία περιλαμβάνεται και άλλη πηγή Α.Π.Ε. ή συμβατική ηλεκτρική πηγή (π.χ Η/Ζ).

- **Αυτόνομα Φ/Β συστήματα (Autonomous PV Systems)**

Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται εξ' ολοκλήρου από τη ΦΒ συστοιχία, χωρίς τη συμμετοχή άλλων Α.Π.Ε. ή Η/Ζ και μπορεί να περιλαμβάνονται ή όχι ηλεκτρικοί συσσωρευτές. Αφορούν εφαρμογές μη συνδεδεμένες στο εθνικό δίκτυο. Η παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι είτε συνεχούς (DC) είτε εναλλασσόμενης (AC) τάσεως. Τα αυτόνομα ΦΒ συστήματα διακρίνονται σε:

- Αυτόνομα Φ/Β συστήματα άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου της εφαρμογής (Direct-Coupled PV systems), στα οποία η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποδίδεται απευθείας στην κατανάλωση, όσο φωτίζεται η Φ/Β συστοιχία, χωρίς αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άντληση καλλιεργειών που δεν απαιτούν αυστηρά τακτική λειτουργία του συστήματος, όπως π.χ κατά την άρδευση ορισμένων καλλιεργειών, που δεν απαιτούν πότισμα ανά τακτά χρονικά διαστήματα.
- Αυτόνομα συστήματα με αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την απευθείας τροφοδοσία και η περίσσεια αποθηκεύεται σε συσσωρευτές. Τέτοια είναι π.χ αυτόνομα Φ/Β συστήματα φωτισμού οδών, αρχαιολογικών χώρων, αλσυλλίων, υποστήριξη συστημάτων πυρανίχνευσης δασικών εκτάσεων, τηλεπικοινωνιακών αναμεταδοτών κ.α. Σχεδιάζονται με πρόβλεψη ορισμένων ημερών αυτονομίας του συστήματος, με βάση το κατάλληλο μέγεθος των συσσωρευτών.

- **Υβριδικά Φ/Β συστήματα (Hybrid PV Systems)**

Στα υβριδικά Φ/Β συστήματα, η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται από τον συνδυασμό Φ/Β συστοιχίας με άλλες πηγές ενέργειας, δηλαδή Α.Π.Ε ή πηγές συμβατικών καυσίμων.

3.1.2 Φ/Β συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο (Grid-Connected Systems)

Τα συστήματα αυτά συνδέονται απ' ευθείας στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής παροχής (AC). Το δίκτυο αποτελεί για το ΦΒ σύστημα, μια τεράστια “δεξαμενή” ηλεκτρικής ενέργειας, σταθερής ηλεκτρικής τάσης. Συνεπώς στα συστήματα αυτά δεν απαιτείται αποθήκευση της παραγόμενης ΦΒ ηλεκτρικής. Διακρίνονται σε:

- **Συνδεδεμένα Κατανεμημένα Φ/Β συστήματα (Distributed)**

Αυτά τα συστήματα διακρίνονται σε:

- Κατανεμημένα με βοηθητική πηγή το δίκτυο (Grid Back-up) όπου το δίκτυο καλύπτει έκτατες ανάγκες ή αστοχία του συστήματος
- Κατανεμημένα με αμφίδρομη λειτουργία (Grid interactive) όπου το σύστημα διαβιβάζει την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας προς πώληση στο δίκτυο, ενώ όταν αδυνατεί να καλύψει τις ανάγκες της κατανάλωσης αντλεί την απαιτούμενη ενέργεια από το δίκτυο

- **Συνδεδεμένα κεντρικού σταθμού Φ/Β συστήματα (Centralized)**

Αποτελούν κεντρικούς Φ/Β σταθμούς μεγάλης ισχύος, των οποίων η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο.

3.2 Απομονωμένα Φ/Β Συστήματα

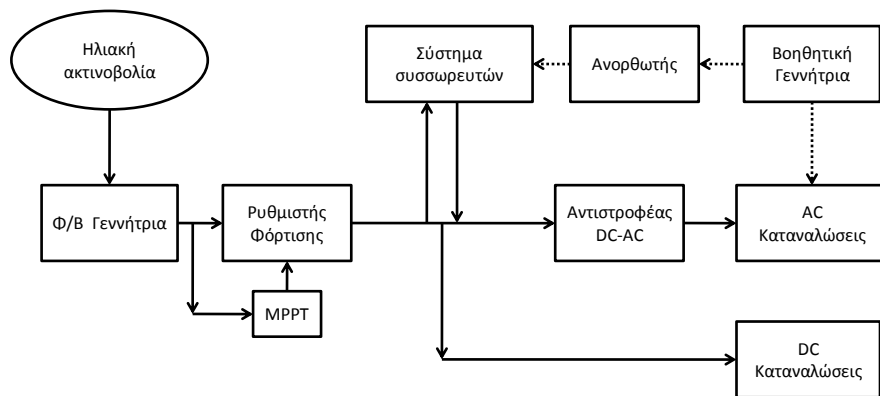
Οι απομονωμένες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις αποτελούν ίσως τις πληρέστερες εφαρμογές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Είναι εγκαταστάσεις που λειτουργούν αυτοδύναμα για την τροφοδότηση καθορισμένων καταναλώσεων, χωρίς να συνδέονται με μεγάλα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, από τα οποία θα

μπορούσαν να αντλούν συμπληρωματική ενέργεια ή να στέλνουν την περίσσεια της παραγόμενης. Αποτελούν την ιδανικότερη λύση για περιοχές που βρίσκονται μακριά από το κεντρικό δίκτυο και στις οποίες η διασύνδεσή τους με αυτό θα απαιτούσε τεράστια οικονομικά κεφάλαια. Ειδικότερα για τον ελλαδικό χώρο, ο οποίος έχει πολυάριθμα μικρά νησιά και μικρούς οικισμούς, τα αυτόνομα φ/β συστήματα έχουν βρει πολλές εφαρμογές, ενώ υπάρχουν ακόμα πολλές δυνατότητες ανάπτυξης. Στο σχήμα 3.2.1 φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος.

Αποτελείται από:

- Τη φ/β γεννήτρια: Είναι και το βασικότερο συστατικό του συστήματος, αφού εκεί γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.
- Τους συσσωρευτές: Για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, σε περιόδους που η παραγόμενη ενέργεια εμφανίζει περίσσεια και για την χρησιμοποίησή της, όταν η παραγωγή είναι ανεπαρκής. Όπως είναι κατανοητό η χωρητικότητα των μπαταριών είναι δεδομένη και υπάρχει το ενδεχόμενο να μην καλύπτουν τις ανάγκες του φορτίου σε παρατεταμένες περιόδους συννεφιάς ή κάποιας βλάβης του συστήματος. Από την άλλη η επιλογή συσσωρευτών πολύ μεγάλης χωρητικότητας κρίνεται οικονομικά ασύμφορη.
- Βοηθητική γεννήτρια: Είναι η ιδανικότερη λύση για καταστάσεις όπου δεν καλύπτεται η ζήτηση (συνήθως νηξελογεννήτρια), η οποία τίθεται σε λειτουργία όταν είναι αναγκαίο. Τότε έχουμε υβριδικό φ/β συστήματα και μπορεί να περιέχει και άλλες εναλλακτικές βοηθητικές πηγές ενέργειας (π.χ. ανεμογεννήτρια). Τα υβριδικά μπορούν επίσης να αποτελέσουν μια λογική προσέγγιση σε καταστάσεις όπου οι περιστασιακές αιχμές ζήτησης είναι σημαντικά υψηλότερες από τη ζήτηση φορτίου βάσης.
- Τον Ρυθμιστή φόρτισης: Είναι η ηλεκτρονική διάταξη που ελέγχει την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών και ανάλογα τους συνδέει ή αποσυνδέει από τη φ/β γεννήτρια.
- Αναστροφέας DC-AC (inverter): Μετατρέπει την DC τάση που παρέχει το φ/β σύστημα σε κατάλληλη AC τάση για να τροφοδοτήσει τις AC καταναλώσεις.

- Βοηθητική γεννήτρια: Είναι η ιδανικότερη λύση για καταστάσεις όπου δεν καλύπτεται η ζήτηση (συνήθως νηξελογεννήτρια), η οποία τίθεται σε λειτουργία όταν είναι αναγκαίο. Τότε έχουμε υβριδικό φ/β συστήματα και μπορεί να περιέχει και άλλες εναλλακτικές βοηθητικές πηγές ενέργειας (π.χ. ανεμογεννήτρια). Τα υβριδικά μπορούν επίσης να αποτελέσουν μια λογική προσέγγιση σε καταστάσεις όπου οι περιστασιακές αιχμές ζήτησης είναι σημαντικά υψηλότερες από τη ζήτηση φορτίου βάσης.



Σχήμα 3.2.1 Απλοποιημένο διάγραμμα αυτόνομου φ/β συστήματος με συσσωρευτές. Εάν χρησιμοποιηθεί μια βοηθητική πηγή ενέργειας, όπως φαίνεται στο σχήμα με την διακεκομμένη γραμμή, τότε το σύστημα καλείται υβριδικό φ/β σύστημα.

3.3 Σχεδίαση Αυτόνομων Φ/Β Συστημάτων με αποθήκευση ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα επιχειρηθεί ο υπολογισμός και η σχεδίαση ενός αυτόνομου συστήματος φωτοβολταϊκών με μπαταρίες. Το σημαντικότερο πρόβλημα για την διαστασιοδότηση ενός τέτοιου συστήματος, το οποίο θα λειτουργεί χωρίς την παραμικρή συνδρομή από το δημόσιο δίκτυο, είναι η πρόβλεψη για επάρκεια, σωστή διαχείριση των συσσωρευτών και η αποφυγή μιας υπερδιαστασιοδότησης που θα εκτινάξει το κόστος κατασκευής στα ύψη.

Η σωστή διαστασιοδότηση ενός φ/β συστήματος είναι θεμελιώδους σημασίας τόσο για την τέλεια λειτουργία του, όσο και για την παράταση της διάρκειας ζωής του γι αυτό, τα στοιχεία που διαμορφώνουν το σύστημα (συγκεκριμένα, το φωτοβολταϊκό

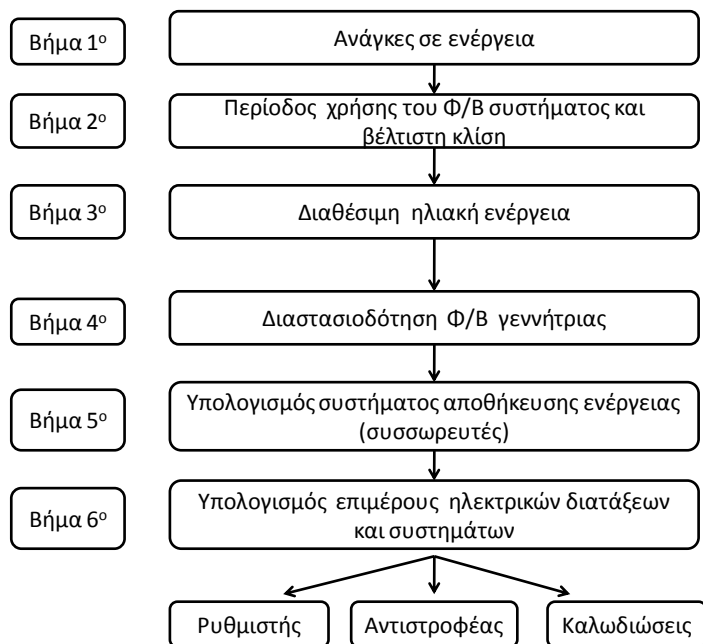
πεδίο και η μπαταρία) θα πρέπει να διατηρούν μεταξύ τους ισορροπία και σωστές αναλογίες, αποφεύγοντας τα υπερμεγέθη και τα μικρά εξαρτήματα

Η διαδικασία σχεδιασμού των φωτοβολταϊκών συστημάτων διαφοροποιείται σημαντικά όταν αφορά αυτόνομο σύστημα από όταν έχουμε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα. Το βασικό κριτήριο σχεδιασμού ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η εξασφάλιση της τροφοδότησης του συγκεκριμένου φορτίου. Σημαντικό κριτήριο αποτελεί επίσης το συνολικό κόστος της εγκατάστασης καθώς και η εξασφάλιση για όσο το δυνατόν λιγότερη αναξιοποίητη παραγόμενη ενέργεια. Για τον λόγο αυτό επιθυμητή θα ήταν και η χρήση μιας γεννήτριας diesel όπου θα λειτουργεί κυρίως τους μήνες με χαμηλή ηλιοφάνεια και θα αποτελεί μια σημαντική εφεδρεία για το σύστημα.

3.4 Διαστασιοδότηση αυτόνομου φ/β συστήματος με αποθήκευση ενέργειας

Η σωστή διαστασιοδότηση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει την ηλιακή γεννήτρια και τις μπαταρίες αποθήκευσης, παίζει σημαντικό ρόλο για την αξιοπιστία του στην εξυπηρέτηση κάποιου δεδομένου ενεργειακού προφίλ κατανάλωσης. Αυτή η διαδικασία διαστασιοδότησης μπορεί να γίνει σύμφωνα με τα παρακάτω βασικά βήματα :

1. Εκτίμηση της ενεργειακής ζήτησης που πρέπει να καλυφθεί. Στο βήμα αυτό εμπεριέχονται οι ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών και αφού βεβαίως αρχικά έχουν εξαντληθεί όλοι οι δυνατοί τρόποι εξοικονόμησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μείωσης όλων των περιττών καταναλώσεων.
2. Επιλογή της κρίσιμης χρονικής περιόδου που θα λειτουργεί το σύστημα και κλίση των συλλεκτών
3. Αξιολόγηση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας στην υπόψη τοποθεσία, στην επιλεγμένη χρονική περίοδο και για τη βέλτιστη κλίση των συλλεκτών.
4. Διαστασιοδότηση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Εδώ θα γίνει ο υπολογισμός της απαιτούμενης συνολικής επιφάνειας ή της συνολικής ισχύος αιχμής των φ/β πλαισίων και εύρεση του αντίστοιχου πλήθους και της κατάλληλης συνδεσμολογίας των τυποποιημένων φ/β πλαισίων.
5. Υπολογισμός του συστήματος συσσωρευτών. Αφού ληφθούν υπόψη οι επιθυμητές μέρες αυτονομίας του αυτόνομου συστήματος ακολουθεί η εύρεση της αντίστοιχης χωρητικότητας των συσσωρευτών για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας.
6. Επιλογή και διαστασιοδότηση των υπολοίπων τμημάτων του συστήματος (αναστροφέας, ρυθμιστής, καλωδιώσεις κ.τ.λ.). Οι αναστροφείς που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι σύμφωνα με την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας καθώς επίσης και βάση πάντα του τύπου του συστήματος που χρησιμοποιείται. Η πτώση τάσης που παρατηρείται στα καλώδια δεν πρέπει να αμελείται και ειδικά όταν αφορά μεγάλα συστήματα με μικρά επίπεδα τάσης. Οι αποδόσεις των τμημάτων αυτών παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποδοτικότητα όλου του συστήματος και την ενεργειακή ισορροπία που πρέπει να εξασφαλίζεται.



Σχήμα 3.4.1 Απλοποιημένο διάγραμμα βημάτων σχεδίασης αυτόνομου φ/β συστήματος με συσσωρευτές.

Η μελέτη των επιμέρους βημάτων πρέπει να είναι πολύ προσεκτική και να αξιολογείται συνεχώς γιατί για παράδειγμα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα βήματα 1 έως 5 μπορεί να απαιτήσουν μια περαιτέρω μείωση στη κατανάλωση ή ακόμα και στην αλλαγή του σεναρίου λειτουργίας (π.χ. διείσδυση ενέργειας από γεννήτρια) για διάφορους λόγους. Κάποιοι λόγοι που μπορούν να μας αναγκάσουν να αναθεωρήσουμε το σύστημα, είναι η μη αποδοτική τοποθεσία για φωτοβολταϊκά (χαμηλή διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία), το τελικό κόστος, η μη συμφέρουσα απόσβεση της επένδυσης κ.α. Γενικά πάντως για την σωστή και αποδοτική διαστασιοδότηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν πολλές παράμετροι. Οι παράμετροι αυτοί διαφέρουν ανάλογα με την αξιοπιστία του, το κόστος, τις ενεργειακές ανάγκες και τις ηλεκτρικές ρυθμίσεις. Για συστήματα που χρειάζεται να λειτουργούν πλήρως αυτονομημένα η αξιοπιστία του συστήματος για την παροχή ενέργειας είναι σημαντική. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε επ' ακριβώς την συμπεριφορά του συστήματος για να επιτευχθεί αξιοπιστία στην παροχή και αποδοτική χρήση της ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

3.5 Εκτίμηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης που ζητείται να ικανοποιεί το αυτόνομο σύστημα

Το πρώτο βήμα για την διαστασιοδότηση ενός φ/β συστήματος είναι ο τέλειος προσδιορισμός των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να καλυφθούν. Γι' αυτό, είναι απαραίτητο να συλλεχθούν και να σημειωθούν όλα τα στοιχεία σχετικά με τις προβλεπόμενες χρήσεις, έτσι ώστε να προχωρήσουμε σε μία πρώτη αξιολόγηση αυτών. Όταν πρόκειται για αυτόνομα φ/β συστήματα, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε λεπτομερώς τις ανάγκες και τις επιθυμίες του χρήστη, διότι αποτελούν τον θεμελιώδη άξονα του σχεδίου. Αν καθοριστούν οι καθοριστούν οι διαστάσεις ενός συστήματος χωρίς να γνωρίζουμε τις ανάγκες του χρήστη, πολύ πιθανόν να μην είναι δυνατή η παροχή της ζητούμενης ενέργειας.

Η εκτίμηση της ενέργειας που καταναλώνεται μπορεί να γίνει:

- Αξιολογώντας τις ενδείξεις που συλλέγουμε από μετρητές ή τους λογαριασμούς ρεύματος προηγούμενων χρόνων.
- Αν γνωρίζουμε ακριβώς τα χαρακτηριστικά του φορτίου μπορούμε να προσδιορίσουμε την ηλεκτρική ισχύ του εξοπλισμού συνεχούς ή εναλλασσομένου ρεύματος με τον ημερήσιο αριθμό ωρών λειτουργίας.

Ενδεικτικές τιμές για ηλεκτροδότηση οικιών, όταν δεν έχουμε στη διάθεσή μας τα πραγματικά στοιχεία, αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα για καταναλώσεις συνεχούς (DC) και εναλλασσόμενου ρεύματος (AC):

Πίνακας 3.5.1 Ενδεικτικές τιμές ισχύος και μέσου χρόνου λειτουργίας οικιακών συσκευών ανά ημέρα.

Ηλεκτρική κατανάλωση- Συσκευή	Ισχύς σε W		Χρόνος χρήσης <i>Ωρες ανά ημέρα</i>
	<i>AC</i>	<i>DC</i>	
Φωτισμός υτνοδοματίου	20	13	1
Φωτισμός μπάνιου	20	13	2
Φωτισμός κουζίνας	20	13	3
Φωτισμός σαλονιού	40	13	7

Πλυντήριο	1.600		0,5
Πλυντήριο (με κρύο νερό)	300		0,2
Ψυγείο	100		24
Φούρνος μικροκυμάτων	850		1
Κεραμική εστία	1.000-1.300		1
Σίδερο	1.500		1
Ηλεκτρική σκούπα	1.500		0,5
Μικρές ηλεκτρικές συσκευές	300		1
Τηλεόραση	45-90		4
Σύστημα Hi—Fi	150		1
Υπολογιστής	100		4

Ένα σημείο εκκίνησης για τον υπολογισμό της ενέργειας ενός φ/β συστήματος αποτελεί το φύλλο δεδομένων κατανάλωσης. Σ' αυτό το φύλλο αποτυπώνεται η ισχύς όλων των στοιχείων συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος και ο μέσος χρόνος χρήσης τους την ημέρα. Αν γνωρίζουμε αυτά τα δύο στοιχεία, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση ημερήσια κατανάλωση κάθε συσκευής. Το φύλλο δεδομένων έχει τη μορφή του πίνακα 3.5.2 .

