



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού
Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας
των 100kW**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Α. Κτενίδης

Επιβλέπων : Στέφανος Ν. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού
Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας
των 100kW**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Λ. Κτενίδης

Επιβλέπων : Στέφανος Ν. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5η Μαρτίου 2008.

.....
Στέφανος Ν. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2008

.....
Γεώργιος Λ. Κτενίδης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Λ. Κτενίδης, 2007
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη ενός διασυνδεδεμένου με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας της Δ.Ε.Η. φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εγκατεστημένη ισχύ αιχμής 100kWp. Ο συγκεκριμένος φ/β σταθμός μελετήθηκε για το γεωγραφικό πλάτος της Καλαμάτας, ενώ εξετάστηκαν και οι διαφορές στην απόδοσή του ανάλογα με την περιοχή, για 7 διαφορετικές τοποθεσίες στον ελλαδικό χώρο, οι οποίες επελέγησαν ανάλογα με το ηλιακό δυναμικό.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που την χαρακτηρίζουν και τους τομείς στους οποίους βρίσκει εφαρμογή. Ακόμα παρουσιάζεται η ιστορική τους εξέλιξη διεθνώς, καθώς και η ελληνική πραγματικότητα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται λεπτομερώς η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη Γή και οι εξισώσεις που προσδιορίζουν φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουράνιο θόλο. Παρουσιάζεται μέθοδος υπολογισμού της ωριαίας και μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο, από τις αντίστοιχες τιμές τους σε οριζόντιο επίπεδο. Επιπλέον δίνεται προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού της ωριαίας ακτινοβολίας από της ημερήσιες τιμές.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση του φωτοβολταϊκού φαινομένου και επιχειρείται μια περιγραφή των σπουδαιότερων υλικών και τεχνολογιών κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ακόμα αναλύονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φ/β στοιχείων και οι σημαντικότεροι παράγοντες που τα επηρεάζουν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή και ανάλυση των επιμέρους στοιχείων, που αποτελούν τόσο ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα όσο και ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξηγούνται βασικές οικονομικές έννοιες και δίνονται τρόποι αξιολόγησης μια επένδυσης.

Στο κεφάλαιο έξι γίνεται μια λεπτομερής μελέτη του φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αφορά τον πλήρη ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί (φ/β πλαίσια, αντιστροφείς, βάσεις στήριξης, γειώσεις κλπ.), ενώ έμφαση δίνεται στην τελική απόδοση της εγκατάστασης. Τέλος γίνεται μια τεchnοοικονομική μελέτη και ερευνάται η οικονομική βιωσιμότητα ενός τέτοιου έργου σύμφωνα με την παρούσα κατάσταση στην Ελλάδα.

Στο κεφάλαιο επτά παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν από την εργασία.

Λέξεις κλειδιά: ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ηλιακή ακτινοβολία, φωτοβολταϊκά πλαίσια, αντιστροφείς, διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα.

Abstract

Scope of the present thesis is the analysis of a grid connected photovoltaic system, which generates all its produced electrical power to the grid and has a nominal power of 100kWp.

The first chapter is an enterprise to the global and the Greek present situation and trends, as far as the electricity generation from renewable energy resources and specifically from photovoltaics, is concerned. A short outline of the photovoltaic technology's advantages and disadvantages is also given.

In the second chapter a detailed analysis of solar radiation is presented. Mathematical tools are provided to calculate the monthly and hourly solar irradiation on inclined surfaces, from the corresponding values on a horizontal surface. Finally, an estimation of the hourly irradiation from the daily irradiation is presented.

The third and fourth chapter is an attempt to describe the materials and the technologies used to manufacture solar cells. Moreover the electrical characteristics of cells and modules are explained in detail and also the factors affecting their efficiency.

The main parts of a grid connected and a stand-alone photovoltaic system are represented in the fourth chapter.

In the fifth chapter basic economical terms are explained and tools for investment assessment are given.

The sixth chapter is a detailed study of a grid connected photovoltaic system as far as the electrical and mechanical equipment is concerned (pv modules, inverters, mounting equipment, groundings etc.). Moreover by estimating the annually produced electrical energy, a techno-economic analysis of the system is presented.

Finally chapter seven is a conclusion of this thesis.

Keywords: renewable energy sources, solar radiation, photovoltaic modules, inverters, grid connected photovoltaic system.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με το εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα με την φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Είναι αποτέλεσμα εκτεταμένης βιβλιογραφικής έρευνας σε θέματα όπως η ηλιακή ενέργεια, η φωτοβολταϊκή μετατροπή, η διασύνδεση στο δίκτυο κ.α.. Ελπίζω να είναι έστω και μια ελάχιστη συμβολή στην ενίσχυση και εξάπλωση των ΑΠΕ, ζήτημα πλέον καθοριστικής σημασίας για τη σχέση του ανθρώπου με το περιβάλλον.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Στέφανο Μανιά, καθηγητή Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη βοήθεια, τις υποδείξεις, τις διορθώσεις και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Ο ΗΛΙΟΣ	σελ. 22
2.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΕΚΤΟΣ ΓΗΙΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ	σελ. 23
2.3 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	σελ. 24
2.4 ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	σελ. 25
2.4.1 Γεωγραφικό πλάτος – Γεωγραφικό μήκος.....	σελ. 25
2.4.2 Σφαιρικές συντεταγμένες.....	σελ. 26
2.4.3 Ηλιακές γωνίες.....	σελ. 28
2.4.4 Γωνία πρόσπτωσης ηλιακών ακτινών.....	σελ. 30
2.5 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	σελ. 31
2.5.1 Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο	σελ. 32
2.5.2 Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο	σελ. 34
2.5.3 Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο	σελ. 36
2.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΟΛΥΩΝΥΜΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ H_d/H	σελ. 39
2.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΩΡΙΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΤΙΜΕΣ...σελ.	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	σελ. 44
3.1.1 Ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού.....	σελ. 44
3.1.2 Δημιουργία φωτορεύματος	σελ. 45
3.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	σελ. 46
3.2.1 Πυρίτιο (Si)	σελ. 46
3.2.1.1 Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο.....	σελ. 46
3.2.1.2 Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο	σελ. 49
3.2.1.3 Ribbon Πυρίτιο	σελ. 51
3.2.1.4 Κρυσταλλικό Πυρίτιο λεπτού φιλμ (c-SiTFC)	σελ. 52
3.2.1.5 Άμορφο πυρίτιο (a-Si)	σελ. 53
3.2.2 Αρσενικούχο γάλλιο (GaAs).....	σελ. 53
3.2.3 Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe ₂ ή CIS).....	σελ. 54
3.2.4 Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)	σελ. 55
3.3 ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	σελ. 56
3.3.1 Απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου	σελ. 58
3.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	σελ. 58

3.4.1 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module).....	σελ. 59
3.4.2 Φωτοβολταϊκές συστοιχίες	σελ. 59
3.4.3 Βέλτιστη διάταξη σταθερών συστοιχιών	σελ. 62
3.4.4 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου	σελ. 64
3.4.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στη απόδοση.....	σελ. 65
3.4.6 Επίδραση της ρύπανσης στην απόδοση	σελ. 66
3.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΕΣ.....	σελ. 66
3.5.1 Τύποι οπτικών μέσων.....	σελ. 66
3.5.2 Συντελεστής συγκέντρωσης.....	σελ. 68
3.5.3 Παρακολούθηση της θέσης του ήλιου	σελ. 69
3.5.4 Οπτική των συγκεντρωτών	σελ. 73
3.5.4.1 Βασικές έννοιες	σελ. 73
3.5.4.2 Ο παραβολικός συγκεντρωτής.....	σελ. 74
3.5.4.3 Ο σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτής	σελ. 77
3.5.4.4 Διαθλαστικοί φακοί	σελ. 78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

4.1 ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (STAND ALONE)	σελ. 82
4.2 ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (GRID CONNECTED)	σελ. 83
4.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ (DC/DC CONVERTER)	σελ. 84
4.4 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (MPPT)	σελ. 90
4.5 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ (DC/AC INVERTER)	σελ. 94
4.5.1 Μονοφασικός αντιστροφέας	σελ. 94
4.5.2 Τριφασικός αντιστροφέας	σελ. 99
4.5.3 Ηλεκτρική απομόνωση των μετατροπέων ισχύος	σελ.102
4.6 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ	σελ.103
4.7 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	σελ.111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

5.1 ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΧΡΗΜΑΤΟΣ.....	σελ.116
5.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΩΝ ΣΧΕΔΙΩΝ	σελ.117
5.2.1 Καθαρή Παρούσα Αξία - ΚΠΑ (Net Present Value - NPV)	σελ.117
5.2.2 Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης – ΕΒΑ (Internal Rate of Return - IRR).....	σελ.118
5.2.3 Λόγος Οφέλους/Κόστους (Benefit/Cost Ratio - BCR)	σελ.118
5.2.4 Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής – ΕΠΑ (Discounted Pay Back Period – DPB)	σελ.118
5.2.5 Παρούσα Αξία Συνολικού Κόστους και Ισοδυνάμου Ετήσιου	

Κόστους	σελ.119
5.3 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ.....	σελ.120
5.3.1 Κλασικές μορφές χρηματοδότησης.....	σελ.120
5.3.2 Σύγχρονοι χρηματοδοτικοί μηχανισμοί	σελ.120
5.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΟΦΛΗΣΗΣ ΔΑΝΕΙΩΝ	σελ.122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ Φ/Β ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

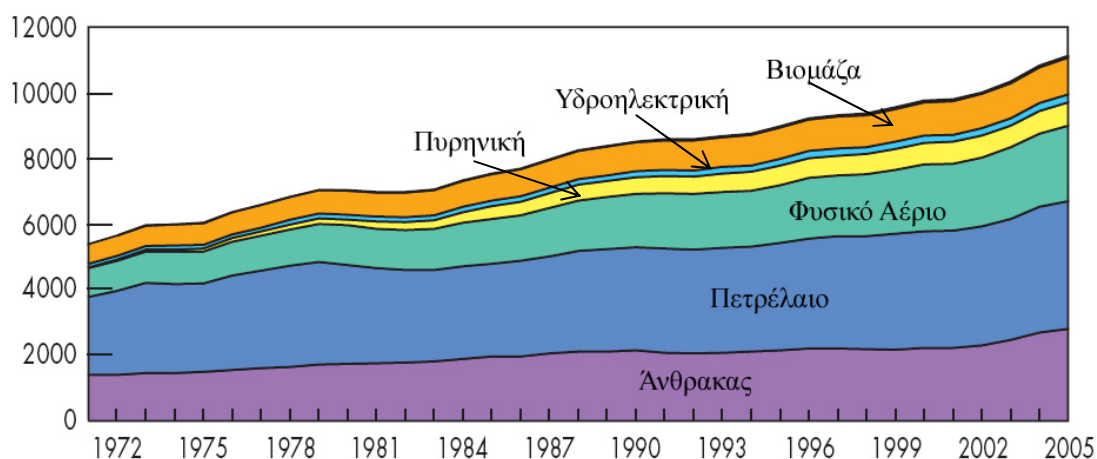
6.1 ΣΕΝΑΡΙΟ	σελ.126
6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ	σελ.126
6.3 ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	σελ.129
6.3.1 Ηλιακό δυναμικό για την πόλη της Καλαμάτας	σελ.133
6.3.1.1 Σταθερή ετήσια κλίση	σελ.133
6.3.1.2 Εναλλαγή μεταξύ δύο κλίσεων στη διάρκεια ενός έτους	σελ.134
6.3.1.3 Επιλογή της κλίσης	σελ.138
6.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ.....	σελ.138
6.5 ΕΠΙΛΟΓΗ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ	σελ.141
6.6 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ	σελ.147
6.6.1 Ανάστροφο ρεύμα	σελ.147
6.7 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ Φ/Β ΠΑΡΚΟΥ	σελ.151
6.8 ΓΕΙΩΣΗ.....	σελ.157
6.9 ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ.....	σελ.160
6.10 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	σελ.164
6.11 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	σελ.168
6.12 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	σελ.171
6.12.1 Βιωσιμότητα επένδυσης-Περίπτωση 1η	σελ.173
6.12.2 Βιωσιμότητα επένδυσης-Περίπτωση 2η	σελ.177
6.12.3 Οριακή τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας.....	σελ.178

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	σελ.183
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	σελ.185
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	σελ.191
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	σελ.199

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

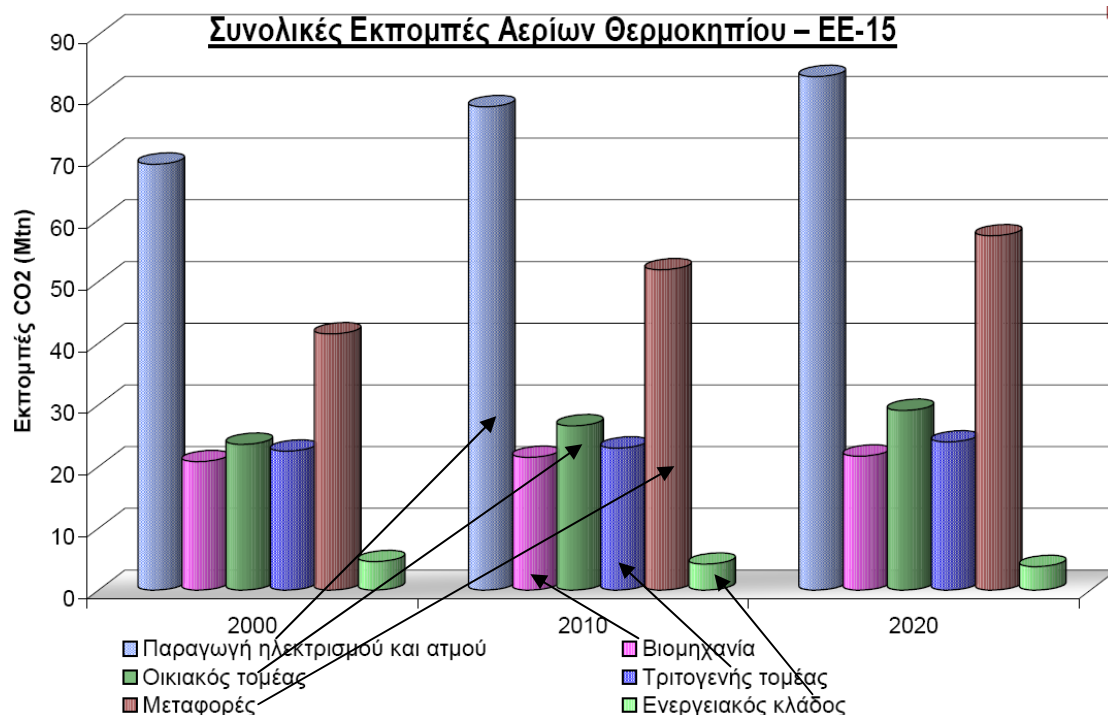
Οι τελευταίες εξελίξεις στο περιβάλλον, καθιστούν το μέλλον του πλανήτη αβέβαιο. Πιο πολύ από ποτέ ο άνθρωπος έχει αρχίσει να συνειδητοποιεί ότι οι παρεμβάσεις στο περιβάλλον δεν μπορούν να συνεχίσουν να είναι ανεξέλεγκτες. Από τα μεγαλύτερα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα σήμερα είναι η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας (Σχήμα 1.1). Οι συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες αναγνωρίζονται ευρέως ως το κύριο αίτιο της καταστροφής του περιβάλλοντος, από την άποψη τόσο της εξάντλησης των φυσικών πόρων όσο και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Υπάρχουν ολοένα και ισχυρότερες ενδείξεις ότι η κλιματική αλλαγή οφείλεται στις εκπομπές του αερίου του θερμοκηπίου, οι οποίες προέρχονται σε μεγάλο βαθμό από τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και από τις μεταφορές (Σχήμα 1.2). Είναι επομένως επιτακτική ανάγκη, η στροφή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας και κυρίως στις ανανεώσιμες, οι οποίες και εντελώς φιλικές προς το περιβάλλον είναι και ανεξάντλητες. Αντίθετα το πετρέλαιο και τα ορυκτά καύσιμα, αν και βραχυπρόθεσμα υπάρχουν ακόμα αρκετά αποθέματα, σε βάθος χρόνου ίσως και ενός αιώνα θα εξαντληθούν, ενώ η πλήρης εξάρτηση από αυτά δημιουργεί σοβαρά οικονομικά προβλήματα σε κάθε αύξηση των τιμών τους.



Σχήμα 1.1 Εξέλιξη της πρωτογενούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε Mtoe (τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) για τα έτη 1971-2005. Πηγή www.iea.org

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή ήπιες μορφές ενέργειας προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες και μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδατοπτώσεις
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια από παλίρροιες
- Ενέργεια από κύματα
- Ενέργεια από τους ωκεανούς



Σχήμα 1.2 Συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την Ευρωπαϊκή Ένωση των 15, ανά τομέα για το έτος 2000 και πρόβλεψη για τα έτη 2010 και 2020[21].

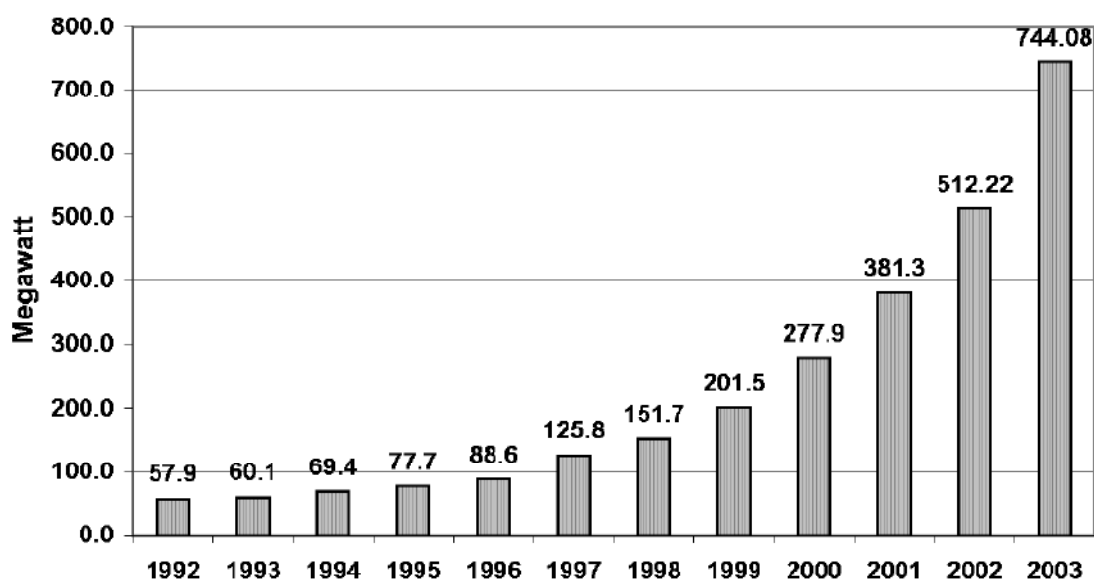
Για την εκμετάλλευση των παραπάνω ήπιων μορφών ενέργειας έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες τεχνολογίες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η ηλιακή ενέργεια ως η ήπια μορφή ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάμεσα στις άλλες τεχνολογίες, οι οποίες εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια είναι και η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, η οποία κερδίζει ευρεία αποδοχή ως ένας τρόπος διατήρησης και βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου χωρίς να βλάπτεται το περιβάλλον. Όλο και περισσότερες εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανταποκρίνονται στις επιθυμίες των καταναλωτών συμπεριλαμβάνοντας τα φωτοβολταϊκά στον παραγωγικό μηχανισμό. Τα πλεονεκτήματα της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα:

- Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
- Μηδενική ρύπανση και πλήρης απουσία αποβλήτων ή άλλων άχρηστων παραπροϊόντων.
- Αθόρυβη λειτουργία.
- Υψηλή αξιοπιστία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Ελάχιστες απαιτήσεις επίβλεψης και συντήρησης.
- Αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες (ισχυρούς ανέμους, ακραία χαλαζόπτωση, κλπ).
- Μεγάλη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων(τουλάχιστον 25 χρόνια).

- Σχετικά απλή μέθοδος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων από πρώτες ύλες.
- Εύκολη επέκταση της υπάρχουσας εγκατάστασης.
- Δυνατότητα ανεξαρτησίας από τα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής για απομακρυσμένες περιοχές (αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα).
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών, όσον αφορά την ισχύ. Από μερικά Watt μέχρι μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μερικών MW.

Από την άλλη τα κύρια μειονεκτήματα είναι:

- Υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, το οποίο οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο υψηλό κόστος κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων και πολύ λιγότερο στο κόστος τις υπόλοιπης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός).
- Σε εφαρμογές που απαιτείται η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα), αυτή γίνεται με μη αποδοτικό τρόπο, με περιορισμένες δυνατότητες, ενώ και το κόστος των συσσωρευτών είναι υψηλό.
- Λόγω της μικρής πυκνότητας της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, απαιτείται η χρησιμοποίηση μεγάλων σχετικά επιφανειών.
- Εξάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις καιρικές συνθήκες, που αποτελούν έναν απρόβλεπτο παράγοντα, επιτρέποντας μόνο εκτιμήσεις σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα (συνήθως ετήσια).



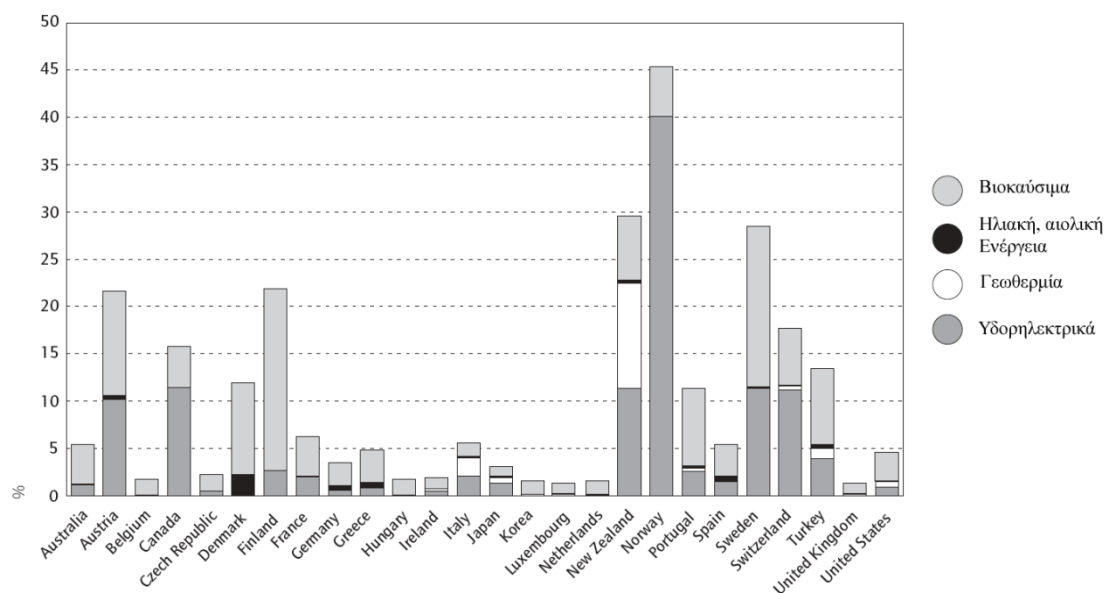
Σχήμα 1.3 Εξέλιξη της παγκόσμιας αγοράς φωτοβολταϊκών σε MWp[4].

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία διεθνώς

Είναι γεγονός μια μεγάλη στροφή διεθνώς, όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τόσο από τις κυβερνήσεις

όσο και από μεγάλες εταιρίες και επενδυτές. Σε αντίθεση με το παρελθόν η ανάπτυξη σήμερα συνδέεται άμεσα με περιβαλλοντικά ζητήματα, τα οποία αποτελούν σημαντική συνιστώσα σε οποιοδήποτε ενεργειακό επενδυτικό σχέδιο. Η αναγκαιότητα αυτή πηγάζει κυρίως από την μεγάλη αλλαγή, που έχει συμβεί στην κοινή γνώμη όσον αφορά την περιβαλλοντική συνείδηση και από τις αδιαμφισβήτητες κλιματολογικές αλλαγές, των τελευταίων χρόνων, οι οποίες εκτός των άλλων έχουν σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις.

Το αποτέλεσμα είναι, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να μετατραπούν σε λύση πρώτης προτεραιότητας για μια ισορροπημένη ανάπτυξη. Όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχουν μεγάλες διαφορές από χώρα σε χώρα, όσον αφορά το ποια μορφή ενέργειας θα χρησιμοποιηθεί. Καθοριστικό ρόλο παίζουν οι γεωλογικές και κλιματολογικές συνθήκες, έτσι ώστε η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να είναι αποδοτική.

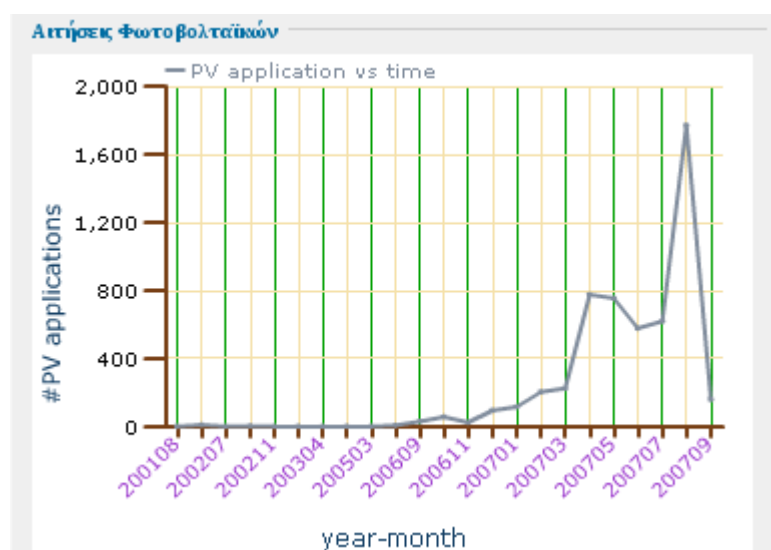


Σχήμα 1.4 Συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην συνολική πρωτογενή παραγωγή στις χώρες της IEA (International Energy Agency) για το έτος 2002. Πηγή www.iea.org

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία εμφανίζει μια ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια διεθνώς (Σχήμα 1.3). Ταυτόχρονα γίνεται μεγάλη προσπάθεια στον τομέα της έρευνας, με σκοπό την εξεύρεση νέων υλικών, αλλά και λιγότερο ενεργοβόρων διαδικασιών παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων, γεγονότα που από την μια θα αυξήσουν την απόδοση και από την άλλη θα μειώσουν το κόστος παραγωγής. Οι δύο τελευταίες παράμετροι αποτελούν και τα κύρια μειονεκτήματα της φ/β τεχνολογίας, τα οποία εμποδίζουν την περεταίρω ανάπτυξή της. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι παρόλο που η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φ/β στοιχείων τα τελευταία χρόνια είναι πολλαπλάσια αν συγκριθεί με την κατάσταση προ μερικών δεκαετιών, εντούτοις παραμένει σε πολύ χαμηλά ποσοστά, όσον αφορά τη συνεισφορά στην συνολική πρωτογενή παραγωγή (Σχήμα 1.4).

Ελληνική Πραγματικότητα

Παρόλο που το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας είναι ιδανικό για την εκμετάλλευση της φ/β τεχνολογίας, μέχρι και το τέλος του 20^{ου} αιώνα, η συνεισφορά της ηλιακής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν ουσιαστικά ανύπαρκτη. Περιοριζόταν κυρίως σε αυτόνομα φ/β συστήματα για απομακρυσμένες από το κεντρικό δίκτυο περιοχές, ενώ και σε αυτή τη περίπτωση ο αριθμός και το μέγεθος ήταν πολύ περιορισμένα.



Σχήμα 1.5 Εξέλιξη των αιτήσεων για φ/β συστήματα στην Ελλάδα για τα έτη 2001-2007. Πηγή www.aenaon.net/gr/

Όμως τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια πολύ μεγάλη αλλαγή. Ο κλάδος της φ/β τεχνολογίας γνωρίζει μια έκρηξη επενδυτικού ενδιαφέροντος, απόρροια της αλλαγής της πολιτείας ως προς την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών γενικότερα και της φ/β τεχνολογίας πιο συγκεκριμένα. Οι γενναίες επιδοτήσεις σε συνδυασμό με την αυξημένη τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β συστήματα είχαν ως αποτέλεσμα αυξημένο επενδυτικό ενδιαφέρον, καθώς η φ/β τεχνολογία κατέστη όχι μόνο βιώσιμη, αλλά και κερδοφόρα επένδυση με ελάχιστο ρίσκο.

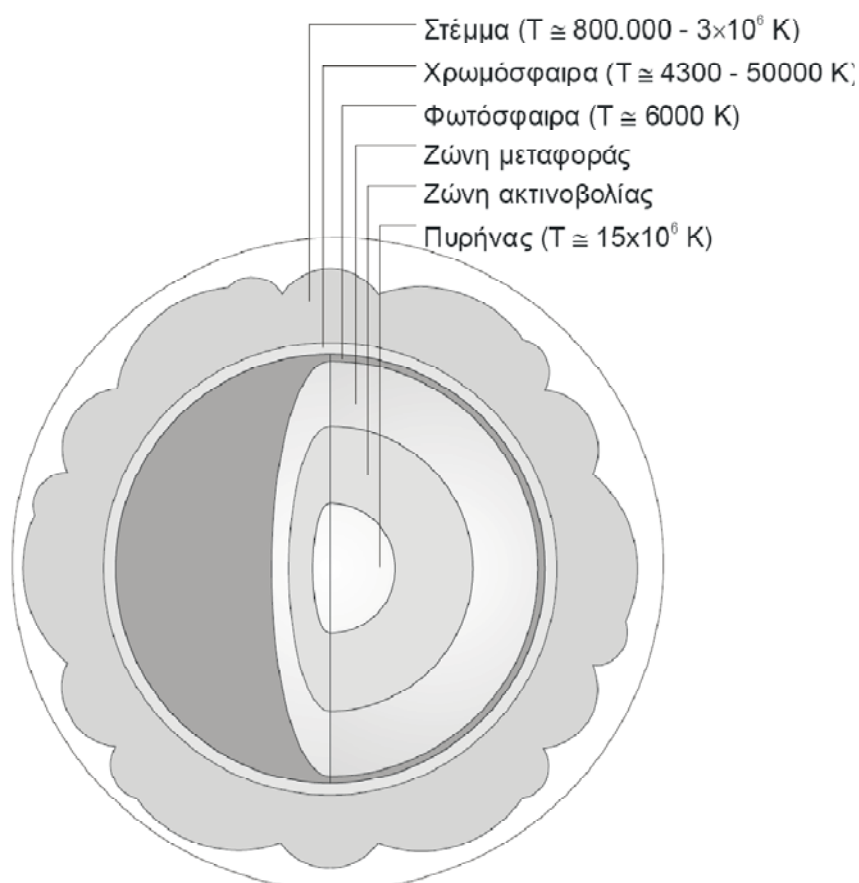
Το αποτέλεσμα ήταν μια χωρίς προηγούμενο εκτίναξη του αριθμού των αιτήσεων για την χορήγηση άδειας κατασκευής φ/β πάρκων (Σχήμα 1.4). Ο στόχος των 700MW που είχε τεθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β συστήματα, καλύφθηκε πολύ γρήγορα (τέλος του 2007). Όπως είναι φανερό, σε μια χώρα όπου η περιβαλλοντική συνείδηση των πολιτών και των επιχειρήσεων δεν είναι πολύ μεγάλη, ο κρατικός παρεμβατισμός μοιάζει ίσως ο μοναδικός τρόπος για την εκδήλωση επενδυτικού ενδιαφέροντος στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Όμως τα πράγματα μπορούν να αλλάξουν σημαντικά, όχι μόνο με την αλλαγή της κοινής γνώμης πάνω σε περιβαλλοντικά ζητήματα, αλλά και από την εξέλιξη της τεχνολογίας, η οποία

μοιάζει ικανή στο άμεσο μέλλον να κάνει τα φ/β μια βιώσιμη και εφικτή λύση στο παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Ο ΗΛΙΟΣ

Ο Ήλιος αποτελείται από 80% υδρογόνο (H_2), 19% ήλιο (He) και το υπόλοιπο 1% είναι μείγμα περισσότερων από 100 χημικών στοιχείων. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του εκτιμάται ότι είναι της τάξεως των 10^7 βαθμών Kelvin. Η ακτινοβολούμενη ενέργεια από την επιφάνειά του προέρχεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που είναι εξώθερμες και γίνονται στο εσωτερικό του. Στις αντιδράσεις αυτές γίνεται μετατροπή του υδρογόνου σε ήλιο και παραγωγή ενέργειας με ρυθμό 4 εκατομμύρια τόνους το δευτερόλεπτο. Η σύσταση του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.1 Σύσταση του Ήλιου[7].

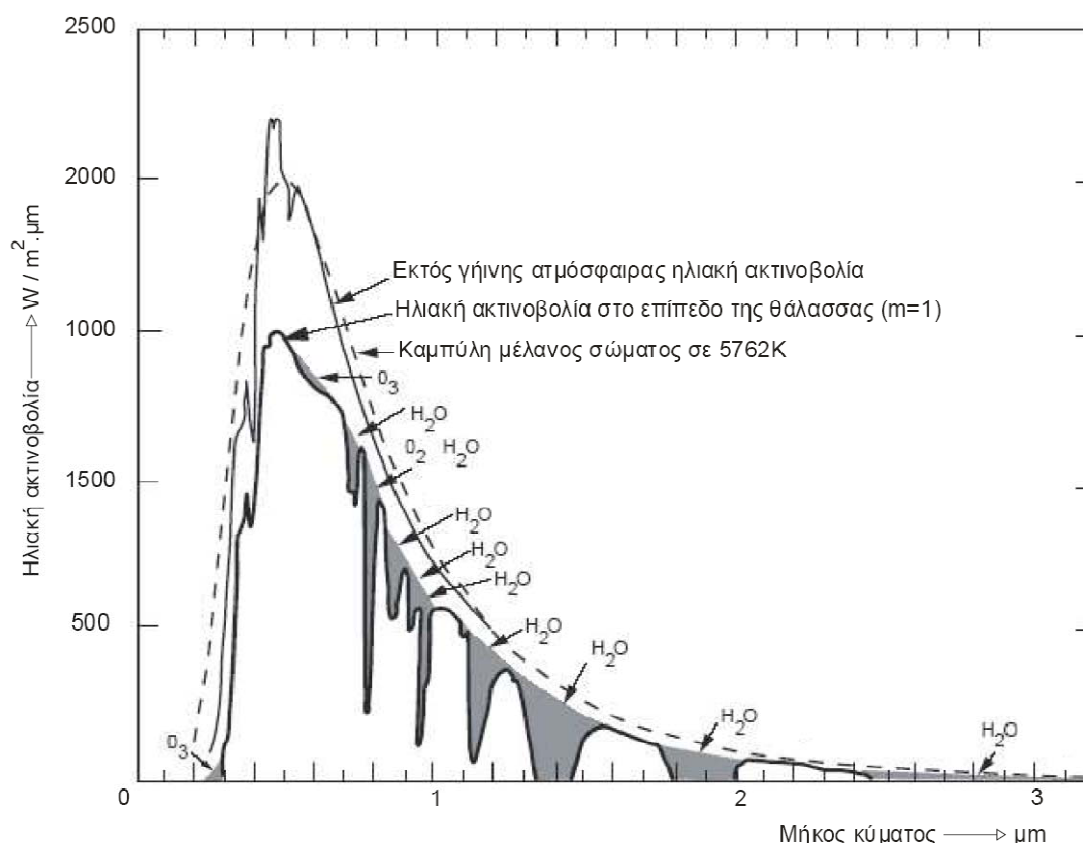
Δεδομένης της διαμέτρου d και της φαινόμενης θερμοκρασίας του T , η ισχύς P που ακτινοβολείται από την επιφάνειά του μπορεί να εκτιμηθεί ότι είναι:

$$P = \pi d^2 \sigma T^4 = 3,8 \times 10^{23} \text{ kW} \quad (2.1)$$

Όπου σ είναι η σταθερά Boltzman. Από την ισχύ αυτή η γη μπορεί να θεωρηθεί ότι δέχεται, σε ένα μέγιστο κύκλο της, περίπου $1,7 \times 10^{14}$ kW. Για να αντιληφθούμε το τεράστιο μέγεθος αυτής της ισχύος αρκεί να αναλογισθούμε ότι η ενέργεια που θα δεχθεί για μια ώρα η γη, θα μπορούσε θεωρητικά να καλύψει όλες τις ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις των κατοίκων του πλανήτη.

2.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΕΚΤΟΣ ΓΗΙΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η φασματική κατανομή της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακής ακτινοβολίας μοιάζει αρκετά με εκείνη του μέλανος σώματος στην θερμοκρασία των 5762K, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, ενώ η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο επίπεδο της θάλασσας είναι αρκετά μειωμένη.



Σχήμα 2.2 Φασματική κατανομή της εκτός γήινης ατμόσφαιρας, ηλιακή ακτινοβολία[7].

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.λπ.

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. Μια τιμή που έχει προταθεί με αβεβαιότητα 1% είναι:

$$G_{sc} = 1367W / m^2 \quad (2.2)$$

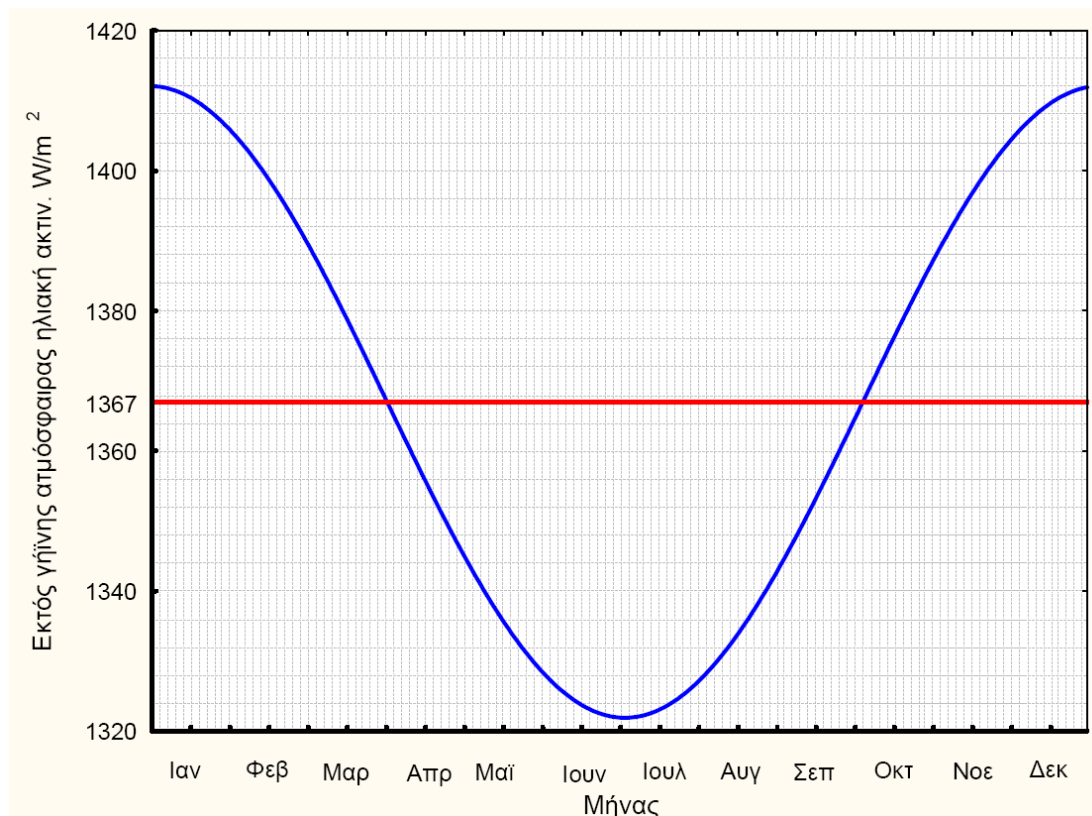
Επειδή η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο είναι ελλειπτική, η εκτός γήινης ατμόσφαιρας ακτινοβολία σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες G_{on} , μεταβάλλεται στη διάρκεια του έτους.

Για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας αυτής, για κάθε μέρα του έτους, χρησιμοποιείται η εμπειρική σχέση:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,33 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \quad (2.3)$$

όπου n είναι ο αριθμός της ημέρας του έτους, με αρχή την 1^η Ιανουαρίου.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 2.3 Ετήσια διακύμανση της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακής ακτινοβολίας[7].

2.3 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο έδαφος επηρεάζεται από το μήκος της ατμόσφαιρας που διαπερνά. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαδρομή των ηλιακών ακτίνων στην ατμόσφαιρα τόσο μειωμένη είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η μεγαλύτερη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας για να φθάσει στην επιφάνεια της γης είναι νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα.

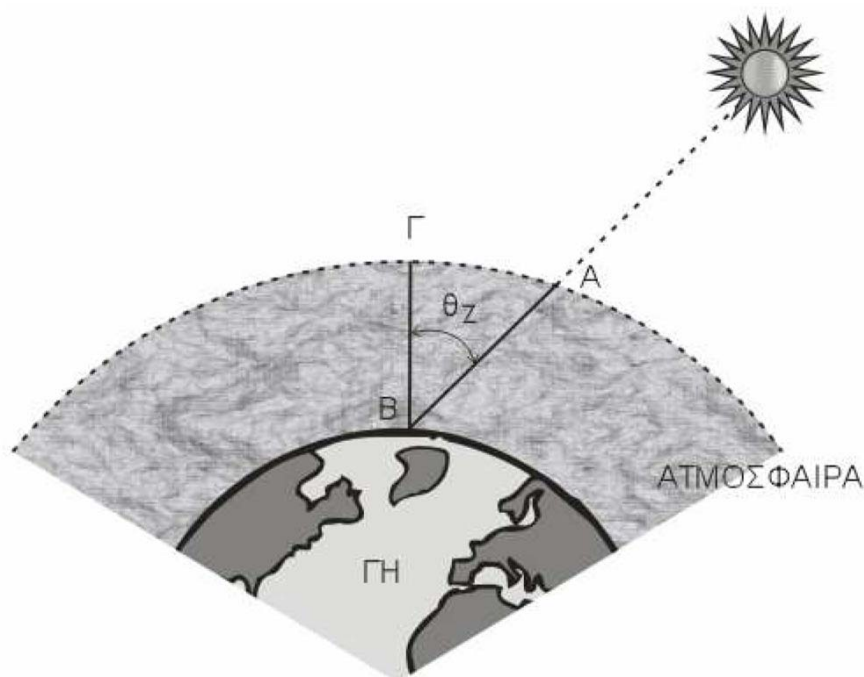
Για την μείωση αυτή της ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ο όρος της **σχετικής μάζας** του αέρα ή απλά όπως συνηθίζεται **μάζα του αέρα**. Μάζα του αέρα (m)*, ορίζεται ο λόγος της μάζας της αερίου στήλης της διαδρομής των ηλιακών ακτίνων, για ανέφελο ουρανό, προς την αντίστοιχη μάζα για κατακόρυφο ήλιο (Σχήμα 2.4).

Όταν η ζενίθια γωνία του ήλιου δε έχει μεγάλες τιμές και αν δεν ληφθεί υπ' όψιν η καμπυλότητα της γης και η διάθλαση, που επηρεάζει ελαφρά το μήκος της πλάγιας διαδρομής AB, τότε το τόξο AB μπορεί να θεωρηθεί ευθύγραμμο τμήμα και κατά

συνέπεια το τρίγωνο ABΓ ορθογώνιο. Οπότε ο λόγος των αντίστοιχων μαζών θα είναι και ο λόγος των διαδρομών AB προς ΒΓ και κατά συνέπεια η μάζα του αέρα (m) θα εξαρτάται από τη ζενίθια γωνία του ήλιου θ_z , οπότε:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2.4)$$

(*συχνά χρησιμοποιείται και ο συμβολισμός AM από τα αρχικά του Air Mass)



Σχήμα 2.4 Μάζα του αέρα[7].

2.4 ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

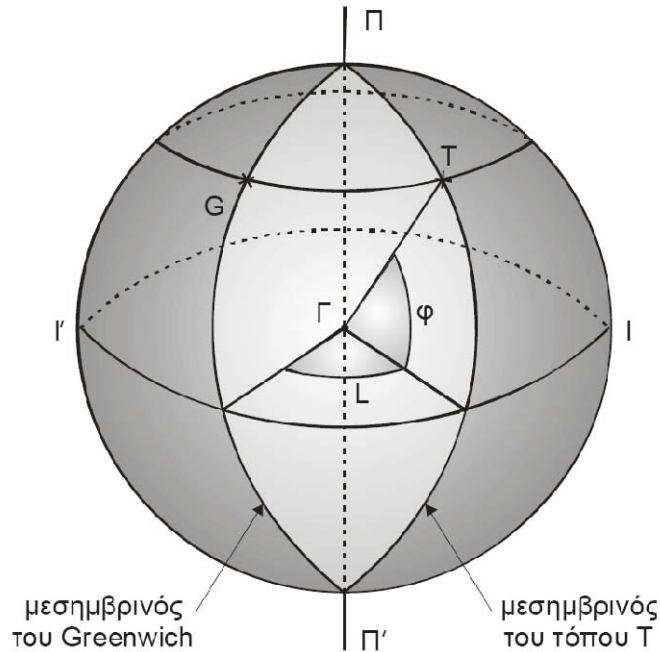
Προκειμένου να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα επίπεδο στη επιφάνεια της γης, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε εκτός των άλλων και τη θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο.

2.4.1 Γεωγραφικό πλάτος –γεωγραφικό μήκος

Οι κύκλοι που είναι παράλληλοι στον ισημερινό ονομάζονται παράλληλοι κύκλοι (Σχήμα 2.5). Τα ημικύκλια που διέρχονται από τους πόλους ονομάζονται μεσημβρινοί. Από κάθε σημείο της επιφάνειας της γης περνάει ένας παράλληλος κύκλος και ένας μεσημβρινός. Βασικός μεσημβρινός θεωρείται αυτός που περνάει από το αστεροσκοπείο του Greenwich(G). Προκειμένου να καθορισθεί η θέση ενός τόπου (Τ) στην επιφάνεια της γης απαιτείται να ορισθεί το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος.

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 νότιο ημισφαίριο.

Γεωγραφικό μήκος (L) 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.



Σχήμα 2.5 Γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος[7].

2.4.2 Σφαιρικές συντεταγμένες

Για τον καθαρισμό της ακριβής θέσης ενός άστρου όπως είναι ο ήλιος στον ουράνιο θόλο, χρησιμοποιούνται σφαιρικές συντεταγμένες.

Αζιμούθιο του ήλιου (α) ονομάζεται το τόξο ΝΛ. Μετράται επί του ορίζοντος από το νότο (N) προς τη δύση από 0° μέχρι 180° και από το νότο (N) προς την ανατολή από 0° μέχρι -180° (Σχήμα 2.6).

Ύψος του ήλιου (h) ονομάζεται το τόξο ΛΗ. Μετράται από τον ορίζοντα προς το ζενίθ από 0° μέχρι 90° και από τον ορίζοντα προς το ναδίρ (Z') από 0° μέχρι -90° .

Ζενίθια γωνία του ήλιου (θ_z). Μετράται από τον ορίζοντα προς το ζενίθ από 0° μέχρι 90° και από τον ορίζοντα προς το ναδίρ από 0° μέχρι -90° .

Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$h = 90 - \theta_z \quad (2.5)$$

Ωριαία γωνία (ω) του ήλιου καλείται το τόξο ΙΚ (Σχήμα 2.6). Μετράται επί του ουρανού ισημερινού από το Ι προς τη δύση από 0° μέχρι 360° θετικά, ή από την αντίθετη κατεύθυνση αρνητικά.

Όταν όμως απαιτείται ο υπολογισμός της μέσης μηνιαίας ηλιακής απόκλισης, τότε για κάθε μήνα χρειαζόμαστε μια χαρακτηριστική μέρα της οποίας η ηλιακή απόκλιση είναι η πλησιέστερη προς τη μέση τιμή του αντίστοιχου μήνα. Η χαρακτηριστική ημέρα για κάθε μήνα καθώς και ο αριθμός της στη διάρκεια του έτους δίνονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστική ημέρα για κάθε μήνα για τον υπολογισμό της μηνιαίας ηλιακής απόκλισης.

Μήνας	Ημέρα του μήνα	Ημέρα του έτους
Ιανουάριος	17	17
Φεβρουάριος	16	47
Μάρτιος	16	75
Απρίλιος	15	105
Μάιος	15	135
Ιούνιος	11	162
Ιούλιος	17	198
Αύγουστος	16	228
Σεπτέμβριος	15	258
Οκτώβριος	15	288
Νοέμβριος	14	318
Δεκέμβριος	10	344

2.4.3 Ηλιακές γωνίες

Θεωρούμε το σφαιρικό τρίγωνο ΠΖΗ όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6 στην ουράνια σφαίρα. Ο τύπος του συνημιτόνου για την πλευρά ΖΗ του σφαιρικού αυτού τριγώνου δίνει:

$$\cos(90 - h) = \cos(90 - \delta) \cos(90 - \phi) + \sin(90 - \delta) \sin(90 - \phi) \cos \omega \quad (2.7)$$

Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί:

$$\sinh = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2.8)$$

Αν αντικατασταθεί το ύψος του ήλιου h από την εξίσωση 2.5 τότε η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2.9)$$

Για τον υπολογισμό του μεγαλύτερου ύψους h_{\max} που θα έχει ο ήλιος στη διάρκεια μιας ημέρας, αρκεί να τεθεί στην εξίσωση 2.8 $\omega=0$, οπότε:

$$h_{\max} = 90 - |\phi - \delta| \quad (2.10)$$

Η ωριαία γωνία ανατολής ή δύσης ω_s του ήλιου για οριζόντιο επίπεδο υπολογίζεται από την εξίσωση 2.8, όταν μηδενιστεί το ύψος του ήλιου, οπότε προκύπτει:

$$\cos \delta \cos \phi \cos \omega_s = \sin \delta \sin \phi \Rightarrow \cos \omega_s = \tan \phi \tan \delta \quad (2.11)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής για $|\tan \phi - \tan \delta| \leq 1$ δίνει:

$$\omega_s = \pm \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.12)$$

Το πρόσημο μείον χρησιμοποιείται για την ανατολή και το συν για τη δύση του ήλιου. Η διάρκεια της ημέρας υπολογίζεται από τη σχέση:

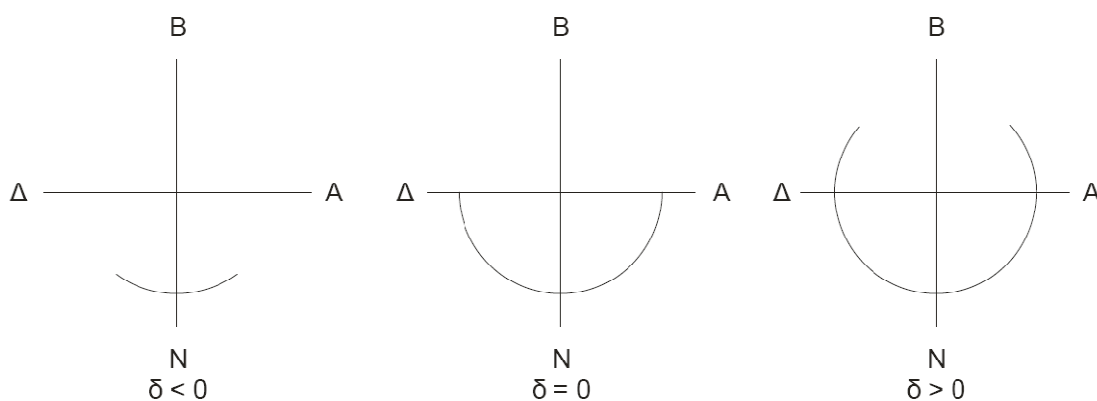
$$DayDuration = \frac{2\omega_s}{15} \quad (2.13)$$

Ο υπολογισμός του αζιμούθιου του ήλιου α , μπορεί να γίνει με εφαρμογή του τύπου του ημιτόνου στο σφαιρικό τρίγωνο ΠΖΗ, οπότε:

$$\frac{\sin(90-h)}{\sin \omega} = \frac{\sin(90-\delta)}{\sin(180-a)} \Rightarrow \sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cosh} \quad (2.14)$$

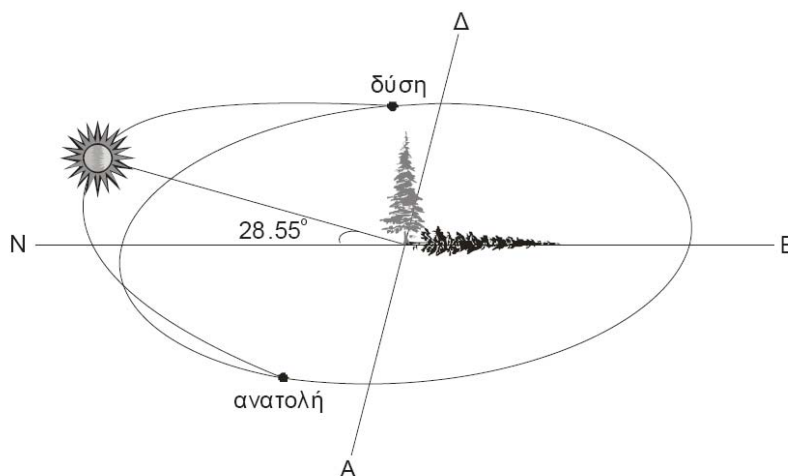
Η εξίσωση αυτή δίνει δύο λύσεις για το αζιμούθιο του ήλιου στην ανατολή (α_{sr}) και δύο στη δύση (α_{ss}). Η σωστή λύση επιλέγεται κάθε φορά ανάλογα με την τιμή της ηλιακής απόκλισης.

Έτσι για τα γεωγραφικά πλάτη της Ελλάδας, όταν $\delta < 0$ ο ήλιος ανατέλλει και δύει νότια της γραμμής Ανατολής-Δύσης, όταν $\delta = 0$ ο ήλιος ανατέλλει ακριβώς στην Ανατολή και δύει ακριβώς στη Δύση και τέλος όταν $\delta > 0$ ο ήλιος ανατέλλει και δύει βόρεια της γραμμής Ανατολής-Δύσης (Σχήμα 2.8).

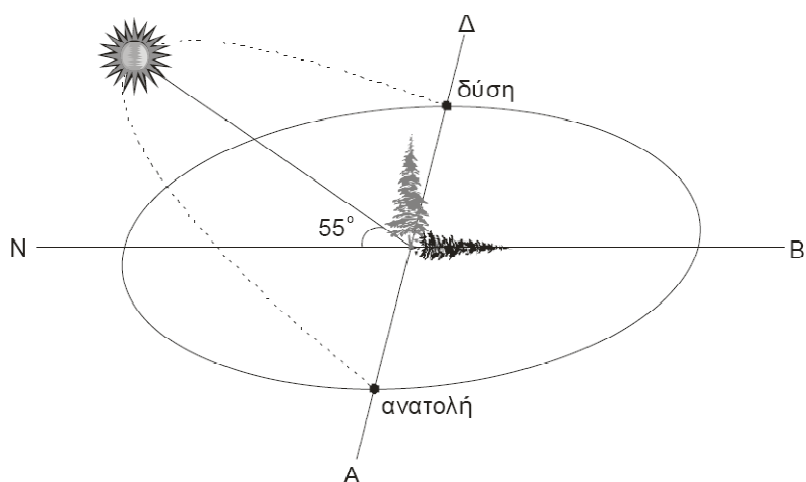


Σχήμα 2.8 Ημερήσιο τόξο του ήλιου για διάφορες τιμές του δ [7].

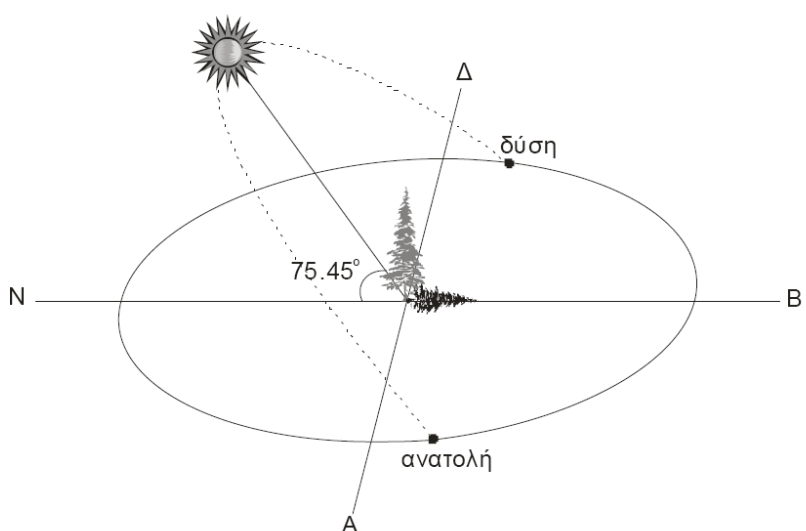
Στα σχήματα 2.9α, 2.9β και 2.9γ παρουσιάζεται η φαινόμενη κίνηση του ήλιου στο βόρειο ημισφαίριο, σε γεωγραφικό πλάτος 38° (Αθήνα), για τις χαρακτηριστικές μέρες του έτους.



Σχήμα 2.9α Φαινόμενη κίνηση του ήλιου στο χειμερινό ηλιοστάσιο (Αθήνα)[7].



Σχήμα 2.9β Φαινόμενη κίνηση του ήλιου στις ισημερίες (Αθήνα)[7].



Σχήμα 2.9γ Φαινόμενη κίνηση του ήλιου στο εαρινό ηλιοστάσιο (Αθήνα)[7].

2.4.4 Γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών

Στις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας απαιτείται συνήθως ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα επίπεδο οποιασδήποτε κλίσης ως προς τον ορίζοντα και αυθαίρετου προσανατολισμού ως προς τον ήλιο. Για τον υπολογισμό αυτόν θα πρέπει αρχικά να ορισθούν όλες οι γωνίες που υπεισέρχονται σε αυτό το σύστημα.

Έστω ένα επίπεδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10, που έχει μια κλίση β ως προς τον ορίζοντα και είναι προσανατολισμένο προς το νότο.

Ο ήλιος σε κάποια στιγμή του ημερήσιου τόξου του βρίσκεται στο σημείο Η. Αν ΚΟ είναι κάθετη στο οριζόντιο επίπεδο και ΓΟ κάθετη στο κεκλιμένο επίπεδο, τότε σχηματίζεται το σφαιρικό τρίγωνο ΗΚΓ. Η ΖΟ είναι η προβολή της ΓΟ στο οριζόντιο επίπεδο και ΕΟ είναι η προβολή της διεύθυνσης των ηλιακών ακτίνων στο οριζόντιο επίπεδο.

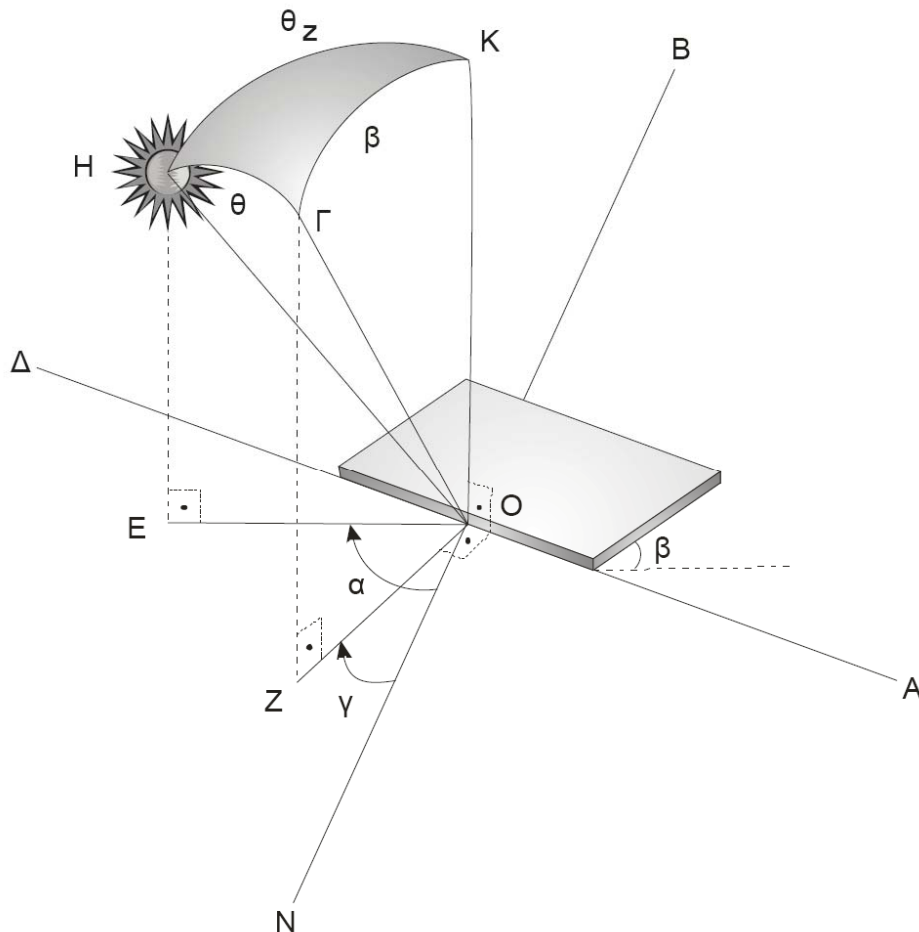
Γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων (θ) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης των ηλιακών ακτίνων (HO) και της καθέτου στο κεκλιμένο επίπεδο.

Αζιμούθιο της επιφάνειας (γ) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της διεύθυνσης βορρά – νότου και της προβολής της ΓΟ στο οριζόντιο επίπεδο. Έχει θετικές τιμές δυτικά του νότου και αρνητικές τιμές ανατολικά του νότου. Όταν μια επιφάνεια έχει εντελώς νότιο προσανατολισμό τότε $\gamma=0$.

Η εφαρμογή του νόμου του σφαιρικού τριγώνου στο σφαιρικό τρίγωνο ΗΚΓ δίνει:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\alpha - \gamma) \quad (2.15)$$

Η γνώση της γωνίας πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων (θ) είναι σημαντική στις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας, διότι από την τιμή της γωνίας αυτής θα εξαρτηθεί το μέγεθος της ηλιακής ακτινοβολίας που θα δεχθεί η αντίστοιχη επιφάνεια. Έτσι όσο μικρότερη είναι η γωνία αυτή τόσο μεγαλύτερη είναι η ακτινοβολία που θα δεχθεί η επιφάνεια.



Σχήμα 2.10 Θέση του ήλιου ως προς το κεκλιμένο επίπεδο[7].

2.5 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο είναι απαραίτητη στις περισσότερες εφαρμογές και μελέτες των ηλιακών συστημάτων, όπως βέβαια και στα φωτοβολταϊκά. Επειδή όμως στους περισσότερους

μετεωρολογικούς σταθμούς είναι διαθέσιμη συνήθως η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, θα πρέπει να δοθεί μέθοδος υπολογισμού της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο. Για τη σωστή επιλογή της κλίσης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας απαιτείται η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο σε μηνιαία και ετήσια βάση. Παρακάτω δίνεται η μεθοδολογία.

2.5.1 Ωριαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια του εδάφους αποτελείται από τρεις συνιστώσες :

- την άμεση που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο
- τη διάχυτη που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο
- την ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής

Η άμεση ακτινοβολία που θα δεχθεί το επίπεδο εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων. Η διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του επιπέδου και ούτε προέρχονται απ' όλο τον ουράνιο θόλο ή το έδαφος της γύρω περιοχής. Έτσι η διάχυτη ακτινοβολία που δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο θα προέρχεται μόνο από το τμήμα του ουρανού που " βλέπει " το επίπεδο.

Έπειτα απ' αυτά για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για κάθε μία από τις συνιστώσες και ένας διορθωτικός συντελεστής.

Ο διορθωτικός συντελεστής για την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (R_b), είναι ο λόγος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο (I_{bT}), προς αυτήν στο οριζόντιο επίπεδο (I_b):

$$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b} = \frac{I_{bn} \cos \theta}{I_{bn} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.16)$$

αντικαθιστώντας στην εξίσωση αυτή το $\cos \theta_z$ με την εξίσωση 2.9, προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (2.17)$$

Απ' την εξίσωση αυτή γίνεται φανερό ότι για ένα συγκεκριμένο τόπο η τιμή του R_b μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας και του έτους.

Ο υπολογισμός της συνιστώσας για την διάχυτη ακτινοβολία βασίζεται στην υπόθεση ότι η διάχυτη είναι ισοτροπική, δηλαδή είναι ομοιόμορφα κατανομημένη απ' τον ουράνιο θόλο. Ο διορθωτικός συντελεστής για την διάχυτη ακτινοβολία (R_d) είναι ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο (I_{dT}) προς αυτήν στο οριζόντιο (I_d). Απ' ολόκληρη την διάχυτη ακτινοβολία που προέρχεται απ' τον ουράνιο θόλο, ένα μόνο ποσοστό δέχεται το κεκλιμένο επίπεδο. Το ποσοστό αυτό είναι ο λόγος του τμήματος του ουράνιου θόλου που "βλέπει" το κεκλιμένο, προς ολόκληρη την ημισφαιρική επιφάνεια του ουράνιου θόλου. Για ένα κεκλιμένο επίπεδο που δεν δέχεται σκίαση, με κλίση β , στην επιφάνεια της γης, ο διορθωτικός αυτός συντελεστής είναι :

$$R_d = \frac{I_{dT}}{I_d} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.18)$$

Ο διορθωτικός συντελεστής για την ανακλώμενη ακτινοβολία (R_r), είναι ο λόγος της ανακλώμενης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο (I_{rT}), προς

αυτήν στο οριζόντιο (I_T). Η ανακλώμενη όμως στο οριζόντιο επίπεδο είναι το γινόμενο του συντελεστή ανάκλασης ρ του εδάφους της γύρω περιοχής επί την ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο I . Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και εδώ, αν υποθέσουμε ότι η ανακλώμενη είναι ισοτροπική, τότε για ένα κεκλιμένο επίπεδο με κλίση β , στην επιφάνεια της γης ο διορθωτικός συντελεστής είναι :

$$R_r = \frac{I_{rT}}{I\rho} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.19)$$

Από τα παραπάνω η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο I_T , είναι:

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + I\rho R_r \quad (2.20)$$

Αν ληφθούν υπ' όψη οι εξισώσεις 2.16, 2.18 και 2.19, τότε η εξίσωση 2.20 γράφεται :

$$I_T = I_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + I\rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.21)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σ' ένα κεκλιμένο επίπεδο με κλίση β , εφόσον θεωρηθούν ότι οι γωνίες θ και θ_z , αντιστοιχούν στο μέσον της αναφερόμενης ώρας. Ο συντελεστής ανάκλασης ρ λαμβάνεται συνήθως 0.2 αλλά όταν η γύρω περιοχή είναι καλυμμένη με χιόνι ο συντελεστής αυτός μπορεί να είναι πολύ υψηλός. Διάφορες τιμές του ρ δίνονται στον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Συντελεστής ανάκλασης για διάφορα είδη επιφανειών.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Φρέσκο χιόνι	0,87
Ξηρή άμμος	0,18
Υγρή άμμος	0,09
Δάσος κωνοφόρων	0,05
Τσιμέντο νέο	0,33
Τσιμέντο παλιό	0,23

Αν ληφθεί υπ' όψη η εξίσωση 2.16 και διαιρεθούν και τα δυο μέλη της εξισώσεως 2.21 δια I , προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$\frac{I_T}{I} = \left(1 - \frac{I_d}{I}\right) R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.22)$$

Ο λόγος I_d/I δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις ανάλογα με την τιμή του ωριαίου δείκτη αιθριότητας K .

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,09K & \text{για } K \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604K + 4,388K^2 - 16,638K^3 + 12,336K^4 & \text{για } 0,22 \leq K \leq 0,8 \\ 0,165 & \text{για } K \geq 0,8 \end{cases} \quad (2.23)$$

Ωριαίος δείκτης αιθριότητας (K) ονομάζεται ο λόγος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (I) προς την εκτός γήινης ατμόσφαιρας ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (I_0). Ο δείκτης αυτός μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα μέτρο της σχετικής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία.

$$K = \frac{I}{I_o} \quad (2.24)$$

Ο υπολογισμός της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (I_o) μπορεί να γίνει προσεγγιστικά από την παρακάτω σχέση με την προϋπόθεση ότι η ζενίθια γωνία θ_z , έχει θεωρηθεί στο μέσο της αντίστοιχης ώρας.

$$I_o = G_{on} \cos \theta_z \quad (2.25)$$

Για να υπολογισθεί η I_o για χρονικό διάστημα από ω_1 μέχρι ω_2 θα πρέπει να ολοκληρωθεί η αμέσως προηγούμενη σχέση.

$$I_o = \int_{\omega_1}^{\omega_2} G_{on} \cos \theta_z d\omega \quad (2.26)$$

$$I_o = \frac{12}{\pi} G_{sc} (1 + 0,33 \cos \frac{360n}{365}) \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (2.27)$$

όπου η I_o είναι σε Wh/m^2

Επειδή στους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι διαθέσιμη η ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, η σχέση 2.21 είναι πολύ χρήσιμη διότι σε συνδυασμό με την 2.22, μπορεί να υπολογισθεί η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο χωρίς την ανάγκη της διάχυτης ακτινοβολίας.

2.5.2 Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Επειδή στην εξίσωση 2.21 ο δεύτερος και τρίτος όρος είναι ανεξάρτητοι απ' την γωνία πρόσπτωσης, η εξίσωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο H_T , αρκεί στον πρώτο όρο να χρησιμοποιηθεί ένας διορθωτικός συντελεστής R_b και οι ακτινοβολίες να θεωρηθούν ημερήσιες. Έτσι η εξίσωση θα γίνει :

$$H_T = H_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + H_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + H_p \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.28)$$

Ο συντελεστής R_b είναι ο λόγος της ημερήσιας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο προς αυτήν στο οριζόντιο . Για το βόρειο ημισφαίριο και για επιφάνειες νότιου προσανατολισμού ($\gamma = 0$) ο συντελεστής αυτός μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση 2.17 με ολοκλήρωση, από την ωριαία γωνία ανατολής ω'_{sr} μέχρι την ωριαία γωνία δύσης ω'_{ss} του ήλιου για το κεκλιμένο επίπεδο και από την ωριαία γωνία ανατολής ω_{sr} μέχρι την ωριαία γωνία δύσης ω_{ss} του ήλιου για το οριζόντιο επίπεδο :

$$R_b = \frac{\int_{\omega'_{sr}}^{\omega'_{ss}} \cos \theta d\omega}{\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} \cos \theta_z d\omega} \quad (2.29)$$

Δεδομένου ότι $\omega'_{sr} = \omega'_{ss}$ και $\omega_{sr} = \omega_{ss}$ οι γωνίες αυτές μπορούν να έχουν ενιαίο συμβολισμό ω'_s και ω_s , οπότε προκύπτει :

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi \omega'_s}{180} \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta} \quad (2.30)$$

όπου ω'_s είναι η ωριαία γωνία της δύσης του ηλίου για κεκλιμένη επιφάνεια και έχει την μικρότερη τιμή απ' τις τιμές που παίρνουν τα δύο μεγέθη που βρίσκονται μέσα στην αγκύλη της παρακάτω εξίσωσης.

$$\omega'_s = \min \left\{ \omega_s, \cos^{-1} [-\tan(\phi - \beta) \tan \delta] \right\} \quad (2.31)$$

Για τις ηλιακές εφαρμογές, σε αρκετές περιπτώσεις, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο. Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία εξίσωση παρόμοια με την 2.28, αρκεί βέβαια ο συντελεστής R_b , να υπολογισθεί για την χαρακτηριστική ημέρα του αντίστοιχου μήνα. Έτσι η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση :

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \bar{R}_b + \bar{H}_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \bar{H} \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.32)$$

Παρόμοια με την σχέση 2.22, η εξίσωση 2.32 μπορεί να μετασχηματισθεί στην παρακάτω σχέση :

$$\frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.33)$$

Διάφορες σχέσεις για το λόγο $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ έχουν προταθεί από αρκετούς ερευνητές.

Κατά τους Liu και Jordan ο λόγος αυτός υπολογίζεται απ' την παρακάτω σχέση :

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,390 - 4,027\bar{K} + 5,531\bar{K}^2 - 3,108\bar{K}^3 \quad (2.34)$$

Για τον ελληνικό χώρο έχει προταθεί από το Λάλα το παρακάτω πολυώνυμο που δίνει καλύτερα αποτελέσματα από την προηγούμενη σχέση:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,446 - 2,965\bar{K} + 1,727\bar{K}^2 \quad (2.35)$$

Ο δείκτης αιθριότητας \bar{K} στη σχέση αυτή είναι ο λόγος της μέσης ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο για κάθε μήνα (\bar{H}) προς την εκτός γήινης ατμόσφαιρας μέση ημερήσια ακτινοβολία (\bar{H}_o), για κάθε μήνα.

Η εκτός γήινης ατμόσφαιρας μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία \bar{H}_o μπορεί να υπολογισθεί με ολοκλήρωση της G_o στο χρονικό διάστημα από την ωριαία γωνία ανατολής (ω_{sr}) μέχρι την ωριαία γωνία της δύσης του ήλιου (ω_{ss}).

$$\bar{H}_o = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} G_{on} \cos \theta_z d\omega \quad (2.36)$$

Αν η ηλιακή σταθερά είναι σε Wh/m^2 τότε η \bar{H}_o θα προκύψει σε Wh/m^2 από την παρακάτω σχέση :

$$\bar{H}_o = \frac{24}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0,33 \cos \frac{360n}{365} \right) \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (2.37)$$

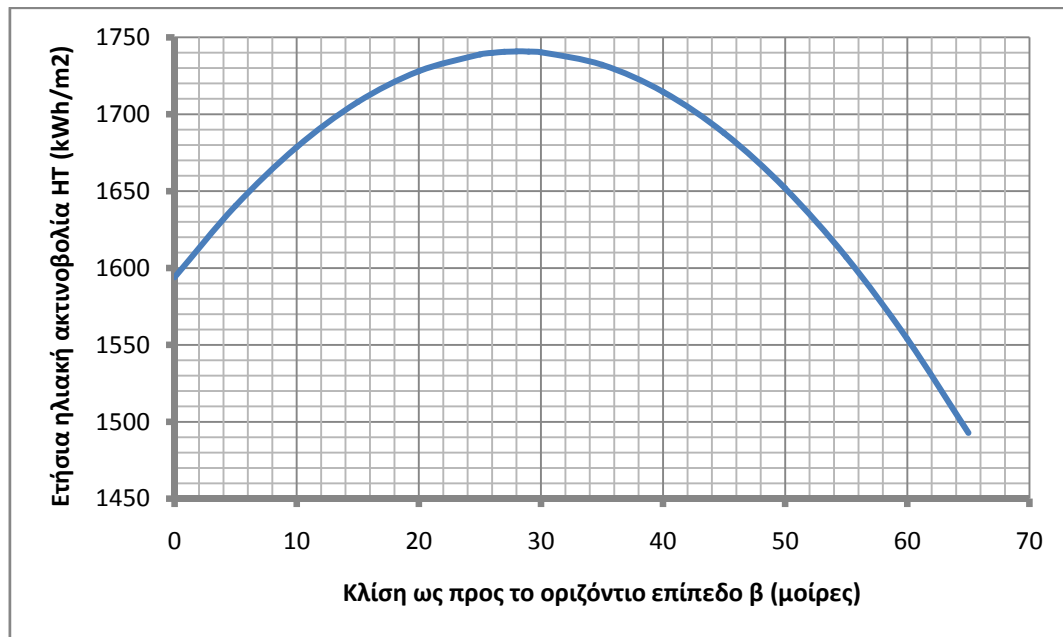
Η εκτός γήινης ατμόσφαιρας ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία \bar{H}_o , μπορεί να υπολογισθεί από την σχέση 2.37 για γεωγραφικά πλάτη που κυμαίνονται από -60° μέχρι 60° .