Σε περίπτωση που οι καταναλώσεις ρεύματος γίνονται σε συγκεκριμένες μέρες της εβδομάδας (π.χ. το σαββατοκύριακο), τα στοιχεία κατανάλωσης κατανέμονται σε ημέρες, με εβδομαδιαία περιοδικότητα.

Πίνακας 3.5.2: Φύλλο δεδομένων κατανάλωσης για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ζήτησης που πρέπει να ικανοποιήσει ένα φ/β σύστημα

ΣΥΣΚΕΥΗ	ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ (AC)		
	Ισχύς (W)	Χρόνος χρήσης (ώρες/ημέρα)	Ημερήσια κατανάλωση ($Wh/ημέρα$)
	(a)	(b)	(c) = (a) χ (b)
	(a ₁)	(b ₁)	(c ₁)= (a ₁) χ(b ₁)
			(c ₂)=...

	<i>Συνολική κατανάλωση εναλλασσόμενου ρεύματος (Wh/ημέρα)</i>		$(d) = (c) + (c_1) + \dots$
ΣΥΝΕΧΕΣ ΡΕΥΜΑ (DC)			
ΣΥΣΚΕΥΗ	<i>Ισχύς (W)</i>	<i>Χρόνος χρήσης (ώρες/ημέρα)</i>	<i>Ημερήσια κατανάλωση (Wh/ημέρα)</i>
	(e)	(f)	$(g) = (e) \chi (f)$
	(e ₁)	(f ₁)	$(g_1) = (e_1) \chi (f_1)$
			(g ₂)=...
	<i>Συνολική κατανάλωση συνεχούς ρεύματος (Wh/ημέρα)</i>		$(h) = (g) + (g_1) + \dots$
ΣΥΝΟΛΟ ΤΙΜΩΝ			
	Σύνολο ημερήσιας κατανάλωσης E _T (Wh/ημέρα)		$(i) = (d) + (h)$
	Μηνιαία χρήση (ημέρες/μήνας) (π.χ 30 ημέρες)		(j)
	Σύνολο μηνιαίας χρήσης (Wh/ μήνας)		$(k) = (i) \times (j)$

3.6 Κρίσιμης χρονικής περιόδου λειτουργίας και βέλτιστη κλίση συλλεκτών

Για να είναι αξιόπιστο ένα φ/β σύστημα, ο σχεδιασμός του πρέπει να γίνει με βάση την χρονική περίοδο την οποία προβλέπεται να λειτουργεί. Έτσι εξασφαλίζεται η μικρότερη δυνατή πιθανότητα να υπολειτουργεί το εν λόγω σύστημα και αποφεύγεται η αδυναμία τροφοδότησης των ηλεκτρικών καταναλώσεων.

Ο μηχανικός θα προσπαθήσει, όσο μπορεί, η κλίση των φ/β πλαισίων σε σχέση με την οριζόντια επιφάνεια να είναι τέτοια, έτσι ώστε η λαμβανόμενη ενέργεια να είναι η μέγιστη για κάθε περίοδο σχεδίασης. Οι συνήθεις περιόδοι σχεδίασης και η αντίστοιχη κλίση β των πλαισίων έτσι ώστε η λαμβανόμενη ενέργεια να είναι η μέγιστη φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.6.1 Περίοδος σχεδιασμού και βέλτιστη κλίση για την συγκεκριμένη περίοδο

Περίοδος σχεδιασμού	β_{opt} (βέλτιστη κλίση)
Δεκέμβριος (Χειμώνας)	$\Phi + 15^\circ$
Ιούλιος (Καλοκαίρι)	$\Phi - 15^\circ$
Ετήσια	Φ

Περιοχή με μεγάλες περιόδους υγρασίας όπου μεγάλο μέρος ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό	$\Phi-15^\circ$ (το ϕ/β πλαίσιο αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται μεγαλύτερη διάχυτη ακτινοβολία)
Φ =Γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας σε μοίρες	

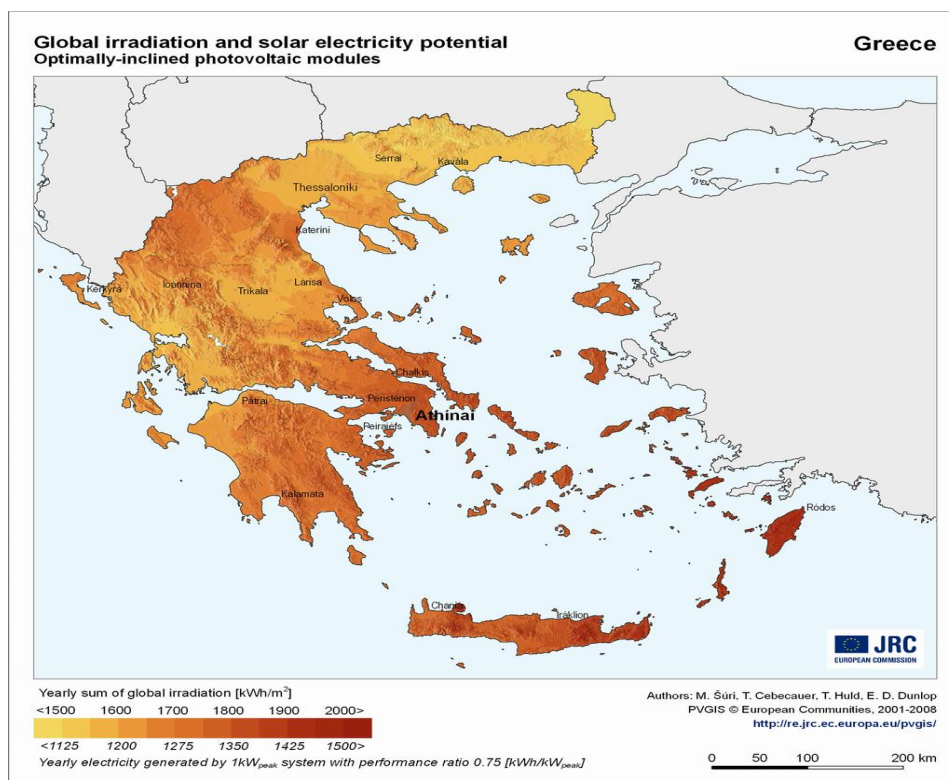
Η περίοδος σχεδιασμού καθορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες κατανάλωσης και ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, σε περίπτωση σταθερής κατανάλωσης καθόλη τη διάρκεια του έτους, η κλίση των πλαισίων θα είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας και η σχεδίαση θα γίνει με βάση το κριτήριο του «λιγότερου ευνοϊκού μήνα» που αντιστοιχεί στον μήνα ελάχιστης ακτινοβολίας. Φυσικά το πεδίο πρέπει να είναι προσανατολισμένο προς τον Νότο, διότι μόνο έτσι η αξιοποίηση της ακτινοβολίας βρίσκεται στο ζενίθ της. Ο προσανατολισμός μπορεί να αλλάζει σε εξαιρετικές περιπτώσεις, ανάλογα με την σκίαση, την έλλειψη χώρου, κτλ.

3.7 Αξιολόγηση της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας στην υπόψη τοποθεσία

Στην εικόνα 3.7.1 βλέπουμε με γραφικό τρόπο, την ετήσια ηλιακή ακτινοβολία για όλες τις περιοχές του ελλαδικού χώρου και για τη βέλτιστη γωνία κλίσης των ϕ/β πλαισίων.

Παρατηρούμε ότι στις νότιες περιοχές η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι στις βόρειες.

Για να εκτιμήσουμε το κέρδος της ηλιακής ενέργειας είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη διαθέσιμη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ανά m^2 επιφάνειας των ϕ/β πλαισίων με νότιο προσανατολισμό και τη βέλτιστη γωνία κλίσης β σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 3.7.1: Συνολική ένταση ηλιακής ακτινοβολίας στον ελλαδικό χώρο

Επειδή η μέθοδος υπολογισμού της Φ/Β γεννήτριας θα είναι αυτή του “λιγότερο ευνοϊκού μήνα” αρκεί να βρεθεί η μέση ημερήσια ηλιακή ενέργεια H ανά m^2 για τον μήνα αυτό που συνήθως είναι ο Δεκέμβριος.

Από πίνακες με δεδομένα ηλιακής ενέργειας για συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος, μπορεί να βρεθεί η τιμή αυτή σε MJ/m^2 ανά ημέρα ή KWh/m^2 ανά ημέρα, όπου $1 KWh=3,6 MJ$.

Αν η τιμή αυτή δεν αναφέρεται για την βέλτιστη κλίση αλλά για οριζόντια επιφάνεια τότε πολλαπλασιάζεται με ένα διορθωτικό παράγοντα κ για κεκλιμένες επιφάνειες που εκφράζει το λόγο μεταξύ της προσπίπτουσας ενέργειας ανά ημέρα σε μία επιφάνεια με νότιο προσανατολισμό και γωνία κλίσης β , και της οριζόντιας επιφάνειας. Ο παράγοντας διόρθωσης κ δίνεται επίσης από πίνακες ανάλογα με την κλίση και τον υπόψη μήνα.

3.8 Διαστασιοδότηση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Κατά τον υπολογισμό και την επιλογή των διαφόρων εξαρτημάτων ενός φ/β συστήματος, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διαστασιοδότησης.

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί είναι αυτή του “λιγότερο ευνοϊκού μήνα”. Μ αυτόν τον τρόπο διασφαλίζουμε ότι θα μπορούμε να καταναλώνουμε ενέργεια κατά τον λιγότερο ευνοϊκό μήνα της περιόδου χρήσης του συστήματος. Ως βάση υπολογισμού του συστήματος παίρνουμε τις καταναλώσεις του λιγότερο ευνοϊκού μήνα θεωρώντας ως τέτοιο, τον μήνα κατά τον οποίο ο λόγος ανάμεσα στην προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια σε οριζόντια επιφάνεια και την ενέργεια που καταναλώνεται είναι ο μικρότερος δυνατός.

Η ιδέα είναι ότι αν το σύστημα λειτουργήσει αυτόν τον μήνα, θα λειτουργήσει και τους υπόλοιπους. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι εφόσον οι υπολογισμοί γίνονται για ένα μόνο μήνα, δεν βελτιστοποιείται ενεργειακά η εγκατάσταση.

3.8.1 Η Ισχύς αιχμής

Η ισχύς αιχμής ενός φ/β πλαισίου P_p είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται από το πλαίσιο κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου είναι το σημαντικότερο ηλεκτρικό χαρακτηριστικό ενός φ/β πλαισίου και με βάση αυτό γίνεται η αναζήτηση αγοράς από το εμπόριο για να καλυφθούν οι ανάγκες μιας Φ/Β εγκατάστασης.

Για να υπολογίσουμε την απαιτούμενη ισχύ αιχμής είναι σημαντικό να συνυπολογίσουμε τις απώλειες που εμφανίζονται στα διάφορα υποσυστήματα που είναι κομμάτια του Φ/Β συστήματος. Σε γενικές γραμμές θα υπάρχουν απώλειες λόγω λειτουργίας της Φ/Β γεννήτριας σε υψηλότερη από την πρότυπη θερμοκρασία, απώλειες στις συνδέσεις των φ/β πλαισίων, στον αναστροφέα κατά την μετατροπή από συνεχή τάση της φ/β γεννήτριας και συσσωρευτών σε εναλλασσόμενη, στο ρυθμιστή φόρτισης των συσσωρευτών καθώς και στις καλωδιώσεις που συνδέουν το σύστημα με τα υποσυστήματα και τις καταναλώσεις. Οπότε πρέπει να γίνεται πρόβλεψη για αυτές τις απώλειες που φτάνουν το 20 με 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος λόγω της φθοράς στα φ/β πλαίσια και τα άλλα μέρη του συστήματος , αναμένεται με την πάροδο του χρόνου μια μικρή βαθμιαία πτώση στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της τάξης του 1 με 2%. Συνοπτικά οι απώλειες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.8.1.1 Απώλειες στα διάφορα υποσυστήματα

Απώλειες στα διάφορα Υποσυστήματα	
Φ/Β γεννήτρια	Σύνολο απωλειών περίπου 20-30%
Συνδέσεις πλαισίων	
Αναστροφέας ΣΡ/ΕΡ	
Ρυθμιστής φόρτισης των συσσωρευτών	
Καλωδιώσεις	
Γήρανση	

Για να συνεχίσουμε λοιπόν στον υπολογισμό της ισχύος αιχμής της φ/β γεννήτριας πρέπει πρώτα να προχωρήσουμε στον υπολογισμό αυτών των παραγόντων που επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργία του συστήματός μας καθώς προσδίδουν απώλειες.

3.8.2 Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης σ_{θ}

Ένας από αυτούς είναι ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης σ_{θ} . Ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή τα φ/β πλαίσια αντιστοιχεί σε μια συμβατική θερμοκρασία συνήθως 20°C που συχνά και ειδικά τους θερινούς μήνες , διαφέρει από την πραγματική θερμοκρασία του στοιχείου ή πλαισίου. Τα ηλιακά στοιχεία κατά τη λειτουργία τους αποκτούν θερμοκρασία μεγαλύτερη από του αέρα κατά 25 με 30°C περίπου, ανάλογα και με την ταχύτητα του ανέμου. Ως μέσο για τους υπολογισμούς μας παίρνουμε συνήθως αύξηση θερμοκρασίας κατά 30°C.

Έτσι αν έχουμε την μέση μηνιαία θερμοκρασία (θ_{μ}) της περιοχής σχεδίασης υπολογίζουμε τον συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης σ_{θ} με τον παρακάτω τύπο:

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

Όπου

- σ_{θ} είναι ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης
- θ_{μ} είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία

3.8.3 Συντελεστής ρύπανσης ατμόσφαιρας σ_{ρ}

Η απόδοση ενός φ/β πλαισίου μειώνεται και κυρίως εκείνου που έχει μικρή κλίση λόγω της ρύπανσης της επιφάνειάς του από την επικάθιση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα κ.τ.λ. Σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές η μείωση της απόδοσης είναι σημαντικότερη λόγω της αιθάλης και γι' αυτό απαιτείται συχνότερος καθαρισμός. Σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ισχυρούς ανέμους το φ/β πλαίσιο πρέπει να τοποθετείται κάθετα ή με κλίση 45° αντίστοιχα, για να μη συγκρατείται το χιόνι και η σκόνη. Ο συντελεστής ρύπανσης σ_{ρ} εκφράζει τον λόγο της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που θα παρήγαγε αν η επιφάνειά του ήταν καθαρή. Έτσι ανάλογα την καθαρότητα της ατμόσφαιρας στην περιοχή που σχεδιάζεται το αυτόνομο σύστημα πρέπει να προβλέπεται στους υπολογισμούς ο αδιάστατος αυτός συντελεστής καθαρότητας ο οποίος είναι τόσο μικρότερος από τη μονάδα όσο μεγαλύτερη είναι η ρύπανση του αέρα. Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή σ_{ρ} είναι:

- $\sigma_{\rho}=0,95$ για καθαρή ατμόσφαιρα ή για πλαίσια που καθαρίζονται συχνά
- $\sigma_{\rho}=0,90$ για ελαφρώς σκονισμένα πλαίσια
- $\sigma_{\rho}=0,80$ για ακάθαρτα και για οριζόντια πλαίσια

3.8.4 Συντελεστής Γήρανσης σ_γ

Η αλλοίωση των υλικών κατασκευής του φ/β στοιχείων μειώνουν την απόδοση των φ/β πλαισίων. Η μείωση αυτή είναι 1% για κάθε έτος λειτουργίας και εκφράζεται με το συντελεστή γήρανσης σ_γ . Έτσι για το πρώτο έτος είναι 0,99 , για το δεύτερο 0,98 κ.τ.λ. Ένας μέσος συντελεστής γήρανσης λαμβάνεται ίσος με 0,9.

3.8.5 Συντελεστής απωλειών διόδου σ_δ

Η διόδος αντεπιστροφής που χρησιμοποιείται για να εμποδίσει την εκφόρτιση του συσσωρευτή διαμέσου του φ/β πλαισίου όταν αυτό δε φωτίζεται προκαλεί απώλειες της τάξης του 1%. Οι απώλειες αυτές εκφράζονται με τον συντελεστή απωλειών διόδου $\sigma_\delta=0,99$.

3.8.6 Συντελεστής ανομοιογένειας σ_α

Η ανομοιογένεια των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών I-V των φ/β πλαισίων, που απαρτίζουν τις Φ/Β συστοιχίες, εκφράζεται με τον συντελεστή ανομοιογένειας σ_α . Οι διαφορές αυτές μπορεί να δημιουργηθούν από εξωτερικούς παράγοντες π.χ. τη σκίαση ενός φ/β πλαισίου, από διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες π.χ. διαφορετική ψύξη των πλαισίων λόγω γειτνίασης με τοίχο περιφράξης ή ακόμα και να υπάρχουν από κατασκευής των πλαισίων. Η τιμή του λαμβάνεται ίση με $\sigma_\alpha=0,98$.

3.8.7 Συντελεστής καλωδιώσεων σ_κ

Ο συντελεστής καλωδιώσεων σ_κ εκφράζει τις απώλειες στα καλώδια σύνδεσης των φ/β πλαισίων της συστοιχίας και είναι ίσος με 0,98

3.8.8 Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας σ_μ

Οι απώλειες του Φ/Β συστήματος, από την έξοδο της Φ/Β γεννήτριας μέχρι την έξοδο προς κατανάλωση περιλαμβάνονται στο συντελεστή απωλειών μεταφοράς

ενέργειας σ_{μ} . Αυτός εξαρτάται από το είδος των διατάξεων που υπάρχουν στο Φ/Β σύστημα. Διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Σε αυτόνομο σύστημα με συσσωρευτή:
 - Χρήση μετατροπέα τάσης DC-DC (converter) και DC-AC (inverter) $\sigma_{\mu}=0,75-0,80$
 - Χρήση μόνο μετατροπέα τάσης DC-AC (inverter) $\sigma_{\mu}=0,85-0,90$
 - Χωρίς μετατροπείς τάσεως $\sigma_{\mu}=0,92$
- Σε άλλα συστήματα χωρίς συσσωρευτή:
 - Χρήση μετατροπέα τάσης DC-DC (converter) και DC-AC (inverter) $\sigma_{\mu}=0,85-0,90$
 - Χρήση μόνο μετατροπέα τάσης DC-AC (inverter) $\sigma_{\mu}=0,96-0,98$
 - Χωρίς μετατροπείς τάσεως $\sigma_{\mu}=0,99$

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

$$P_{\alpha}(W_p) = \frac{E_T(Wh/d) \times P_{STC}(kW/m^2) \times m}{\Pi(kWh/m^2 \cdot d) \times \sigma_{\Lambda\Sigma} \times \sigma_{\mu}}$$

Όπου:

- P_{α} η απαιτούμενη ισχύς αιχμής της φ/β εγκατάστασης
- E_T η απαιτούμενη συνολική ημερήσια ενέργεια
- Π η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στην περιοχή εγκατάστασης
- m είναι ένας συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων για να καλυφθεί μια πιθανή υποτίμηση των αναγκών κατανάλωσης και είναι ίσος με $m=1,2$.
- $\sigma_{\Lambda\Sigma}$ το γινόμενο των υπολοίπων συντελεστών απωλειών $\sigma_{\Lambda\Sigma} = \sigma_{\gamma} \cdot \sigma_{\rho} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\delta} \cdot \sigma_{\alpha} \cdot \sigma_{\kappa}$
- P_{STC} η ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες STC και είναι ίση με $P_{STC}=1 \text{ KW/m}^2$

Σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα που απαιτείται η κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων καθημερινά πρέπει να οριστεί ένας αριθμός ημερών αυτονομίας που θα λειτουργεί το Φ/Β σύστημα χωρίς την πλήρη ηλιακή ακτινοβολία. Οι μέρες αυτονομίας n αντιπροσωπεύουν τον αριθμό συνεχόμενων ημερών κακοκαιρίας που μπορεί να προκύψουν (μουντές, συννεφιασμένες, βροχερές κ.τ.λ.) και κατά τις οποίες τα φ/β πλαίσια δεν παράγουν σχεδόν καθόλου ενέργεια, με αποτέλεσμα να καταναλώνεται η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στον συσσωρευτή, γεγονός που ελαττώνει γρήγορα την κατάσταση φόρτισής του.

Οπότε ο καθορισμός του μέγιστου αριθμού n ημερών αυτονομίας που προβλέπονται για Φ/Β σύστημα αποτελεί σημαντική λεπτομέρεια. Ενδεικτικοί αριθμοί, ελάχιστων και μέγιστων ημερών αυτονομίας που συνίστανται για αυτόνομα φ/β ανάλογα με τον τύπο της εγκατάστασης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Βέβαια λόγω των ειδικών παραμέτρων που προκύπτουν, ανάλογα τις ανάγκες μιας εγκατάστασης μπορεί να διαφέρουν. Αυτό επαφίεται στην κρίση και σχεδίαση του κάθε μηχανικού.

Πίνακας 3.8.8.1 Αριθμοί ημερών αυτονομίας που συνίστανται για φ/β συστήματα

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 τη σηματοδότηση	10	Επαφίεται στην κρίση του μηχανικού

Η ισχύς αιχμής της φ/β γεννήτριας για την κάλυψη των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων με n ημέρες αυτονομίας είναι :

$$P_{\alpha} (W_p) = \frac{E_T (Wh / d) \times P_{STC} (kW / m^2) \times m}{\Pi (kWh / m^2 \cdot d) \times \sigma_{\Lambda\Sigma} \times \sigma_{\mu}} \cdot \frac{N}{N - n}$$

Όπου:

- P_{α} η απαιτούμενη ισχύς αιχμής της φ/β εγκατάστασης

- E_T η απαιτούμενη συνολική ημερήσια ενέργεια
- Π η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στην περιοχή εγκατάστασης
- m είναι ένας συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων για να καλυφθεί μια πιθανή υποτίμηση των αναγκών κατανάλωσης και είναι ίσος με $m=1,2$.
- $\sigma_{ΑΣ}$ το γινόμενο των υπολοίπων συντελεστών απωλειών

$$\sigma_{ΑΣ} = \sigma_{\gamma} \cdot \sigma_{\rho} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\delta} \cdot \sigma_{\alpha} \cdot \sigma_{\kappa}$$
- P_{STC} η ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες STC και είναι ίση με $P_{STC}=1 \text{ KW/m}^2$
- N η περίοδος χρονικής αναφοράς σε ημέρες (π.χ. 31 ημέρες για έναν μήνα)
- n οι εκτιμώμενες ημέρες αυτονομίας

3.9 Ο αριθμός των φ/β πλαισίων

Για να υπολογιστεί ο απαιτούμενος αριθμός των φ/β πλαισίων που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν και αφού οι απώλειες έχουν ήδη προσδιοριστεί θα πρέπει να γίνει η επιλογή του πλαισίου που θα χρησιμοποιηθεί ως δομικό στοιχείο της εγκατάστασης.

Η επιλογή του πλαισίου επαφίεται στην κρίση του μηχανικού ανάλογα την χρήση, το κόστος, την διαθεσιμότητα χώρου κ.τ.λ. . Για παράδειγμα ένα πλαίσιο με μεγάλη τιμή ισχύος αιχμής είναι ακριβότερο αλλά απαιτούνται λιγότερα πλαίσια. Ένα πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου ίδιας ισχύος με ένα πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχει πολύ μικρότερη επιφάνεια και με αυτό τον τρόπο αξιοποιείται ένας μικρότερος διαθέσιμος χώρος, με το κόστος όμως να αυξάνεται. Μετά την επιλογή του φ/β πλαισίου μπορούμε να συνεχίσουμε τους υπολογισμούς.

Από τα χαρακτηριστικά του φ/β πλαισίου που έχουμε διαλέξει, χρησιμοποιώντας την ισχύ αιχμής του P_{\max} , υπολογίζεται ο αριθμός των θεωρητικών φ/β πλαισίων $N_{\text{πλαισίων}}$ που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν:

$$N_{\text{πλαισίων}} = \frac{P_a(W_p)}{P_{\max}(W_p)}$$

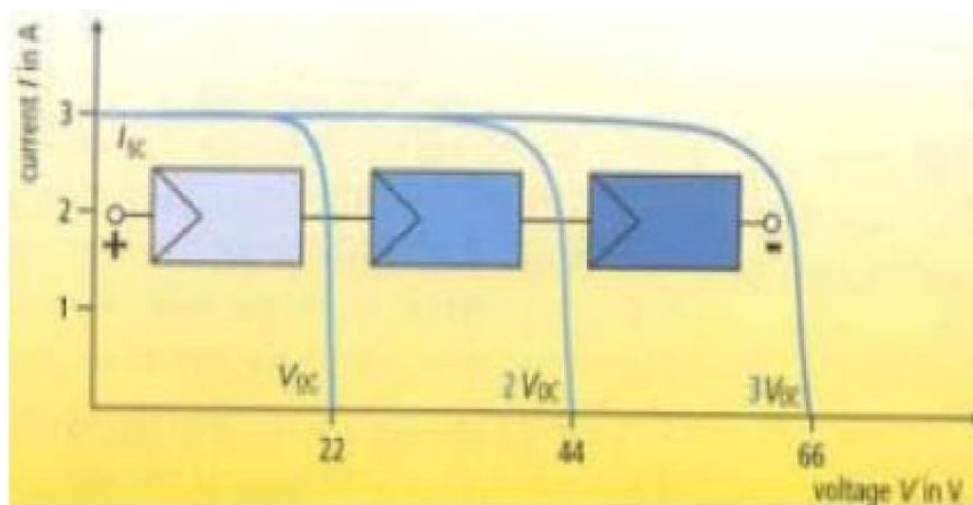
Όπου:

- $N_{\text{πλαισίων}}$ ο συνολικός αριθμός φ/β πλαισίων
- P_{α} η απαιτούμενη ισχύς αιχμής της φ/β εγκατάστασης
- P_{max} η μέγιστη ισχύς που αποδίδει το φ/β πλαίσιο

3.9.1 Σύνδεση πλαισίων

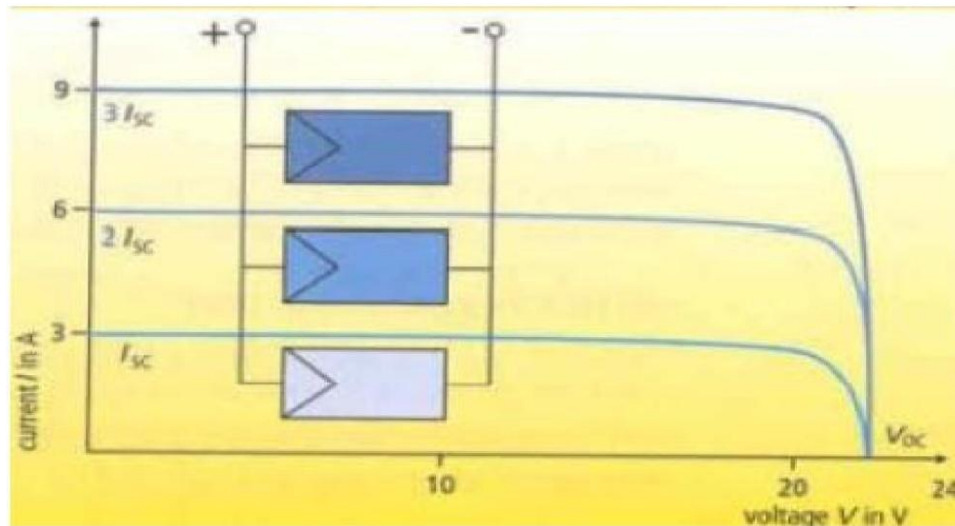
Ιδιαίτερη αναφορά εδώ, πρέπει να γίνει για τους τρόπους σύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να είναι σε σειρά, παράλληλη ή μικτή.

Η σύνδεση σε σειρά χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που θέλουμε να επιτύχουμε τάση μεγαλύτερη από την τάση που παρέχει κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ χωριστά. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που θα συνδεθούν σε σειρά πρέπει να έχουν το ίδιο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) και το ίδιο ρεύμα μέγιστης ισχύος (I_{max}).



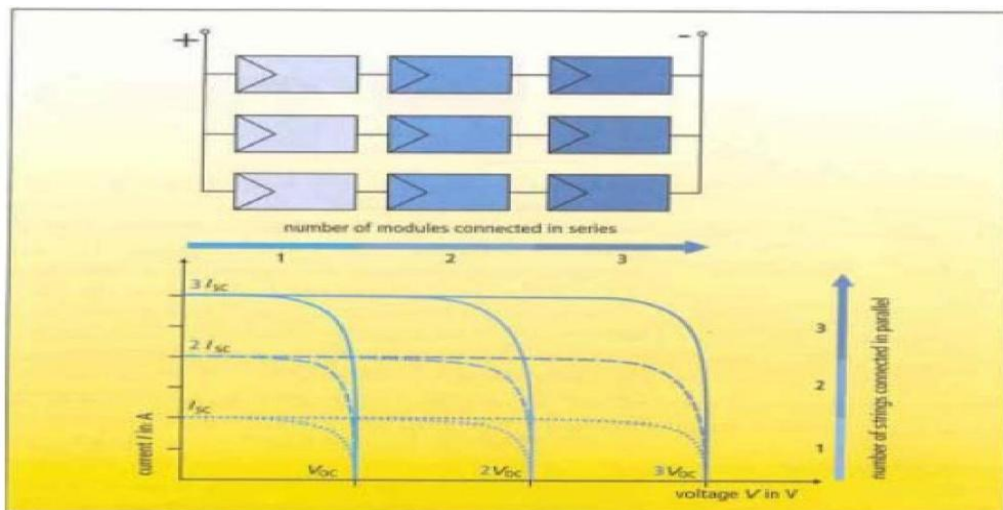
Σχήμα 3.9.1.1: Σε σειρά σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων - Αύξηση της συνολικής τάσης.

Η παράλληλη σύνδεση χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που θέλουμε να επιτύχουμε ρεύμα μεγαλύτερο από το ρεύμα που παρέχει κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ χωριστά. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ που θα συνδεθούν παράλληλα πρέπει να έχουν την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}).



Σχήμα 3.9.1.2: Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων-Αύξηση του συνολικού ρεύματος

Με τη μικτή σύνδεση πετυχαίνουμε να αυξήσουμε το ρεύμα και την τάση ταυτόχρονα, σε τιμές που δεν είναι διαθέσιμες από απλά φωτοβολταϊκά πάνελ. Από τεχνικής απόψεως η μικτή σύνδεση είναι συνδυασμός της σύνδεσης σε σειρά και της παράλληλης σύνδεσης και κατά συνέπεια ισχύει ότι ισχύει σε αυτές τις συνδέσεις. Η τάση της συστοιχίας αυτής καθορίζεται από τα στοιχεία που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ενώ το συνολικό ρεύμα από τις παράλληλες ομάδες.



Σχήμα 3.9.1.3: Μικτή σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων-Αύξηση συνολικής τάσης και συνολικού ρεύματος.

3.9.2 Υπολογισμός του πλήθους των φ/β πλαισίων σε σειρά

Ο αριθμός των σε σειρά πάνελ που καθορίζει την τάση του κλάδου, μπορεί να υπολογιστεί από την ονομαστική τάση της εγκατάστασης και είναι ο ακέραιος αριθμός που είναι μεγαλύτερος από τον λόγο μεταξύ της ονομαστικής τάσης της εγκατάστασης V_N (επιλέγεται) και της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος του επιλεγμένου φ/β πλαισίου V_{max} (στοιχείο που παρέχει ο κατασκευαστής στο φύλλο χαρακτηριστικών):

$$N_s = \frac{V_N (V)}{V_{max} (V)}$$

Όπου:

- N_s ο αριθμός των φ/β πλαισίων σε σειρά
- V_N η ονομαστική τάση της εγκατάστασης
- V_{max} η τάση του φ/β πλαισίου στο σημείο μέγιστης ισχύος

Η τάση V_N πρέπει να επιλέγεται με βάση την τάση εισόδου της επόμενης διάταξης και διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Αυτόνομα συστήματα με συσσωρευτές με ονομαστική τάση V_B :
 - Χρήση συσσωρευτή: $V_N > 1,2 \cdot V_B$
 - Χρήση συσσωρευτή και μετατροπέα τάσης DC-AC (inverter):
 $V_N > 1,2 \cdot V_B$
 - Χρήση συσσωρευτή και μετατροπέα τάσης DC-DC (converter) με επιτρεπόμενη τάση στην είσοδο του converter V_{con} :
 $V_N = V_{con} < 600V$

Στα συστήματα αυτά με συσσωρευτή βασικό ρόλο παίζει η τάση εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης ο οποίος συνδέεται αμέσως μετά τη φ/β γεννήτρια. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να ελέγχεται ότι η τάση V_N δεν βρίσκεται πάνω από τα όρια λειτουργίας της επόμενης ηλεκτρονικής διάταξης.

- Συνδεδεμένα συστήματα ή αυτόνομα χωρίς συσσωρευτές:
 - Χρήση μετατροπέα τάσης DC-AC (inverter) με τάση στην είσοδο του inverter V_{inv} : $V_N = V_{inv}$
 - Χρήση μετατροπέα τάσης DC-DC (converter) με επιτρεπόμενη τάση στην είσοδο του converter V_{con} : $V_N = V_{con} < 600V$

Η τάση V_N σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να έχει τις παρακάτω ενδεικτικές τιμές:

- V_N : 100-200V για συστήματα έως 3 KW_p
- V_N : 200-400V για συστήματα έως 3-10 KW_p
- V_N : 400-700V για μεγαλύτερα συστήματα

3.9.3 Υπολογισμός του πλήθους των παράλληλων φ/β πλαισίων

Ο υπολογισμός του πλήθους των παράλληλων πλαισίων μπορεί να υπολογιστεί εύκολα αν έχω υπολογίσει τα σε σειρά πλαίσια. Τότε ο αριθμός τους προσδιορίζεται από τον ακέραιο αριθμό που είναι μεγαλύτερος από τον λόγο μεταξύ των απαιτούμενων πλαισίων προς τον αριθμό πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά ανά συστοιχία:

$$N_p = \frac{N_{\text{πλαισίων}}}{N_s}$$

Όπου:

- N_p ο αριθμός των φ/β πλαισίων σε παράλληλη σύνδεση
- $N_{\text{πλαισίων}}$ ο αριθμός των συνολικών φ/β πλαισίων
- N_s ο αριθμός των φ/β πλαισίων σε σειρά

Εφόσον γνωρίζουμε τον αριθμό πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά N_s ανά κλάδο, και τον αριθμό πλαισίων με παράλληλη σύνδεση N_p , ο πραγματικός αριθμός πλαισίων που χρειαζόμαστε θα δοθεί από το γινόμενο του αριθμού πλαισίων σε σειρά και του αριθμού πλαισίων με παράλληλη σύνδεση.

$$N_{\text{πραγμ.πλαισίων}} = N_s \cdot N_p$$

Όπου:

- $N_{\text{πραγμ.πλαισίων}}$ ο τελικός υπολογιζόμενος αριθμός των συνολικών φ/β πλαισίων
- N_p ο αριθμός των φ/β πλαισίων σε παράλληλη σύνδεση
- N_s ο αριθμός των φ/β πλαισίων σε σειρά

Σε συστήματα χωρίς συσσωρευτή σε κάθε περίπτωση πρέπει να ελέγχεται ότι το πλήθος των σε σειρά πάνελ πολλαπλασιασμένο με την τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) του πλαισίου πρέπει να είναι μικρότερο από την μέγιστη τάση εισόδου του αναστροφέα. Δηλαδή πρέπει:

$$N_s \cdot V_{oc} < V_{in,max,inverter}$$

Όπου:

- N_s ο αριθμός των φ/β πλαισίων σε σειρά
- V_{oc} η τάση ανοικτού κυκλώματος του φ/β πλαισίου
- $V_{in,max,inverter}$ η μέγιστη τάση εισόδου του αναστροφέα

3.10 Υπολογισμός του συστήματος συσσωρευτών

Σε ένα αυτόνομο σύστημα η ανάγκη αποθήκευσης της περίσσειας της ηλεκτρικής παραγωγής, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η παραγωγή από τη Φ/Β γεννήτρια δεν ανταποκρίνεται στη ζήτηση, οδηγεί στη χρήση ηλεκτρικών συσσωρευτών.

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός συσσωρευτή είναι η ονομαστική τάση V_B και η ονομαστική χωρητικότητά του C .

Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή είναι το ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί στο εσωτερικό του και μετράται συνήθως σε αμπερώρια (Ah). Σε ιδανικές συνθήκες τα αμπερώρια είναι το γινόμενο της μέσης έντασης ρεύματος I , που δίνει ο συσσωρευτής ανεξάρτητα από την τάση του, επί το πλήθος των ωρών μέχρι να εκφορτιστεί, ξεκινώντας από πλήρη φόρτιση.

Με την καθημερινή χρήση των συσσωρευτών, η χωρητικότητά τους μειώνεται λόγω διάβρωσης των πλακών, σχηματισμού επικαθήσεων και άλλα. Αποτέλεσμα είναι όσο αυξάνουν οι κύκλοι λειτουργίας N_c του συσσωρευτή, δηλαδή ο αριθμός διαδοχικών φορτίσεων και εκφορτίσεων, η χωρητικότητα να μειώνεται. Ένας συσσωρευτής θεωρείται άχρηστος όταν η χωρητικότητά του έχει πέσει κάτω από το 80% περίπου της αρχικής του τιμής. Η απώλεια αυτή της χωρητικότητας ονομάζεται γήρανση του συσσωρευτή και εκφράζεται με τον συντελεστή γήρανσης $\sigma_{\gamma B}$ και ισούται με $\sigma_{\gamma B}=0,8$.

Σε αυτό το στάδιο πρέπει να έχουμε επιλέξει τον τύπο, τον κατασκευαστή και τα βασικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή που θα χρησιμοποιήσουμε και κυρίως το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης DOD του συσσωρευτή. Η τιμή αυτή είναι σημαντική για την διάρκεια ζωής του συσσωρευτή. Αν δεν γίνει σωστή ρύθμιση και ξεπερνιέται συστηματικά κατά την αποφόρτιση τότε οι κύκλοι ζωής του συσσωρευτή μειώνονται.

Η επιλογή της ονομαστικής τάσης των συσσωρευτών μπορεί να γίνει με βάση την ισχύ αιχμής της Φ/Β συστοιχίας όπως στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.10.1 Αντιστοιχία ισχύος αιχμής με επιλεγόμενη τάση συσσωρευτή

Ισχύς Αιχμής P_a σε KWp	Ονομαστική Τάση Συσσωρευτών V_B σε Volt
0-0,5	12
0,5-3	24
3-10	48
>10	>48

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η τάση V_B του συστήματος συσσώρευσης πρέπει να συμβαδίζει με την τάση εξόδου του ρυθμιστή φόρτισης.

Το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης DOD μιας μπαταρίας εξαρτάται από τον τύπο μπαταρίας που έχει επιλεγεί και από τις ανάγκες κάλυψης. Κατά την διαστασιοδότηση αυτόνομων φ/β συστημάτων, οι τιμές βάθους εκφόρτισης που

συνήθως επιλέγουν οι μηχανικοί είναι 40% ή 50% για συνήθεις τύπους συσσωρευτών μολύβδου. Μια επιλογή του DOD με βάση την ανάγκη κάλυψης ορισμένων ημερών αυτονομίας φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.10.2 Αντιστοιχία ημερών αυτονομίας με βάθος εκφόρτισης

Ημέρες αυτονομίας	Βάθος Εκφόρτισης DOD
1-3	0,4
4-6	0,6
7-10	0,8

Πρέπει να σημειωθεί ότι για πολύ χαμηλή μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος $t_a < 0^\circ \text{C}$ το βάθος εκφόρτισης πρέπει να επιλέγεται $DOD=0,2$ έως $0,3$. Αυτό γιατί οι χαμηλές θερμοκρασίες μειώνουν τη χωρητικότητα του συσσωρευτή και πρέπει να περιοριστεί και το βάθος εκφόρτισης.