2.5.3 Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο είναι από τα πιο σημαντικά μεγέθη στις ηλιακές εφαρμογές. Ο υπολογισμός της μπορεί να γίνει με βάση τη μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή αρκεί απλά να αθροίσουμε τις τιμές της μηνιαίας ακτινοβολίας, που αντιστοιχούν στην επιλεγμένη κλίση, για όλους τους μήνες του έτους:

$$H(\beta) = \sum_{i=1}^{12} H_i(\beta) \quad (2.38)$$

Η μεταβολή της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την κλίση του επιπέδου πρόσπτωσης, σύμφωνα με την ανάλυση που έχει γίνει παραπάνω έχει την μορφή του σχήματος 2.11.

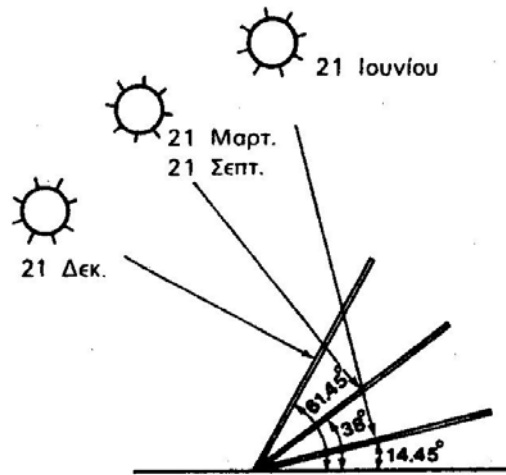


Σχήμα 2.11 Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με την κλίση για γεωγραφικό πλάτος $\phi=37^\circ$.

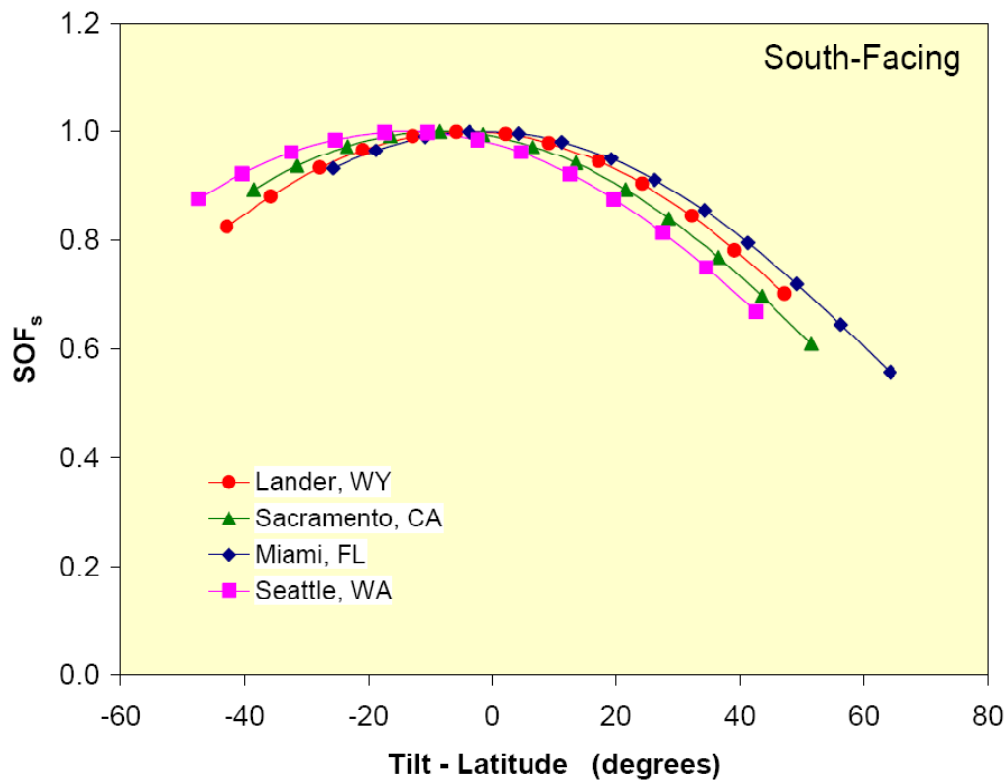
Αυτό που μας ενδιαφέρει σε μια ηλιακή εφαρμογή είναι η εύρεση εκείνης της γωνίας κλίσης των συλλεκτών, που θα έχει ως αποτέλεσμα τη μέγιστη ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (β_{opt}).

Παλιότερες μελέτες υποδείκνυαν την επιλογή γωνίας ίση με το γεωγραφικό πλάτος ($\beta_{opt}=\phi$) και κατεύθυνση προς τον νότο ($\gamma=0^\circ$) (για επιφάνειες στο βόρειο ημισφαίριο). Η πρόταση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι μια επιφάνεια θα δέχεται τη μέγιστη ακτινοβολία όταν αυτή προσπίπτει κάθετα σε αυτή. Επομένως η βέλτιστη κλίση για μια επιφάνεια που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος ϕ και είναι στραμμένη προς τον νότο προκύπτει από το μέγεθος $\phi+\delta$, όπου δ η απόκλιση. Η γωνία αυτή κυμαίνεται μεταξύ $\phi+23,45^\circ$ τον χειμώνα (21 Δεκεμβρίου) και $\phi-23,45^\circ$ το καλοκαίρι

(21 Ιουνίου) (Σχήμα 2.12). Είναι λογικό επομένως να επιλεγεί η μέση τιμή της μεταβολής αυτής της γωνίας, για να έχουμε τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ . Διαφορετικά σκεπτόμενοι μπορούμε να πούμε ότι η επιλογή γωνίας κλίσης ίσης με το γεωγραφικό πλάτος ισοδυναμεί με μια οριζόντια επιφάνεια στο επίπεδο του ισημερινού και η οριζόντια επιφάνεια αυτή θα έχει τη μέγιστη ετήσια ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 2.12 Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στις χαρακτηριστικές μέρες του έτους, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος 38° . Τα ύψη του ηλίου αφορούν τα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια[1].

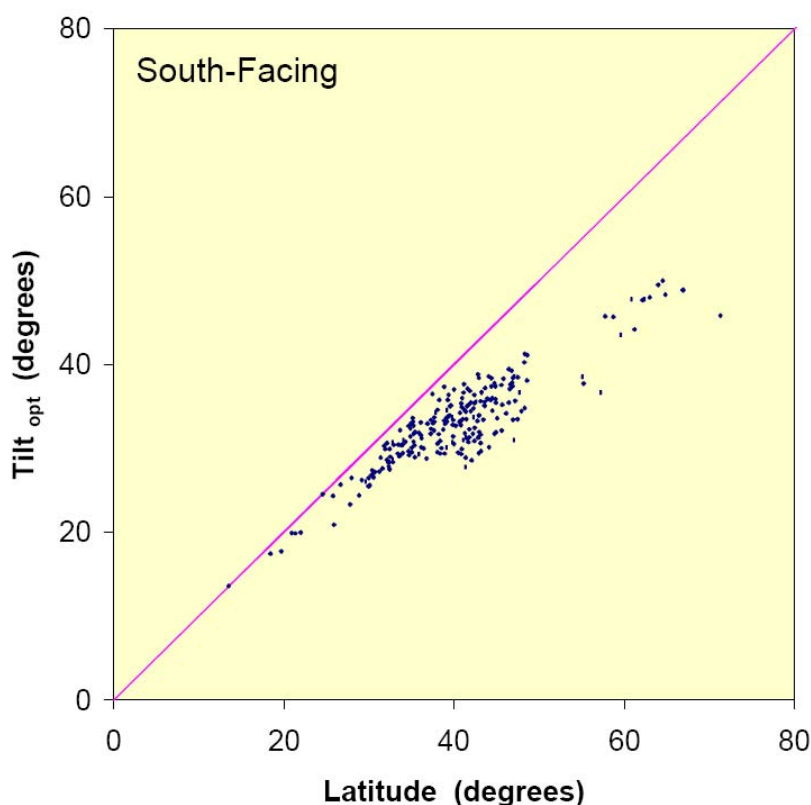


Σχήμα 2.13 Μεταβολή της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την κλίση της επιφάνειας για 4 διαφορετικές τοποθεσίες στις Η.Π.Α. (όπου $SOF = H/H_{max}$)[14].

Νεότερες μελέτες έχουν δείξει ότι κάτι τέτοιο δεν είναι απόλυτα ακριβές (Σχήμα 2.13). Η βέλτιστη γωνία κλίσης προκύπτει σημαντικά μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος και η απόκλιση αυτή μεγαλώνει ταυτόχρονα με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους (Σχήμα 2.14). Το γεγονός αυτό οφείλεται σε κάποιους παράγοντες, οι οποίοι καταδεικνύουν και τις αδυναμίες-παραδοχές της προηγούμενης πρότασης:

- Μεγαλύτερο γεωγραφικό πλάτος, συνεπάγεται μεγαλύτερη διαφορά στη διάρκεια της μέρας ανάμεσα στο καλοκαίρι και τον χειμώνα και επομένως μεγαλύτερη διαφορά στην ηλιακή ακτινοβολία.
- Ο καιρός είναι στη γενική περίπτωση καλύτερος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όπου ο ήλιος βρίσκεται ψηλότερα στον ουρανό.
- Η συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη σε μικρότερες τιμές της γωνίας κλίσης του επιπέδου.
- Υπάρχει λιγότερη ατμοσφαιρική απορρόφηση όταν ο ήλιος είναι ψηλότερα στον ουρανό.
- Μικρότερες γωνίες κλίσης μειώνουν τη διάρκεια που ο ήλιος βρίσκεται πίσω από την επιφάνεια (κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου).

Η ανάλυση που έχει γίνει παραπάνω για την εύρεση της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο λαμβάνει υπ' όψιν τους παραπάνω παράγοντες, για αυτό τον λόγο παρατηρούμε στο σχήμα 2.9 το β_{opt} να είναι μικρότερο από το γεωγραφικό πλάτος.



Σχήμα 2.14 Βέλτιστη γωνία κλίσης συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους για 239 παρατηρούμενες τοποθεσίες στις Η.Π.Α[14].

Μια πολύ χρήσιμη προσεγγιστική σχέση που συνδέει την βέλτιστη γωνία κλίσης με το γεωγραφικό πλάτος είναι η εξής[3]:

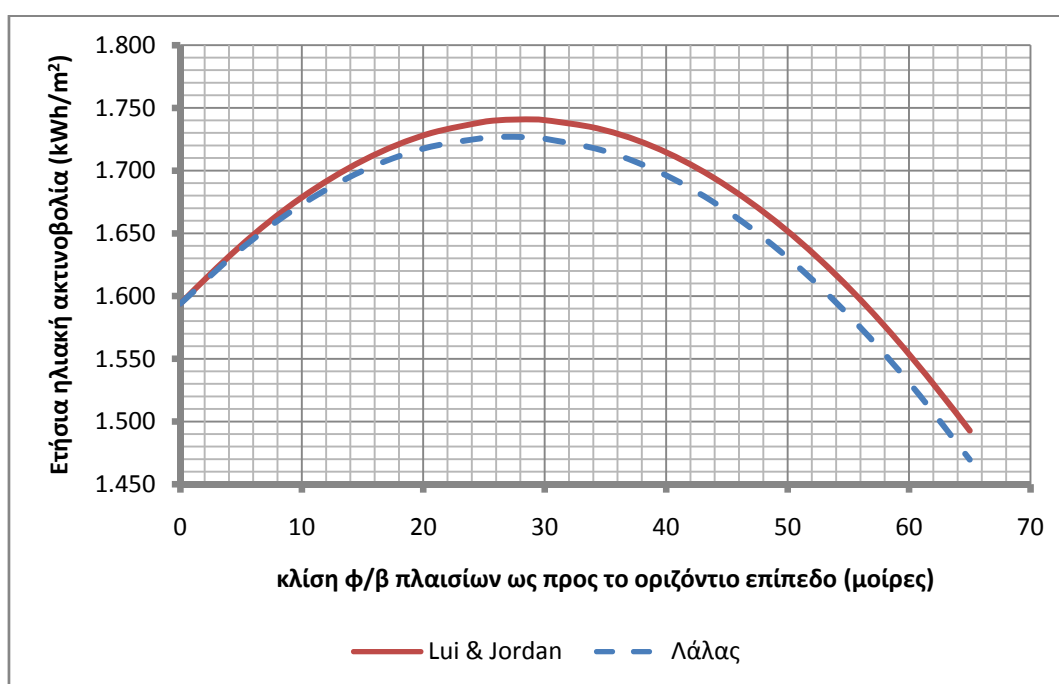
$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69|\phi| \quad (2.39)$$

Επιπλέον όσον αφορά τον απόλυτα νότιο προσανατολισμό ($\gamma=0^\circ$), αυτό θεωρείται βέλτιστος, όταν στη περιοχή που τοποθετούνται τα φ/β πλαίσια, ο άξονας Α-Δ δεν παρουσιάζει εμπόδια που μπορεί να δημιουργήσουν μείωση στη διάρκεια της ημερήσιας ηλιοφάνειας. Για παράδειγμα αν υποθέσουμε ότι τα φ/β πλαίσια τοποθετούνται σε μια περιοχή, όπου στα ανατολικά υπάρχει ένα ψηλό βουνό, έστω και σε μεγάλη απόσταση, τότε όπως είναι αναμενόμενο χάνεται ένα μέρος της ηλιοφάνειας κατά την ανατολή του ήλιου και μέχρι αυτός να ξεπεράσει σε ύψος την κορυφή του βουνού. Αν ακόμα υποθέσουμε ότι στα δυτικά δεν υπάρχει κάποιο αντίστοιχο εμπόδιο, αλλά ο ορίζοντας είναι ανοιχτός, τότε προκύπτει μια ασυμμετρία ως προς την πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας από τα φ/β στοιχεία κατά τη διάρκεια μιας μέρας. Επομένως είναι φανερό ότι ο απόλυτα νότιος προσανατολισμός δεν είναι βέλτιστος για την περιοχή που περιγράφηκε. Η βέλτιστη λύση είναι να στραφούν οι συστοιχίες προς τα δυτικά και υπό τέτοια γωνία, ώστε να μεγιστοποιείται η ημερήσια προσλαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία.

2.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΟΛΥΩΝΥΜΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ H_d/H

Παραπάνω παρουσιάστηκαν δύο πολυώνυμα που σκοπό έχουν να προσεγγίσουν τον λόγο H_d/H σε πραγματικές συνθήκες. Το πρώτο έχει γενικότερη ισχύ σε τοποθεσίες ανά την υφήλιο, έχει προταθεί από τους Liu και Jordan και δίνεται από τη σχέση 2.34. Το δεύτερο έχει προταθεί από το κ.Λάλα για τον ελληνικό χώρο και δίνεται από τη σχέση 2.35.

Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα δύο αυτά πολυώνυμα. Επιλέγεται μια συγκεκριμένη πόλη της Ελλάδας, της οποίας υπάρχουν οι μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο σε μηνιαία βάση[1] και εξετάζεται η μεταβολή της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την κλίση β και για τα δύο πολυώνυμα. Στο σχήμα 2.15 φαίνονται οι δύο αντίστοιχες καμπύλες.



Σχήμα 2.15 Σύγκριση καμπυλών ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας.

Παρατηρούμε ότι η διαφορά των δύο καμπυλών είναι πολύ μικρή και μάλιστα για μικρές τιμές της γωνίας β , οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται. Για τιμές της γωνίας μεγαλύτερες των 20° υπάρχει μια σταθερή απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών, με το πολυώνυμο των Lui και Jordan να δίνει υψηλότερες τιμές ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας. Όμως, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 2.3, η απόκλιση που εμφανίζουν στη χειρότερη περίπτωση είναι μόλις 1%. Ακόμα ένα πολύ σημαντικό γεγονός είναι ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης (β_{opt}), που δίνει τη μέγιστη ετήσια ηλιακή ακτινοβολία προκύπτει σχεδόν ίδια ανεξαρτήτως του πολυωνύμου που χρησιμοποιείται και είναι 27° για το πολυώνυμο που έχει προταθεί από το Λάλα και 28° για το πολυώνυμο των Lui και Jordan.

Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγιστικών υπολογιστικών μοντέλων είναι ανεπαίσθητη για τις ανάγκες της μελέτης που γίνεται στο 6ο κεφάλαιο, και η ακρίβεια και των δύο θεωρείται ότι είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Στους υπολογισμούς του κεφαλαίου 6, χρησιμοποιήθηκε, ενδεικτικά το πολυώνυμο, που έχει προταθεί από τους Lui και Jordan.

Πίνακας 2.3 Σύγκριση προσεγγιστικών πολυωνύμων για τον υπολογισμό του λόγου H_d/H

Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο β (μοίρες)	Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία HT κατά Λάλα (kWh/m ²)	Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία HT κατά Lui&Jordan (kWh/m ²)
0	1.594,00	1.594,00
5	1.637,71	1.640,50
10	1.673,12	1.678,60
15	1.699,84	1.707,88
20	1.717,58	1.728,04
25	1.726,16	1.738,86
26	1.726,76	1.739,90
27	1.726,99	1.740,55
28	1.726,85	1.740,83
29	1.726,34	1.740,72
30	1.725,46	1.740,24
35	1.715,47	1.732,12
40	1.696,25	1.714,57
45	1.667,95	1.687,71
50	1.630,80	1.651,77
55	1.585,11	1.607,04
60	1.531,26	1.553,91
65	1.469,74	1.492,84

2.7 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΩΡΙΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΤΙΜΕΣ

Πολλές φορές είναι χρήσιμες οι τιμές της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, κυρίως όταν μελετώνται οι επιπτώσεις φαινομένων σκίασης από παρακείμενα εμπόδια ή και από τα ίδια τα φ/β πλαίσια. Όμως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς αφορούν συνήθως ημερήσιες τιμές της ακτινοβολίας. Στατιστικές μελέτες μετεωρολογικών δεδομένων έχουν δείξει ότι ο λόγος της εξωγήινης ακτινοβολίας προς την ημερήσια τιμή της, ισούται με τον αντίστοιχο λόγο της διάχυτης ακτινοβολίας, δηλαδή:

$$r_d = \frac{G_d}{H_d} = \frac{G_0}{H_0} = \frac{\pi}{T} \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s - \sin \omega_s} \quad (2.40)$$

όπου χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις 2.3, 2.25 και 2.37. Ενώ ο αντίστοιχος λόγος της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας χρειάζεται την εξής τροποποίηση:

$$r = \frac{G}{H} = \frac{G_0}{H_0} (a + b \cos \omega) \quad (2.41)$$

όπου τα a και b δίνονται από τους παρακάτω εμπειρικούς τύπους:

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad (2.42a)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad (2.42b)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το ω είναι η ωριαία γωνία του χρόνου και το ω_s η γωνία της δύσης σε μοίρες. Για να υπολογιστούν, προσεγγιστικά αλλά με αρκετή ακρίβεια, οι ωριαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 2.41 αντικαθιστώντας όπου ω το μέσο της ώρας που μας ενδιαφέρει. Δηλαδή μπορούμε να γράψουμε:

$$r = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{T} \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\frac{\pi}{180} \omega_s \cos \omega_s - \sin \omega_s} \cdot (a + b \cos \omega) \quad (2.43)$$

Η προσέγγιση αυτή μας γλυτώνει από τον υπολογισμό επίπονων ολοκληρωμάτων. Στο Παράρτημα Α δίνονται οι τιμές της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, που προκύπτουν από την μέσες ημερήσιες τιμές για την πόλη της Καλαμάτας ($\varphi=37,03^\circ$) και για κάθε μήνα[1].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποκαλείται η εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στα άκρα μιας διόδου η οποία ακτινοβολείται με ηλιακή ενέργεια. Για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η ακτινοβολία παράγεται συνεχές ρεύμα από την διόδο, το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει ένα οποιοδήποτε φορτίο συνεχούς ρεύματος και κατά συνέπεια να έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Όταν διακοπεί η ακτινοβολία της διόδου, σταματάει και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

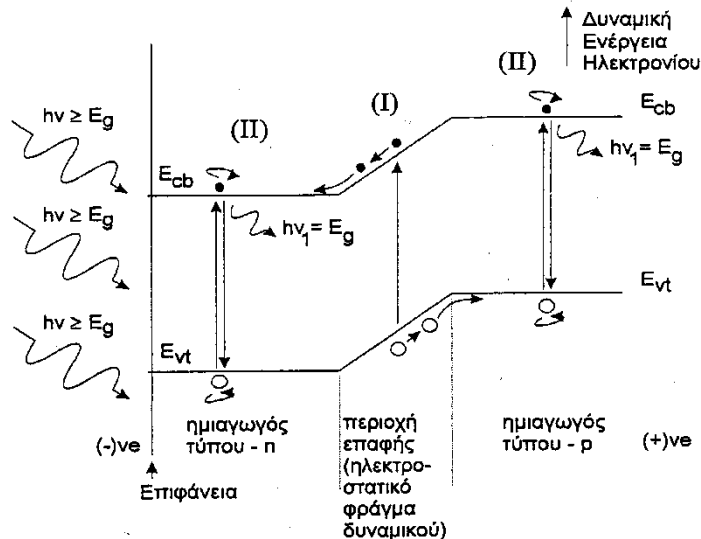
3.1.1 Ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού

Τα ηλιακά στοιχεία είναι διόδοι ημιαγωγού με την μορφή ενός δίσκου, που δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία. Πρόκειται για διόδους επαφής τύπου-n και τύπου-p, οι οποίες εκτείνονται σε όλο το πλάτος του δίσκου. Τα ηλιακά στοιχεία βασίζονται στη λειτουργία τους στη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού, το οποίο εκτείνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το φράγμα δυναμικού βρίσκεται κατανομημένο σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και τοποθετείται από την πλευρά από την οποία προσπίπτει το φως.

Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να δημιουργηθεί ένα ζεύγος φορέων, δηλαδή ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας και μια οπή της ζώνης σθένους. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων, πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν σε συνθήκες ισορροπίας.

Η αναγκαιότητα ύπαρξης του ηλεκτροστατικού δυναμικού πηγάζει από την απαίτηση για διαχωρισμό των θετικών και αρνητικών φορέων φορτίου και την συγκέντρωσή τους πάνω στις δύο όψεις του ηλιακού στοιχείου. Συγκεκριμένα, επειδή μερικά από τα ζεύγη των φορέων αυτών δημιουργούνται μέσα ή-και δίπλα από την περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού διαχωρίζονται προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τη δυναμική τους ενέργεια. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται σαν σφαίρες που κυλούν πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο, ενώ οι οπές συμπεριφέρονται σαν φουσαλίδες που αιωρούνται μέσα σε ένα υγρό (Σχήμα 3.1). Στο μοντέλο αυτό, το ηλεκτρόνιο ελαχιστοποιεί την ενέργεια του κινούμενο προς τα κάτω, ενώ η οπή ελαχιστοποιεί την ενέργειά της κινούμενη προς τα πάνω σε ένα διάγραμμα δυναμικής ενέργειας.

Σε μια διόδο p-n τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου-n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου-p. Αποτέλεσμα είναι να συσσωρεύονται φορτία στις δύο αντικρινές επιφάνειες και να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων του ηλιακού στοιχείου, για όσο διάστημα υπάρχει οπτική διέγερση, η εμφάνιση δηλαδή του φωτοβολταϊκού φαινομένου.



Σχήμα 3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το ηλιακό στοιχείο αποτελείται από την επαφή ημιαγωγού τύπου-n και τύπου-p. Το σχήμα παρουσιάζει το διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια. Στο ηλιακό στοιχείο προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ενέργεια $E=h \cdot \nu \geq E_g$, όπου $E_g=E_{cb}-E_{vt}$ η τιμή του ενεργειακού διακένου, E_{cb} ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας και E_{vt} η κορυφή της ζώνης σθένους[11].

3.1.2 Δημιουργία φωτορεύματος

Όταν ένα φ/β στοιχείο δέχεται μια κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα I_ϕ , που η τιμή του είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά και κατά συνέπεια ανάλογη προς τη ηλιακή ακτινοβολία. Για τον υπολογισμό του μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση:

$$I_\phi = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda)[1 - R(\lambda)]\Phi(\lambda)d\lambda \quad (3.1)$$

- όπου e το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο,
- $R(\lambda)$ ο δείκτης ανάκλασης για ακτινοβολία μήκους κύματος λ ,
- $\Phi(\lambda)$ το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι $\lambda+d\lambda$,
- $S(\lambda)$ η φασματική απόκριση, δηλαδή το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου,
- λ_g το μέγιστο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό, ενεργειακού διακένου E_g : ($\lambda_g = h \cdot c / E_g$).

Η τιμή του φωτορεύματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης και το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων κλπ.

3.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ/ΚΥΨΕΛΩΝ (PV CELLS)

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φ/β στοιχείων είναι:

- Τεχνολογία παραγωγής ημιαγωγικών υλικών με κρυσταλλική δομή, την πλειοψηφία των οποίων αποτελεί το πυρίτιο.
- Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film), η οποία ονομάζεται έτσι επειδή το πάχος των στοιχείων είναι πολύ μικρό (μερικά μόνο μm).
- Άλλες τεχνολογίες που σκοπό έχουν να γίνει λιγότερο ενεργοβόρα η παραγωγή του καθαρού πυριτίου, περιορίζοντας τις απώλειες σε ακριβό καθαρό πυρίτιο (π.χ. μέθοδος EFG, edge defined film fed growth και μέθοδος String Process).

Οι κρύσταλλοι και η μορφή λεπτού φιλμ διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά την απόδοση απορρόφησης του φωτός, την απόδοση μετατροπής της μια μορφής ενέργειας στην άλλη, την τεχνολογία κατασκευής και το κόστος κατασκευής.

3.2.1 Το Πυρίτιο (Si)

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

Εκτός του οξυγόνου, το πυρίτιο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στην επιφάνεια του εδάφους. Σχεδόν πάντα, όμως απαντάται με τη μορφή οξειδίου στο περιβάλλον, συγκεκριμένα ως διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Για την αξιοποίησή του, επομένως, απαιτείται επεξεργασία έτσι ώστε να αποκτήσει υψηλή καθαρότητα.

3.2.1.1 Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο

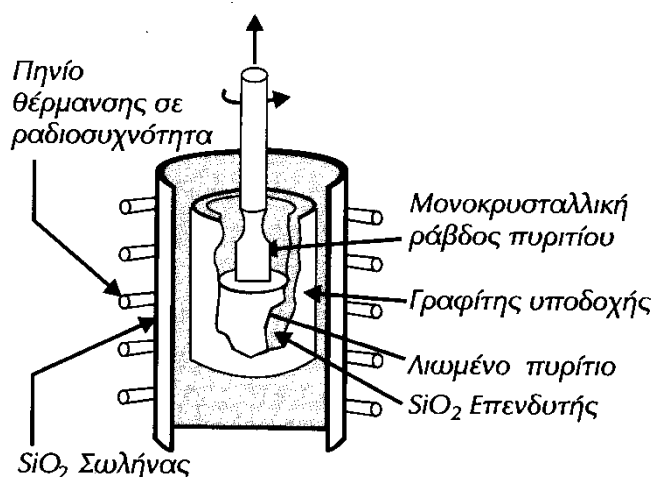
Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει μια ομοιόμορφη μοριακή δομή. Συγκρινόμενο με υλικά που δεν είναι σε μορφή κρυστάλλου, η υψηλή του ομοιομορφία έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης (δηλαδή την αναλογία της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από το ηλιακό στοιχείο προς την διαθέσιμη από την ηλιακή

ακτινοβολία ισχύ). Η απόδοση των μονοκρυσταλλικών στοιχείων του εμπορίου κυμαίνεται από 14-18%.

Παραγωγική Διαδικασία

Το διοξείδιο του πυριτίου κατά την διαδικασία εξευμενισμού του (αφαίρεση των προσμίξεων) θερμαίνεται στους 1800 °C παρουσία άνθρακα. Το μεταλλουργικό πυρίτιο που προκύπτει από αυτή την διαδικασία έχει μια καθαρότητα της τάξης του 98% και μπορεί μεν να χρησιμοποιηθεί στην μεταλλουργική βιομηχανία, είναι δε τελείως ακατάλληλο ως ημιαγωγός. Απαιτείται επομένως περαιτέρω επεξεργασία.

Σε πρώτη φάση γίνεται ανάτηξη και στη συνέχεια αντίδραση με υδροχλώριο (HCl), μετατρέποντας το μεταλλουργικό πυρίτιο σε τριχλωροσιλάνιο (SiHCl_3) που είναι ένα πτητικό υγρό. Εν συνεχεία αποχωρίζεται από διάφορες προσμίξεις μέσω κλασματικής απόσταξης (μέθοδος Siemens). Τέλος ανάγεται με υδρογόνο και συμπυκνώνεται. Πρέπει να τονιστεί ότι οι παραπάνω διαδικασίες είναι εξαιρετικά ενεργοβόρες και συντελούν στο υψηλό κόστος κατασκευής των φ/β στοιχείων. Το τελικό προϊόν είναι ένα υψηλής καθαρότητας πυρίτιο (με συγκέντρωση προσμίξεων μικρότερη από 1 άτομο ανά 10^{12} άτομα Si), που δεν έχει όμως την επιθυμητή δομή.



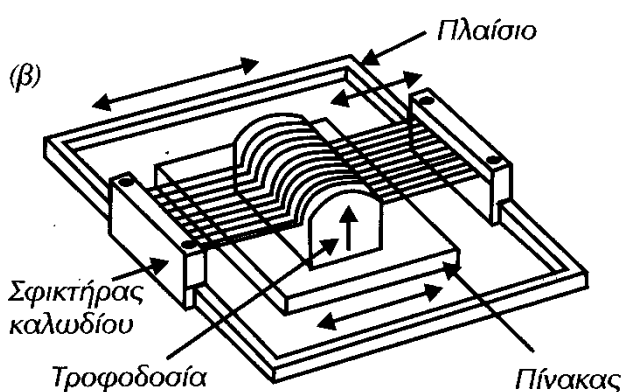
Σχήμα 3.2 Μέθοδος Czochrankski[2].

Ακολουθεί η κρυσταλλική ανάπτυξη του πυριτίου συνήθως με την μέθοδο Czochrankski (Σχήμα 3.2), κατά την οποία αρχικά τήκεται αυτό μέσα σε ένα κυλινδρικό δοχείο και σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1400 °C. Έπειτα ένα πολύ μικρό κομμάτι κρυσταλλικού πυριτίου τοποθετείται σε επαφή με την επιφάνεια του λιωμένου πυριτίου, ενώ το κυλινδρικό δοχείο βρίσκεται σε περιστροφική κίνηση. Το κομμάτι πυριτίου δρα σαν πυρήνας κρυστάλλωσης και έτσι το πυρίτιο επικάθεται σε αυτό με αποτέλεσμα να μεγαλώσει και να σχηματισθεί σταδιακά ένας νέος μεγάλος κρύσταλλος πυριτίου με την συνεχή ανύψωση από το λιωμένο πυρίτιο. Αποτέλεσμα της μεθόδου είναι το πυρίτιο να αποκτήσει μια κυλινδρική μορφή με διάμετρο περίπου 10cm και μήκους 1m.

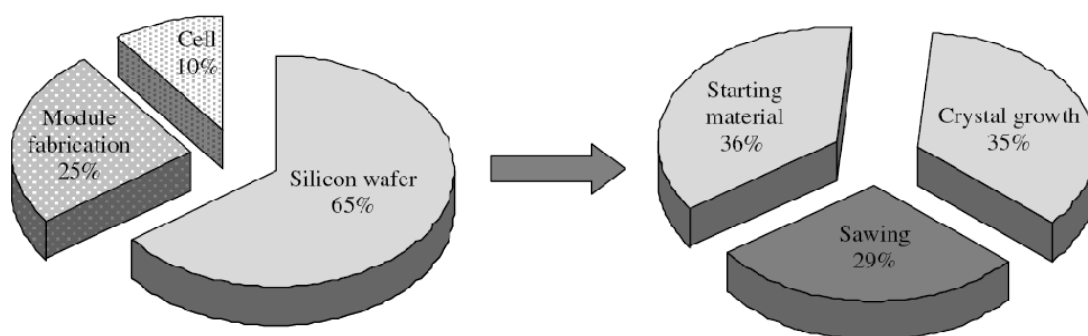
Εν συνεχεία ο κύλινδρος αυτός πρέπει να κοπεί σε πολύ λεπτούς δίσκους (κυλινδρικές πλάκες), πάχους που κυμαίνεται από 150μm μέχρι 500μm για τις

ηλιακές εφαρμογές. Η διαδικασία είναι εξαιρετικά δαπανηρή, καθώς το πυρίτιο είναι πολύ σκληρό υλικό και επιπλέον ένα ποσοστό χάνεται κατά την κοπή, που φτάνει μέχρι και το 50%. Μια μέθοδος κοπής που περιορίζει κάπως τις παραπάνω απώλειες φαίνεται στο Σχήμα 3.3 και στηρίζεται στη κοπή με πολύ λεπτή διαμαντένια ίνα. Οι δίσκοι έπειτα λειαίνονται για την απομάκρυνση των ελαττωμάτων της κοπής και διαμορφώνονται σε διόδους τύπου-p ή τύπου-n με επίταξη, διάχυση ή εμφύτευση προσμίξεων.

Το τελικό στάδιο είναι η συγκόλληση των ηλεκτροδίων στην εμπρός και πίσω όψη του δίσκου, η αλληλοσύνδεση των έτοιμων πια στοιχείων, η κάλυψη της εμπρός επιφανείας τους με ένα αντιανακλαστικό επίστρωμα για την μείωση της ανάκλασης του φωτός και η στεγανή συσκευασία σε πλαίσια.



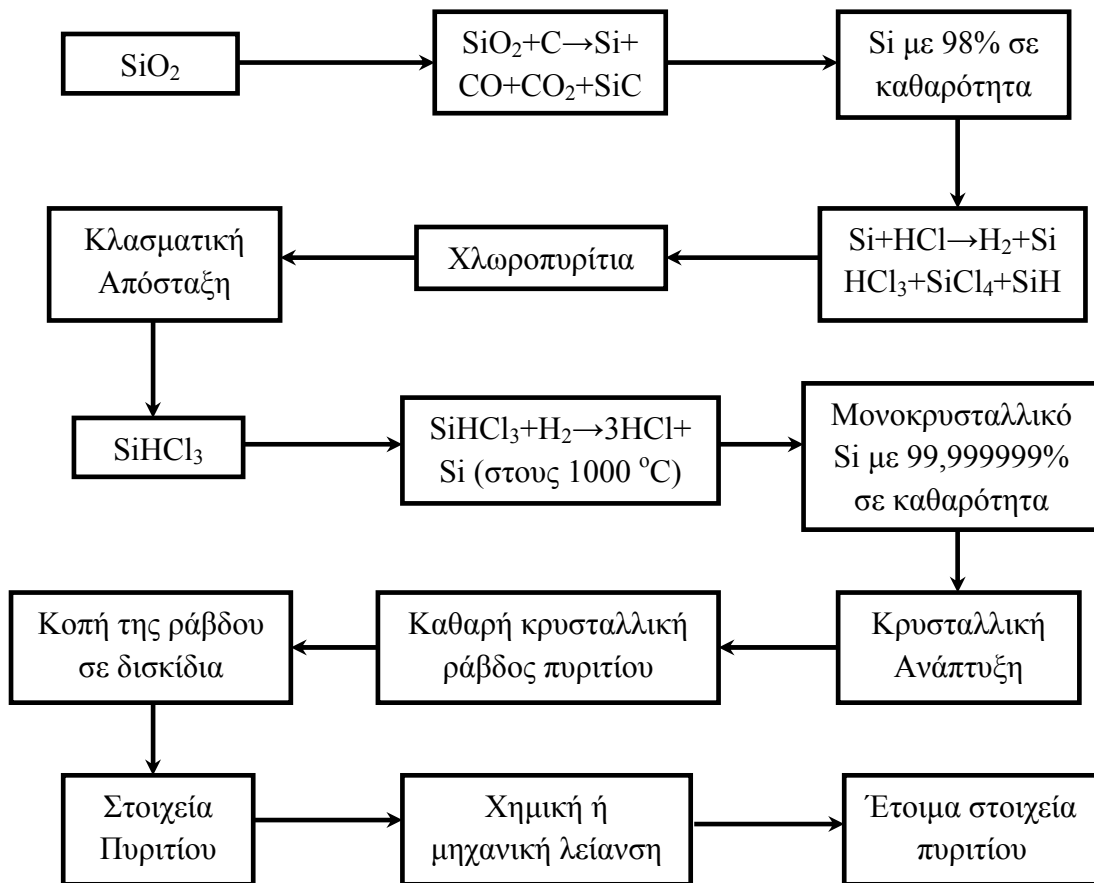
Σχήμα 3.3 Κοπή με τη μέθοδο των πολλαπλών συρμάτων[2].



Σχήμα 3.4 Καταμερισμός του κόστους παραγωγής ενός φ/β στοιχείου ανά διαδικασία. Δεξιά αναλύεται το κόστος δημιουργίας δισκιδίων πυριτίου[4].

Το κόστος ανά παραγωγική διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4, όπου φαίνεται ότι μεγάλο μέρος αποτελεί η παραγωγή καθαρού πυριτίου σε κρυσταλλική δομή (μέθοδος Czochranski) και η κοπή του σε λεπτά δισκίδια (πλάκες).

Συγκεντρωτικά η διαδικασία παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου φαίνεται στο δομικό διάγραμμα στο σχήματος 3.5.



Σχήμα 3.5 Δομικό διάγραμμα της διαδικασίας παρασκευής ενός στοιχείου μονοκρυσταλλικού πυριτίου[6].

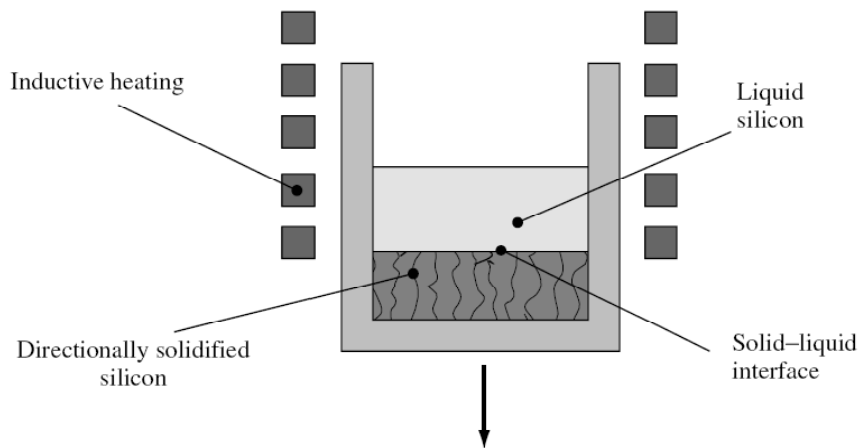
3.2.1.2 Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποτελείται από περιοχές μονοκρυσταλλικού πυριτίου, αλλά δεν έχει την ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από τα στοιχεία που αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Ο βαθμός απόδοσης για μια βαθμίδα εμπορίου κυμαίνεται μεταξύ 10 και 14 %.

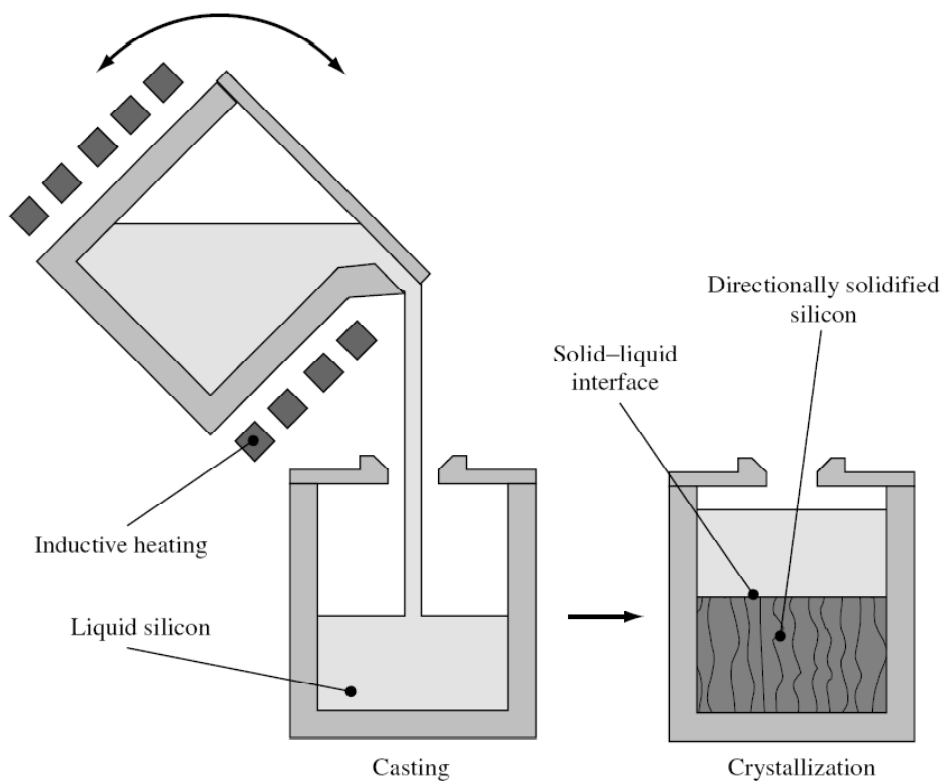
Παραγωγική Διαδικασία

Η παραγωγή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου διαφοροποιείται από την παραπάνω διαδικασία στο γεγονός ότι αντί της μεθόδου Czochranski για την επίτευξη «τέλειας» κρυσταλλικής δομής, το υψηλής καθαρότητας πυρίτιο, απλά τήκεται και τοποθετείται σε ένα δοχείο με τετραγωνική βάση, όπου και αφήνεται να στερεοποιηθεί (μέθοδος Bridgman) (Σχήμα 3.6). Εναλλακτικά χρησιμοποιείται η μέθοδος block casting, όπου το πυρίτιο τήκεται σε ένα δοχείο και έπειτα μεταφέρεται σε ένα δεύτερο όπου και στερεοποιείται (Σχήμα 3.7). Το στερεό πυρίτιο που δημιουργείται έχει πολυκρυσταλλική δομή. Ακολουθεί η κοπή με τον τρόπο που

αναφέρθηκε παραπάνω και η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον ίδιο τρόπο με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.



Σχήμα 3.6 Μέθοδος Bridgman για την παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου[4].



Σχήμα 3.7 Μέθοδος block casting[4].

Η διαδικασία παραγωγής πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι φθηνότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού. Επιπλέον οι τετραγωνικές πλάκες που προκύπτουν από την κοπή πλεονεκτούν στο γεγονός ότι μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή τετραγωνικών φ/β στοιχείων σε αντίθεση με τους δίσκους που είναι

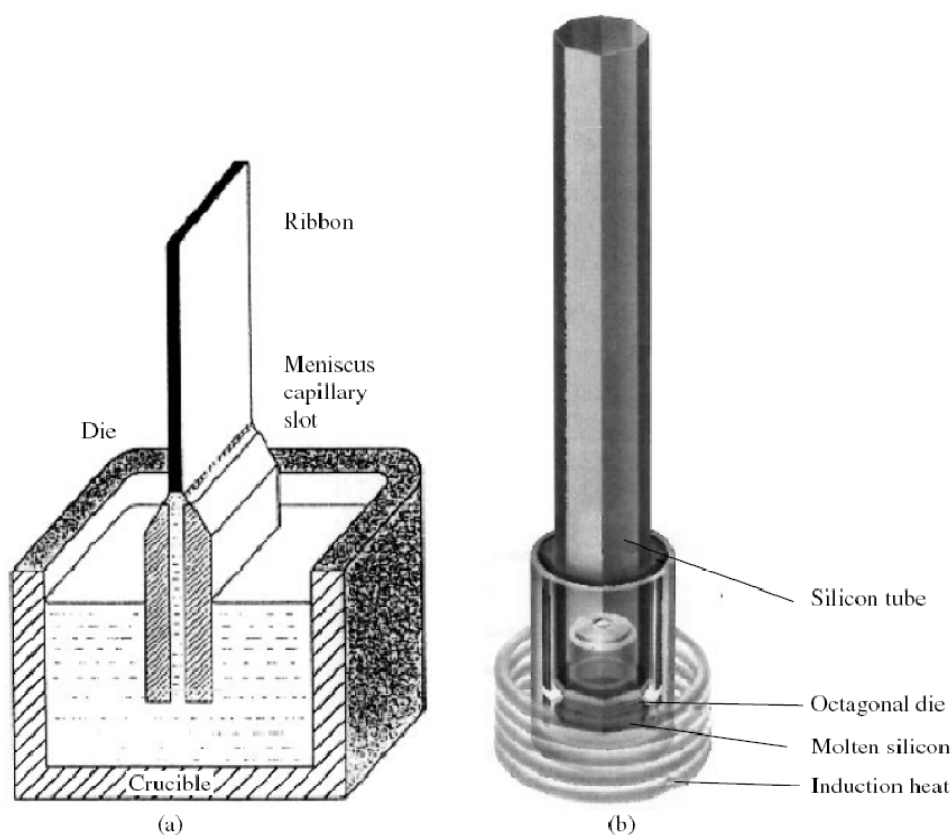
κυκλικό. Αυτό έχει σαν συνέπεια τον μεγαλύτερο δείκτη κάλυψης του φ/β πλαισίου. (βλέπε κεφάλαιο 3.4.4). Από τη άλλη εμφανίζουν μικρότερη απόδοση, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω.

3.2.1.3 Ribbon Πυρίτιο

Το πυρίτιο σε μορφή ταινίας μπορεί να παραχθεί με πολλές τεχνικές. Στόχος είναι η αποφυγή του κόστους που συνεπάγεται η διαδικασία κοπής, όπως περιγράφηκε παραπάνω, καθώς και η μείωση των απωλειών σε καθαρό πυρίτιο που συνεπάγεται. Από τις πολυάριθμες τεχνικές ουσιαστικά μόνο δύο κατέληξαν σε εμπορική χρησιμοποίηση.

α. Edge defined Film Fed Growth Process (EFG)

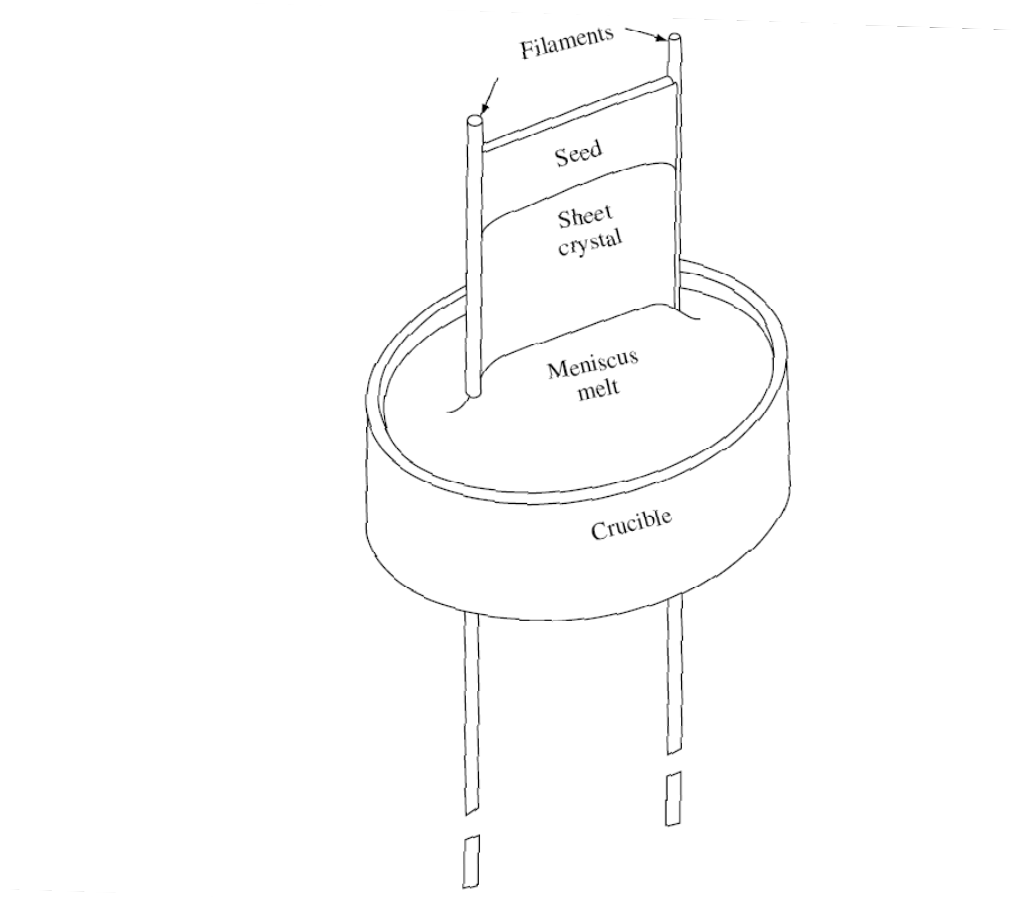
Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται το Ribbon πυρίτιο μέσα από το λιωμένο υλικό μέσω ενός καλουπιού, το σχήμα του οποίου καθορίζει και τη μορφή της ταινίας (Σχήμα 3.8). Τα παραγόμενα στοιχεία έχουν μικρότερη ποιότητα από τα μονοκρυσταλλικά και η επιφάνειά τους εμφανίζει ανωμαλίες. Παρόλα αυτά η απόδοσή τους φτάνει μέχρι το 14,8% για στοιχεία που έχουν φτιαχτεί σε γραμμή παραγωγής και για εμπορικούς σκοπούς.



Σχήμα 3.8 Edge defined Film Fed Growth Process (EFG), a) απλή διαμόρφωση σε δοχείο b) οκταγωνική διαμόρφωση[4].

β. String Ribbon Process (STR)

Σε αυτή την τεχνική το πυρίτιο εξάγεται κατευθείαν από το δοχείο με το λιωμένο πυρίτιο χωρίς καλούπι. Η διαδικασία είναι σχετικά απλή, καθώς χρησιμοποιούνται δύο λωρίδες που διαπερνούν το δοχείο στη βάση του και κινούνται με σταθερή ταχύτητα ανοδικά (Σχήμα 3.9). Στην αρχή της διαδικασίας χρειάζεται ένας "πυρήνας", έτσι ώστε να γίνει η αρχή της ταινίας πυριτίου. Το πάχος της ταινίας εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα με την οποία κινούνται οι δύο λωρίδες. Η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει μέχρι και το 14-15%.



Σχήμα 3.9 String Ribbon Process (STR)[4].

3.2.1.4 Κρυσταλλικό Πυρίτιο λεπτού φιλμ (c-SiTFC)

Η τεχνολογία λεπτού φιλμ έχει ως σκοπό την μείωση του κόστους, μέσω της μείωσης του απαιτούμενου υλικού για την παραγωγή των στοιχείων. Η εναπόθεση μπορεί να γίνει κατευθείαν σε γυαλί, κεραμικό ή οποιοδήποτε άλλο κατάλληλο υπόστρωμα. Εκτός από το μειωμένο κόστος πλεονεκτούν και στην ευκολία με την οποία μπορεί να γίνει σύνδεσή τους σε σειρά, φτιάχνοντας έτσι ολόκληρα πλαίσια κατά τη διαδικασία εναπόθεσης. Από την άλλη όμως η διαδικασία αυτή είναι απαιτητική καθώς μεγάλες περιοχές πρέπει να παραχθούν χωρίς ελαττώματα.

Παρόλο που το c-SiTFPC έχει πάχος μερικών μόνο μm (5 μέχρι 50 μm), έχει αποδειχθεί θεωρητικά, αλλά και στην πράξη ότι εμφανίζει αξιόλογη απόδοση. Το κλειδί στην τεχνολογία είναι ο έξυπνος οπτικός σχεδιασμός, με αποτέλεσμα το φως μέσω ανακλάσεων να διαγράφει τελικά διαδρομή 30 φορές ή και περισσότερο, μεγαλύτερη από το πάχος του φιλμ. Εκτός από το πλεονέκτημα της μειωμένης απαίτησης σε πυρίτιο, το c-SiTFPC δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις στο υλικό του υποστρώματος, το οποίο μπορεί να είναι χαμηλής ποιότητας πυρίτιο, γυαλί, κεραμικά ή γραφίτης. Υπάρχει εκτεταμένη έρευνα όσον αφορά το c-SiTFPC που έχει αναδείξει την υψηλή απόδοση που μπορεί να πετύχει (μέχρι 21% κάτω από ιδανικές συνθήκες). Παρόλο που έχει εμφανίσει σημαντική ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία λίγες εταιρίες το έχουν περάσει στη γραμμή παραγωγής ως εμπορικό προϊόν.

3.2.1.5 Άμορφο πυρίτιο (a-Si)

Το άμορφο πυρίτιο χρησιμοποιείται για την παραγωγή φ/β στοιχείων σύμφωνα με την τεχνολογία λεπτού φιλμ. Ως υλικό εμφανίζει μεγάλη αταξία στη δομή του, παρά ταύτα βρίσκει εφαρμογή στη φ/β τεχνολογία με τη μορφή κράματος με υδρογόνο. Η προσθήκη υδρογόνου βελτιώνει τις ηλεκτρικές ιδιότητές του και περιέχεται σε 10-40% ατομική αναλογία. Διαφέρει ουσιαστικά από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο καθώς εμφανίζει ενεργειακό διάκενο με μεταβλητή τιμή που κυμαίνεται μεταξύ 1,12eV και 1,7eV περίπου. Το κύριο πλεονέκτημα του είναι ότι έχει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και μάλιστα περίπου 40 φορές υψηλότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ως προς αυτή την ιδιότητά του το a-Si συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου, για αυτό μια λεπτή επίστρωση είναι αρκετή για την κατασκευή φ/β στοιχείων. Επιπλέον το άμορφο πυρίτιο μπορεί να εναποτεθεί σε ποικίλα, χαμηλού κόστους υποστρώματα, συμπεριλαμβανομένου του χάλυβα, του γυαλιού και του πλαστικού. Η κατασκευαστική διαδικασία απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες και επομένως λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι το συνολικό κόστος του υλικού και του κόστους κατασκευής είναι χαμηλότερο ανά μονάδα επιφάνειας, συγκρινόμενο με τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου.

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

3.2.2 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

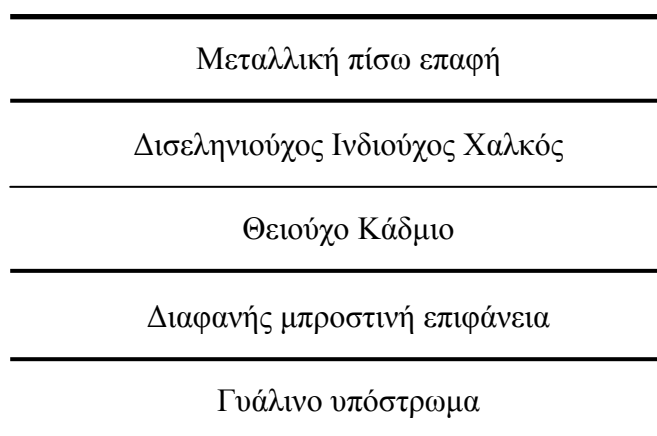
Το αρσενικούχο γάλλιο είναι ένας ημιαγωγός με ενεργειακό διάκενο 1,43 eV, τιμή η οποία είναι στη βέλτιστη περιοχή για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας με θεωρητική απόδοση περίπου 25-30%. Ένα ακόμη πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι το ενεργειακό διάκενο είναι άμεσο. Επομένως το GaAs

συνδυάζει καταρχήν ιδανικά τις προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθεί ως υλικό κατασκευής ηλιακών φ/β στοιχείων. Το μειονέκτημά του είναι το υψηλό κόστος παραγωγής, περίπου πενταπλάσιο από αυτό του κρυσταλλικού πυριτίου. Έχει εφαρμογή κυρίως σε ηλιακά στοιχεία συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, όπου το υψηλό κόστος του αντισταθμίζεται από την υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας. Επίσης το GaAs συναντάται συχνά σε διαστημικές εφαρμογές λόγω της υψηλής θερμικής αδράνειάς του και του υψηλού βαθμού απόδοσης. Συγκεκριμένα η απόδοση των στοιχείων GaAs πέφτει στο μισό, σε σύγκριση με την απόδοσή τους σε συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, όταν θερμανθούν στους 200 °C. Η αντίστοιχη μείωση στα στοιχεία πυριτίου παρατηρείται ήδη στους 120 °C.

3.2.3 Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe₂ ή CIS)

Το ημιαγώγιμο υλικό του δισεληνιούχου ινδιούχου χαλκού είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό, το οποίο μπορεί να είναι τύπου-n ή τύπου-p και έχει μια άμεση οπτική απορρόφηση με τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του CIS εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο χαλκού/ινδίου, ενώ ο καλός έλεγχος της στοιχειομετρίας του θεωρείται ουσιώδης για αποδοτικές διατάξεις.

Είναι δυνατόν να κατασκευασθούν ομοεπαφές τύπου p-n των CIS αλλά αυτές δεν θα είναι ούτε σταθερές ούτε αποδοτικές και οι καλύτερες διατάξεις μέχρι σήμερα είναι ετεροενώσεις με θειούχο κάδμιο (CdS). Το CdS μπορεί να αναπτυχθεί μόνο ως υλικό τύπου-n για αυτό και το CIS πρέπει να είναι τύπου-p. Το CIS έχει ενεργειακό διάκενο 1eV και παράγεται ως κιονοειδής πολυκρυσταλλική μεμβράνη, ενώ το CdS έχει ενεργειακό διάκενο 2,4eV και έτσι αυτό θα απορροφά έντονα όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία από το πράσινο μέχρι το μπλε άκρο φάσματος. Οι βέλτιστες διατάξεις χρησιμοποιούν ένα πολύ λεπτό στρώμα (0,03μm) του CdS με στρώμα παραθύρου ενός υλικού με μεγάλο ενεργειακό διάκενο και υψηλή αγωγιμότητα. Το οξειδίο του ψευδαργύρου έχει βρεθεί ότι είναι ένα κατάλληλο υλικό για το στρώμα του παραθύρου. Έτσι η δομή του ηλιακού στοιχείου CIS είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10 Δομή του ηλιακού στοιχείου CIS[2].

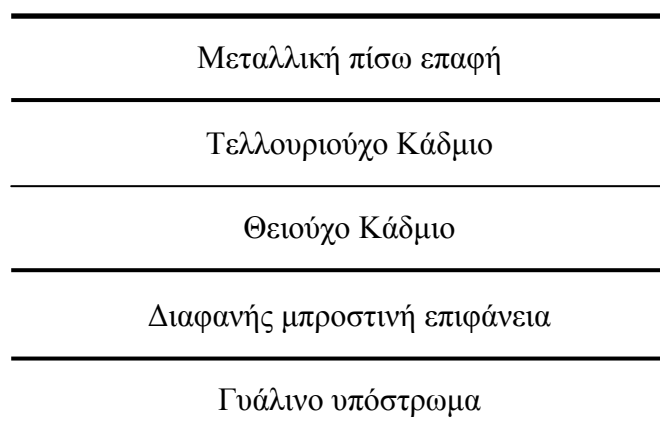
Μια σημαντική προσπάθεια έχει αφιερωθεί στην άνοδο της τεχνολογίας CIS κυρίως από τη SIEMENS. Έχουν φτιαχτεί στοιχεία CIS του εμπορίου, η απόδοση των οποίων πλησιάζει το 10%. Πλεονεκτούν σε σχέση με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, καθώς δεν εμφανίζουν βαθμιαία πτώση της απόδοσης για μια περίοδο μερικών ετών. Επίσης όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω προσφέρουν μεγάλη οικονομία σε ημιαγώγιμα υλικά. Από την άλλη όμως το CIS είναι ένα πολύπλοκο υλικό που δυσκολεύει την κατασκευή του. Τέλος πολύ σημαντική είναι η ασφάλεια του προσωπικού κατά τη διάρκεια της κατασκευής του, αφού η παραγωγή του περιλαμβάνει το σεληνιούχο υδρογόνο, ένα εξαιρετικά τοξικό αέριο.

3.2.4 Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το τελλουριούχο κάδμιο είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό που αποτελείται από κάδμιο και τελλούριο, το οποίο έχει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και το ενεργειακό του διάκενο είναι πολύ κοντά στο ιδανικό. Αρκεί ένα όγκος πάχους ενός μικρόμετρου για να απορροφηθεί το 90 % του ηλιακού φάσματος. Η δομή του ηλιακού στοιχείου είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.11.

Υπάρχουν μερικές χαμηλού κόστους τεχνικές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόθεση του CdTe και όλες αυτές, μπορούν, αφού υποστούν μια επεξεργασία μετά την απόθεση, να παράγουν υλικό υψηλής ποιότητας και αποδοτικά ηλιακά στοιχεία.

Η διαδικασία πλεγματικής εκτύπωσης των στοιχείων CdTe προσφέρει μια τεχνολογία με χαμηλό κόστος παραγωγής, αλλά από την άλλη και μια εντελώς χαμηλού ρυθμού παραγωγή. Το βήμα που περιορίζει το ρυθμό παραγωγής είναι η θερμοκρασιακή επεξεργασία της μελάνης εκτύπωσης μετά την απόθεση, η οποία απαιτεί σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (γύρω στους 500 °C) για περιόδους μιας ώρας ή και περισσότερο. Με αυτή την τεχνολογία έχουν παραχθεί βασικές μονάδες με απόδοση 6% και έχουν ελεγχθεί σε εξωτερικές συνθήκες. Η εμπορική τους όμως διαθεσιμότητα είναι περιορισμένη.

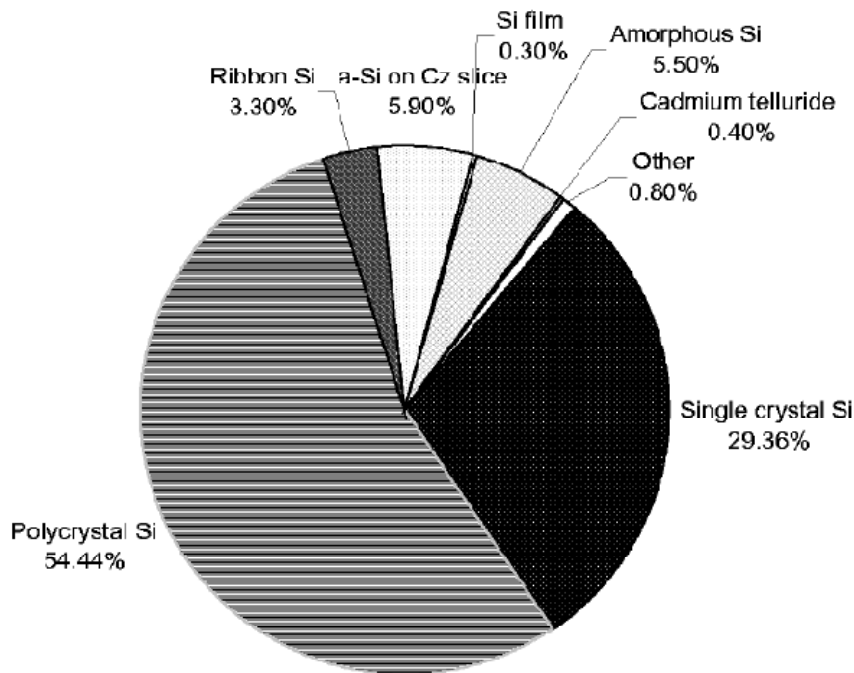


Σχήμα 3.11 Δομή του ηλιακού στοιχείου CdTe[2].

Μια ακόμα τεχνολογία είναι αυτή της ηλεκτροτυπίας. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για τα στοιχεία CdTe, λόγω της πολύ μικρή χρήσης του υλικού και του χαμηλού κόστους. Η BP Solar έχει παράγει βασικές μονάδες με αποδόσεις πάνω από 10% και στοιχεία με αποδόσεις γύρω στο 13%. Οι έλεγχοι σταθερότητας σε

εξωτερικές συνθήκες έχουν επιτευχθεί με ικανοποιητική επιτυχία. Από την άλλη όμως όπως και στο CIS, το κάδμιο είναι ένα τοξικό υλικό και θα πρέπει να λαμβάνονται αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγή του.

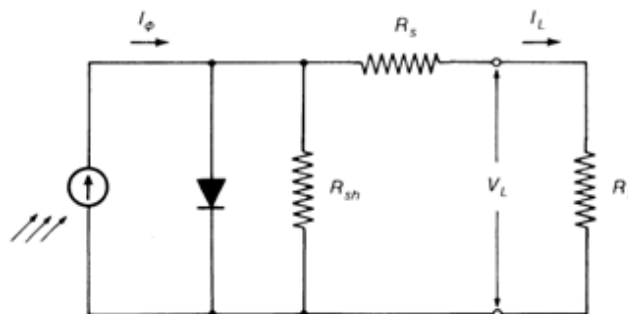
Το μερίδιο αγοράς όλων των παραπάνω υλικών κατασκευής φ/β στοιχείων για το έτος 2002 φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Είναι ξεκάθαρο ότι το πυρίτιο ως ημιαγώγιμο υλικό κατέχει την συντριπτική πλειοψηφία της αγοράς φ/β στοιχείων και συγκεκριμένα την πρωτιά κατέχει το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο που αποτελεί το 54% αυτής.



Σχήμα 3.12 Μερίδιο αγοράς των διαφόρων τεχνολογιών φ/β κυψελών για το 2002[13].

3.3 ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου φαίνεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φ/β στοιχείου. Περιλαμβάνονται η αντίσταση σειράς R_s και η παράλληλη αντίσταση R_{sh} .

Παρατηρούμε ότι το φ/β στοιχείο αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μια διόδο. Το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει ακόμα την αντίσταση σειράς R_s , η οποία εμποδίζει την κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} , η οποία εμφανίζεται λόγω διαρροών ρεύματος κάνοντας των αντίσταση διαμέσου της διόδου μη άπειρη.

Το παραγόμενο φωτόρευμα από το στοιχείο δίνεται από τη σχέση:

$$I_\phi = I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

όπου I_o το ανάστροφο ρεύμα κόρου,

V η τάση που δημιουργείται στα άκρα της διόδου,

γ ο συντελεστής ποιότητας της διόδου (μεταξύ 1 και 2),

k η σταθερά Boltzmann,

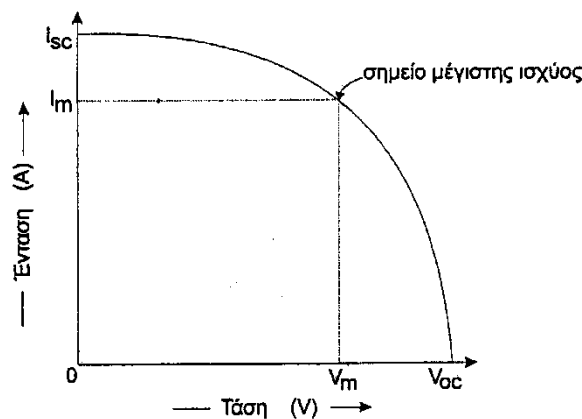
T η απόλυτη θερμοκρασία.

Ενώ με ανάλυση του ισοδυνάμου κυκλώματος, το ρεύμα που καταλήγει τελικά στο φορτίο υπολογίζεται:

$$I_L = \frac{I_\phi - I_o \left[\exp\left(\frac{e(V_L - I_L R_s)}{\gamma kT}\right) - 1 \right] - \frac{V_L}{R_{sh}}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (3.3)$$

όπου V_L η τάση εξόδου του φ/β στοιχείου.

Η χαρακτηριστική τάσης-έντασης (V-I) ενός φ/β στοιχείου έχει τη μορφή του Σχήματος 3.14.



Σχήμα 3.14 Χαρακτηριστική τάσης-έντασης φ/β στοιχείου.

Από την χαρακτηριστική φαίνεται ότι θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης του φορτίου για την οποία η ισχύς που παράγεται από το φ/β στοιχείο θα είναι μέγιστη και σε αυτό αντιστοιχούν οι μέγιστες τιμές τάσης V_m και έντασης I_m . Καταλαβαίνουμε επομένως ότι η ισχύς που παράγεται για κάθε ζεύγος τιμών τάσης-έντασης δεν είναι πάντα σταθερή αλλά μηδενίζεται όπως φαίνεται εύκολα στις ακραίες συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης-βραχυκύκλωσης και παρουσιάζει ένα μέγιστο για συγκεκριμένη τιμή τάσης-έντασης (Σχήμα 3.14). Επιθυμητό είναι λοιπόν σε κάθε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών οι συστοιχίες να λειτουργούν παράγοντας τις τιμές αυτές τάσης-έντασης που δίνουν κάθε στιγμή τη μέγιστη ισχύ. Όταν η φωτοβολταϊκή

γεννήτρια τροφοδοτεί απευθείας ένα συγκεκριμένο φορτίο κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό καθώς η τιμή του φορτίου έχει συγκεκριμένη αντίσταση. Όταν όμως μεταξύ γεννητριών και κατανάλωσης παρεμβάλλονται ηλεκτρονικά για τον έλεγχο της ισχύος, για την ρύθμιση φόρτισης συσσωρευτών, για την ανύψωση ή και την αλλαγή μορφής της παραγόμενης τάσης, τότε υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργούν αυτές σε ένα μέγιστο σημείο. Αυτό το αναλαμβάνουν ειδικοί ανιχνευτές της μέγιστης ισχύος ή maximum power point trackers (MPPT) (βλέπε κεφάλαιο 3.5.4).

3.3.1 Απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου

Ως απόδοση ενός φ/β στοιχείου η_c , ορίζεται το πηλίκο της μέγιστης ισχύος (P_{max}), που αποδίδει, προς το γινόμενο της προσπίπτουσας έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της επιφάνειας S_c του φ/β στοιχείου:

$$\eta_c = \frac{P_{max}}{G \cdot S_c} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{G \cdot S_c} \quad (3.4)$$

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος (P_{max}) προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης (I_{sc}) και της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης (V_{oc}) ενός φ/β στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (fill factor):

$$FF = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (3.5)$$

Επομένως η απόδοση του φ/β στοιχείου μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\eta_c = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{G \cdot S_c} \quad (3.6)$$

Ως μέγιστη ισχύ του φ/β στοιχείου θεωρούμε αυτήν που λαμβάνουμε όταν η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι 1000W/m^2 , υπό τις ακόλουθες συνθήκες:

- Θερμοκρασία φ/β στοιχείου $25\text{ }^\circ\text{C}$.
- Μάζα αέρα 1,5

Η τιμή αυτή της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ονομάζεται και ένταση ακτινοβολίας ενός ήλιου, δηλαδή:

$$1\text{SUN} = 1000\text{W/m}^2 = 1\text{kW/m}^2 \quad (3.7)$$

Αντίστοιχα η ισχύς που παράγεται από ένα φ/β πλαίσιο όταν δέχεται ακτινοβολία 1SUN με την ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνειά του ονομάζεται Watt αιχμής (W_p - peak Watt).

3.4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Το βασικό χαρακτηριστικό συστατικό κάθε φ/β εγκατάστασης είναι η φ/β γεννήτρια, που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα φ/β ηλιακά στοιχεία. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια «μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας» κατά αναλογία με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής από θερμοηλεκτρικά εργοστάσια.

Μια φ/β γεννήτρια αποτελείται από φ/β πλαίσια που ενώνονται και συγκροτούν συστοιχίες.

3.4.1 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module)

Η τάση και η ισχύς ενός φ/β στοιχείου είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Για αυτό το λόγο τα φ/β στοιχεία τοποθετούνται σε ένα ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο αυτό, τα στοιχεία συνδέονται σε σειρά, σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση επιθυμητής τάσης.

Τα πλαίσια είναι προκατασκευασμένα στο εργοστάσιο. Τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) ή από ενισχυμένο πλαστικό, που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου, ενώ η εμπρός όψη τους καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Το εμπρός και πίσω φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με τη βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Διαμορφώνεται έτσι το φ/β πλαίσιο (module), που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση φ/β γεννητριών.

Λόγω των απαιτούμενων υλικών και εργασιών για την κατασκευή του, το κόστος προκύπτει σημαντικά μεγαλύτερο από τα φ/β στοιχεία που περιέχουν.

Συνώνυμο σχεδόν με το φ/β πλαίσιο είναι το φ/β πανέλο (panel). Όπως και το πλαίσιο, έχει συναρμολογηθεί και προκατασκευαστεί στο εργοστάσιο και είναι έτοιμο για τοποθέτηση σε φ/β εγκατάσταση, αλλά με τη διαφορά ότι ένα πανέλο μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο) που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. Τα τελευταία χρόνια σχεδόν όλες οι εταιρίες που κατασκευάζουν φ/β στοιχεία, δεν διαχωρίζουν τα πλαίσια από τα πανέλα. Το προϊόν που παράγεται ονομάζεται φ/β πλαίσιο (module) και διατίθεται σε ποικιλία, όσον αφορά την ισχύ που παράγει, την τάση και τελικά τις διαστάσεις του. Για αυτό τον λόγο παρακάτω θα γίνεται αναφορά μόνο σε φ/β πλαίσια.

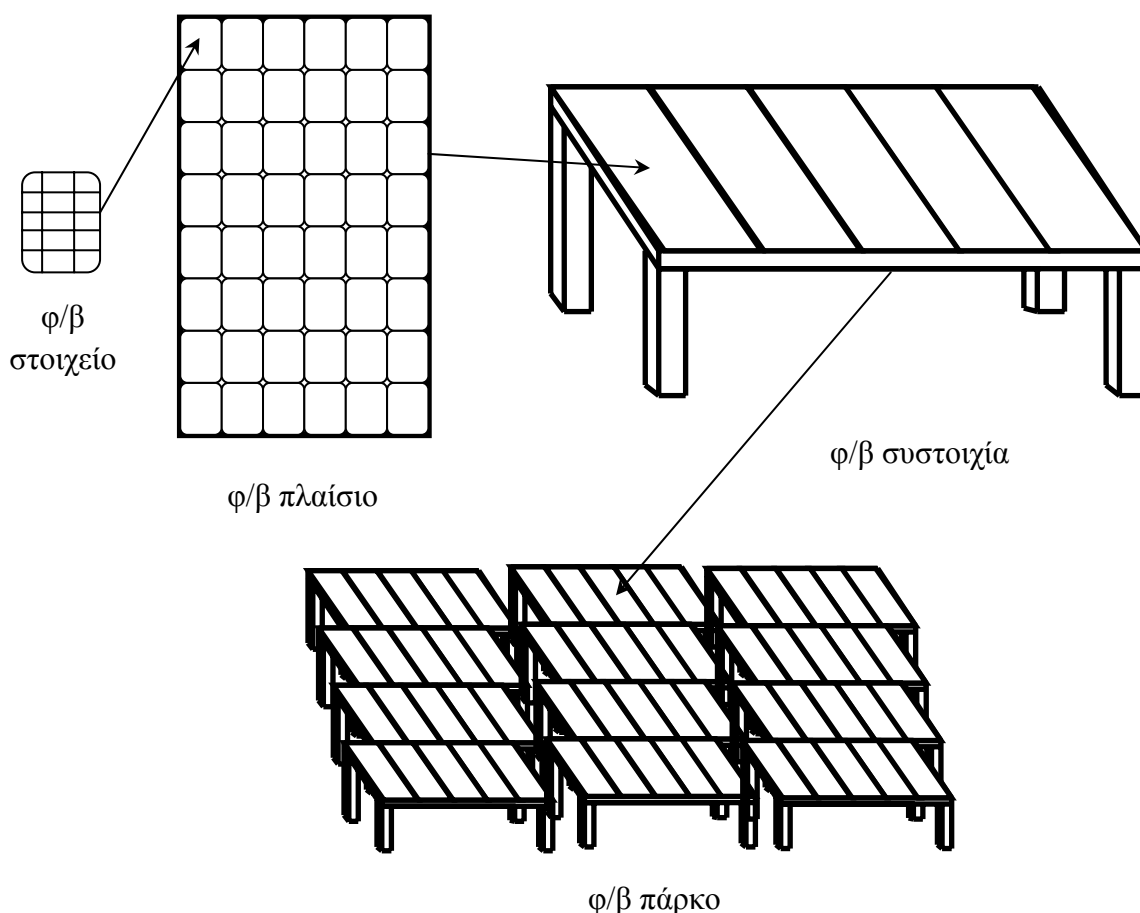
3.4.2 Φωτοβολταϊκή συστοιχία (string)

Σε μια φ/β εγκατάσταση που έχει σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή λειτουργεί ως σταθμός παραγωγής, μπορεί να χρησιμοποιηθούν εκατοντάδες ή και χιλιάδες φ/β πλαίσια. Όπως είναι αναμενόμενο τα φ/β πλαίσια πρέπει να ομαδοποιηθούν και να συνδεθούν κατάλληλα. Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός φ/β συστήματος είναι σκόπιμο οι συνδέσεις των φ/β στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και ανάμεσα στα πλαίσια να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες.

Με αυτόν τον τρόπο, αν ένα φ/β στοιχείο σκιαστεί ή αν πάθει βλάβη δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το σύστημα.

Έτσι τα φ/β πλαίσια ομαδοποιούνται σε φ/β συστοιχίες και τοποθετούνται σε κοινή βάση στήριξης, η οποία είναι συνήθως μεταλλική. Η σύνδεση των πλαισίων στη σειρά ή παράλληλα γίνεται έτσι ώστε να η τάση εξόδου της γεννήτριας να αποκτήσει την επιθυμητή τιμή.

Η σχέση του φ/β πλαισίου με την φ/β συστοιχία και την φ/β γεννήτρια φαίνεται στο σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15 Η σχέση ανάμεσα στο φ/β στοιχείο, το φ/β πλαίσιο, τη φ/β συστοιχία και το φ/β πάρκο.

Σταθερές συστοιχίες

Ο απλούστερος τύπος μιας φ/β συστοιχίας είναι ο σταθερός (fixed), ο οποίος έχει το πλεονέκτημα των ακίνητων τμημάτων και το μειονέκτημα ότι δεν εκμεταλλεύεται με τον μέγιστο βαθμό την ηλιακή ακτινοβολία. Τα πλαίσια τοποθετούνται με νότιο προσανατολισμό (για το Βόρειο ημισφαίριο) και έχουν μια κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο κατάλληλη ώστε να μεγιστοποιείται η πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας, ανάλογα με το χρονικό διάστημα που είναι επιθυμητό (βλέπε κεφάλαιο 1). Το ελαφρό τους βάρος και η απλότητά τους, τις καθιστά χρήσιμες για μια

πληθώρα εφαρμογών. Ωστόσο, αν δεν είναι αρκετή η ενέργεια που παράγεται και δεν υπάρχει επιπλέον διαθέσιμος χώρος, αναγκαστικά πρέπει να καταφύγει κάποιος σε μια εκ των επομένων εναλλακτικών.

Στρεφόμενες συστοιχίες

Για να βελτιωθεί η απόδοση συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστοιχίες με κινητά πλαίσια, τα οποία θα παρακολουθούν την κίνηση του ηλίου. Για να μεγιστοποιηθεί η προσλαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία απαιτείται η κίνηση των συστοιχιών τόσο στον οριζόντιο άξονα (άξονας ανύψωσης) όσο και στον πολικό άξονα (αζιμούθιος άξονας). Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν κινούνται σε έναν άξονα ή δύο άξονες.

α. Στρεφόμενες συστοιχίες ενός άξονα

Στις στρεφόμενες συστοιχίες ενός άξονα ως άξονας κίνησής τους μπορεί να επιλεγεί είτε ο οριζόντιος είτε ο πολικός. Ο πολικός άξονας πλεονεκτεί όσον αφορά την συγκομιδή ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας έναντι του οριζόντιου άξονα κάνει όμως την εγκατάσταση πιο περίπλοκη μηχανικά.

β. Περιτροφικές συστοιχίες δύο αξόνων

Αποτελούν την πλειοψηφία των στρεφόμενων συστοιχιών και επιτυγχάνουν την μέγιστη δυνατή συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας. Η καθοδήγηση των μηχανισμών γίνεται με την βοήθεια θερμοϋδραυλικών διατάξεων, μικροϋπολογιστών για την πρόβλεψη της θέσης του ήλιου και ηλιακών αισθητήρων, όπως φωτοαντιστάσεις και φωτοτρανζίστορ.

Συστοιχίες με ανακλαστήρες/κάτοπτρα

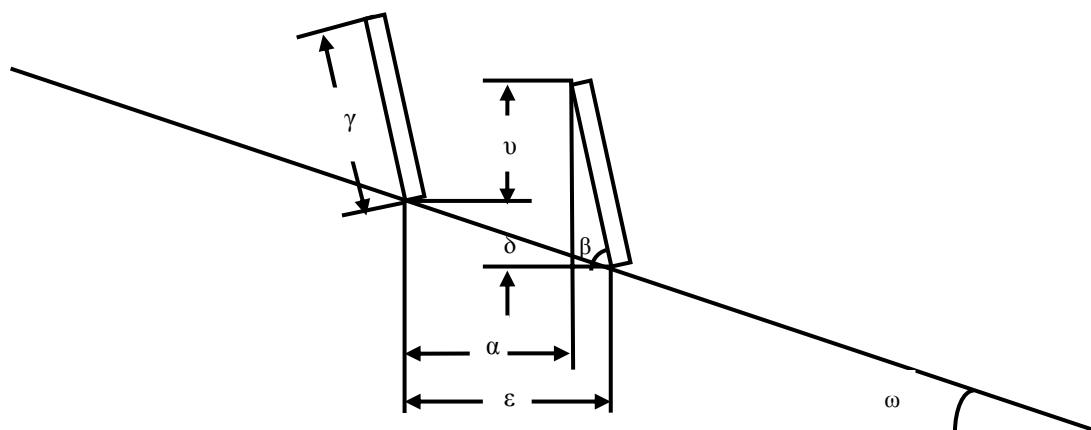
Ένας άλλος σχεδιασμός που βοηθά στην αύξηση της απόδοσης ενός φ/β συστήματος επιτυγχάνεται με την χρήση ανακλαστήρων/κατόπτρων. Κατασκευάζονται σε διάφορες μορφές (κοίλα, παραβολικά, ελλειπτικά, τριγωνικά, κωνικά, κ.α.) και σκοπός τους είναι να ενισχύουν και να εστιάζουν το ποσό του ηλιακού φωτός προς τα φ/β στοιχεία (βλέπε κεφάλαιο 3.5)

Στρεφόμενες συστοιχίες με κάτοπτρα

Τέλος μπορεί να χρησιμοποιηθούν στρεφόμενες συστοιχίες ταυτόχρονα με κάτοπτρα για ακόμη μεγαλύτερη πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας. Η παρακολούθηση του ήλιου επιτυγχάνεται είτε περιστρέφοντας την συστοιχία προς την κατεύθυνση των ηλιακών ακτίνων, είτε ανακλώντας τις ακτίνες με την χρήση περιστροφικών κατόπτρων προς το φ/β πλαίσιο. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν κινητά μέλη, ωστόσο το πλεονέκτημα της χρήσης κινητών κατόπτρων, αντί των κινητών συστοιχιών, είναι ότι η καταπόνηση, την οποία δέχεται η συστοιχία αποφεύγεται. Επιπλέον οι ανακλαστήρες θα πρέπει να περιστρέφονται κατά το ήμισυ

από ότι οι συστοιχίες, αφού το φαινόμενο της ανάκλασης διπλασιάζει την κίνηση του κατόπτρου (βλέπε κεφάλαιο 3.5).

3.4.3 Βέλτιστη διάταξη σταθερών συστοιχιών



Σχήμα 3.16 Διάταξη φ/β συστοιχιών σε πλαγία κλίσης $\kappa = \tan \omega$, με απόλυτα νότιο προσανατολισμό.

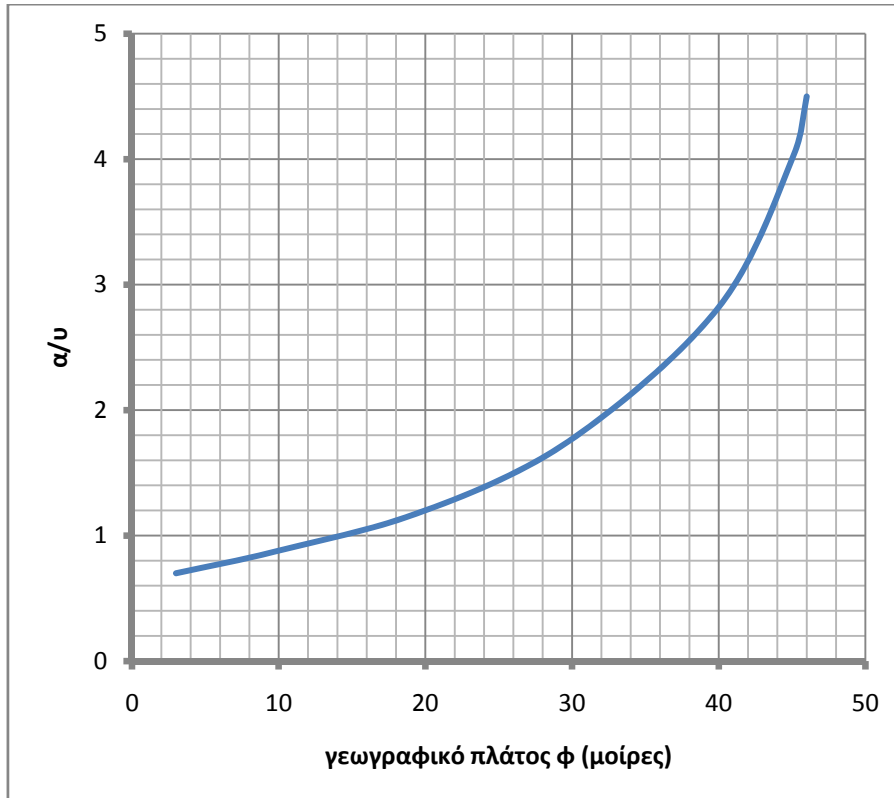
Καταρχήν είναι πολύ σημαντικό σε μια φ/β εγκατάσταση, οι φ/β συστοιχίες να μην σκιάζονται από παρακείμενα εμπόδια (δέντρα, κτίρια, βουνά κλπ.). Σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος ϕ , η προϋπόθεση ανοιχτού ορίζοντα θεωρείται ότι εξασφαλίζεται όταν η γωνία του ύψους (β_e) των γειτονικών συστοιχιών, δέντρων, κτιρίων ή άλλων εμποδίων ικανοποιεί μέσα σε μία αζιμούθιο γωνία από -60° μέχρι 60° προς τον Νότο, τη σχέση:

$$\beta_e \leq 48^\circ - \phi \quad (3.8)$$

Στο σχήμα 3.16 φαίνεται η διάταξη των φ/β συστοιχιών σε μία πλαγία κλίσης κ , με απόλυτα νότιο προσανατολισμό. Για να υπολογιστεί η ελάχιστη απόσταση ϵ , μεταξύ δύο συστοιχιών που θα εξασφαλίζει ότι δεν σκιάζει αισθητά η μία συστοιχία την επόμενη, χρησιμοποιείται το διάγραμμα του σχήματος 3.17. Το διάγραμμα προέρχεται από την εταιρία Monegon και είναι εμπειρικό. Συνδέει τον λόγο της ελεύθερης απόστασης α προς το ύψος των συστοιχιών u , με το γεωγραφικό πλάτος ϕ του τόπου (Σχήμα 3.17).

Για τιμές του γεωγραφικού πλάτος από 25° μέχρι 45° η καμπύλη προσεγγίζεται ικανοποιητικά από την μαθηματική σχέση:

$$\frac{\alpha}{u} = 0,0042\phi^2 - 0,1661\phi + 2,8653 \quad (3.9)$$



Σχήμα 3.17 Η καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης a ανάμεσα στις γειτονικές συστοιχίες, προς την επικάλυψη του ύψους $υ$, σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος ϕ , ώστε να μην εμποδίζεται ουσιαστικά η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το διάγραμμα είναι της εταιρίας Monegon (1980)

Για να βρεθεί το ζητούμενο, που είναι ο υπολογισμός της απόστασης ε , πρέπει να λυθεί το παρακάτω σύστημα εξισώσεων, το οποίο περιέχει διάφορες γεωμετρικές σχέσεις που προκύπτουν από το σχήμα 3.16 και τη τιμή από το διάγραμμα Monegon:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu = \gamma \sin \beta - \delta \\ \frac{a}{u} = \text{σταθερά διαγράμματος Monegon} \\ \varepsilon = \alpha + \gamma \cos \beta \\ \kappa = \tan \omega = \frac{\delta}{\varepsilon} \end{array} \right. \quad (3.10)$$

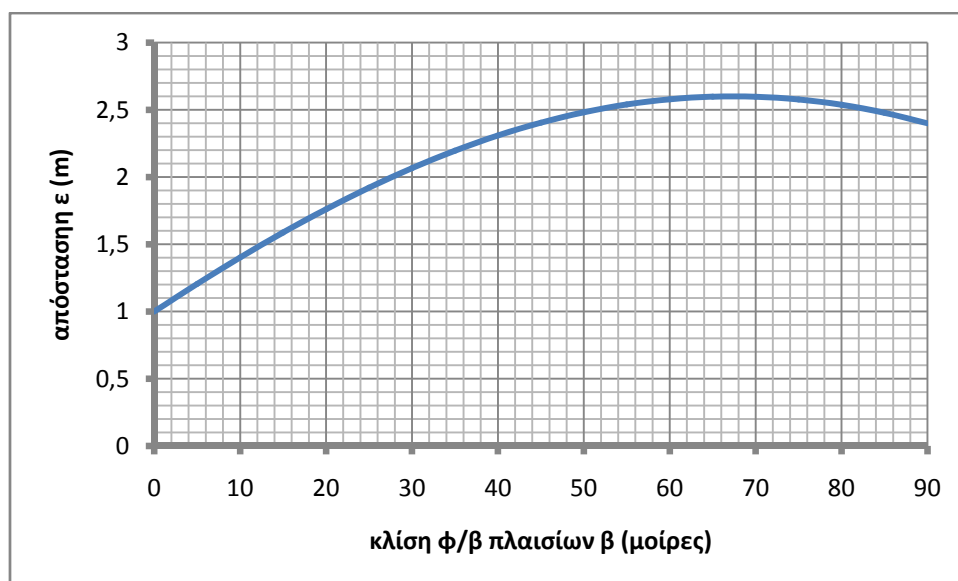
Πρέπει να τονιστεί ότι η κλίση κ μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές, όταν έχουμε υπερύψωση της νότιας πλευράς, που συνεπάγεται και αρνητικές τιμές της παραμέτρου δ .

Επιλύοντας το παραπάνω σύστημα καταλήγουμε στη σχέση:

$$\varepsilon = \gamma \cdot \frac{\frac{\alpha}{\nu} \cdot \sin \beta + \cos \beta}{1 + \frac{\alpha}{\nu} \cdot \kappa} \quad (3.11)$$

Παρατηρείται ότι η απόσταση ε μεταξύ των συστοιχιών είναι ανάλογη με το ύψος γ της συστοιχίας.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή της απόστασης ε σε σχέση με την κλίση της συστοιχίας.



Σχήμα 3.18 Καμπύλη απόστασης ε σε σχέση με την κλίση των συστοιχιών, για συστοιχίες με ύψος 1m και μηδενική κλίση εδάφους.

Παρατηρείται ότι η απόσταση ε αυξάνεται ταυτόχρονα με την αύξηση της κλίσης μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή της που είναι περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερη από το ύψος των συστοιχιών και εμφανίζεται στις 70° περίπου.

3.4.4 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φ/β πλαισίου, ορίζεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν του φ/β στοιχείου. Εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φ/β πλαίσιο, προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια. Επειδή όμως η επιφάνεια ενός φ/β πλαισίου δεν είναι καλυμμένη εξολοκλήρου από φ/β στοιχεία η απόδοση διαφέρει από την απόδοση των στοιχείων που αποτελείται. Ορίζεται ο **συντελεστής κάλυψης** (σ_k) ενός φ/β πλαισίου ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του φ/β πλαισίου. Στις παρακάτω σχέσεις οι δείκτες που χρησιμοποιούνται παραπέμπουν στο αν το μέγεθος αφορά το πλαίσιο (m→module) ή το στοιχείο (c→cell).

Ο συντελεστής απόδοσης ενός πλαισίου δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_m = \frac{P_{\max}}{G \cdot S_m} = \frac{I_{\max} \cdot V_{\max}}{G \cdot S_m} \quad (3.12)$$

Την ίδια τιμή θα είχε και ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ενέργειας E_{\max} που παράγει το φ/β πλαίσιο επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται επί το ίδιο χρονικό διάστημα:

$$\eta_m = \frac{E_{\max}}{H \cdot S_m} \quad (3.13)$$

Τέλος εναλλακτικά θα μπορούσε κάποιος να υπολογίσει τον συντελεστή απόδοσης κατά προσέγγιση από την σχέση:

$$\eta_m = \frac{P_{\max} \cdot \sigma_{\kappa}}{G \cdot S_c \cdot N_c} \quad (3.14)$$

Όπου N_c ο συνολικός αριθμός των φ/β στοιχείων που περιέχονται στο πλαίσιο. Η σχέση 3.14 δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα, καθώς σε ένα φ/β πλαίσιο υπάρχουν και άλλες απώλειες, εκτός του συντελεστή κάλυψης

3.4.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στη απόδοση

Ένας σημαντικός παράγοντας, ο οποίος μπορεί να μεταβάλλει αξιοσημείωτα την απόδοση ενός φ/β πλαισίου είναι η θερμοκρασία των φ/β στοιχείων του.

Έχει μετρηθεί ότι κυρίως λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα φ/β στοιχεία αποκτούν κατά την λειτουργία τους θερμοκρασία αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Αν T_c είναι η θερμοκρασία του στοιχείου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι εξαρτάται αυτή γραμμικά από την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a και την ηλιακή ακτινοβολία G , ως εξής:

$$T_c = T_a + h_w \cdot G \quad (3.15)$$

Όπου h_w είναι ένας χαρακτηριστικός συντελεστής των φ/β πλαισίων, με τιμή συνήθως:

$$h_w = 0,03m^2 \cdot ^\circ C / W \quad (3.16)$$

Αυτό συνεπάγεται ότι ένα φ/β πλαίσιο που δέχεται ηλιακή ακτινοβολία $1kW/m^2$, θα έχει θερμοκρασία κατά $30^\circ C$ μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία ακόμα επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου και γίνεται καλύτερη απαγωγή θερμότητας όσο η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη. Ως γενικός κανόνας στους υπολογισμούς φ/β εγκαταστάσεων, που επαληθεύεται και από μετρήσεις σε πραγματικές εγκαταστάσεις, λαμβάνεται συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας του φ/β πλαισίου κατά $30^\circ C$ από αυτή του περιβάλλοντος.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός φ/β πλαισίου δίνονται συνήθως σε στάνταρ συνθήκες (STC : Standard Test Conditions, δηλαδή θερμοκρασία $25^\circ C$, AM=1,5 και ηλιακή ακτινοβολία $1kW/m^2$) (βλέπε Παράρτημα Β). Αν υποθέσουμε ότι $\eta_{m,STC}$ είναι η απόδοση του φ/β πλαισίου σε STC, τότε για να υπολογιστεί η απόδοση σε οποιαδήποτε άλλη θερμοκρασία χρειάζεται ένας **διορθωτικός θερμοκρασιακός συντελεστής** (σ_θ), ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_\theta = 1 - (T_c - 25) \cdot 0,005 \quad (3.17)$$

Η σχέση αυτή ισχύει για τα συμβατικά στοιχεία πυριτίου και υποδηλώνει μείωση της απόδοσης κατά 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από τη

θερμοκρασία των 25°C. Τελικά η απόδοση ενός φ/β πλαισίου σε οποιαδήποτε θερμοκρασία προκύπτει:

$$\eta_m = \sigma_\theta \cdot \eta_{m,25^\circ C} \quad (3.18)$$

3.4.6 Επίδραση της ρύπανσης στην απόδοση

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των φ/β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειάς τους από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού κ.α. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στην γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φ/β πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή εύκολα να τη ξεπλύνει.

Επομένως είναι σημαντικό όταν η φ/β γεννήτρια πρόκειται να εγκατασταθεί σε μια περιοχή, που εκτιμάται ότι η ρύπανσή της θα είναι σημαντική να προβλεφθεί στους υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρησιμοποίηση ενός **αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας** (σ_p). Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο φ/β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που παράγει όταν η επιφάνειά του είναι τελείως καθαρή. Η τιμή του σ_p είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του φ/β πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κλπ. Τελικά η απόδοση ενός φ/β πλαισίου, λαμβάνοντας υπόψη την ρύπανση της επιφάνειάς του, προκύπτει:

$$\eta_m = \sigma_p \cdot \eta_{m,\kappa} \quad (3.19)$$

όπου $\eta_{m,\kappa}$ η απόδοσή του, όταν είναι καθαρό.

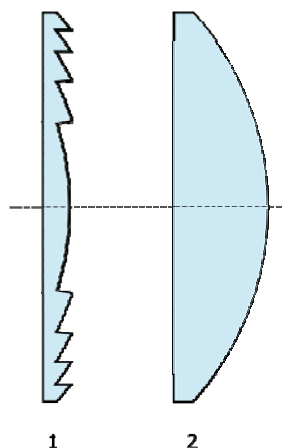
3.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΕΣ

Οι φωτοβολταϊκοί συγκεντρωτές χρησιμοποιούν φακούς ή κάτοπτρα για να συγκεντρώσουν μεγαλύτερη ποσότητα ακτινοβολίας στο ίδιο εμβαδό ενός φ/β πλαισίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας για την παραγωγή ενός δεδομένου ποσού ενέργειας. Στόχος των συγκεντρωτών είναι να μειωθεί το κόστος των φ/β εγκαταστάσεων με την μείωση των απαιτούμενων φ/β πλαισίων.

3.5.1 Τύποι οπτικών μέσων

Οι συγκεντρωτές μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τα οπτικά μέσα που χρησιμοποιούν για να συγκεντρώσουν την ακτινοβολία, των αριθμών των αξόνων περί του οποίους κινούνται για να παρακολουθούν τον ήλιο, τους μηχανισμούς για αυτή τη κίνηση κ.α..

Οι περισσότεροι συγκεντρωτές χρησιμοποιούν είτε διαθλαστικούς φακούς ή ανακλαστικά παραβολικά κάτοπτρα. Φακοί με μέγεθος διαμέτρου μεγαλύτερο από 5cm είναι πρακτικά οικονομικά ασύμφοροι, για αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται φακοί Fresnel. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τη δημιουργία φακών με μεγάλο άνοιγμα και μικρή εστιακή απόσταση, αποφεύγοντας έτσι το μεγάλο βάρος και τον όγκο των συμβατικών οπτικών φακών. Ένας φακός Fresnel έχει τη μορφή ενός επιπεδόκυρτου φακού ο οποίος έχει εκλεπτυνθεί σε αρκετά σημεία (Σχήμα 3.19). Οι έδρες που δημιουργούνται μπορούν να είναι επίπεδες, εάν είναι πολυάριθμες και αρκετά μικρές ή να έχουν την ίδια μορφή με τον κυρτό φακό.

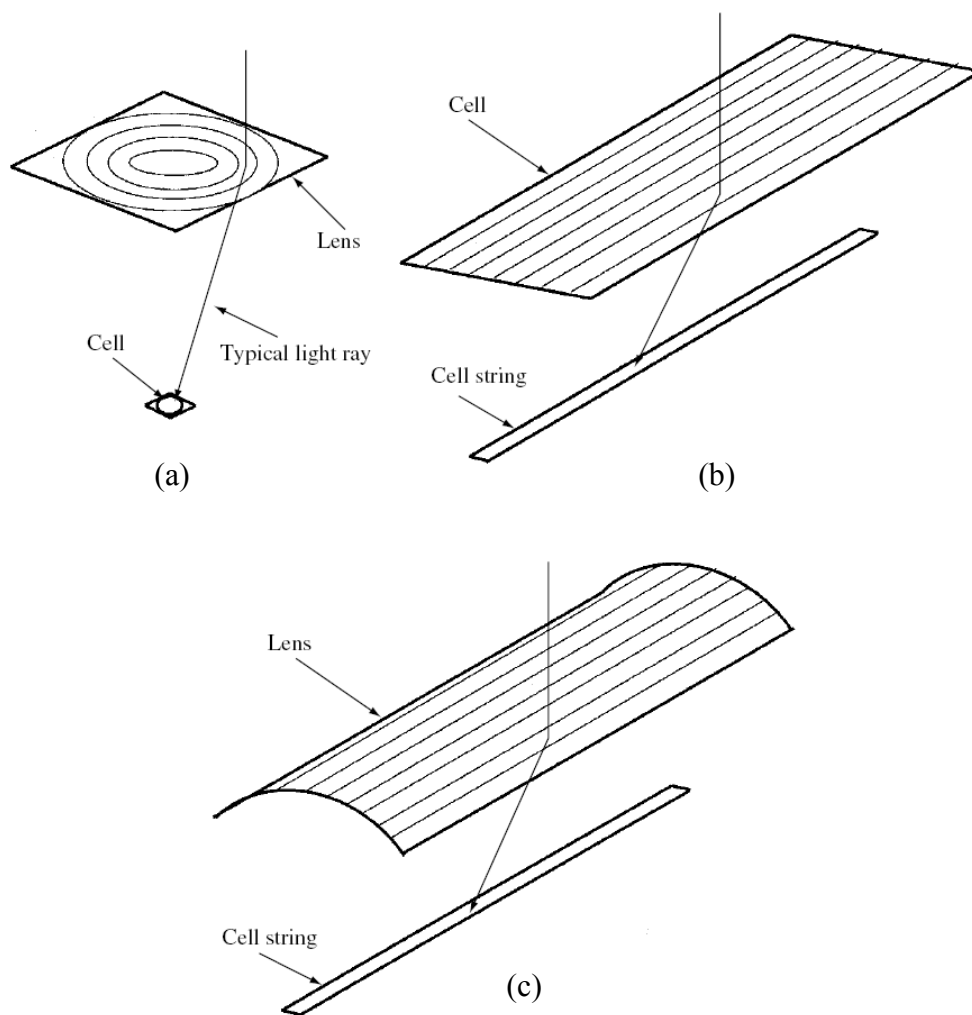


Σχήμα 3.19 1) Κάθετη τομή ενός φακού Fresnel, 2) Κάθετη τομή ενός συμβατικού επιπεδόκυρτου φακού.

Οι φακοί Fresnel μπορεί να είναι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να έχουν είτε σημειακή εστίαση (η ακτινοβολία συγκεντρώνεται στην κεντρική εστία του φακού), όπου στη περίπτωση αυτή εμφανίζουν κυκλική συμμετρία περί των άξονά τους, ή να έχουν γραμμική εστίαση, όπου στη περίπτωση αυτή οι ακτίνες συναντώνται σε έναν εγκάρσιο άξονα. Οι φακοί με σημειακή εστίαση συνήθως στέλνουν τις ακτίνες σε μια φ/β κυψέλη, αντίθετα οι γραμμικής εστίασης χρησιμοποιούν μια σειρά από φ/β κυψέλες. Ένας ιδιαίτερα επιτυχημένος φακός με γραμμική εστίαση είναι ο θολωτός φακός Fresnel (Σχήμα 3.20).

Το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένος ένας φακός Fresnel είναι συνήθως ακρυλικό πλαστικό, με εμπορική ονομασία Plexiglas (πολυμερές μεθακρυλικού μεθυλεστέρα, PMMA), το οποίο εκτός από την αντοχή του στις καιρικές συνθήκες, μπορεί εύκολα να αποκτήσει την επιθυμητή φόρμα μέσα σε κατάλληλα καλούπια. Παρόλα τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν κάποια ερωτήματα όσον αφορά την μακροχρόνια αντοχή του.

Μια εναλλακτική των διαθλαστικών φακών αποτελούν οι ανακλαστικοί φακοί ή καθρέφτες. Σε ένα παραβολικό ανακλαστήρα, αν η γωνία πρόσπτωσης στην εσωτερική επιφάνειά του είναι ίση με την γωνία ανάκλασης, τότε συγκεντρώνονται όλες τις ακτίνες που είναι παράλληλες με τον άξονα της παραβολής σε ένα σημείο, στην εστία της παραβολής. Όπως και οι φακοί έτσι και τα κάτοπτρα μπορούν είναι σημειακής εστίασης ή γραμμικής εστίασης (Σχήμα 3.21).



Σχήμα 3.20 Φακοί Fresnel. (a) Φακός Fresnel σημειακής εστίασης, όπου φαίνεται μια ακτίνα να προσπίπτει στην κυκλική επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη, (b) Φακός Fresnel γραμμικής εστίασης, (c) Θολωτός φακός Fresnel με γραμμική εστίαση[4].

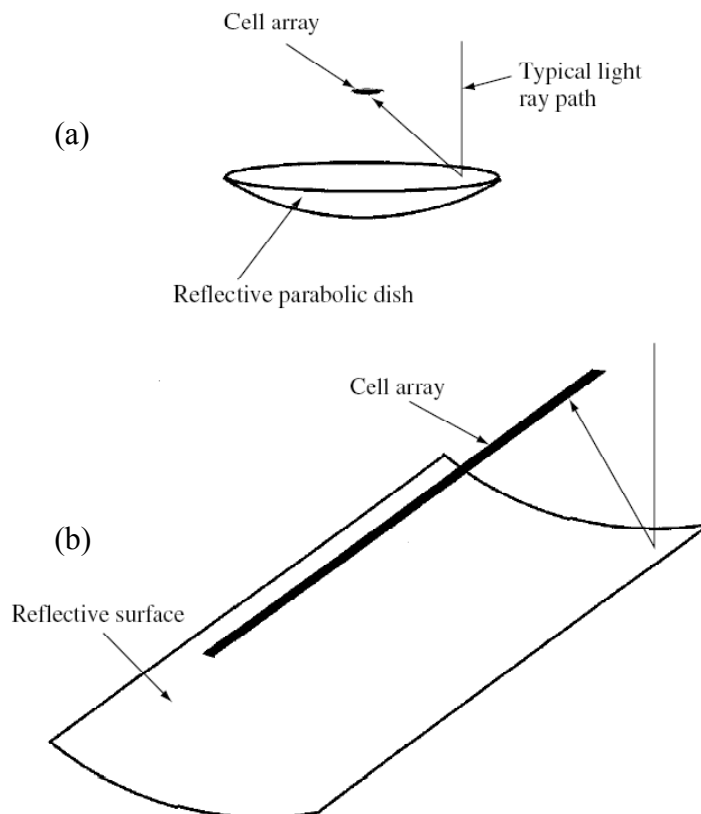
3.5.2 Συντελεστής συγκέντρωσης

Χρησιμοποιούνται διάφοροι ορισμοί του συντελεστή συγκέντρωσης. Ο γεωμετρικός **συντελεστής συγκέντρωσης** ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας του φακού προς την ενεργό επιφάνεια της φ/β κυψέλης, της επιφάνειας δηλαδή της κυψέλης που ακτινοβολείται.

Ένας άλλος τρόπος για να μετρηθεί η συγκεντρωτική ικανότητα ενός φακού είναι ο **συντελεστής έντασης συγκέντρωσης**, ο οποίος μετράται σε ήλιους (Suns). Ορίζεται ως ο λόγος της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που συγκεντρώνεται στην επιφάνεια της κυψέλης, προς την ένταση ενός ήλιου, δηλαδή 1kW/m^2 .

Είναι φανερό ότι στη ιδανική περίπτωση που ο φακός έχει 100% βαθμό απόδοσης και η άμεση ηλιακή ακτινοβολία έχει την τιμή του 1Sun, τότε οι τιμές των

δύο παραπάνω συντελεστών συμπίπτουν. Εν γένει, όμως επειδή η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι σχεδόν πάντα μικρότερη από 1kW/m^2 και ο βαθμός απόδοσης σαφώς μικρότερος από 100%, ο γεωμετρικός συντελεστής συγκέντρωσης, προκύπτει μεγαλύτερος από τον συντελεστή της έντασης συγκέντρωσης.



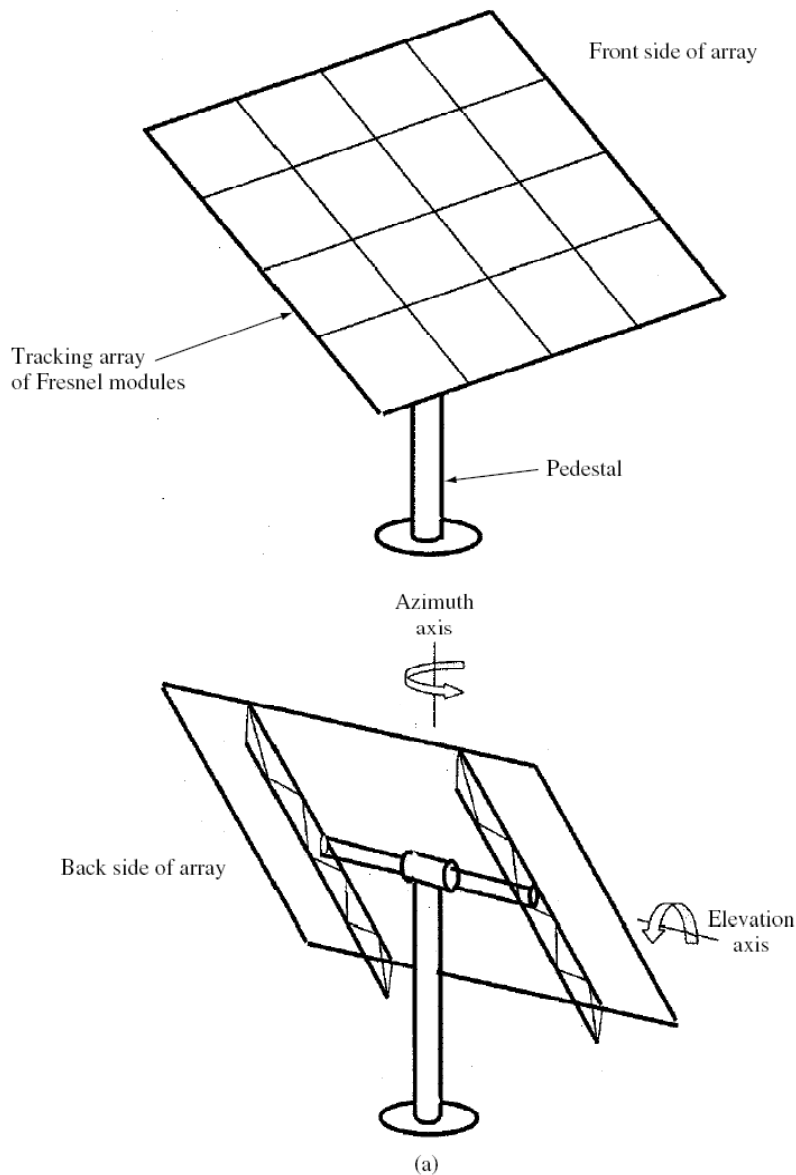
Σχήμα 3.21 Ανακλαστικοί συγκεντρωτές. (α) Ανακλαστικό παραβολοειδές, όπου εστιάζει σε μια κυψέλη, (β) Παραβολικό κάτοπτρο γραμμικής εστίασης[4].

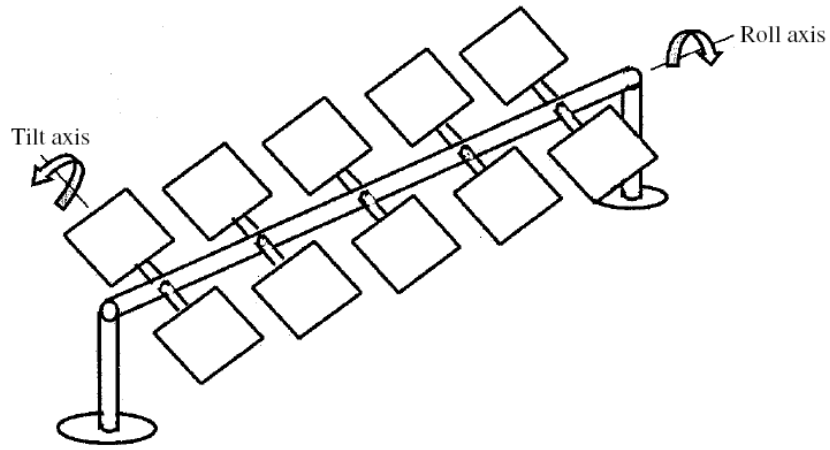
3.5.3 Παρακολούθηση της θέσης του ήλιου

Τα οπτικά μέσα σημειακής εστίασης, εν γένει απαιτούν παρακολούθηση δύο αξόνων, έτσι ώστε πάντα να στοχεύουν τον ήλιο και η ηλιακή ακτινοβολία που συγκεντρώνεται να προσπίπτει στον συλλέκτη. Από μηχανικής πλευράς, η παρακολούθηση δύο αξόνων είναι πιο πολύπλοκη από αυτήν του ενός άξονα, παρόλα αυτά η συγκέντρωση αυξάνεται και το κόστος των συλλεκτών μειώνεται. Τα ανακλαστικά κάτοπτρα γραμμικής εστίασης χρειάζονται παρακολούθηση μόνο κατά μήκος ενός άξονα. Όμως οι γραμμικοί συγκεντρωτές Fresnel απαιτούν παρακολούθηση δύο αξόνων, καθώς εμφανίζουν σοβαρές αποκλίσεις όταν ο ήλιος δεν είναι κάθετος στον επιμήκη άξονα.

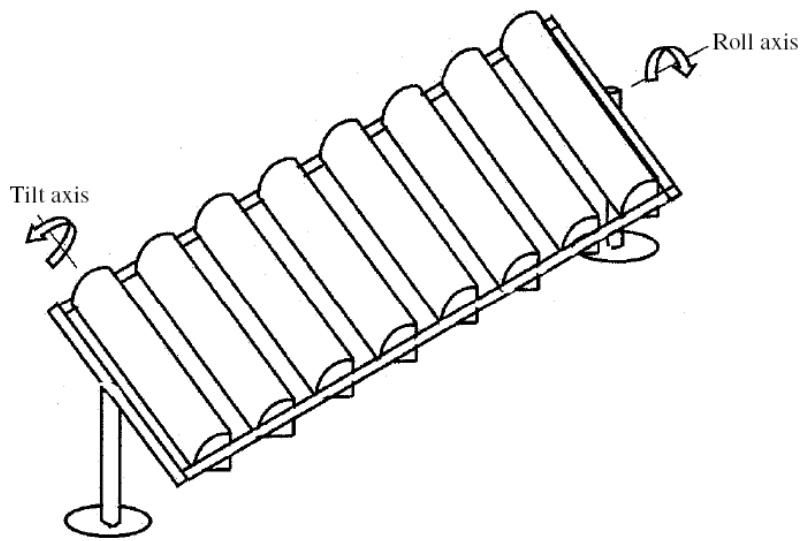
Όσον αφορά την παρακολούθηση δύο αξόνων χρησιμοποιούνται συνήθως τρεις διατάξεις. Η μορφή που φαίνεται στο σχήμα 3.22(a), χρησιμοποιεί ένα κυλινδρικό στήριγμα, πάνω στον οποίο συνδέεται ένα σύνολο κυψελών. Η παρακολούθηση γίνεται συνήθως με τη βοήθεια κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο κινεί τις κυψέλες κατά

μήκος ενός κάθετου άξονα (κίνηση περί τον αζιμουθιακό άξονα) και κατά μήκος ενός οριζόντιου άξονα (άξονας ανύψωσης). Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι η απλότητα της κατασκευής, ενώ μειονεκτεί όσον αφορά το γεγονός ότι οι δυνάμεις που ασκούνται από τον αέρα μεταφράζονται σε μεγάλη ροπή στο κιβώτιο. Μια άλλη υλοποίηση φαίνεται στο σχήμα 3.22(b), στην οποία το φορτίο του αέρα είναι σαφώς μειωμένο, όμως απαιτούνται περισσότερες συνδέσεις και ρουλεμάν, κάνοντας την κατασκευή πιο σύνθετη. Μια παραλλαγή της διάταξης αυτής φαίνεται το σχήμα 3.22(c). Τέλος υπάρχει και η διάταξη του σχήματος 3.22(d), η οποία εμφανίζει τα μικρότερα φορτία αέρα και έχει την πιο μικρή και συμπαγή κατασκευή, όμως από την άλλη έχει και την πιο σύνθετη εγκατάσταση.

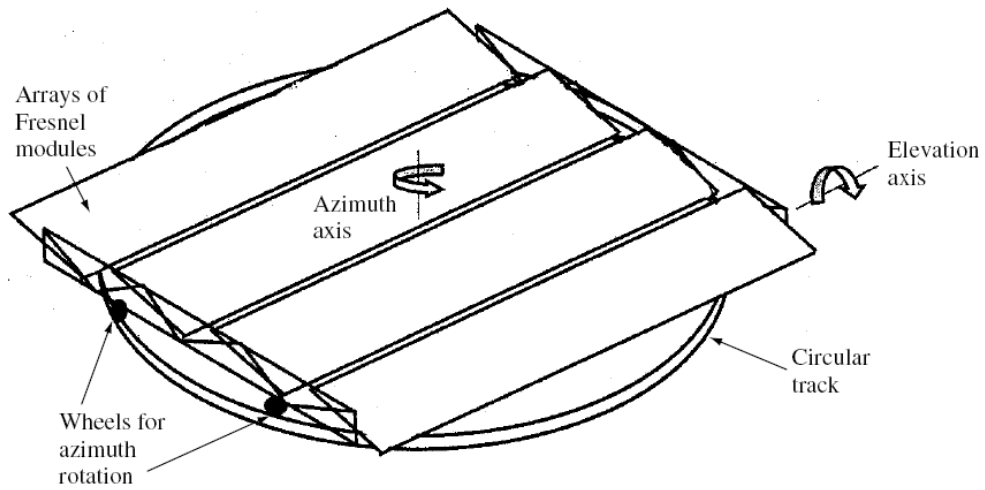




(b)



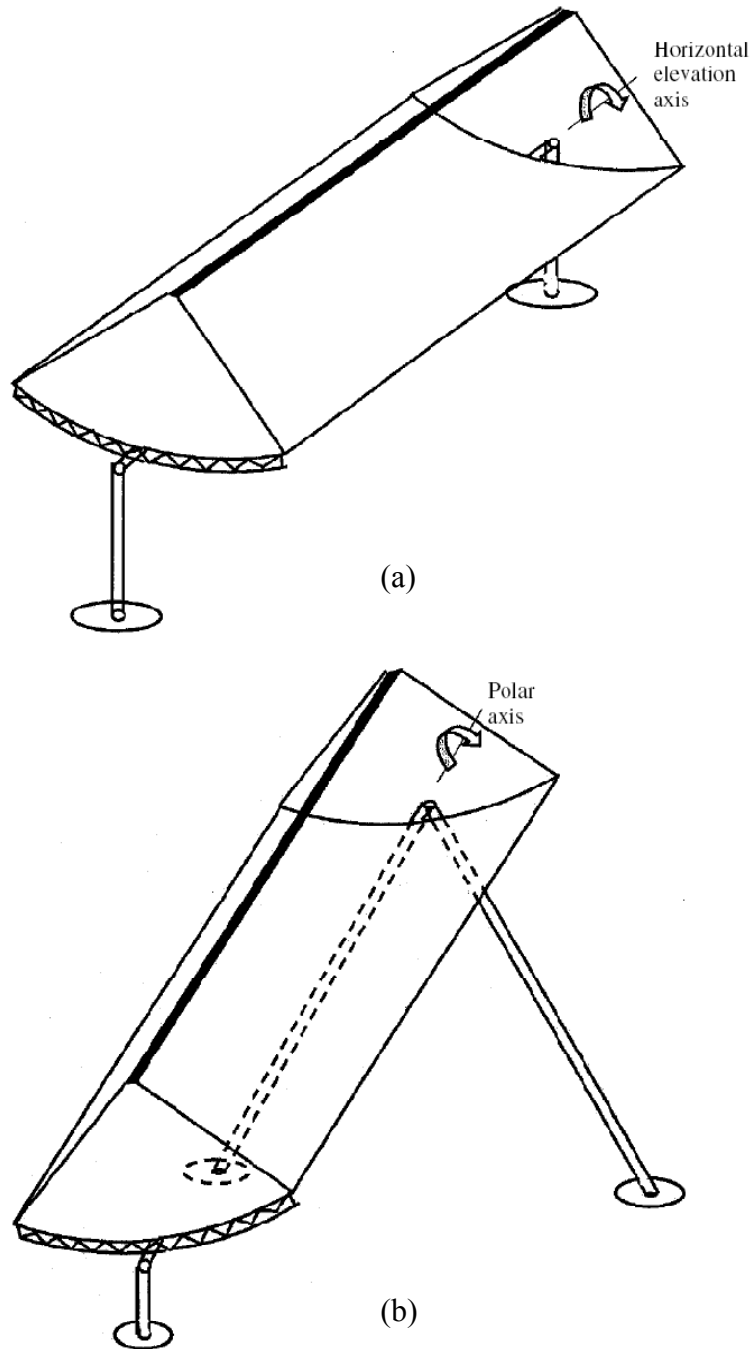
(c)



(d)

Σχήμα 3.22 Διάφορες παραλλαγές παρακολούθησης σε δύο άξονες[4].

Στην παρακολούθηση ενός άξονα, ως άξονας κίνησης μπορεί να επιλεγεί είτε ο οριζόντιος είτε ο πολικός, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.23. Ο οριζόντιος άξονας επιτρέπει την επιλογή μεγαλύτερης επιφάνειας ανά συσκευή παρακολούθησης σε σύγκριση με τον πολικό και συνήθως χρησιμοποιούνται ανακλαστικά κάτοπτρα. Ο πολικός άξονας, από την άλλη πλεονεκτεί όσον αφορά την συγκομιδή ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας έναντι του οριζόντιου άξονα κάνει όμως την εγκατάσταση πιο περίπλοκη μηχανικά. Παρόλα αυτά η πιο συνηθισμένη επιλογή είναι αυτή του οριζόντιου άξονα, κυρίως λόγω της απλότητας της κατασκευής.



Σχήμα 3.23 Παρακολούθηση ενός άξονα. (a) Οριζόντιος άξονας παρακολούθησης με ανακλαστικό κάτοπτρο. (b) Πολικός άξονας παρακολούθησης με ανακλαστικό κάτοπτρο[4].

3.5.4 Οπτική των συγκεντωτών

Το ζητούμενο στην περίπτωση των συγκεντρωτών φ/β κυψελών είναι η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας όσο αποδοτικότερα γίνεται στην επιφάνεια των κυψελών, η οποία είναι μικρότερη από την αρχική επιφάνεια των συγκεντρωτών.

3.5.4.1 Βασικές έννοιες

Σύμφωνα με το βασικότερο θεώρημα της οπτικής των συγκεντρωτών υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στη μέγιστη γωνία που μπορεί να λάβει το φως ένας συγκεντρωτής και τη μέγιστη δυνατή συγκέντρωσή του. Από το σχήμα 3.24 φαίνεται ότι οι ακτίνες που προσπίπτουν στον συγκεντρωτή υπό γωνία μικρότερη ή ίση από την $\theta_{\max,in}$, στο άνοιγμα εισόδου A_{conc} , μεταδίδονται στο άνοιγμα εξόδου A_{rec} υπό γωνία μικρότερη ή ίση της $\theta_{\max,out}$. Για ενός άξονα ή δύο διαστάσεων συγκεντρωτές, ισχύει, η παρακάτω σχέση:

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \leq C_{\max} = \frac{\sin(\theta_{\max,out})}{\sin(\theta_{\max,in})} \quad (3.20)$$

Αντίστοιχα για δύο αξόνων ή τριών διαστάσεων συγκεντρωτές ισχύει:

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \leq C_{\max} = \frac{\sin^2(\theta_{\max,out})}{\sin^2(\theta_{\max,in})} \quad (3.21)$$

Εάν ο συλλέκτης βρίσκεται σε κάποιο διηλεκτρικό μέσο με δείκτη διάθλασης n τότε οι παραπάνω σχέσεις τροποποιούνται στις εξής:

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \leq C_{\max} = n \frac{\sin(\theta_{\max,out})}{\sin(\theta_{\max,in})} \quad (3.22)$$

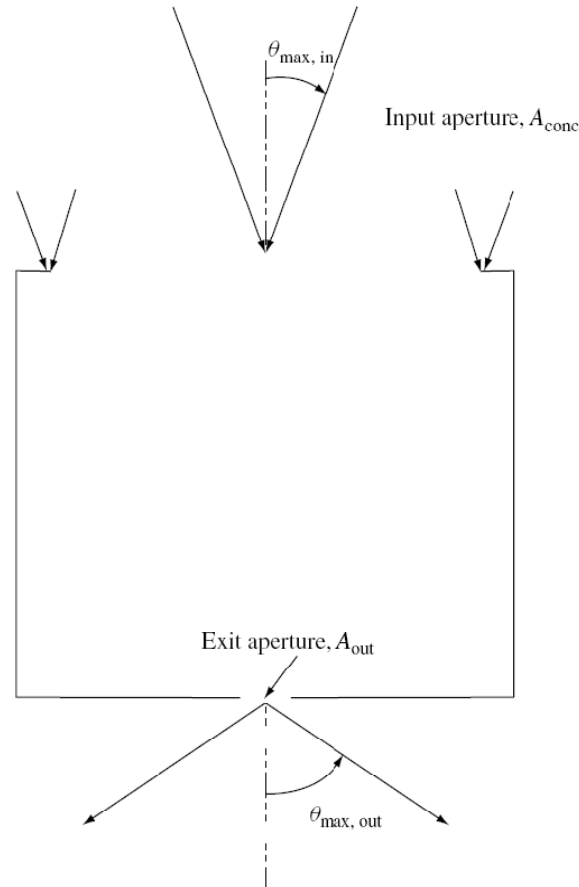
$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \leq C_{\max} = n^2 \frac{\sin^2(\theta_{\max,out})}{\sin^2(\theta_{\max,in})} \quad (3.23)$$

για δύο και τριών διαστάσεων συγκεντρωτές αντίστοιχα.

Ένας συγκεντρωτής, ο οποίος μπορεί να επιτύχει το παραπάνω μέγιστο, ονομάζεται ιδανικός συγκεντρωτής. Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς ότι για να αυξηθεί η συγκέντρωση πρέπει η γωνία $\theta_{\max,out}$ να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει είναι 90° , αλλά ακόμα και γωνίες μικρότερες από την τιμή αυτή, μπορούν να αποδειχθούν μη πρακτικές, καθώς οι γωνίες αυτές ευνοούν την πιθανότητα ανάκλασης, με αποτέλεσμα την μείωση της συγκεντρωτικής ικανότητας. Οι παραπάνω εξισώσεις συχνά αναφέρονται για $\theta_{\max,out}=90^\circ$:

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \leq C_{\max} = \frac{n}{\sin(\theta_{\max,in})} \quad (3.24)$$

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \leq C_{\max} = \frac{n^2}{\sin^2(\theta_{\max,in})} \quad (3.25)$$



Σχήμα 3.24 Σχηματική αναπαράσταση ενός συγκεντρωτή στη γενική περίπτωση[4].

Εάν κάποιος σχεδιάσει έναν συγκεντρωτή με μέγιστη γωνία εισόδου, την μισή από την γωνία που φαίνεται ο κυκλικός δίσκος του ήλιου από την γη, περίπου 1/4 της μοίρας, τότε θα μπορούσε να πετύχει μέγιστη συγκέντρωση περίπου 200 στη περίπτωση των δύο διαστάσεων και 40.000 για τις τρεις διαστάσεις. Ένας τέτοιος συγκεντρωτής θα δεχόταν ακτίνες μόνο κατευθείαν από τον ήλιο και θα απέρριπτε τις ακτίνες από τις άλλες περιοχές του ουρανού, οι οποίες σαν αποτέλεσμα δεν θα έφταναν στον συλλέκτη.

3.5.4.2 Ο παραβολικός συγκεντρωτής

Στο σχήμα 3.25 φαίνεται η κάθετη τομή ενός βασικού ανακλαστικού παραβολικού συγκεντρωτή. Η εξίσωση της παραβολής δίνεται από τη σχέση:

$$y = \frac{1}{4} Fx^2 \quad (3.26)$$

όπου F είναι η εστιακή απόσταση της παραβολής. Αποδεικνύεται ότι όλες οι ακτίνες που προσπίπτουν παράλληλα με τον άξονα της παραβολής (δηλαδή χωρίς x συνιστώσα) περνάνε από την εστία. Αν D είναι η διάμετρος της παραβολής τότε η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί σε κανονικοποιημένη μορφή:

$$\frac{y}{D/2} = \frac{1}{8f} \left(\frac{x}{D/2} \right)^2 \quad (3.27)$$

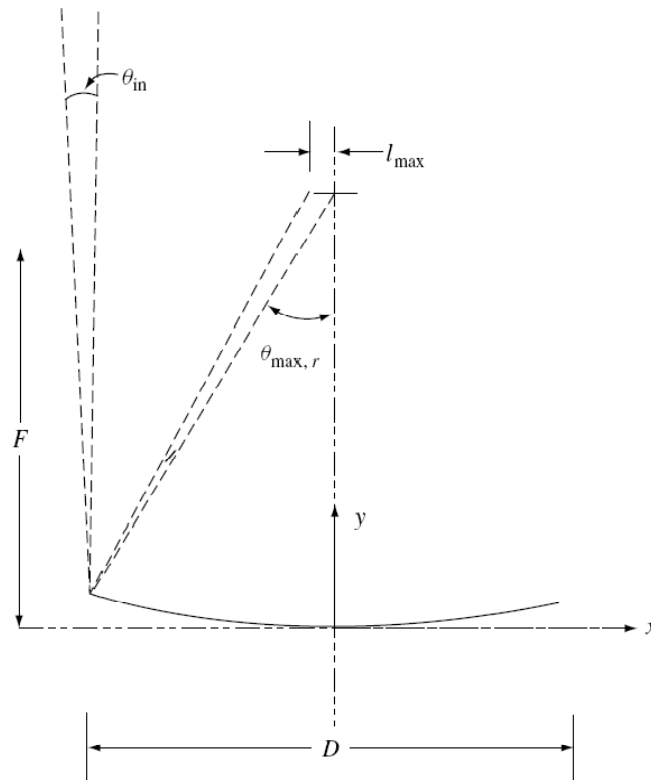
όπου $f = F/D$ καλείται f-αριθμός της παραβολής.

Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν $f = 1/4$ τότε για $x = D/2$, δηλαδή στα άκρα της παραβολής προκύπτει $y = D/4 = F$. Επομένως για μια $f = 1/4$ παραβολή τα δύο ακραία σημεία βρίσκονται στο ίδιο ύψος με την εστία. Άλλη μια χρήσιμη σχέση που συνδέει την εστιακή απόσταση F με την παραβολική επιφάνεια r και την γωνία πρόσπτωσης στον συλλέκτη θ_r είναι:

$$r = \frac{2F}{1 + \cos \theta_r} \quad (3.28)$$

και

$$x = r \sin \theta_r = \frac{2F \sin \theta_r}{1 + \cos \theta_r} \quad (3.29)$$



Σχήμα 3.25 Κάθετη τομή ενός παραβολικού ανακλαστικού συγκεντρωτή[4].

Έστω τώρα ότι μια ακτίνα φτάνει υπό μια μικρή γωνία θ_{in} (Σχήμα 3.25). Η ακτίνα αυτή θα συναντήσει τον συλλέκτη σε μια απόσταση s από την εστία, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$s = \frac{r \sin \theta_{in}}{\cos \theta_r} = \frac{2F \sin \theta_{in}}{\cos \theta_r (1 + \cos \theta_r)} \quad (3.30)$$

Τα παραπάνω δείχνουν ότι η απόσταση s αυξάνεται όσο κανείς κατευθύνεται προς τα άκρα της παραβολής, καθώς αυξάνεται και η γωνία θ_r . Προφανώς η μέγιστη

τιμή προκύπτει για $x = D/2$. Η απόσταση S που απαιτείται για έναν συλλέκτη να παγιδεύσει όλες τις προσπίπτουσες ακτίνες μέχρι την γωνία $\pm\theta_{\max,in}$ είναι $S = 2s_{\max}$ και άρα προκύπτει:

$$S = \frac{4F \sin \theta_{\max,in}}{\cos \theta_{\max,r} (1 + \cos \theta_{\max,r})} = D \frac{\sin \theta_{\max,in}}{\cos \theta_{\max,r} \sin \theta_{\max,r}} \quad (3.31)$$

Για ένα διδιάστατο παραβολικό κάτοπτρο, η συγκέντρωση είναι $C = D/S$ και άρα:

$$C = \cos \theta_{\max,r} \frac{\sin \theta_{\max,r}}{\sin \theta_{\max,in}} \quad (3.32)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέγιστη συγκέντρωση για μια παραβολή συμβαίνει για σε μια γωνία 45° μεταξύ της ευθείας που ενώνει το άκρο της παραβολής με την εστία και τον οριζόντιο άξονα, γεγονός που αντιστοιχεί σε μια $f = 0,6$ παραβολή και είναι:

$$C = \frac{1}{2} \frac{1}{\sin \theta_{\max,in}} \quad (3.33)$$

Όταν το $\theta_{\max,in}$ είναι $1/4$ της μοίρας, όπως συμβαίνει με τον ήλιο, η παραπάνω εξίσωση μας δίνει μια μέγιστη τιμή συγκέντρωσης 100. Από αυτό μπορεί να καταλάβει κανείς ότι ο παραβολικός συγκεντρωτής δεν είναι ιδανικός, αλλά για την παραπάνω περίπτωση εμφανίζει το μισό της μέγιστης δυνατής συγκέντρωσης. Για το λόγο αυτό ο παραβολικός συγκεντρωτής χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με δευτερεύοντες συγκεντρωτές για να επιτευχθεί η ιδανική τιμή της συγκέντρωσης. Αν χρησιμοποιούσαμε έναν ιδανικό δευτερεύοντα συγκεντρωτή, ο οποίος θα μετέτρεπε τη γωνία $\theta_{\max,r}$ στη γωνία $\theta_{\max,out}$ τότε θα είχε μια συγκέντρωση:

$$C_{secondary} = \frac{\sin \theta_{\max,out}}{\sin \theta_{\max,r}} \quad (3.34)$$

και ο συνδυασμός των δύο θα έδινε συνολική συγκέντρωση:

$$C_{tot} = C_{secondary} C_{parabola} = \cos \theta_{\max,r} \frac{\sin \theta_{\max,out}}{\sin \theta_{\max,in}} \quad (3.35)$$

Η τιμή αυτή διαφέρει από τη μέγιστη γωνία εξόδου του ιδανικού συγκεντρωτή κατά το συνημίτονο της γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει το άκρο της παραβολής με την εστία και τον οριζόντιο άξονα και πλησιάζει το ιδανικό για μικρές τιμές της γωνίας αυτής. Στην πράξη μικρές τιμές της παραπάνω γωνίας οδηγούν σε μη πρακτικό σχήμα του συγκεντρωτή και ο συμβιβασμός είναι απαραίτητος.

Για έναν τρισδιάστατο συγκεντρωτή με σχήμα παραβολοειδούς εκ περιστροφής, η συγκέντρωση προκύπτει αν υψώσουμε στο τετράγωνο την προηγούμενη σχέση:

$$C_{tot} = \cos^2 \theta_{\max,r} \left(\frac{\sin \theta_{\max,r}}{\sin \theta_{\max,in}} \right)^2 \quad (3.36)$$

και για γωνία 45° , έχουμε:

$$C_{tot} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\sin \theta_{\max, in}} \right)^2 \quad (3.37)$$

Αυτό δίνει τιμή συντελεστή συγκέντρωσης 10.000 για ένα τέλειο παραβολοειδές με $f = 0,6$.

Στη πράξη κατασκευαστικά ελαττώματα στην ανακλαστική επιφάνεια μειώνουν την απόδοση. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό, αν αναλογιστούμε ότι ένα λάθος στη κλίση κατά μια γωνία θ_s , θα προκαλέσει απόκλιση της ανακλώμενης ακτίνας από την επιθυμητή κατεύθυνση κατά $2\theta_s$, η οποία θα προστεθεί στην γωνία άφιξης $\theta_{\max, in}$. Ένα υψηλής ποιότητας παραβολοειδές για ηλιακή συγκέντρωση μπορεί να έχει $\theta_s = 1/8^\circ$, με αποτέλεσμα να διπλασιαστεί η γωνία του φωτός από τον ήλιο από $1/4^\circ$ σε $1/2^\circ$. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειωθεί η συγκέντρωση κατά το ένα τέταρτο, δηλαδή 2.500 για έναν τρισδιάστατο συγκεντρωτή και κατά το ήμισυ, δηλαδή 50 για έναν δισδιάστατο.

3.5.4.3 Ο σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτής

Όπως είδαμε ο παραβολικός συγκεντρωτής δεν είναι ένας ιδανικός συγκεντρωτής. Μια πρώτη πραγματοποίηση ενός ιδανικού συγκεντρωτή ήταν ο σύνθετος παραβολικός συγκεντρωτής (compound parabolic concentrator, CPC).

Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.26, αυτός ουσιαστικά αποτελείται από δύο παραβολικές επιφάνειες, των οποίων όμως ο άξονας εμφανίζει κλίση $\pm\theta_{\max, in}$ και εστιάζουν τις ακτίνες στα αντίθετα άκρα του συλλέκτη. Οι παραβολές έχουν προεκταθεί προς τα πάνω μέχρι να δημιουργηθεί μια κάθετη επιφάνεια και με αυτό τον τρόπο να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο άνοιγμα. Όταν οι ακτίνες προσπίπτουν υπό τη μέγιστη γωνία είναι εμφανές ότι όλη η ακτινοβολία ανακλάται σε μία παραβολική επιφάνεια και καταλήγει στα άκρα του συλλέκτη. Καθώς όμως απομακρυνόμαστε από τη μέγιστη γωνία, παρατηρούμε ότι οι ακτίνες κατευθύνονται προς τα κάτω και συνεχίζουν να προσπίπτουν στον συλλέκτη. Από τη γεωμετρία των παραβολικών επιφανειών προκύπτει ότι:

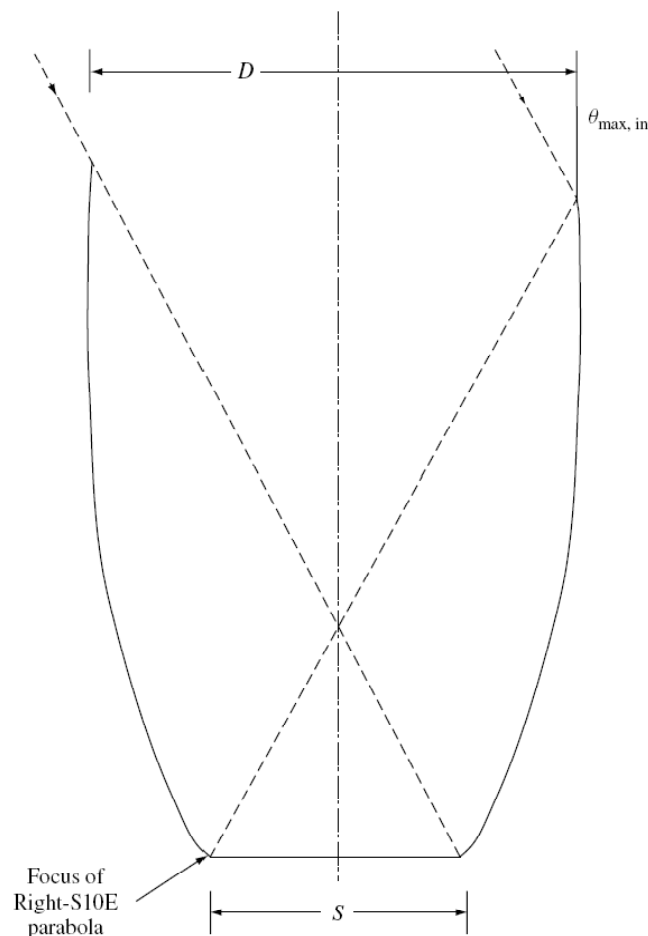
$$C = \frac{1}{\sin \theta_{\max, in}} \quad (3.38)$$

επομένως ο συγκεκριμένος συγκεντρωτής είναι ιδανικός.

Ένας τρισδιάστατος CPC συγκεντρωτής μπορεί να κατασκευαστεί αν περιστραφεί ο συγκεντρωτής του παραπάνω σχήματος περί τον κεντρικό άξονα. Παρόλο που ο συντελεστής συγκέντρωσης ενός CPC πλησιάζει το ιδανικό, δεν είναι αυστηρά ιδανικός. Κάποιες ακτίνες, κυρίως αυτές που προσπίπτουν στα άκρα, απορρίπτονται. Ακόμα ένα μειονέκτημα είναι το σχήμα τους, το οποίο είναι μακρόστενο με αποτέλεσμα να μην ευνοεί υψηλές συγκεντρώσεις στη πράξη.

Οι CPC συγκεντρωτές συχνά χρησιμοποιούνται ως δευτερεύοντες συγκεντρωτές στην εστία των πρωτευόντων, ειδικά σε συστήματα φακών Fresnel, επειδή έχουν μια

αρκετά μεγάλη γωνία υποδοχής και η τελική κατασκευή που προκύπτει είναι συμπαγής.



Σχήμα 3.26 Γεωμετρία ενός σύνθετου παραβολικού συγκεντροτή με $\theta_{\max, in} = 30^\circ$

3.5.4.4 Διαθλαστικοί φακοί

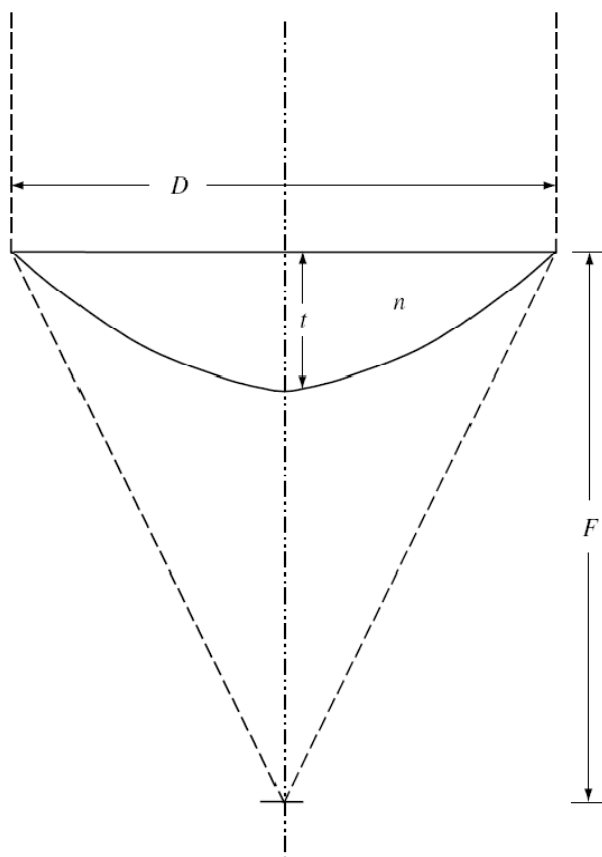
Οι διαθλαστικοί φακοί είναι μια συνηθισμένη εναλλακτική λύση των ανακλαστικών φακών. Ένας τέτοιος φακός φαίνεται στο σχήμα 3.27. Στο σχήμα αυτό φαίνεται ένας επιπεδόκυρτος φακός, με την επίπεδη επιφάνειά του στραμμένη προς τα πάνω. Η ανάλυση βασίζεται στην αρχή του Fermat, η οποία αναφέρει ότι όλες οι ακτίνες που φτάνουν στην εστία, διατρέχουν το ίδιο οπτικό μονοπάτι. Αυτό σημαίνει ότι ακτίνες που φεύγουν από την πηγή την ίδια χρονική στιγμή θα φτάσουν ταυτόχρονα στην εστία, ανεξαρτήτως από το σημείο του φακού που θα προσπέσουν. Αν εξισώσουμε το οπτικό μονοπάτι δύο ακτινών που φαίνεται στο σχήμα 3.27, θα έχουμε:

$$F + (n-1)t = \sqrt{(F-y)^2 + x^2} + ny \quad (3.39)$$

Αυτή είναι η εξίσωση μιας υπερβολής. Ένας τέτοιος φακός καλείται σφαιρικός για να διαφοροποιηθεί από τον συνηθισμένο σφαιρικό φακό, ο οποίος είναι μια

προσέγγιση της παραπάνω εξίσωσης για μεγάλο F και μικρό x . Το πάχος ενός φακού μπορεί να συσχετιστεί με τον f -αριθμό αν τεθεί $x = D/2$, για τα άκρα του φακού:

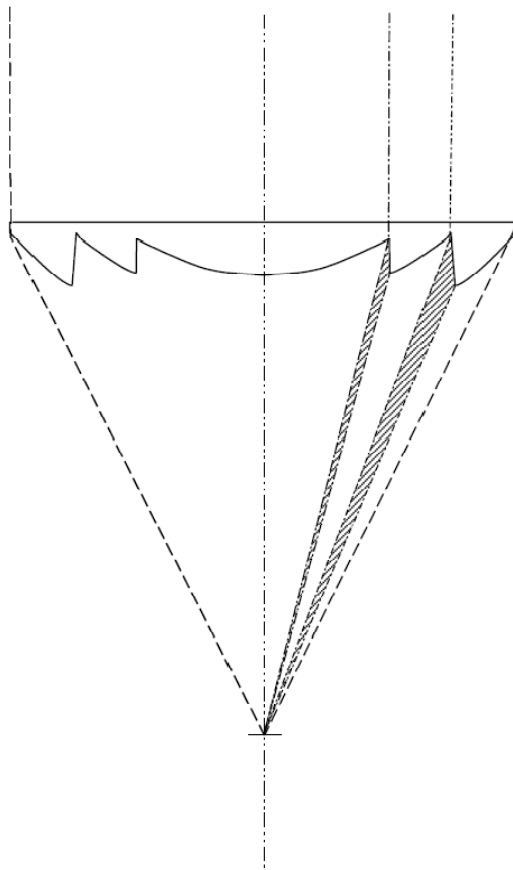
$$\frac{t}{D} = \frac{\sqrt{\frac{F^2}{D^2} + \frac{1}{4}} - \frac{F}{D}}{n-1} \quad (3.40)$$



Σχήμα 3.27 Γεωμετρία ενός διαθλαστικού φακού[4].

Ένα σοβαρό μειονέκτημα ενός τέτοιου φακού είναι το γεγονός ότι γίνεται αρκετά παχύς για μικρές τιμές του f -αριθμού. Εάν για παράδειγμα έχουμε $F/D=1$ και $n=1,5$, τότε προκύπτει $t/D=0,24$. Άρα αν ένας φακός έχει διάμετρο 10cm, τότε το πάχος του φακού θα είναι 2,4cm, με αποτέλεσμα μια βαριά και μη πρακτική κατασκευή. Είναι αντιληπτό επομένως ότι αυτού του είδους οι φακοί προσφέρουν μια καλή λύση για φακούς με μικρή διάμετρο, αλλά για μεγαλύτερους φακούς τη λύση δίνουν οι φακοί Fresnel. Το σχήμα των φακών Fresnel, προκύπτει αν στον επιπεδόκυρτο φακό του προηγούμενου σχήματος υπάρξουν σημεία που το πάχος είναι πολύ μικρό, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.28.

Το μειονέκτημα των φακών Fresnel με τη μορφή του παραπάνω σχήματος είναι το γεγονός ότι εμφανίζουν χαμηλή απόδοση, εξαιτίας της δυσκολίας να λειανθούν οι πλευρές μεταξύ των κάθετων επιφανειών των φακών. Αν όμως οι πλευρές αυτές κατασκευαστούν μικρές σε σχέση με το μέγεθος της κυψέλης, τότε οι απώλειες στη συγκέντρωση είναι μικρότερες.



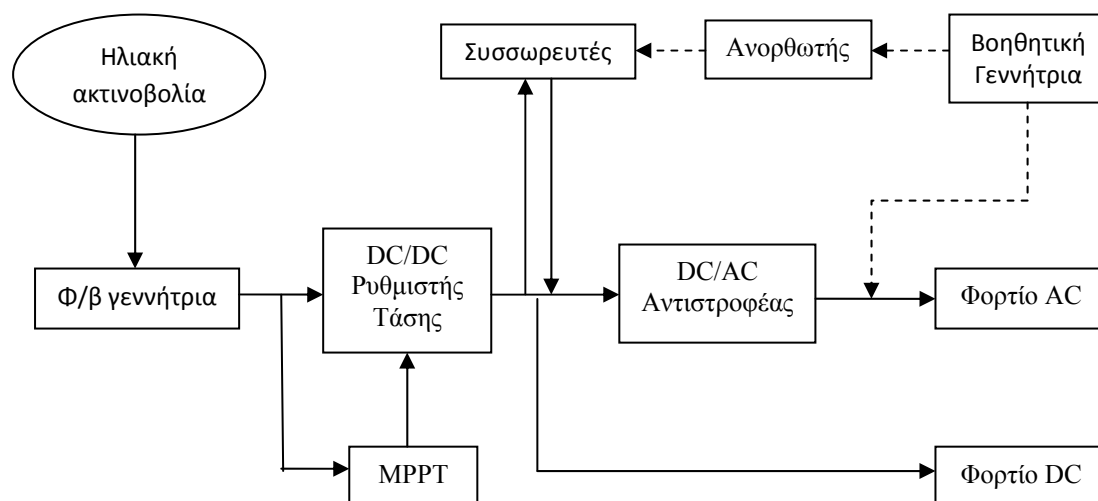
Σχήμα 3.28 Κάθετη τομή ενός φακού Fresnel[4].