Οι κύκλοι λειτουργίας N_k των συσσωρευτών μπορούν να υπολογιστούν για συγκεκριμένο βάθος εκφόρτισης DOD αν ληφθεί υπόψη ότι το γινόμενο του βάθους εκφόρτισης με τους κύκλους λειτουργίας παραμένει σταθερό και ίσο με 1200 για συσσωρευτές φωτοβολταϊκών:

$$N_k \cdot DOD = 1200 \quad (\text{σταθερό})$$

Όπου:

- N_k οι κύκλοι λειτουργίας των συσσωρευτών
- DOD το βάθος εκφόρτισης

Έχοντας επιλέξει το βάθος εκφόρτισης DOD , την ονομαστική τάση V_B και τις ημέρες αυτονομίας n του συστήματος των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιηθούν μπορεί να υπολογιστεί η χωρητικότητα C σε αμπερώρια (Ah):

$$C \text{ (Ah)} = \frac{E_T (Wh/d) \cdot m \cdot (n+b)}{\sigma_{\gamma B} \cdot DOD \cdot V_B (V) \cdot \sigma_{εκ}}$$

Όπου:

- C η χωρητικότητα των συσσωρευτών
- E_T οι ημερήσιες ανάγκες σε ενέργεια
- $m=1,2$ ο συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων
- n οι ημέρες αυτονομίας
- b το ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας
- $\sigma_{\gamma B}$ ο συντελεστής γήρανσης των συσσωρευτών
- DOD το βάθος εκφόρτισης
- V_B η ονομαστική τάση των συσσωρευτών
- $\sigma_{εκ}$ ο συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας

➤ Ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας b

Ο συντελεστής αυτός μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1. Την τιμή 0 όταν τα φορτία κατανάλωσης τροφοδοτούνται απευθείας από τη Φ/Β γεννήτρια, δηλαδή άμεση τροφοδοσία, και 1 όταν τα φορτία κατανάλωσης καλύπτονται μόνο από τον συσσωρευτή, δηλαδή έμμεση τροφοδοσία.

➤ Συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων m

Ο συντελεστής αυτός αφορά στην εκτίμηση των ημερήσιων ενεργειακών αναγκών. Προκειμένου να καλυφθεί μια πιθανή υποτίμηση των αναγκών της κατανάλωσης λαμβάνεται ένα ποσοστό 20% επιπλέον των καταγραφέντων φορτίων.

➤ Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας $\sigma_{εκ}$

Περιλαμβάνει τις ενεργειακές απώλειες στις επιμέρους διατάξεις του κυκλώματος. Χαρακτηριστικές τιμές είναι:

Πίνακας 3.10.3: Τιμές συντελεστή απωλειών μεταφοράς ενέργειας

Στοιχεία Κυκλώματος	$\sigma_{εκ}$
Χωρίς μετατροπέα τάσης DC-AC (inverter)	0,97
Με μετατροπέα τάσης DC-AC (inverter)	0,91

Οι χωρητικότητες τις οποίες δίνουν οι κατασκευαστές αναφέρονται σε ιδανικές συνθήκες δηλαδή σε θερμοκρασία 20 με 25° C. Αν η μέση ετήσια θερμοκρασία στην τοποθεσία σχεδίασης είναι διαφορετική θα πρέπει να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες διορθώσεις. Αν ο κατασκευαστής δε δίνει στοιχεία χωρητικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο παρακάτω τύπος αν η μέση ετήσια θερμοκρασία του χώρου όπου βρίσκεται ο συσσωρευτής είναι μικρότερη από 20° C.

$$C'(Ah) = \frac{C(Ah)}{k_{\theta}}$$

Όπου:

- C' η διορθωμένη χωρητικότητα των συσσωρευτών
- C η υπολογισμένη χωρητικότητα των συσσωρευτών
- k_{θ} ένας συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης και για διαφορά $\Delta\theta$ βαθμών κελσίου κάτω από τους 20° C ισούται με: $k_{\theta} = 1 - \frac{\Delta\theta}{160}$

Όπου:

- k_{θ} ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης
- $\Delta\theta$ η διαφορά της θερμοκρασίας κάτω από τους 20° C

Με αυτό τον τρόπο αντισταθμίζεται η μείωση της χωρητικότητας που προκαλείται από τη θερμοκρασία.

3.11 Επιλογή και διαστασιοδότηση των υπολοίπων τμημάτων του συστήματος

Μετά τον υπολογισμό των πλαισίων και της χωρητικότητας της μπαταρίας, προχωρούμε στην διαστασιοδότηση των υπολοίπων στοιχείων του συστήματος: του ρυθμιστή, του αναστροφέα και των διατομών της καλωδίωσης.

- Υπολογισμός και επιλογή του ρυθμιστή (ή ελεγκτή φόρτισης)

Ο ρυθμιστής φόρτισης που θα επιλεγεί πρέπει να έχει:

α. Ονομαστική τάση ίση με εκείνη του συστήματός μας, η οποία μπορεί και να συμπίπτει με την τάση του συστήματος συσσώρευσης.

β. Τεχνικά χαρακτηριστικά ώστε να λειτουργεί χωρίς βλάβες στη μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

γ. Τεχνικά χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να μπορεί να δεχθεί ρεύμα από τη γραμμή της Φ/Β γεννήτριας κατά 50% μεγαλύτερο από το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} σε κανονικές συνθήκες μέτρησης αν πρόκειται για παράλληλο ελεγκτή φόρτισης και κατά 50% μεγαλύτερο από το μέγιστο ρεύμα I_{max} αν πρόκειται για σειριακό ελεγκτή.

δ. Τεχνικά χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να μπορεί να δώσει το μέγιστο ρεύμα προς την γραμμή κατανάλωσης για τα φορτία που λειτουργούν ταυτόχρονα.

➤ Υπολογισμός και επιλογή του μετατροπέα τάσης DC-AC (inverter)

Όταν έχουμε να τροφοδοτήσουμε με ρεύμα AC μια κατανάλωση που χρησιμοποιεί για τροφοδοσία ένα Φ/Β σύστημα, είναι απαραίτητη η χρήση ενός αναστροφέα DC-AC (inverter).

Για την επιλογή του μετατροπέα λαμβάνουμε υπόψη τα εξής:

α. Την ονομαστική τάση του inverter. Σε αυτόνομα συστήματα με συσσωρευτή πρέπει να είναι ίση με αυτή του συσσωρευτή. Στα υπόλοιπα ίση με αυτή της λειτουργίας της εγκατάστασης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι αναστροφείς για αυτόνομα συστήματα είναι διαφορετικοί από αυτούς που χρησιμοποιούνται στα συνδεδεμένα στο δίκτυο.

β. Τον τύπο καταναλώσεων σε AC ($\cos\phi$). Αναγράφεται στα χαρακτηριστικά του inverter ο τύπος που μπορεί να καλυφθεί. Συνήθως φορτία με $\cos\phi=-1$ έως 1.

γ. Την μέγιστη ισχύ των καταναλώσεων σε AC που λειτουργούν συγχρόνως. Πρέπει να ισούται με την ισχύ εξόδου του inverter.

δ. Η ισχύ αιχμής πρέπει να είναι τριπλάσια της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος των φορτίων κατανάλωσης που λειτουργούν συγχρόνως.

ε. Η τάση εξόδου του inverter πρέπει να είναι ίση με την τάση λειτουργίας των φορτίων κατανάλωσης.

Για ορισμένους τύπους φορτίων όπως οι κινητήρες απαιτούν για την εκκίνηση τους μεγαλύτερη ισχύ από την ονομαστική τους για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Η πρόβλεψη του μηχανικού πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα αυτή αλλιώς δεν θα τεθεί σε λειτουργία ο κινητήρας.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε μοντέλου αναστροφέα δίνονται από τον κατασκευαστή και με βάση αυτά γίνεται η επιλογή.

3.12 Υπολογισμός των καλωδιώσεων

Η επιλογή των κατάλληλων αγωγών σύνδεσης σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα γίνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1^ο: Σχεδίαση της ηλεκτρικής εγκατάστασης

Ο σωστός σχεδιασμός δείχνει τη θέση όλων των διατάξεων και δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστούν οι αποστάσεις και άρα το μήκος των καλωδίων που θα χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση των επιμέρους κυκλωμάτων. Για να μειωθούν οι απώλειες οι αποστάσεις αυτές πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερες.

Τα επιμέρους ηλεκτρικά κυκλώματα και διατάξεις που αποτελούν ένα αυτόνομο Φ/Β σύστημα καθορίζουν τις συνδέσεις που θα γίνουν με καλωδιώσεις. Οι συνδέσεις αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.12.1 : Κύριες συνδέσεις με καλώδια σε ένα Φ/Β σύστημα

Αυτόνομο Φ/Β Σύστημα	Φ/Β Γεννήτρια – Ρυθμιστής
	Ρυθμιστής - Συσσωρευτές
	Συσσωρευτές – Αναστροφέας
	Προς Καταναλώσεις σε AC
	Προς Καταναλώσεις σε DC

Οι συνηθέστεροι τύποι καλωδίων που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους Φ/Β εγκαταστάσεις συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.12.2 : Συνήθεις τύποι καλωδίων σε αυτόνομες Φ/Β εγκαταστάσεις

	ΠΛΑΙΣΙΟ Φ/Β- ΡΥΘΜΙΣΤΗ Σ	ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ - ΜΠΑΤΑΡΙΑ	ΜΠΑΤΑΡΙΑ - ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΕ DC	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΣΕ AC
ΡΕΥΜΑ	Συνεχές	Συνεχές	Συνεχές	Συνεχές	Εναλλασσόμενο
ΤΥΠΟΣ ΚΑΛΩΔΙΟ Υ	Διπολικό καλώδιο σε σωλήνα	Δύο εξωτερικά μονοπολικά καλώδια ή σε κανάλι	Δύο εξωτερικά μονοπολικά καλώδια ή σε κανάλι	Κάθε γραμμή: εντοιχισμένο διπολικό καλώδιο ή σε κανάλι	Κάθε γραμμή: εντοιχισμένο διπολικό καλώδιο ή σε κανάλι
ΤΑΣΗ	12, 24 ή 48V	12, 24 ή 48V	12, 24 ή 48V	12, 24 ή 48V	230V

Ο προσδιορισμός της κατάλληλης διατομής των καλωδιώσεων έχει ιδιαίτερη σημασία έτσι ώστε να εξαλείφονται οι υπερβολικές πτώσεις τάσης αλλά και η υπερθέρμανση και πιθανή καταστροφή των καλωδίων.

Χρησιμοποιώντας την κατάλληλη διατομή η μέγιστη επιτρεπτή πτώση τάσης ανάμεσα στις συνδέσεις του Φ/Β συστήματος είναι οι παρακάτω:

Πίνακας 3.12.3 : Μέγιστες επιτρεπτές πτώσεις τάσης

Μέγιστη πτώση τάσης μεταξύ της φ/β γεννήτριας και του ρυθμιστή	3%
Μέγιστη πτώση τάσης μεταξύ του ρυθμιστή και συσσωρευτών	1%
Μέγιστη πτώση τάσης μεταξύ των συσσωρευτών και του αναστροφέα	1%
Μέγιστη πτώση τάσης μεταξύ του ρυθμιστή και του αναστροφέα	1%
Μέγιστη πτώση τάσης μεταξύ του ρυθμιστή ή αναστροφέα και των φορτίων DC ή AC αντίστοιχα	3%

Βήμα 2^ο : Υπολογισμός διατομής αγωγών

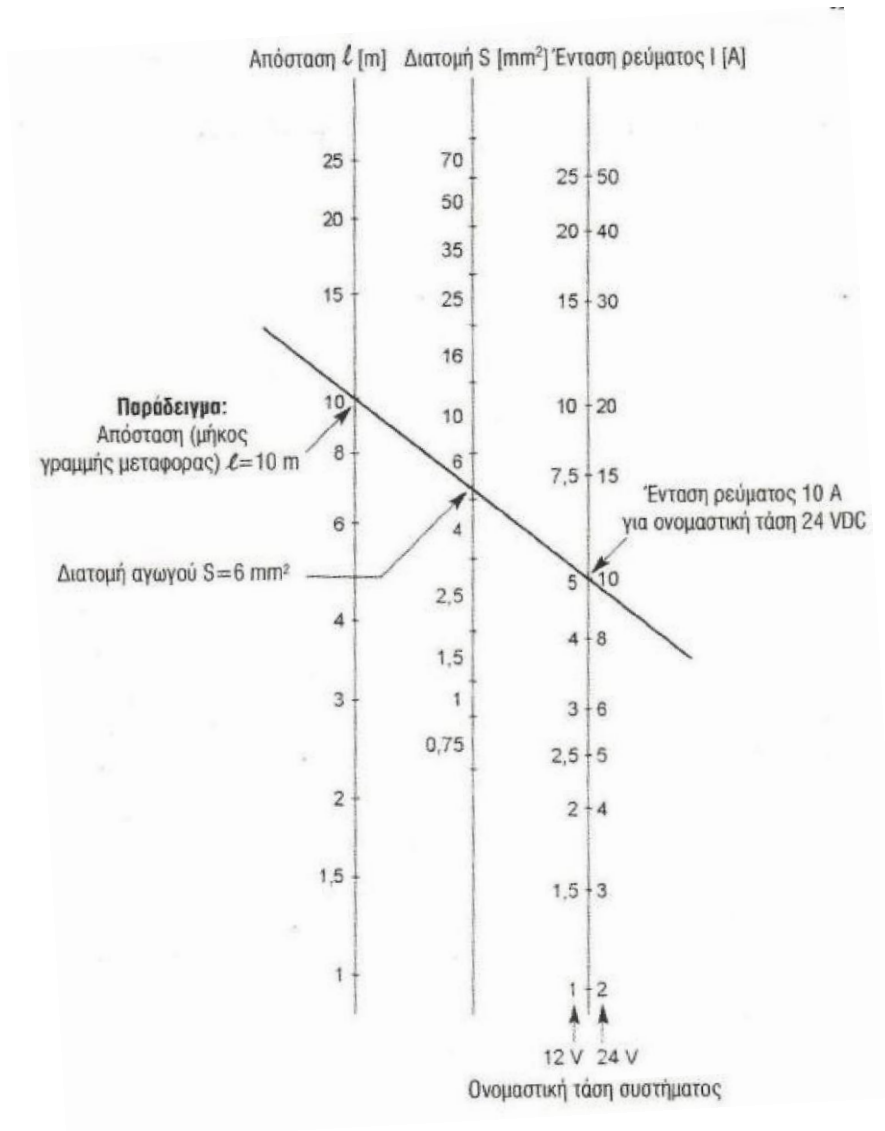
Για αγωγούς από χαλκό η διατομή S που θα επιλεγεί για κάθε υποσύστημα υπολογίζεται, για το συνεχές και το μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, από τον τύπο:

$$S(mm^2) = \frac{2 \cdot \rho \cdot L(m) \cdot i(A)}{\Delta V(V)}$$

Όπου

- S : Η διατομή σε mm^2
- L : Μήκος σε μέτρα
- ΔV : Η μέγιστη επιτρεπτή πτώση τάσης σε Volt με $\Delta V = V_N \cdot \frac{\%}{100}$
- i : Η μέγιστη ένταση του ρεύματος σε αμπέρ προσαυξημένη κατά 25%
- ρ : Η ειδική αντίσταση του υλικού του καλωδίου ($\rho = \frac{1}{56}$ για τον χαλκό)

Η διατομή των αγωγών μπορεί να υπολογιστεί και από το νομογράφημα του επόμενου σχήματος. Στη δεξιά ευθεία σημειώνεται η μέγιστη ένταση του ρεύματος I και από την αριστερή η απόσταση L που πρέπει να διανύσει ο αγωγός. Ενώνοντας τα δυο σημεία, η ευθεία που δημιουργείται τέμνει τον κεντρικό άξονα του νομογραφήματος και το σημείο τομής μας δίνει την ελάχιστη απαιτούμενη διατομή του αγωγού. Επιλέγεται λοιπόν η επόμενη αναγραφόμενη τιμή προς τα πάνω, από το σημείο τομής.



Σχήμα 3.12.1 : Νομογράφημα για τον υπολογισμό της διατομής ενός ηλεκτρικού αγωγού

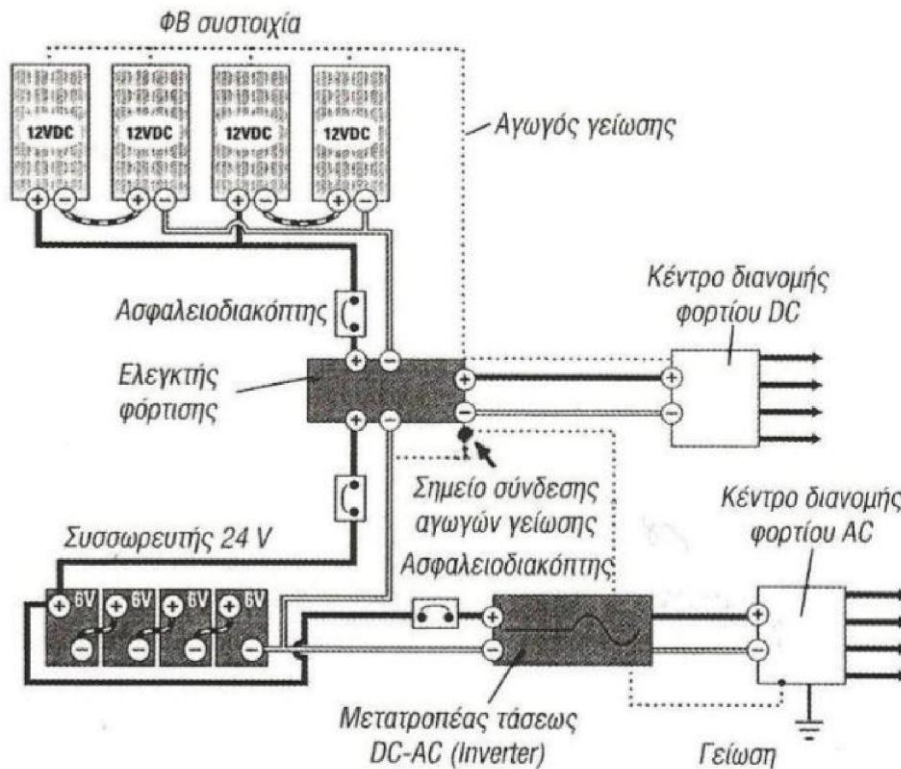
3.13 Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία

Η γείωση των ΦΒ συστημάτων κρίνεται απαραίτητη για τους παρακάτω λόγους:

α. Αποφυγή ζημιών που μπορεί να υποστεί ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός λόγω κρουστικών υπερτάσεων, δηλαδή, λόγω απότομων αυξήσεων της απόλυτης τιμής του δυναμικού από μερικά Volts μέχρι χιλιάδες Volts, των οποίων η διάρκεια κυμαίνεται από 10^{-6} s έως 10^{-3} s. Οι κρουστικές υπερτάσεις δημιουργούνται από κεραυνούς, αστραπές, χειρισμούς διακοπών, βραχυκυκλώματα κλπ.

β. Ασφάλεια του προσωπικού συντήρησης από ηλεκτροπληξία λόγω διαρροής ρευμάτων.

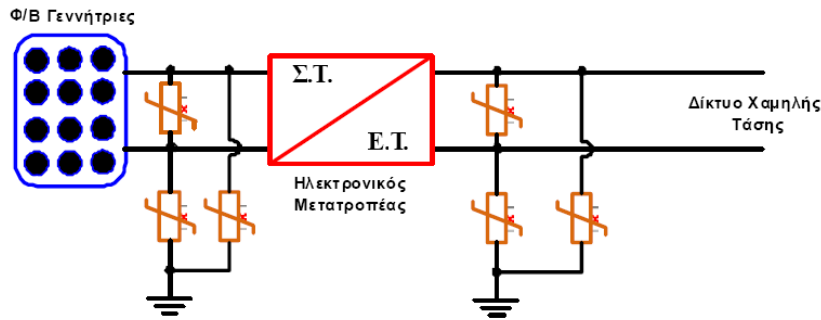
Ο τρόπος γείωσης μιας ΦΒ εγκατάστασης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.13.1: Γείωση ΦΒ εγκατάστασης

Για μια εγκατάσταση ΦΒ συστήματος η οποία βρίσκεται στη γη και όχι σε κάποιο κτίριο μπορεί να επιλεγεί ο συνδυασμός άμεσης θεμελιακής γείωσης με διακόπτες διαφυγής έντασης. Η θεμελιακή γείωση αποτελείται από ταινία ή κυλινδρικό αγωγό, που τοποθετείται στο κάτω μέρος των συστοιχιών σε βάθος περίπου 1m. Η θεμελιακή γείωση καθώς συνδέεται ηλεκτρικά με τον οπλισμό της εγκατάστασης αποκτά εντυπωσιακά χαμηλές τιμές αντίστασης, διότι σχηματίζει ένα πολύ μεγάλο ηλεκτρόδιο γείωσης.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια ενδεικτική μορφή εγκατάστασης των διατάξεων προστασίας από υπερτάσεις για την προστασία μόνο του Φ/Β συστήματος η οποία και συνιστάται. Παράλληλα θα πρέπει να προβλεφθεί και προστασία των υφιστάμενων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων του κτηρίου (π.χ. προστασία γενικού πίνακα και υποπινάκων).



Σχήμα 3.13.2: Τυπική μορφή των συστημάτων γειώσεως και προστασίας από υπερτάσεις της εγκατάστασης

Τα πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας που ισχύουν και εφαρμόζονται είναι της σειράς ΕΛΟΤ EN 62305 καθώς επίσης της σειράς ΕΛΟΤ EN 50164. Τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 62305 περιγράφουν τις απαιτήσεις σχεδιασμού ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας ενώ τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 50164 περιγράφουν τις απαιτήσεις δοκιμών των εξαρτημάτων αντικεραυνικής προστασίας. Επίσης για την προστασία από υπερτάσεις τα αντίστοιχα πρότυπα είναι της σειράς ΕΛΟΤ EN 61643 τα οποία περιγράφουν τις απαιτήσεις δοκιμών και εγκατάστασης των διατάξεων προστασίας από υπερτάσεις τόσο για τα ενεργειακά όσο και για τα τηλεπικοινωνιακά κυκλώματα.

Η αναγκαιότητα εγκατάστασης ενός συστήματος εξωτερικής αντικεραυνικής προστασίας μπορεί να εξετασθεί με την εφαρμογή του προτύπου ΕΛΟΤ EN 62305-2. Το πρότυπο εξετάζει, ανεξάρτητα με το εάν υπάρχει Φ/Β εγκατάσταση, τον κίνδυνο που μπορεί να έχει το υφιστάμενο κτήριο σε ένα άμεσο ή έμμεσο κεραυνικό πλήγμα.

Εάν η εγκατάσταση ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας κριθεί απαραίτητη, ο σχεδιασμός του συστήματος θα πρέπει να υλοποιηθεί με βάση το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 62305-3.

3.14 Χωροθέτηση Φ/Β πλαισίων

Κατά την τοποθέτηση των ΦΒ πλαισίων πρέπει να μεριμνήσουμε ώστε ένα πλαίσιο να μην σκιάζει αισθητά ένα άλλο. Ιδιαίτερη προσοχή συνίσταται όταν έχουμε δυο σειρές πλαισίων και δεν θέλουμε η μια σειρά να σκιάζει την άλλη. Αυτό

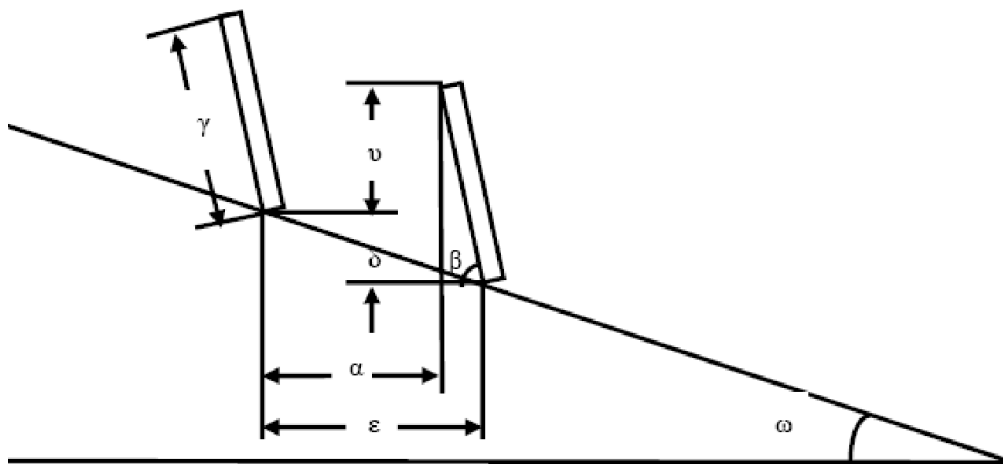
μπορούμε να το επιτύχουμε με τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης ε μεταξύ των δυο γειτονικών σειρών. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Βήμα 1^ο : Υπολογισμός της επικάλυψης του ύψους της κατασκευής στήριξης:

$$v = \gamma(m) \cdot \sin \beta(^{\circ}) - \delta(m) \quad \text{σε μέτρα}[m]$$

Όπου:

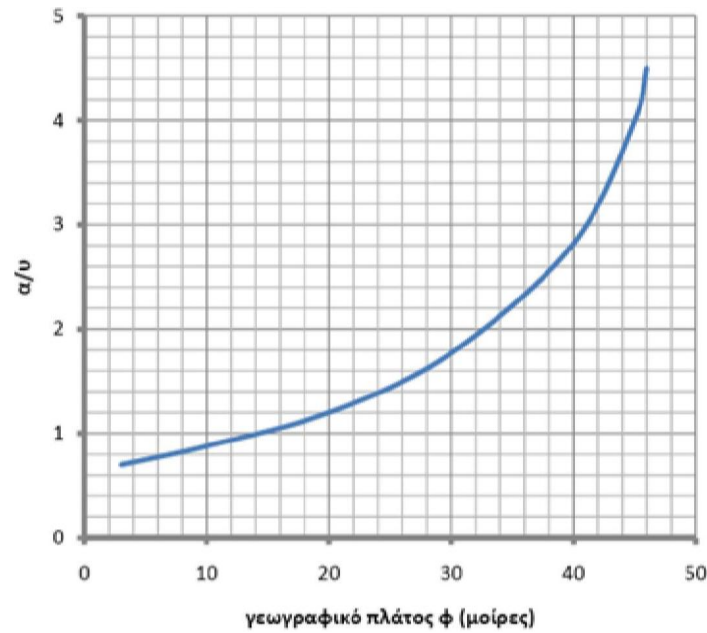
- γ [m] : μήκος ΦΒ πλαισίων
- β [°] : γωνία κλίσης ΦΒ πλαισίων
- δ [m] : υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα δυο σειρών ΦΒ πλαισίων ($\delta=0$ για στήριξη στο ίδιο επίπεδο)



Σχήμα 3.14.1: Διάταξη Φ/Β πλαισίων σε παράλληλες σειρές

Βήμα 2^ο : Υπολογισμός της ελεύθερης απόστασης μεταξύ δυο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων:

Η ελεύθερη απόσταση a προκύπτει από το λόγο a/v , τον οποίο υπολογίζουμε από το παρακάτω διάγραμμα που δείχνει την καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης a μεταξύ δυο γειτονικών σειρών φ/β πλαισίων προς την επικάλυψη του ύψους v , σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ του τόπου.



Σχήμα 3.14.2 Γραφική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ του λόγου a/v και του γεωγραφικού πλάτους φ

Βήμα 3^ο : Υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης μεταξύ δυο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων:

$$\varepsilon = \alpha(m) + \gamma(m) \cdot \cos \beta(^{\circ}) \quad \text{σε μέτρα}[m]$$

Όπου:

- α [m]: η ελεύθερη απόσταση
- γ [m]: το μήκος ΦΒ πλαισίων
- β [°]: η γωνία κλίσης πλαισίων

3.15 Υπολογισμός εμβαδού οριζόντιας έκτασης τοποθέτησης των πλαισίων

Το εμβαδό της οριζόντιας έκτασης S_E σε m^2 , που θα χρειαστεί για την τοποθέτηση των ΦΒ πλαισίων ή πάνελ ή συστοιχιών, δίνεται από τη σχέση

$$S_E(m^2) = S_0(m^2) \cdot \frac{\varepsilon(m)}{\gamma(m) \cdot \cos \beta(^{\circ})}$$

Όπου :

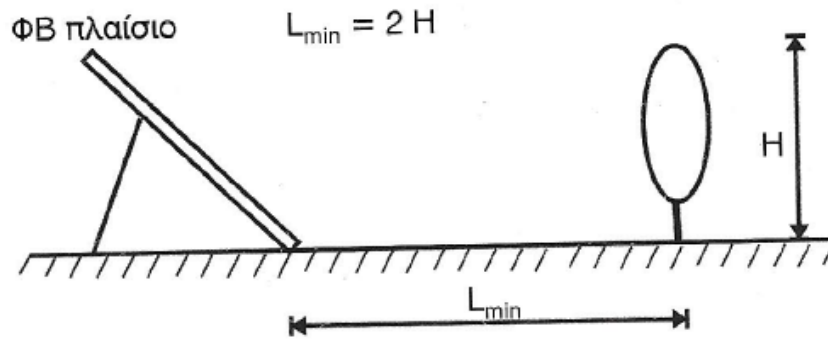
- S_o [m^2]: εμβαδόν οριζόντιας προβολής όλων των ΦΒ πλαισίων με $S_o = S_\pi \cdot N \cdot \cos \beta$
- S_π [m^2]: το εμβαδό του ΦΒ πλαισίου
- N : αριθμός ΦΒ πλαισίων
- ε [m]: η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων
- γ [m]: το μήκος ΦΒ πλαισίων
- β [$^\circ$]: η γωνία κλίσης πλαισίων

3.16 Αποφυγή σκίασης από εμπόδια

Στην περιοχή της Φ/Β εγκατάστασης μπορεί να υπάρχουν δέντρα, θάμνοι, παρακείμενα κτίρια, γειτονικά ΦΒ πλαίσια, κολώνες κ.λπ. τα οποία μπορεί να προκαλούν σκίαση πάνω στα φ/β πλαίσια. Η σκίαση επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των ΦΒ πλαισίων. Μια μικρή ποσότητα σκιάς μπορεί να μειώσει την απόδοσή τους έως και 80%. Αυτό γιατί το συνολικό ρεύμα μιας στοιχειοσειράς Φ/Β πλαισίων θα καθορίζεται από το μειωμένο ρεύμα του σκιασμένου τμήματος της Φ/Β συστοιχίας. Επίσης οι μόνιμοι και επαναλαμβανόμενοι τοπικοί σκιασμοί σε ώρες υψηλής ακτινοβολίας δύναται να καταπονήσουν το σκιαζόμενο Φ/Β πλαίσιο, προκαλώντας την πρόωρη γήρανση αυτού. Συνεπώς είναι σημαντικό να αποφεύγονται σκιασμοί και πρέπει να γίνεται σχολαστική αξιολόγηση της περιοχής και προσεκτική επιλογή του τύπου εγκατάστασης, προκειμένου να εξασφαλίσουμε τη βέλτιστη απόδοση του συστήματος.

Η σκίαση αποτελεί μεγαλύτερο πρόβλημα κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, όταν το ύψος του ήλιου είναι χαμηλό και οι σκιές γίνονται μακρύτερες. Για τις περιοχές στο βόρειο ημισφαίριο οι υπολογισμοί της χειρότερης σκίασης γίνονται για την 21η Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο).

Ένας πρακτικός τρόπος για να αποφύγουμε τη σκίαση των πλαισίων είναι να εξασφαλίσουμε ότι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ αυτών και του εμποδίου είναι διπλάσια του ύψους του εμποδίου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.16.1: Ελάχιστη απόσταση για αποφυγή σκίασης από εμπόδιο

Η επιλογή της θέσης έδρασης της Φ/Β συστοιχίας θα πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρξουν σκιασμοί καθ' όλο το έτος και ειδικά τις ώρες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Εάν στην τοποθεσία έδρασης του Φ/Β εξοπλισμού υπάρχουν μόνιμοι ή επαναλαμβανόμενοι σκιασμοί (π.χ. σκίαση από παρακείμενα κτήρια, κολώνες, στηθαίο, κλπ.) για μεγάλο χρονικό διάστημα γύρω από το ηλιακό μεσημέρι, από 09:00 έως 15:00, τότε η θέση εγκατάστασης θεωρείται ακατάλληλη. Ο γενικός κανόνας ορθής τοποθεσίας έδρασης του Φ/Β εξοπλισμού είναι ο ορίζοντας προς Νότο να είναι ελεύθερος και χωρίς εμπόδια.

Ο έλεγχος της τοποθεσίας μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του ηλιακού χάρτη της περιοχής, μίας πυξίδας και ενός τοπογραφικού ταχυμέτρου, που είναι όργανο μέτρησης του ύψους ενός εμποδίου. Για τον σκοπό αυτό ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία:

Βήμα 1: Στεκόμαστε στο κέντρο της προτεινόμενης θέσης εγκατάστασης της Φ/Β συστοιχίας.

Βήμα 2: Χρησιμοποιώντας την πυξίδα, που δείχνει πάντοτε τον Βορά, βρίσκουμε την Ανατολή.

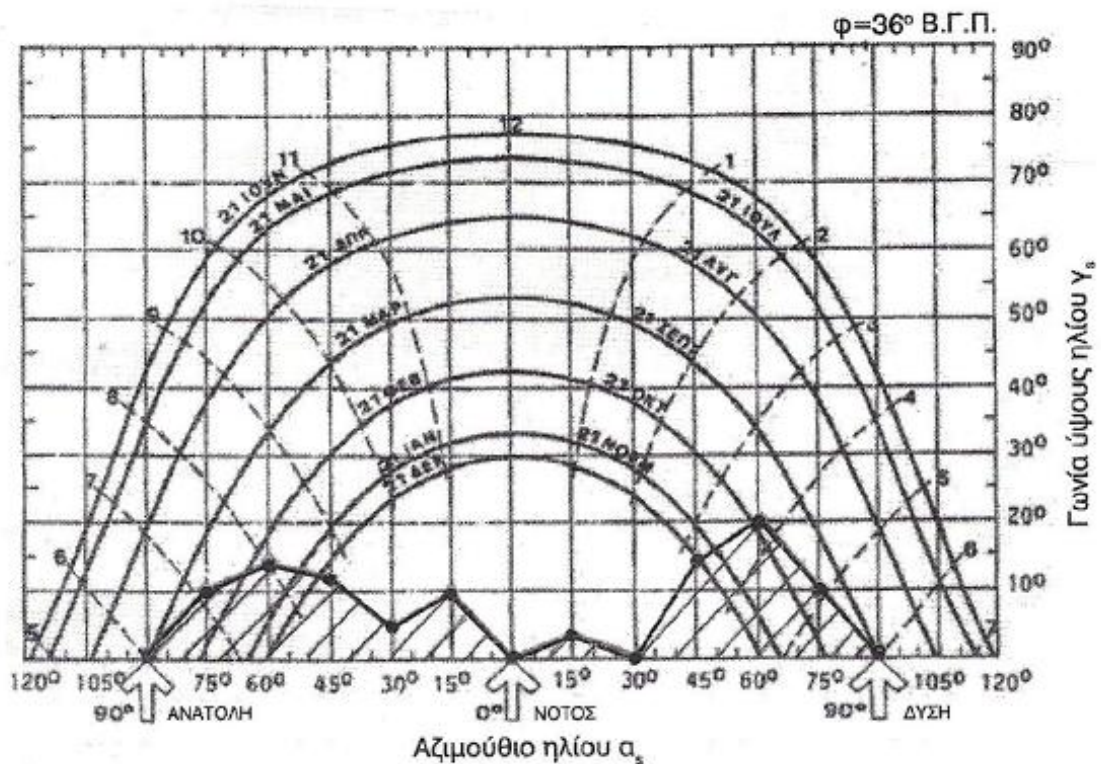
Βήμα 3: Χρησιμοποιώντας το ταχύμετρο υπολογίζουμε το ύψος του κάθε εμποδίου, που βρίσκεται στην Ανατολή, σε μοίρες.

Βήμα 4: Σημειώνουμε το ύψος σε μοίρες κάθε εμποδίου επάνω στον ηλιακό χάρτη (Σχήμα 3.16.2).

Βήμα 5: Περιστρεφόμαστε κατά 15° , με την πλάτη προς τον Βορά, και επαναλαμβάνουμε τα βήματα 3 και 4 για τη νέα θέση (Ανατολή + 15°).

Βήμα 6: Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 5, 3 και 4 μέχρι να φτάσουμε στη Δύση.

Βήμα 7: Συνδέουμε τα σημεία πάνω στον ηλιακό χάρτη και σκιαζουμε την περιοχή κάτω από τη γραμμή που σχεδιάσαμε. Μία σωστά επιλεγμένα περιοχή δεν πρέπει να σκιάζεται από τις 09:00 π.μ. έως τις 15:00 μμ.



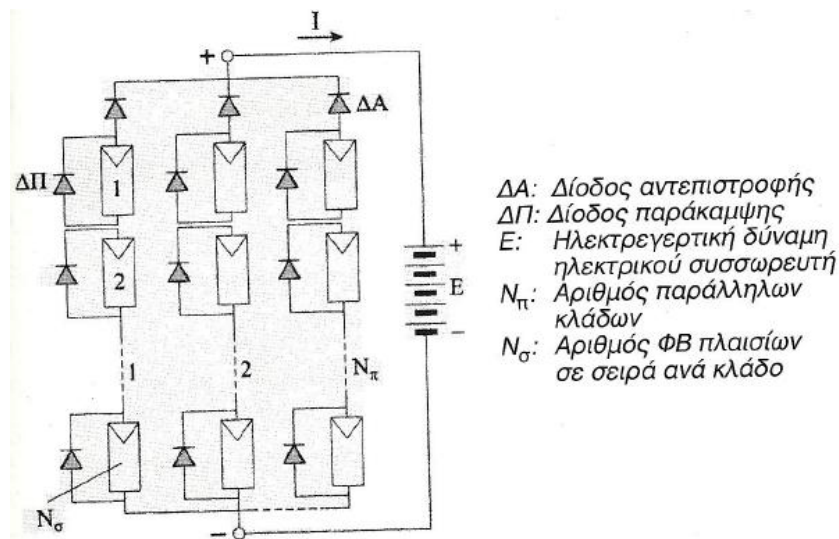
Σχήμα 3.16.2: Σχεδίαση γραμμής σκίασμού πάνω σε ηλιακό χάρτη

3.17 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες

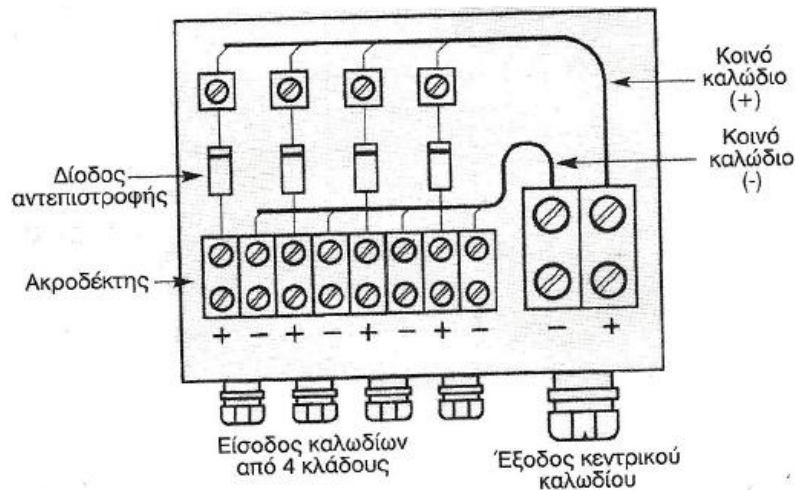
Η αρνητική επίπτωση της σκίασης, που όταν είναι ολική σε ένα πλαίσιο μπορεί να μηδενίσει την απόδοση σε ολόκληρο τον κλάδο της Φ/Β συστοιχίας, αντιμετωπίζεται με τη χρήση διόδων παράκαμψης (bypass diode) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9.8. Έτσι ακόμα και εάν ένα πλαίσιο δε λειτουργεί λόγω ολικής σκίασης ο κλάδος θα αποδώσει ηλεκτρική ισχύ μειωμένη κατά την ισχύ του σκιασμένου φ/β πλαισίου.

Επίσης σε κάθε κλάδο προβλέπεται μια διόδος αντεπιστροφής που τοποθετείται στο αντίστοιχο κιβώτιο συνδέσεων του κλάδου ή αν υπάρχει κεντρικό κιβώτιο όπου καταλήγουν οι γραμμές από όλους τους κλάδους τότε τοποθετούνται εκεί όπως φαίνεται στο σχήμα 3.17.2 .