Οι φακοί Fresnel δεν μεταδίδουν όλη την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην εστία. Οι απώλειες προέρχονται από διάφορες αιτίες. Πρώτον, απώλειες λόγω ανάκλασης, οι οποίες ανέρχονται στο 8%. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εν μέρει με την χρήση αντανάκλαστικού επιστρώματος στην επιφάνεια των φακών. Δεύτερον οι κάθετες επιφάνειες δεν είναι τελείως κάθετες, καθώς σε αυτή τη περίπτωση δεν θα μπορούσε να βγει ο φακός από το καλούπι, από το οποίο κατασκευάζονται. Η απόκλιση αυτή είναι περίπου 2° και το αποτέλεσμα είναι οι ακτίνες που προσπίπτουν σε αυτές τις επιφάνειες να αποκλίνουν από την εστία. Τέλος οι κορυφές και οι πλευρές δεν είναι τέλειες. Σύγχρονοι φακοί Fresnel έχουν μια τυπική τιμή απόδοσης 85%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Ένα φ/β σύστημα, το οποίο παράγει ηλεκτρική ενέργεια για να εξυπηρετήσει τη ζήτηση κάποιων φορτίων, αποτελείται από πολλά επιμέρους συστατικά. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια επισκόπηση των συστατικών αυτών που συνθέτουν ένα πλήρες φ/β σύστημα.

4.1 ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (STAND ALONE)



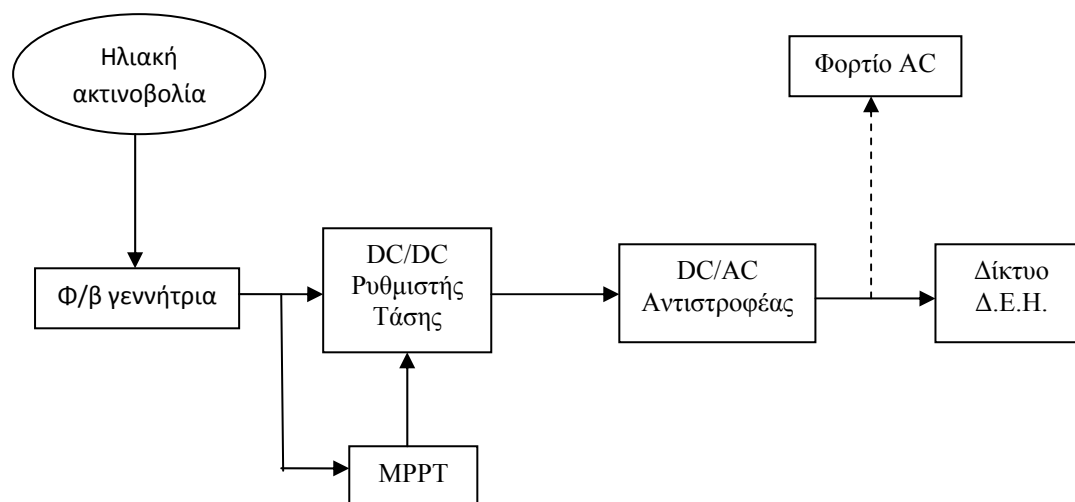
Σχήμα 4.1 Απλοποιημένο διάγραμμα αυτόνομου φ/β συστήματος. Εάν χρησιμοποιηθεί μια βοηθητική πηγή ενέργειας, όπως φαίνεται στο σχήμα με την διακεκομμένη γραμμή, τότε το σύστημα καλείται υβριδικό φ/β σύστημα.

Οι αυτόνομες 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 4.1 φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος. Αποτελείται καταρχήν από τη **φ/β γεννήτρια**, η οποία είναι και το βασικότερο συστατικό του συστήματος, αφού εκεί γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Έπειτα περιλαμβάνει **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. Η ιδανικότερη λύση είναι μια βοηθητική γεννήτρια (συνήθως νηζελογεννήτρια), η οποία τίθεται σε λειτουργία όταν είναι αναγκαίο. Συχνά τα συστήματα αυτά καλούνται **υβριδικά φ/β συστήματα** και μπορεί να περιέχουν 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. Τέλος αναπόσπαστα συστατικά ενός αυτόνομου συστήματος είναι οι διατάξεις για την μετατροπή της παραγόμενης ενέργεια από τα φ/β στοιχεία σε μορφή κατάλληλη για την τροφοδότηση των φορτίων, οι οποίες περιέχουν έναν **DC/DC μετατροπέα** σε συνδυασμό με έναν **ανιχνευτή μέγιστης ισχύος(MPPT)** και έναν **DC/AC αντιστροφέα**.

4.2 ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (GRID CONNECTED)



Σχήμα 4.2 Απλοποιημένο διάγραμμα διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος

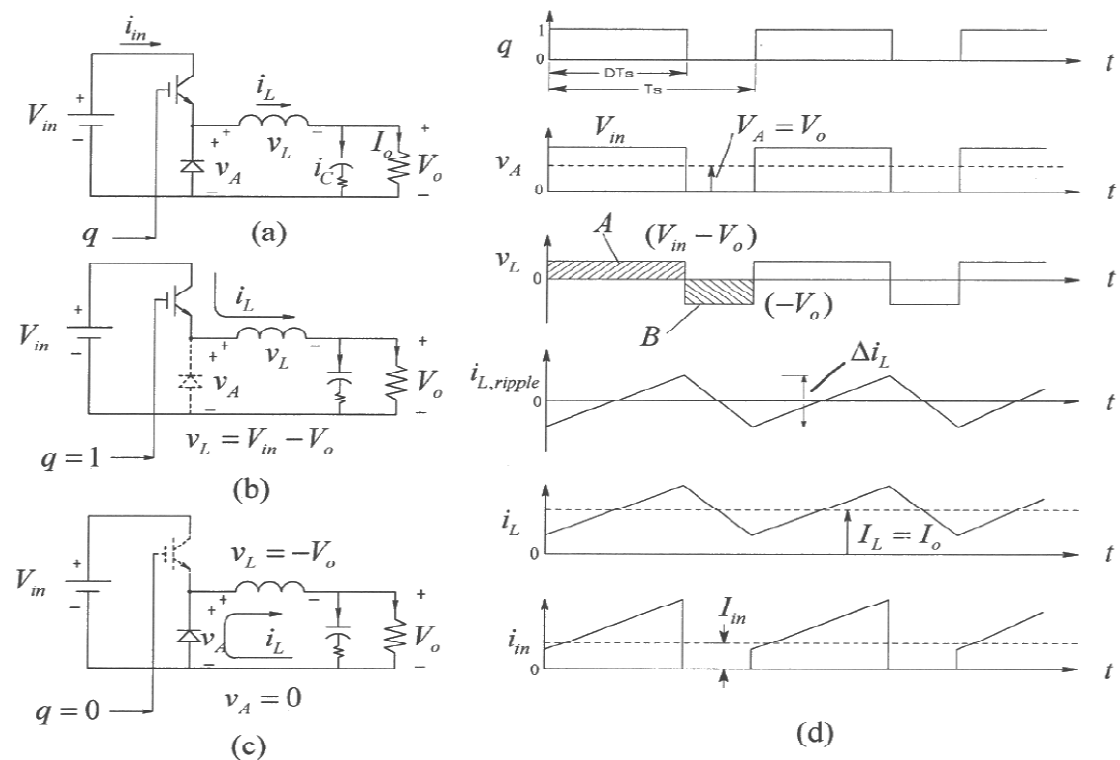
Μια διαφορετική προσέγγιση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η εφαρμογή των διασυνδεδεμένων φ/β συστημάτων, στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο. Υπάρχουν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις, ανάλογα με το αν τροφοδοτείται κάποιο φορτίο απευθείας από το σύστημα ή όχι (Σχήμα 4.2). Σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα το δίκτυο ενεργεί όπως μια μπαταρία με απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης. Επομένως, η συνολική αποδοτικότητα ενός διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος, θα είναι καλύτερη από την αποδοτικότητα ενός αυτόνομου συστήματος, αφού το δίκτυο έχει πρακτικά απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης και επομένως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί πάντοτε να αποθηκεύεται. Αντιθέτως στις αυτόνομες εφαρμογές οι συσσωρευτές θα είναι ενίοτε πλήρως

φορτισμένες, τότε η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει με κάποιο τρόπο να αποβάλλεται.

4.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ (DC/DC CONVERTER)

Σε ένα φ/β σύστημα η παραγόμενη τάση από τα φ/β στοιχεία δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά μεταβάλλεται γύρω από μια μέση τιμή. Για να σταθεροποιηθεί η τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας και να καταστεί κατάλληλη για την είσοδό της στον αντιστροφέα χρησιμοποιούνται μετατροπείς συνεχούς ρεύματος. Οι μετατροπείς μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με το αν η τάση εξόδου που βγάζουν είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου και ακόμα ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά τη μόνιμη κατάσταση των μετατροπέων και τα στοιχεία θεωρούνται ιδανικά.

Μετατροπέας Υποβιβασμού (Step-Down Converter ή Buck Converter)



Σχήμα 4.3 (α) Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού, (β) Διακόπτης κλειστός, (γ) Διακόπτης ανοιχτός, (δ) Κυματομορφές για συνεχόμενο ρεύμα εξόδου.

Το κύκλωμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού φαίνεται στο σχήμα 4.3(a). Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η διάοδος πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος παρέχει ενέργεια τόσο στο φορτίο όσο και στο πηνίο (Σχήμα 4.3(b)). Όταν ο διακόπτης

ανοίξει, το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου προς το φορτίο, μεταφέροντας έτσι μέρος της αποθηκευμένης του ενέργειας προς αυτό (Σχήμα 4.3(c)).

Ο μετατροπέας αυτός δέχεται στην είσοδό του μια συνεχή τάση V_{in} και δίνει στην έξοδό του συνεχή τάση μικρότερης τιμής V_o . Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_o = V_a = DV_{in} \quad (4.1)$$

όπου το D δείχνει τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακόπτη και δίνεται από τη σχέση:

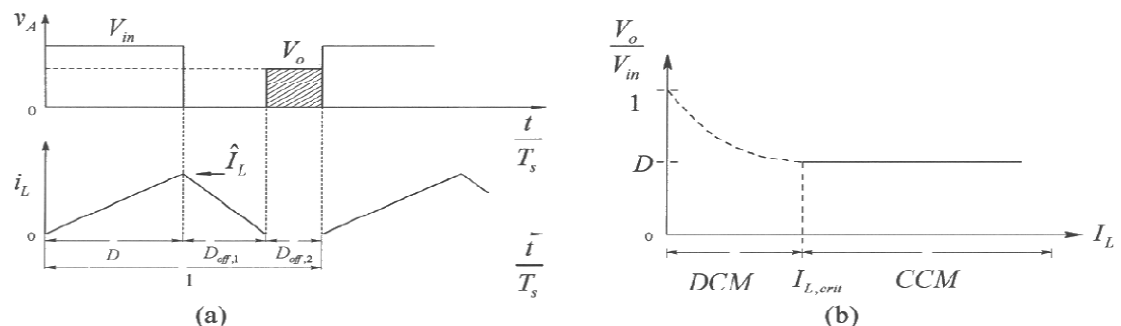
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (4.2)$$

όπου t_{on} η διάρκεια κατά την οποία άγει ο διακόπτης για μια περίοδο, t_{off} η διάρκεια κατά την οποία δεν άγει και T_s η περίοδος. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_o προκύπτει ίση με την τάση στα άκρα της διόδου V_a , καθώς η μέση τιμή της τάσης του πηνίου για χρόνο μιας περιόδου είναι μηδέν.

Το ρεύμα εξόδου μπορεί να είναι είτε συνεχές είτε διακοπτόμενο, γεγονός που εξαρτάται από το φορτίο και τη χρονική διάρκεια t_{on} . Οι κυματομορφές για την κατάσταση συνεχούς ρεύματος εξόδου (Continuous Conduction Mode - CCM) φαίνονται στο σχήμα 4.3(d), ενώ η κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος εξόδου φαίνεται στο σχήμα 4.4 (Discontinuous Conduction Mode - DCM). Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τη γραφική παράσταση του σχήματος 4.4(b), υπάρχει μια κρίσιμη μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου, κάτω από την οποία το ρεύμα γίνεται ασυνεχές. Η μέση τιμή αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$I_{L,crit,Buck} = \frac{V_{in}}{2Lf_s} D(1-D) \quad (4.3)$$

Τέλος επειδή τόσο η τάση όσο και το ρεύμα είναι θετικά κατά τη λειτουργία του μετατροπέα, για αυτό και ονομάζεται μετατροπέας πρώτου τεταρτημορίου.



Σχήμα 4.4 Μετατροπέας υποβιβασμού στη κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος (DCM).

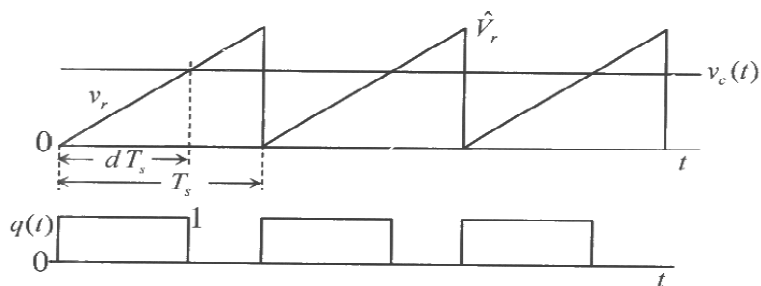
Έλεγχος με την τεχνική PWM

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί με τη μέθοδο της διαμόρφωσης πλάτους (PWM). Όπως φαίνεται και από τη σχέση 4.1, η τάση αυτή εξαρτάται από το χρόνο τον οποίο άγει ο διακόπτης σε χρόνο μιας περιόδου. Σύμφωνα με την τεχνική της PWM, η μέση τιμή της τάσης εξόδου ελέγχεται ρυθμίζοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής του διακοπτικού στοιχείου. Η περίοδος καθώς και η συχνότητα μετάβασης του διακόπτη είναι σταθερά, ενώ αυτό που μεταβάλλεται είναι η σχετική διάρκεια αγωγής αυτού, δηλαδή ο λόγος D .

Η τάση εξόδου του μετατροπέα μετράται και συγκρίνεται με την επιθυμητή τάση και έπειτα το σήμα λάθους ενισχύεται από έναν ενισχυτή, του οποίου η έξοδος είναι το σήμα ελέγχου $v_c(t)$. Έπειτα το σήμα ελέγχου $v_c(t)$ συγκρίνεται με μια πριονωτή τάση $v_r(t)$, η οποία έχει πλάτος V_r και σταθερή συχνότητα f_s . Παράγεται έτσι το διακοπτικό σήμα το οποίο έχει τιμή 1 όταν $v_c(t) > v_r(t)$, και 0 όταν $v_c(t) < v_r(t)$ (Σχήμα 4.5). Έτσι η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των δύο αυτών τάσεων ως εξής:

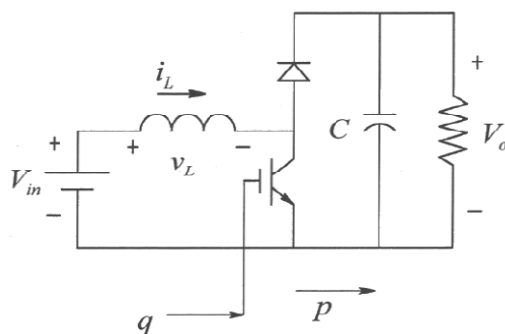
$$D = \frac{V_c}{V_r} \quad (4.4)$$

Με αυτόν τον τρόπο το σήμα ελέγχου που μπορεί να κυμαίνεται από 0 μέχρι V_r , και να ελέγχει γραμμικά και δυναμικά τον λόγο D .



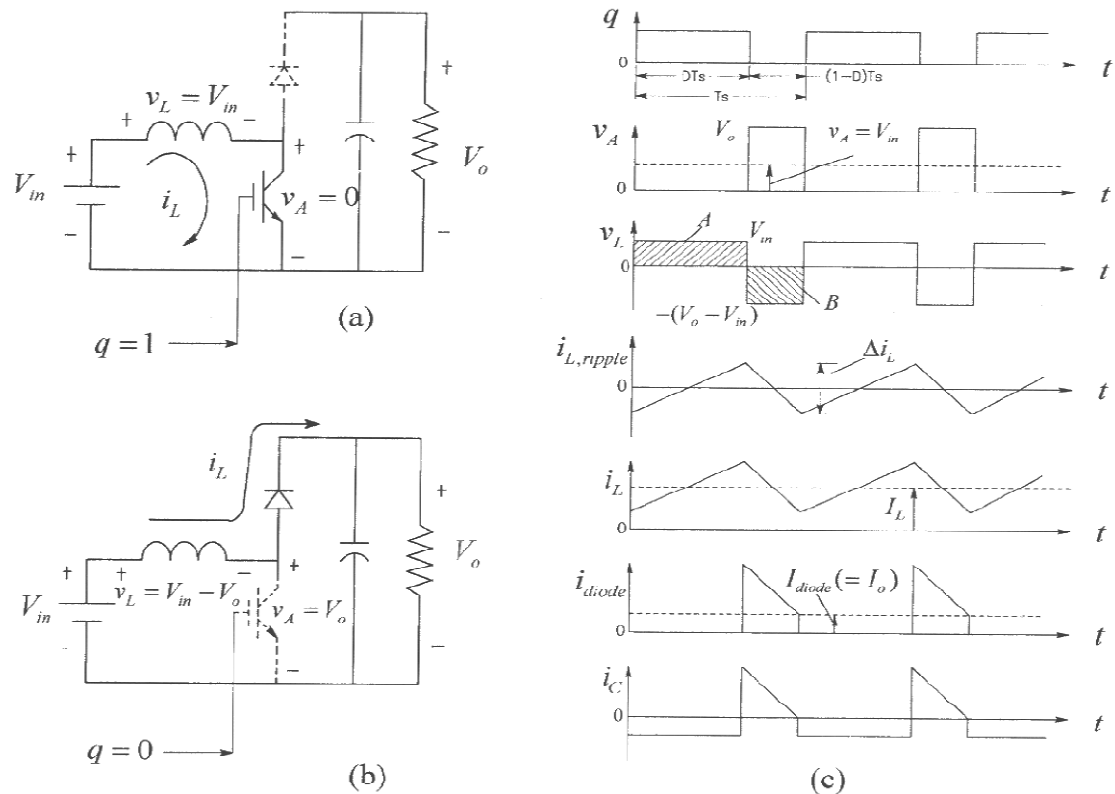
Σχήμα 4.5 Έλεγχος της τάσης εξόδου με την τεχνική PWM.

Μετατροπέας Ανύψωσης (Step-Up Converter ή Boost Converter)

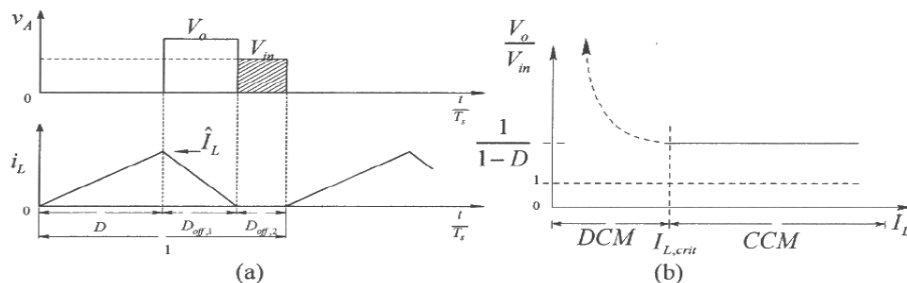


Σχήμα 4.6 Μετατροπέας ανύψωσης.

Το κύκλωμα ενός μετατροπέα ανύψωσης φαίνεται στο σχήμα 4.6. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός το ρεύμα στο πηνίο αυξάνεται και αποθηκεύεται ενέργεια σε αυτό, ενώ η διόδος είναι σε κατάσταση αποκοπής, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σύνδεση μεταξύ εισόδου και εξόδου (Σχήμα 4.7(a)). Όταν ο διακόπτης ανοίξει, ρεύμα περνάει από τη διόδο και φτάνει στην έξοδο, με αποτέλεσμα η έξοδος να δέχεται ενέργεια τόσο από την πηγή όσο και από το πηνίο (Σχήμα 4.7(b)).



Σχήμα 4.7 Μετατροπέας ανύψωσης. (a) Διακόπτης κλειστός, (b) Διακόπτης ανοιχτός, (c) Κυματομορφές για συνεχόμενο ρεύμα εξόδου.



Σχήμα 4.8 Μετατροπέας ανύψωσης στη κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος.

Ο μετατροπέας αυτός δέχεται στην είσοδό του μια συνεχή τάση V_{in} και δίνει στην έξοδό του συνεχή τάση μεγαλύτερης τιμής V_o . Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τη σχέση:

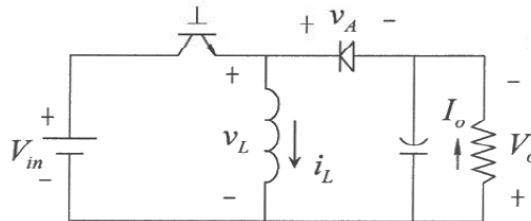
$$V_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} V_{in} = \frac{T_s}{T_s - t_{on}} = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (4.5)$$

Και σε αυτή τη περίπτωση το ρεύμα εξόδου μπορεί να είναι είτε συνεχές είτε διακοπτόμενο. Οι κυματομορφές για την κατάσταση συνεχούς ρεύματος εξόδου (CCM) φαίνονται στο σχήμα 4.7(c), ενώ η κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος εξόδου στο σχήμα 4.8 (DCM). Η κρίσιμη μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου, δίνεται από τη σχέση:

$$I_{L,crit,Boost} = \frac{V_{in}}{2Lf_s} D \quad (4.6)$$

Τέλος επειδή τόσο η τάση όσο και το ρεύμα είναι θετικά κατά τη λειτουργία του μετατροπέα είναι και αυτός ο μετατροπέας πρώτου τεταρτημορίου.

Μετατροπέας Ανύψωσης-Υποβιβασμού (Buck-Boost Converter)



Σχήμα 4.9 Μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού

Το κύκλωμα ενός μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού φαίνεται στο σχήμα 4.9. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, το ρεύμα στο πηνίο αυξάνεται και αποθηκεύεται ενέργεια σε αυτό ενώ η διόδος πολώνεται ανάστροφα (Σχήμα 4.10(a)). Όταν ο διακόπτης ανοίξει, το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου προς το φορτίο, μεταφέροντας έτσι μέρος της αποθηκευμένης του ενέργειας προς αυτό (Σχήμα 4.10(b)).

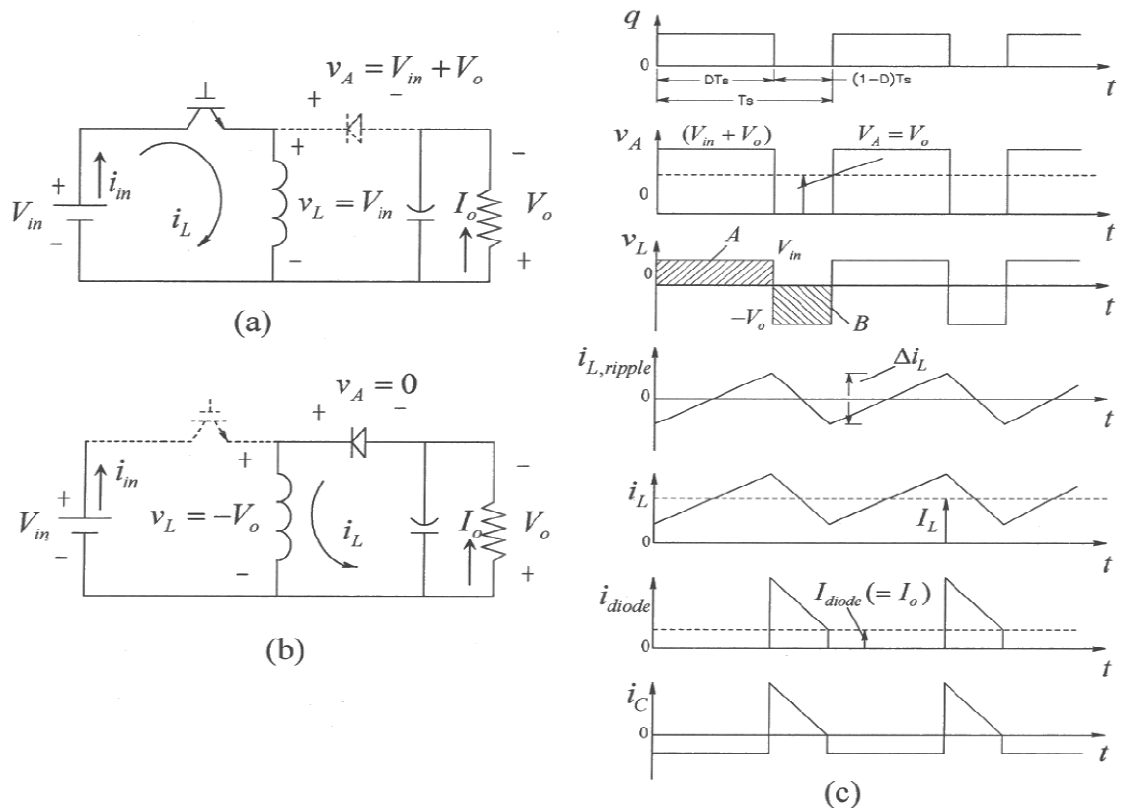
Η σχέση που συνδέει την μέση τιμή της τάσης εισόδου με την τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει:

$$V_o = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (4.7)$$

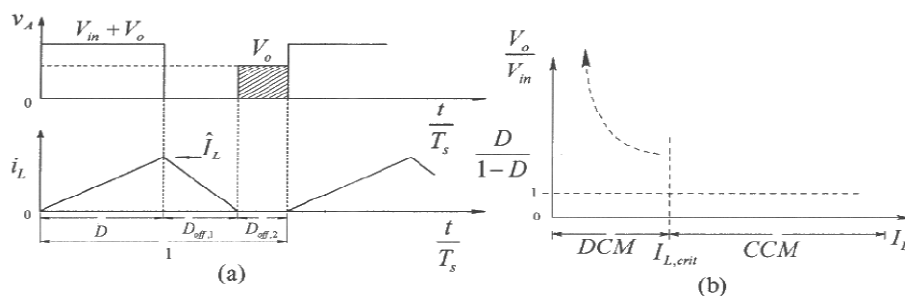
όπου παρατηρούμαι ότι η τάση εξόδου μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη από την τάση εισόδου ανάλογα με την τιμή του συντελεστή D.

Οι κυματομορφές για την κατάσταση συνεχούς ρεύματος εξόδου (CCM) φαίνονται στο σχήμα 4.10(c), ενώ η κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος εξόδου στο σχήμα 4.11 (DCM). Η κρίσιμη μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου είναι ίδια με την περίπτωση του μετατροπέα ανύψωσης και δίνεται από τη σχέση:

$$I_{L,crit,Buck-Boost} = \frac{V_{in}}{2Lf_s} D \quad (4.8)$$



Σχήμα 4.10 Μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού. (a) Διακόπτης κλειστός, (b) Διακόπτης ανοιχτός, (c) Κυματομορφές για συνεχόμενο ρεύμα εξόδου.

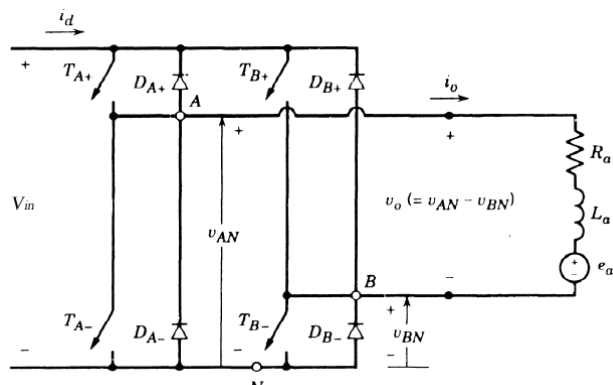


Σχήμα 4.11 Μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού στη κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος (DCM).

Μετατροπέας πλήρους γέφυρας

Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας φαίνεται στο Σχήμα 4.12 χρησιμοποιεί συνολικά τέσσερις διακόπτες και τέσσερις διόδους τοποθετημένες αντιπαράλληλα. Κάθε σκέλος αποτελείται από δύο ζεύγη διακοπών – διόδων και λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε ποτέ την ίδια στιγμή οι διακόπτες του να μην είναι ταυτόχρονα ανοιχτοί ή κλειστοί. Έτσι για κάθε σκέλος κάθε στιγμή ο ένας διακόπτης είναι ανοιχτός ενώ ο άλλος κλειστός. Στον μετατροπέα αυτόν η τάση εισόδου έχει καθορισμένη τιμή V_{in} ενώ η τάση εξόδου V_o , μπορεί να αλλάζει τόσο πλάτος όσο

και πολικότητα. Για τον έλεγχο της τάσης εξόδου, χρησιμοποιείται η τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών, όπου η τάση ελέγχου V_c συγκρίνεται αυτή τη φορά με μία τριγωνική κυματομορφή.



Σχήμα 4.12 Μετατροπέας πλήρους γέφυρας.

Αντίθετα από τα παραπάνω είδη μετατροπέων, ο μετατροπέας με πλήρη γέφυρα έχει την ικανότητα να μεταφέρει ενέργεια αμφίδρομα, καθώς έχει την δυνατότητα να αντιστρέφει την πολικότητα τόσο στην τάση εξόδου V_o , όσο και στο ρεύμα εξόδου I_o . Για αυτό και ονομάζεται μετατροπέας τεσσάρων τεταρτημορίων.

4.4 ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ - MAXIMUM POWER POINT TRACKERS (MPPT)

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών. Σήμερα χρησιμοποιούνται πολυάριθμες τεχνικές και αλγόριθμοι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. Όλες αυτές οι τεχνικές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες.

Έμμεσοι ανιχνευτές MPP

Αυτοί οι ανιχνευτές προσεγγίζουν το σημείο μέγιστης λειτουργίας με βάση απλές υποθέσεις και έμμεσες μετρήσεις. Σύμφωνα με μία μέθοδο η τάση λειτουργίας ρυθμίζεται ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Μεγαλύτερες τιμές τάσης στο σημείο μέγιστης λειτουργίας αναμένονται τον χειμώνα, όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές, ενώ το καλοκαίρι οι τιμές της τάσης είναι σαφώς μικρότερες. Μια άλλη μέθοδος ρυθμίζει την τάση ανάλογα με την θερμοκρασία που αναπτύσσει το πλαίσιο. Τέλος μια τρίτη κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλαδή:

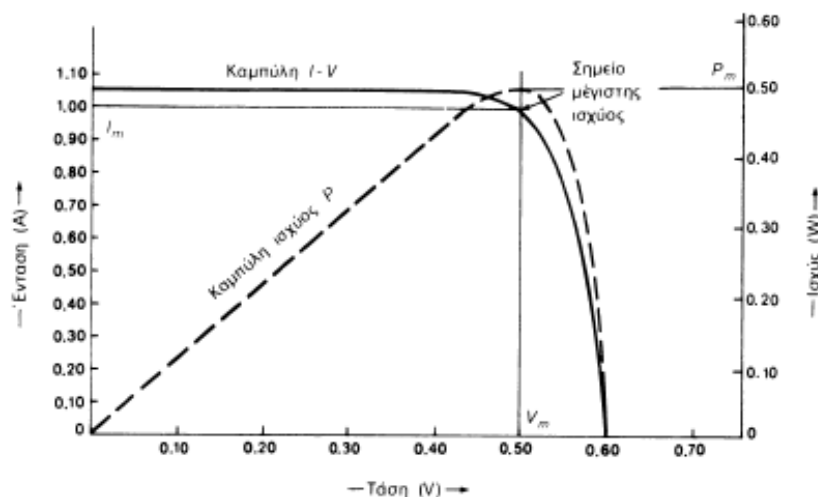
$$\frac{V_m}{V_{oc}} = K = \text{σταθ.} \quad (4.9)$$

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φ/β στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο $K \cdot V_{oc}$, που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

Άμεσοι ανιχνευτές MPP

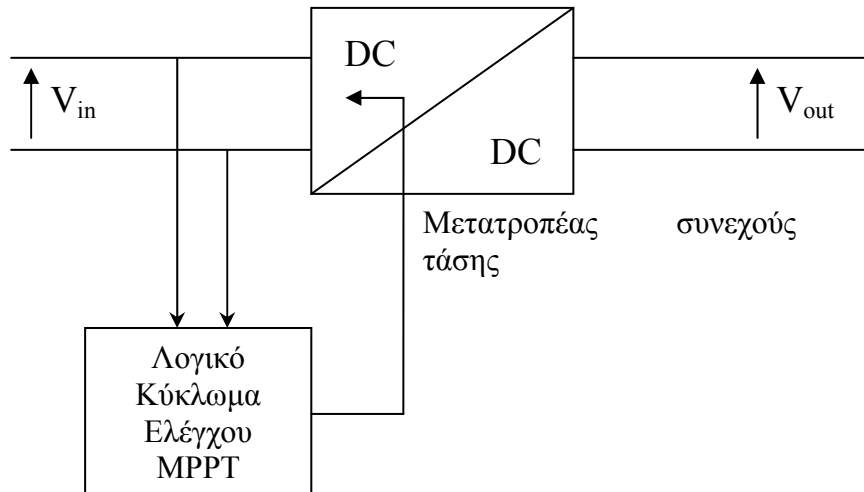
Η λειτουργία τους βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών της τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας.

Όπως προαναφέρθηκε στην εξέταση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η ένταση που παράγεται από ένα φ/β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ότι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό για κάθε στιγμή το φωτοβολταϊκό στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του. Στο σχήμα 4.13 φαίνονται οι χαρακτηριστικές τάσης- έντασης και ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 4.13 Η συνεχής καμπύλη δείχνει την μεταβολή της τάσης σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος ενός φ/β στοιχείου πυριτίου, σε συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται.

Για να επιτευχθεί η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα DC/DC αντιστροφέα, ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης, στα άκρα της ηλεκτρονικής συσκευής στην οποία εισέρχεται η ισχύς του φωτοβολταϊκού. Ένα απλοϊκό σχεδιάγραμμα dc/dc converter που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της μέγιστης ισχύς εξόδου της φ/β γεννήτριας φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.14 Απλοποιημένη διάταξη MPPT

Ανά πάσα στιγμή η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι:

$$P = V \cdot I \quad (4.10)$$

Εάν λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, αλλάξει η παραγόμενη ισχύς, μετατοπιστεί δηλαδή σε διαφορετικό σημείο λειτουργίας πάνω στη καμπύλη V-I, τότε θα υπάρξει μεταβολή της τάσης και μεταβολή της έντασης κατά dV και dI αντίστοιχα. Η ισχύς στο καινούργιο σημείο λειτουργίας θα είναι τώρα.

$$P' = (V + dV) \cdot (I + dI) = V \cdot I + V \cdot dI + IdV \quad (4.11)$$

όπου αγνοήθηκαν οι όροι δεύτερης τάξης. Συνεπώς η μεταβολή στην ισχύ προκύπτει:

$$dP = P' - P = V \cdot dI + IdV \quad (4.12)$$

Στο σημείο της μέγιστης ισχύος η κλίση της καμπύλης ισχύος του φ/β στοιχείου μηδενίζεται, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.13. Δηλαδή ισχύει:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow V \frac{dI}{dV} + I = 0 \Rightarrow \frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (4.13)$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει την δυναμική αντίσταση της πηγής (Z_d) ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση (Z_s).

Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν δυο διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος:

- Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής Z_d και η στατική αντίσταση Z_s . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή:

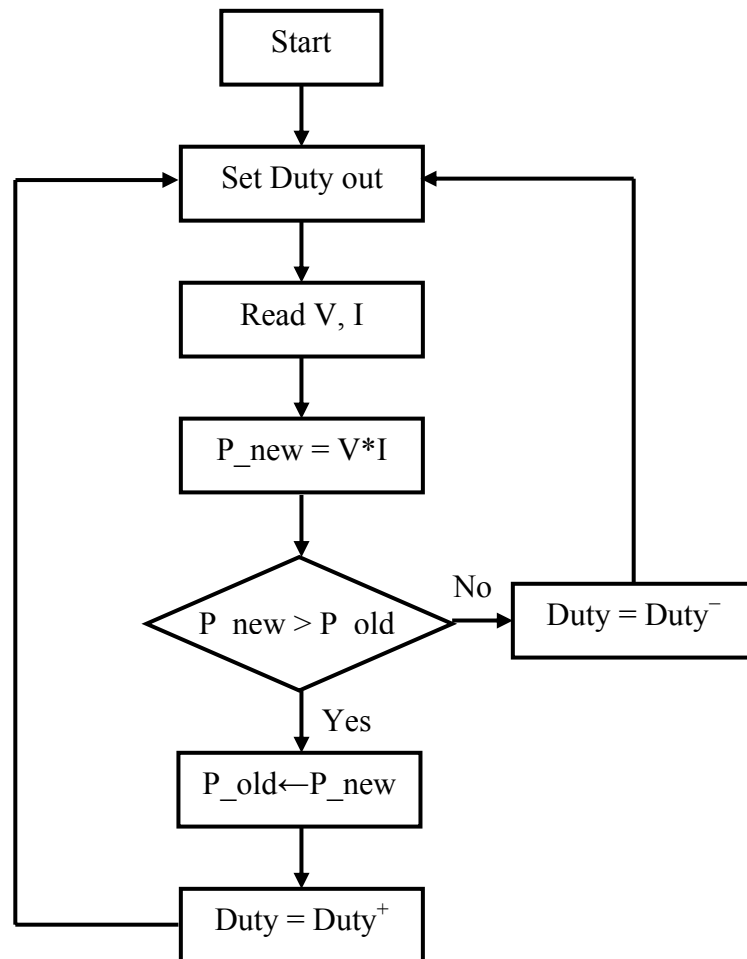
$$Z_d = -Z_s \quad (4.14)$$

- Σύμφωνα με μια δεύτερη μέθοδο ελέγχου, η τάση αυξάνεται όσο ισχύει η συνθήκη:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad (4.15)$$

που συνεπάγεται και ταυτόχρονη αύξηση της ισχύος. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται, ενώ όταν ο ρυθμός μεταβολής είναι πολύ κοντά στο μηδέν η τάση σταθεροποιείται.

Το λογικό κύκλωμα ελέγχου μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, η οποία βέβαια εξαρτάται κάθε στιγμή από την ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της γεννήτριας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά η γεννήτρια στα άκρα της. Εφαρμόζοντας μία από τις παραπάνω μεθόδους, στέλνει σήμα στον DC/DC μετατροπέα να ανυψώσει ή να μειώσει την τάση μέχρι να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Ανάλογα με την περίπτωση λοιπόν το συγκεκριμένο κύκλωμα λειτουργεί είτε ως μετατροπέας ανύψωσης είτε ως μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα ροής ενός απλού αλγορίθμου εύρεσης mpp.

Εναλλακτικές μορφές ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος χρησιμοποιούν κυκλώματα με μνήμη ώστε να συγκρίνουν τις τρέχουσες μετρούμενες τιμές ισχύος,

τάσης, έντασης με προηγούμενες οπότε προσαρμόζουν ανάλογα τη στάθμη της τάσης που θα απορροφήσει ο αντιστροφείας. Το διάγραμμα ροής ενός απλού αλγορίθμου που συγκρίνει δύο διαδοχικές μετρήσεις της ισχύος φαίνεται στο σχήμα 4.15. Σύμφωνα με αυτό εισάγεται μια περιοδική διαταραχή της τάσης και ελέγχεται αν αυτή προκαλεί αύξηση ή μείωση της παραγόμενης ισχύος. Αν το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της ισχύος τότε εισάγεται εκ νέου η ίδια διαταραχή (αν εισήχθηκε αύξηση της τάσης τότε εισάγεται και πάλι αύξηση και το αντίστοιχο αν είχε εισαχθεί μείωση) ενώ αν το αποτέλεσμα είναι η μείωση της ισχύος τότε εισάγεται η αντίθετη διαταραχή (αν εισήχθηκε αύξηση της τάσης τότε εισάγεται μείωση και το αντίστοιχο αν είχε εισαχθεί μείωση της τάσης). Ο παραπάνω αλγόριθμος χρησιμοποιεί δύο σημεία της καμπύλης ισχύος και ταλαντεύεται γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος. Το κύριο μειονέκτημά του είναι ότι εμφανίζει απώλειες ισχύος ιδίως στη περίπτωση που η ηλιακή ακτινοβολία αλλάζει απότομα. Μια καλύτερη υλοποίηση μπορεί να προσφέρει ένας αλγόριθμος που εκμεταλλεύεται τρία σημεία της καμπύλης ισχύος.

4.5 ANTIΣΤΡΟΦΕΑΣ (DC/AC INVERTER)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τάση που παράγεται από τη φ/β γεννήτρια είναι ακατάλληλη για την άμεση σύνδεση του φ/β σταθμού στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρόλος του αντιστροφέα είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης που παράγεται από τα φ/β στοιχεία σε εναλλασσόμενη, κατάλληλης τιμής και συχνότητας για διασύνδεση στο δίκτυο.

Οι αντιστροφείς DC/AC μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Όταν η είσοδος είναι μια πηγή τάσης, αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI) ενώ όταν ως είσοδος λαμβάνεται μια πηγή έντασης ονομάζονται αντιστροφείς πηγής έντασης (CSI). Ο χαρακτηρισμός του αντιστροφέα δεν έχει να κάνει απαραίτητα με την ενεργειακή πηγή του συστήματος, αλλά με την τοπολογία. Έτσι είναι δυνατόν να αλλάξει η μορφή της πηγής χρησιμοποιώντας παθητικά στοιχεία. Οι αντιστροφείς πηγής τάσης έχουν μια χωρητικότητα παράλληλα συνδεδεμένη με την πηγή, ενώ οι αντιστροφείς πηγής έντασης ένα πηνίο σε σειρά με την πηγή.

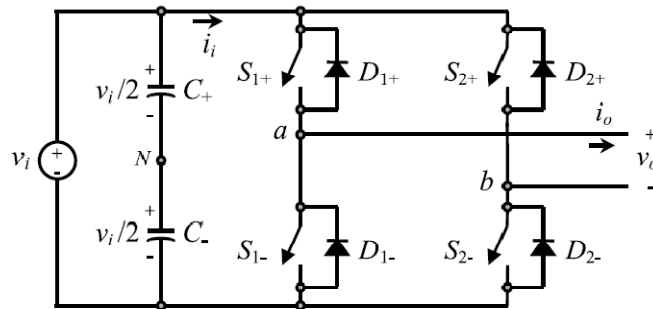
4.5.1 Μονοφασικός αντιστροφείας

Οι μονοφασικοί αντιστροφείς χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την τοπολογία τους σε αντιστροφείς ημιγέφυρας και πλήρους γέφυρας. Οι πρώτοι υστερούν σαφώς για αυτό και σε εφαρμογές ΑΠΕ χρησιμοποιούνται οι αντιστροφείς πλήρους γέφυρας (Σχήμα 4.16).

Διάφορες τεχνικές ελέγχου, υλοποιούν διαφορετικές κυματομορφές εξόδου της εναλλασσόμενης τάσης, στην εργασία όμως αυτή θα εστιάσουμε το ενδιαφέρον στους μονοφασικούς αντιστροφείς με έλεγχο SPWM.

Διαμόρφωση με την τεχνική SPWM

Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς κυματομορφής έξοδος, η οποία μπορεί να ελεγχθεί τόσο κατά πλάτος όσο και κατά συχνότητα, καθώς και να μειωθεί η επίδραση των αρμονικών στην έξοδο. Είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο στα συστήματα σύνδεσης πηγών ΑΠΕ και δικτύου χαμηλής τάσης.



Σχήμα 4.16 Τοπολογία μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας ελεγχόμενου από πηγή τάσης.

Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με την τεχνική SPWM, δημιουργούνται δύο κυματομορφές. Μια τριγωνική κυματομορφή πλάτους v_{Δ} , η οποία έχει το ρόλο του φορέα και μια κυματομορφή αναφοράς πλάτους v_c , η οποία έχει ημιτονοειδή μορφή. Οι κυματομορφές αυτές, οι οποίες δημιουργούνται στο κύκλωμα ελέγχου, είναι συγχρονισμένες και παράγονται από γεννήτριες κυματομορφών. Τα δύο αυτά σήματα συγκρίνονται και καθορίζουν ποιοι διακόπτες θα άγουν και για ποιο χρονικό διάστημα. Η συχνότητα f_{Δ} της τριγωνικής κυματομορφής ονομάζεται φέρουσα συχνότητα (ή συχνότητα μετάβασης), και είναι αυτή που καθορίζει την συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα. Το σήμα αναφοράς v_c χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής των διακοπών και έχει συχνότητα f_c . Αυτή ονομάζεται συχνότητα διαμόρφωσης και είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Η παραγόμενη αυτή τάση, δεν είναι τέλεια ημιτονοειδής, αλλά περιέχει και αρμονικές συνιστώσες της συχνότητας διαμόρφωσης f_c .

Ορίζεται ο **συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας** m_f ως ο λόγος της φέρουσας συχνότητας προς τη συχνότητα διαμόρφωσης:

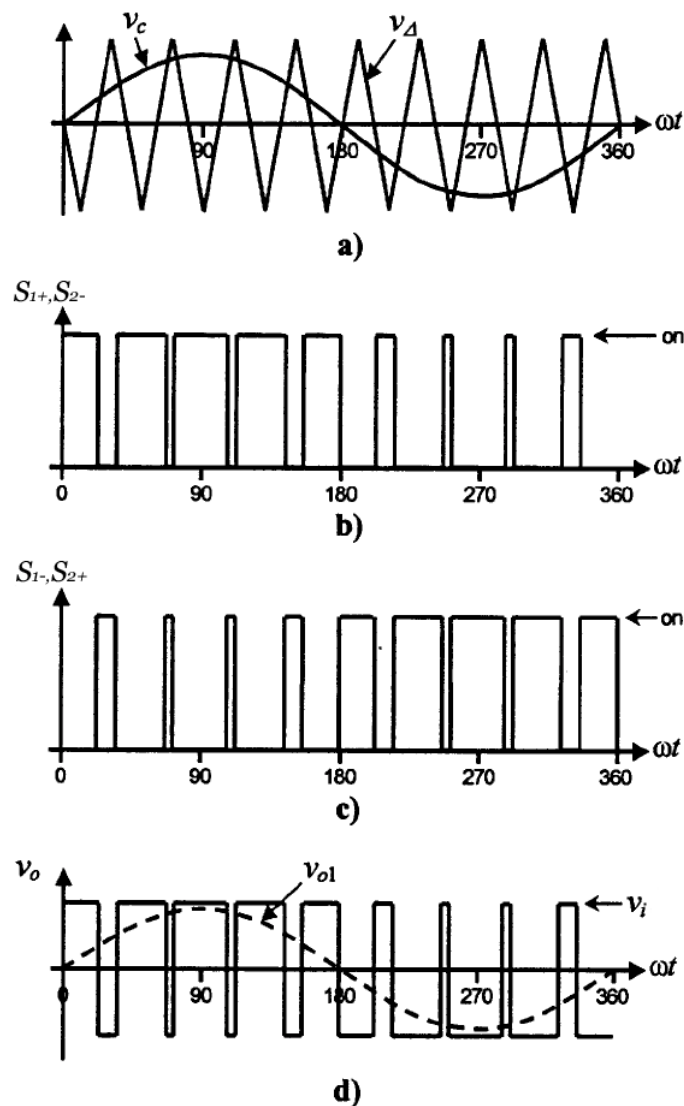
$$m_f = \frac{f_{\Delta}}{f_c} \quad (4.16)$$

Ομοίως ορίζεται και ο **συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους** ως ο λόγος του πλάτους του σήματος ελέγχου προς το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής:

$$m_a = \frac{v_c}{v_{\Delta}} \quad (4.17)$$

Πίνακας 4.1 Διακοπτικές καταστάσεις για αντιστροφή πλήρους γέφυρας.

α/α	Κατάσταση	v_a	v_b	v_o
1	S_{1+}, S_{2-} ON S_{1-}, S_{2+} OFF	$v/2$	$-v/2$	v
2	S_{1-}, S_{2+} ON S_{1+}, S_{2-} OFF	$-v/2$	$v/2$	$-v$
3	S_{1+}, S_{2+} ON S_{1-}, S_{2-} OFF	$v/2$	$v/2$	0
4	S_{1-}, S_{2-} ON S_{1+}, S_{2+} OFF	$-v/2$	$-v/2$	0



Σχήμα 4.17 Διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου **a)** Σήμα φορέα και σήμα αναφοράς, **b)** Καταστάσεις διακοπών S_{1+}, S_{2-} , **c)** Καταστάσεις διακοπών S_{1-}, S_{2+} , **d)** Εναλλασσόμενη τάση εξόδου.

Στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας του σχήματος 4.16 δεν πρέπει να είναι ταυτόχρονα κλειστοί οι διακόπτες του ίδιου κλάδου, γιατί τότε προκύπτει βραχυκύκλωμα στη πλευρά DC. Δηλαδή πρέπει να αποφευχθεί η κατάσταση στην οποία οι S_{1+} και S_{1-} είναι κλειστοί ταυτόχρονα και αντίστοιχα η κατάσταση στην οποία οι S_{2+} και S_{2-} είναι κλειστοί. Υπάρχουν τέσσερις δυνατοί συνδυασμοί για τους διακόπτες, οι οποίοι περιγράφονται στον πίνακα 4.1.

Η διαμόρφωση μπορεί να γίνει είτε με διπολική τάση εξόδου είτε με μονοπολική.

A. Διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου

Κατά την περίπτωση ελέγχου αυτή, τα ζευγάρια των διακοπών S_{1+}, S_{2-} και S_{1-}, S_{2+} αλλάζουν καταστάσεις μαζί. Δηλαδή είναι πιθανές μόνο οι καταστάσεις 1 και 2 του πίνακα 4.1 και τα προηγούμενα ζευγάρια θα έχουν τους ίδιους παλμούς έναυσης (Σχήμα 4.17). Τα δύο ζεύγη διακοπών αυτά ελέγχονται με βάση τη σύγκριση των κυματομορφών v_C και v_Δ , και ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος εξόδου i_o , προκύπτει τάση εξόδου:

- $v_o = v_i$ όταν $v_C > v_\Delta$ και οι διακόπτες S_{1+}, S_{2-} άγουν,
- $v_o = -v_i$ όταν $v_C < v_\Delta$ και οι διακόπτες S_{1-}, S_{2+} άγουν.

Στη γραμμική περιοχή της διαμόρφωσης ($m_a < 1$), η κυματομορφή εξόδου που προκύπτει είναι ημιτονοειδούς μορφής, η οποία περιέχει μια θεμελιώδη συνιστώσα με πλάτος \hat{v}_{o1} , που δίνεται από τη σχέση:

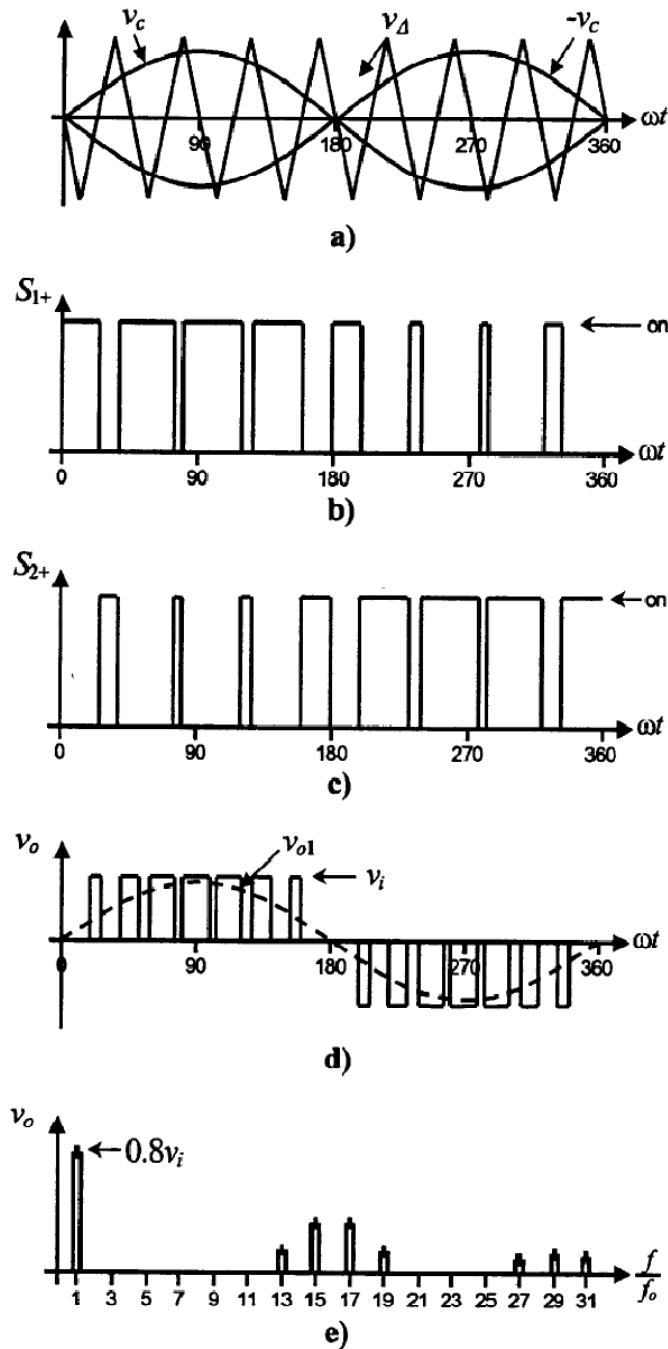
$$\hat{v}_{o1} = \hat{v}_{ab} = m_a v_i \quad (4.18)$$

Όταν ο συντελεστής m_a είναι μεγαλύτερος της μονάδας έχουμε υπερδιαμόρφωση, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου v_o να περιέχει περισσότερες αρμονικές στις πλευρικές ζώνες σε σύγκριση με τη γραμμική περιοχή. Για μεγάλες τιμές του λόγου m_a , η κυματομορφή εξόδου του αντιστροφέα εκφυλίζεται σε τετραγωνική. Τότε η τάση εξόδου λαμβάνει τιμές:

$$v_i < \hat{v}_{o1} = \hat{v}_{ab} < \frac{4}{\pi} \cdot v_i \quad (4.19)$$

B. Διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου

Σε αντίθεση με την διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου, η μονοπολική χρησιμοποιεί και τις τέσσερις διακοπτικές καταστάσεις του πίνακα 4.1. Με αυτό τον τρόπο η εναλλασσόμενη τάση εξόδου μπορεί να πάρει τις τρεις τιμές που φαίνονται στον ίδιο πίνακα, δηλαδή $v, -v, 0$. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται εκτός από το σήμα αναφοράς v_C και άλλο ένα με αντίθετο πρόσημο $-v_C$ (Σχήμα 4.18).



Σχήμα 4.18 Διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου α) Σήμα φορέα και σήματα αναφοράς, β) Κατάσταση διακόπτη S_{1+} , γ) Κατάσταση διακόπτη S_{2+} , δ) Εναλλασσόμενη τάση εξόδου, ε) Κατανομή συχνοτήτων τάσης εξόδου.

Στον κλάδο 1 του μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας του σχήματος 4.16 συγκρίνεται το σήμα αναφοράς v_c με το v_Δ , ενώ στον κλάδο 2 γίνεται σύγκριση μεταξύ του $-v_c$ και του v_Δ . Έτσι για το σκέλος 1 προκύπτει:

- $v_{aN} = v_i$ όταν $v_c > v_\Delta$ και ο διακόπτης S_{1+} άγει,
- $v_{aN} = 0$ όταν $v_c < v_\Delta$ και ο διακόπτης S_{1-} άγει,

ενώ για το σκέλος 2:

- $v_{bN} = v_i$ όταν $-v_C > v_\Delta$ και ο διακόπτης S_{2+} άγει,
- $v_{bN} = 0$ όταν $-v_C < v_\Delta$ και ο διακόπτης S_{2-} άγει.

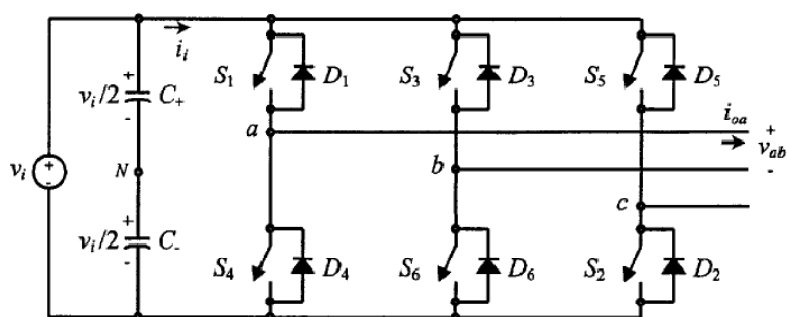
Παρόμοια συμπεράσματα με την περίπτωση της διπολικής διαμόρφωσης μπορούν να εξαχθούν και σε αυτή την περίπτωση όσον αφορά το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου και όσον αφορά τη λειτουργία για μικρές και μεγάλες τιμές της παραμέτρου m_f και για την περίπτωση της υπερδιαμόρφωσης. Όμως επειδή οι τάσεις v_{aN} και v_{bN} αν και έχουν το ίδιο πλάτος, εμφανίζουν διαφορά φάσης 180° , η τάση εξόδου δεν θα περιέχει άρτιες αρμονικές. Έτσι αν επιλεγεί το m_f να είναι περιττό, τότε οι αρμονικές στην έξοδο του αντιστροφέα εμφανίζονται σε κανονικοποιημένες περιττές συχνότητες f_h γύρω από το διπλάσιο της κανονικοποιημένης συχνότητας m_f και των πολλαπλασίων της (Σχήμα 4.18ε). Συγκεκριμένα έχουμε:

$$h = l \cdot m_f \pm k \quad l = 2, 4, \dots \quad (4.20)$$

όπου $k = 1, 3, 5, \dots$. Το γεγονός αυτό προσδίδει ένα πλεονέκτημα στη τεχνική της διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου, έναντι της διαμόρφωσης με διπολική τάση, καθώς οι αρμονικές στην έξοδο εμφανίζονται σε μεγαλύτερες συχνότητες, γεγονός που συνεπάγεται μικρότερο και φθηνότερο φίλτρο.

4.5.2 Τριφασικός αντιστροφέας

Οι τριφασικοί αντιστροφείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μέσης και υψηλής ισχύος. Σκοπός τους είναι να παρέχουν μια τριφασική πηγή τάσης ή έντασης, όπου το πλάτος, η φάση και η συχνότητα να είναι ανά πάσα στιγμή ελεγχόμενα. Η τοπολογία ενός τριφασικού αντιστροφέα ελεγχόμενου από πηγή τάσης φαίνεται στο σχήμα 4.19, ενώ οι επιτρεπόμενοι συνδυασμοί των καταστάσεων των διακοπών δίνονται στον πίνακα 4.2.



Σχήμα 4.19 Τοπολογία τριφασικού αντιστροφέα ελεγχόμενου από πηγή τάσης.

Παρατηρούμαι ότι υπάρχουν οκτώ επιτρεπόμενες διακοπτικές καταστάσεις. Όπως και στον μονοφασικό αντιστροφέα, έτσι και εδώ, δεν γίνεται οι διακόπτες του ίδιου κλάδου να είναι ταυτόχρονα κλειστοί, καθώς τότε δημιουργείται βραχυκύκλωμα στη πλευρά DC. Ακόμα σε περίπτωση που οι διακόπτες αυτοί είναι ταυτόχρονα ανοιχτοί τότε καταλήγουμε σε απροσδιόριστες καταστάσεις, για αυτό και οι καταστάσεις αυτές είναι μη επιτρεπόμενες. Τέλος υπάρχουν δύο καταστάσεις, που η τάση στη πλευρά AC μηδενίζεται.

Πίνακας 4.2 Διακοπτικές καταστάσεις για τριφασικό αντιστροφέα.

α/α	Κατάσταση		v_a	v_b	v_{ab}
1	S_1, S_2, S_6 ON	S_4, S_5, S_3 OFF	$-v$	0	v
2	S_2, S_3, S_1 ON	S_5, S_6, S_4 OFF	$-v$	v	0
3	S_3, S_4, S_2 ON	S_6, S_1, S_5 OFF	0	v	$-v$
4	S_4, S_5, S_3 ON	S_1, S_2, S_6 OFF	v	0	$-v$
5	S_5, S_6, S_4 ON	S_2, S_3, S_1 OFF	v	$-v$	0
6	S_6, S_1, S_5 ON	S_3, S_4, S_2 OFF	0	$-v$	v
7	S_1, S_3, S_5 ON	S_4, S_6, S_2 OFF	0	0	0
8	S_4, S_6, S_2 ON	S_1, S_3, S_5 OFF	0	0	0

Διαμόρφωση με την τεχνική SPWM

Η τεχνική αυτή είναι μια επέκταση αυτής που παρουσιάστηκε στους μονοφασικούς αντιστροφείς. Για τον τριφασικό αντιστροφέα χρησιμοποιούνται τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς με διαφορά φάσης 120° και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα. Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς είναι μεταβλητό σε σχέση με το πλάτος της κυματομορφής του φορέα, το οποίο παραμένει σταθερό. Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ενός ιδανικού τριφασικού αντιστροφέα.

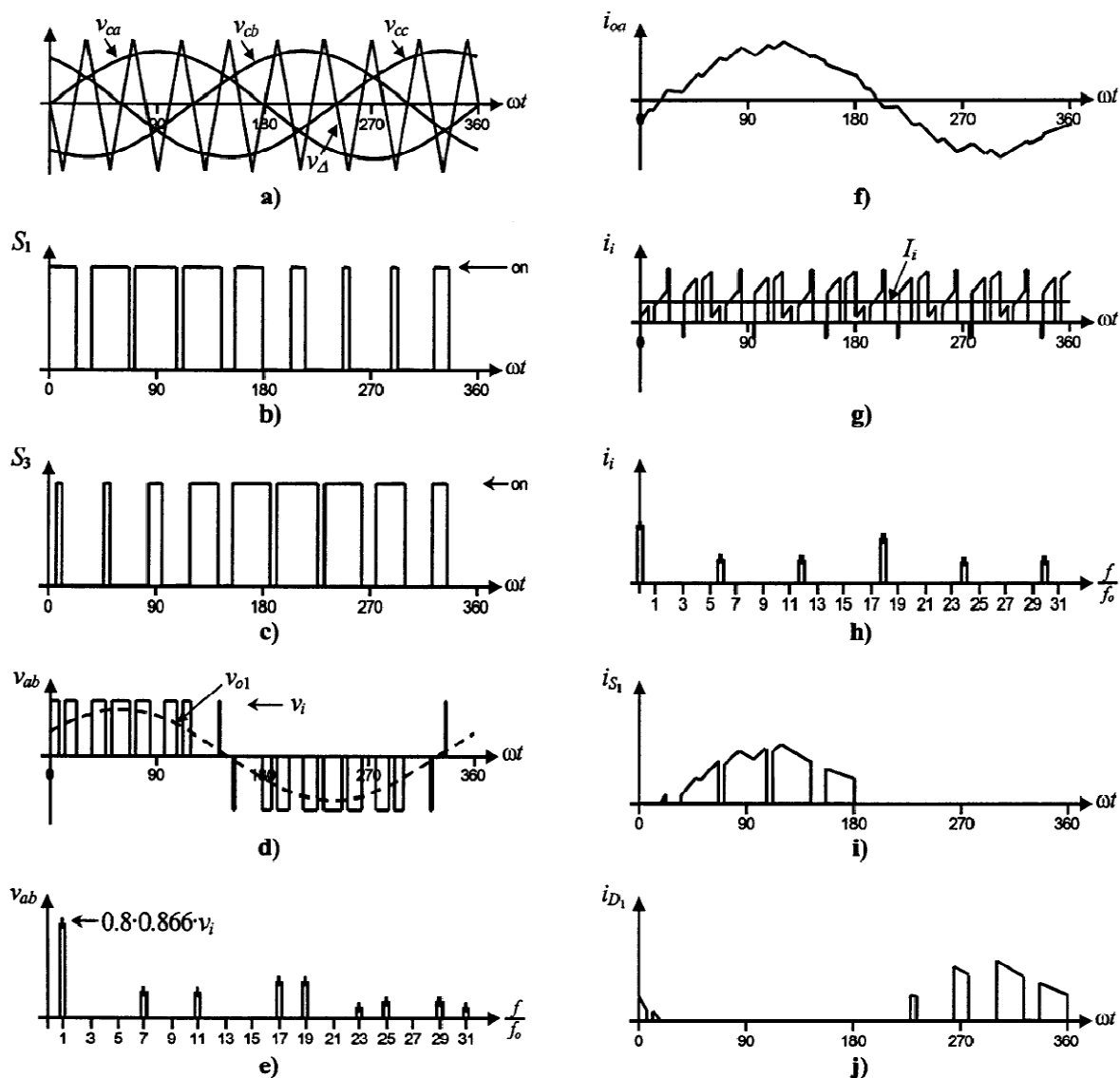
Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας επιλέγεται να είναι περιττό πολλαπλάσιο του 3. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι φασικές τάσεις να μην έχουν άρτιες αρμονικές και επιπλέον οι αρμονικές σε συχνότητες πολλαπλάσιες του 3, κάθε φάσης, να είναι ίδιες τόσο σε πλάτος όσο και σε φάση. Άρα, επιπλέον οι φασικές τάσεις δεν περιέχουν αρμονικές σε συχνότητες πολλαπλάσιες του 3. Τότε οι αρμονικές στην έξοδο του αντιστροφέα εμφανίζονται σε κανονικοποιημένες συχνότητες f_h γύρω από την κανονικοποιημένη συχνότητα m_f και τα πολλαπλάσιά της (Σχήμα 4.18e).

Συγκεκριμένα:

$$h = l \cdot m_f \pm k \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad (4.21)$$

Όπου $l = 1, 3, 5, \dots$ για $k = 2, 4, 6, \dots$ και $l = 2, 4, 6, \dots$ για $k = 1, 5, 7, \dots$, έτσι ώστε το h να μην είναι πολλαπλάσιο του 3. Δηλαδή οι αρμονικές θα εμφανιστούν σε συχνότητες:

$$m_f \pm 2, m_f \pm 4, \dots, 2m_f \pm 1, 2m_f \pm 5, \dots, 3m_f \pm 2, 3m_f \pm 4, \dots, \text{κτλ.} \quad (4.22)$$



Σχήμα 4.20 Τριφασικός αντιστροφέας VSI, διαμόρφωση SPWM a) Σήμα φορέα και σήμα αναφοράς, b), c) Καταστάσεις διακοπών S_1, S_3 , d) Εναλλασσόμενη τάση εξόδου, e) Κατανομή συχνοτήτων τάσης εξόδου, f) Ρεύμα εξόδου g) Συνεχές ρεύμα, h) Κατανομή συχνοτήτων συνεχούς ρεύματος, i) Ρεύμα διακόπτη S_1 , j) Ρεύμα διόδου D_1 .

Στη γραμμική περιοχή διαμόρφωσης ($m_a < 1$), το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι:

$$\hat{v}_{ab,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} m_a v_i \quad (4.23)$$

Ενώ στην περίπτωση της υπερδιαμόρφωση προκύπτει:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} v_i < \hat{v}_{ab,1} < \frac{4\sqrt{3}}{\pi} v_i \quad (4.24)$$

Όπου το άνω όριο περιγράφει την περίπτωση του εκφυλλισμού.

4.5.3 Ηλεκτρική απομόνωση των μετατροπέων ισχύος

Πιο πάνω περιγράφηκαν οι βασικές θεωρητικές τοπολογίες με τις οποίες γίνεται η μετατροπή μιας συνεχούς τάσης εισόδου σε ημιτονική τάση εξόδου, ελεγχόμενη κατά πλάτος και συχνότητα. Διάφορες εφαρμογές απαιτούν είτε την ύπαρξη μόνο μιας γέφυρας DC/AC, για την μετατροπή της εισερχόμενης τάσης κατευθείαν σε εναλλασσόμενη, είτε την μετατροπή της (μη σταθερής) DC εισερχόμενης τάσης σε μια στάθμη σταθερής τιμής και στη συνέχεια την μετατροπή αυτής σε εναλλασσόμενη. Ένας αντιστροφείας ωστόσο δεν περιλαμβάνει μόνο τις διατάξεις που επιτυγχάνουν αυτή τη μετατροπή, αλλά και σειρά άλλων που αφορούν τον έλεγχο, την προστασία και την βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης τάσης.

Ασφάλειες, αυτόματοι διακόπτες, και κυκλώματα εντοπισμού υπερτάσεων αποτελούν διατάξεις προστασίας του αντιστροφεία. Φίλτρα πηνίων και πυκνωτών χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση των ρευμάτων εισόδου και εξόδου.

Πολύ σημαντική είναι και η παρεμβολή ενός μετασχηματιστή, έτσι ώστε να υπάρχει πλήρης ηλεκτρική απομόνωση της πλευράς εισόδου από την έξοδο. Ένας μετασχηματιστής απομόνωσης χαμηλής συχνότητας μπορεί να τοποθετείται κατευθείαν στο στάδιο εξόδου, οπότε η παραγόμενη ημιτονική κυματομορφή οδηγείται μέσω αυτού στο κύκλωμα της εναλλασσόμενης τάσης (π.χ. ηλεκτρικό δίκτυο πόλης). Μεγάλη συζήτηση διεξάγεται σχετικά με το αν είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μετασχηματιστή απομόνωσης, σε αντιστροφείς που συνδέονται με το κεντρικό δίκτυο. Κανονισμοί μερικών χωρών καθιστούν υποχρεωτική την ύπαρξη αυτού στους αντιστροφείς που συνδέονται στο δίκτυο τους. Είναι πολύ πιθανό όταν δεν υπάρχει μετασχηματιστής απομόνωσης, είτε σε κανονική λειτουργία, είτε πολύ περισσότερο σε περιπτώσεις σφάλματος, ο αντιστροφείας να εισάγει μια DC συνιστώσα ρεύματος στην ημιτονική κυματομορφή εξόδου του, κάτι εντελώς ανεπιθύμητο για το ηλεκτρικό δίκτυο και τις συσκευές που βρίσκονται κοντά, προκαλώντας υπερθέρμανση στα τυλίγματα κινητήρων και μετασχηματιστών ή παρεμβολές σε άλλες συσκευές. Η παρεμβολή αυτού του μετασχηματιστή λειτουργεί ως ένα αδιαπέραστο φίλτρο τυχόν DC ρευμάτων. Η ύπαρξη μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας, επιτρέπει απόδοση του αντιστροφεία μέχρι 92%.

Μια διαφορετική τοπολογία που επιτρέπει την γαλβανική απομόνωση της DC από την AC πλευρά, είναι η τοποθέτηση μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας πριν τη γέφυρα παραγωγής της ημιτονοειδούς τάσης. Κατά τη διάταξη αυτή, η εισερχόμενη DC τάση εισέρχεται σε μια διάταξη DC/DC μετατροπέα η οποία και λειτουργεί με υψηλή διακοπτική συχνότητα. Η συνεχής τάση εισόδου μετατρέπεται με γέφυρα διακοπών σε τάση υψηλής συχνότητας και έπειτα ανορθώνεται ώστε να μετατραπεί σε DC τάση ελεγχόμενου πλάτους. Στο ενδιάμεσο στάδιο του μετατροπέα αυτού, είναι δυνατόν να παρεμβληθεί ο υψίσυχνος μετασχηματιστής. Έτσι πάλι επιτυγχάνεται απομόνωση της εισόδου από την έξοδο του αντιστροφεία, η οποία ωστόσο πάλι είναι πιθανό να μην αποκλείει την ενδεχόμενη έγχυση DC ρεύματος,

από το μετέπειτα στάδιο της PWM γέφυρας DC/AC, στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο με την τοπολογία αυτή επιτυγχάνονται αποδόσεις λίγο μεγαλύτερες (της τάξης του 94%), καθώς ο μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας, λόγω της ισχυρής μαγνητικής του σύζευξης, έχει μικρότερες απώλειες απ' ό,τι ένας που λειτουργεί στα 50Hz. Παράλληλα μειώνονται ο όγκος, το βάρος και το κόστος του μετασχηματιστή εν συγκρίσει με αυτά ενός χαμηλής συχνότητας.

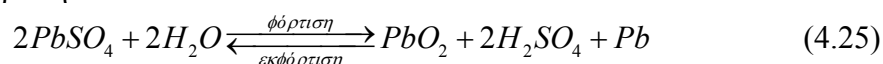
4.6 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Οι συσσωρευτές παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπου αποτελούν και ένα αρκετά μεγάλο κομμάτι της οικονομικής επιβάρυνσης. Στα διασυνδεδεμένα συστήματα δεν υπάρχει λόγος χρησιμοποίησης συσσωρευτών, εκτός και αν το διασυνδεδεμένο σύστημα τροφοδοτεί άμεσα κάποια φορτία (τα φορτία δηλαδή αυτά τροφοδοτούνται κατευθείαν από το φ/β σύστημα και όχι μέσω του κεντρικού δικτύου) και τα οποία θεωρούνται ότι δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να μείνουν εκτός λειτουργίας σε μια ενδεχόμενη βλάβη.

Τα αυτόνομα φ/β συστήματα επομένως χρειάζεται να αποθηκεύουν μια ποσότητα από την περίσσεια της ηλεκτρικής τους παραγωγής, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή της φ/β γεννήτριας. Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να προνοείται να αποθηκεύεται, εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες και απαιτήσεις και κυρίως από το μέγιστο πλήθος των πιθανών συνεχόμενων ημερών συννεφιάς, τις αιχμές της κατανάλωσης και τον βαθμό αξιοπιστίας που θα πρέπει να παρουσιάζει το σύστημα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ή όχι βοηθητικών ενεργειακών πηγών.

Φόρτιση – Εκφόρτιση

Υπάρχουν διάφορων τύπων ηλεκτρικοί συσσωρευτές, ανάλογα με το υλικό των ηλεκτροδίων τους. Έχει όμως διαπιστωθεί ότι οικονομικότεροι για χρησιμοποίηση σε φ/β συστήματα είναι οι συσσωρευτές μολύβδου. Τα ηλεκτρόδιά τους είναι πλάκες από κράματα μολύβδου βυθισμένες σε διάλυμα θειικού οξέος. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε μια αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία, που περιγράφεται από την αμφίδρομη αντίδραση.