Με αυτές τις διόδους αποκλείουμε την εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή κατά την διάρκεια της νύχτας αλλά και την κυκλοφορία ρεύματος που επιβάλλουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι στους υπόλοιπους.



Σχήμα 3.17.1: Χρήση διόδων παράκαμψης και αντεπιστροφής σε Φ/Β συστοιχία συνδεμένη με συσσωρευτές



Σχήμα 3.17.2: Κεντρικό κιβώτιο σύνδεσης Φ/Β συστοιχίας με 4 κλάδους και χρήση διόδων αντεπιστροφής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Μελέτη μικρού αυτόνομου Φ/Β συστήματος με συσσωρευτές

Σκοπός της μελέτης είναι η εγκατάσταση ενός φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για μικρές ανάγκες σε ισχύ που θα μπορεί να εξυπηρετεί π.χ περιμετρικό φωτισμό οδών και ειδικών εγκαταστάσεων, συστήματα ασφαλείας και παρακολούθησης και γενικά καταναλώσεις μη απαιτητικών φορτίων. Η υπόψη μελέτη γίνεται για μια εγκατάσταση στην περιοχή της Ρόδου.

4.1 Δεδομένα και χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος

Τα αρχικά δεδομένα που απαιτούνται για την έναρξη της σχεδίασης συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.1.1: Δεδομένα προκαταρκτικής μελέτης

Δεδομένα Προκαταρκτικής Μελέτης	
Περιοχή Μελέτης	Ρόδος (Γεωγρ. Πλάτος=36° 30')
Απαιτούμενη αυτοδυναμία συστήματος σε (ημέρες)	6 ημέρες

4.2 Ενεργειακές ανάγκες

Καταγραφή της ημερήσιας ενεργειακής ζήτησης:

4.3 Περίοδος χρήσης και βέλτιστη κλίση

Η εγκατάσταση προορίζεται για ετήσια λειτουργία σε αγροτική περιοχή της Ρόδου.

Η βέλτιστη κλίση σχεδιάζεται για χρήση όλο το έτος και ίση με το γεωγραφικό πλάτος της Ρόδου.

Πίνακας 4.3.1 : Περίοδος σχεδιασμού και βέλτιστη κλίση

Περίοδος σχεδιασμού	β_{opt}
Ετήσια Λειτουργία	$\Phi=36^{\circ} 30'$
Φ = Γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας σε μοίρες	

4.4 Ηλιακό Δυναμικό

Αξιολόγηση του ηλιακού δυναμικού στην περιοχή της Ρόδου:

Πίνακας 4.4.1 : Τιμές ηλιακής ακτινοβολίας στη Ρόδο

Μηνιαίες και ετήσιες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή της Ρόδου σε KWh/ m ²														
κλίση	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Μ.Ο.	Σύνολο Ετησίως
30°	95	101	142	159	184	191	207	210	188	153	118	95	153	1843

Μήνας σχεδίασης: Δεκέμβριος

Ημερήσια τιμή ηλιακής ακτινοβολίας:

$$\Pi = \frac{95 \text{ kwh} / \text{m}^2}{31 \text{ ημέρες}} = 3,06 \text{ kwh} / \text{m}^2 \cdot \text{d}$$

4.5 Διαστασιοδότηση Φ/Β γεννήτριας

Υπολογισμός συντελεστών απωλειών:

- Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης σ_θ :

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

Πίνακας 4.5.1 : Τιμές μέσων τιμών θερμοκρασίας της Ρόδου

Μέση μηνιαία Θερμοκρασία στη Ρόδο στη διάρκεια φωτεινών ωρών													
	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Μ.Ο.
C °	12,6	13,1	14,5	17,7	21,9	26,3	28,6	28,9	26,2	21,8	17,6	14,2	20,3

$$\Delta εκ: \quad \sigma_{\theta} = 1 - [(14,2 + 30) - 25] \times 0,004 = 0,9232$$

- Συντελεστής ρύπανσης σ_{ρ} της ατμόσφαιρας:

Αγροτική περιοχή χωρίς ρύπανση, ελάχιστη σκόνη και συχνό καθαρισμό.
Επιλέγεται $\sigma_{\rho}=0,95$.

- Συντελεστής γήρανσης:

Επιλέγεται μέσος συντελεστής γήρανσης $\sigma_{\gamma}=0,9$

- Συντελεστής απωλειών διόδου:

Επιλέγεται $\sigma_{\delta}=0,99$

- Συντελεστής ανομοιογένειας σ_{α}

Επιλέγεται συντελεστής ανομοιογένειας $\sigma_{\alpha}=0,98$.

- Συντελεστής καλωδιώσεων σ_{κ}

Επιλέγεται συντελεστής καλωδιώσεων $\sigma_{\kappa} = 0,98$

- Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας:

Αυτόνομο Φ/Β σύστημα με AC καταναλώσεις. Χρήση συσσωρευτών, ελεγκτή φόρτισης και αναστροφή. Επιλέγεται $\sigma_{\mu} = 0,85$

Συγκεντρωτικά:

$$\sigma_{\Lambda\Sigma} = \sigma_{\gamma} \cdot \sigma_{\rho} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\delta} \cdot \sigma_{\alpha} \cdot \sigma_{\kappa} = 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,9232 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \approx 0,75$$

- Ισχύς αιχμής της φ/β γεννήτριας για την κάλυψη των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων :

$$P_{\alpha}(W_p) = \frac{E_T(Wh/d) \times P_{STC}(kW/m^2) \times m}{\Pi(kWh/m^2 \cdot d) \times \sigma_{\Lambda\Sigma} \times \sigma_{\mu}} \cdot \frac{N}{N-n} = \frac{8940 \cdot 1 \cdot 1,2}{3,06 \cdot 0,75 \cdot 0,85} \cdot \frac{31}{31-6} = 6819,28 W_p$$

➤ Φωτοβολταϊκά Πλαίσια:

Επιλογή τύπου φ/β πλαισίου : Bosch Solar c-Si-M60-M235-3BB (235W)

Πίνακας 4.5.3 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου:

Electrical Characteristics	
Bosch Solar c-Si-M60-M235-3BB (235W)	
STC Power Rating	235W
Imp	7.99A
Vmp	29.41V
Isc	8.47A
Voc	36.48V
Temp. Coefficient of Power	-0.51%/C
Temp. Coefficient of Voltage	-0,135V/C
Series Fuse Rating	17A
Maximum System Voltage	600V

Αριθμός φ/β πλαισίων:

$$N_{\text{πλασίων}} = \frac{P_a(W_p)}{P_{\text{max}}(W_p)} = \frac{6819,28W_p}{235W_p} \approx 30$$

➤ Ονομαστική τάση Φ/Β γεννήτριας V_N :

Η επόμενη διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί είναι σειριακός ρυθμιστής φόρτισης: Sunny Island Charger 50 (24 V) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4.5.4 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά ρυθμιστής φόρτισης

Είσοδος (Φ/Β γεννήτρια)	
Μεγ. φωτοβολταϊκή ισχύς	1250 W
Μεγ. τάση DC	140 V DC
Βέλτιστο εύρος τάσης MPPT	40 V – 80 V
Αριθμός ανιχνευτών σημείου μέγιστης ισχύος (ανιχνευτής MPP)	1
Μέγ. φωτοβολταϊκό ρεύμα	40 A
Έξοδος (συσσωρευτής)	
Ονομαστική ισχύς DC έως 40°C	1200 W
Ονομαστική τάση συσσωρευτή	24 V
Εύρος ονομαστικής τάσης	16 V – 31,5 V
Τύπος συσσωρευτή	Σφραγισμένοι και κλειστοί συσσωρευτές μολύβδου
Μεγ. ρεύμα φόρτισης / ρεύμα συνεχούς φόρτισης	50 A / 50 A
Ρύθμιση φόρτισης	IUoU

Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	-25°C ... +60 °C
--------------------------------	------------------

Από τα χαρακτηριστικά του ρυθμιστή φόρτισης επιλέγεται ότι το σύστημα συσσωρευτών θα έχει $V_B=24$ V.

Για την τάση V_N πρέπει να ισχύει : $V_N > 1,2V_B=28,8$ V

Επιλέγεται ονομαστική τάση φ/β γεννήτριας $V_N =60$ V

Σύνδεση φ/β πλαισίων σε σειρά:

$$N_s = \frac{V_N (V)}{V_{\max} (V)} = \frac{60 \text{ Volt}}{29,41 \text{ Volt}} \approx 2 \text{ πλαίσια}$$

Σύνδεση φ/β πλαισίων παράλληλα:

$$N_p = \frac{N_{\text{πλαίσια}}}{N_s} = \frac{30}{2} = 15 \text{ πλαίσια}$$

Τελικός αριθμός φ/β πλαισίων:

$$N_{\text{πραγμ.πλαίσια}} = N_s \cdot N_p = 2 \cdot 15 = 30 \text{ πλαίσια}$$

4.6 Υπολογισμός συστήματος συσσωρευτών

Έχει επιλεγθεί $V_B=24$ V λόγω της τάσης εξόδου του ρυθμιστή φόρτισης.

Ημέρες αυτονομίας έχουν καθοριστεί στις 6 άρα επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης $DOD=0,6$

- Ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας b

Το σύστημα σε τις μέρες αυτονομίας καλύπτεται εξ' ολοκλήρου από το συσσωρευτή. Άρα επιλέγω $b=1$.

- Συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων m

Για ποσοστό 20% επιπλέον των καταγραφέντων φορτίων $m=1,2$.

- Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας $\sigma_{εκ}$

Χρησιμοποιείται αναστροφέας άρα $\sigma_{εκ}=0,91$

Υπολογισμός συνολικής χωρητικότητας συστήματος:

$$C (Ah) = \frac{E_T (W_p / d) \cdot m \cdot (n + b)}{\sigma_{γβ} \cdot DOD \cdot V_B (V) \cdot \sigma_{εκ}} = \frac{8940 \cdot 1,2 \cdot (6 + 1)}{0,8 \cdot 0,6 \cdot 24 \cdot 0,91} = 7163,46 Ah$$

Θα επιλεγθούν συσσωρευτές των 12V συνδεόμενοι ανά 2 σε σειρά έτσι ώστε:

$$V_B = 2 \cdot 12 = 24V$$

Η χωρητικότητα θα καθοριστεί από την παράλληλη σύνδεση αυτών ώστε να έχω τελικά 7163,46 Ah. Η μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή σχεδίασης (Ρόδος) είναι 20,3° C. Επομένως δε χρειάζεται να πραγματοποιηθεί διόρθωση χωρητικότητας λόγω θερμοκρασίας.

Επιλέγεται ο συσσωρευτής PVX-2580L με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4.6.2 : Τεχνικά Χαρακτηριστικά συσσωρευτή

Type	PVX-2580L
Voltage	12v
Industry Reference	8D
Battery Series	12 Volt Sun Xtender Series
Nominal Capacity Ampere Hours @ 25° C (77° F) to 1.75 Volts per cell - 24 Hour Rate	258 Ah
Weight	165 lb / 75 kg
Length	527 mm
Width	277 mm
Height	248 mm

Ο αριθμός των παράλληλων συνδέσεων συσσωρευτών είναι:

$$N_{bat,p} = \frac{7136,46}{258} = 27,7 \approx 28$$

Επομένως ο συνολικός αριθμός συσσωρευτών είναι :

$$N_{bat} = 28 \cdot 2 = 56 \text{ συσσωρευτές}$$

Για τη στέγαση των συσσωρευτών απαιτείται χώρος $S_{bat} = 0,527 \cdot 0,277 \cdot 56 = 8,18 m^2$ Αν συνυπολογιστούν και διάδρομοι διέλευσης μπροστά από τους συσσωρευτές απαιτείται συνολικά χώρος τουλάχιστον 15-20 τ.μ. αν τοποθετηθούν όλοι στο επίπεδο. Υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης σε ράφια όπου μπορεί να μειωθεί ο απαιτούμενος χώρος.

4.7 Υπολογισμός Ηλεκτρονικών Διατάξεων

4.7.1 Σειριακός ρυθμιστής φόρτισης

Έχει επιλεγθεί σειριακός ρυθμιστής φόρτισης: Sunny Island Charger 50 (24 V) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4.7.1.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά ρυθμιστής φόρτισης

Είσοδος (Φ/Β γεννήτρια)	
Μεγ. φωτοβολταϊκή ισχύς	1250 W
Μεγ. τάση DC	140 V DC
Βέλτιστο εύρος τάσης MPPT	40 V – 80 V
Αριθμός ανιχνευτών σημείου μέγιστης ισχύος (ανιχνευτής MPP)	1
Μέγ. φωτοβολταϊκό ρεύμα	40 A
Έξοδος (συσσωρευτής)	
Ονομαστική ισχύς DC έως 40°C	1200 W
Ονομαστική τάση συσσωρευτή	24 V
Εύρος ονομαστικής τάσης	16 V – 31,5 V
Τύπος συσσωρευτή	Σφραγισμένοι και κλειστοί συσσωρευτές μολύβδου
Μεγ. ρεύμα φόρτισης / ρεύμα συνεχούς φόρτισης	50 A / 50 A
Ρύθμιση φόρτισης	I _U U
Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	-25°C ... +60 °C

Έλεγχος:

4.7.2 Σύνδεση φ/β γεννήτριας και ρυθμιστών:

Έχω μέχρι στιγμής στο σχεδιασμό μου 15 παράλληλες σειρές πλαισίων οι οποίες ανά δύο πρέπει να συνδεθούν σε ένα ρυθμιστή Sunny Island Charger 50. Έτσι θα έχω 7 ρυθμιστές με 2 παράλληλες σειρές η κάθε μια και μένει η 15^η παράλληλη σειρά για σύνδεση με ένα ρυθμιστή. Για λόγους ομοιόμορφης κατανομής λοιπόν θα προσθέσω άλλη μια παράλληλη σειρά (άλλα δυο πλαίσια σε σειρά δηλαδή) και θα έχω συνολικά:

$$N_{charger} = \frac{16}{2} = 8 \text{ ρυθμιστές.}$$

Οπότε για την φωτοβολταϊκή γεννήτρια θα έχω τελικό αριθμό φ/β πλαισίων:

$$N_{πραγμ.πλαισιων} = N_s \cdot N_p = 2 \cdot 16 = 32 \text{ πλαίσια}$$

Το κωτίο που αναφέρεται στο παραπάνω σχήμα ως Combiner Box είναι ένα κωτίο συνδέσεων των καλωδίων από τα φ/β πλαίσια σε ένα κεντρικό καλώδιο προς τον ρυθμιστή φόρτισης και μπορεί να περιέχει και στοιχεία αντικεραυνικής προστασίας. Ένα ενδεικτικό διάγραμμα συνδέσεων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

4.7.3 Αναστροφέας Τάσης DC-AC (inverter)

Η εγκατάσταση είναι αυτόνομη με χρήση συσσωρευτών ονομαστικής τάσης $V_B=24$ V άρα επιλέγεται ο inverter για αυτόνομες εφαρμογές Sunny Island 2224 με δυνατότητα σύνδεσης και βοηθητικής πηγής AC (π.χ. γεννήτριας) και έχει τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4.7.3.1: Τεχνικά Χαρακτηριστικά αναστροφέα τάσης (Inverter)

Έξοδος AC (καταναλωτές)	
Ονομαστική τάση AC (ρυθμιζόμενη)	230 V (202 V – 253 V)
Συχνότητα δικτύου AC (ρυθμιζόμενη)	50 Hz / 60 Hz (45 Hz - 65 Hz)
Συνεχής ισχύς AC στους 25°C / 45°C	2200 W / 1600 W
Ισχύς AC στους 25°C για 30 min / 1 min / 3 s	2900 W / 3800 W / 3900 W
Ονομαστικό ρεύμα AC / μεγ. ρεύμα AC (peak)	9,6 A / 25 A για περ. 500 ms
Συντελεστής παραμόρφωσης τάσης εξόδου / συντελεστής ισχύος (cos φ)	< 4% / -1 έως +1
Είσοδος AC (γεννήτρια ή δίκτυο)	
Τάση εισόδου AC (εύρος)	230 V (172,5 V - 264,5 V)
Συχνότητα εισόδου AC (εύρος)	50 Hz / 60 Hz (40 Hz - 70 Hz)
Μεγ. ρεύμα εισόδου (ρυθμιζόμενο) / Μεγ. ισχύς εισόδου	25 A (0 A – 25 A) / 5,75 kW
Είσοδος DC συσσωρευτή	
Τάση συσσωρευτή (εύρος)	24 V (16,8 V - 31,5 V)
Μεγ. ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή/ρεύμα διαρκούς φόρτισης στους 25 °C	90 A / 80 A
Τύπος συσσωρευτή / χωρητικότητα συσσωρευτή (εύρος)	Μολύβδου, NiCd / 100 – 10.000 Ah

Ρύθμιση φόρτισης	Μέθοδος IUoU
Βαθμός απόδοσης / Ιδιοκατανάλωση	
Μεγ. βαθμός απόδοσης	94%
Ιδιοκατανάλωση άνευ φορτίου / κατάσταση αναμονής	21 W / 6 W
Συστήματα προστασίας	
Προστασία από αντιστροφή πόλων DC / ασφάλεια DC	— / —
Βραχυκύκλωμα AC / υπερφόρτιση AC	ναι / ναι
Υπερθέρμανση / Βαθιά εκφόρτιση συσσωρευτή	ναι / ναι
Γενικά στοιχεία	
Διαστάσεις (Π / Υ / Β) σε mm	470/445/185
Βάρος	19 kg
Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	-25 °C ... +60 °C
Κατηγορία προστασίας (κατά IEC 60529)	Εγκατάσταση σε εξωτερικό χώρο (IP54)
Εξοπλισμός / λειτουργία	
Χειρισμός & οθόνη / Ρελέ πολλαπλών λειτουργιών	εξωτερικά μέσω SRC-1 / 2 / ναι
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
Εγγύηση (5 / 10 / 15 / 20 / 25 έτη)	ναι / προαίρ. / προαίρ. / προαίρ. /

προαιρ.

- Υπολογισμός ελάχιστης απόστασης για αποφυγή σκίασης

Οι διαστάσεις του επιλεγμένου φ/β πλαισίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.8.2: Διαστάσεις επιλεγμένου φ/β πλαισίου

Length: (γ)	$\gamma = 1660$ [mm]
Width: (π)	$\pi = 990$ [mm]
Height:	50 [mm]
Height, incl. junction box:	50 [mm]

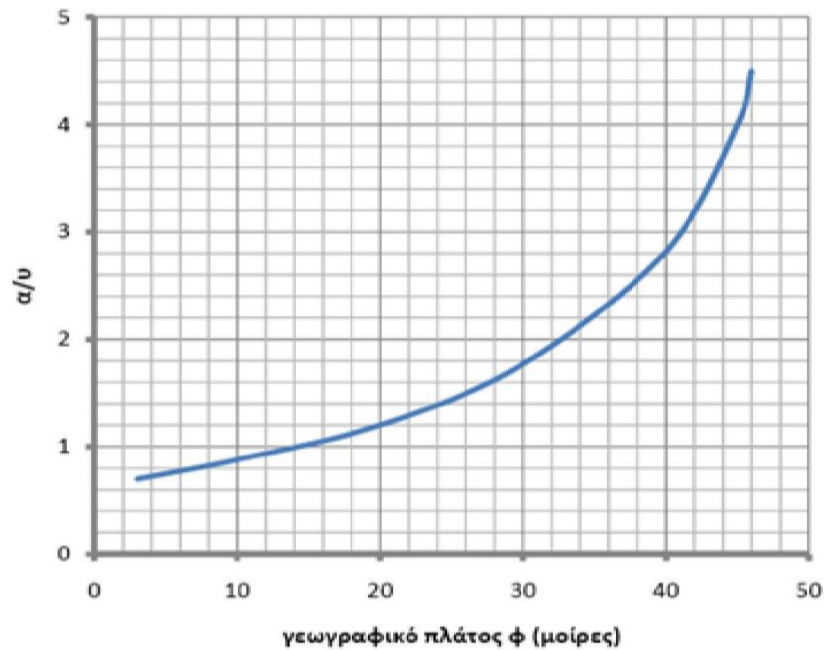
Βήμα 1^ο : Υπολογισμός της επικάλυψης του ύψους της κατασκευής στήριξης. Η τοποθέτηση γίνεται σε επίπεδη επιφάνεια άρα $\delta=0$, $\gamma=1,66$:

$$v = \gamma \cdot \sin \beta - \delta = 1,66 \cdot \sin 36 - 0 = 0,975 \text{ m}$$

Βήμα 2^ο : Υπολογισμός της ελεύθερης απόστασης μεταξύ δυο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων:

Ο λόγος a/v από το παρακάτω διάγραμμα για γεωγραφικό πλάτος 36^ο προκύπτει ότι είναι:

$$\frac{a}{v} = 2,4$$



Σχήμα 4.8.1: Διάγραμμα Moneron

Επομένως

$$\frac{\alpha}{\nu} = 2,4 \rightarrow \alpha = 2,4 \cdot 0,975 = 2,34$$

Βήμα 3^ο : Υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης μεταξύ δυο γειτονικών σειρών ΦΒ πλαισίων:

$$\varepsilon = \alpha + \gamma \cdot \cos \beta = 2,34 + 1,66 \cdot \cos 36 = 3,69 \text{ m}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Μελέτη μεγάλου αυτόνομου Φ/Β συστήματος με συσσωρευτές

Σκοπός της μελέτης είναι η εγκατάσταση ενός εκτεταμένου αυτόνομου φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θα έχει ονομαστική ισχύ ικανή να καλύψει μεγάλες ανάγκες σε ενέργεια, σε απομονωμένες κτιριακές εγκαταστάσεις στην περιοχή της Ρόδου.

5.1 Δεδομένα και χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος

Τα αρχικά δεδομένα που απαιτούνται για την έναρξη της σχεδίασης συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.1.1: Δεδομένα προκαταρκτικής μελέτης

Δεδομένα Προκαταρκτικής Μελέτης	
Περιοχή Μελέτης	Ρόδος (Γεωγρ. Πλάτος=36° 30')
Απαιτούμενη αυτοδυναμία συστήματος σε (ημέρες)	6 ημέρες

5.2 Ενεργειακές ανάγκες

Καταγραφή της ημερήσιας ενεργειακής ζήτησης:

Πίνακας 5.2.1: Εκτιμώμενες ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες

Εκτιμώμενη Κατανάλωση Ενέργειας Ημερησίως			
	ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ (AC)		
Φωτισμός εσωτερικών κοινόχρηστων χώρων	5χ60	8	2400
Φωτισμός χώρων προσωπικού	5χ60	5	1500
Φωτισμός εξωτερικών χώρων	20χ50	12	12000
Τηλεόραση	90	5	450
Ηχοσύστημα	150	2	300
Συσκευή αναπαραγωγής DVD	90	2	180
Ψυγείο κουζίνας (καταψύκτης)	300	10	3000
Ψυγείο χώρου εστίασεως	160	10	1600
Απορροφητήρας	300	3	900
Πλυντήριο	2000	0,5	1000
Θερμοσίφωνα	4000	1	4000
Ηλεκτρική κουζίνα με κεραμική εστία	1.300	5	6500
Ηλεκτρικός Φούρνος	3000	3	9000
Φούρνος μικροκυμάτων	850	0,5	425
Σίδερο	1.500	1	1500
Άλλες Μικρές ηλεκτρικές συσκευές	300	2	600
Τηλεπικοινωνίες σε αναμονή	20	22	440
Τηλεπικοινωνίες σε χρήση	150	2	300
Καυστήρας Πετρελαίου	150	5	750
ΣΥΝΟΛΟ ΤΙΜΩΝ			
Σύνολο ημερήσιας κατανάλωσης E_T (Wh/ημέρα)			46845

5.3 Περίοδος χρήσης και βέλτιστη κλίση

Η εγκατάσταση προορίζεται για ετήσια λειτουργία σε αγροτική περιοχή της Ρόδου. Η βέλτιστη κλίση σχεδιάζεται για χρήση όλο το έτος και ίση με το γεωγραφικό πλάτος της Ρόδου (πίνακας 4.3.1) .

5.4 Ηλιακό Δυναμικό

Η αξιολόγηση του ηλιακού δυναμικού στην περιοχή της Ρόδου σύμφωνα με τον πίνακα 4.4.1 προκύπτει:

Μήνας σχεδίασης: Δεκέμβριος

Ημερήσια τιμή ηλιακής ακτινοβολίας:

$$\Pi = \frac{95 \text{ kwh} / \text{m}^2}{31 \text{ ημέρες}} = 3,06 \text{ kwh} / \text{m}^2 \cdot \text{d}$$

5.5 Διαστασιοδότηση Φ/Β γεννήτριας

Οι συντελεστές απωλειών είναι ίδιοι όπως έχουν υπολογιστεί στην παράγραφο 4.5 :

- Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης $\sigma_{\theta}=0,9232$
- Συντελεστής ρύπανσης της ατμόσφαιρας $\sigma_{\rho}=0,95$
- Συντελεστής γήρανσης $\sigma_{\gamma}=0,9$
- Συντελεστής απωλειών διόδου $\sigma_{\delta}=0,99$
- Συντελεστής ανομοιογένειας $\sigma_{\alpha}=0,98$
- Συντελεστής καλωδιώσεων $\sigma_{\kappa}= 0,98$
- Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας $\sigma_{\mu}=0,85$

Συγκεντρωτικά:

Πίνακας 5.5.1: Συγκεντρωτικά δεδομένα για υπολογισμό φ/β γεννήτριας

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ Φ/Β ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	
Ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες	$E_T=46845 \text{ KWh/d}$
Συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων	$m=1,2$
Συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης	$\sigma_\theta=0,9232$
Συντελεστής ρύπανσης	$\sigma_p=0,95$
Συντελεστής γήρανσης	$\sigma_\gamma=0,9$
Συντελεστής απωλειών διόδου	$\sigma_\delta=0,99$
Συντελεστής ανομοιογένειας	$\sigma_\alpha=0,98$
Συντελεστής καλωδιώσεων	$\sigma_\kappa= 0,98$
Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας	$\sigma_\mu=0,85$
Ημέρες αναφοράς	$N=31$
Ημέρες αυτονομίας	$n=6$

$$\sigma_{\Lambda\Sigma} = \sigma_\gamma \cdot \sigma_p \cdot \sigma_\theta \cdot \sigma_\delta \cdot \sigma_\alpha \cdot \sigma_\kappa = 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,9232 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \approx 0,75$$

Ισχύς αιχμής της φ/β γεννήτριας για την κάλυψη των ημερήσιων ενεργειακών απαιτήσεων :

$$P_{\alpha}(W_p) = \frac{E_T(Wh/d) \times P_{STC}(kW/m^2) \times m}{\Pi(kWh/m^2 \cdot d) \times \sigma_{ΑΣ} \times \sigma_{\mu}} \cdot \frac{N}{N-n} = \frac{46845 \cdot 1,2}{3,06 \cdot 0,75 \cdot 0,85} \cdot \frac{31}{31-6} = 35732,6 W_p$$

➤ Φωτοβολταϊκά Πλαίσια:

Επιλογή τύπου φ/β πλαισίου : Bosch Solar c-Si-M60-M235-3BB (235W)

Πίνακας 5.5.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου

Electrical Characteristics	
Bosch Solar c-Si-M60-M235-3BB (235W)	
STC Power Rating	235W
I_{mp}	7.99A
V_{mp}	29.41V
I_{sc}	8.47A
V_{oc}	36.48V
Temp. Coefficient of Power	-0.51%/C
Temp. Coefficient of Voltage	-0,135V/C
Series Fuse Rating	17A
Maximum System Voltage	600V

- Αριθμός φ/β πλαισίων:

$$N_{\text{πλαισίων}} = \frac{P_a(W_p)}{P_{\text{max}}(W_p)} = \frac{35732,6W_p}{235W_p} \approx 152$$

- Ονομαστική τάση Φ/Β γεννήτριας V_N :

Η επιλογή της ονομαστικής τάσης της Φ/Β γεννήτριας καθορίζει και την επόμενη ηλεκτρονική συσκευή που θα χρησιμοποιηθεί και τον τρόπο σύνδεσης των φ/β πλαισίων.

Η ισχύς της Φ/Β γεννήτριας είναι περίπου 36KW_p , τιμή αρκετά μεγάλη. Αν χρησιμοποιήσω ρυθμιστή φόρτισης όπως στην προηγούμενη περίπτωση μικρής αυτόνομης εγκατάστασης θα απαιτηθεί μεγάλος αριθμός φορτιστών που συνεπάγεται και περισσότερες συνδέσεις με καλώδια, παράγοντες που αυξάνουν το κόστος της εγκατάστασης και κάνουν επίσης την σχεδίαση ιδιαίτερα πολύπλοκη.

Έστω ότι επιλεγόταν η χρήση του σειριακού ρυθμιστής φόρτισης: Sunny Island Charger 50 (48 V) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5.5.3: Τεχνικά Χαρακτηριστικά φ/β ρυθμιστή φόρτισης

Είσοδος (Φ/Β γεννήτρια)	
Μεγ. φωτοβολταϊκή ισχύς	2400 W
Μεγ. τάση DC	140 V DC
Βέλτιστο εύρος τάσης MPPT	70 V – 100 V
Αριθμός ανιχνευτών σημείου μέγιστης ισχύος (ανιχνευτής MPP)	1
Μέγ. φωτοβολταϊκό ρεύμα	40 A
Έξοδος (συσσωρευτής)	
Ονομαστική ισχύς DC έως 40°C	2400 W
Ονομαστική τάση συσσωρευτή	48 V
Εύρος ονομαστικής τάσης	36 V - 65 V
Τύπος συσσωρευτή	σφραγισμένοι και κλειστοί συσσωρευτές μολύβδου
Μεγ. ρεύμα φόρτισης / ρεύμα συνεχούς φόρτισης	50 A / 50 A
Ρύθμιση φόρτισης	IUoU
Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	-25°C ... +60 °C

Από τα χαρακτηριστικά του ρυθμιστή φόρτισης θα επιλεγόταν για το σύστημα συσσωρευτών ονομαστική τάση $V_B=48$ V.

Για την τάση V_N πρέπει να ισχύει : $V_N > 1,2V_B=57,6$ V

Θ επιλεγόταν ονομαστική τάση φ/β γεννήτριας $V_N=88$ V

Για τη σύνδεση φ/β πλαισίων σε σειρά θα ίσχυε:

$$N_s = \frac{V_N (V)}{V_{\max} (V)} = \frac{88 \text{ Volt}}{29,41 \text{ Volt}} = 2,9 \approx 3 \text{ πλάισια}$$

Για τη σύνδεση φ/β πλαισίων παράλληλα θα ίσχυε:

$$N_p = \frac{N_{\text{πλαίσια}}}{N_s} = \frac{152}{3} = 50,66 \approx 51 \text{ πλάισια}$$

Τελικός αριθμός φ/β πλαισίων:

$$N_{\text{πραγμ.πλαίσια}} = N_s \cdot N_p = 3 \cdot 51 = 153 \text{ πλάισια}$$

Για τη σύνδεση των τριών πλαισίων σε σειρά το μέγιστο ρεύμα θα είναι :
 $I_{\max}=7,99 \text{ A}$

Συντελεστής ασφάλειας για σειριακό ρυθμιστή $I=1,5 \cdot I_{\max} = 1,5 \cdot 7,99 = 11,9 \approx 12 \text{ A}$
το οποίο είναι μικρότερο από τα 40 A που είναι το μέγιστο φ/β ρεύμα που μπορεί να δεχτεί ο ρυθμιστής.

Η μέγιστη φωτοβολταϊκή ισχύς εισόδου σε αυτή την περίπτωση: $P_{in} = 3 \cdot 3 \cdot 235 = 2115 \text{ Watt}$ που είναι αποδεκτή τιμή εντός του ορίου του ρυθμιστή (2400 W).

Μέγιστη τάση 3 πλαισίων σε σειρά: $V_{max} = 3 \times 29,41 = 88,23 \text{ V}$ εντός του βέλτιστου εύρους τάσης MPPT του ρυθμιστή (70-100 Volt).

Υπό αυτές τις προϋποθέσεις θα απαιτούνταν συνολικά $N_{charger} = \frac{51}{3} = 17$ ρυθμιστές Sunny Island Charger 50 (48V). Με αυτό τον αριθμό των φορτιστών η διαδικασία σχεδίασης κρίνεται ασύμφορη και μη χρηστική λόγω και της πολυπλοκότητας που εισάγει.

Για να καλύψω τα περίπου 36KWp της Φ/Β γεννήτριας θα απαιτηθούν τρεις inverter SMC 11000TL, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 5.5.4: Τεχνικά Χαρακτηριστικά αναστροφέα τάσης SMC11000TL

Τεχνικά Χαρακτηριστικά SMC 1100TL	
Είσοδος (DC)	
Μέγιστη ισχύς DC (@ $\cos \phi = 1$)	11400 W
Μέγιστη τάση DC	700 V
Εύρος τάσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPP)	333 V – 500 V
Ονομαστική τάση DC	350 V
Ελάχιστη τάση DC / Τάση εκκίνησης	333 V / 400 V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου / ανά στοιχειοσειρά	34 A / 34 A
Αριθμός ανιχνευτών MPP / Στοιχειοσειρές ανά ανιχνευτή MPP	1 / 5
Έξοδος (AC)	
Ονομαστική ισχύς AC (@ 230 V, 50 Hz)	11000 W
Μέγιστη φαινόμενη ισχύς AC	11000 VA
Ονομαστική τάση, περιοχή τάσεων	220, 230, 240 V, 180 V – 260 V (262 V*)
Συχνότητα δικτύου, εύρος AC	50, 60 Hz, $\pm 4,5$ Hz
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	48 A
Συντελεστής ισχύος ($\cos \phi$)	1
Φάσεις τροφοδοσίας / Φάσεις σύνδεσης / Power Balancing	1 / 1 / ναί
Βαθμός απόδοσης	
Μέγιστος βαθμός απόδοσης / Euro-Eta (EBA)	98,0 % / 97,5 %

Διατάξεις προστασίας	
Προστασία από αντιστροφή πόλων DC / προστασία από ανάστροφη τάση	ναι/ προοιρ. (Ασφάλειες)
Αποζεύκτης φορτίου DC ESS	ναι
Αντοχή σε βραχυκύκλωμα AC	ναι
Επιτήρηση βραχυκυκλώματος προς τη γη	ναι
Επιτήρηση δικτύου (SMA grid guard)	ναι
Γαλβανική απομόνωση / μονάδα επιτήρησης ρεύματος σφάλματος ευαίσθητη σε όλα τα ρεύματα	—/ναι
Κατηγορία προστασίας / Κατηγορία υπέρτασης	I / III
Γενικά χαρακτηριστικά	
Εύρος τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας	-25 °C... +60 °C
Ίδια κατανάλωση (νύχτα)	0,25 W
Τοπολογία	Χωρίς μετασχηματιστή
Είδος προστασίας ηλεκτρονικού συστήματος / Περιοχή σύνδεσης (κατά το πρότυπο IEC 60529)	IP65 / IP65

Από τα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνεται ότι η ισχύς DC εισόδου του inverter είναι 11400W και άρα οι τρεις inverter δέχονται συνολικά 34200Wp από τη Φ/Β γεννήτρια, λιγότερα από τα 36KWp της γεννήτριας. Αυτό είναι αποδεκτό από το γεγονός ότι τα 36KWp αποδίδονται σε ιδανικές συνθήκες (STC) ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να υπολογιστεί και μια τιμή 20% μικρότερη ανάλογα τις συνθήκες.

Στα τεχνικά χαρακτηριστικά του inverter φαίνεται ότι:

- Μέγιστη τάση εισόδου 700V
- Ελάχιστη τάση εισόδου/τάση εκκίνησης 333V/400V

Επιλέγω ονομαστική τάση V_N της Φ/Β γεννήτριας τα $V_N = 500V$

Σύνδεση φ/β πλαισίων σε σειρά:

$$N_s = \frac{V_N (V)}{V_{\max} (V)} = \frac{500 \text{ Volt}}{29,41 \text{ Volt}} = 17 \text{ πλαίσια}$$

Σύνδεση φ/β πλαισίων παράλληλα:

$$N_p = \frac{N_{\text{πλαίσια}}}{N_s} = \frac{152}{17} = 8,9 \approx 9 \text{ πλαίσια}$$

Τελικός αριθμός φ/β πλαισίων:

$$N_{\text{πραγμ.πλαίσια}} = N_s \cdot N_p = 17 \cdot 9 = 153 \text{ πλαίσια}$$

5.6 Υπολογισμός συστήματος συσσωρευτών

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

Ημέρες αυτονομίας έχουν καθοριστεί στις 6 άρα επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης $DOD=0,6$

➤ Ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας b

Το σύστημα σε τις μέρες αυτονομίας καλύπτεται εξ' ολοκλήρου από το συσσωρευτή.
Άρα επιλέγω $b=1$.

- Συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων m

Για ποσοστό 20% επιπλέον των καταγραφέντων φορτίων $m=1,2$.

- Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας $\sigma_{εκ}$

Χρησιμοποιείται αναστροφείας άρα $\sigma_{εκ}=0,91$

Συγκεντρωτικά δεδομένα:

Πίνακας 5.6.1: Πίνακας δεδομένων για υπολογισμό συσσωρευτών

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ	
Ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες	$E_T=46845$ KWh/d
Ονομαστική τάση συστήματος συσώρευσης	$V_B=48$ V
Ημέρες αυτονομίας	$n=6$
Μέγιστο βάθος εκφόρτισης	$DOD=0,6$
Ποσοστό φορτίων έμμεσης τροφοδοσίας	$b=1$
Συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων	$m=1,2$
Συντελεστής απωλειών μεταφοράς ενέργειας	$\sigma_{εκ}=0,91$
Συντελεστή γήρανσης	$\sigma_{\gamma B}=0,8$

Υπολογισμός συνολικής χωρητικότητας συστήματος:

$$C (Ah) = \frac{E_T (W_p / d) \cdot m \cdot (n + b)}{\sigma_{\gamma B} \cdot DOD \cdot V_B (V) \cdot \sigma_{εκ}} = \frac{46845 \cdot 1,2 \cdot (6 + 1)}{0,8 \cdot 0,6 \cdot 48 \cdot 0,91} = 18768 Ah$$

Θα επιλεγθούν συσσωρευτές των 12V συνδεόμενοι ανά 4 σε σειρά έτσι ώστε:

$$V_B = 4 \cdot 12 = 48V$$

Η χωρητικότητα θα καθοριστεί από την παράλληλη σύνδεση αυτών ώστε να έχω τελικά 18768 Ah. Η μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή σχεδίασης (Ρόδος) είναι 20,3° C. Επομένως δε χρειάζεται να πραγματοποιηθεί διόρθωση χωρητικότητας λόγω θερμοκρασίας.

Επιλέγεται ο συσσωρευτής PVX-2580L με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5.6.2: Τεχνικά Χαρακτηριστικά συσσωρευτής PVX-2580L

Type	PVX-2580L
Voltage	12v
Industry Reference	8D
Battery Series	12 Volt Sun Xtender Series
Nominal Capacity Ampere Hours @ 25° C (77° F) to 1.75 Volts per cell - 24 Hour Rate	258 Ah
Weight	165 lb / 75 kg
Length	527 mm
Width	277 mm
Height	248 mm

Ο αριθμός των παράλληλων συνδέσεων συσσωρευτών είναι:

$$N_{bat,p} = \frac{18768}{258} = 72,7 \approx 73$$

Επομένως ο συνολικός αριθμός συσσωρευτών είναι :

$$N_{bat} = 73 \cdot 4 = 292 \text{ συσσωρευτές}$$

Για τη στέγαση των συσσωρευτών απαιτείται χώρος $S_{bat} = 0,527 \cdot 0,277 \cdot 292 = 42,62 m^2$. Αν συνυπολογιστούν και διάδρομοι διέλευσης μπροστά από τους συσσωρευτές απαιτείται συνολικά χώρος τουλάχιστον 65 τ.μ. αν τοποθετηθούν όλοι στο επίπεδο. Υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης σε ράφια όπου μπορεί να μειωθεί ο απαιτούμενος χώρος.

5.7 Υπολογισμός Ηλεκτρονικών Διατάξεων

- Ενδιάμεσος αναστροφέας τάσης

Έχω επιλέξει τον inverter SMC 11000TL, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον πίνακα 5.5.4 .