Συγκεκριμένα οι συσσωρευτές αποτελούνται από κυψελίδες, δηλαδή ζεύγη μονωμένων μεταξύ τους πλακών βυθισμένων στο ίδιο διάλυμα θειικού οξέος. Οι πλάκες του αφόρτιστου συσσωρευτή καλύπτονται από θειικό μόλυβδο ($PbSO_4$). Κατά το στάδιο της φόρτισης, διασπάται ο θειικός μόλυβδος και σχηματίζεται οξείδιο του μολύβδου (PbO_2) στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός (Pb) στις πλάκες των αρνητικών. Αντίστροφα κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και

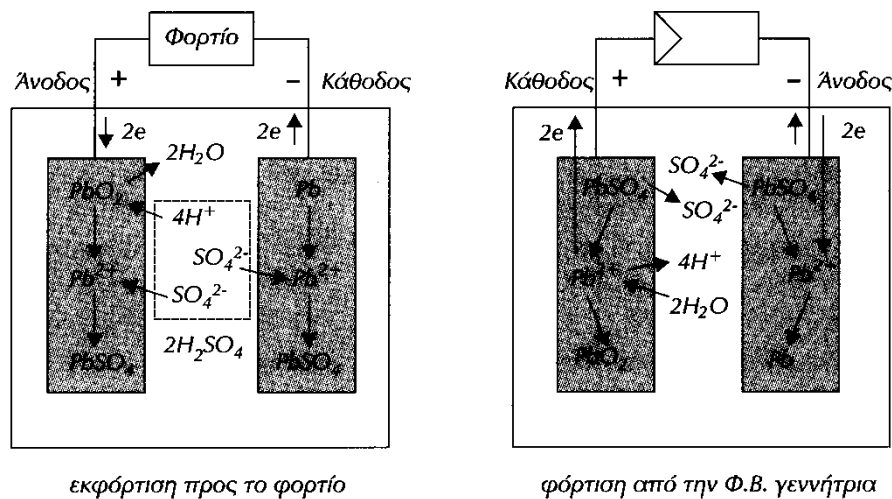
την τροφοδότηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων, ο μολύβδος οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων προς ιόντα Pb^{2+} και δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα:



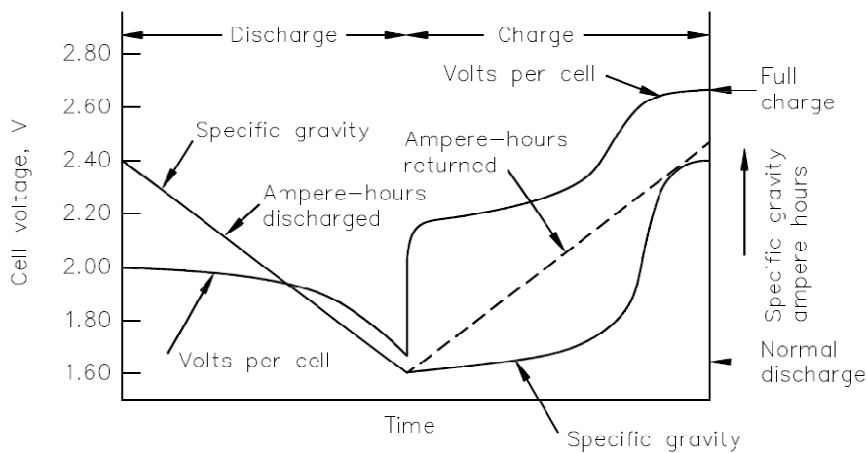
Ενώ στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων ο Pb^{4+} ανάγεται προς Pb^{2+} , παίρνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα:



Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλαδή τα ιόντα Pb^{2+} , ενώνονται με θειικά ιόντα (SO_4^{2-}) από το διάλυμα και ξανασχηματίζουν τον θεικό μολύβδο πάνω στις πλάκες των κυψελίδων. Έτσι καταναλώνεται θεικό οξύ και αραιώνεται το διάλυμα στις κυψελίδες. Με την φόρτιση όμως που ακολουθεί, τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα, όπως δείχνει η αμφίδρομη αντίδραση και η περιεκτικότητά του αποκαθίσταται στην κανονική τιμή.



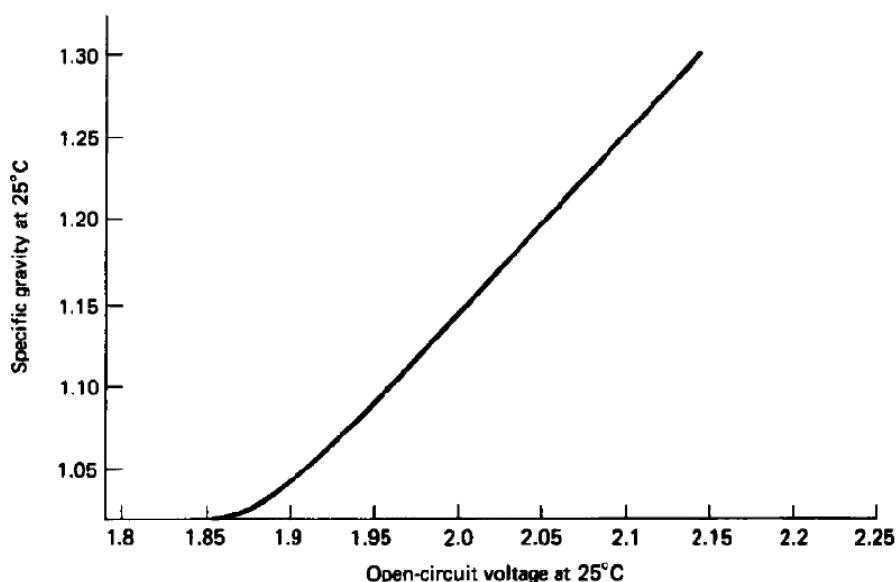
Σχήμα 4.21 Λειτουργία συσσωρευτή μολύβδου-οξέος.



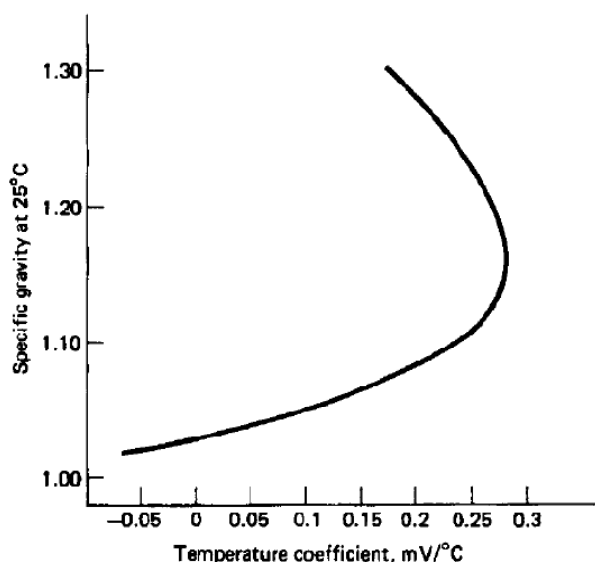
Σχήμα 4.22 Τυπικές χαρακτηριστικές τάσης και ειδικού βάρους στη συνεχόμενη φόρτιση και εκφόρτιση.

Χαρακτηριστικές ανοιχτού κυκλώματος

Από τις παραπάνω αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στον συσσωρευτή, η μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος που μπορεί να αναπτυχθεί σε μια κυψέλη μολύβδου είναι 2,041V.



Σχήμα 4.23 Ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη ενός συσσωρευτή μολύβδου σε συνάρτηση με τη τάση ανοιχτοκύκλωσης.



Σχήμα 4.24 Ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη ενός συσσωρευτή μολύβδου σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος, σε σχέση με το θερμοκρασιακό συντελεστή.

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για την λειτουργία μιας μπαταρίας είναι το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη. Χρησιμοποιείται ως ένας δείκτης της κατάστασης

φόρτισης, στην οποία βρίσκεται μια κυψελίδα ή μια μπαταρία. Η τάση ανοιχτοκύκλωματος για ένα συσσωρευτή είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εξίσωση:

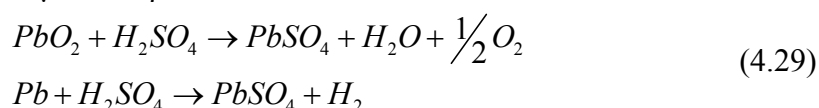
$$V_{oc} = 2,047 + \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{a_{H_2SO_4}}{a_{H_2O}} \right) \quad (4.28)$$

Όπου R η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή, T η θερμοκρασία και F η σταθερά του Faraday (96,487 Coulomb). Στο σχήμα 4.23 φαίνεται το διάγραμμα της τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε σχέση με την συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη σε θερμοκρασία 25 °C, το οποίο εμφανίζει μια γραμμική συμπεριφορά για τιμές του ειδικού βάρους μεγαλύτερες από 1,10, ενώ για μικρότερες τιμές εμφανίζει έντονη απόκλιση από τη γραμμικότητα. Ενώ η επίδραση της θερμοκρασίας στη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη παρουσιάζεται στο σχήμα 4.24.

Αυτό-εκφόρτιση

Ακόμα και αν ένας φορτισμένος συσσωρευτής παραμείνει μη συνδεδεμένος με κάποιο εξωτερικό φορτίο για ένα χρονικό διάστημα, εμφανίζει μείωση της στάθμης φόρτισής του. Ο ρυθμός αυτός της αυτό-εκφόρτισης σε μια κυψελίδα μολύβδου είναι αρκετά μεγάλος, αλλά μπορεί να μειωθεί αρκετά με κατάλληλες σχεδιαστικές παρεμβάσεις.

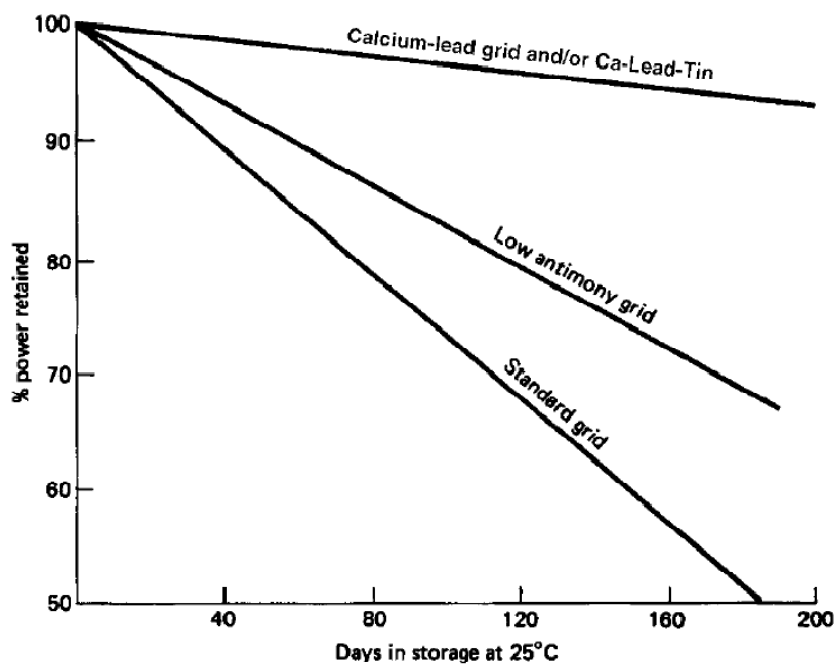
Ο μολύβδος και το διοξείδιο του μολύβδου είναι θερμοδυναμικά ασταθή και αντιδρούν με τον ηλεκτρολύτη. Στο θετικό ηλεκτρόδιο παράγεται οξυγόνο και στο αρνητικό υδρογόνο, με ρυθμό που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση, σύμφωνα με τα παρακάτω:



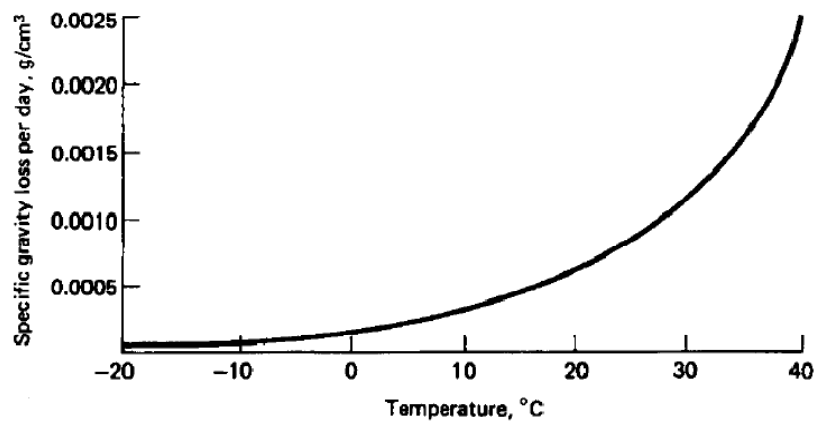
Η πρώτη αντίδραση συμβαίνει στο θετικό ηλεκτρόδιο και ο μηχανισμός αυτό-εκφόρτισης είναι εν γένει μικρός (μικρότερος από 0,5% την ημέρα στους 25 °C). Αντίθετα η δεύτερη αντίδραση στο αρνητικό ηλεκτρόδιο έχει ταχύτερο ρυθμό, ειδικά σε κυψελίδες με καταλυτικά μεταλλικά ιόντα. Για έναν καινούργιο συσσωρευτή με μείγμα μολύβδου-αντιμονίου οι απώλειες φόρτισης ανέρχονται περίπου στο 1% την ημέρα, αλλά οι απώλειες αυτές αυξάνονται κατά ένα παράγοντα που κυμαίνεται μεταξύ του 2 και του 5 καθώς ο συσσωρευτής παλιώνει. Συσσωρευτές χωρίς αντιμόνιο εμφανίζουν μικρότερες απώλειες 0,5% την ημέρα, χωρίς να αυξάνεται ο ρυθμός αυτός με την πάροδο του χρόνου (Σχήμα 4.25α). Επειδή όμως το αντιμόνιο εμφανίζει και θετικά αποτελέσματα, η πλήρης απουσία του δεν είναι επιθυμητή και για αυτό ένας χρήσιμος συμβιβασμός προκύπτει αν χρησιμοποιηθούν μείγματα με χαμηλή περιεκτικότητα αντιμονίου.

Η ρυθμός αυτό-εκφόρτισης εξαρτάται ακόμα από την θερμοκρασία όπως φαίνεται στο σχήμα 4.25β. Παρατηρείται απότομη αύξηση των απωλειών για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 30 °C και για αυτό συνίσταται η διατήρηση των

συσσωρευτών σε μέρη με θερμοκρασία μικρότερη από αυτή, όχι όμως μικρότερη των 5 °C, καθώς μετά δημιουργούνται προβλήματα κατά την κανονική λειτουργία τους.



(a)



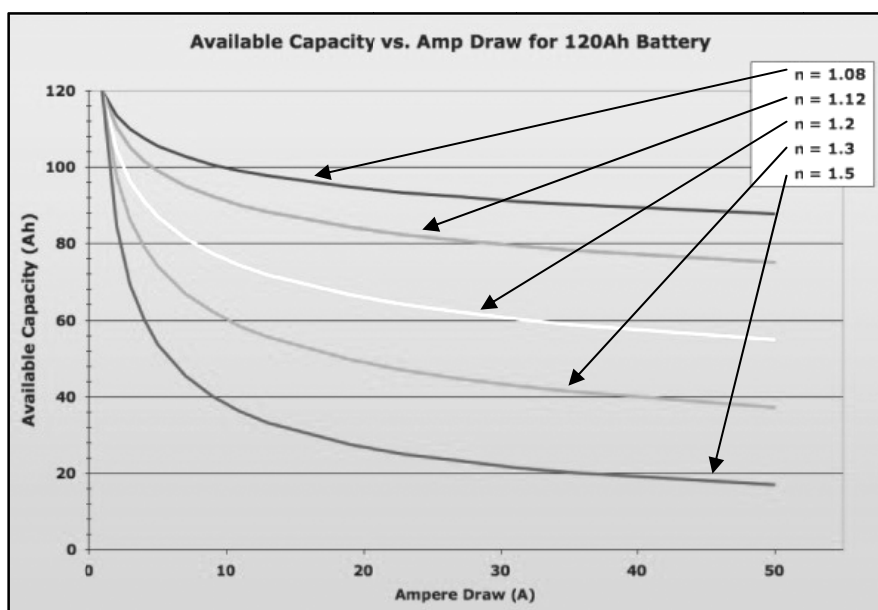
(b)

Σχήμα 4.25 Φαινόμενο αυτό-εκφόρτισης (a) Εναπομένουσα ενέργεια σε συνάρτηση με τον χρόνο σε θερμοκρασία 25 °C και για 3 διαφορετικά μείγματα συσσωρευτών μολύβδου, (b) Απώλειες ειδικού βάρους ανά μέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Χωρητικότητα συσσωρευτών

Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μετράται συνήθως σε αμπερώρια (Ah), που είναι σε ιδανικές συνθήκες το γινόμενο της μέσης έντασης του ρεύματος, που δίνει ο συσσωρευτής, ανεξάρτητα από την τάση του, επί το πλήθος των ωρών μέχρι να εκφορτιστεί, ξεκινώντας από πλήρη φόρτιση. Αντίθετα η ποσότητα ηλεκτρικής

ενέργειας, που μπορεί να αποθηκεύσει ένας συσσωρευτής εξαρτάται από την τάση του. Οι κατασκευαστές συνήθως αναφέρουν την χωρητικότητα σε αμπερώρια (Ah) για έναν συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης. Για παράδειγμα αν η χωρητικότητα μιας μπαταρίας δίνεται 200 Ah για χρόνο εκφόρτισης 10 ωρών, αυτό σημαίνει ότι η μπαταρία για αυτό το χρονικό διάστημα θα δίνει 20A ρεύματος υπό ιδανικές συνθήκες (25 °C).



Σχήμα 4.26 Φαινόμενο Peukert. Χωρητικότητα ενός συσσωρευτή του ρεύματος εκφόρτισης για διαφορετικές τιμές τις σταθεράς n.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η χωρητικότητα μιας μπαταρίας εξαρτάται από τον ρυθμό εκφόρτισής της. Εξήγηση για αυτή τη σχέση χωρητικότητας – ρυθμού εκφόρτισης δίνει το φαινόμενο Peukert. Σύμφωνα με το φαινόμενο Peukert, ο χρόνος για την εκφόρτιση ενός συσσωρευτή μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το ρεύμα με το οποίο γίνεται αυτή η εκφόρτιση. Μια εμπειρική σχέση για το φαινόμενο Peukert είναι η εξής:

$$I^n \cdot t = K \quad (4.30)$$

όπου I το ρεύμα εκφόρτισης σε Ampere, t ο χρόνος εκφόρτισης σε sec, και K , n σταθερές που εξαρτώνται από το είδος του συσσωρευτή. Επειδή η σταθερά K κάθε συσσωρευτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη, εισάγοντας διόρθωση θερμοκρασίας θα έχουμε:

$$K = K_0(1 + a \cdot T) \quad (4.31)$$

όπου K_0 , a σταθερές και T η θερμοκρασία.

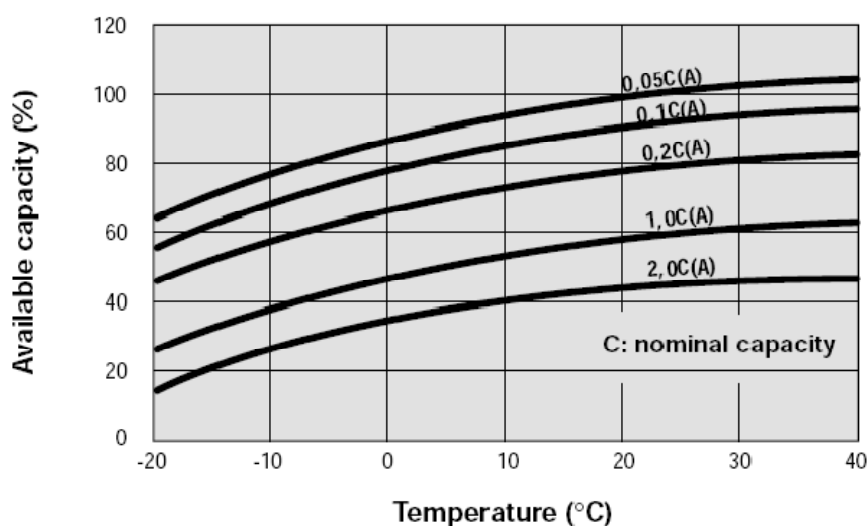
Στην εξίσωση Peukert μπορεί επιπρόσθετα να εισαχθεί και ένας παράγοντας ώστε να ληφθεί υπ' όψιν και το πάχος των ηλεκτροδίων, οπότε γίνεται:

$$I^n \left(\frac{t}{d^{2-n}} \right) = K_0(1 + a \cdot T) \quad (4.32)$$

όπου d το πάχος των πλακών του συσσωρευτή. Από τη σχέση αυτή είναι φανερή η αλληλεπίδραση μεταξύ ρεύματος εκφόρτισης, χρόνου εκφόρτισης και θερμοκρασίας. Γι' αυτό το λόγο η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή αναφέρεται πάντα συναρτήσει των ωρών που διαρκεί αυτή ή του ρεύματος εκφόρτισης, μετρημένες σε μια θερμοκρασία αναφοράς, συνήθως τους 25 °C.

Η αποθηκευμένη ενέργεια στον συσσωρευτή μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την χωρητικότητά του σε Ah επί την ονομαστική τάση αυτού. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ονομαστική αυτή χωρητικότητα δεν είναι ποτέ και η πραγματική. Λόγω της εσωτερικής αντίστασης των συσσωρευτών, συνήθως ένα 80% αυτής της ενέργειας μπορεί να εξαχθεί από ένα συσσωρευτή. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη κατά τη σχεδίαση ενός αυτόνομου συστήματος.

Ακόμα από την εξίσωση Peukert φαίνεται ότι χωρητικότητα αυξάνει με την θερμοκρασία του συσσωρευτή. Συγχρόνως όμως επιταχύνονται οι μηχανισμοί διάβρωσης και μειώνεται η διάρκεια ζωής του (Σχήμα 4.27).



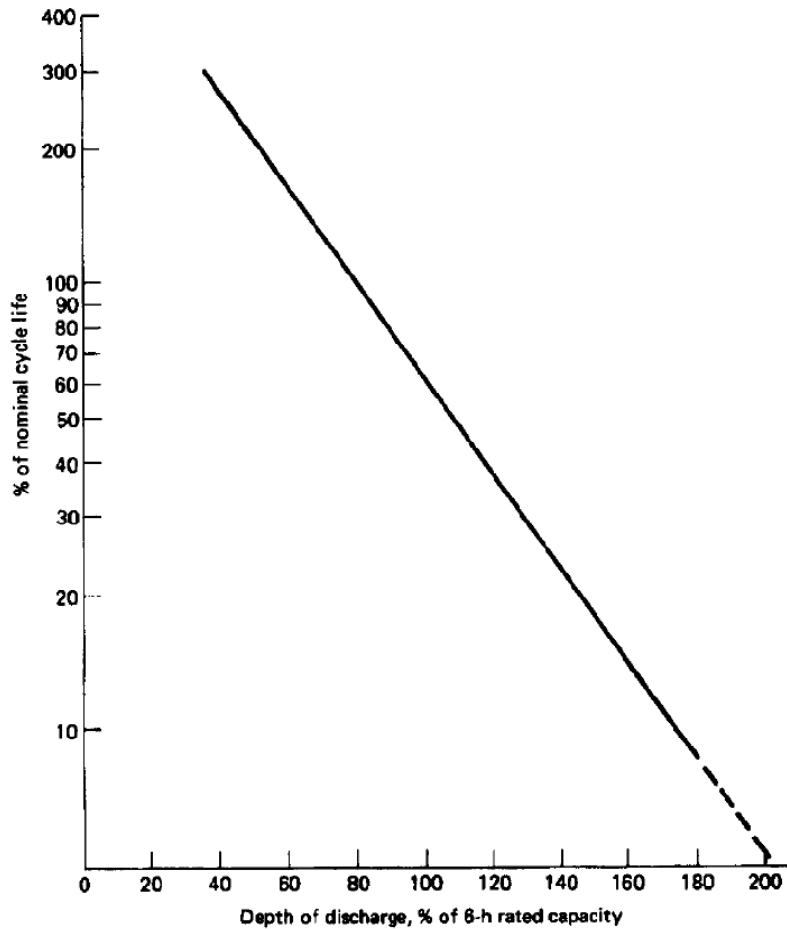
Σχήμα 4.27 Διαθέσιμη χωρητικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για διάφορες τιμές ρεύματος.

Διάρκεια ζωής

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά τη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή είναι:

- Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή.
- Το βάθος εκφόρτισης (Σχήμα 4.28). Η εκφόρτιση των συσσωρευτών πέρα από την επιτρεπόμενη από τον κατασκευαστή τιμή του, μειώνει δραστικά τόσο τη διάρκεια ζωής όσο και τη χωρητικότητα. Αν το βάθος εκφόρτισης υπερβεί το 80% τότε ο συσσωρευτής αποκλίνει από την ονομαστική διάρκεια ζωής του.
- Το ποσοστό υπερφόρτισης. Αντίστοιχα αποτελέσματα έχει η φόρτιση του συσσωρευτή πάνω από τα επιτρεπτά όρια.

- Η τάση και το ρεύμα φόρτισης. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης ένα αρχικό ρεύμα μεγάλης τιμής μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες. Το ίδιο συμβαίνει και με μια πιθανή υπέρταση.



Σχήμα 4.28 Διάρκεια ζωής ως ποσοστό της ονομαστικής, σε συνάρτηση με το βάθος εκφόρτισης.

Διαστασιολόγηση συσσωρευτή

Ένας συσσωρευτής ονομαστικής χωρητικότητας C_N , έχει αξιοποιήσιμη (ενεργό) χωρητικότητα C :

$$C = \beta \cdot C_N \quad (4.33)$$

όπου β το βάθος εκφόρτισης. Η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί και να ανακτηθεί, σε ιδανικές συνθήκες είναι:

$$E = C \cdot V = \beta \cdot C_N \cdot V \quad (4.34)$$

Ως συντελεστής απόδοσης a , ενός συσσωρευτή ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί προς την ενέργεια που έχει απορροφηθεί από την εξωτερική πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, σε κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης.

Επομένως η ενέργεια που ζητείται από τον συσσωρευτή αντιστοιχεί σε ενέργεια φόρτισης E_ϕ , που δίνεται από τη σχέση:

$$E_\phi = \frac{E}{a} \quad (4.35)$$

λόγο της σχέσης αυτής και της 4.34 η ονομαστική χωρητικότητα προκύπτει :

$$C_N = \frac{E_\phi}{\beta \cdot V} = \frac{E}{a \cdot \beta \cdot V} \quad (4.36)$$

Αν είναι γνωστή η μέση ισχύς της κατανάλωσης που απαιτείται για διάστημα μ ημερών, τότε μπορεί να υπολογιστεί η ενεργός χωρητικότητα του συσσωρευτή:

$$C_N = \frac{24 \cdot \mu}{a \cdot V} \quad (4.37)$$

4.7 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Η λειτουργία ενός ηλεκτρικού δικτύου ελέγχεται από συσκευές προστασίας και ρύθμισης της τάσης, που έχουν σκοπό την παροχή προς τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας αποδεκτής ποιότητας, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των σφαλμάτων και προσφέροντας υψηλό επίπεδο ασφάλειας. Η σύνδεση στο δίκτυο μονάδων παραγωγής πρέπει να συμβαδίζει με αυτές τις γενικές αρχές, ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών.

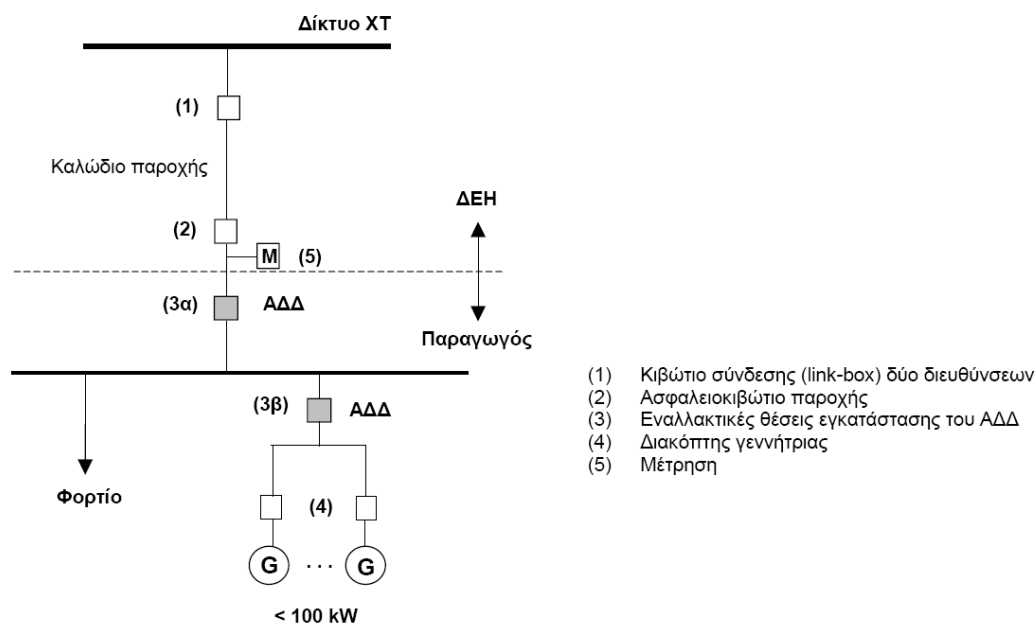
Ο τρόπος σύνδεσης μιας δεδομένης εγκατάστασης παραγωγής δεν προκύπτει μονοσήμαντα από την ονομαστική ισχύ της. Δηλαδή σταθμοί παραγωγής ίδιας ισχύος μπορεί να συνδέονται στο δίκτυο κατά τελείως διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με τα ειδικά τεχνικά τους χαρακτηριστικά, την κατά περίπτωση υφιστάμενη κατάσταση δικτύων και την προβλεπόμενη ανάπτυξή τους. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν οι ακόλουθοι δύο περιορισμοί ως προς το επίπεδο τάσης στο οποίο μπορεί να συνδεθεί μια εγκατάσταση παραγωγής, οι οποίοι εφαρμόζονται κατά την εξέταση, ασχέτως των λοιπών τεχνικών κριτηρίων:

- Εγκαταστάσεις συμφωνημένης ισχύος μεγαλύτερης των 100 kW δεν μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο XT.
- Εγκαταστάσεις συμφωνημένης ισχύος μεγαλύτερης των 20 MW δεν μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο MT.

Γενικά η επιλογή του τρόπου σύνδεσης αποτελεί αντικείμενο τεχνικοοικονομικής εξέτασης, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κεφαλαίου των έργων ενίσχυσης και επέκτασης του δικτύου και αφετέρου τις απώλειες ενέργειας κάθε τρόπου διασύνδεσης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, αλλά και άλλους παράγοντες (χρόνος και δυνατότητα κατασκευής των έργων, χρηματοδότησή τους κλπ.).

Σύνδεση στο δίκτυο ΧΤ

Η σύνδεση παραγωγών στο δίκτυο ΧΤ επιτρέπεται για εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος μέχρι 100 kW. Ανάλογα με την ισχύ των γεννητριών που θα συνδεθούν στο δίκτυο ΧΤ, εξετάζεται αν είναι δυνατή η σύνδεση χωρίς επαύξηση της παροχής του παραγωγού. Αν απαιτείται επαύξηση της παροχής, γίνεται μελέτη επάρκειας του δικτύου.



Σχήμα 4.29 Τυπική διάταξη σύνδεσης παραγωγού στο δίκτυο ΧΤ[18].

Στο Σχήμα 4.29 φαίνεται μια τυπική διάταξη σύνδεσης παραγωγού στο δίκτυο ΧΤ. Βασική απαίτηση για λόγους ασφάλειας είναι η ύπαρξη μέσω διακοπής (με ικανότητα διακοπής ρεύματος φορτίου) και ορατής απόζευξης, προσιτών ανά πάσα στιγμή στο προσωπικό της ΔΕΗ, ώστε να εξασφαλίζεται η απομόνωση του παραγωγού από το δίκτυο όταν αυτό απαιτείται από τη ΔΕΗ. Η απαίτηση ορατής απόζευξης ικανοποιείται τόσο από το κιβώτιο σύνδεσης (1), όσο και από τις ασφάλειες της παροχής (2). Για εγκαταστάσεις μικρής ισχύος τα μέσα αυτά μπορούν σε έκτακτες περιπτώσεις να χρησιμοποιηθούν και για τη διακοπή της εγκατάστασης. Σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος είναι αναγκαία η ύπαρξη διακόπτη φορτίου ή ισχύος. Το μέσο διακοπής (3) είναι ο αυτόματος διακόπτης της διασύνδεσης (ΑΔΔ). Μπορεί να τοποθετηθεί εναλλακτικά σε δύο θέσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, ανάλογα με την επιθυμία του παραγωγού. Εάν επιλεγεί η θέση (3α), τότε είναι εφικτή η απομονωμένη λειτουργία της συνολικής εγκατάστασης (εγκατάσταση παραγωγής και φορτία). Ο παραγωγός θα πρέπει να παρέχει πρόσβαση στον ΑΔΔ και στο σχετικό σύστημα προστασίας στο αρμόδιο προσωπικό της ΔΕΗ. Είναι γενικά αποδεκτό, αλλά απαιτεί προηγούμενη συμφωνία με τη ΔΕΗ, οι λειτουργίες του ΑΔΔ

να πραγματοποιούνται από τον διακόπτη και το σύστημα προστασίας των γεννητριών, όταν δεν προβλέπεται η απομονωμένη λειτουργία των εγκαταστάσεων.

Το είδος και ο αριθμός των απαιτούμενων μετρητικών διατάξεων και συσκευών ρύθμισης καθορίζονται σύμφωνα με τους όρους της σύμβασης ΔΕΗ-Παραγωγού. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, χρησιμοποιούνται μετρητικές διατάξεις χωρίς δυνατότητα αντίθετης περιστροφής και πραγματοποιείται ανεξάρτητη μέτρηση της παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας στις εγκαταστάσεις του παραγωγού. Εάν η παροχή είναι τριφασική, ο μετρητής της παρεχόμενης στο δίκτυο ενέργειας πρέπει να είναι τριφασικός, ακόμη και για μονοφασικές εγκαταστάσεις παραγωγής.

Συνθήκες ζεύξης

Για εγκαταστάσεις παραγωγής με αντιστροφείς ΣΡ/ΕΡ, η ζεύξη πρέπει να γίνεται με την πλευρά ΕΡ του μετατροπέα χωρίς τάση.

Προστασία απόζευξης

Η εγκατάσταση παραγωγής πρέπει να διαθέτει προστασία έναντι βραχυκυκλώματος, έναντι υπερφόρτισης και έναντι άμεσης και έμμεσης επαφής. Επιπλέον, για την προστασία της ίδιας της εγκατάστασης, αλλά και των άλλων εγκαταστάσεων του δικτύου, απαιτείται η ύπαρξη συστήματος προστασίας απόζευξης το οποίο επενεργεί στον ΑΔΔ και εξασφαλίζει την αποσύνδεση της εγκατάστασης από το δίκτυο όταν εμφανιστούν αποκλίσεις τάσης ή/και συχνότητας άνω των προβλεπόμενων ορίων.

Σε εγκαταστάσεις παραγωγής με αντιστροφείς ΣΡ/ΕΡ η επιτήρηση συχνότητας μπορεί να απουσιάζει, εάν ο αντιστροφέας δεν διαθέτει τη δυνατότητα αυτή. Αντίθετα, η επιτήρηση της τάσης (προστασίες υπότασης και υπέρτασης) είναι πάντοτε αναγκαία, η δε συνιστώμενη ρύθμιση για την προστασία υπέρτασης είναι $1,10 \cdot U_n$.

Επιπτώσεις στην τάση του δικτύου

Η σύνδεση εγκαταστάσεων παραγωγής σε κάποιο σημείο του δικτύου ΧΤ είναι δυνατή, υπό την προϋπόθεση ότι η λειτουργία τους δεν προκαλεί υπέρβαση της επιτρεπόμενης στάθμης διαταραχών για δημόσια δίκτυα ΧΤ και άρα δεν παρενοχλεί άλλες εγκαταστάσεις και συσκευές του δικτύου. Διαταραχές οι οποίες εξετάζονται είναι οι προκαλούμενες μεταβολές της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης, το flicker και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης εξαιτίας της λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Η λειτουργία μιας εγκατάστασης παραγωγής είναι αποδεκτή όταν δεν γίνεται υπέρβαση των ορίων που καθορίζονται από τα θεσπισμένα πρότυπα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η οικονομική βιωσιμότητα ενός ενεργειακού επενδυτικού σχεδίου αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα για την προσέλκυση επενδυτικού ενδιαφέροντος. Επιπλέον σημαντικό ρόλο παίζει το ρίσκο που πάντα συνεπάγεται μια επένδυση.

Η διαδικασία επιλογής ενός σχεδίου επένδυσης περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα στάδια:

- Το πρώτο είναι ο προσδιορισμός των εφικτών εναλλακτικών παραλλαγών του σχεδίου επένδυσης. Είναι σχέδια επενδύσεων τεχνικά ασυμβίβαστα, με την έννοια ότι η πραγματοποίηση του ενός αποκλείει την πραγματοποίηση των άλλων.
- Το δεύτερο, είναι η εκτίμηση της ροής των εσόδων και δαπανών που συνοδεύουν το έργο.
- Το τρίτο, είναι η αξιολόγηση των εναλλακτικών σχεδίων και η επιλογή ενός, το οποίο θα κατασκευασθεί.
- Το τέταρτο, είναι η παρακολούθηση και η καταγραφή των αποκλίσεων ως προς τις προβλέψεις, μετά την πραγματοποίησή του, για την άσκηση μιας θετικής κριτικής για το μέλλον.

Από όλα τα στάδια το πρώτο είναι ίσως το πιο σημαντικό, γιατί περιλαμβάνει την καταγραφή των εναλλακτικών σχεδίων και γενικότερα τις νέες ιδέες και τα να σχέδια για καρποφόρες επενδύσεις σε όλους τους τομείς.

5.1 ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΧΡΗΜΑΤΟΣ

Η Παρούσα Αξία (Present Value) ενός ποσού μετά από n χρόνια δίνεται από τον τύπο:

$$PV = \frac{X}{(1+i)^n} \quad (5.1)$$

όπου i ο πληθωρισμός. Ενώ η Παρούσα Αξία ποσών X_j συντελούμενων στο τέλος κάθε χρόνου για n χρόνια είναι:

$$PV = \sum_{j=1}^n \frac{X_j}{(1+i)^j} \quad (5.2)$$

Αν τα ποσά είναι ίδια A , τότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$PV = A \cdot \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} \quad (5.3)$$

Η Μελλοντική Αξία F μετά από n χρόνια ιδίων ποσών A συντελούμενων στο τέλος κάθε χρόνου δίνεται από τον τύπο:

$$F = A \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (5.4)$$

Αν η παραπάνω σχέση λυθεί ως προς τα ίδια ποσά A , προκύπτει:

$$A = F \cdot \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (5.5)$$

Τέλος η Ισοδύναμη Ετήσια Αξία (Equivalent Annual Value) ποσού X για n χρόνια δίνεται από τον τύπο:

$$EAV = X \cdot \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad (5.6)$$

5.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΩΝ ΣΧΕΔΙΩΝ

Υπάρχουν δύο κατηγορίες κριτηρίων, ανάλογα με το αν λαμβάνεται υπόψη ή όχι η χρονική αξία του χρήματος, δηλαδή η αναγωγή σε παρούσα αξία. Η πρώτη περιλαμβάνει τα ορθολογικά και η δεύτερη τα ατελή κριτήρια. Παρακάτω εξετάζονται μόνο τα ορθολογικά κριτήρια, τα οποία είναι πιο ακριβή.

5.2.1 Καθαρή Παρούσα Αξία - ΚΠΑ (Net Present Value - NPV)

Η καθαρή παρούσα αξία μιας επένδυσης στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής της λειτουργίας, ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NPV = -K + \sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1+d)^t} + \frac{SV_N}{(1+d)^N} \quad (5.7)$$

όπου:

- K : αρχική επένδυση
- F_t : ετήσιο καθαρό όφελος
- N : οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης
- d : επιτόκιο αναγωγής σε παρούσα αξία (επιθυμητή απόδοση κεφαλαίου)
- SV_N : υπολειμματική αξία της επένδυσης στο τέλος του οικονομικού κύκλου ζωής

Διακρίνονται οι ακόλουθες τρεις περιπτώσεις:

- $NPV > 0$: Η επένδυση είναι βιώσιμη
- $NPV < 0$: Η επένδυση δεν είναι βιώσιμη
- $NPV = 0$: Η επένδυση είναι βιώσιμη με ετήσιο ρυθμό απόδοσης ίσο με d (οριακή κατάσταση)

Κατά την αξιολόγηση σχεδίων τα οποία αποκλείονται αμοιβαία, δηλαδή η επιλογή του ενός αποκλείει την επιλογή του άλλου, επιλέγεται το επενδυτικό σχέδιο με το μεγαλύτερο NPV . Πρέπει να τονιστεί ότι η εφαρμογή του κριτηρίου προϋποθέτει την ίδια διάρκεια ζωής της επένδυσης. Στην περίπτωση που έχουμε διαφορετική διάρκεια ζωής διαμορφώνονται νέα επενδυτικά σχέδια με διάρκεια ζωής είτε θεωρητικά άπειρα είτε ίση με το ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο της διάρκειας των επενδύσεων. Η κάθε μια από τις επενδύσεις θα περιλαμβάνει μια σειρά επαναλαμβανόμενων επενδύσεων σε τακτό χρονικό διάστημα ίσο με τη διάρκεια

ζωής κάθε αρχικής επένδυσης αντίστοιχα. Τελικά το κριτήριο εφαρμόζεται στις νέες επενδύσεις, οι οποίες τώρα έχουν την ίδια διάρκεια ζωής.

5.2.2 Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης – EBA (Internal Rate of Return - IRR)

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης μιας επένδυσης ορίζεται ως το επιτόκιο αναγωγής που μηδενίζει το NPV και προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$NPV_{(d=IRR)} = 0 \Leftrightarrow -K + \sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1+IRR)^t} + \frac{SV_N}{(1+IRR)^N} = 0 \quad (5.8)$$

Ο επενδυτής θέτει ένα ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο για την τιμή του IRR , κάτω από το οποίο απορρίπτεται η επένδυση. Το επιτόκιο αυτό είναι το κόστος ευκαιρίας της επένδυσης, δηλαδή το επιτόκιο αναγωγής d . Τελικά εάν το IRR προκύψει μεγαλύτερο από το επιτόκιο αναγωγής η επένδυση είναι αποδεκτή, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η επένδυση απορρίπτεται.

Μεταξύ δύο εναλλακτικών επενδύσεων προκρίνεται αυτή με το μεγαλύτερο IRR

5.2.3 Λόγος Οφέλους/Κόστους (Benefit/Cost Ratio - BCR)

Το BCR ορίζεται ως το πηλίκο του συνολικού οφέλους προς το συνολικό κόστος μιας επένδυσης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της με όλα τα ποσά ανηγμένα σε παρούσα αξία:

$$BCR = \frac{\sum_{t=1}^N \frac{B_t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=0}^N \frac{C_t}{(1+d)^t}} \quad (5.9)$$

όπου:

- B_t : όφελος κατά το έτος t
- C_t : κόστος κατά το έτος t (η τιμή C_0 αντιστοιχεί στην αρχική επένδυση)

Μια επένδυση είναι οικονομικά βιώσιμη όταν ο λόγος οφέλους-κόστους είναι μεγαλύτερος ή ίσος της μονάδας. Σε αντίθετη περίπτωση η επένδυση δεν είναι βιώσιμη.

5.2.4 Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής – ΕΠΑ (Discounted Pay Back Period – DPB)

Η έντοκη περίοδος αποπληρωμής είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αποπληρωμή της αρχικής επένδυσης καθώς και των τόκων που θα μπορούσαν να

ληφθούν από μια εναλλακτική τοποθέτηση του αρχικού κεφαλαίου. Προσδιορίζεται ως λύση της εξίσωσης:

$$NPV_{(N=DPB)} = 0 \quad (5.10)$$

όπου η ένδειξη $N = DPB$ υπονοεί ότι η εξίσωση λύνεται ως προς N .

Εάν η υπολειμματική αξία της επένδυσης είναι ίση με το μηδέν ($SV_N = 0$) και επιπλέον θεωρηθεί ότι το λειτουργικό ετήσιο όφελος F_t παραμένει σταθερό σε σταθερές τιμές, τότε η λύση της εξίσωσης της παραπάνω σχέσης παίρνει την αναλυτική μορφή:

$$DPB = \frac{-\ln\left(1 - \frac{d \cdot K}{F}\right)}{\ln(1+d)} \quad (5.11)$$

Μια επένδυση θεωρείται οικονομικά βιώσιμη όταν η τιμή του DPB ικανοποιεί τις προσδοκίες του επενδυτή ως προς τον χρόνο αποπληρωμής.

5.2.5 Παρούσα Αξία Συνολικού Κόστους και Ισοδύναμου Ετήσιου Κόστους - ΙΕΚ

Στην περίπτωση αξιολόγησης δύο αμοιβαία αποκλειόμενων επενδύσεων, οι οποίες όμως δίνουν ίδια έσοδα κατ' έτος η εφαρμογή του κριτηρίου του NPV , οδηγούμαστε στην επιλογή της επένδυσης με την μικρότερη παρούσα αξία συνολικού κόστους. Η αξία αυτή ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$PVTC = K + \sum_{t=1}^N \frac{C_t}{(1+d)^t} \quad (5.12)$$

Η παρούσα αξία του συνολικού κόστους μπορεί να εκφραστεί από μια οικονομικά ισοδύναμη ετήσια, σταθερή ράντα, της οποίας ο όρος προσδιορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή ανάκτησης του κεφαλαίου. Έτσι η σύγκριση μεταξύ παρούσας αξίας συνολικού κόστους καταλήγει σε σύγκριση ετήσιου κόστους, οικονομικά ισοδύναμου, το οποίο θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$EAC = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \left[\sum_{t=0}^N \frac{C_t}{(1+d)^t} \right] \quad (5.13)$$

Στην περίπτωση που το κόστος δεν διαφέρει από έτος σε έτος, το ισοδύναμο ετήσιο κόστος εκφράζεται ως εξής:

$$EAC = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} C_o + C \quad (5.14)$$

Όπου ο πρώτος όρος αντανακλά σε ετήσια βάση την επιβάρυνση από το κεφάλαιο της επένδυσης και αποτελείται από την απόσβεση και την εξυπηρέτηση του κεφαλαίου, δηλαδή, τον τόκο, ενώ ο δεύτερος το ετήσιο κόστος.

5.3 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ

Ένα από τα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει ο επενδυτής ενός ενεργειακού έργου είναι η εύρεση του κεφαλαίου για τη χρηματοδότηση του έργου. Στους ανασταλτικούς παράγοντες συγκαταλέγονται το μεγάλο αρχικό κόστος, η μακρά περίοδος απόσβεσης της επένδυσης, το μεγάλο τεχνολογικό και λειτουργικό ρίσκο και η περιορισμένη γνώση των σύγχρονων τεχνολογιών.

5.3.1 Κλασικές μορφές χρηματοδότησης

Στις κλασικές μορφές χρηματοδότησης περιλαμβάνονται:

- Η αυτοχρηματοδότηση, δηλαδή η χρήση ίδιων κεφαλαίων για τη χρηματοδότηση του έργου.
- Ο δανεισμός, ο οποίος παρουσιάζεται στον ισολογισμό της επιχειρησιακής μονάδας. Το μειονέκτημα από αυτή τη διαδικασία είναι ότι εμφανίζονται τα κέρδη της επιχείρησης μειωμένα.
- Οι κρατικές ενισχύσεις, μέσω κυρίως των κοινοτικών πλαισίων στήριξης εντός της Ε.Ε..

5.3.2 Σύγχρονοι χρηματοδοτικοί μηχανισμοί

Στους σύγχρονους χρηματοδοτικούς μηχανισμούς συγκαταλέγεται η Χρηματοδότηση Μέσω Τρίτων – ΧΑΤ (Third Party Financing - TPF) ενεργειακών έργων. Συγκεκριμένα η ΧΑΤ προσφέρει:

- Άμεση διάθεση των κονδυλίων επένδυσης, χωρίς επιβάρυνση του χρήστη.
- Ανάλυση μερικώς ή εξ' ολοκλήρου του επενδυτικού κινδύνου, μιας και η αποπληρωμή της επένδυσης γίνεται βάση της απόδοσής της.
- Ολοκληρωμένη τεχνική κάλυψη από τη σύλληψη του επενδυτικού σχεδίου, την αξιολόγησή του και την επιλογή προμηθευτών μέχρι την κατασκευή, λειτουργία και παρακολούθηση της απόδοσης του έργου.
- Συνολική διαχειριστική και οργανωτική κάλυψη κατά τις φάσεις αδειοδότησης, προμήθειας, κατασκευής και λειτουργίας του έργου.

Σήμερα συμπεριλαμβάνονται στο αντικείμενο της αγοράς ΧΑΤ, όλα τα έργα που έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν χρηματορροές αποφευχθέντος κόστους ή νέες εισροές λόγω πωλήσεων, ως αποτέλεσμα επενδύσεων σε καινοτόμες τεχνολογίες.

Η συμμετοχή δύο μερών συνιστά τη βάση για την εφαρμογή της ΧΑΤ. Το ένα είναι η Εταιρία Παροχής Ενεργειακών Υπηρεσιών (ΕΠΕΥ ή ESCO), η οποία δρα ως ανάδοχος για τον σχεδιασμό, ανάπτυξη και λειτουργία του έργου και συνεπώς αναλαμβάνει όλους τους εγγενείς τεχνικούς και οικονομικούς κινδύνους. Το δεύτερο

είναι ο καταναλωτής ενέργειας (χρήστης ΧΑΤ), ο οποίος είναι ο ιδιοκτήτης των εγκαταστάσεων στις οποίες εκτελείται η επένδυση.

Παρόλα τα προφανή πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρηματοδότηση ενεργειακών έργων μέσω τρίτων έχει και ορισμένα μειονεκτήματα όπως η διαφορά ανάμεσα στις προβλέψεις και τα αποτελέσματα, η μεγαλύτερη χρονική διάρκεια απόσβεσης από την αναμενόμενη, η εξάρτηση από τη λειτουργία της επιχείρησης κ.α..

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συμβάσεων στη ΧΑΤ, οι οποίοι και παρουσιάζονται παρακάτω κατά σειρά προτίμησης εφαρμογής:

- Συμμετοχή στα Εξοικονομούμενα (Shared Savings). Στη σύμβαση αυτή οι ακαθάριστες χρηματοροές που δημιουργούνται από την επένδυση καταμερίζονται μεταξύ του αναδόχου και του χρήστη. Η συνήθης διάρκεια των εν λόγω συμβάσεων κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10 ετών. Όλα τα ρίσκα μεταβιβάζονται στην ESCO.
- Εγγυημένη Εξοικονόμηση (Guaranteed Savings). Στη σύμβαση αυτή οι πληρωμές στην ESCO είναι γνωστές εξαρχής και γίνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, υπάρχει όμως η εγγύηση του αναδόχου ως προς τα κέρδη. Η διάρκεια αυτών των συμβάσεων είναι κατά κανόνα μεγάλη.
- Καθολική Αποπληρωμή (First Out). Στην περίπτωση αυτή η ανάδοχος εισπράττει το σύνολο των ακαθάριστων χρηματοροών είτε μέχρι να αποπληρωθεί το επενδύσιμο κεφάλαιο και τα κέρδη της ΧΑΤ είτε μέχρι να λήξει η σύμβαση. Οι συμβάσεις αυτού του τύπου έχουν μικρή διάρκεια.

Ένας άλλος χρηματοδοτικός μηχανισμός είναι ο BOT (Build Operate Transfer). Ο BOT προβλέπει μια κοινοπραξία διαφορετικών εταιριών, οι οποίες αναλαμβάνουν από κοινού τη διεκπεραίωση ενός έργου που τους ανέθεσε το κράτος. Ο οργανισμός αυτός είναι υπεύθυνος για την κατασκευή, τη χρηματοδότηση, τη λειτουργία και τη συντήρηση του έργου για μια καθορισμένη χρονική περίοδο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου το έργο το εκμεταλλεύεται ο οργανισμός, ενώ μετά το τέλος της περιόδου, το έργο μεταφέρεται στο κράτος.

Στα πλεονεκτήματα ενός έργου που κατασκευάζεται με το χρηματοδοτικό μηχανισμό BOT περιλαμβάνονται:

- Η μη καταβολή κρατικών κεφαλαίων.
- Η μετατόπιση των ρίσκων.
- Η παροχή τεχνογνωσίας, σύγχρονου εξοπλισμού και πρόσβαση σε ισχυρές αγορές.
- Η εισαγωγή ξένου κεφαλαίου.
- Η βέλτιστη απόδοση.

Τα όποια προβλήματα του χρηματοδοτικού αυτού μηχανισμού οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ίδια τη φύση του έργου.

5.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΟΦΛΗΣΗΣ ΔΑΝΕΙΩΝ

Οι διάφοροι οικονομικοί οργανισμοί για την κάλυψη των συνολικών αναγκών τους σε κεφάλαια πραγματοποιούν δάνεια, εφόσον τα έσοδά τους δεν αρκούν.

Τα δάνεια χωρίζονται ανάλογα με τη διάρκειά τους σε βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα. Τα βραχυπρόθεσμα ιδιωτικά δάνεια γίνονται κυρίως με γραμμάτια και συναλλαγματικές, ενώ τα κρατικά βραχυπρόθεσμα με έντοκα γραμμάτια. Ένα μακροπρόθεσμο δάνειο είναι μια σύμβαση μεταξύ δανειστή και δανειζομένου. Όταν υπάρχει ένας δανειστής και ένας οφειλέτης το δάνειο ονομάζεται ενιαίο, ενώ όταν οι δανειστές είναι πολλοί και ένας ο οφειλέτης ονομάζεται ομολογιακό δάνειο.

Υπάρχουν πάρα πολλοί τρόποι εξόφλησης δανείων. Παρακάτω εξετάζονται τέσσερις από τους πιο συνηθισμένους. Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών είναι ότι προβλέπουν είτε εφάπαξ εξόφληση του δανείου σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές είτε βαθμιαία εξόφληση εντός ορισμένου χρόνου. Τα ποσά της βαθμιαίας εξόφλησης λέγονται χρεολύσια. Τα χρεολύσια μαζί με τους εκάστοτε πληρωτέους τόκους σχηματίζουν τα τοκοχρεολύσια, τα οποία αποτελούν τις δόσεις εξόφλησης του δανείου.

Εφάπαξ εξόφληση δανείου με απλό τόκο

Στο τέλος κάθε χρόνου καταβάλλεται ο τόκος και με τη λήξη της περιόδου του δανείου εξοφλείται το δάνειο. Δίνονται οι παρακάτω διευκρινίσεις:

- Οι οφειλόμενοι τόκοι υπολογίζονται κάθε φορά από τον τόκο του ανεξόφλητου δανείου στο τέλος του προηγούμενου έτους, από το υπόλοιπο της οφειλής τόκων του προηγούμενου έτους και από τον τόκο τους.
- Ως πληρωμή τόκων ορίζεται κάθε φορά οι τόκοι που πληρώνονται στον δανειστή.
- Ως χρεολύσιο ορίζεται το ποσό που πληρώνεται στον δανειστή για την εξόφληση του δανείου
- Το ανεξόφλητο δάνειο υπολογίζεται κάθε φορά μετά την αφαίρεση των μέχρι τότε χρεολυσίων από το συνολικό δάνειο.
- Ως τοκοχρεολύσιο ορίζεται το άθροισμα του χρεολυσίου και των πληρωτέων τόκων.
- Η τελική αξία των εκάστοτε τοκοχρεολυσίων στο τέλος της περιόδου δανεισμού υπολογίζεται με ανατοκισμό προς το επιτόκιο και για την αντίστοιχη κάθε φορά χρονική περίοδο.
- Η παρούσα αξία των εκάστοτε τοκοχρεολυσίων στην αρχή του πρώτου έτους υπολογίζεται με επιτόκιο.

Εφάπαξ εξόφληση δανείου με ανατοκισμό

Στο τέλος κάθε χρόνου δεν καταβάλλεται κανένα ποσό έναντι των οφειλόμενων τόκων και με την λήξη της περιόδου του δανείου εξοφλείται το δάνειο και οι τόκοι μαζί.

Βαθμιαία εξόφληση με ισόποσα χρεολύσια

Στο τέλος κάθε χρόνου για την εξόφληση του δανείου θα καταβάλλεται ένα ποσό (χρεολύσιο) που είναι ίσο με το μέρος του δανείου που θα αντιστοιχούσε σε κάθε χρόνο χωρίς το επιτόκιο, καθώς επίσης ο τόκος, ο οποίος υπολογίζεται επί του ποσού που είχε στα χέρια του ο δανειζόμενος στην αρχή κάθε χρόνου.

Βαθμιαία εξόφληση με ίσα τοκοχρεολύσια

Στο τέλος κάθε χρόνου καταβάλλονται ισόποσα τοκοχρεολύσια. Ο τόκος από χρόνο σε χρόνο μειώνεται ενώ το χρεολύσιο αυξάνει.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ Φ/Β
ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ 100kWp**

6.1 ΣΕΝΑΡΙΟ

Σκοπός της μελέτης είναι η εγκατάσταση ενός φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θα έχει ονομαστική ισχύ περί τα 100kW_p στον ελλαδικό χώρο. Αρχικά εξετάζεται το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας, αφού πρώτα χωριστεί η χώρα σε 7 περιοχές ανάλογα με την ετήσια ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται και επιλεγούν ενδεικτικά συγκεκριμένες τοποθεσίες-πόλεις από κάθε μια από αυτές τις περιοχές. Έπειτα επιλέγεται μια πόλη που και γίνεται λεπτομερέστερη ανάλυση του ηλιακού δυναμικού. Η πόλη που επιλέγεται είναι η Καλαμάτα. Όσον αφορά την κλίση των συστοιχιών εξετάζεται το ηλιακό δυναμικό στις εξής περιπτώσεις:

- Σταθερή ετήσια κλίση, σε αμετακίνητες βάσεις στήριξης
- Μεταβολή της κλίσης δύο φορές το χρόνο με τη βοήθεια ενός απλού μηχανισμού

Δεν εξετάζεται η περίπτωση ενός συστήματος με κινούμενες συστοιχίες που θα ακολουθούν τις ακτίνες του ήλιου για λόγους ταχύτητας διεκπεραίωσης του έργου, συντήρησης και για λόγους μεγάλης οικονομικής επιβάρυνσης. Η μορφολογία του εδάφους δεν είναι ομαλή, αλλά παρουσιάζει μια κλίση 8% στη διεύθυνση Βορρά-Νότου με υπερύψωση στον Βορρά και μια μικρή κλίση 3% στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης με υπερύψωση στη Δύση. Η ευρύτερη περιοχή έχει θαμνώδη βλάστηση, ενώ δεν υπάρχουν σε κοντινή απόσταση κτίρια ή κάποιο ψηλό βουνό ή κάποιο άλλο εμπόδιο, που θα μπορούσε να δημιουργήσει προβλήματα σκίασης. Στην περιοχή πνέουν αρκετά ισχυροί άνεμοι με μέσο όρο 3m/s. Η έκταση γης, στην οποία θα τοποθετηθεί η φ/β γεννήτρια βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με το δίκτυο ΧΤ, γεγονός που δεν δικαιολογεί επιπλέον έξοδα υποδομών για διασύνδεση στο δίκτυο.

Επιπλέον εξετάζονται αναλυτικά διάφορα μέτρα για την προστασία της εγκατάστασης, όπως γειώσεις και αντικεραυνική προστασία. Αφού υπολογιστεί η παραγόμενη ετήσια ενέργεια από το φ/β πάρκο, γίνεται διερεύνηση του αντίστοιχου μεγέθους και για τις άλλες 6 πόλεις. Τέλος γίνεται μια οικονομοτεχνική μελέτη του φ/β πάρκου και εξετάζεται η βιωσιμότητα μιας τέτοιας επένδυσης.

6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ

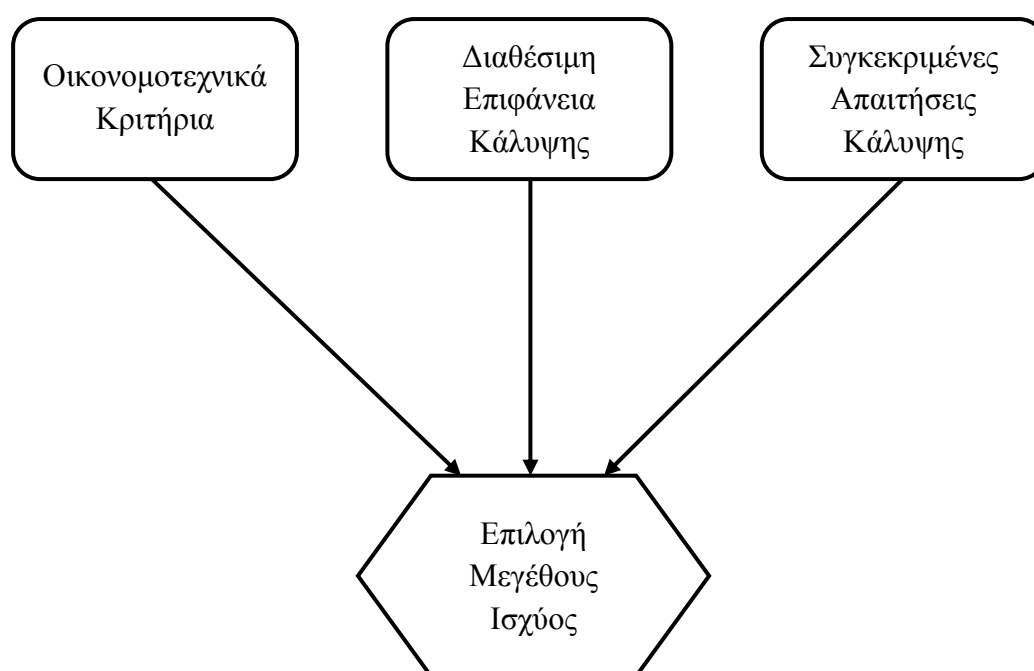
Κριτήρια επιλογής ισχύος

Ο σχεδιασμός ενός Φ/Β πάρκου όπως και κάθε σχεδιασμός τεχνικού έργου προαπαιτεί την επιλογή συγκεκριμένων μεγεθών. Μέγεθος αφετηρία για τη σχεδίαση ενός Φ/Β πάρκου αποτελεί η ισχύς του, η οποία καθορίζεται κατά περίπτωση από τα παρακάτω κριτήρια (Σχήμα 6.1):

α) Οικονομοτεχνικά κριτήρια (απαιτήσεις επενδυτή, μέγεθος επένδυσης). Στην περίπτωση αυτή, στην οποία απαιτείται οικονομοτεχνική μελέτη, εμπίπτουν κυρίως οι αυτοπαραγωγοί, με απευθείας διασυνδεδεμένα στο δίκτυο Φ/Β συστήματα.

β) Κριτήρια με βάση την διαθέσιμη επιφάνεια κάλυψης. Στην περίπτωση αυτή η ισχύς του πάρκου είναι ίση με την ισχύ που προκύπτει αν «καλύψουμε» πλήρως με συλλέκτες την διαθέσιμη επιφάνεια (εννοείται ότι συνυπολογίζονται οι ζώνες σκίασης και επισκεψιμότητας). Το σύστημα μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα με συσσωρευτές ή χωρίς, με απευθείας διασύνδεση στο δίκτυο.

γ) Καθαρά τεχνικά κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά αφορούν τον καθορισμό συγκεκριμένου μεγέθους ισχύος που απορρέει από συγκεκριμένες απαιτήσεις κατανάλωσης (αυτόνομα συστήματα μη διασυνδεδεμένα, είτε αυτοπαραγωγοί όπως στο πρώτο κριτήριο). Το μειονέκτημα του αυτόνομου συστήματος είναι ότι δεν αξιοποιεί την ενέργεια όταν δεν υπάρχει κατανάλωση, πράγμα που δεν ισχύει με το απευθείας διασυνδεδεμένο σύστημα.

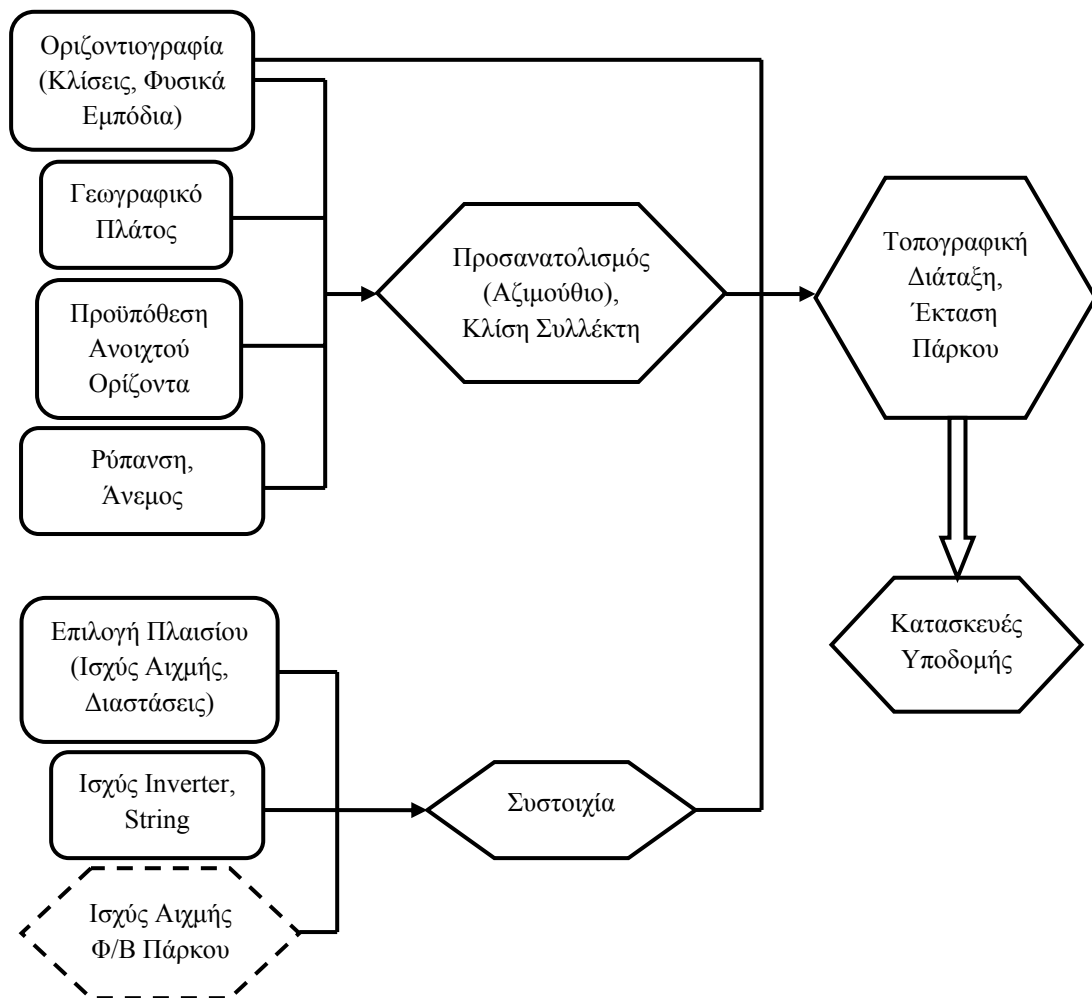


Σχήμα 6.1 Κριτήρια επιλογής ισχύος

Στην περίπτωσή μας, όπως είναι φανερό, το μοναδικό κριτήριο που θα καθορίσει το μέγεθος της ισχύος του φ/β πάρκου είναι το ποσό της επένδυσης που είναι διαθέσιμο. Εφόσον, σύμφωνα με το σενάριο, έχουμε στη διάθεσή μας την απαραίτητη έκταση και πρόθεσή μας είναι να υλοποιηθεί το έργο με όσο δυνατόν μεγαλύτερη ισχύ, αλλά χωρίς να υπερβαίνει τα 100kWp (γεγονός που θα δημιουργούσε καθυστερήσεις λόγω γραφειοκρατίας και επιπλέον αδειών, βεβαιώσεων κτλ.) επιλέγεται αυτό το μέγεθος της ισχύος.

Αλγόριθμος Υπολογισμού Διασυνδεδεμένου Φ/β Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Για να υπολογιστεί η τοπογραφική διάταξη και η έκταση ενός φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που θα καθορίσουν και την κατασκευή των απαραίτητων υποδομών, πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.2 τα κυρίαρχα μεγέθη που το καθορίζουν είναι ο προσανατολισμός και η κλίση των συλλεκτών, η μορφολογία του εδάφους και η κυκλωματική διάταξη της συστοιχίας, που με τη σειρά τους καθορίζονται από την επιλογή πλαισίου, αντιστροφέα και φυσικά την ισχύ της εγκατάστασης.

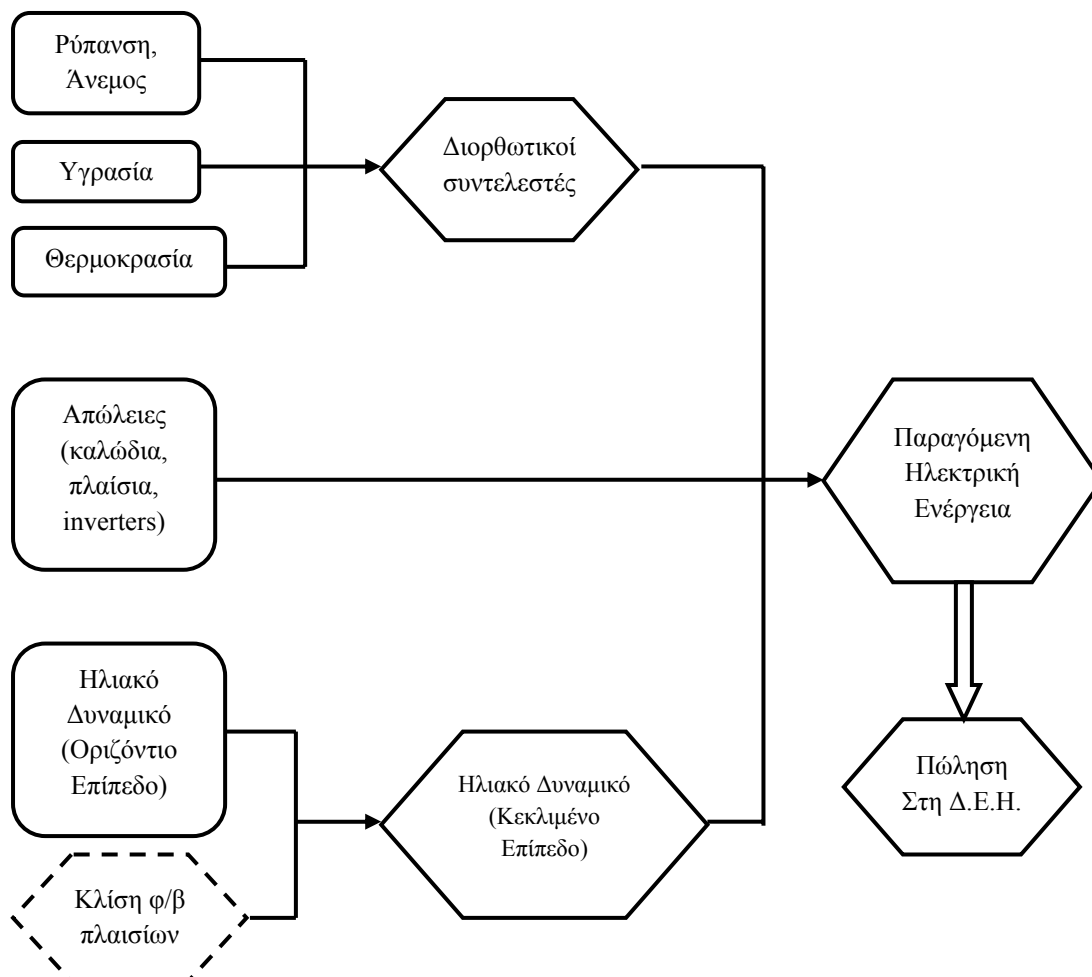


Σχήμα 6.2 Αλγόριθμος υπολογισμού διασυνδεδεμένου φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Αλγόριθμος Παραγόμενης Ηλεκτρικής Ενέργειας Φ/β Πάρκου

Το ζητούμενο σε κάθε εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Για να γίνει αυτό πρέπει να είναι κατανοητό από ποιούς παράγοντες εξαρτάται. Σε μία φ/β εγκατάσταση

προφανώς τον πρωταρχικό ρόλο παίζει το διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό της περιοχής. Έπειτα σημαντικότερη είναι η συνεισφορά της φ/β γεννήτριας στην καλή απόδοση του συστήματος. Επομένως λαμβάνονται υπόψη οι αποδόσεις των πλαισίων των αντιστροφών, οι απώλειες των καλωδίων κτλ. Τέλος δεν πρέπει να παραληφθούν διάφοροι διορθωτικοί συντελεστές όπως η θερμοκρασία, ο άνεμος και η ρύπανση.



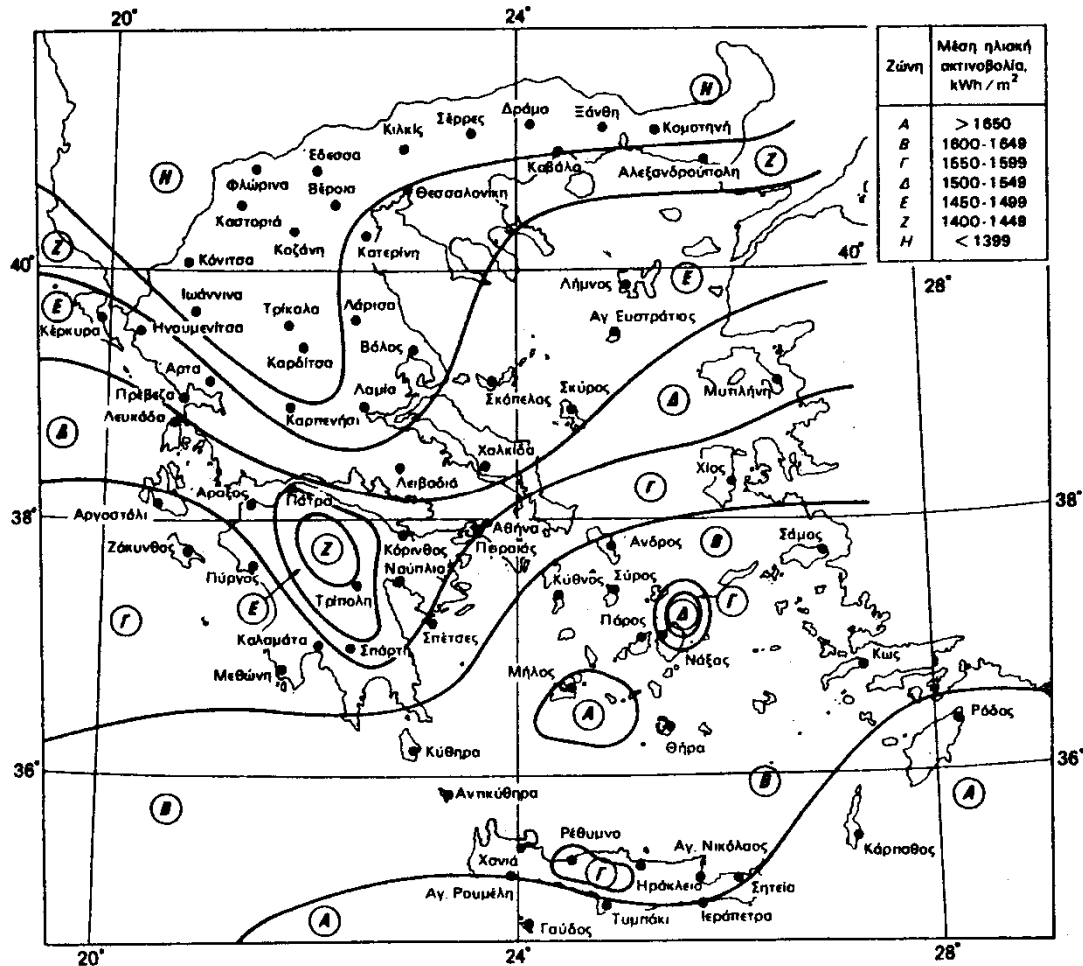
Σχήμα 6.3 Αλγόριθμος υπολογισμού παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας φ/β πάρκου.