Έλεγχος:

Αν θεωρήσω τα 17 πλαίσια σε σειρά ως μια στοιχειοσειρά, τότε το μέγιστο ρεύμα στοιχειοσειράς θα είναι : $I_{\max}=7,99 \text{ A}$.

Συντελεστής ασφάλειας $I = 1,5 \cdot I_{\max} = 1,5 \cdot 7,99 = 11,985 \approx 12 \text{ A}$. Αποδεκτή τιμή αφού από τα χαρακτηριστικά του inverter έχω μέγιστη τιμή ρεύματος εισόδου στοιχειοσειράς 34A.

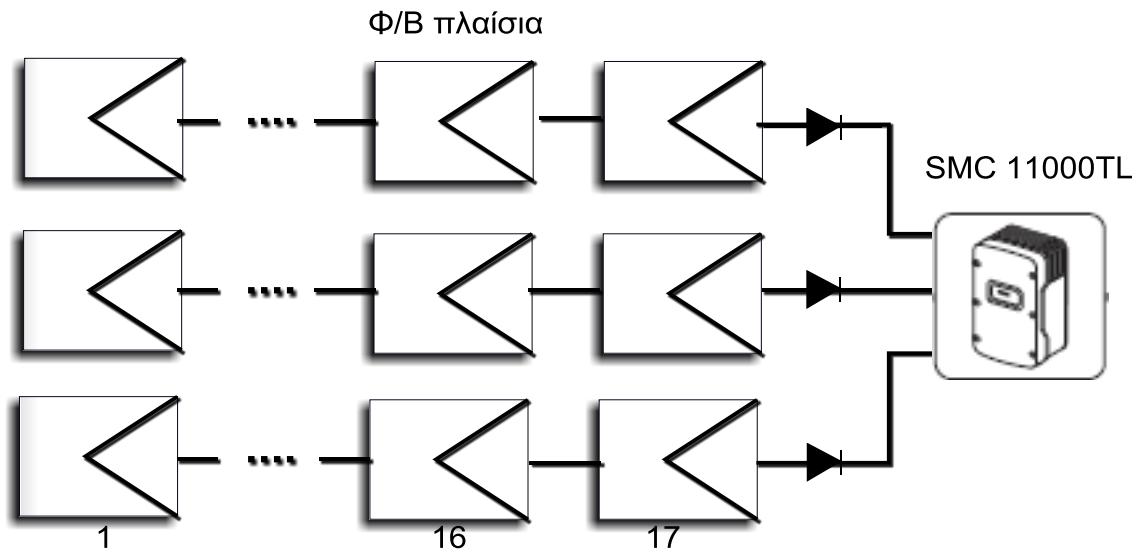
Η τάση της κάθε στοιχειοσειράς είναι $V_{\max} = 17 \cdot 29,41 = 499,97 \approx 500V$. Εντός του ορίου των 700V.

Σύμφωνα με τη διαδικασία διαστασιοδότησης της Φ/Β γεννήτριας έχω 9 στοιχειοσειρές των 17 πλαισίων. Ο συγκεκριμένος inverter μπορεί να δεχτεί έως 5 στοιχειοσειρές στην είσοδό του.

Σύνδεση φ/β γεννήτριας και ενδιάμεσων inverter:

Έχει υπολογιστεί ότι απαιτούνται τρεις inverter αυτού του τύπου άρα θα κατανεμηθούν οι 9 στοιχειοσειρές ανά τρεις σε κάθε inverter.

Άρα θα προκύψουν τρία υποσυγκροτήματα με έναν αναστροφέα και 3 στοιχειοσειρές των 17 πλαισίων σε σειρά το κάθε ένα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.10.1 .



Σχήμα 5.10.1: Συνδέσεις φ/β πλαισίων και ενδιάμεσων inverter

➤ Τελικός αναστροφέας Τάσης DC-AC (inverter)

Η εγκατάσταση είναι αυτόνομη με χρήση συσσωρευτών με τάση $V_B=48$ V. Η μέγιστη ισχύς των AC καταναλώσεων που λειτουργούν ταυτόχρονα υπολογίζεται σε $P_{\max}=12$ KW επομένως θα επιλεγούν τρεις τελικοί inverter για αυτόνομες εφαρμογές Sunny Island 5048 με δυνατότητα σύνδεσης και βοηθητικής πηγής AC. Αυτός ο τύπος inverter έχει τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5.10.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά Sunny Island 5048

Έξοδος AC (καταναλωτές)	
Ονομαστική τάση AC (ρυθμιζόμενη)	230 V (202 V – 253 V)
Συχνότητα δικτύου AC (ρυθμιζόμενη)	50 Hz / 60 Hz (45 Hz – 65 Hz)
Συνεχής ισχύς AC στους 25°C / 45°C	5000 W / 4000 W
Ισχύς AC στους 25°C για 30 min / 1 min / 3 s	6500 W / 8400 W / 12000 W
Ονομαστικό ρεύμα AC / μεγ. ρεύμα AC (peak)	21,7 A / 120 A για 60 ms
Συντελεστής παραμόρφωσης τάσης εξόδου / συντελεστής ισχύος (cos φ)	< 3% / -1 έως +1
Είσοδος AC (γεννήτρια ή δίκτυο)	
Τάση εισόδου AC (εύρος)	230 V (172,5 V – 264,5 V)
Συχνότητα εισόδου AC (εύρος)	50 Hz / 60 Hz (40 Hz – 70 Hz)
Μεγ. ρεύμα εισόδου (ρυθμιζόμενο) / Μεγ. ισχύς εισόδου	56 A (0 A - 56 A) / 12,8 kW
Είσοδος DC συσσωρευτή	
Τάση συσσωρευτή (εύρος)	48 V (41 V – 63 V)
Μεγ. ρεύμα φόρτισης συσσωρευτή/ρεύμα διαρκούς φόρτισης στους 25 °C	120 A / 100 A
Τύπος συσσωρευτή / χωρητικότητα συσσωρευτή (εύρος)	Μολύβδου, NiCd / 100 – 10.000 Ah

Ρύθμιση φόρτισης	Μέθοδος IUoU
Βαθμός απόδοσης / Ιδιοκατανάλωση	
Μεγ. βαθμός απόδοσης	95%
Ιδιοκατανάλωση άνευ φορτίου / κατάσταση αναμονής	25 W / 4 W
Γενικά στοιχεία	
Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	-25 °C ... +50 °C
Κατηγορία προστασίας (κατά IEC 60529)	Εσωτερική τοποθέτηση (IP30)
Εξοπλισμός / λειτουργία	
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

Έλεγχος:

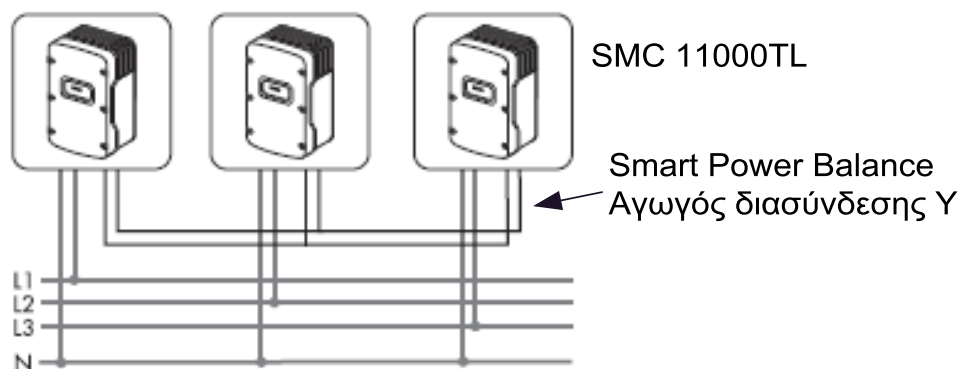
Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας : $I_{\max} = \frac{P_{\max}}{V_{AC}} = \frac{12000}{220} = 54,54 \text{ A}$ που μοιράζεται

στους τρεις παράλληλους inverter και έχουμε $I_{inverter} = \frac{54,54}{3} = 18,18 \text{ A}$ σε κάθε έναν.

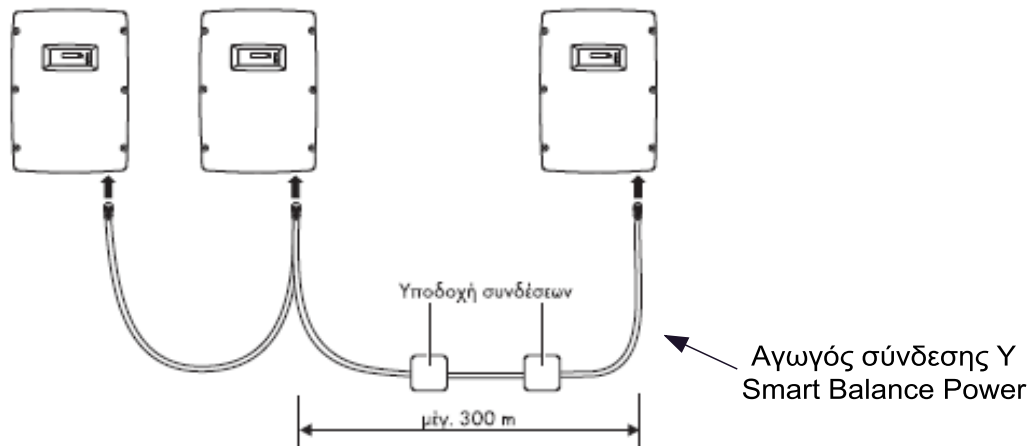
Αποδεκτή τιμή αφού στα χαρακτηριστικά του inverter το ονομαστικό ρεύμα AC είναι 21,7 A.

Ισχύς αιχμής του συστήματος των τριών αναστροφέων: $P_{\text{peak}} = 3 \times 12 = 36 \text{ KW}$ είναι τριπλάσια από την μέγιστη ισχύ των καταναλώσεων που λειτουργούν ταυτόχρονα.

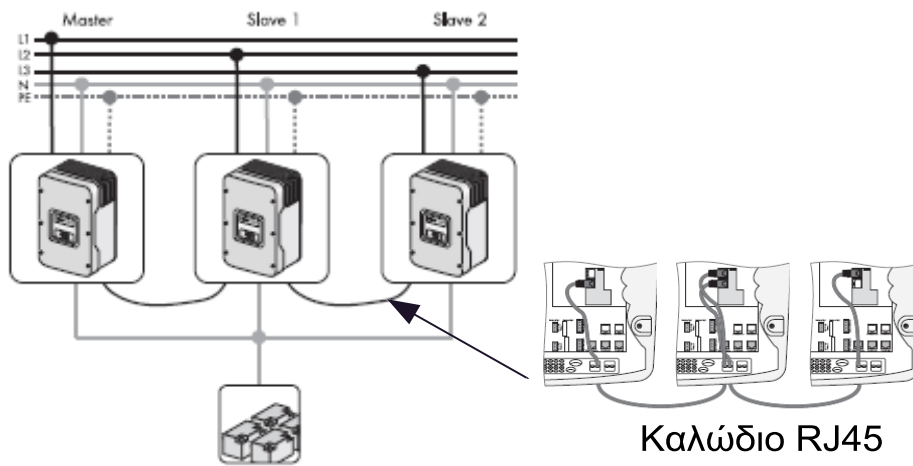
Λόγω της μεγάλης ισχύος της εγκατάστασης η σύνδεση των inverter θα είναι τριφασική όπως περιγράφεται στα τεχνικά τους εγχειρίδια. Η τριφασική αυτή σύνδεση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5.10.3: Τριφασική σύνδεση των αναστροφέων SMC 11000TL



Σχήμα 5.10.4: Σύνδεση των αναστροφέν SMC 11000TL με τον αγωγό σύνδεσης Smart Power Balance.



Σχήμα 5.10.5: Τριφασική σύνδεση των αναστροφέν Sunny Island 5048

5.8 Χωροταξική Μελέτη

Τα γεωγραφικά δεδομένα για την τοποθεσία εγκατάστασης είναι όμοια με την προηγούμενη μελέτη και φαίνονται στον πίνακα 4.8.1.

- Υπολογισμός ελάχιστης απόστασης για αποφυγή σκίασης

Ισχύει ότι και στην προηγούμενη μελέτη στην παράγραφο 4.8 καθώς χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τύπος φ/β πλαισίου. Έχει υπολογιστεί ότι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των στοιχειοσειρών είναι 3,69m.

Η κάθε στοιχειοσειρά αποτελείται από 17 πλαίσια. Υπολογίστηκαν 9 στοιχειοσειρές και ανά τρεις συνδέεται και ένας ενδιάμεσος αναστροφέας SMC 11000TL.

Το συνολικό εμβαδό της εδαφικής επιφάνειας που απαιτείται λαμβάνοντας υπόψη τα φ/β πλαίσια και το κτίριο στέγασης των συσσωρευτών και των υπολοίπων ηλεκτρονικών διατάξεων είναι περίπου : $S = 750m^2$

Συγκεντρωτικά:

Πίνακας 5.11.1: Δεδομένα χωροταξικής μελέτης

Δεδομένα Χωροταξικής Μελέτης	
Γεωγραφικό πλάτος περιοχής εγκατάστασης	Ρόδος (Γεωγρ. Πλάτος=36° 30')
Επιφάνεια διάταξης πλαισίων	Επίπεδη επιφάνεια χωρίς κλίση
Τύπος εδάφους Εγκατάστασης	Μικτό, κατάλληλο για στήριξη των μεταλλικών στηριγμάτων
Άνεμοι	Μέτριοι εντός των ορίων αντοχής των στηριγμάτων
Εμπόδια	Θάμνοι μικρού ύψους που δύναται να αφαιρεθούν
Κλίση τοποθέτησης	$\beta=36^\circ$
Αζιμούθιο (ως προς νότο)	$\zeta=0^\circ$
Διάταξη	9 στοιχειοσειρές των 17 πλαισίων
Ελάχιστη απόσταση μεταξύ σειρών	3,69 μέτρα
Καθαρή επιφάνεια εγκατάστασης	750 τ. μ.

5.9 Υπολογισμός καλωδιώσεων

Αρχικά υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των επιμέρους κυκλωμάτων που θα συνδεθούν με καλώδιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. Συμπεράσματα

Βασικά στοιχεία της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας έχουν παρουσιαστεί σε αυτή τη εργασία όπως η γεωμετρία γης-ήλιου, η ηλιακή ακτινοβολία, η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια στην επιφάνεια της γης καθώς και το φωτοβολταϊκό στοιχείο και η συμπεριφορά του σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Επίσης παρουσιάστηκαν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού στοιχείου με τις χαρακτηριστικές του καμπύλες σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, προσομοιώθηκε η λειτουργία του σε διαφορετικές συνθήκες έντασης ακτινοβολίας και θερμοκρασίας με το πρόγραμμα PVSYST και μελετήθηκε με πειραματική διάταξη η επίδραση της ποσοστιαίας μερικής σκίασης.

Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι η με την αύξηση της ηλιακής έντασης έχουμε μεγάλη αύξηση του ρεύματος στη χαρακτηριστική I-V και αμελητέα στην τάση αλλά και αύξηση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Επίσης με την αύξηση της θερμοκρασίας έχουμε μεγάλη μείωση της τάσης στη χαρακτηριστική I-V και ελάχιστη μείωση στο ρεύμα αλλά και μετατόπιση του σημείου μέγιστης ισχύος προς τα αριστερά. Τέλος με τις πειραματικές μετρήσεις στην περίπτωση της μερικής ποσοστιαίας σκίασης παρατηρήσαμε την απαίτηση χρήσης διόδων παράκαμψης για αποφυγή του φαινομένου της θερμής κηλίδας και την επίδρασή της στην μείωση της αποδιδόμενης ισχύος όσο μεγαλύτερη είναι η σκίαση.

Στο επόμενο κομμάτι της εργασίας πραγματοποιήθηκε, μια μελέτη με τον τρόπο διαστασιοδότησης ενός μικρού αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος και μια μελέτη μιας μεγαλύτερης έκτασης αυτόνομης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Οι κύριες πηγές των σφαλμάτων και των περιορισμών στο σχεδιασμό του συστήματος συνδέονται με τα πεδία συλλογής δεδομένων που είναι απαραίτητα για την ανάλυση. Έτσι τα κλιματικά και μετεωρολογικά δεδομένα, όπως είναι οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία, ο δείκτης καθαρότητας, και άλλα όπου λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία, αντιστοιχούν σε μετρήσεις προηγούμενων ετών

από διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς κοντά στις περιοχές ενδιαφέροντος και μπορεί πλέον να μην είναι ακριβείς.

Επίσης στο προφίλ του φορτίου που χρησιμοποιείται για τις ενεργειακές ανάγκες υποτίθεται ότι όλες οι ηλεκτρικές συσκευές λειτουργούν με δεδομένο τρόπο κάθε μέρα ενώ στην πράξη η ζήτηση ενέργειας ποικίλλει ανάλογα με την ημέρα καθώς και οι προδιαγραφές των συσκευών και η καθημερινή τους χρήση ήταν επίσης κατά προσέγγιση και μπορεί να διαφέρει ουσιαστικά ανάμεσα σε διαφορετικές τοποθεσίες, εποχές, κοινωνικό και μορφωτικό επίπεδο των ανθρώπων που τις χρησιμοποιούν κ.τ.λ.

Το μέγεθος του συστήματος εξαρτάται από τη θέση του καθώς σε περιοχές με μικρότερο ηλιακό δυναμικό ή λιγότερο καθαρή ατμόσφαιρα κ.τ.λ., απαιτείται μεγαλύτερος αριθμός πάνελ για την κάλυψη των ίδιων φορτίων

Η διαστασιοδότηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος δεν είναι ένας εύκολος στόχος. Υπάρχουν πολλά ζητήματα, υποθέσεις και προβλέψεις που πρέπει να γίνουν και να αντιμετωπιστούν, προκειμένου το σύστημα να είναι αποτελεσματικό. Ο σχεδιαστής πρέπει να έχει μια λεπτομερή και επικαιροποιημένη γνώση των κλιματικών, μετεωρολογικών και γεωγραφικών δεδομένων του τόπου εγκατάστασης αλλά και την προβλεπόμενη χρήση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης έτσι ώστε κάθε λεπτομέρεια να εξεταστεί προσεκτικά και το σύστημα που θα προκύψει να μην είναι ούτε υπερεκτιμημένο ούτε υποτιμημένο.

Όσο πιο ακριβείς είναι ο προσδιορισμός των απωλειών που προβλέπεται ότι θα έχει το σύστημα τόσο πιο αποτελεσματικός θα είναι ο σχεδιασμός και τόσο πιο αποδοτικό το σύστημα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ι.Ε Φραγκιαδάκης,, (2007), « *Φωτοβολταϊκά Συστήματα* », Εκδόσεις ΖΗΤΗ
- [2] Κ. Θ. Δέρβος,, (2010), «*Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα Υλικά και Φωτοβολταϊκές Διατάξεις*», Εκδόσεις ΕΜΠ
- [3] Κ. Καγκαράκης,, (1992), « *Φωτοβολταϊκή τεχνολογία* », Εκδόσεις Συμμετρία
- [4] Μιχ. Παπαδόπουλος, (1997), «*Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές*» , Εκδόσεις ΕΜΠ
- [5] Σ. Παπαθανασίου (2008) «*Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – Σημειώσεις παραδόσεων*» , Εκδόσεις ΕΜΠ
- [6] Σταμάτης Δ. Περδίας, (2011), « *Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις* », 3η Έκδοση, Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ -4Μ,
- [7] Σεμινάρια φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων
- [8] The German Energy Society, (2008), «*Planning and Installing Photovoltaic Systems – A Guide for Installers, Architects and Engineers*» , Second Edition , International Solar Energy Society.
- [9] David L. King, William E. Boyson, Jay A. Kratochvil, (2004), «*Photovoltaic Array Performance Model*», Sandia National Laboratories
- [10] Yaw-Juen Wang, and Po-Chun Hsu, (2009), «*Analysis of Partially Shaded PV Modules Using Piecewise Linear Parallel Branches Model*» , World Academy of Science, Engineering and Technology
- [11] http://www.cres.gr/kape/index_gr.htm
- [12] <http://www.sma-hellas.com/el.html>
- [13] <http://files.sma.de/dl/7418/GlobalPeak-UGR101210.pdf>
- [14] <http://photovoltaics.sandia.gov/docs/PDF/King%20SAND.pdf>
- [15] <http://www.technel.gr/arthra/images/diatomeskalwdiwn.pdf>