6.3 ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η τοποθεσία ενός φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ, λόγω των καιρικών φαινομένων της συγκεκριμένης περιοχής και της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται. Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας θεωρείται από τα υψηλότερα της Ευρώπης, κάνοντας τα φ/β ελκυστικά για αξιοποίηση. Όμως δεν μπορούν να εξαχθούν ανάλογα συμπεράσματα για όλες τις περιοχές τις χώρες, καθώς κάποια σημεία δέχονται υψηλά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. νησιά νοτιοανατολικού Αιγαίου), ενώ άλλα πολύ χαμηλότερα (π.χ. βόρεια Ελλάδα). Για αυτό το λόγο ακολουθεί η παρακάτω ανάλυση, που σκοπό έχει

να δείξει τις περιοχές μεγάλου ηλιακού δυναμικού, αλλά και την εύρεση της βέλτιστης κλίσης ανά τοποθεσία.

Ο Ελλαδικός χώρος μπορεί να χωριστεί σε 7 ζώνες ανάλογα με το ποσό της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται (Σχήμα 6.4)[1].



Σχήμα 6.4 Κατανομή της μέσης συνολικής ετήσιας έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντιο επίπεδο, στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας[1].

Από τον παραπάνω χάρτη είναι εμφανή τα σημεία που έχουν υψηλές τιμές ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας και είναι τα νησιά του νότιου, νοτιοανατολικού Αιγαίου και η Κρήτη. Αν συγκρίνουμε την ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στις περιοχές με υψηλό δυναμικό με αυτές που έχουν το χαμηλότερο, τότε οι πρώτες εμφανίζονται να έχουν ετήσια ηλιακή ακτινοβολία κατά 25% περίπου υψηλότερο.

Για την εύρεση της βέλτιστης ετήσιας κλίσης, χρησιμοποιείται η ανάλυση του κεφαλαίου 2. Παρακάτω επιλέγονται 7 πόλεις της Ελλάδας, μια από κάθε περιοχή και υπολογίζεται η βέλτιστη γωνία κλίσης και η αντίστοιχη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία. Ως αφετηρία χρησιμοποιείται η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο[1]. Οι πόλεις φαίνονται στον Πίνακα 6.1, ενώ στον Πίνακα 6.2 εκτός από τη β_{opt} και το αντίστοιχο $H_{T,max}$ δίνεται και η διαφορά ανάμεσα στο γεωγραφικό πλάτος και το β_{opt} . Παρατηρούμε ότι η διαφορά αυτή μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και το

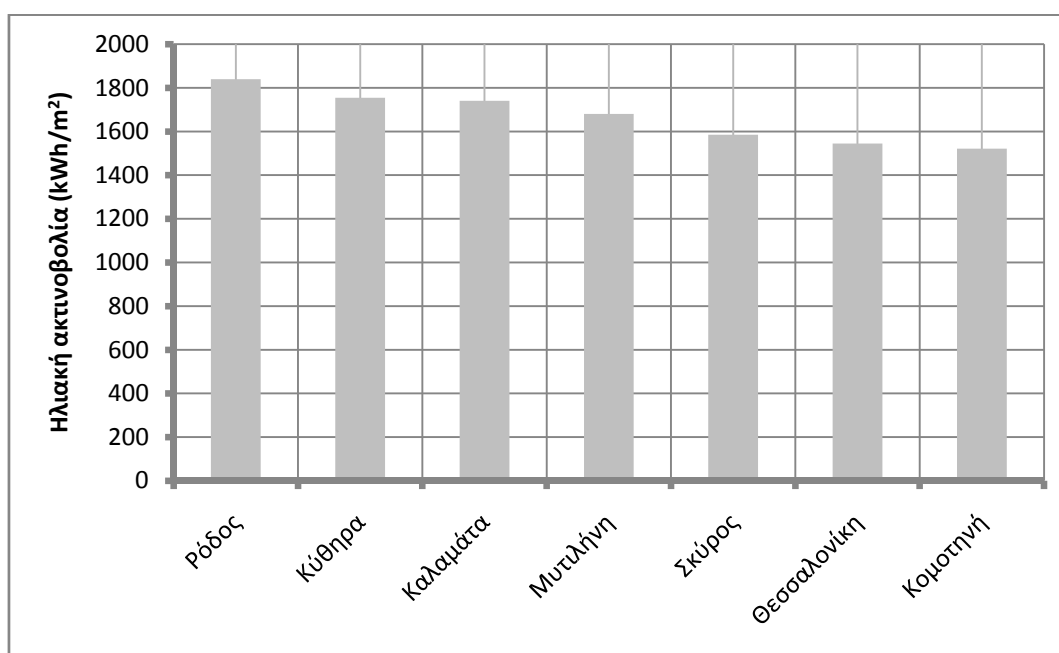
γεωγραφικό πλάτος. Στο σχήμα 6.6 φαίνονται οι καμπύλες της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της κλίσης για τις 7 παραπάνω πόλεις.

Πίνακας 6.1

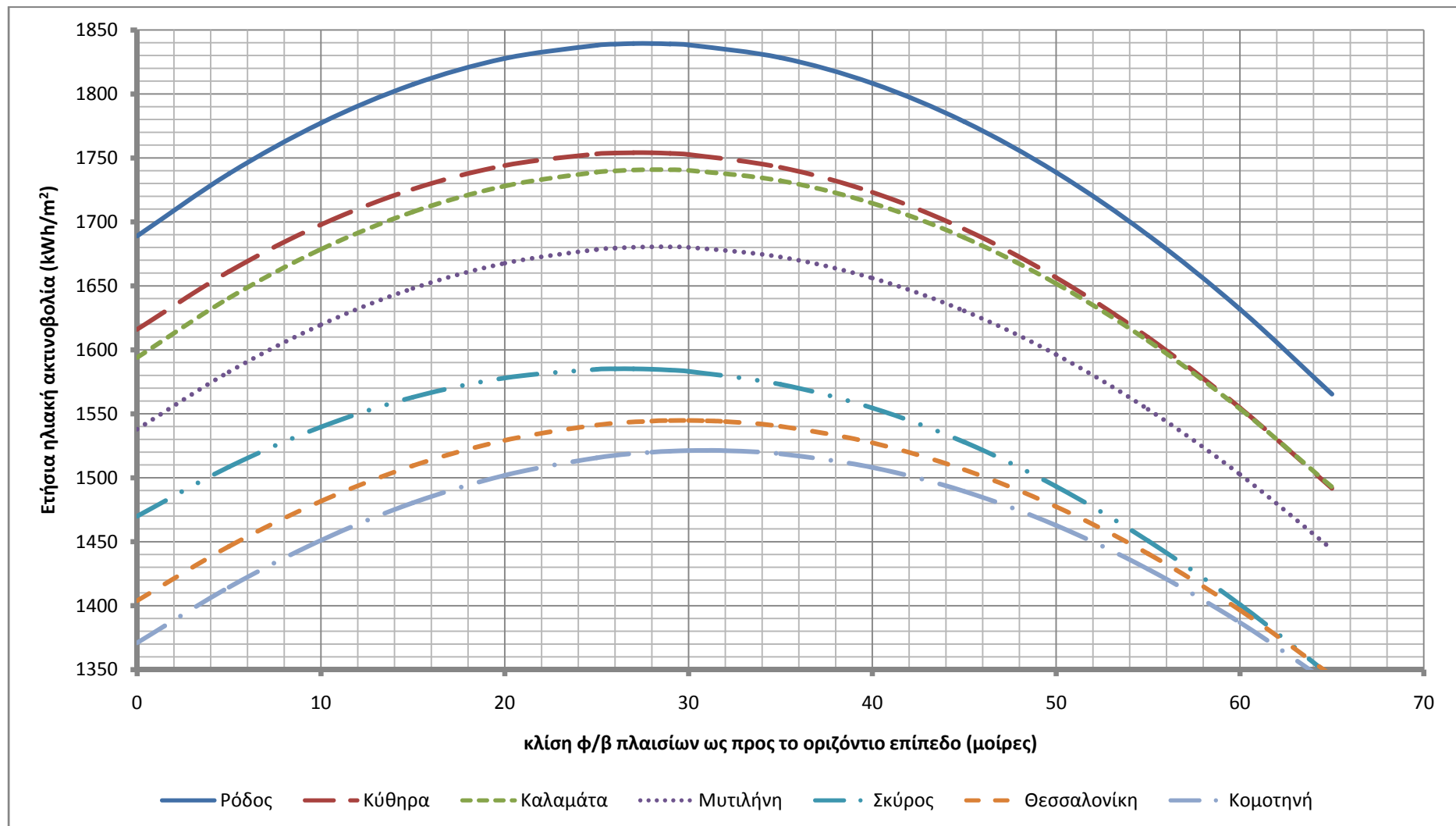
Πόλη	Ζώνη	Συνολική ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο H (kWh/m ²)	Γεωγραφικό Πλάτος φ (μοίρες)
Ρόδος	A	1686	36,17
Κύθηρα	B	1615	36,17
Καλαμάτα	Γ	1596	37,03
Μυτιλήνη	Δ	1539	39,10
Σκύρος	E	1480	38,90
Θεσσαλονίκη	Z	1403	40,64
Κομοτηνή	H	1368	41,10

Πίνακας 6.2

Πόλη	Ζώνη	β_{opt} (μοίρες)	Συνολική ετήσια ηλιακή ακτινοβολία για β_{opt} (kWh/m ²)	$\varphi - \beta_{opt}$ (μοίρες)
Ρόδος	A	28	1839,43	8
Κύθηρα	B	27	1754,08	9
Καλαμάτα	Γ	28	1740,83	9
Μυτιλήνη	Δ	28	1680,50	11
Σκύρος	E	27	1585,15	12
Θεσσαλονίκη	Z	30	1544,79	11
Κομοτηνή	H	31	1521,38	10



Σχήμα 6.5 Μέγιστη ετήσια ηλιακή ακτινοβολία για γωνία κλίσης β_{opt} για 7 πόλεις της Ελλάδας.



Σχήμα 6. Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της κλίσης για 7 πόλεις της Ελλάδας

6.3.1 Ηλιακό δυναμικό για την πόλη της Καλαμάτας

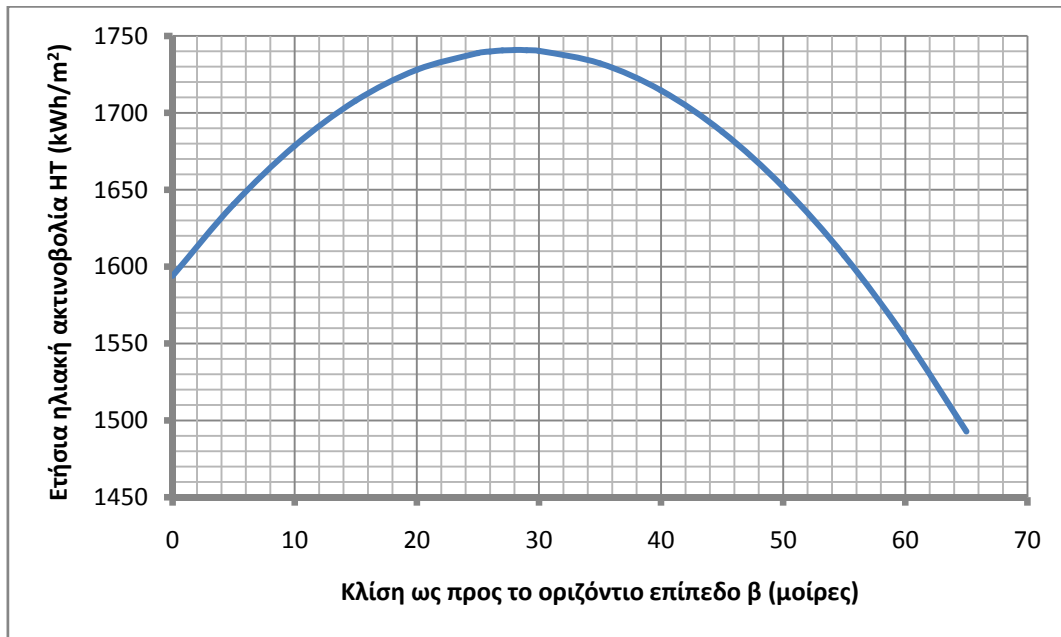
6.3.1.1 Σταθερή ετήσια κλίση

Αρχικός στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης κλίσης των φ/β συστοιχιών ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε ετήσια βάση, δηλαδή εκείνη η κλίση που θα εξασφαλίσει τη μέγιστη ετήσια ηλιακή ακτινοβολία. Όσον αφορά την τιμή της αζιμούθιας γωνίας γ , προφανώς αυτή επιλέγεται μηδενική, δηλαδή επιλέγεται απόλυτα νότιος προσανατολισμός. Οι τιμές της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στην Καλαμάτα, όπου θα εγκατασταθεί η φ/β γεννήτρια, καθώς και οι τιμές της για κλίσεις από 0° μέχρι 65° υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3, ενώ η καμπύλη που προέκυψε φαίνεται στο σχήμα 6.7.

Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης β_{opt} είναι κοντά στις 28° - 29° και διαφέρει σημαντικά από το γεωγραφικό πλάτος της Καλαμάτας που είναι $37,03^\circ$. Είναι όμως αναμενόμενο με την ανάλυση που έχει γίνει στο κεφάλαιο 2.. Ένα επίσης πολύ σημαντικό γεγονός που προκύπτει από τους υπολογισμούς είναι ότι για αποκλίσεις $\pm 5^\circ$ από τη βέλτιστη γωνία, η ετήσια ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται μόλις κατά 0,5%. Δηλαδή η μεταβολή της ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανεπαίσθητη για μικρές μεταβολές της κλίσης περί το β_{opt} .

Πίνακας 6.3

Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο β (μοίρες)	Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία H_T (kWh/m ²)
0	1594,00
5	1640,50
10	1678,60
15	1707,88
20	1728,04
25	1738,86
26	1739,90
27	1740,55
28	1740,83
29	1740,72
30	1740,24
35	1732,12
40	1714,57
45	1687,71
50	1651,77
55	1607,04
60	1553,91
65	1492,84



Σχήμα 6.7 Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία συναρτήσει της κλίσης β.

6.3.1.2 Εναλλαγή μεταξύ δύο κλίσεων στη διάρκεια ενός έτους

Η επιλογή δύο κλίσεων στη διάρκεια ενός έτους γίνεται με σκοπό τη βελτίωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στηρίζεται στο γεγονός ότι το καλοκαίρι ευνοούνται μικρές τιμές της κλίσης (συνήθως 10° - 25°), ενώ το χειμώνα μεγαλύτερες τιμές (45° - 60°). Επομένως η κλίση των συστοιχιών θα αλλάζει μεταξύ δύο θέσεων κάθε 6 μήνες. Ως καλοκαιρινούς μήνες θεωρούμε τους 6 μήνες με τις μεγαλύτερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και ως χειμερινούς τους 6 με τις μικρότερες. Επομένως καλοκαιρινοί μήνες θεωρούνται οι μήνες από τον Απρίλιο μέχρι το Σεπτέμβριο, ενώ χειμερινοί από το Οκτώβριο μέχρι το Μάρτιο. Στους πίνακες υπολογίζεται η συνολική ηλιακή ακτινοβολία για τους καλοκαιρινούς και τους χειμερινούς μήνες, σε σχέση με την κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη τιμή της κλίσης για τις δύο περιόδους του χρόνου.

Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη κλίση για τους καλοκαιρινούς μήνες είναι 11° και η ηλιακή ακτινοβολία που προκύπτει $1113,32\text{kWh/m}^2$, ενώ για χειμερινούς είναι 52° και $708,79\text{kWh/m}^2$ τα αντίστοιχα μεγέθη. Επομένως η συνολική ετήσια ακτινοβολία που προκύπτει με την εναλλαγή μεταξύ των δύο παραπάνω κλίσεων είναι $1822,1132\text{kWh/m}^2$. Το κέρδος σε σχέση με την σταθερή ετήσια κλίση είναι $81,28\text{kWh/m}^2$ ή περίπου 4,7%.

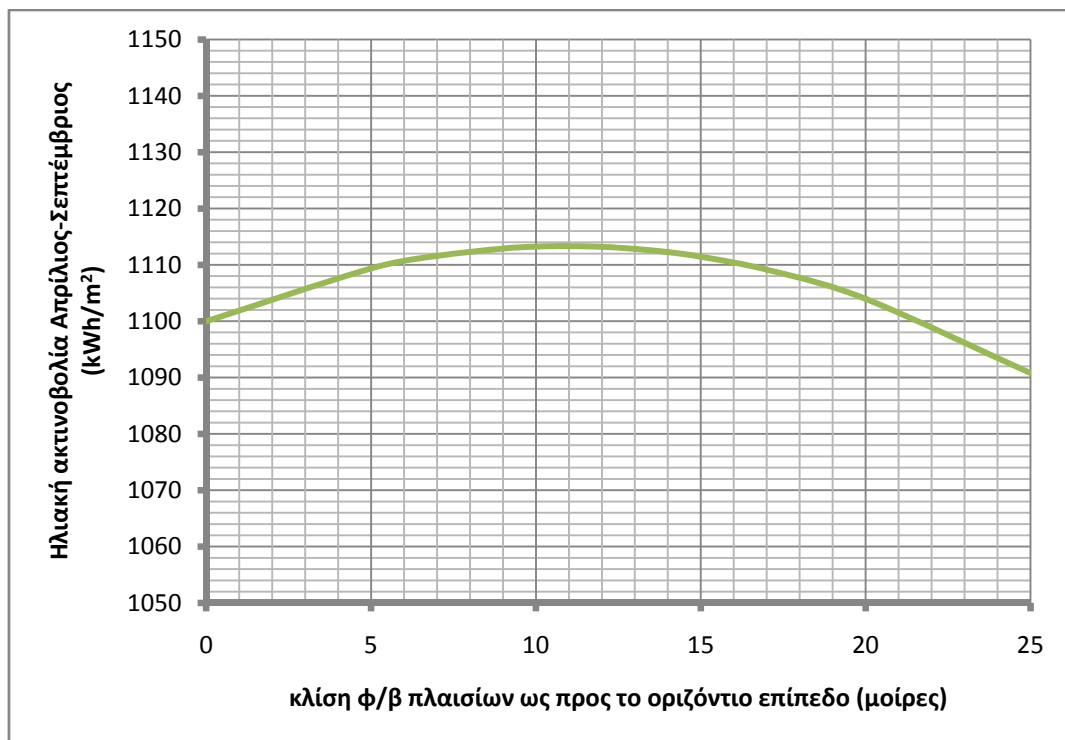
Ακόμα στο σχήμα 6.10 φαίνονται οι μηνιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας για σταθερή ετήσια κλίση και για εναλλαγή της κλίσης μεταξύ δύο θέσεων στη διάρκεια του έτους. Παρόλο που τους περισσότερους μήνες η σταθερή ετήσια γωνία υστερεί, υπάρχουν και δύο μήνες (Μάρτιος-Σεπτέμβριος), που συμβαίνει το αντίθετο.

Πίνακας 6.4

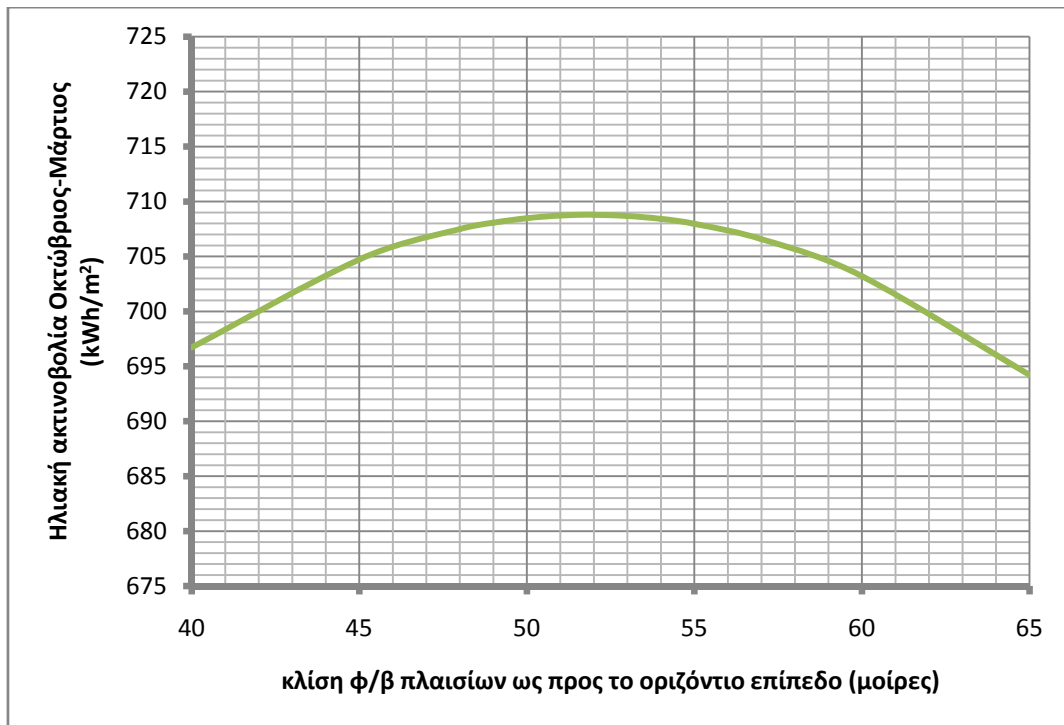
Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο β (μοίρες)	Ηλιακή ακτινοβολία Απρίλιος-Σεπτέμβριος (kWh/m ²)
0	1100,00
5	1109,36
7	1111,57
9	1112,90
10	1113,22
11	1113,32
12	1113,20
13	1112,84
14	1112,26
15	1111,45
17	1109,15
20	1103,97
25	1090,78

Πίνακας 6.5

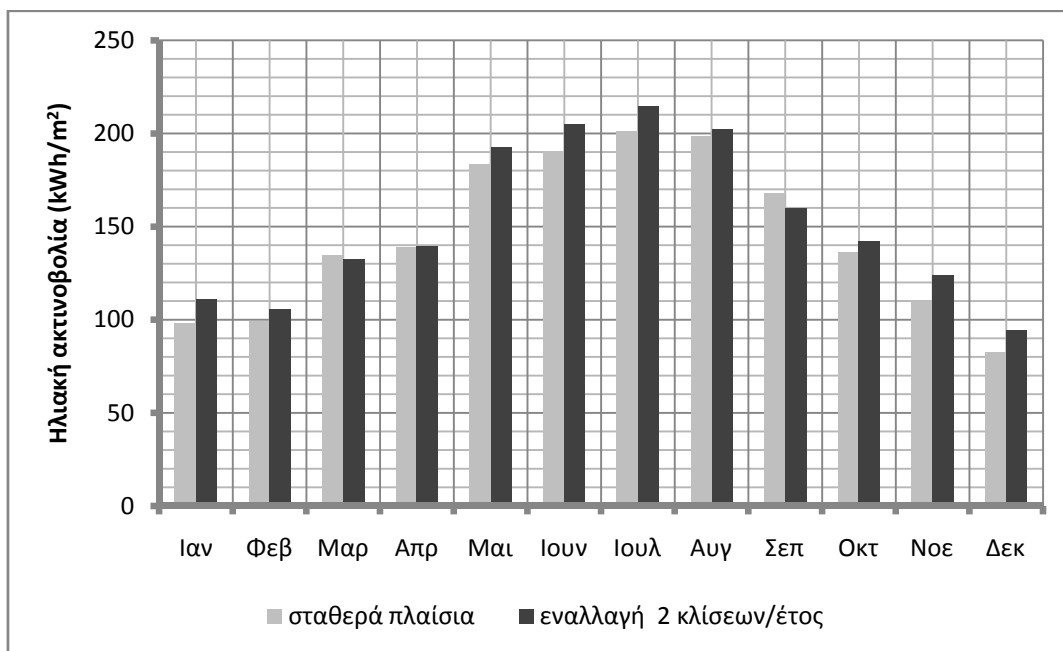
Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο β (μοίρες)	Ηλιακή ακτινοβολία Οκτώβριος-Μάρτιος (kWh/m ²)
40	696,72
45	704,72
48	707,48
49	708,07
50	708,48
51	708,72
52	708,79
53	708,69
54	708,41
55	707,97
57	706,57
60	703,20
65	694,21



Σχήμα 6.8



Σχήμα 6.9



Σχήμα 6.10 Σύγκριση σταθερής ετήσιας κλίσης και κλίσης που αλλάζει 2 φορές το έτος.

Πίνακας 6.6 Περιέχει την ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο H , την εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία H_0 , τον συντελεστή R_b , την άμεση, διάχυτη, ανακλώμενη και συνολική ηλιακή ακτινοβολία για κλίση 28° ανά μήνα για το γεωγραφικό πλάτος της Καλαμάτας. Η τελευταία στήλη δείχνει την μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για κάθε μήνα.

Μήνας	H (kWh/m ²)	H_0 (kWh/m ²)	R_b	Άμεση (kWh/m ²)	Διάχυτη (kWh/m ²)	Ανακλώμενη (kWh/m ²)	H_T (kWh/m ²)	H_T/d (kWh/d·m ²)
Ιανουάριος	66	146,676	1,848	71,397	25,768	0,773	97,937	3,159
Φεβρουάριος	76	172,763	1,556	68,075	30,357	0,890	99,321	3,547
Μάρτιος	116	247,663	1,287	89,926	43,452	1,358	134,735	4,346
Απρίλιος	135	294,854	1,070	85,612	51,778	1,580	138,970	4,632
Μάιος	192	340,636	0,946	123,313	57,994	2,247	183,554	5,921
Ιούνιος	209	347,195	0,881	130,300	57,488	2,446	190,234	6,341
Ιούλιος	217	350,498	0,905	141,487	57,064	2,540	201,091	6,487
Αύγουστος	198	319,075	1,009	144,233	51,868	2,318	198,418	6,401
Σεπτέμβριος	149	259,181	1,194	122,311	43,821	1,744	167,877	5,596
Οκτώβριος	106	207,483	1,460	98,737	36,111	1,241	136,089	4,390
Νοέμβριος	75	151,878	1,764	82,552	26,542	0,878	109,972	3,666
Δεκέμβριος	55	134,288	1,949	58,426	23,557	0,644	82,627	2,665
Άθροισμα				1216,368	505,800	18,658	1740,826	

6.3.1.3 Επιλογή της κλίσης

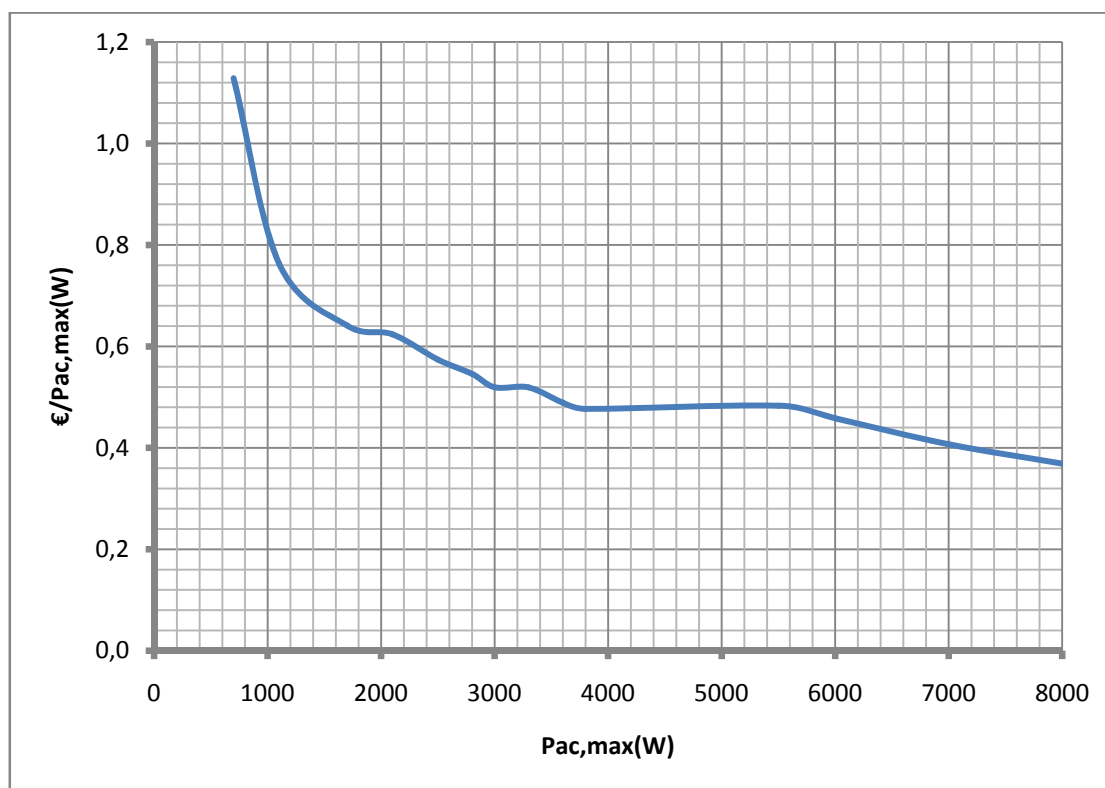
Εφόσον η επιλογή έχει να γίνει μεταξύ των δύο παραπάνω εκδοχών, θεωρείται ότι το κέρδος που προσφέρει η εναλλαγή μεταξύ δύο κλίσεων όσον αφορά την προσλαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία δεν αντισταθμίζει τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από μια τέτοια επιλογή. Αρχικά η κλίση των 11° για το καλοκαίρι ευνοεί της επικάθηση σκόνης και άλλων ρύπων στη επιφάνεια των συλλεκτών και κάνει δύσκολη των απομάκρυνσή τους από τον αέρα. Το γεγονός αυτό μπορεί να μειώσει αρκετά την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, καθώς αυτή εξαρτάται άμεσα από τον συντελεστή ρύπανσης, αναιρώντας ουσιαστικά οποιοδήποτε κέρδος προέκυπτε από την προσλαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον το κόστος του χειροκίνητου μηχανισμού των αρθρωτών στηριγμάτων είναι μεγαλύτερο από αυτό των σταθερών βάσεων στήριξης. Τελικά επιλέγεται η εκδοχή των αμετακίνητων στηριγμάτων σε γωνία 28° για όλη την διάρκεια του έτους. Στον πίνακα 6.6 δίνονται αναλυτικά όλες οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας για το γεωγραφικό πλάτος της Καλαμάτας και για την επιλεγόμενη τιμή της κλίσης, καθώς και η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία κάθε μήνα.

6.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

Η επιλογή των αντιστροφών είναι ίσως το σημαντικότερο κομμάτι στη μελέτη μιας φ/β εγκατάστασης. Αν η προσέγγιση γίνει μόνο από οικονομικής πλευράς τότε αναμφισβήτητα θα καταλήξουμε στην επιλογή αντιστροφών μεγάλης ισχύος, γιατί η διαφορά στην τιμή είναι αρκετά μεγάλη και η πολυπλοκότητα του φ/β συστήματος μικρή (Σχήμα 6.11). Ως ακραίο παράδειγμα θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι το συγκεκριμένο φ/β πάρκο ισχύος 100kWp καλύπτεται από ένα και μόνο αντιστροφέα. Όμως μια τέτοια επιλογή, προφανώς είναι λανθασμένη, καθώς περιέχει τον κίνδυνο να αποκοπεί όλο το σύστημα σε περίπτωση βλάβης του μοναδικού αντιστροφέα. Επισημαίνεται ότι ο τύπος των αντιστροφών για απευθείας διασύνδεση είναι συγκεκριμένος και με ειδικές διατάξεις όπως αυτές του σκανδαλισμού, της διάγνωσης και του εύρους λειτουργίας. Για τη λειτουργία τους προαπαιτείται η ύπαρξη τάσης στο δίκτυο (σκανδαλισμός).

Ακόμα πρέπει να τονιστεί ότι η ονομαστική ισχύς εξόδου του αντιστροφέα δεν πρέπει να ταυτίζεται σε καμία περίπτωση με την ισχύ αιχμής των φ/β πλαισίων στην είσοδό του. Μια τέτοια επιλογή θα ήταν λανθασμένη, καθώς τα φ/β πλαίσια παράγουν την ονομαστική ισχύ αιχμής τους υπό ιδανικές συνθήκες, οι οποίες δεν συναντώνται στην πράξη και αν συμβεί ποτέ αυτό διαρκεί για ένα πολύ μικρό διάστημα. Επιπλέον και οι εταιρίες, οι οποίες παράγουν αντιστροφείς προτείνουν η μέγιστη ονομαστική ισχύς της γεννήτριας να είναι αυξημένη κατά ένα ποσοστό σε σχέση με την ονομαστική ισχύ εισόδου του αντιστροφέα. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι κατά 10-20% μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ εξόδου του αντιστροφέα. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν επιλεγεί μικρότερη τιμή, αυτό θα είχε σαν

αποτέλεσμα μη αποδοτική χρήση των αντιστροφέων και ακόμα μεγαλύτερο κόστος, καθώς θα απαιτούνται περισσότεροι αντιστροφείς για την υλοποίηση της ίδιας φ/β εγκατάστασης.



Σχήμα 6.11 Κόστος αντιστροφέων σε σχέση με την μέγιστη ισχύ εξόδου. Οι τιμές αφορούν αντιστροφείς της εταιρίας SMA (σειρές Sunny Boy και Sunny Mini Central) και προέκυψαν από μια στοιχειώδη έρευνα αγοράς στο διαδίκτυο. Σκοπός είναι να φανεί ότι το κόστος ανά Watt μειώνεται με την αύξηση της ισχύος του αντιστροφέα.

Η ισχύς του αντιστροφέα πρέπει να συμβιβάζει πολλούς παραμέτρους. Για το συγκεκριμένο φ/β πάρκο εξετάστηκαν τα προϊόντα μιας εκ των μεγαλύτερων εταιριών στον χώρο, της SMA. Η εταιρία αυτή δραστηριοποιείται πολλά χρόνια στο χώρο των αντιστροφέων για φ/β συστήματα και τα προϊόντα της θεωρούνται κορυφαία όσον αφορά την αξιοπιστία και την απόδοση.

Η προσέγγιση που ακολουθείται για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου αντιστροφέα έχει πρώτα από όλα να κάνει με την επιλογή της κατάλληλης ισχύος. Η επιλογή αυτή πρέπει να συμβιβάζει τους παράγοντες του κόστους, της αξιοπιστίας και ευκολίας χειρισμού του συστήματος. Θεωρούμε ότι όλοι οι αντιστροφείς που θα χρησιμοποιηθούν είναι όμοιοι, γεγονός που εξασφαλίζει ότι και τα string των φ/β πλαισίων, καθώς και οι συστοιχίες θα προκύψουν ίδιες. Αυτό θα έχει με τη σειρά του σαν αποτέλεσμα να απλοποιηθεί η τοπογραφική διάταξη της εγκατάστασης και να γίνει ευκολότερη η κυκλωματική σύνδεση. Εφόσον η συνολική εγκατάσταση έχει ισχύ 100kWp, η ισχύς των αντιστροφέων πρέπει να επιλεγεί αναλογικά με αυτή την

τιμή. Εξετάζονται οι διάφορες υλοποιήσεις που μπορούν να προκύψουν χρησιμοποιώντας τους αντιστροφείς της SMA της σειράς SUNNY MINI CENTRAL, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για εγκαταστάσεις μέσης και μεγάλης ισχύς. Τα μοντέλα που εξετάστηκαν είναι τα : SMC 6000TL, SMC 7000TL και SMC 8000TL. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών των αντιστροφέων φαίνονται στον πίνακα 6.7, ενώ αναλυτικά datasheet δίνονται στο παράρτημα Γ.

Πίνακας 6.7 Τεχνικά στοιχεία των αντιστροφέων SUNNY MINI CENTRAL της εταιρίας SMA.

SMA-SUNNY MINI CENTRAL			
	SMC 6000TL	SMC 7000TL	SMC 8000TL
Τιμές Εισόδου			
Μέγιστη ισχύς DC	6200W	7200W	8250W
Εύρος τάσης DC	335V-700V	335V-700V	335V-700V
Ονομαστική τάση DC	350V	350V	350V
Μέγιστη τάση DC	700V	700V	700V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου	19A	22A	25A
Διακύμανση τάσης DC	<10%	<10%	<10%
Μέγιστος αριθμός παράλληλων string	4	4	4
Τιμές Εξόδου			
Μέγιστη ισχύς AC	6000W στους 40°C	7000W στους 40°C	8000W στους 40°C
Ονομαστική ισχύς AC	6000W	7000W	8000W
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	27A	31A	35A
THD ρεύματος AC	<4%	<4%	<4%
Ονομαστική τάση AC	220V-240V	220V-240V	220V-240V
Ονομαστική συχνότητα AC	50Hz	50Hz	50Hz
Απόδοση			
Μέγιστη απόδοση	98%	98%	98%
Euro-eta	97,7%	97,7%	97,7%
Μηχανολογικά στοιχεία			
Βάρος	31kg	32kg	33kg
Ύψος/Μήκος/Πλάτος/ (mm)	613/468/242	613/468/242	613/468/242

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του πλήθους των αντιστροφέων σε κάθε περίπτωση. Επειδή η φ/β εγκατάσταση πρόκειται να συνδεθεί στο δίκτυο XT μέσω τριών αγωγών στις τρεις φάσεις του δικτύου (τριφασική σύνδεση) εξετάζεται το κατά πόσο είναι δυνατόν οι τρεις αυτοί αντιστροφείς να προσφέρουν μια υλοποίηση στην οποία θα υπάρχει συμμετρία ισχύος μεταξύ των τριών φάσεων. Εφόσον έχει επιλεγεί η χρήση ενός τύπου αντιστροφέα αυτό συνεπάγεται ότι ο συνολικός αριθμός των αντιστροφέων πρέπει να είναι πολλαπλάσιος του 3, για να μπορούν να ομαδοποιηθούν συμμετρικά, όσον αφορά την ισχύ, οι έξοδοί τους. Αν δεν καταστεί

δυνατή μια τέτοια υλοποίηση με κανέναν από τους αντιστροφείς που θα επιλεγούν τότε θα εξεταστεί μια διαφορετική προσέγγιση.

Εξετάζοντας τον αντιστροφέα SMC 6000TL, παρατηρούμε ότι η ισχύς εισόδου είναι 6kW. Λαμβάνοντας υπόψη όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω για την ισχύ αιχμής των πλαισίων προκύπτει ότι η ιδανική ισχύς στην είσοδό του κυμαίνεται μεταξύ 6.000Wp και 7.200Wp (έως 20% αυξημένη). Οι τιμές αυτές μας οδηγούν στην επιλογή 15 τέτοιων αντιστροφέων (αριθμός πολλαπλασιασμός του 3), που θα δέχονται στη είσοδό τους 6.667Wp ($100.000Wp/15 \approx 6.667Wp$). Τα αντίστοιχα μεγέθη για τους άλλους δύο αντιστροφείς προκύπτουν με τον ίδιο τρόπο και είναι: 12 αντιστροφείς SMC 7000TL που θα δέχονται στη είσοδο ισχύ περί τα 8.333Wp, 12 αντιστροφείς SMC 8000TL με ισχύ εισόδου την ίδια με πριν δηλαδή 8.333Wp, καθώς αν επιλέγαμε 9 η ισχύς στην είσοδό του θα ήταν πάρα πολύ μεγάλη (11.111Wp). Είναι ακόμα προφανές ότι αν πρέπει να επιλέξουμε ανάμεσα στους 2 τελευταίους αντιστροφείς, προφανώς συμφέρει ο αντιστροφέας SMC 7000TL, καθώς είναι φθηνότερος, όμως θα πρέπει πρώτα να εξεταστεί κατά πόσο είναι δυνατόν να συνδυαστεί με τα επιλεγόμενα πλαίσια, γεγονός που εξετάζεται στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος οι παραπάνω τιμές ισχύος εισόδου των αντιστροφέων είναι ενδεικτικές, ενώ οι ακριβείς θα υπολογιστούν με βάση την ισχύ των φ/β πλαισίων.

6.5 ΕΠΙΛΟΓΗ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Η επιλογή του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι γενικά ένα πολυσύνθετο πρόβλημα. Η πληθώρα κατασκευαστικών εταιριών και πλαισίων επιτείνουν ακόμα περισσότερο τη δυσκολία της επιλογής.

Οι παράμετροι σύμφωνα με τις οποίες έγινε η επιλογή των πλαισίων ήταν η αξιοπιστία και η τεχνογνωσία της κατασκευάστριας εταιρίας, η μέγιστη ισχύς που παράγουν, η απόδοσή τους και φυσικά το κόστος.

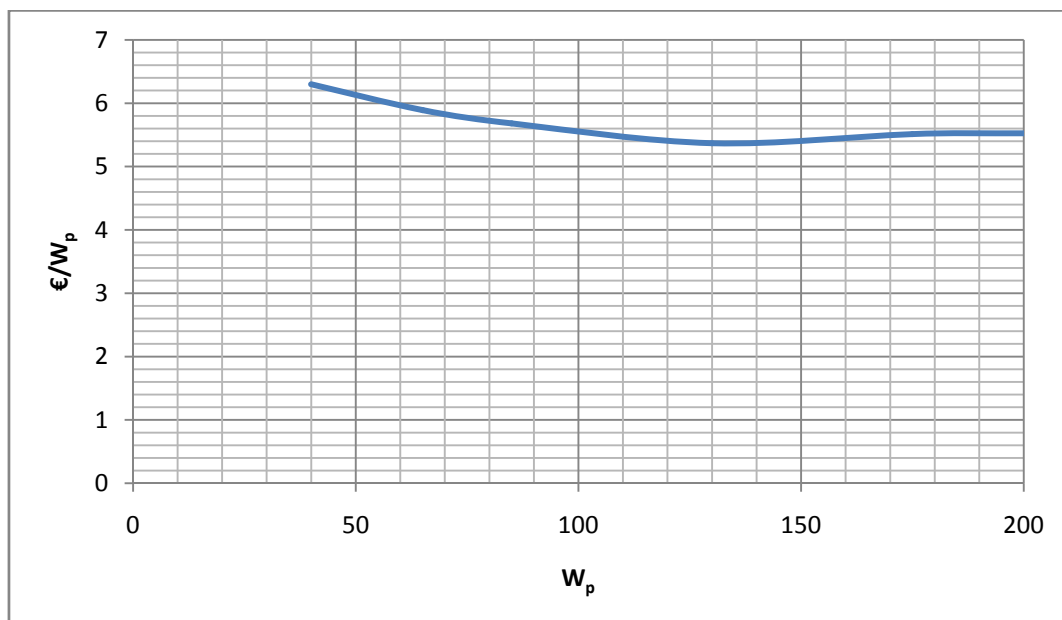
Η αρχική απόφαση που έπρεπε να ληφθεί είχε να κάνει με τη επιλογή του είδους του φωτοβολταϊκού πλαισίου όσον αφορά την τεχνολογία κατασκευής του. Πολύ γρήγορα η επιλογή κατέληξε ανάμεσα σε πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου και πολυκρυσταλλικού πυριτίου, καθώς όλες οι άλλες κατηγορίες που έχουν αναφερθεί στον κεφάλαιο 3 έχουν χρησιμοποιηθεί σε περιορισμένες εφαρμογές, δεν εμφανίζουν υψηλή απόδοση, ή όταν εμφανίζουν υψηλή απόδοση, κρίνονται οικονομικά ασύμφορες. Σύγκριση των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή φ/β στοιχείων δίνεται στον πίνακα 6.8.

Μετά από μια στοιχειώδη έρευνα αγοράς διαπιστώνεται ότι το κόστος των μονοκρυσταλλικών γεννητριών είναι αρκετά υψηλότερο από αυτό των πολυκρυσταλλικών και είναι της τάξεως του 10-15% ακριβότερες. Από την άλλη παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση κατά 1,5-3% από τις πολυκρυσταλλικές. Όμως εύκολα διαπιστώνει κανείς ότι η καλύτερη απόδοση που εμφανίζουν δεν αντισταθμίζει το κόστος αγοράς τους. Επομένως ως πρώτο βήμα αποφασίζεται η επιλογή ενός πολυκρυσταλλικού πλαισίου.

Πίνακας 6.8 Συγκριτικός πίνακας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή φ/β στοιχείων

Υλικό φ/β στοιχείων	Απόδοση φ/β στοιχείων του εμπορίου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο	14-19%	<ul style="list-style-type: none"> • Ομοιόμορφη μοριακή δομή • Μεγάλος βαθμός απόδοσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος παραγωγής • Μεγάλες απώλειες κατά τη διαδικασία κοπής • Ενεργοβόρα διαδικασία παραγωγής
Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο	10-14%	<ul style="list-style-type: none"> • Οικονομικότερη παραγωγική διαδικασία από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο • Τετραγωνικά δισκία επιτρέπουν μεγαλύτερο δείκτη κάλυψης 	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλότερη απόδοση συγκρινόμενη με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο • Μεγάλες απώλειες κατά τη διαδικασία κοπής
Ribbon Πυρίτιο	Έως 15%	<ul style="list-style-type: none"> • Λιγότερες απώλειες πυριτίου στην παραγωγή 	<ul style="list-style-type: none"> • Χειρότερη ποιότητα πυριτίου από αυτή του μον/κού • Περιορισμένες εμπορική παραγωγή μέχρι σήμερα
Thin-film Πυρίτιο	Έως 17% (ραγδαία εξελισσόμενη έρευνα)	<ul style="list-style-type: none"> • Λιγότερο χρησιμοποιούμενο υλικό • Όχι μεγάλες απαιτήσεις σε υλικό υποστρώματος • Πολλά υποσχόμενη τεχνολογία 	<ul style="list-style-type: none"> • Περιορισμένες εμπορική παραγωγή μέχρι σήμερα
Άμορφο Πυρίτιο	6-9%	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος παραγωγής συγκρινόμενο με το κρυσταλλικό πυρίτιο • Υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας 	<ul style="list-style-type: none"> • Μικρός βαθμός απόδοσης • Βαθμιαία μείωση της απόδοσης με την πάροδο του χρόνου
Αρσενικούχο γάλλιο	25-30%	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγάλος βαθμός απόδοσης • Υψηλή θερμική αδράνεια 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος παραγωγής (5πλασιο του κρυσταλλικού πυριτίου)
Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός	Έως 10%	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας • Δεν εμφανίζει βαθμιαία πτώση της απόδοσης όπως το άμορφο πυρίτιο 	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύπλοκο υλικό • Αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγική διαδικασία • Περιορισμένες εμπορική παραγωγή μέχρι σήμερα
Τελλουριούχο Κάδμιο	6-13%	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας • Χαμηλό κόστος παραγωγής 	<ul style="list-style-type: none"> • Αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγική διαδικασία • Περιορισμένες εμπορική παραγωγή μέχρι σήμερα

Προφανώς για την επιλογή της κατασκευάστριας εταιρίας δεν ήταν δυνατόν να εξεταστούν όλες οι εκατοντάδες εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο. Επιλέχθηκαν 4-5 μεγάλες εταιρίες που δραστηριοποιούνται για πολλά χρόνια στο χώρο, έχουν την απαραίτητη τεχνογνωσία και η αντοχή των προϊόντων (γεγονός υψίστης σημασίας για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις) έχει αποδειχθεί στη πράξη. Οι εταιρίες αυτές είναι η BP Solar, Shell, Kyocera, Siemens και η Sharp.



Σχήμα 6.12 Κόστος φ/β πλαισίων σε σχέση με την ισχύ που παράγουν. Οι τιμές αφορούν πλαίσια της εταιρίας Kyocera και προέκυψαν από μια στοιχειώδη έρευνα αγοράς στο διαδίκτυο. Σκοπός είναι να φανεί ότι το κόστος των μικρών πλαισίων (μέχρι $100W_p$) είναι υψηλότερο από τα μεγαλύτερα πλαίσια.

Από την άποψη της ισχύος συμφέρει περισσότερο η επιλογή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με μεγάλη ισχύ αντί πολλών πλαισίων με μικρότερες ισχύεις ειδικά για μεγάλες φ/β εγκαταστάσεις, που λειτουργούν ως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μεγάλα πλαίσια δουλεύονται πιο εύκολα στην εγκατάστασή τους, απαιτούνται λιγότερες συνδέσεις και το κόστος εγκατάστασης είναι μικρότερο. Επίσης το κόστος ανά W_p μειώνεται ελαφρά με την αύξηση της ισχύος ενός πλαισίου, αλλά για πλαίσια μεγαλύτερα των $120W_p$ είναι ουσιαστικά σταθερό (Σχήμα 6.12)

Από την άλλη η επιλογή ενός πλαισίου με πολύ μεγάλη ισχύ μπορεί να έχει και αρνητικές επιπτώσεις, γιατί μια ενδεχόμενη σκίαση ενός μέρους του, θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ότι σε ένα πλαίσιο μικρότερης ισχύος. Συμβιβάζοντας τα παραπάνω επιλέγεται η ισχύς του πλαισίου να κυμαίνεται μεταξύ $120W_p$ και $200W_p$.

Τελικά μελετώντας τα datasheet των πλαισίων από τις παραπάνω εταιρίες, επιλέχθηκαν τρία πλαίσια της εταιρίας Kyocera, τα οποία θα εξεταστούν, αν μπορούν να συνδυαστούν και με ποιο τρόπο, με τους αντιστροφείς της προηγούμενης παραγράφου, για να επιτευχθεί ο τελικός στόχος, που είναι η εγκατάσταση ενός φ/β

συστήματος 100kWp. Τα πλαίσια αυτά είναι τα: KC130 GHT-2, KC175GHT-2 και KC200GHT-2, ονομαστικής ισχύος 130Wp, 175Wp και 200Wp αντίστοιχα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον πίνακα 6.9 και αναλυτικά datasheet δίνονται στο παράρτημα Β.

Η απόδοση των πλαισίων μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 3.12 και προκύπτει:

$$\eta_m = \frac{P_m}{G \cdot S} = \frac{130}{1000 \cdot 0,9291} = 0,1399 = 13,99\% \text{ για το πλαίσιο KC130GT-1}$$

$$\eta_m = \frac{175}{1000 \cdot 1,2771} = 0,1370 = 13,70\% \text{ για το πλαίσιο KC175GHT-2}$$

$$\eta_m = \frac{200}{1000 \cdot 1,4108} = 0,1418 = 14,18\% \text{ για το πλαίσιο KC200GHT-2}$$

Πίνακας 6.9 Τεχνικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων φ/β πλαισίων εταιρίας Kyocera.

KYOCERA-KC 175 GHT-2			
Ηλεκτρική απόδοση υπό στάνταρ συνθήκες (STC*)			
	KC130 GHT-2	KC175GHT-2	KC200GHT-2
Ονομαστική μέγιστη ισχύς Pmax	130W	175W	200W
Ονομαστική τάση φόρτισης Vmp	17,6V	23,6V	26,3V
Ονομαστικό ρεύμα φόρτισης Impp	7,39A	7,42A	7,61A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος Voc	21,9V	29,2V	32,9V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης Isc	8,02A	8,09A	8,21A
Τάση μέγιστης ισχύος συστήματος	750V	1000V	1000V
Πλήθος φ/β στοιχείων ανά πλαίσιο	36	48	54
Τεχνολογία φ/β στοιχείων	Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο
Μορφή φ/β στοιχείων	πολυγωνική	πολυγωνική	πολυγωνική
Διαστάσεις (μήκος×πλάτος×ύψος) mm	1425×652×36	1290×990×36	1425×990×36
Βάρος	11,9kg	16,0kg	18,5kg

*STC Ηλιακή ακτινοβολία=1kW/m², AM=1.5, θερμοκρασία πλαισίου=25°C

Πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή του φ/β πλαισίου εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του αντιστροφέα και ουσιαστικά δεν μπορεί να γίνει χωρίς να ληφθούν υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά του τελευταίου. Ακόμα οι διατάξεις του πλαισίου θα καθορίσουν τις βάσεις στήριξης που θα χρησιμοποιηθούν και γενικότερα τις

απαραίτητες κατασκευαστικές υποδομές. Εκτός από τις διαστάσεις του πλαισίου και την ισχύ αιχμής του, ρόλο κλειδί έχουν τα μεγέθη της τάσης και έντασης στο σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος (MPP), καθώς και το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτού κυκλώματος, που επηρεάζονται άμεσα από τα χαρακτηριστικά μεγέθη του αντιστροφέα. Τέλος άμεσα συνυφασμένη με τα παραπάνω είναι και η κυκλωματική διάταξη της συστοιχίας.

Συνδυασμός πλαισίου-αντιστροφέα

Με βάση την επιλογή των αντιστροφέων και των φ/β πλαισίων, που έγινε παραπάνω, εξετάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί για την υλοποίηση του φ/β πάρκου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε φαίνεται αμέσως παρακάτω και βασίστηκε στα εξής:

- Τα πλαίσια που συνδέονται σε έναν αντιστροφέα πρέπει να έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά, σε διαφορετική περίπτωση δεν υπάρχει η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους. Γενικότερα πρέπει μια τέτοια υλοποίηση να αποφεύγεται, καθώς μπορούν να ανακύψουν και τεχνικά προβλήματα (π.χ ανάστροφο ρεύμα προς κάποιο παράλληλο string, γεγονός που εξετάζεται παρακάτω).
- Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, προτιμήθηκε οι αντιστροφείς που θα χρησιμοποιηθούν στην εγκατάσταση να είναι οι ίδιοι (κυρίως να έχουν την ίδια ισχύ) και ο συνολικός αριθμός τους να είναι πολλαπλάσιο του 3.
- Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όλα τα πλαίσια, που θα χρησιμοποιηθούν σε όλη την εγκατάσταση θα είναι τα ίδια.

Έστω ότι επιλέγονται 15 αντιστροφείς SMC 6000TL, ο καθένας εκ των οποίων πρέπει να δέχεται στην είσοδο του 6667Wp για να φτάσουμε τα 100kWp που είναι η επιθυμητή τιμή της εγκατάστασης. Εξετάζοντας τα πλαίσια που έχουμε στη διάθεσή μας καταλήγουμε στο γεγονός ότι το πλαίσιο, το οποίο είναι το πιο ιδανικό από τα 3 να συνδυαστεί με τον συγκεκριμένο αντιστροφέα (σκοπός πάντα είναι, η εγκατεστημένη ισχύς να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα 100kWp, χωρίς όμως να τα ξεπερνάει) είναι το KC175GHT-2.

Το επόμενο βήμα είναι να βρεθεί ο κατάλληλος αριθμός των πλαισίων και η κυκλωματική σύνδεσή τους. Υπολογίζεται ότι σε κάθε αντιστροφέα συνδέονται 38 πλαίσια των 175W_p (**175W_p×38=6650W_p**). Τα πλαίσια αυτά οργανώνονται σε 2 παράλληλα string των 19 πλαισίων το καθένα. Αυτό σημαίνει ότι η είσοδος του αντιστροφέα δέχεται:

$$\mathbf{19\text{πλαίσια εν σειρά}\times 23,6V=448,4V}$$

από ένα string (επί συνόλου 2 string ανά αντιστροφέα), που είναι η απαραίτητη τάση εισόδου προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ισχύς εξόδου. Ακόμα δέχεται:

$$\mathbf{2\text{παράλληλα string}\times 7,42A=14,84A}$$

που παρατηρούμε ότι βρίσκεται μέσα στα όρια του αντιστροφέα. Ο συνολικός αριθμός των φ/β πλαισίων της εγκατάστασης προκύπτει:

$$\mathbf{38\text{πλαίσια/αντιστροφέα}\times 15\text{αντιστροφείς}=570\text{ φ/β πλαίσια}$$

Τέλος η συνολική ισχύς της εγκατάστασης είναι:

$$6650\text{Wp}/\text{αντιστροφέα} \times 15 \text{ αντιστροφείς} = 99.750\text{Wp}$$

που είναι πολύ κοντά στο επιθυμητό. Πρέπει να τονιστεί ότι ο συνδυασμός με τα άλλα 2 πλαίσια που εξετάστηκαν, έδιναν συνολική ισχύ εγκατάστασης είτε μεγαλύτερη από το επιθυμητό είτε αρκετά μικρότερη. Για αυτό τον λόγο επιλέγεται ο συγκεκριμένος συνδυασμός πλαισίου-αντιστροφέα.

Έστω τώρα ότι επιλέγονται 12 αντιστροφείς SMC 7000TL, ο καθένας εκ των οποίων πρέπει να δέχεται στην είσοδο του 8333Wp για να φτάσουμε τα 100kWp που είναι η επιθυμητή τιμή της εγκατάστασης. Εξετάζοντας τα πλαίσια που έχουμε στη διάθεσή μας καταλήγουμε στο γεγονός ότι κανένα από τα 3 φ/β πλαίσια δεν μπορεί να συνδυαστεί με τον συγκεκριμένο αντιστροφέα καθώς προκύπτει η συνολική επιτρεπτή ισχύς στην είσοδό του κατά πολύ μικρότερη από το επιθυμητό. Συγκεκριμένα το πρόβλημα είναι ότι τα συγκεκριμένα φ/β πλαίσια δεν μπορούν να οργανωθούν αποδοτικά σε 2 παράλληλα string, καθώς τότε η τάση εισόδου είναι εκτός ορίων MPP του αντιστροφέα, αλλά ούτε και σε 3 παράλληλα string, καθώς τότε το ρεύμα εισόδου είναι εκτός ορίων MPP του αντιστροφέα.

Με τη ίδια λογική εξετάστηκε και ο τρίτος αντιστροφέας και τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στον πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10 Πιθανοί συνδυασμοί πλαισίων-αντιστροφέων

	1η περίπτωση	2η περίπτωση	3η περίπτωση
Αντιστροφέας (INV)	SMC6000TL (6kW)	SMC 7000TL (7kW)	SMC 8000TL (8kW)
Πλαίσιο	KC 175 GHT-2 (175Wp)	KC 200 GHT-2 (200Wp)	KC 130 GHT-2 (200Wp)
Πλήθος αντιστροφέων	15	12	12
Πλαίσια/Αντιστροφέα	38	38	63
Ισχύς PV στην είσοδο αντιστροφέα $P_{in,dc}$	6650Wp	7600Wp	8190Wp
Παράλληλα String/αντιστροφέα	2	2	3
Πλαίσια εν σειρά/αντιστροφέα	19	19	21
Τάση στην είσοδο αντιστροφέα $V_{in,dc}$	448,4V	499,7V	369,6V
Ένταση ρεύματος στην είσοδο αντιστροφέα $I_{in,dc}$	14,84A	15,22A	22,17A
Συνολικός αριθμός πλαισίων	570	456	756
Συνολική ισχύς εγκατάστασης	99.750Wp	91.200Wp	98.280Wp
Κόστος αντιστροφέων	15×2.750€=41.250€	12×2.850€=34.200€	12×2.950€=35.400€

Από τα παραπάνω σίγουρα αποκλείεται η 2η περίπτωση, καθώς απέχει πολύ από τον στόχο των 100kWp και ανάμεσα στις άλλες δύο προτιμάται η περίπτωση 3, καθώς το κόστος των αντιστροφέων σε αυτή τη περίπτωση προκύπτει αρκετά μικρότερο.

6.6 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

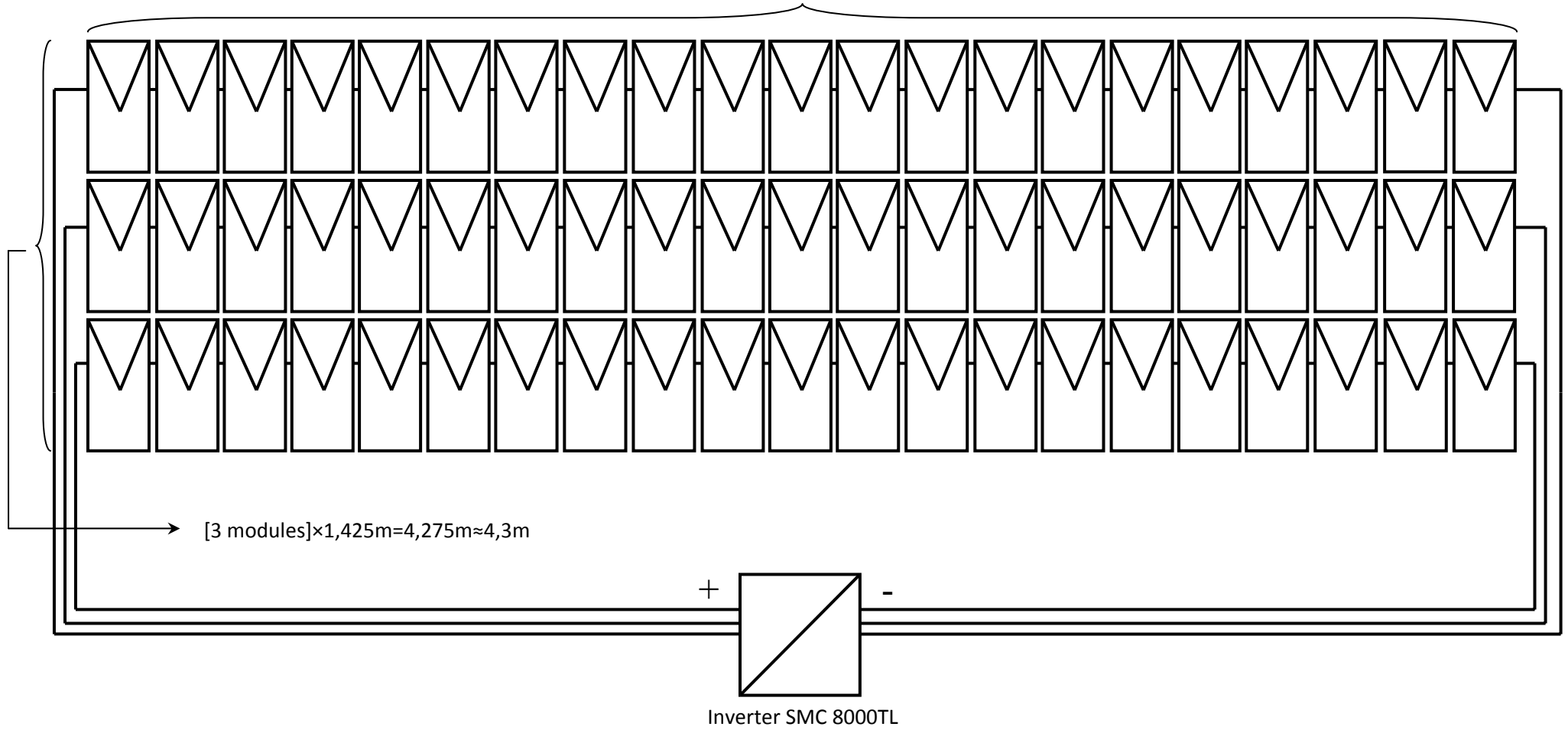
Είναι πολύ βολικό να επιλεγούν οι συστοιχίες του φ/β πάρκου να αποτελούνται από 63 φ/β πλαίσια με την κυκλωματική σύνδεση που περιγράφηκε παραπάνω (Σχήμα 6.13). Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει ένας αντιστροφέας ανά συστοιχία. Η λύση αυτή σαφώς και δεν είναι η μοναδική. Μια εναλλακτική υλοποίηση φαίνεται στο σχήμα 6.14, όπου έχει επιλεγεί κάθε string με 21 πλαίσια εν σειρά να αποτελεί και μια συστοιχία. Σε αυτή την διάταξη σε κάθε αντιστροφέα καταλήγουν 3 συστοιχίες παράλληλα, χωρίς βέβαια να μεταβάλλεται ο συνολικός αριθμός των πλαισίων που παραμένει 63 πλαίσια/αντιστροφέα. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο υλοποιήσεις έχει να κάνει με το γεγονός ότι η δεύτερη περίπτωση έχει μικρότερες συστοιχίες και απαιτείται μεγαλύτερο μήκος καλωδίων για τις συνδέσεις από την πρώτη περίπτωση. Από την άλλη μικρότερη συστοιχία συνεπάγεται και μικρότερης έκτασης και μεγέθους απαιτήσεις στην υποδομή στήριξης. Τονίζεται ότι δεν προκύπτει καμία διαφορά ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις, όσον αφορά την τελική απαιτούμενη έκταση του φ/β πάρκου, όπως φαίνεται στο κεφάλαιο 6.7. Επιπλέον δεν είναι δεσμευτικό ότι η σε σειρά σύνδεση των φ/β πλαισίων ενός string πρέπει να αποτελεί και το μήκος μιας συστοιχίας. Θα μπορούσε ως μήκος της συστοιχίας να επιλεγεί οποιοσδήποτε αριθμός φ/β πλαισίων χωρίς να υπάρχει κάποιο πρόβλημα στην λειτουργία, κάνοντας απλά τη σύνδεσή τους πιο πολύπλοκη.

6.6.1 Ανάστροφο ρεύμα

Το φαινόμενο της αντιστροφής ροής του ρεύματος προς τα πλαίσια σε μια φ/β συστοιχία, που συνδέεται σε έναν αντιστροφέα είναι γενικά ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο. Μπορεί να εμφανιστεί μόνο στην περίπτωση, την οποία υπάρχουν φ/β πλαίσια συνδεδεμένα παράλληλα και η τάση ανοιχτού κυκλώματος στα άκρα των παράλληλων strings είναι διαφορετική. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποφευχθεί εάν επιλεγούν παράλληλα strings ίδιου μήκους και ισχύος. Επιπλέον το φαινόμενο της σκίασης δεν συνεπάγεται εμφάνιση ανάστροφου ρεύματος σημαντικής τιμής, καθώς η επίδρασή του στην τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι ασήμαντη. Επομένως σε μια φ/β γεννήτρια, η οποία έχει διαστασιολογηθεί σωστά και για κατάσταση λειτουργίας χωρίς σφάλματα, η εμφάνιση του ανάστροφου ρεύματος είναι τελείως ανεπαίσθητη.

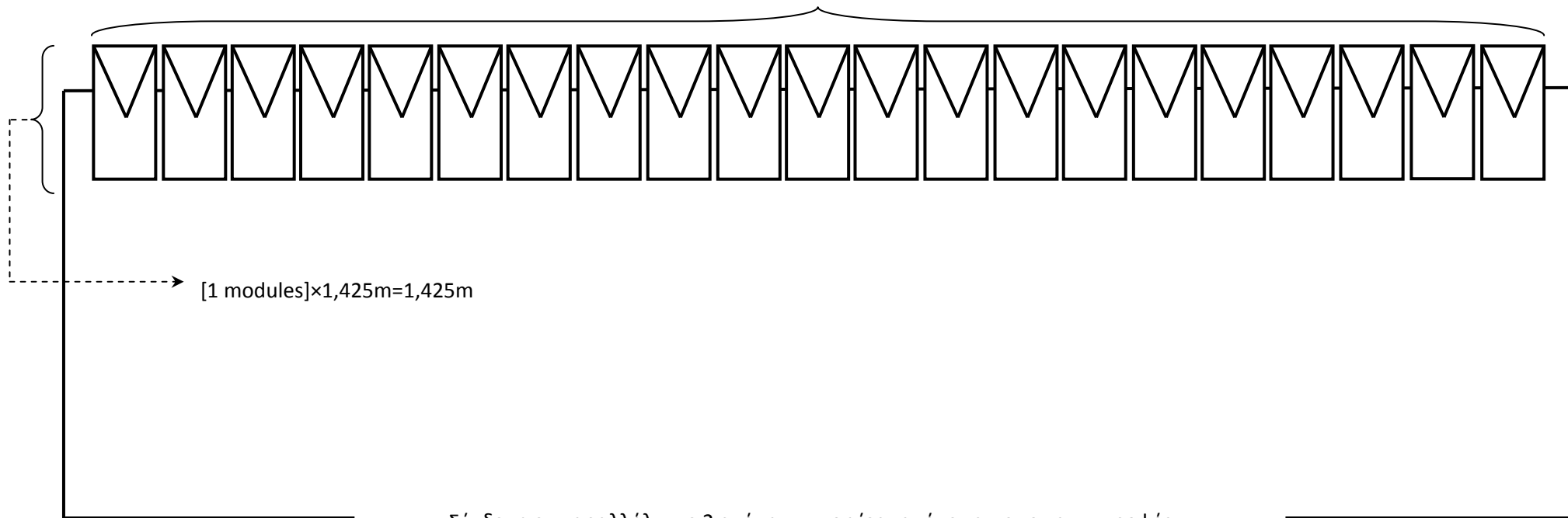
Σχήμα 6.13 Κυκλωματική Διάταξη Συστοιχίας

$[21 \text{ modules}] \times 0,652\text{m} = 13,692\text{m} \approx 14\text{m}$



Σχήμα 6.14 Εναλλακτική Διάταξη Συστοιχίας

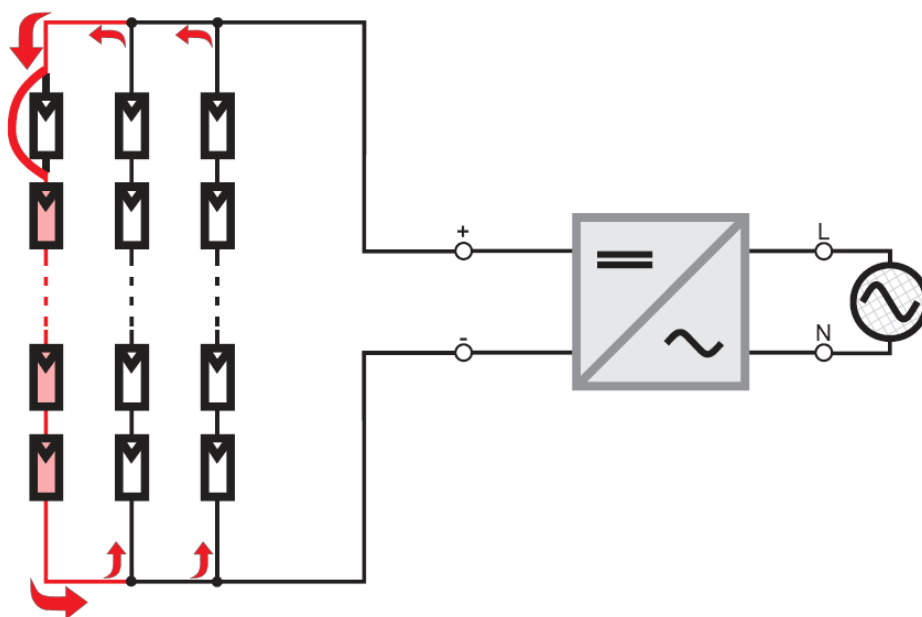
$$[21 \text{ modules}] \times 0,652\text{m} = 13,692\text{m} \approx 14\text{m}$$



Σύνδεση εν παραλλήλω με 2 ακόμα συστοιχίες και έπειτα με τον αντιστροφέα

Το ανάστροφο ρεύμα μπορεί να εμφανιστεί μόνο σε περιπτώσεις σφαλμάτων της φ/β γεννήτριας (π.χ. βραχυκύκλωμα σε ένα ή περισσότερα πλαίσια), τα οποία μπορούν να μειώσουν σημαντικά την τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός string σε σχέση με τα άλλα παράλληλα string. Σε μία τέτοια περίπτωση η διάοδος παράκαμψης (bypass diode), που έχουν όλα τα φ/β πλαίσια, αναγκάζει το ανάστροφο ρεύμα να περάσει μέσα από το string, το οποίο εμφάνισε το σφάλμα και ανάλογα με την τιμή αυτού του ρεύματος μπορεί να οδηγήσει σε θέρμανση και πιθανώς καταστροφή όλων των πλαισίων, που είναι συνδεδεμένα σε σειρά στο συγκεκριμένο string.

Παρόλο που τέτοια φαινόμενα σφαλμάτων είναι αρκετά απίθανα, και πολύ σπάνια συμβαίνουν στην πράξη, πρέπει να λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα προφύλαξης.



Σχήμα 6.15 Φαινόμενο της αντίστροφης ροής ρεύματος[SMA].

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.15 η τιμή του ανάστροφου ρεύματος ισούται με το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης των υπολοίπων strings. Στην περίπτωση της συστοιχίας, που έχει επιλεγεί για την εγκατάσταση του φ/β πάρκου, η τιμή αυτή προκύπτει:

$$\text{Ανάστροφο Ρεύμα} = (3 \text{ παράλληλα strings} - 1) \times 8,02\text{A} = 16,04\text{A}$$

Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της αντίστροφης ροής του ρεύματος σε μια συστοιχία, μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω μέθοδοι:

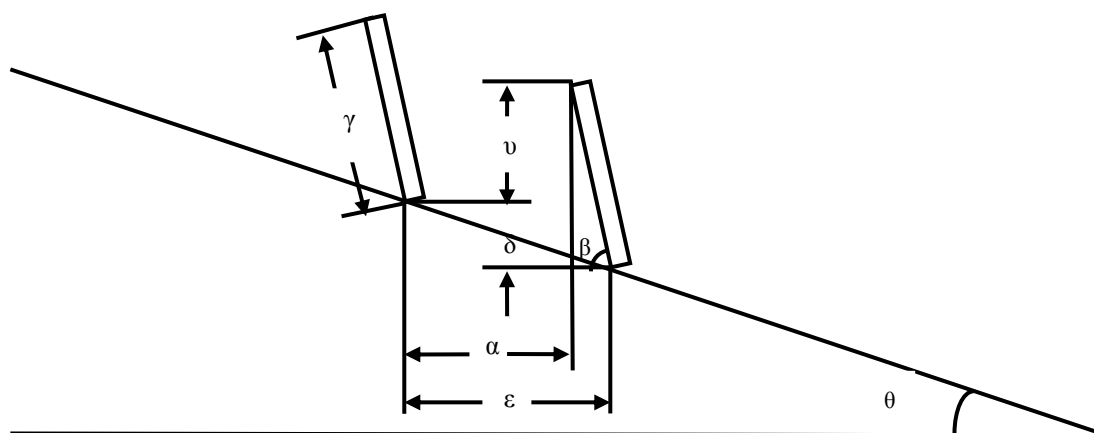
- **Διαστασιολόγηση των strings.** Με την κατάλληλη επιλογή των στοιχείων που αποτελούν ένα string (πλαίσια, καλώδια, ακροδέκτες σύνδεσης), έτσι ώστε να αντέχουν το άθροισμα των ρευμάτων βραχυκύκλωσης των υπολοίπων strings. Όταν ο μέγιστος αριθμός των παράλληλων strings είναι 2, ο περιορισμός αυτός ικανοποιείται πάντα, καθώς το ανάστροφο ρεύμα που θα δεχθεί το string, όπου εμφανίστηκε το σφάλμα, θα προέρχεται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης του άλλου string και θα ισούται με αυτό. Επομένως δεν χρειάζεται καμία επιπλέον προστασία έναντι του ανάστροφου ρεύματος όταν υπάρχουν 2 παράλληλα strings.

- **Δίοδοι φραγής (String Diodes).** Οι δίοδοι αυτές συνδέονται εν σειρά με κάθε παράλληλο string για να αποτρέψουν την διέλευση ανάστροφου ρεύματος. Το μειονέκτημα είναι ότι στην κανονική λειτουργία της γεννήτριας σε κάθε string περνάει από τη δίοδο αυτή το ρεύμα κανονικής λειτουργίας με αποτέλεσμα να υπάρχουν απώλειες. Επιπλέον μια ενδεχόμενη βλάβη της δίοδου μπορεί να αναірέσει τον προστατευτικό της ρόλου ή ακόμα και να επιφέρει αστοχία όλου του string.
- **Ασφάλειες τήξης (String Fuses).** Συνδέονται και αυτές εν σειρά με κάθε παράλληλο string και έχουν κατάλληλη τιμή έτσι ώστε να προστατεύουν από το ανάστροφο ρεύμα. Πλεονεκτούν σε σχέση με τις δίοδους φραγής καθώς έχουν ασήμαντες απώλειες κατά την κανονική λειτουργία, ενώ και η περίπτωση βλάβης τους μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτή.

Ακόμα πρέπει να τονιστεί ότι η μέγιστη τιμή του ανάστροφου ρεύματος που μπορούν να δεχθούν τα φ/β πλαίσια είναι μια παράμετρος που δεν δίνεται από τους κατασκευαστές. Κάποιες εταιρίες μόνο δίνουν την μέγιστη τιμή της ασφάλειας που απαιτείται. Ως γενικός κανόνας πάντως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ότι για τιμές του ανάστροφου ρεύματος μεγαλύτερες από το διπλάσιο του ρεύματος βραχυκύκλωσης των πλαισίων πρέπει να λαμβάνονται μέτρα προστασίας.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται η προστασία έναντι του αντίστροφου ρεύματος να γίνει με ασφάλειες τήξης όπως φαίνεται και στην κυκλωματική διάταξη του σχήματος 6.25.

6.7 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ



Σχήμα 6.16 Διάταξη φ/β συστοιχιών σε πλαγία κλίσης $\kappa = \tan\theta$, με απόλυτα νότιο προσανατολισμό.

Ένα πολύ σημαντικό γεγονός στις φ/β εγκαταστάσεις είναι η τοπογραφική διάταξη να είναι βέλτιστη. Γεγονός που εξασφαλίζεται αν έχει επιτευχθεί:

- Η βέλτιστη τοποθέτηση των πλαισίων όσον αφορά την κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο και τον προσανατολισμό προς τον νότο (αζιμούθιο 180°), όπως έχει προκύψει από την μελέτη.
- Η ελάχιστη δυνατή χρησιμοποίηση των επιφανειών που θα τοποθετηθούν τα πλαίσια, χωρίς σε καμία περίπτωση να επηρεάζεται η προσλαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια (αποφυγή φαινομένων σκίασης μεταξύ γειτονικών συστοιχιών).
- Η ελάχιστη χρησιμοποίηση καλωδίων για τις ενώσεις μεταξύ των πλαισίων, των συστοιχιών, των αντιστροφών κτλ.

Αρχικά υπολογίζεται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων συστοιχιών ε κατά μήκος του άξονα Β-Ν, που εξασφαλίζει ότι η μία συστοιχία δεν θα σκιάζει την επόμενη. Στο σχήμα 6.16 φαίνεται η διάταξη δύο συνεχόμενων συστοιχιών στη πλαγία.

Γνωρίζουμε ότι:

- Η κλίση της πλαγιάς που θα τοποθετηθούν τα φ/β πλαίσια είναι 8% κατά τη διεύθυνση Β-Ν με υπερύψωση στον Βορρά. Άρα $\kappa = \tan\theta = 0,08$.
- Η κλίση β των πλαισίων επιλέχθηκε ίση με 28° που είναι και η βέλτιστη τιμή. Άρα $\beta = 28^\circ$.
- Το ύψος γ της συστοιχίας προέκυψε περίπου 4,3m. Άρα $\gamma = 4,3m$.
- Το γεωγραφικό πλάτος της Καλαμάτας είναι $37,03^\circ$, Επομένως σύμφωνα με το διάγραμμα της εταιρίας Monogon (Σχήμα 3.15) προκύπτει ο λόγος της ελεύθερης απόστασης a προς το ύψος v , $a/v = 2,45$.

Από τη σχέση (3.11) προκύπτει η απόσταση ε :

$$\varepsilon = \gamma \cdot \frac{\frac{a}{v} \cdot \sin \beta + \cos \beta}{1 + \frac{a}{v} \cdot \kappa} = 4,3 \cdot \frac{2,45 \cdot \sin 28^\circ + \cos 28^\circ}{1 + 2,45 \cdot 0,08} = 7,31m \cong 8m$$

τιμή την οποία στρογγυλεύουμε στα 8m.

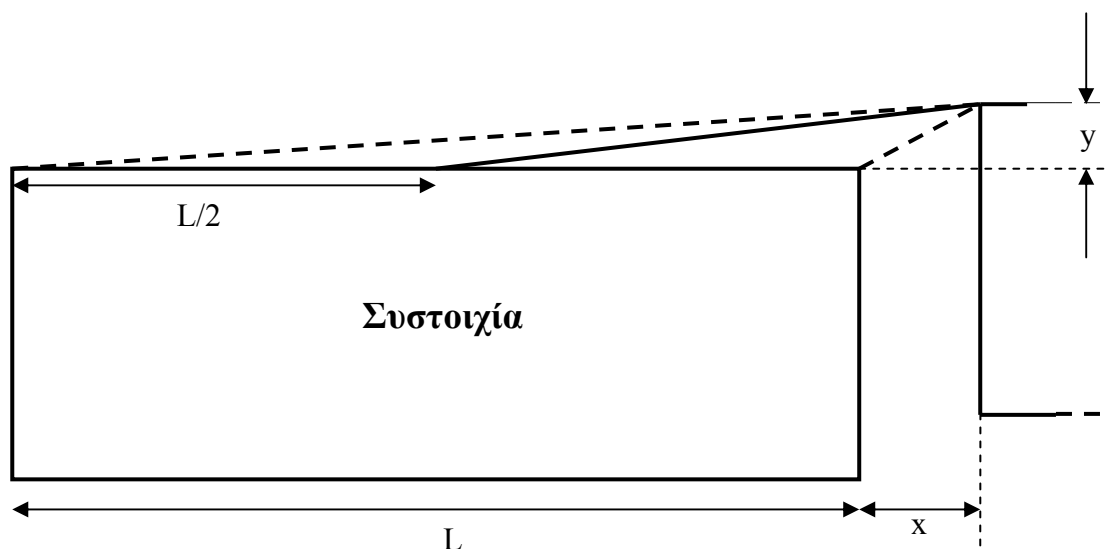
Μέχρι στιγμής έχει υπολογιστεί η απόσταση των συστοιχιών στη διεύθυνση Β-Ν. Απομένει διερεύνηση όσον αφορά τη διεύθυνση Α-Δ. Στη διεύθυνση αυτή παρατηρούμε μια μικρή κλίση του εδάφους ίση με 3%, που σημαίνει ότι η οριζοντίωση μιας συστοιχίας απαιτεί μια υπερύψωση του άκρου της συστοιχίας που βρίσκεται στη Δύση. Συγκεκριμένα η διαφορά ύψους κατά μήκος της συστοιχίας προκύπτει 0,42m ($0,03 \times 14m$).

Η τοποθέτηση των συστοιχιών μπορεί να γίνει με συμφώνα με τους παρακάτω τρόπους:

- Α. Τοποθέτηση των συστοιχιών χωρίς να γίνει οριζοντίωσή τους ακολουθώντας την φυσική κλίση.
- Β. Οριζοντίωση κάθε συστοιχίας κατά τον άξονα Α-Δ, ακολουθώντας κλιμακωτά τη φυσική κλίση.
- Γ. Οριζοντίωση όλων των συστοιχιών που θα τοποθετηθούν στη διεύθυνση Α-Δ.

Η επιλογή του τρίτου τρόπου τοποθέτησης, δηλαδή η οριζοντίωση όλων των συστοιχιών μπορεί να δημιουργήσει κατασκευαστικά προβλήματα και προβλήματα

αντοχής των βάσεων στήριξης, ειδικά στη περίπτωση που επιλεγεί να τοποθετηθούν πολλές συστοιχίες κατά τη διεύθυνση Α-Δ. Μια τέτοια επιλογή θα σήμαινε ότι η ανατολικότερη συστοιχία θα απαιτούσε μια μεγάλη υπερύψωση, η οποία θα ήταν τελείως μη πρακτική, αντιοικονομική και αντιαισθητική. Όσον αφορά τους άλλους δύο τρόπους θα μπορούσαν να υλοποιηθούν χωρίς μεγάλα προβλήματα. Η επιλογή του πρώτου τρόπου τοποθέτησης, δηλαδή ακολουθώντας την κλίση του εδάφους συνεπάγεται καταρχήν ότι όλες οι συστοιχίες θα σκιάζονται κατά τη δύση του ήλιου και για όσο χρονικό διάστημα το ύψος του γίνεται μικρότερο από τη γωνία κλίσης. Βέβαια στη περίπτωση που μελετάται, η κλίση είναι μικρή και η επίδραση της σκίασης τελείως αμελητέα. Επιπλέον η τοποθέτηση σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο μπορεί να συναντήσει και κατασκευαστικές δυσκολίες ειδικά εάν η κλίση δεν είναι ομαλή κατά μήκος του άξονα Α-Δ, καθώς και δυσκολίες κατά την τοποθέτηση των πλαισίων στις βάσεις. Τέλος ο δεύτερος τρόπος τοποθέτησης, εξασφαλίζει ότι οι δυτικότερες συστοιχίες δεν θα σκιάζονται καθόλου, αλλά προκύπτουν προβλήματα σκίασης μεταξύ των άλλων συστοιχιών (Σχήμα 6.17).

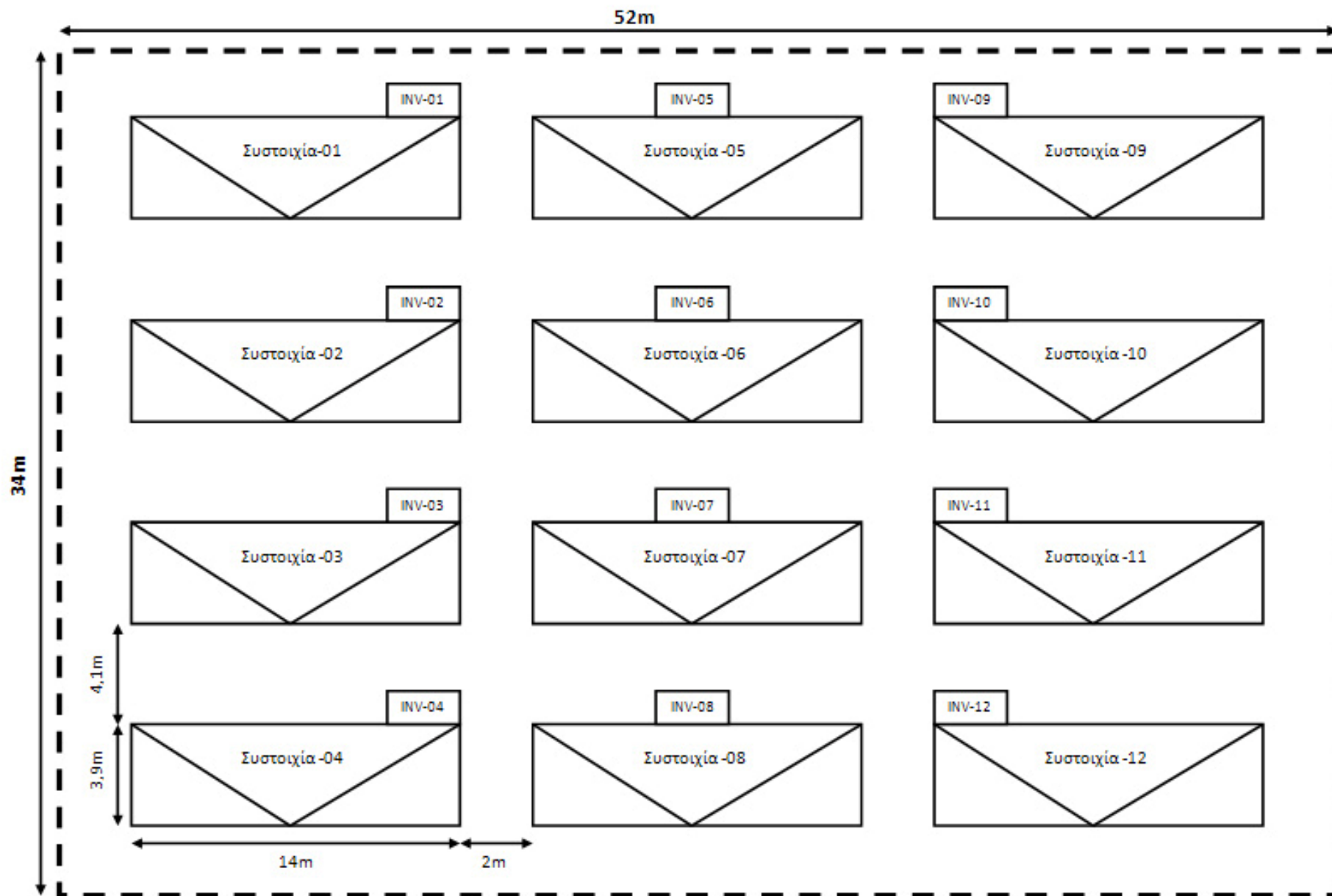


Σχήμα 6.17 Σκίαση από διπλανή συστοιχία κατά τη διεύθυνση Α-Δ.

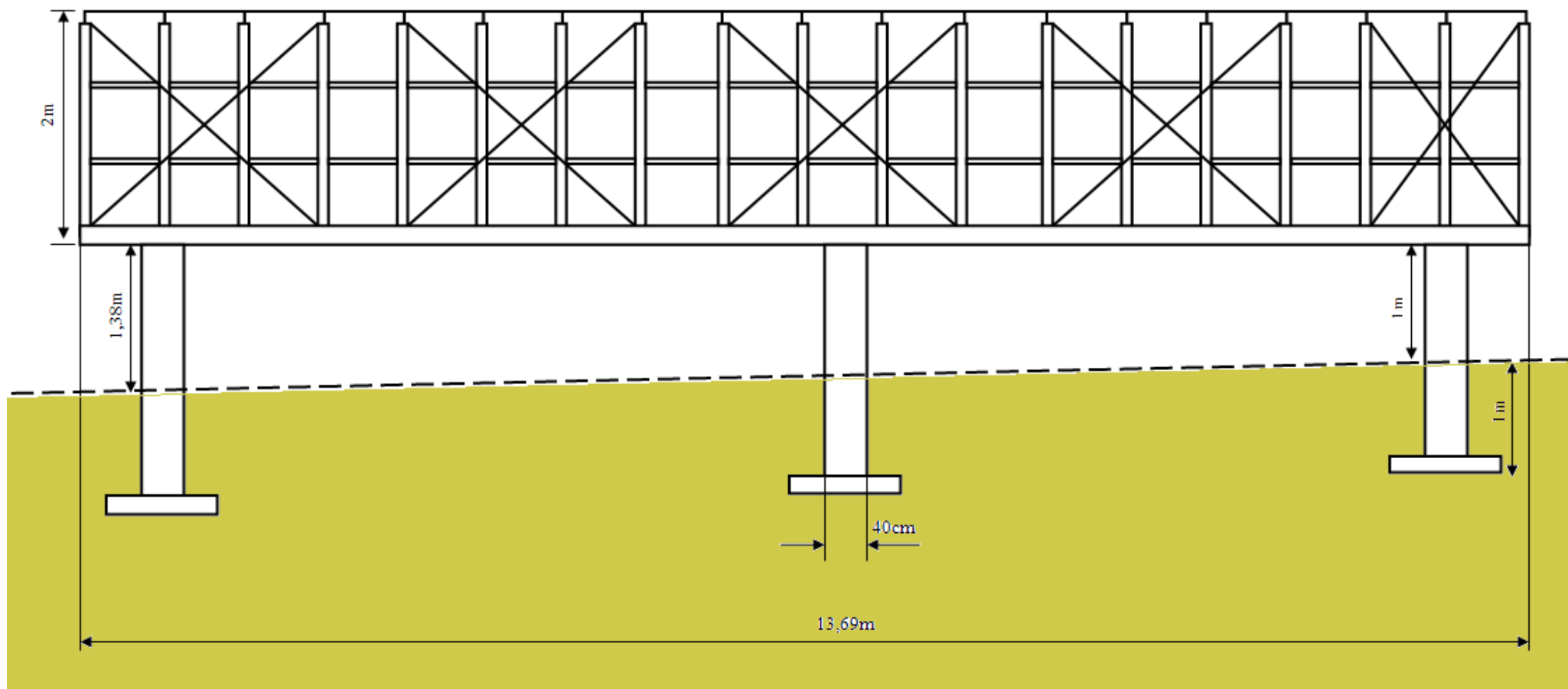
Αν επιλεγεί η ελεύθερη ζώνη μεταξύ δύο συνεχόμενων συστοιχιών κατά τον άξονα Α-Δ να είναι 2m, τότε οι συνολικές απώλειες λόγω σκίασης μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με το προσεγγιστικό μοντέλο της παραγράφου 2.7 και τους υπολογισμούς του παραρτήματος Α (θεωρώντας ότι τα αποτελέσματα για οριζόντιο επίπεδο μπορούν να εφαρμοστούν με προσέγγιση και για κεκλιμένο και ότι η διάρκεια σκίασης της συστοιχίας μπορεί να περιγραφεί από τη διάρκεια της σκίασης του μέσου της) και είναι μόλις 0,21%.

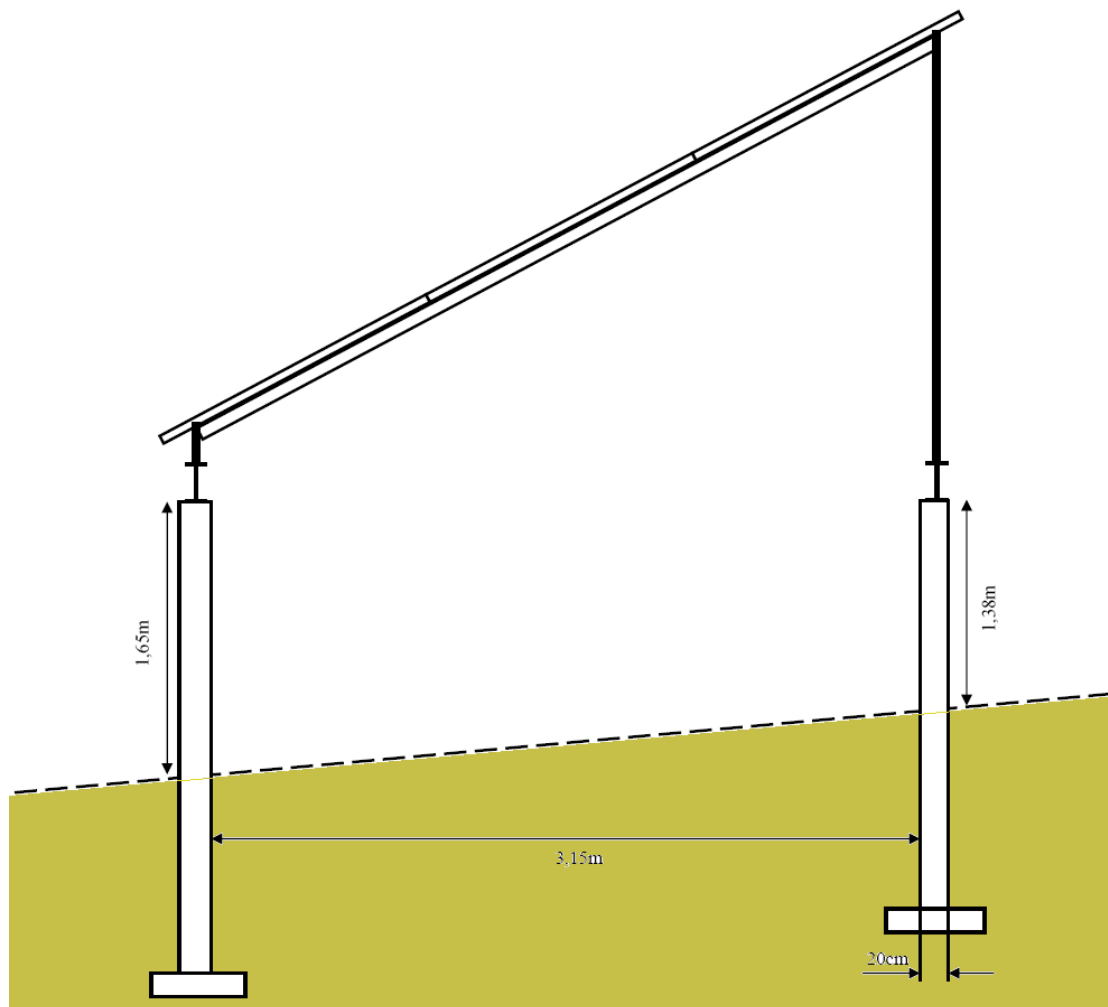
Τελικά επιλέγεται ο δεύτερος τρόπος τοποθέτησης καθώς εμφανίζει τις λιγότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις, οι απώλειες λόγω σκίασης είναι πολύ μικρές και αισθητικά είναι ο πιο άρτιος. Οι 12 συστοιχίες επιλέγονται να τοποθετηθούν σε τρεις σειρές των τεσσάρων συστοιχιών η κάθε μια.

Σχήμα 6.18 Τοπογραφική διάταξη του φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 6.19 Διάταξη συστοιχίας, βάσεων στήριξης και στύλων στον χώρο (πίσω όψη).





Σχήμα 6.20 Διάταξη συστοιχίας, βάσεων στήριξης και στύλων στον χώρο (πλάγια όψη).

Η τοπογραφική διάσταση της εγκατάστασης παρουσιάζεται στο σχήμα 6.18 (κάτοψη), στο οποίο μπορεί κανείς να διακρίνει και τα όρια της περιοχής που απαιτείται και τη θέση των αντιστροφών. Η περιοχή οριοθετείται από μια περίφραξη του χώρου με συρματόπλεγμα, το οποίο είναι απαραίτητο για να διαφυλάξει την εγκατάσταση ανέπαφη από τυχόν κινδύνους (π.χ. από οικόσιτα και άγρια ζώα).

Κατασκευές υποδομής-Βάσεις στήριξης

Για την εγκατάσταση των συστοιχιών επιλέχθηκε κάθε συστοιχία να τοποθετηθεί σε 6 στύλους (2 σειρές των 3 στύλων) 40×20cm από εμφανές μπετό, οι οποίοι θεμελιώνονται σε βάθος περίπου 1m και στηρίζονται σε μια πεδילוδοκό 100×100×30cm. Οι κεφαλές των 6 στύλων της κάθε συστοιχίας ορίζουν μια κοινή οριζόντια στάθμη, εφόσον έχει επιλεγεί να οριζοντιωθεί η κάθε συστοιχία. Πάνω στους στύλους εδράζονται οι μεταλλικές βάσεις στήριξης μέσω των οποίων επιτυγχάνεται και η επιθυμητή κλίση των 28°. Οι βάσεις στήριξης μπορούν να υλοποιηθούν από μια πληθώρα συνδυασμών μεταλλικών δοκών ή και να επιλεγούν

έτοιμες βάσεις στήριξης του εμπορίου. Σε κάθε περίπτωση στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους της κατασκευής, χωρίς όμως σε καμία περίπτωση να τίθεται σε κίνδυνο η ασφάλεια και η αντοχή της κατασκευής. Ο ακριβής τύπος μεταλλικών δοκών και το μέγεθος κάθε μιας από αυτές αποτελούν αντικείμενο της αντοχής υλικών και ξεφεύγουν από τα όρια αυτής της μελέτης. Ενδεικτικά μια υλοποίηση φαίνεται στα σχήματα 6.19(πίσω όψη) και 6.20(πλάγια όψη), όπου μπορεί κανείς να παρατηρήσει εκτός από την μεταλλική κατασκευή, τη θέση των στύλων και τα θεμέλιά τους, καθώς και τη θέση στην οποία τοποθετείται ο αντιστροφέας της συστοιχίας. Αυτός εγκαθίσταται πάνω στους στύλους χωρίς να υπάρχει κανένα πρόβλημα, καθώς είναι ενδεδειγμένη η εξωτερική χρήση τους. Εκτός από τους αντιστροφείς στους στύλους τοποθετούνται και τα μέσα προστασία και απόζευξης (διακόπτες, ασφάλειες κλπ)(Σχήμα 6.25). Ακόμα στους στύλους βρίσκονται και οι αναμονές των γειώσεων, οι οποία εξετάζεται αμέσως παρακάτω.

6.8 ΓΕΙΩΣΗ

Στις συνήθεις κτιριακές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις διακρίνει κανείς τρεις κατηγορίες γειώσεων:

1. **Γείωση λειτουργίας.** Ονομάζεται η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους (π.χ. γείωση του κόμβου του μετασχηματιστή). Αυτή διακρίνεται σε:
 - Άμεση, εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης.
 - Έμμεση, εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.
2. **Γείωση προστασίας.** Ονομάζεται η αγώγιμη σύνδεση των μεταλλικών μερών μιας εγκατάστασης, που δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας, και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά.
3. **Γείωση ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας.** Η γείωση ασφαλείας χρησιμεύει για την ασφάλεια των παρευρισκόμενων στο περιβάλλον που έχει κατασκευαστεί. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικέραυνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας.

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι παρακάτω:

- Η **ουδετέρωση**, δηλαδή η αγώγιμη σύνδεση με τον ουδέτερο αγωγό ή άλλο γειωμένο αγωγό φάσης δικτύου.
- Η **άμεση γείωση**, με απευθείας αγώγιμη σύνδεση με το σύστημα γείωσης το οποίο μπορεί να είναι μια πλάκα γείωσης, ένα ηλεκτρόδιο, ένα τρίγωνο κλπ.
- Η γείωση **μέσω διακόπτη διαφυγής**, για την αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης. Υπάρχουν δυο ειδών διακόπτες διαφυγής, τάσης (ΔΔΤ) και έντασης (ΔΔΕ). Ο διακόπτης διαφυγής τάσης

παρακολουθεί την τάση ως προς γη των μεταλλικών περιβλημάτων όπου είναι συνδεδεμένος και αν αυτή υπερβεί τα 50 V τότε αποσυνδέει το κύκλωμα. Το γειωμένο άκρο του ΔΔΤ συνδέεται με ιδιαίτερο ηλεκτρόδιο γείωσης. Ο διακόπτης διαφυγής έντασης παρακολουθεί το ρεύμα διαρροής ως προς τη γη (Σχήμα 20). Αν αυτό υπερβεί μία τιμή, συνήθως 30 mA, τότε αποζεύει το κύκλωμα. Σε αντιδιαστολή με τους ΔΔΤ, έχουμε εδώ και μία προστασία κατά της πυρκαγιάς, γιατί περιορίζεται άμεσα το ρεύμα διαρροής προς γη.

Για την εγκατάσταση που μελετάται επιλέγεται ο συνδυασμός άμεσης θεμελιακής γείωσης με διακόπτες διαφυγής έντασης. Η θεμελιακή γείωση αποτελείται από ταινία ή κυλινδρικό αγωγό, που τοποθετείται στο κάτω μέρος των θεμελιών των κτιρίων, μέσα στο σκυρόδεμα. Στην φ/β εγκατάσταση που μελετάται η θεμελιακή γείωση συνδέεται με τα βάρη των συστοιχιών, τα οποία είναι χυτά από Ο/Σ (οπλισμένο σκυρόδεμα) και θεμελιωμένα 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.

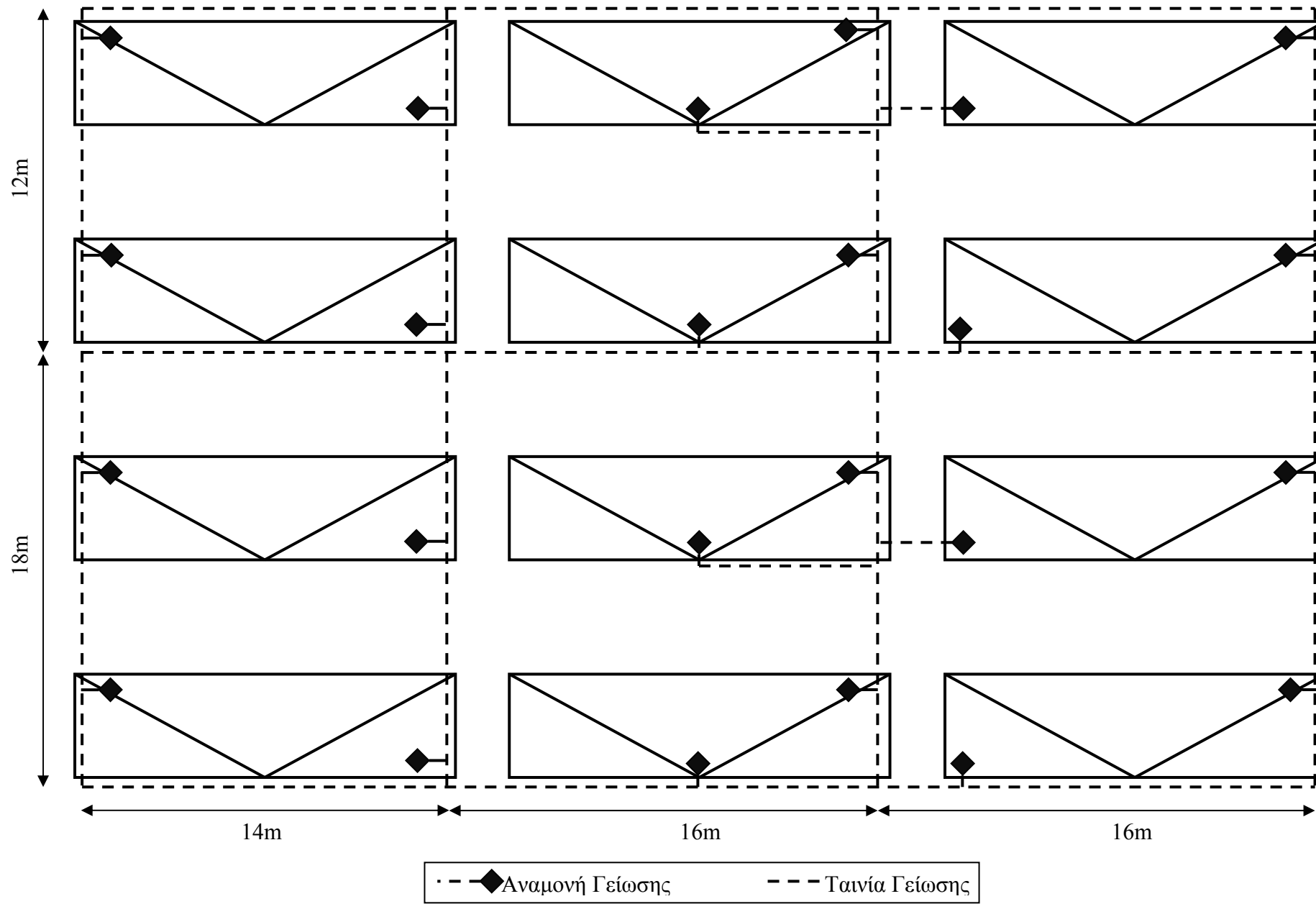
Σε εγκαταστάσεις μεγάλων διαστάσεων (με τη μία τουλάχιστον διάσταση μεγαλύτερη από 25m) επιλέγεται η από τη θεμελιακή γείωση περικλειόμενη επιφάνεια να κατανέμεται σε μικρότερα τμήματα – βρόχους, μέγιστων διαστάσεων (20 m x 20 m). Στην περίπτωση του φ/β πάρκου που εξετάζεται, αυτό έχει ληφθεί υπόψη και η θεμελιακή γείωση αποτελείται από έξι βρόχους (Σχήμα 6.21)

Ως ηλεκτρόδια θεμελιακής γείωσης χρησιμοποιούνται χαλύβδινες ταινίες με ελάχιστες διαστάσεις διατομής 30 mm × 3.5 mm ή χαλύβδινοι αγωγοί κυκλικής διατομής με ελάχιστη διάμετρο 10 mm. Όμως χαμηλότερη αντίσταση γείωσης επιτυγχάνεται με την χρήση ταινίας. Αν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρόδιο γείωσης σε μορφή ταινίας, αυτή πρέπει να τοποθετηθεί με τη μεγαλύτερη διάσταση της διατομής της κατακόρυφα.

Τα εξαρτήματα για τη σύνδεση των αγωγών ή των ταινιών μεταξύ τους καθώς και με το σιδηρό οπλισμό πρέπει να είναι κατασκευασμένα από θερμά γαλβανισμένο ή ανοξείδωτο χάλυβα, να έχουν αντοχή σε διάβρωση και ικανότητα να άγουν το αναμενόμενο ρεύμα σφάλματος.

Για τη σύνδεση της ηλεκτρικής εγκατάστασης, των ισοδυναμικών συνδέσεων κλπ. με τη θεμελιακή γείωση κατασκευάζονται λήψεις όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις θέσεις εγκατάστασης πινάκων διανομής που προβλέπεται η άμεση σύνδεσή τους στη γείωση καθώς και όπου θα πραγματοποιηθούν οι κύριες και συμπληρωματικές ισοδυναμικές συνδέσεις (Σχήμα 6.21). Οι λήψεις θεμελιακής γείωσης είναι κατασκευασμένες από υλικό ανθεκτικό στη διάβρωση (γαλβανισμένο ή ανοξείδωτο χάλυβα). Μπορεί να είναι σε μορφή ακροδέκτη γείωσης ή ζυγού γείωσης ή σε μορφή στρογγυλού αγωγού ή ταινίας. Πρέπει να επισημαίνονται (π.χ. με επικάλυψη ταινίας, χρωματισμό κλπ.) και να προστατεύονται κατάλληλα από φθορά κατά τη φάση κατασκευής του κτιρίου. Τα εξαρτήματα σύνδεσης της ηλεκτρικής εγκατάστασης και των ισοδυναμικών συνδέσεων με τις λήψεις της θεμελιακής γείωσης, καθώς και τα σημεία σύνδεσης των εξαρτημάτων διαστολής με τις λήψεις της θεμελιακής γείωσης

Σχήμα 6.21 Σύστημα θεμελιακής γείωσης με ταινία και αναμονές γείωσης (κάτοψη).



πρέπει να έχουν αντοχή σε διάβρωση στο περιβάλλον που εγκαθίστανται, ικανότητα να άγουν το αναμενόμενο ηλεκτρικό ρεύμα και επαρκή μηχανική αντοχή ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση της ηλεκτρικής συνέχειας.

Εάν η θεμελιακή γείωση χρησιμοποιείται και ως γείωση αντικεραυνικής προστασίας, όπως συμβαίνει και στην εγκατάσταση που μελετάται, θα πρέπει οι συνδετήρες – σφιγκτήρες να έχουν υποστεί τις προβλεπόμενες εργαστηριακές δοκιμές των Προτύπων της σειράς ΕΛΟΤ EN 50164.

6.9 ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Αν και η πιθανότητα να χτυπήσει κεραυνός την φ/β εγκατάσταση είναι αρκετά μικρή εντούτοις η ζημιά που μπορεί να προκαλέσει ένα τέτοιο ενδεχόμενο είναι πολύ μεγάλη στα φ/β πλαίσια και τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό (inverters, καλώδια, συστήματα ελέγχου κλπ.).

Στόχος είναι να προστατευτούν οι φ/β συστοιχίες από μια ενδεχόμενη φωτιά εξαιτίας ενός άμεσου χτυπήματος από κεραυνό και η προστασία του ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού από έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό που μπορεί να προκληθεί από τον κεραυνό. Για να προστατευτεί η εγκατάσταση στον χώρο που καταλαμβάνουν τα φ/β πλαίσια πρέπει να εγκατασταθεί ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Ανάλογα με τον τύπο της αντικεραυνικής προστασίας και το ύψος των απαιτούμενων ράβδων – αλεξικέραυνων, καθορίζεται η ποσότητά τους καθώς και η απόστασή τους. Για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας για αντικεραυνική προστασία τύπου III (υπάρχουν συνολικά τέσσερις τύποι προστασίας και ξεκινώντας από την προστασία τύπου I, που προσφέρει τη μέγιστη ασφάλεια καταλήγουμε στην τύπου IV, που προσφέρει συγκριτικά με τις υπόλοιπες τη λιγότερη ασφάλεια) κατά VDE V 0185-3. Η ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας για τύπου III προστασία είναι 45m και η κοιλία της σφαίρας αυτής σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των αλεξικέραυνων (Σχήμα 6.22) δίνεται από τη σχέση:

$$p = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (6.1)$$

Όπου p η κοιλία που εμφανίζει η σφαίρα, R η ακτίνα της και d η απόσταση μεταξύ των αλεξικέραυνων. Προφανώς το ύψος στο οποίο θα αναρτηθούν τα αλεξικέραυνα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την τιμή που βρίσκεται από τη σχέση 6.1 και το ύψος αυτό μετράται από το επίπεδο που ορίζουν τα υψηλότερα σημεία των φ/β συστοιχιών.

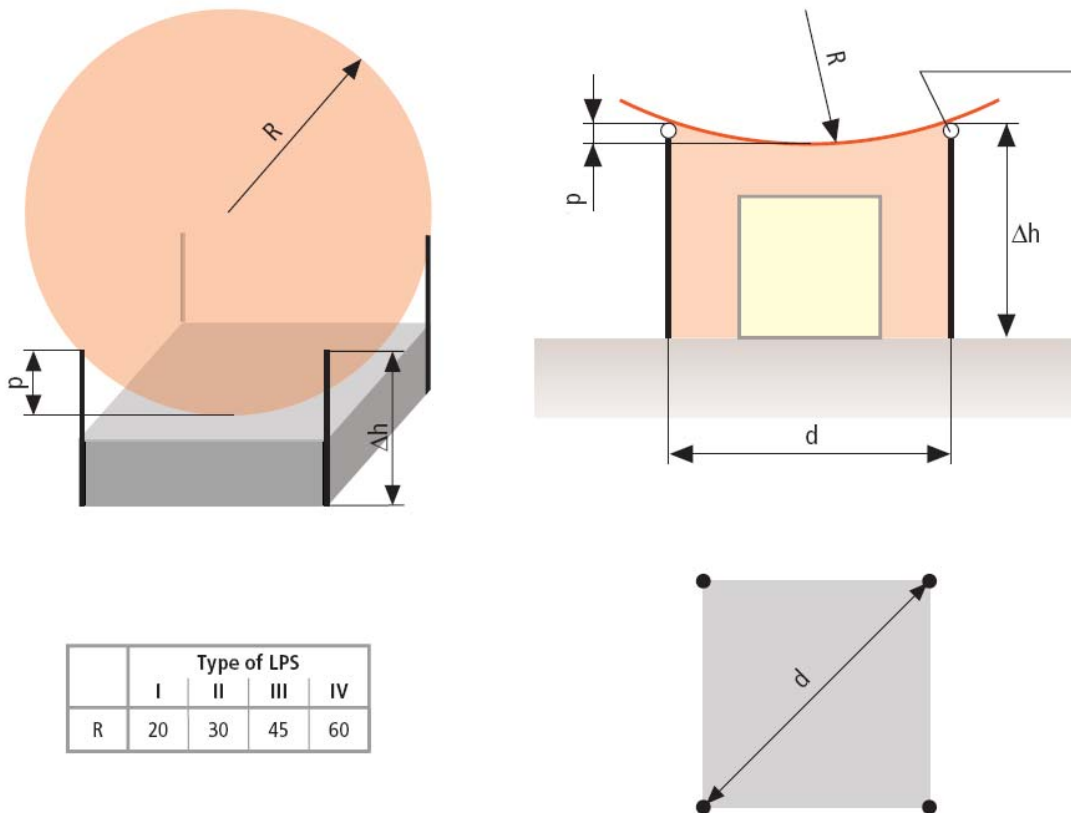
Στην εγκατάσταση που μελετάται επιλέγεται η τοποθέτηση 8 τερματικών ακίδων σύλληψης σε σημεία της εγκατάστασης που φαίνονται στο σχήμα 6.23. Τα σημεία τοποθέτησης, εκτός από την αντικεραυνική προστασία, εξασφαλίζουν ότι η σκίαση που δημιουργείται είναι αμελητέα. Ακόμα δημιουργούν ανά τέσσερα, νοητά ορθογώνια το μεγαλύτερο εκ των οποίων είναι διαστάσεων 28,5m×16m. Δεδομένου αυτού του μεγέθους, η απόσταση d προκύπτει:

$$d = \sqrt{28,5^2 + 16^2} = 32,68m$$

Και αντικαθιστώντας στη σχέση 6.1 έχουμε:

$$p = 45 - \sqrt{45^2 - \left(\frac{32,68}{2}\right)^2} = 3,07m$$

Για την υλοποίηση της αντικεραυνικής προστασίας χρησιμοποιήθηκαν ακίδες σύλληψης και κυλινδρικοί μεταλλικοί δοκοί για τη στήριξή τους, οι οποίοι θα εδράζονται σε μια βάση από μπετόν και επιπλέον επειδή έχουν μεγάλο ύψος, θα στηρίζονται, όπου είναι απαραίτητο, από τις βάσεις στήριξης των συστοιχιών μέσω ηλεκτρομονωτικού υλικού.



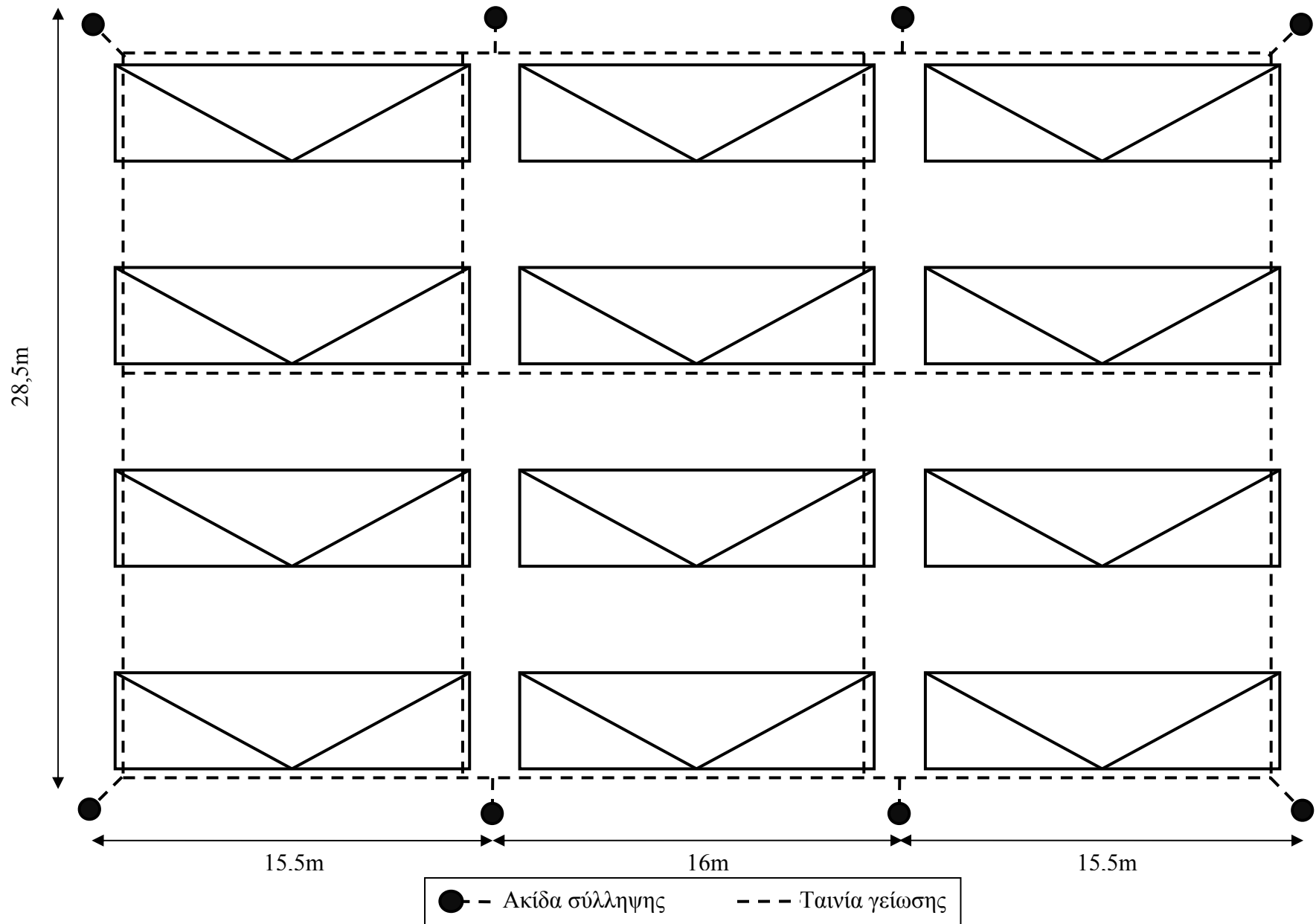
Σχήμα 6.22 Μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας[25].

Ηλεκτρική απομόνωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας

Ανάμεσα σε μια εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας και τον μεταλλικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό της κατασκευής μπορεί να δημιουργηθεί μη ελεγχόμενη διαπήδηση ηλεκτρικού σπινθήρα εάν δεν υπάρχει μεταξύ τους η απαραίτητη απόσταση ασφαλείας. Ο τύπος που επιτρέπει τον υπολογισμό αυτής της απόστασης στην γενική περίπτωση είναι αρκετά σύνθετος:

$$s = k_i \cdot \frac{k_c}{k_m} \cdot L \quad (6.2)$$

Σχήμα 6.23 Αντικεραυνική προστασία – Θέσεις ακίδων σύλληψης



όπου το k_i εξαρτάται από τον τύπο της προστασίας που έχει επιλεγεί, το k_c είναι ο συντελεστής διαχωρισμού ρεύματος και εξαρτάται από την τοπολογία του συστήματος, το k_m εξαρτάται από το υλικό που περιβάλλει τον αγωγίμο δρόμο και το L είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της ισοδυναμικής επιφάνειας λόγω των ηλεκτροδίων γείωσης και του σημείου ενδιαφέροντος.

Για την φ/β εγκατάσταση που μελετάται έχει επιλεγεί η αντικεραυνική προστασία τύπου III η οποία καθορίζει την τιμή του συντελεστή: $k_i = 0,05$.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή διαχωρισμού του ρεύματος, παρατηρούμε ότι τα επιλεγόμενα στοιχεία οδήγησης του κεραύνιου ρεύματος δεν είναι συνδεδεμένα, παρά μόνο στο υπέδαφος δημιουργώντας εκεί μια ισοδυναμική επιφάνεια. Αυτό συνεπάγεται ότι το ρεύμα που θα προκληθεί από ένα κεραυνό και θα οδηγηθεί στο έδαφος μέσω αυτών των στοιχείων δεν θα διαχωριστεί σε κανένα σημείο της διαδρομής και θα καταλήξει στη γη ως έχει. Σε αυτή τη περίπτωση ο συντελεστής λαμβάνει την τιμή: $k_c = 1$

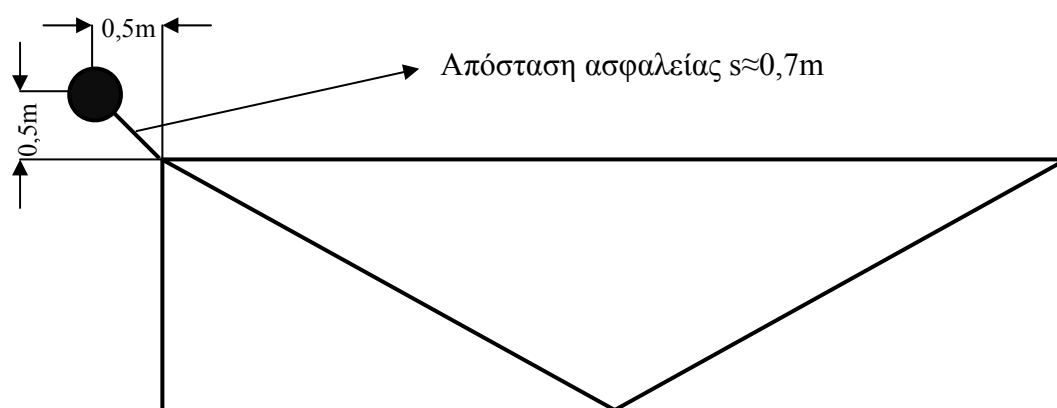
Για τον υπολογισμό του συντελεστή μόνωσης του υλικού που παρεμβάλλεται μεταξύ των αλεξικέραυνων και του εξοπλισμού που πρέπει να προστατευθεί, παρατηρούμε ότι αυτό στην περίπτωση μας είναι ο αέρας και επομένως: $k_m = 1$.

Τέλος το μήκος L όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.19 έχει μεγαλύτερη τιμή: $L \cong 3,4m$.

Τελικά η απόσταση διαχωρισμού, που απαιτείται να υπάρχει για λόγους ασφαλείας δίνεται από τη σχέση 6.2 και προκύπτει:

$$s = 0,05 \cdot \frac{1}{1} \cdot 3,4 = 0,17m$$

Στο φ/β πάρκο που μελετάται και λαμβάνοντας υπόψη τη διαστασιολόγησή του, η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας αυτή δεν αποτελεί πρόβλημα και έχει επιλεγεί να είναι αρκετά μεγαλύτερη (Σχήμα 6.24).



Σχήμα 6.24 Απόσταση ασφαλείας των ακίδων σύλληψης στην εγκατάσταση.

6.10 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Αντιστροφείς

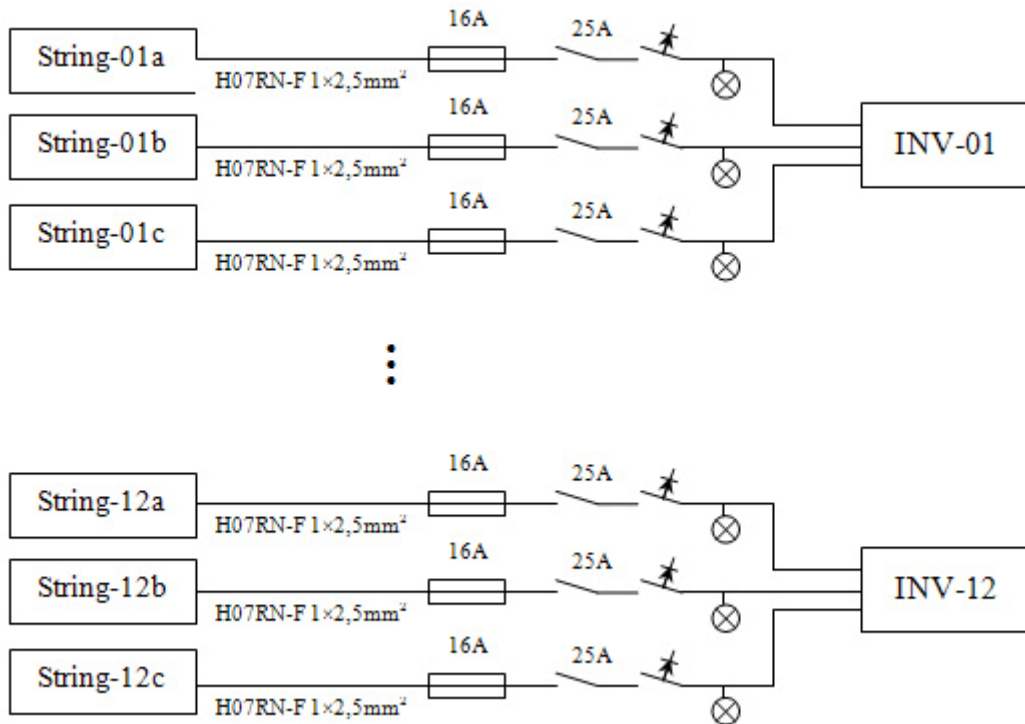
Είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί ότι οι αντιστροφείς που χρησιμοποιήθηκαν, ικανοποιούν όλες τις απαιτήσεις ασφαλείας σύμφωνα με τον «Οδηγό σύνδεσης φωτοβολταϊκών σταθμών στο δίκτυο χαμηλής τάσης» της Δ.Ε.Η.. Το πιστοποιητικό που συνοδεύει τους αντιστροφείς δίνεται στο Παράρτημα C, τα σημαντικότερα σημεία του οποίου είναι:

- Η εισαγωγή συνεχούς ρεύματος (χωρίς τη χρήση ΜΣ) είναι μικρότερη του 0,5% της ονομαστικής του τιμής.
- Η συνολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος (THDI) είναι μικρότερη από 4%.
- Η σύνδεση και η αποσύνδεση γίνεται μέσω ηλεκτρονόμων που ελέγχονται μέσω λογισμικού και περιλαμβάνει αυτόματη (επανα)σύνδεση εφόσον οι τιμές τάσης και συχνότητας εμπίπτουν στα όρια $0,8 \times V_{nom} - 1,15 \times V_{nom}$ και 49,5Hz – 50,5Hz και άμεση αποσύνδεση εφόσον δεν πληρούνται τα όρια αυτά.
- Η ενεργός προστασία έναντι της νησιδοποίησης μέσω μέτρησης της σύνθετης αντίστασης

Καλώδια

Τα καλώδια, με τα οποία συνδέονται τα φ/β πλαίσια μεταξύ τους, είναι ειδικού τύπου διατομής $2,5\text{mm}^2$ και μπορεί κάποιος να τα προμηθευτεί μαζί με τις γεννήτριες. Στα datasheet των εταιριών (Παράρτημα Β) φαίνεται η θέση του κιβωτίου σύνδεσης σε κάθε φ/β πλαίσιο. Στο κιβώτιο αυτό, ένας ακροδέκτης παρέχει δύο πολικότητες, επικοινωνώντας με το εξωτερικό μέσω δύο οπών με στυπιοθλίπτες καλωδίου. Σήμερα ωστόσο αυξάνεται ο αριθμός των προκαλωδιωμένων στοιχείων που διαθέτουν στεγανούς συνδετήρες και επιτρέπουν τη γρήγορη σύνδεση χωρίς να είναι αναγκαίο το άνοιγμα κιβωτίων σύνδεσης. Η προκαλωδίωση αυτή περιλαμβάνει καλώδια διαφορετικού μήκους με αρσενικό και θηλυκό βύσμα για τις δύο πολικότητες. Στο εσωτερικό του κιβωτίου σύνδεσης υπάρχουν επίσης μία ή δύο δίοδοι by-pass που συνήθως τοποθετούνται από τον κατασκευαστή με σκοπό να περιορίζουν τις βλάβες από σκίαση.

Ακόμα η σύνδεση της συστοιχίας με τον αντιστροφέα μπορεί να γίνει με καλώδια νεοπρενίου ή PVC, τα οποία ενδείκνυνται για μεσαία και υψηλή καταπόνηση και είναι ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες. Ο υπολογισμός αυτών των καλωδίων, γίνεται με βάση τις τιμές της τάσης και της έντασης στην είσοδο του αντιστροφέα, οι οποίες τιμές φαίνονται στον πίνακα 6.9 στην περίπτωση 3. Τελικά η παροχή ισχύος από τις φ/β συστοιχίες γίνεται μέσω καλωδίων τύπου H07RN-F (νεοπρενίου) διατομής $1 \times 2,5\text{mm}^2$, που μεταφέρουν συνεχές ρεύμα έντασης 7,39A από τα φ/β πλαίσια στον αντιστροφέα.



Σχήμα 6.25 Διάγραμμα σύνδεσης στην πλευρά του συνεχούς ρεύματος.

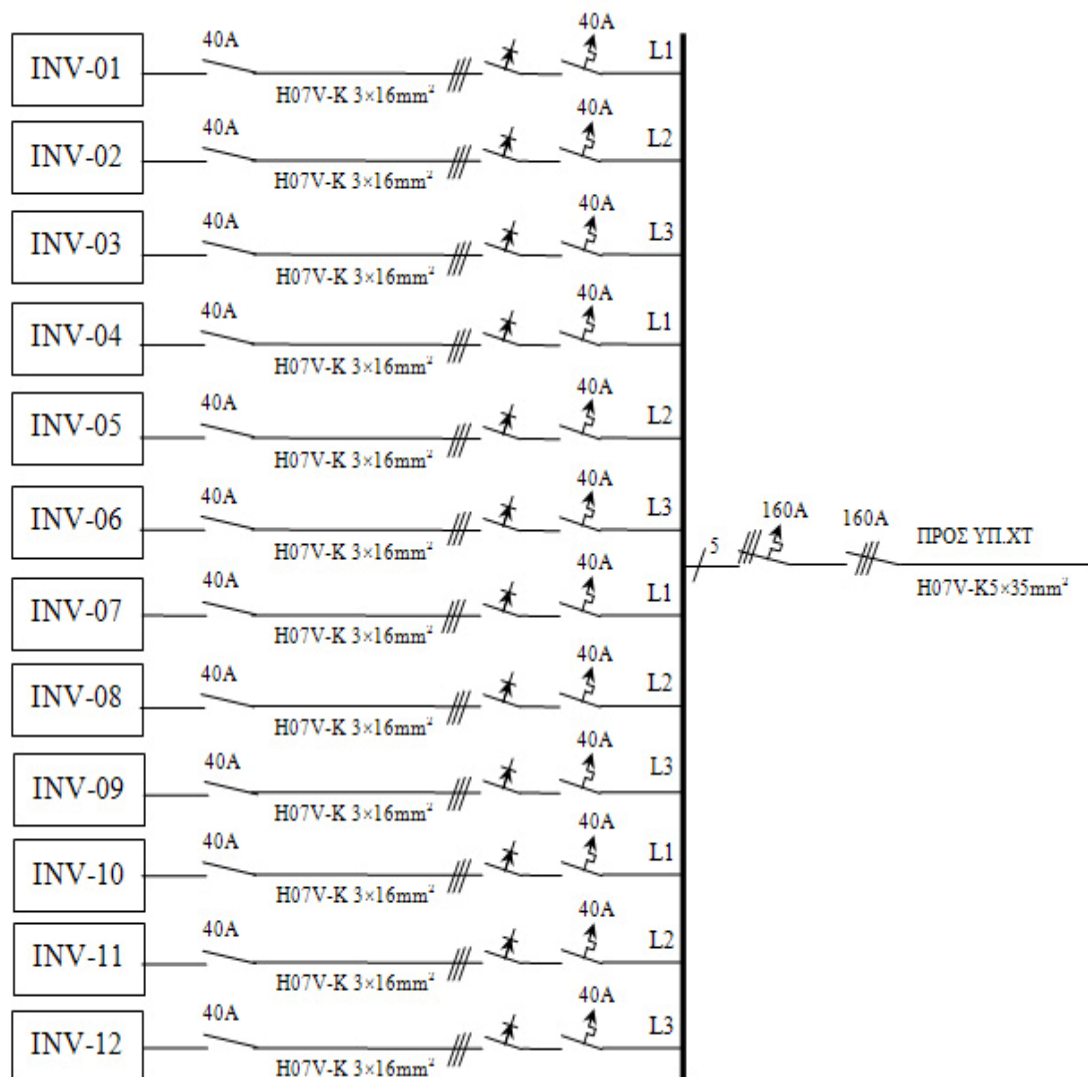
Από την άλλη η σύνδεση του αντιστροφέα με τον πίνακα χαμηλής τάσης της εγκατάστασης γίνεται με καλώδια τύπου H07V-K (παλιότερα γνωστά ως NYAF) διατομής $3 \times 16 \text{mm}^2$. Είναι πολύ σημαντικό οι απώλειες των καλωδίων αυτών να μην ξεπερνούν το 1%, όπως χαρακτηριστικά ορίζεται στα datasheet των αντιστροφέων. Οι απώλειες εξαρτώνται τόσο από τη διατομή των αγωγών όσο και από το μήκος τους. Για τη συγκεκριμένη διατομή που επιλέχτηκε, η απαίτηση οι απώλειες να περιορίζονται στο 1% ικανοποιείται όταν το μέγιστο μήκος των καλωδίων είναι 31,1m. Η θέση του πίνακα στην εγκατάσταση ικανοποιεί εύκολα την απαίτηση αυτή (Σχήμα 6.29).

Τα καλώδια στον πίνακα ομαδοποιούνται σε τρεις φάσεις και έπειτα αναχωρούν για τη σύνδεσή τους με την XT του δικτύου με καλώδια τύπου H07V-K διατομής $5 \times 35 \text{mm}^2$ και προστατεύονται με διακόπτη μικροαυτόματο 160A και αποζεύκτη επίσης 160A.

Μέσα προστασίας

Η είσοδος κάθε αντιστροφέα προστατεύεται με διάταξη ασφάλεια τήξης σε συνδυασμό με αποζεύκτη (ασφαλειοαποζεύκτης), διακόπτη διαρροής έντασης και ενδεικτική λυχνία. Οι ασφάλειες θα είναι των 16A και οι διακόπτες των 25A, ενώ ο διακόπτης διαφυγής έντασης θα είναι των 30mA. Η διάταξη με την σειρά της προστατεύεται από στεγανό ανοιγόμενο κιτίο.

Στην πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος, στην έξοδο του αντιστροφέα, θα υπάρχει επίσης διακόπτης διαφυγής έντασης και μικροαυτόματος διακόπτης των 40Α.

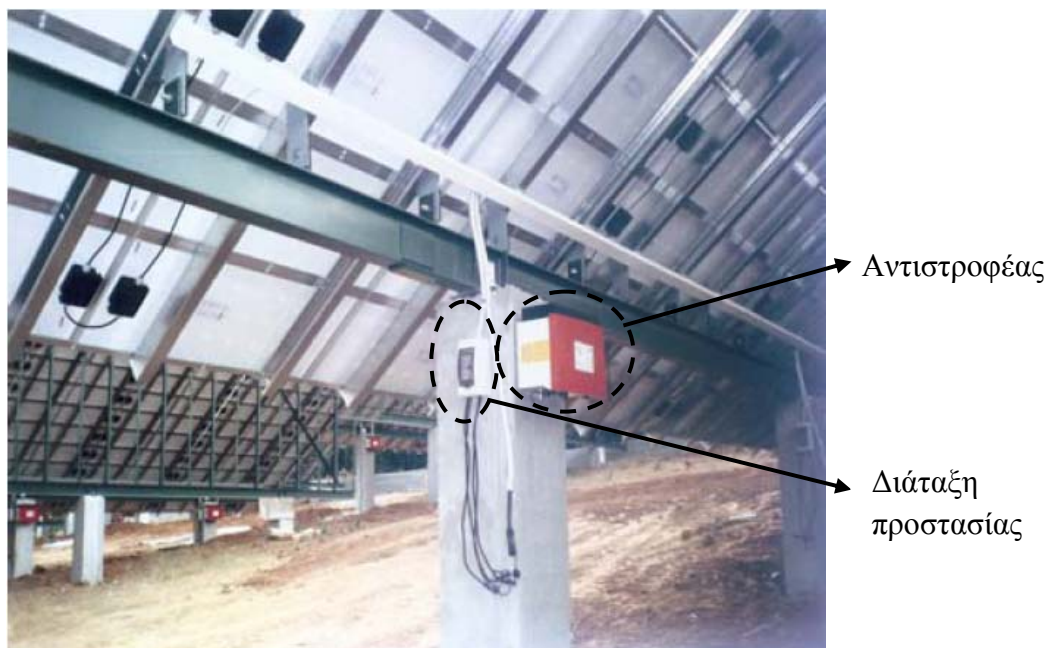


Σχήμα 6.26 Διάγραμμα σύνδεσης στην πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Εξωτερικός Πίνακας Pillar

Οι έξοδοι όλων των αντιστροφέων συγκεντρώνονται σε ένα πίνακα χαμηλής τάσης, όπου και ομαδοποιούνται σε τρεις φάσεις και στη συνέχεια αναχωρεί μια τριφασική γραμμή για να συνδεθεί με το δίκτυο. Λόγο της φύσης της εγκατάστασης προτιμήθηκε η χρήση ενός πίνακα Pillar (Σχήμα 6.27). Οι πίνακες εξωτερικού χώρου – Pillar είναι πίνακες διανομής, τροφοδότησης κινητήρων, φωτισμού για υπαίθρια εγκατάσταση, όπου λόγω αντίξοων περιβαλλοντικών συνθηκών απαιτείται μεγάλη στεγανότητα και εύκολη επεκτασιμότητα. Κατασκευάζονται από χαλυβοέλασμα γαλβανιζέ πάχους 2mm σε διάφορες διαστάσεις, ενώ ο βαθμός προστασίας τους είναι IP40 ή ανάλογα με τις προδιαγραφές μέχρι και IP66. Ανάλογα με τις διαστάσεις και το ηλεκτρολογικό υλικό χωρίζονται σε μονομερή, διμερή, τριμερή και τετραμερή

αριθμό διαμερισμάτων, γεγονός που δίνει μεγάλη ευελιξία τοποθέτησης υλικών. Το ηλεκτρολογικό υλικό κουμπώνεται σε ειδική γαλβανιζέ ράγα. Η κατασκευή του είναι τέτοια, ώστε τα διάφορα όργανα να είναι εύκολα προσιτά και τοποθετημένα σε κανονικές αποστάσεις μεταξύ τους και έτσι εξασφαλίζεται η άνετη αφαίρεση, επισκευή και επανατοποθέτηση τους, χωρίς να μεταβάλλεται η κατασκευή των γειτονικών οργάνων.



Σχήμα 6.27 Παράδειγμα τοποθέτησης αντιστροφέα σε στύλο που στηρίζει φ/β συστοιχία και διατάξεων προστασίας και απόξευξης[16].

Η θέση του πίνακα στην εγκατάσταση είναι πολύ σημαντική, καθώς από αυτή εξαρτάται άμεσα το μήκος των καλωδίων που απαιτούνται για την σύνδεση των αντιστροφέων. Σύμφωνα με τη τοπογραφική διάταξη της εγκατάστασης το σημείο τοποθεσίας του πίνακα XT, που θα έχει ως αποτέλεσμα το μικρότερο δυνατό μήκος των καλωδίων βρίσκεται στον γεωμετρικό τόπο των σημείων που ορίζει η γραμμή που χωρίζει στη μέση την εγκατάσταση κατά τη διεύθυνση B-N. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το σημείο που τοποθετήθηκε ο πίνακας φαίνεται στο σχήμα 6.29. Η θέση αυτή εξασφαλίζει όχι μόνο συνολικά το μικρότερο μήκος των καλωδίων, αλλά και ξεχωριστά τα καλώδια, που έρχονται από τις εξόδους των αντιστροφέων δεν ξεπερνούν στη χειρότερη περίπτωση τα 25m. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει ότι οι απώλειες των καλωδίων θα είναι μικρότερες από 1%. Τέλος οι διαστάσεις του ποικίλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν. Στην περίπτωσή μας το ύψος του δεν θα ξεπερνάει τα 1,5m και έτσι δεν θα δημιουργεί κανένα πρόβλημα σκίασης στην εγκατάσταση, καθώς τοποθετείται πίσω από τη βάση στήριξης.



Σχήμα 6.28 Εξωτερικός πίνακας - Pillar

Σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου

Είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να γίνεται η παρακολούθηση και καταγραφή της απόδοσης μιας φ/β εγκατάστασης, καθώς και η εύκολη επέμβαση στις παραμέτρους του συστήματος όταν είναι αυτό αναγκαίο. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο ένα σύστημα ελέγχου. Η εταιρία SMA, ταυτόχρονα με την παραγωγή των αντιστροφέων, προσφέρει και μια πληθώρα προϊόντων καταγραφής, αλλά και λογισμικού επεξεργασίας σε οποιοδήποτε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για την εγκατάσταση που μελετάται μια πολύ καλή λύση προσφέρει ο συνδυασμός του Sunny Boy Control με το λογισμικό Sunny Data Control.

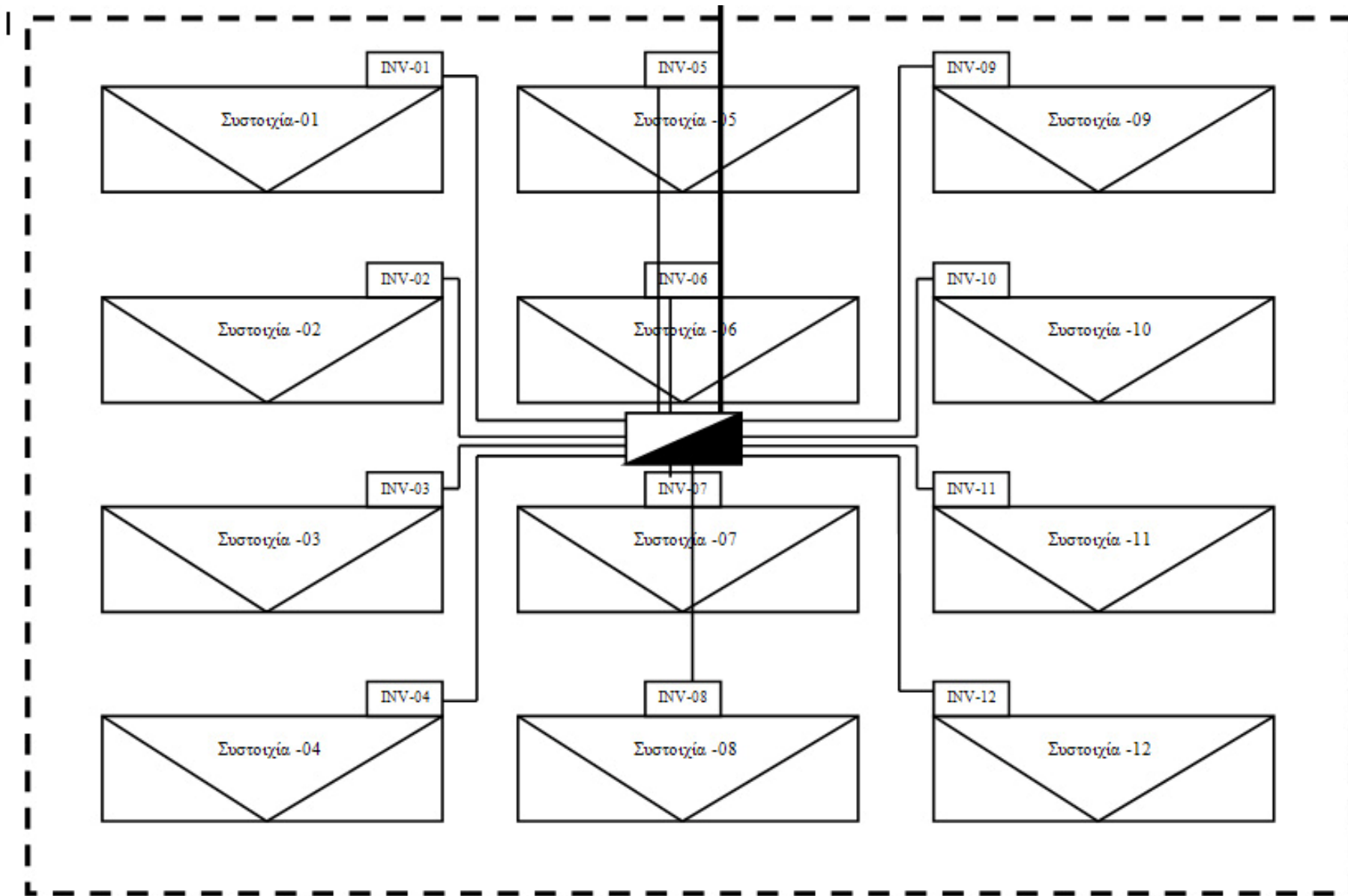
Το Sunny Boy Control μπορεί να καταγράψει μια πληθώρα μεταβλητών του φ/β συστήματος, να τις αποθηκεύσει και έπειτα να αποστείλει κάθε ώρα ή κάθε μέρα μια αναφορά για την κατάσταση της εγκατάστασης ή μια αναφορά σφαλμάτων μέσω e-mail ή Fax. Για το σκοπό αυτό συνδέεται σε ένα εξωτερικό μόντεμ, το οποίο επιτρέπει από οποιοδήποτε σημείο και με την βοήθεια του λογισμικού για ηλεκτρονικό υπολογιστή Sunny Data Control, την πρόσβαση στην φ/β εγκατάσταση, τον έλεγχο της τρέχουσας κατάστασής της και τις ενεργειακές αποδόσεις που επιτεύχθηκαν. Η επικοινωνία με τους μετατροπείς γίνεται είτε μέσω αγωγού δικτύου (Powerline) είτε μέσω διεπαφής RS485. Με ένα μόνο SunnyBoy Control είναι εφικτή η επιτήρηση έως και 50 αντιστροφέων, ακόμη και διαφορετικών κατηγοριών απόδοσης.

6.11 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

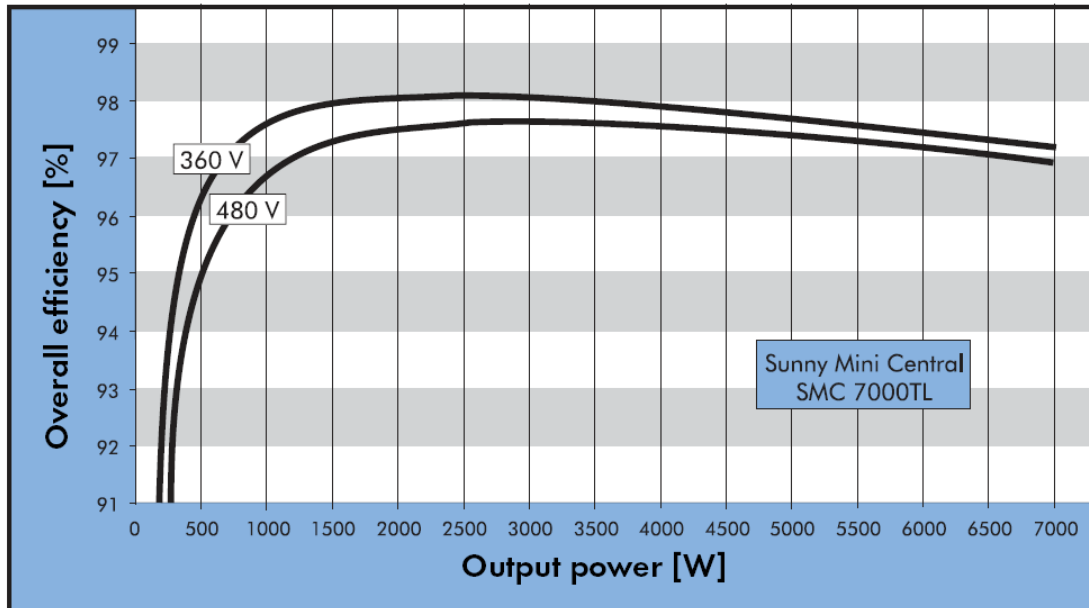
Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$E = H_T S_K a \quad (6.3)$$

όπου H_T η μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένου επίπεδου στο οποίο έχουν τοποθετηθεί τα πλαίσια, S_K η συνολική ενεργός επιφάνεια των φ/β πλαισίων και a ο συνολικός συντελεστής απόδοσης της εγκατάστασης.



Σχήμα 6.29 Σύνδεση των αντιστροφέων στον πίνακα χαμηλής τάσης και αναχώρηση τριφασικής γραμμής.



Σχήμα 6.30 Απόδοση αντιστροφέα SMC 7000TL.[SMA]

Η μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα στην επιφάνεια των φ/β πλαισίων με κλίση 28° για την πόλη της Καλαμάτας δίνεται στον Πίνακα 6.6.

Η συνολική επιφάνεια κάλυψης των φ/β πλαισίων δίνεται από τη σχέση:

$$S_K = N \cdot S \quad (6.4)$$

όπου N ο συνολικός αριθμός των φ/β πλαισίων της εγκατάστασης ($N = 756$), S η επιφάνεια ενός φ/β πλαισίου ($S = \text{μηκος} \times \text{πλάτος} = 1,425\text{m} \times 0,652\text{m} = 0,9291\text{m}^2$).

Τελικά προκύπτει:

$$S_K = 702,4\text{m}^2$$

Τέλος ο συνολικός συντελεστής απόδοσης της εγκατάστασης δίνεται από τη σχέση:

$$a = \eta_{mod} \eta_{inv} (1 - \alpha_{cab}) (1 - a_{sh}) \sigma_\rho \sigma_\theta \quad (6.5)$$

όπου η_{mod} ο βαθμός απόδοσης των φ/β πλαισίων που υπολογίζεται από τη σχέση 3.12 ($\eta_{mod} = 0,1399$), η_{inv} ο βαθμός απόδοσης των αντιστροφέων που προκύπτει από το διάγραμμα απόδοσης του σχήματος 6.30 ($\eta_{inv} = 0,97$), α_{cab} οι απώλειες στα καλώδια ($\alpha_{cab} = 0,01$), a_{sh} οι απώλειες λόγω σκίασης ($a_{sh} = 0,01$), σ_ρ ο συντελεστής καθαρότητας, ο οποίος προκύπτει με βάση το γεγονός ότι η περιοχή έχει σχετικά μικρή ρύπανση $\sigma_\rho = 0,95$ και σ_θ θερμοκρασιακός συντελεστής που υπολογίζεται από τη σχέση 3.17 με βάση τις θερμοκρασίες αέρα του εκάστοτε μήνα. Επομένως έχουμε:

$$a = 0,1264\sigma_\theta$$

Στον παρακάτω πίνακα υπολογίζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά μήνα για την βέλτιστη γωνία κλίσης β_{opt} στην οποία έχουν τοποθετηθεί τα πλαίσια.

Πίνακας 6.11 Στον πίνακα φαίνεται η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία για $\beta_{opt} = 28^\circ$ H_T , η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα για τις ώρες της ημέρας με ηλιοφάνεια T_a , η αντίστοιχη θερμοκρασία των φ/β πλαισίων T_{mod} , ο θερμοκρασιακός συντελεστής σ_θ και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια E .

Μήνας	H_T (kWh/m ²)	T_a (°C)	T_{mod} (°C)	σ_θ	E (kWh)
Ιανουάριος	97,94	12,8	42,8	0,886	7.701,00
Φεβρουάριος	99,32	13,2	43,2	0,884	7.792,25
Μάρτιος	134,74	14,6	44,6	0,877	10.486,94
Απρίλιος	138,97	17,5	47,5	0,863	10.637,68
Μάιος	183,55	21,3	51,3	0,844	13.740,97
Ιούνιος	190,23	25,6	55,6	0,822	13.878,06
Ιούλιος	201,09	28,4	58,4	0,808	14.420,23
Αύγουστος	198,42	28,5	58,5	0,808	14.219,75
Σεπτέμβριος	167,88	25,7	55,7	0,822	12.239,57
Οκτώβριος	136,09	21,8	51,8	0,841	10.157,47
Νοέμβριος	109,97	18,1	48,1	0,860	8.388,74
Δεκέμβριος	82,63	14,4	44,4	0,878	6.438,50
Σύνολο	1.740,83				130.101,14

Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επομένως προκύπτει:

$$E = 130,101MWh / \text{έτος}$$

Και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά εγκατεστημένο kWp :

$$E = 1.323,78kWh / kWp \cdot \text{έτος}$$

6.12 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των φ/β εγκαταστάσεων είναι το υψηλό κόστος αγοράς των φ/β γεννητριών. Παρακάτω ακολουθεί μια τεχνοοικονομική ανάλυση του φ/β σταθμού παραγωγής 100kWp. Εξετάζεται αρχικά η περίπτωση επιδότησης κατά 50% και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τις τιμές που θεσπίστηκαν στον αναπτυξιακό νόμο 3468/2006 (Περίπτωση 1). Έπειτα εξετάζεται η βιωσιμότητα της επένδυσης χωρίς επιδότηση, αλλά με την αυξημένη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας (Περίπτωση 2) και τέλος υπολογίζεται η οριακή τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που μηδενίζει την ΚΠΑ.

Αρχικά υπολογίζεται το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης των φ/β γεννητριών.

Συγκεντρωτικός Πίνακας Κόστους

ΠΡΟΪΟΝ	ΜΟΝΑΔΑ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ ΜΟΝΑΔΑΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΤΙΜΗ
KYOCERA-KC 130 GHT-2	Τεμ.	756	620 €	468.720 €
SMA-SUNNY MINI CENTRAL 8000TL	Τεμ.	12	2.950 €	35.400 €
ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	Τεμ.	1	3.000 €	3.000 €
ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ ΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ				1.200 €
ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΕΣ- ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ				3.000 €
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ	Τεμ.	12	2.000 €	24.000 €
ΗΛΕΚΤΟΡΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ (ΚΑΛΩΔΙΑ, ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ κ.τ.λ.)				25.000 €
ΛΟΙΠΑ ΕΞΟΔΑ (ΓΡΑΦΕΙΟΚΡΑΤΙΚΑ κ.τ.λ.)				2.500 €
ΣΥΝΟΛΟ				562.820 €

Έπειτα παρουσιάζεται η τιμή πώλησης της ενέργειας από την εγκατάσταση που υλοποιήθηκε σύμφωνα με τον αναπτυξιακό νόμο 3468/2006. Εφόσον πρόκειται για διασυνδεδεμένο σύστημα με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη από 100kWp, τότε η τιμή της ενέργειας είναι 0,45€/kWh.

ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από:	Τιμή Ενέργειας (€/kWh)	
	Διασυνδεδεμένο Σύστημα	Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά
Ηλιακή ενέργεια που αξιοποιείται από φωτοβολταϊκές μονάδες, με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη ή ίση των 100kWp	0,45	0,5
Ηλιακή ενέργεια που αξιοποιείται από φωτοβολταϊκές μονάδες, με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη των 100kWp	0,4	0,45

6.12.1 Βιωσιμότητα επένδυσης-Περίπτωση 1η

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΣ ΣΤΘΜΟΣ

1. Γενική Περιγραφή		
1.1	Συνολική Ισχύς Σταθμού	98.280 Wp
1.2	Στατιστικές Ώρες	1.324 h
1.3	Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας	130.088 kWh
2. Συνολική Επένδυση		
2.1	Κόστος Εξοπλισμού και Εγκατάστασης	560.000 €
2.2	Κόστος Απόκτησης Εκτάσεως	0 €
2.3	Συνολικό Κόστος	560.000 €
2.4	Επιχορήγηση	280.000 €
2.5	Ίδια Συμμετοχή	140.000 €
2.6	Δάνειο	140.000 €
2.7	Επιτόκιο Αναγωγής	7 %
2.8	Έξοδα Εξυπηρέτησης Δανείου	15.371 €
3. Τιμές Πώλησης		
3.1	Τιμή Πώλησης Ενέργειας (με προσαύξηση 2,5% ετησίως)	0,45 €/kWh
4. Ετήσια Αποτελέσματα		
4.1	Έσοδα από Πώληση Ενέργειας	58.540
4.2	Λειτουργικά Έξοδα(με προσαύξηση 2,5% ετησίως)	600 €
4.3	Έξοδα Ασφάλισης (με προσαύξηση 2,5% ετησίως)	1.000 €
4.4	Συντελεστής Φόρων	20 %
4.5	Μεικτό Κέρδος (χωρίς εξυπηρέτηση δανείου)	56.940 €
5. Δείκτες ανά kWp		
5.1	Ύψος επένδυσης ανά kWp	1.425 €/kWp
5.2	Μεσοσταθμικός Τζίρος ανά έτος και ανά kWp	36,06 €/kWp/έτος
5.3	Μεσοσταθμικό Κέρδος ανά έτος και ανά kWp	24,75 €/kWp/έτος
6. Δείκτες Χρηματικών Ροών		
6.1	Καθαρή Παρούσα Αξία-NPV	389.707 €
6.2	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης-IRR	29,03 %
6.3	Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής (έτη)	4,20 έτη

Όροι και Αποπληρωμή Δανείου

1.1 Όροι Δανείου

α. Ποσό Δανείου	140.000 €
β. Ετήσιο Επιτόκιο	7%
γ. Διάρκεια Δανείου	15 έτη

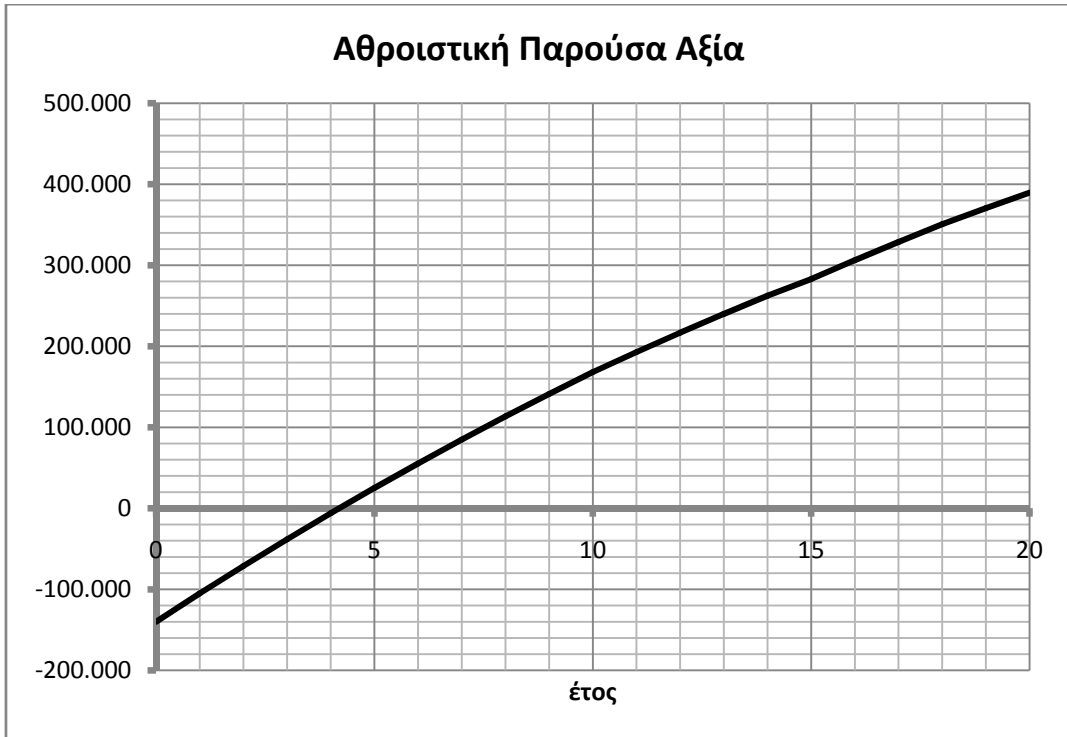
1.2 Αποπληρωμή Δανείου

Έτος	Ποσό Δανείου	Ετήσια Τοκοχρεολυτική Δόση	Χρεολύσιο	Τόκος	Τόκοι Πληρωτέοι	Ανεξόφλητο Υπόλοιπο
0	140.000					
1		15.371	5.571	9.800	9.800	134.429
2		15.371	5.961	9.410	9.410	128.468
3		15.371	6.379	8.992	8.992	122.089
4		15.371	6.825	8.546	8.546	115.264
5		15.371	7.303	8.068	8.068	107.961
6		15.371	7.814	7.557	7.557	100.147
7		15.371	8.361	7.010	7.010	91.786
8		15.371	8.946	6.425	6.425	82.840
9		15.371	9.572	5.799	5.799	73.268
10		15.371	10.243	5.128	5.128	63.025
11		15.371	10.959	4.412	4.412	52.066
12		15.371	11.727	3.644	3.644	40.339
13		15.371	12.548	2.823	2.823	27.791
14		15.371	13.426	1.945	1.945	14.366
15		15.371	14.366	1.005	1.005	0
Σύνολο		230.565	140.000	90.565	90.565	

Απόδοση Επένδυσης με Επιχορήγηση επί των Ίδιων Κεφαλαίων (Μετά Τοκοχρεολυσίων και Φόρων)

Έτος	Έσοδα	Λειτουργικές	Μεικτό	Αποσβέσεις	Χρεολύσιο	Τόκοι	Φόροι	Καθαρή	Αθροιστική	Παρούσα	Αθροιστική
0									-140.000		-140.000
1	58.540	1.600	56.940	18.667	5.571	9.800	4.580	36.989	-103.011	34.895	-105.105
2	60.004	1.640	58.364	18.667	5.961	9.410	4.865	38.127	-64.884	33.933	-71.172
3	61.504	1.681	59.823	18.667	6.379	8.992	5.157	39.295	-25.590	32.993	-38.179
4	63.041	1.723	61.318	18.667	6.825	8.546	5.456	40.491	14.902	32.073	-6.107
5	64.617	1.766	62.851	18.667	7.303	8.068	5.763	41.717	56.619	31.174	25.067
6	66.233	1.810	64.422	18.667	7.814	7.557	6.077	42.974	99.593	30.295	55.362
7	67.888	1.856	66.033	18.667	8.361	7.010	6.399	44.263	143.856	29.437	84.800
8	69.586	1.902	67.684	18.667	8.946	6.425	6.729	45.584	189.440	28.600	113.399
9	71.325	1.949	69.376	18.667	9.572	5.799	7.068	46.937	236.377	27.782	141.181
10	73.108	1.998	71.110	18.667	10.243	5.128	7.415	48.325	284.702	26.984	168.166
11	71.189	2.048	69.141	18.667	10.959	4.412	7.021	46.749	331.451	24.627	192.793
12	72.969	2.099	70.870	18.667	11.727	3.644	7.366	48.132	379.584	23.920	216.713
13	74.793	2.152	72.641	18.667	12.548	2.823	7.721	49.550	429.133	23.231	239.944
14	76.663	2.206	74.458	18.667	13.426	1.945	8.084	51.003	480.136	22.558	262.502
15	74.444	2.261	72.183	18.667	14.366	1.005	7.629	49.183	529.319	20.522	283.025
16	76.305	2.317	73.988				14.798	59.190	588.509	23.300	306.325
17	78.213	2.375	75.837				15.167	60.670	649.179	22.531	328.855
18	80.168	2.435	77.733				15.547	62.187	711.366	21.787	350.642
19	77.607	2.495	75.112				15.022	60.089	771.455	19.860	370.502
20	79.547	2.558	76.989				15.398	61.592	833.047	19.205	389.707

Επιτόκιο Αναγωγής	6,00%
Καθαρή Παρούσα Αξία	389.707
IRR	29,03%
ΕΠΑ	4,20έτη



6.12.2 Βιωσιμότητα επένδυσης-Περίπτωση 2η (χωρίς επιδότηση)

Απόδοση Επένδυσης με Επιχορήγηση επί των Ίδιων Κεφαλαίων (Μετά Τοκοχρεολυσίων και Φόρων)

Έτος	Έσοδα	Λειτουργικές Δαπάνες	Μεικτό Κέρδος	Αποσβέσεις	Χρεολύσιο	Τόκοι	Φόροι	Καθαρή Χρηματική Ροή	Αθροιστική Χρηματική Ροή	Παρούσα Αξία	Αθροιστική Παρούσα Αξία
0									-420.000		-420.000
1	58.540	1.600	56.940	28.000	5.571	9.800	2.714	38.855	-381.145	36.656	-383.344
2	60.004	1.640	58.364	28.000	5.961	9.410	2.999	39.994	-341.151	35.595	-347.750
3	61.504	1.681	59.823	28.000	6.379	8.992	3.290	41.161	-299.990	34.560	-313.190
4	63.041	1.723	61.318	28.000	6.825	8.546	3.589	42.358	-257.632	33.551	-279.639
5	64.617	1.766	62.851	28.000	7.303	8.068	3.896	43.584	-214.048	32.569	-247.070
6	66.233	1.810	64.422	28.000	7.814	7.557	4.210	44.841	-169.207	31.611	-215.459
7	67.888	1.856	66.033	28.000	8.361	7.010	4.532	46.130	-123.077	30.679	-184.780
8	69.586	1.902	67.684	28.000	8.946	6.425	4.863	47.450	-75.627	29.771	-155.009
9	71.325	1.949	69.376	28.000	9.572	5.799	5.201	48.804	-26.823	28.887	-126.122
10	73.108	1.998	71.110	28.000	10.243	5.128	5.548	50.191	23.368	28.027	-98.096
11	71.189	2.048	69.141	28.000	10.959	4.412	5.154	48.616	71.985	25.610	-72.485
12	72.969	2.099	70.870	28.000	11.727	3.644	5.500	49.999	121.984	24.848	-47.637
13	74.793	2.152	72.641	28.000	12.548	2.823	5.854	51.416	173.400	24.106	-23.531
14	76.663	2.206	74.458	28.000	13.426	1.945	6.217	52.869	226.269	23.384	-147
15	74.444	2.261	72.183	28.000	14.366	1.005	5.762	51.050	277.319	21.301	21.154
16	76.305	2.317	73.988	28.000			9.198	64.790	342.109	25.504	46.659
17	78.213	2.375	75.837	28.000			9.567	66.270	408.379	24.610	71.269
18	80.168	2.435	77.733	28.000			9.947	67.787	476.166	23.749	95.018
19	77.607	2.495	75.112	28.000			9.422	65.689	541.855	21.711	116.729
20	79.547	2.558	76.989	28.000			9.798	67.192	609.047	20.951	137.679

Καθαρή Παρούσα Αξία **109.707**
IRR **9,39%**
ΕΠΑ **14,01έτη**

6.12.3 Οριακή τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας (ΚΠΑ=0)

Απόδοση Επένδυσης με Επιχορήγηση επί των Ίδιων Κεφαλαίων (Μετά Τοκοχρεολυσίων και Φόρων)

Έτος	Έσοδα	Λειτουργικές	Μεικτό	Αποσβέσεις	Χρεολύσιο	Τόκοι	Φόροι	Καθαρή	Αθροιστική	Παρούσα	Αθροιστική
0									-420.000		-420.000
1	37.420	1.600	35.820	28.000	5.571	9.800	-1.510	21.960	-398.040	20.717	-399.283
2	38.356	1.640	36.716	28.000	5.961	9.410	-1.331	22.676	-375.364	20.182	-379.102
3	39.315	1.681	37.634	28.000	6.379	8.992	-1.147	23.410	-351.954	19.656	-359.446
4	40.298	1.723	38.575	28.000	6.825	8.546	-959	24.163	-327.791	19.139	-340.307
5	41.305	1.766	39.539	28.000	7.303	8.068	-766	24.934	-302.857	18.632	-321.674
6	42.338	1.810	40.528	28.000	7.814	7.557	-569	25.725	-277.132	18.135	-303.539
7	43.396	1.856	41.541	28.000	8.361	7.010	-366	26.536	-250.596	17.648	-285.891
8	44.481	1.902	42.579	28.000	8.946	6.425	-158	27.367	-223.229	17.170	-268.721
9	45.593	1.949	43.644	28.000	9.572	5.799	55	28.218	-195.011	16.702	-252.019
10	46.733	1.998	44.735	28.000	10.243	5.128	273	29.091	-165.920	16.244	-235.775
11	71.189	2.048	69.141	28.000	10.959	4.412	5.154	48.616	-117.304	25.610	-210.164
12	72.969	2.099	70.870	28.000	11.727	3.644	5.500	49.999	-67.305	24.848	-185.316
13	74.793	2.152	72.641	28.000	12.548	2.823	5.854	51.416	-15.888	24.106	-161.210
14	76.663	2.206	74.458	28.000	13.426	1.945	6.217	52.869	36.981	23.384	-137.826
15	74.444	2.261	72.183	28.000	14.366	1.005	5.762	51.050	88.031	21.301	-116.525
16	76.305	2.317	73.988	28.000			9.198	64.790	152.821	25.504	-91.020
17	78.213	2.375	75.837	28.000			9.567	66.270	219.091	24.610	-66.410
18	80.168	2.435	77.733	28.000			9.947	67.787	286.878	23.749	-42.661
19	77.607	2.495	75.112	28.000			9.422	65.689	352.567	21.711	-20.950
20	79.547	2.558	76.989	28.000			9.798	67.192	419.758	20.951	0

Καθαρή Παρούσα Αξία **0**
 Οριακή τιμή πώλησης
 ηλεκτρικής ενέργειας **28,77€/kWh**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σχεδιασμός ενός τεχνικού έργου είναι ένα σύνθετο, πολυπαραμετρικό πρόβλημα. Βασική παράμετρος για όλα τα τεχνικά έργα υποδομής, είναι ο υπολογισμός τους σε βάθος χρόνου, για όποιο χαρακτήρα και αν έχει αυτό. Ειδικότερα για ένα έργο παραγωγής ενέργειας, οι προτεινόμενες λύσεις πρέπει να αξιολογούνται σε βάθος χρόνου και όχι στιγμιαία, γεγονός που μπορεί να παραπλανήσει την τελική επιλογή υλικών και μεγεθών. Τέτοιας αξιολόγησης χρήζουν π.χ. σε μια επένδυση Α.Π.Ε., η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία – ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας και κατά συνέπεια η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικά στα φ/β συστήματα, η χρονική διάρκεια ενός έτους είναι μέγεθος αναφοράς, γιατί αποτελεί την περίοδο(T) της σχετικής κίνησης ηλίου-γης.

Η παρούσα μελέτη αφορά την εγκατάσταση ενός διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των 100kWp, το οποίο κατατάσσει το έργο στα μεσαία κλίμακα. Στο κεφάλαιο 2 προσδιορίστηκε η σημαντικότερη παράμετρος του έργου και δεν είναι άλλη από την ηλιακή ακτινοβολία. Παρουσιάστηκαν μοντέλα προσδιορισμού της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο τόσο σε ωριαία βάση όσο και σε μηνιαία, της βέλτιστης ετήσιας κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο και του υπολογισμού ημερήσιων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας από τις μηνιαίες. Αυτά αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για κάθε φ/β εγκατάσταση. Το ζητούμενο στην παρούσα μελέτη ήταν να βρεθεί καταρχήν εκείνη η γωνία που θα μεγιστοποιούσε την προσλαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία σε ετήσια βάση. Όπως προέκυψε από την ανάλυση και επαληθεύεται και από πραγματικά δεδομένα, η γωνία αυτή διαφέρει σημαντικά από το γεωγραφικό πλάτος και η διαφορά μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και το γεωγραφικό πλάτος. Χωρίζοντας τον ελλαδικό χώρο σε 7 περιοχές σύμφωνα με τα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται και έπειτα από υπολογισμούς που αφορούσαν 7 πόλεις του ελλαδικού χώρου, μια από κάθε περιοχή, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι αυτή η διαφορά κυμαίνεται μεταξύ 7° και 11°. Επομένως θα μπορούσε κάποιος να θεωρήσει ότι η βέλτιστη γωνία για τον ελλαδικό χώρο είναι περίπου στις 30°.

Στην παρούσα μελέτη δεν μελετήθηκε η περίπτωση της μόνιμης παρακολούθησης της κίνησης του ήλιου στον ουράνιο θόλο για την μεγιστοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας, εξετάστηκε όμως ένας πολύ πιο απλός, χειροκίνητος μηχανισμός εναλλαγής μεταξύ δύο θέσεων κατά τη διάρκεια του έτους. Διαπιστώθηκε ότι τα ενεργειακά οφέλη, αν και υπαρκτά (4,7% περισσότερη προσλαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία) δεν αντισταθμίζουν το οικονομικό κόστος και τα πιθανά νέα προβλήματα που μπορεί να προκαλέσει μια τέτοια επιλογή (π.χ. επικάθηση σκόνης για μικρές τιμές κλίσης κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού). Τελική επιλογή ήταν η χρησιμοποίηση σταθερών αμετακίνητων φ/β στοιχείων καθ' όλη τη διάρκεια του έτος και συγκεκριμένα για την πόλη της Καλαμάτας όπου εστιάστηκε η περαιτέρω λεπτομερέστατη ανάλυση.

Στο κεφάλαιο 3 μελετήθηκαν εκτενέστατα οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής φ/β στοιχείων και εστιάστηκε η μελέτη στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας. Ακόμα εξετάστηκαν οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση ενός φ/β συστήματος. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνεται ότι ο σημαντικότερος παράγοντας είναι αυτός της θερμοκρασίας των φ/β πλαισίων, ο

οποίος συνδέεται άμεσα με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και συγκεκριμένα είναι κατά 30° C περίπου υψηλότερος από αυτή. Το γεγονός αυτό δεν κάνει τον ελλαδικό χώρο ιδανικό, καθώς το καλοκαίρι αναπτύσσονται πολύ μεγάλες θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγωγή των φ/β συστημάτων. Από την άλλη όμως αυτή την περίοδο του χρόνου η χώρα δέχεται τα μεγαλύτερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον χώρες της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης παρόλο που έχουν σαφώς χαμηλότερες θερμοκρασίες, εντούτοις δέχονται και κατά πολύ μικρότερα ποσά ενέργειας από τον ήλιο.

Στο κεφάλαιο 4 μελετήθηκαν οι βασικοί τύποι φ/β συστημάτων, τα οποία χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τα αυτόνομα και τα διασυνδεδεμένα φ/β συστήματα έχουν το καθένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα αυτόνομα αποτελούν την ιδανική λύση για απομακρυσμένες από το κεντρικό δίκτυο περιοχές, όπου η διασύνδεσή τους θα σήμαινε τεράστιες οικονομικές επιβαρύνσεις. Από την άλλη τα διασυνδεδεμένα μπορούν να διοχετεύουν την όποια περίσσεια ενέργειας στο δίκτυο και να λαμβάνουν από αυτό όταν η παραγωγή δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εξοικονόμηση ενέργειας. Ακόμα παρουσιάστηκαν τα βασικά στοιχεία ενός φ/β συστήματος, γεγονός που βοήθησε στην επιλογή των κατάλληλων προϊόντων του εμπορίου για την υλοποίηση της εγκατάστασης.

Στο κεφάλαιο 5 δόθηκαν βασικές οικονομικές έννοιες και μεγέθη αξιολόγησης της βιωσιμότητας μιας επένδυσης.

Στο κεφάλαιο 6 έγινε η μελέτη της εγκατάστασης. Για την επιλογή του τύπου των φ/β πλαισίων καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι από όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά καιρούς, αυτά που συμφέρουν από οικονομικής άποψης, αλλά και εμφανίζουν αξιολογη απόδοση είναι τα φ/β πλαίσια από μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Όλα τα άλλα υλικά έχουν περιορισμένες εφαρμογές μέχρι και σήμερα, αν και γίνεται μια μεγάλη προσπάθεια στον τομέα της έρευνας. Στο γεγονός συνηγορούν και τα στοιχεία που δείχνουν ότι οι δύο αυτές κατηγορίες αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία στα εγκατεστημένα φ/β συστήματα. Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν φ/β πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου καθώς ήταν πιο φθηνά και η διαφορά στην απόδοση σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικού πυριτίου ήταν πολύ μικρή. Η επιλογή του αντιστροφέα είναι ίσως το σημαντικότερο κομμάτι ενός φ/β συστήματος. Παρουσιάστηκε μια μέθοδος συνδυασμού φ/β πλαισίων και αντιστροφέα, κατά την οποία η αρχική επιλογή έχει να κάνει με τη επιλογή ενός αντιστροφέα κατάλληλης ισχύος για την εγκατάσταση που μελετάται και έπειτα διερεύνηση κατά πόσο αυτός μπορεί να συνδυαστεί με συγκεκριμένα φ/β πλαίσια που έχουν επιλεγεί. Σημαντικότες παράμετροι εκτός από τις ισχύεις των πλαισίων και του αντιστροφέα είναι και οι τιμές της τάσης και έντασης που μπορεί να δεχτεί στην είσοδό του ένας αντιστροφέας, οι οποίες εξαρτώνται από τα αντίστοιχα μεγέθη των πλαισίων, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η σύνδεσή τους.

Η βέλτιστη τοπογραφική διάταξη της εγκατάστασης αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι της, καθώς μπορεί να εξασφαλίσει την ελάχιστη χρήση του διαθέσιμου χώρου, την μέγιστη πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας, το ελάχιστο μήκος καλωδίων για τη σύνδεση και τον περιορισμό των απωλειών. Ακόμα η επιλογή του μεγέθους και

η εγκατάσταση της συστοιχίας στον χώρο πρέπει να λάβει υπόψη πολλές παραμέτρους. Η μορφολογία του εδάφους παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Συγκεκριμένα η κλίση του εδάφους κατά τη διεύθυνση B-N είναι η σημαντικότερη παράμετρος στο να χαρακτηριστεί μια περιοχή κατάλληλη ή όχι για την εγκατάσταση ενός φ/β συστήματος. Περιοχές που εμφανίζουν αρνητική κλίση μεγαλύτερη από 10% κρίνονται ακατάλληλες, καθώς η απαιτούμενη απόσταση για την αποφυγή σκίασης από διπλανές συστοιχίες μεγαλώνει δραματικά για τέτοιες τιμές.

Ένα φ/β σύστημα θα πρέπει ακόμα να έχει και τα απαραίτητα μέσα προστασίας. Η ύπαρξη γείωσης είναι επιβεβλημένη καθώς και διακοπών διαφυγής του ρεύματος. Όπως επιβεβλημένη είναι και η ύπαρξη αντικεραυνικής προστασίας.

Τέλος σύμφωνα με την τωρινή κατάσταση στην Ελλάδα όσον αφορά την οικονομική βιωσιμότητα διαπιστώθηκαν τα εξής: Ο συνδυασμός γενναίων επιδοτήσεων (έως και 50%) σε συνδυασμό με την αυξημένη τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από την Δ.Ε.Η. (45€/kWh) έκανε τις αντίστοιχες επενδύσεις κάτι παραπάνω από βιώσιμες. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε έκρηξη ενδιαφέροντος, φτάνοντας την συνολική ισχύ των αιτήσεων για φ/β εγκαταστάσεις στα 700MW (Σεπτέμβριος 2007). Οι τεχνοικονομική μελέτη επιβεβαιώνει και δικαιολογεί την ανάπτυξη αυτή. Από την άλλη όμως δείχνει ότι μέχρι και σήμερα η βιωσιμότητα των φ/β επενδύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παρέμβαση του κράτους και ουσιαστικά είναι τελείως αδιάφορη σε ένα επενδυτή χωρίς τα αναγκαία μέτρα στήριξης (π.χ. επιδοτήσεις).

Βιβλιογραφία

- [1] Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Κ. Καγκαράκης Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- [2] Ηλεκτρισμός από Ηλιακή Ενέργεια, Thomas Markvart, Επιμέλεια Ελληνικής Έκδοσης Παναγιώτης Σκούτζος, Εκδόσεις ΙΩΝ
- [3] Solar Engineering of Thermal Processes 2nd Edition, Duffie J., and Beckman W.
- [4] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Antonio Luque and Steven Hegedus
- [5] Ηλεκτρονικά Ισχύος, Στέφανος Ν. Μανιάς Καθηγητής Ε.Μ.Π., Εκδόσεις Συμεών Αθήνα 2000
- [6] Σημειώσεις Εγκαταστάσεων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και Ανεμογεννητριών, Στέφανος Ν. Μανιάς Καθηγητής Ε.Μ.Π., Κ.Ε.Κ. Αγίων Αναργύρων
- [7] First Course on Power Electronics and Drivers, Ned Mohan, Professor of Power Electronics and Systems, University of Minnesota, 2003 Edition.
- [8] Power Electronics Handbook, MUHAMMAD H. RASHID, Ph.D., Fellow IEE, Fellow IEEE, Professor University of West Florida,. Copyright © 2001 by ACADEMIC PRESS
- [9] Power Electronics, Converters, Applications and Design, Second Edition, Mohand/Underland/Robbins, John Wiley & Sons Inc.
- [10] Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Ανανεώσιμες Πηγές, Μιχ. Π. Παπαδόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997
- [11] Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά, Στέφανος Ν. Μανιάς Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- [12] Φυσική, Τεχνολογία και Χρήσεις Φωτοβολταϊκών, Κ.Θ. Δέρβος Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006
- [13] Photovoltaic Solar Energy Generation, Professor Dr. Adolf Goetzberger and Dipl.-Wirt Volker U. Hoffmann, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- [14] Proceedings of Solar Forum 2001: Solar Energy: The power to choose, April 21-25, 2001 Washington DC. 'Effects of tilt and azimuth on annual incident solar radiation for United States Locations', Craig B. Christensen and Greg M. Barker
- [15] Σημειώσεις Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Δρ. Π. Αξιάπουλος
- [16] Μελέτη και Κατασκευή Φωτοβολταϊκού Πάρκου για Κάλυψη Ενεργειακών Εφαρμογών σε Παραγωγικές Μονάδες, Π. Γκουλιάρας, Δ. Γκουλιάρας, Φ. Γκουλιάρας
- [17] Σύνδεση Εγκαταστάσεων Παραγωγής στα Δίκτυα Διανομής, Σημειώσεις Α.Π.Ε., Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου, Λέκτορας ΕΜΠ, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2003
- [18] Handbook of Batteries Third Edition, David Linden & Thomas B. Reddy, McGraw-Hill Companies, Inc.
- [19] Handbook Primer on Lead-Acid Storage Batteries, US Department of Energy
- [20] Οικονομική Ανάλυση Επιχειρήσεων, Π.Κάπρος Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα Δεκέμβριος 2001

- [21] Διαχείριση Ενέργειας και Περιβαλλοντική Πολιτική, Ιωάννης Ψαρράς, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π., Κωνσταντίνος Δ. Παλιτζιάνος, Επ. Συνεργάτης Ε.Μ.Π., Αθήνα 2005
- [22] Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙΙ, Μηχανική των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων. Τεχνολογία, Μελέτες, Εφαρμογές, Σ.Ν.Καπλάνης, Εκδόσεις ΙΩΝ.
- [23] Αυτόνομες Εφαρμογές ηλιακής Ενέργειας Μικρού και Μεσαίου Μεγέθους, Βασίλης Μαλαμής, Εκδόσεις ΙΩΝ
- [24] Απαιτήσεις για θεμελιακή γείωση, Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης, ΕΛΟΤ-1424, 3/11/2006
- [25] Lightning Protection Guide, ©DEHN, Revised: May 2004, Publication No. DS702/E/2004
- [26] Προστασία Κατασκευών από Κεραυνούς, Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης, ΕΛΟΤ-1197, 17/6/2002
- [27] Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems, Joe-Air Jiang, Tsong-Liang Huang, Ying-Tung Hsiao and Chia-Hong Chen, Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 8, No 2, pp. 147_153 (2005)
- [28] Ανάλυση της Λειτουργίας Εργαστηριακού Πρωτότυπου Μικροδικτύου, Διπλωματική Εργασία, Χαράλαμπος Ι. Αναστασόπουλος, Ε.Μ.Π, Σχολή Η.Μ.Μ.Υ., Αθήνα Ιούλιος 2004
- [29] Έλεγχος Φόρτισης στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Πτυχιακή Εργασία, Κυριάκος Τανατζής, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας
- [30] Μελέτη Εγκατάστασης Φωτοβολταϊκής Γεννήτριας στο Νέο Κτίριο των Ηλεκτρολόγων του Ε.Μ.Π., Μεταπτυχιακή Διπλωματική, Δημητρώπουλος Δημήτριος, Ε.Μ.Π., Σχολή Η.Μ.Μ.Υ., Αθήνα 2004
- [31] Πρακτικά Όγδοου Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Θεσσαλονίκη 29-31 Μαρτίου 2006, Ινστιτούτο Ηλιακής Ενέργειας.

Ακόμα χρησιμοποιήθηκαν πολλές πληροφορίες από το διαδίκτυο. Παρακάτω δίνονται κάποιες διευθύνσεις από τις οποίες αντλήθηκαν πληροφορίες για την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

- [32] www.sma.de
- [33] <http://global.kyocera.com>
- [34] www.rae.gr
- [35] www.desmie.gr
- [36] www.ypan.gr
- [37] www.cres.gr
- [38] www.iea.org
- [39] www.aenaon.net/gr/

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

		Ιανουάριος		Φεβρουάριος		Μάρτιος	
		$\omega_{\zeta}=73,24^{\circ}$		$\omega_{\zeta}=80,01^{\circ}$		$\omega_{\zeta}=88,17^{\circ}$	
ω	Ώρα	I/H	I(Wh/m ²)	I/H	I(Wh/m ²)	I/H	I(Wh/m ²)
(-120°, -105°)	4:00-5:00						
(-105°, -90°)	5:00-6:00						
(-90°, -75°)	6:00-7:00			0,0046	12,59	0,0131	48,99
(-75°, -60°)	7:00-8:00	0,0175	37,22	0,0284	77,17	0,0393	146,92
(-60°, -45°)	8:00-9:00	0,0612	130,36	0,0678	184,03	0,0724	270,89
(-45°, -30°)	9:00-10:00	0,1079	229,80	0,1066	289,34	0,1040	389,13
(-30°, -15°)	10:00-11:00	0,1460	310,84	0,1376	373,60	0,1288	481,99
(-15°, 0°)	11:00-12:00	0,1673	356,29	0,1549	420,40	0,1425	533,05
(0°, 15°)	12:00-13:00	0,1673	356,29	0,1549	420,40	0,1425	533,05
(15°, 30°)	13:00-14:00	0,1460	310,84	0,1376	373,60	0,1288	481,99
(30°, 45°)	14:00-15:00	0,1079	229,80	0,1066	289,34	0,1040	389,13
(45°, 60°)	15:00-16:00	0,0612	130,36	0,0678	184,03	0,0724	270,89
(60°, 75°)	16:00-17:00	0,0175	37,22	0,0284	77,17	0,0393	146,92
(75°, 90°)	17:00-18:00			0,0046	12,59	0,0131	48,99
(90°, 105°)	18:00-19:00						
(105°, 120°)	19:00-20:00						
Μέση Ημερήσια Ηλιακή ακτινοβολία (H)			2.129,03		2.714,29		3.741,94
Μηνιαία Ηλιακή Ακτινοβολία (H)			66.000,00		76.000,00		116.000,00

		Απρίλιος		Μάιος		Ιούνιος	
		$\omega_{\zeta}=97,19^{\circ}$		$\omega_{\zeta}=104,23^{\circ}$		$\omega_{\zeta}=108,76^{\circ}$	
ω	Ωρα	I/H	I(Wh/m ²)	I/H	I(Wh/m ²)	I/H	I(Wh/m ²)
(-120°, -105°)	4:00-5:00					-0,0002*	-1,51*
(-105°, -90°)	5:00-6:00	0,0044	19,87	0,0083	51,46	0,0120	83,53
(-90°, -75°)	6:00-7:00	0,0211	95,12	0,0279	172,67	0,0314	218,58
(-75°, -60°)	7:00-8:00	0,0472	212,30	0,0514	318,18	0,0534	371,95
(-60°, -45°)	8:00-9:00	0,0749	337,08	0,0757	468,96	0,0759	528,61
(-45°, -30°)	9:00-10:00	0,1006	452,78	0,0979	606,33	0,0962	669,95
(-30°, -15°)	10:00-11:00	0,1205	542,09	0,1148	711,19	0,1116	777,18
(-15°, 0°)	11:00-12:00	0,1313	590,76	0,1240	767,99	0,1199	835,05
(0°, 15°)	12:00-13:00	0,1313	590,76	0,1240	767,99	0,1199	835,05
(15°, 30°)	13:00-14:00	0,1205	542,09	0,1148	711,19	0,1116	777,18
(30°, 45°)	14:00-15:00	0,1006	452,78	0,0979	606,33	0,0962	669,95
(45°, 60°)	15:00-16:00	0,0749	337,08	0,0757	468,96	0,0759	528,61
(60°, 75°)	16:00-17:00	0,0472	212,30	0,0514	318,18	0,0534	371,95
(75°, 90°)	17:00-18:00	0,0211	95,12	0,0279	172,67	0,0314	218,58
(90°, 105°)	18:00-19:00	0,0044	19,87	0,0083	51,46	0,0120	83,53
(105°, 120°)	19:00-20:00					-0,0002*	-1,51*
Μέση Ημερήσια Ηλιακή ακτινοβολία (H)			4.500,00		6.193,55		6.966,67
Μηνιαία Ηλιακή Ακτινοβολία (H)			135.000,00		192.000,00		209.000,00

		Ιούλιος		Αύγουστος		Σεπτέμβριος	
		$\omega_{\zeta}=107,00^{\circ}$		$\omega_{\zeta}=100,40^{\circ}$		$\omega_{\zeta}=91,67^{\circ}$	
ω	Ώρα	I/H	I(Wh/m ²)	I/H	I(Wh/m ²)	I/H	I(Wh/m ²)
(-120°, -105°)	4:00-5:00	0,0000	-0,06*				
(-105°, -90°)	5:00-6:00	0,0104	72,56	0,0059	37,86	0,0032	15,77
(-90°, -75°)	6:00-7:00	0,0301	210,63	0,0244	156,04	0,0145	72,05
(-75°, -60°)	7:00-8:00	0,0527	368,64	0,0493	314,70	0,0427	212,30
(-60°, -45°)	8:00-9:00	0,0758	530,90	0,0754	481,43	0,0736	365,62
(-45°, -30°)	9:00-10:00	0,0968	677,83	0,0994	634,72	0,1027	510,15
(-30°, -15°)	10:00-11:00	0,1128	789,56	0,1178	752,42	0,1254	622,84
(-15°, 0°)	11:00-12:00	0,1214	849,94	0,1278	816,38	0,1378	684,59
(0°, 15°)	12:00-13:00	0,1214	849,94	0,1278	816,38	0,1378	684,59
(15°, 30°)	13:00-14:00	0,1128	789,56	0,1178	752,42	0,1254	622,84
(30°, 45°)	14:00-15:00	0,0968	677,83	0,0994	634,72	0,1027	510,15
(45°, 60°)	15:00-16:00	0,0758	530,90	0,0754	481,43	0,0736	365,62
(60°, 75°)	16:00-17:00	0,0527	368,64	0,0493	314,70	0,0427	212,30
(75°, 90°)	17:00-18:00	0,0301	210,63	0,0244	156,04	0,0145	72,05
(90°, 105°)	18:00-19:00	0,0104	72,56	0,0059	37,86	0,0032	15,77
(105°, 120°)	19:00-20:00	0,0000	-0,06*				
Μέση Ημερήσια Ηλιακή ακτινοβολία (H)			7.000,00		6.387,10		4.966,67
Μηνιαία Ηλιακή Ακτινοβολία (H)			217.000,00		198.000,00		149.000,00

		Οκτώβριος		Νοέμβριος		Δεκέμβριος	
		$\omega_{\zeta}=82,70^{\circ}$		$\omega_{\zeta}=75,02^{\circ}$		$\omega_{\zeta}=71,28^{\circ}$	
ω	Ώρα	I/H	I(Wh/m ²)	I/H	I(Wh/m ²)	I/H	I(Wh/m ²)
(-120°, -105°)	4:00-5:00						
(-105°, -90°)	5:00-6:00						
(-90°, -75°)	6:00-7:00	0,0069	23,70	0,0022	5,44		
(-75°, -60°)	7:00-8:00	0,0324	110,96	0,0193	48,23	0,0132	23,50
(-60°, -45°)	8:00-9:00	0,0696	238,05	0,0633	158,20	0,0586	104,03
(-45°, -30°)	9:00-10:00	0,1058	361,87	0,1077	269,23	0,1081	191,75
(-30°, -15°)	10:00-11:00	0,1346	460,30	0,1437	359,27	0,1486	263,68
(-15°, 0°)	11:00-12:00	0,1506	514,79	0,1638	409,62	0,1714	304,13
(0°, 15°)	12:00-13:00	0,1506	514,79	0,1638	409,62	0,1714	304,13
(15°, 30°)	13:00-14:00	0,1346	460,30	0,1437	359,27	0,1486	263,68
(30°, 45°)	14:00-15:00	0,1058	361,87	0,1077	269,23	0,1081	191,75
(45°, 60°)	15:00-16:00	0,0696	238,05	0,0633	158,20	0,0586	104,03
(60°, 75°)	16:00-17:00	0,0324	110,96	0,0193	48,23	0,0132	23,50
(75°, 90°)	17:00-18:00	0,0069	23,70	0,0022	5,44		
(90°, 105°)	18:00-19:00						
(105°, 120°)	19:00-20:00						
Μέση Ημερήσια Ηλιακή ακτινοβολία (H)			3.419,35		2.500,00		1.774,19
Μηνιαία Ηλιακή Ακτινοβολία (H)			106.000,00		75.000,00		55.000,00

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

THE NEW VALUE FRONTIER



KC130GHT-2

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE



Kyocera is "ISO9001" certified and registered.
TUVdotCOM Internet platform for tested quality and service ID 0000007358.

HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module.
The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%.
These cells are encapsulated between a tempered glass cover and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions.
The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.
Equipped with plug in connectors.

APPLICATIONS

Grid-Connected Systems

- Residential Solar Power Systems
- Public and Industrial Solar Power Systems

Stand-Alone Solar Power Systems for

- Villages in remote areas
- Homes and summer cottages
- Microwave / Radio repeater stations
- Medical facilities in rural areas

- Emergency communication
- Water quality and environmental data monitoring
- Drinking water and livestock water pumping
- Irrigation pumping
- Cathodic protection
- Aviation obstruction lights
- Environmental data monitoring
- Railway signals
- Street lighting
- Desalination
- etc.

LIMITED WARRANTY

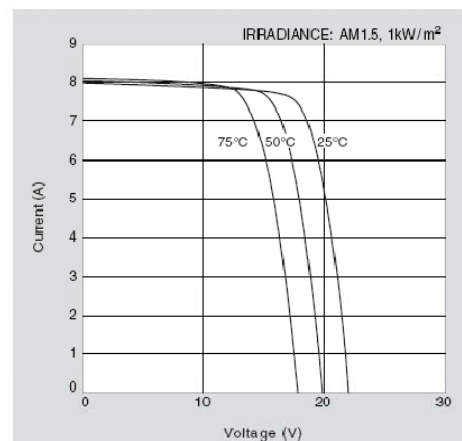
※ Limited warranty on material and workmanship: For warranty period, please refer to Warranty issued by Kyocera

※ 20 years limited warranty on power output: For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera

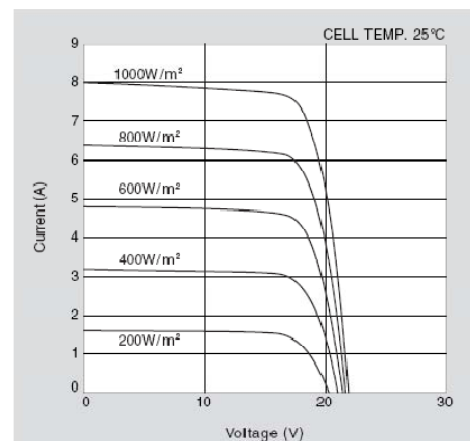
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC130GHT-2 at various cell temperatures

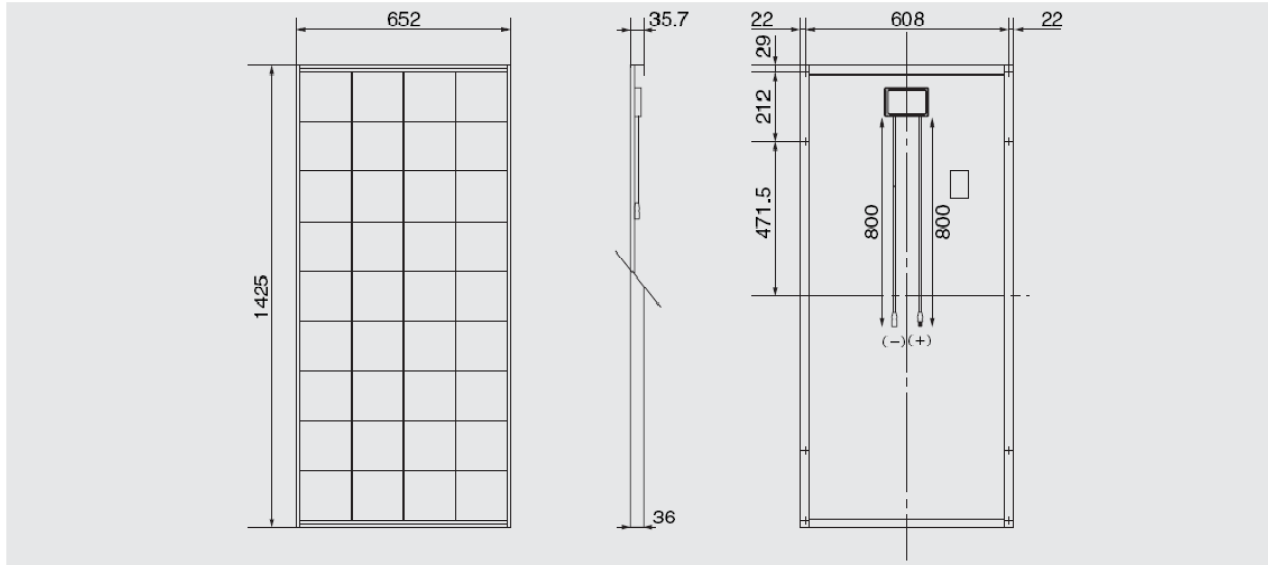


Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC130GHT-2 at various irradiance levels



Physical Specifications

(Unit: mm)



Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)

Maximum Power (P _{max})	130W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	17.6V
Maximum Power Current (I _{mp})	7.39A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	21.9V
Short Circuit Current (I _{sc})	8.02A
Max System Voltage	1000V
Temperature Coefficient of Voc	−8.21×10 ^{−2} V/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	3.18×10 ^{−3} A/°C

*STC: Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

Electrical Performance at 800W/m², NOCT*, AM1.5

Maximum Power (P _{max})	92W
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	15.5V
Maximum Power Current (I _{mp})	5.94A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	19.9V
Short Circuit Current (I _{sc})	6.47A

*NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): 47°C

Cells

Number per Module	36
Cell Technology	Multicrystal
Cell Shape	Rectangular

Module Characteristics

Length × Width × Depth without Box	1425×652×36mm
Weight	12.2kg
Cable	(+)800/(−)800mm

Junction Box Characteristics

Length × Width × Depth	113.6×76×9mm
IP Code	IP65

Reduction of Efficiency under Low Irradiance

Reduction	4.3%
-----------	------

Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m² to 200W/m² (module temperature 25°C)

Please contact our office for further information



KYOCERA Corporation

KYOCERA Corporation Headquarters

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION
6 Takeda Tobadono-cho
Fushimi-ku, Kyoto
612-0501, Japan
TEL:(81)75-604-9476 FAX:(81)75-604-3475
<http://www.kyocera.com>

KYOCERA Solar, Inc.

7812 East Acoma Drive
Scottsdale, AZ 85260, USA
TEL:(1)480-948-8003 or (800)223-9580 FAX:(1)480-483-6431
<http://www.kyocerasolar.com>

KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Av. Guignard 661, Loja A
22790-200, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brazil
TEL:(55)21-2437-8525 FAX:(55)21-2437-2338
<http://www.kyocerasolar.com.br>

KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde
N.S.W. 2113, Australia
TEL:(61)2-9870-2948 FAX:(61)2-9888-9588
<http://www.kyocerasolar.com.au>

KYOCERA Fineceramics GmbH

Fritz-Mueller-Strasse 107, 73730 Esslingen, Germany
TEL:(49)711-93934-999 FAX:(49)711-93934-950
<http://www.kyocerasolar.eu>

KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

298 Tiong Bahru Road, #13-03/05
Central Plaza, Singapore 108730
TEL:(65)6271-0500 FAX:(65)6271-0600

KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 801-802, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong
TEL:(852)2-7237193 FAX:(852)2-7244501

KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.66, Nanking West Road, Taipei, Taiwan
TEL:(886)2-2559-3609 FAX:(886)2-2559-4131

KYOCERA(Tianjin) Sales & Trading Corporation

19F, Tower C HeQiao Building 8A GuangHua Rd.,
Chao Yang District, Beijing 100026, China
TEL:(86)10-6583-2270 FAX:(86)10-6583-2250

THE NEW VALUE FRONTIER



KC175GHT-2

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE



Kyocera is "ISO9001" certified and registered.
TUVdotCOM Internet platform for tested quality and service ID 0000007146.

HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module.
The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%.
These cells are encapsulated between a tempered glass cover and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions.
The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.
Equipped with plug in connectors.

APPLICATIONS

Grid-Connected Systems

- Residential Solar Power Systems
- Public and Industrial Solar Power Systems

Stand-Alone Solar Power Systems for

- Villages in remote areas
- Homes and summer cottages
- Microwave / Radio repeater stations
- Medical facilities in rural areas

- Emergency communication
- Water quality and environmental data monitoring
- Drinking water and livestock water pumping
- Small-scale irrigation pumping
- Cathodic protection
- Aviation obstruction lights
- Environmental data monitoring
- Railway signals
- Street lighting
- Small-scale desalination
- etc.

LIMITED WARRANTY

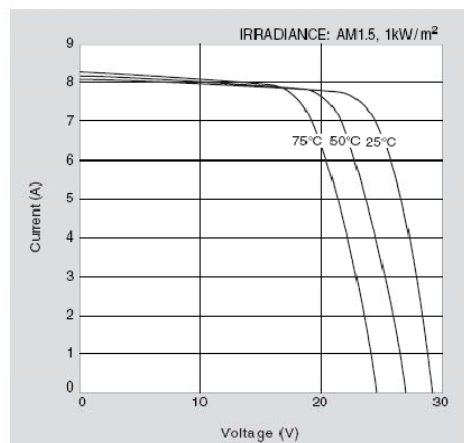
※ Limited warranty on material and workmanship: For warranty period, please refer to Warranty issued by Kyocera

※ 20 years limited warranty on power output: For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera

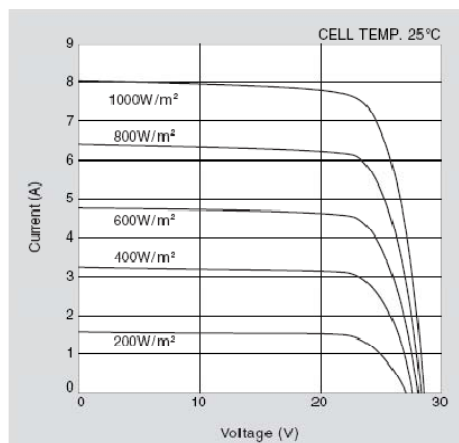
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC175GHT-2 at various cell temperatures

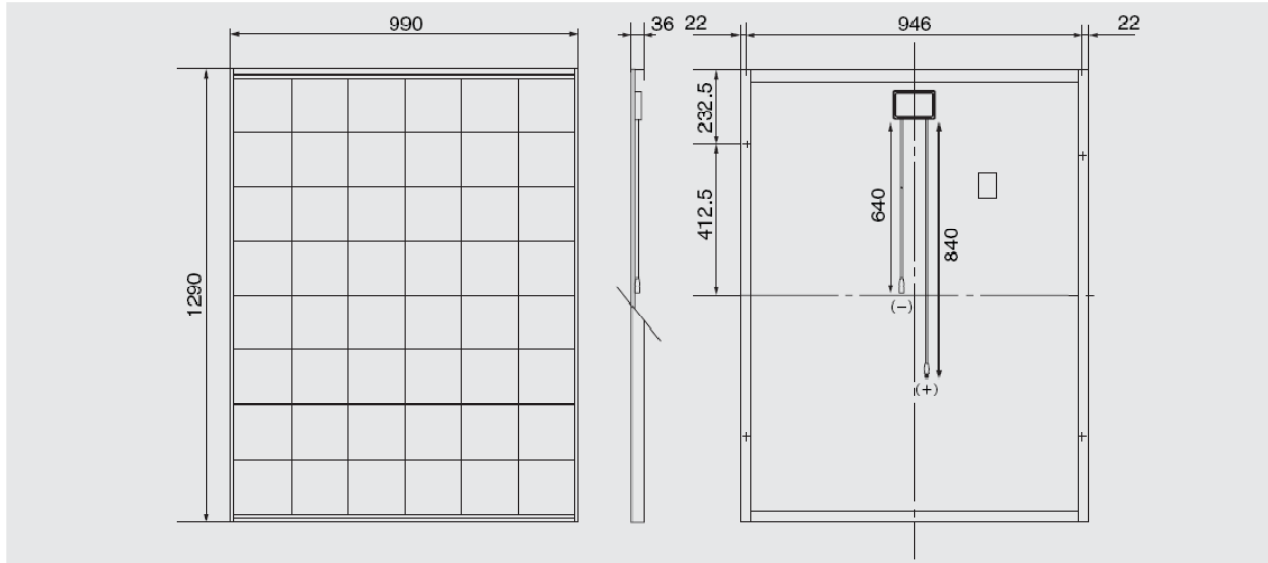


Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC175GHT-2 at various irradiance levels



Physical Specifications

(Unit: mm)



Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (Pmax)	175W (+10%/ -5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	23.6V
Maximum Power Current (Impp)	7.42A
Open Circuit Voltage (Voc)	29.2V
Short Circuit Current (Isc)	8.09A
Max System Voltage	1000V
Temperature Coefficient of Voc	-1.09×10 ⁻¹ V/°C
Temperature Coefficient of Isc	3.18×10 ⁻³ A/°C
*STC: Irradiance 1000W/m ² , AM1.5 spectrum, module temperature 25°C	
Electrical Performance at 800W/m ² , NOCT*, AM1.5	
Maximum Power (Pmax)	125W
Maximum Power Voltage (Vmpp)	20.9V
Maximum Power Current (Impp)	5.99A
Open Circuit Voltage (Voc)	26.5V
Short Circuit Current (Isc)	6.53A

*NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): 47°C

Cells	
Number per Module	48
Cell Technology	Multicrystal
Cell Shape	Rectangular

Module Characteristics	
Length × Width × Depth without Box	1290×990×36mm
Weight	16.0kg
Cable	(+)840/(-)640mm

Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	113.6×76×9mm
IP Code	IP65

Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	5.1%

Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m² to 200W/m² (module temperature 25°C)

Please contact our office for further information



KYOCERA Corporation

KYOCERA Corporation Headquarters

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION
6 Takeda Tobadono-cho
Fushimi-ku, Kyoto
612-0501, Japan
TEL:(81)75-604-9476 FAX:(81)75-604-9475
http://www.kyocera.com

KYOCERA Solar, Inc.

7812 East Acoma Drive
Scottsdale, AZ 85260, USA
TEL:(1)480-948-8003 or (800)223-9580 FAX:(1)480-483-6431
http://www.kyocerasolar.com

KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Av. Guillard 661, Loja A
22790-200, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brazil
TEL:(55)21-2437-8525 FAX:(55)21-2437-2338
http://www.kyocerasolar.com.br

KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde
N.S.W. 2113, Australia
TEL:(61)2-9870-2948 FAX:(61)2-9888-9588
http://www.kyocerasolar.com.au/

KYOCERA Fineceramics GmbH

Fritz-Mueller-Strasse 107, 73730 Esslingen, Germany
TEL:(49)711-93934-999 FAX:(49)711-93934-950
http://www.kyocerasolar.eu

KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

298 Tiong Bahru Road, #13-03/05
Central Plaza, Singapore 108730
TEL:(65)6271-0500 FAX:(65)6271-0600

KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 801-802, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong
TEL:(852)2-7237193 FAX:(852)2-7244501

KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.66, Nanking West Road, Taipei, Taiwan
TEL:(886)2-2559-3609 FAX:(886)2-2559-4131

KYOCERA(Tianjin) Sales & Trading Corporation

19F, Tower C HeQiao Building 8A GuangHua Rd.,
Chao Yang District, Beijing 100026, China
TEL:(86)10-8583-2270 FAX:(86)10-8583-2250

THE NEW VALUE FRONTIER



KC200GHT-2

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE



Kyocera is "ISO9001" certified and registered.
TUVdotCOM Internet platform for tested quality and service ID 000007358.

HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module.
The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%.
These cells are encapsulated between a tempered glass cover and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions.
The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.
Equipped with plug in connectors.

APPLICATIONS

Grid-Connected Systems

- Residential Solar Power Systems
- Public and Industrial Solar Power Systems

Stand-Alone Solar Power Systems for

- Villages in remote areas
- Homes and summer cottages
- Microwave / Radio repeater stations
- Medical facilities in rural areas

- Emergency communication
- Water quality and environmental data monitoring
- Drinking water and livestock water pumping
- Irrigation pumping
- Cathodic protection
- Aviation obstruction lights
- Environmental data monitoring
- Railway signals
- Street lighting
- Desalination
- etc.

LIMITED WARRANTY

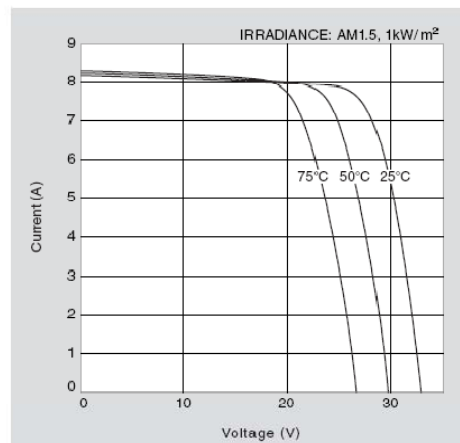
※ Limited warranty on material and workmanship: For warranty period, please refer to Warranty issued by Kyocera

※ 20 years limited warranty on power output: For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera

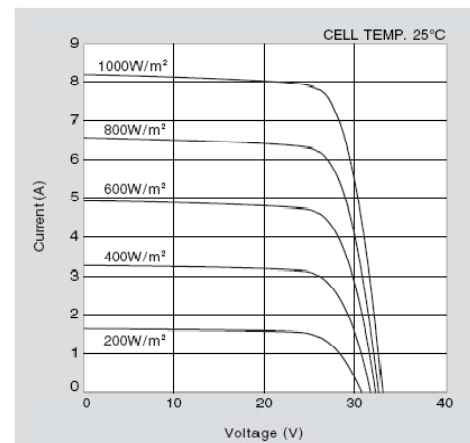
(Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GHT-2 at various cell temperatures

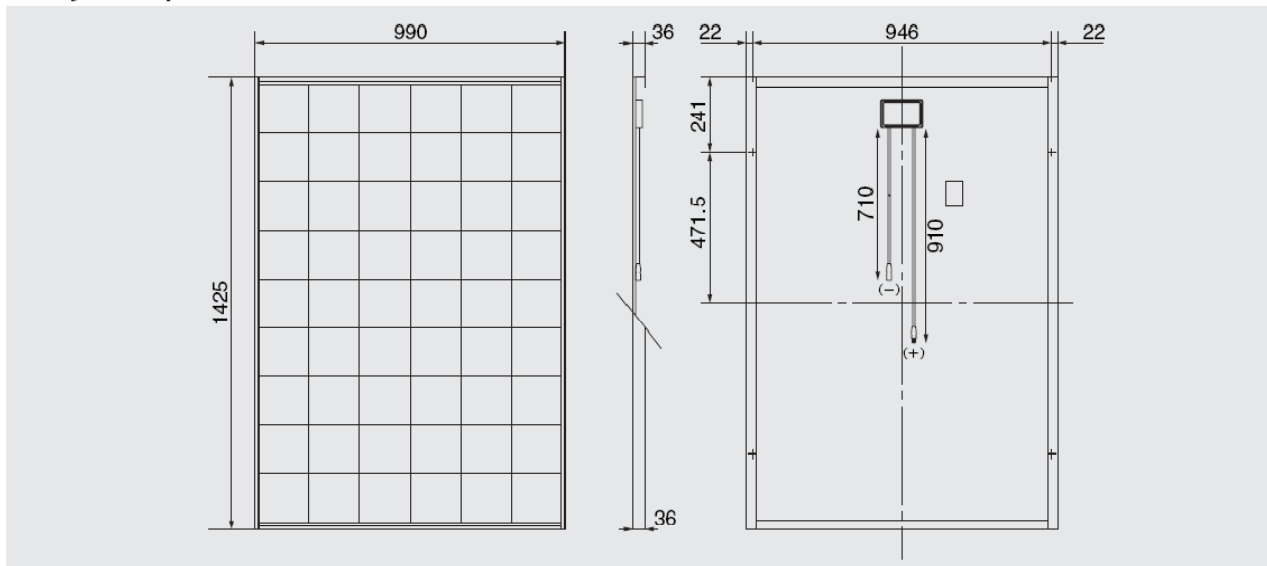


Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC200GHT-2 at various irradiance levels



Physical Specifications

(Unit : mm)



Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (P _{max})	200W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	26.3V
Maximum Power Current (I _{mpp})	7.61A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	32.9V
Short Circuit Current (I _{sc})	8.21A
Max System Voltage	1000V
Temperature Coefficient of Voc	−1.23×10 ⁻¹ V/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	3.18×10 ⁻³ A/°C

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C

Electrical Performance at 800W/m ² , NOCT*, AM1.5	
Maximum Power (P _{max})	142W
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	23.2V
Maximum Power Current (I _{mpp})	6.13A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	29.9V
Short Circuit Current (I _{sc})	6.62A

*NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C

Cells	
Number per Module	54
Cell Technology	Multicrystal
Cell Shape	Rectangular

Module Characteristics	
Length × Width × Depth without Box	1425×990×36mm
Weight	18.5kg
Cable	(+)910/(−)710mm

Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	113.6×76×9mm
IP Code	IP65

Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	7.8%

Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m² to 200W/m² (module temperature 25°C)

Please contact our office for further information



KYOCERA Corporation

KYOCERA Corporation Headquarters

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION
6 Takeda Tobadono-cho
Fushimi-ku, Kyoto
612-8501, Japan
TEL:(81)75-604-3476 FAX:(81)75-604-3475
http://www.kyocera.com

KYOCERA Solar, Inc.

7812 East Acoma Drive
Scottsdale, AZ 85260, USA
TEL:(1)480-948-8003 or (800)223-9580 FAX:(1)480-483-6431
http://www.kyocerasolar.com

KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Av. Guignard 661, Loja A
22790-200, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brazil
TEL:(55)21-2437-8525 FAX:(55)21-2437-2338
http://www.kyocerasolar.com.br

KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde
N.S.W. 2113, Australia
TEL:(61)2-9870-3948 FAX:(61)2-9888-9588
http://www.kyocerasolar.com.au/

KYOCERA Fin ceramics GmbH

Fritz-Mueller-Strasse 107, 73730 Eeslingen, Germany
TEL:(49)711-93934-999 FAX:(49)711-93934-950
http://www.kyocerasolar.eu

KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

298 Tiong Bahru Road, #13-03/05
Central Plaza, Singapore 160730
TEL:(65)6271-0500 FAX:(65)6271-0600

KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 801-802, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,
Tsimshatsui East, Kowloon, Hong Kong
TEL:(852)2-7237183 FAX:(852)2-7244501

KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.66, Nanking West Road, Taipei, Taiwan
TEL:(886)2-2555-3609 FAX:(886)2-2559-4131

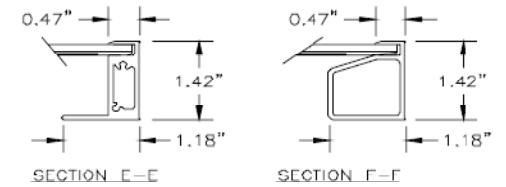
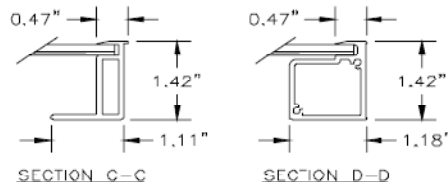
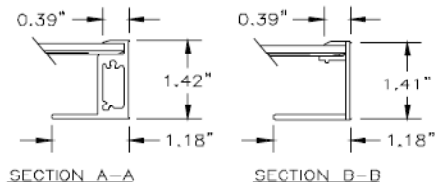
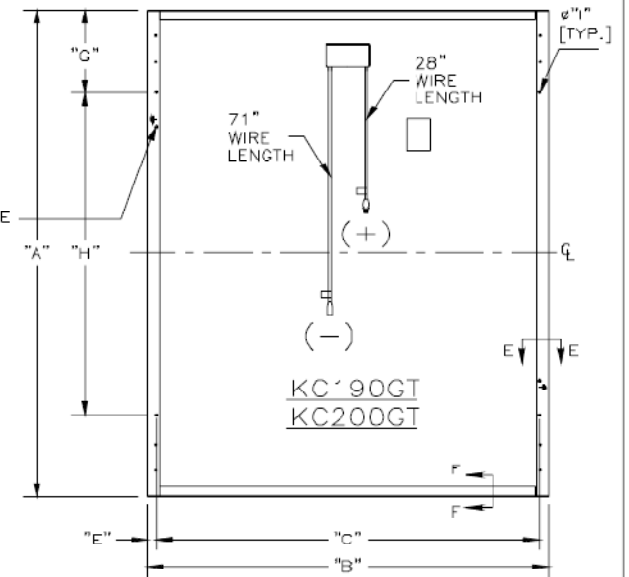
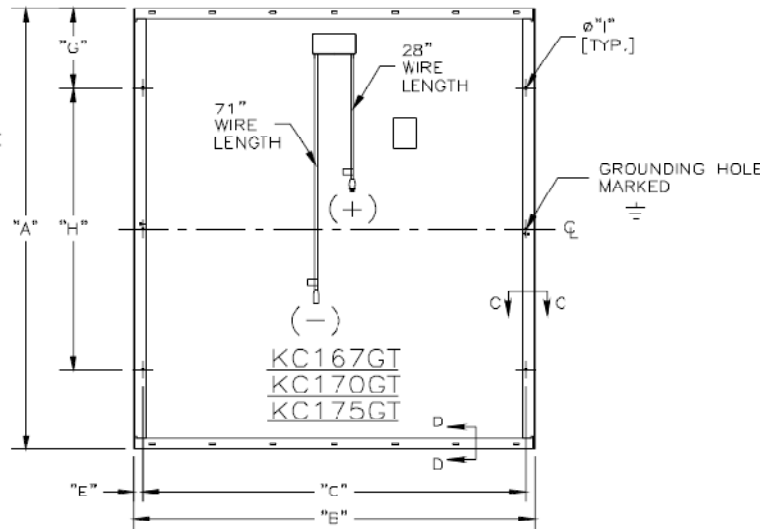
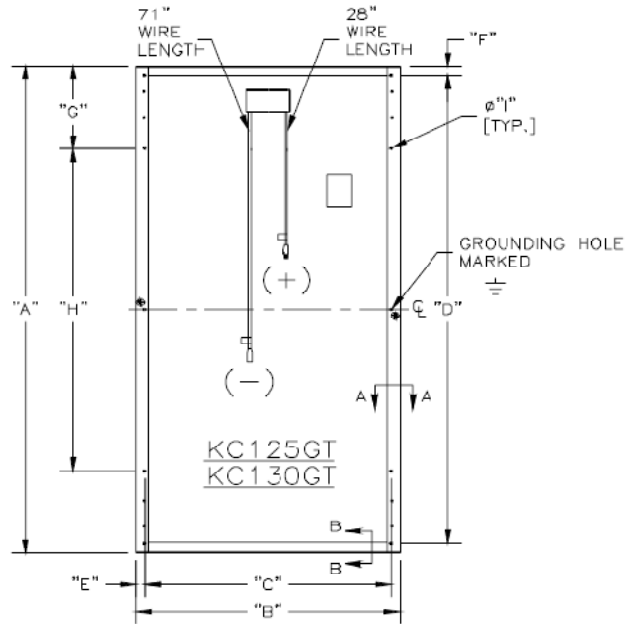
KYOCERA(Tianjin) Sales & Trading Corporation

19F, Tower C HeQiao Building 8A GuangHua Rd.,
Chao Yang District, Beijing 100026, China
TEL:(86)10-6583-2270 FAX:(86)10-6583-2250

KYOCERA KC125GT KC130GT KC167GT KC170GT
 KC175GT KC190GT KC200GT
 MODULE DRAWING

MODULE DIMENSIONS

MODULE	DIM. A	DIM. B	DIM. C	DIM. D	DIM. E	DIM. F	DIM. G	DIM. H	DIM. I
KC125GT, KC130GT	55.10"	25.67"	23.94"	53.82"	0.87"	1.14"	9.49"	37.13"	0.28"
KC167GT, KC170GT, KC175GT	50.79"	38.98"	37.24"	-	0.87"	-	9.15"	32.48"	0.28"
KC190GT, KC200GT	56.10"	38.98"	37.24"	-	0.87"	-	9.49"	37.13"	0.28"



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Sunny Mini Central

SMC 6000TL, SMC 7000TL και SMC 8000TL



Υψηλότερη απόδοση παγκοσμίως,
πάνω από 98 %

Χαμηλότερη τιμή μονάδας

Ελάχιστος χρόνος απόσβεσης

OptiCool:

Μέγιστη απόδοση σε θερμοκρασία
περιβάλλοντος έως 50 °C χάρη στο
σύστημα ψύξης διπλού θαλάμου

SMA grid guard 2:

Αυτόνομος διακόπτης σύνδεσης
σε δίκτυο σύμφωνα με το πρότυπο
DIN VDE 0126-1-1

Electronic Solar Switch ESS:

Ενσωματωμένος διακόπτης
απόζευξης DC σύμφωνα με το
πρότυπο DIN VDE 0100-712
(προαιρετικά)

Για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις
τριφασικής τροφοδοσίας

Εγγύηση 5 ετών από την SMA

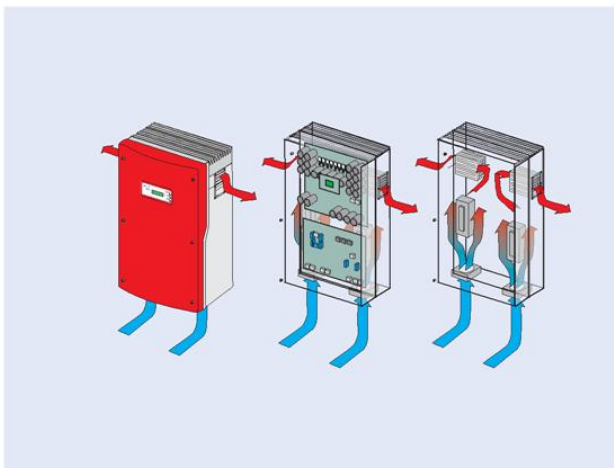
Η νέα σειρά προϊόντων Sunny Mini Central σας προσφέρει ακόμα περισσότερα: με απόδοση πάνω από 98% και την χαμηλότερη τιμή αγοράς σας εγγυάται την ταχύτερη απόσβεση των ηλιακών μετατροπέων.

Κλιμακωτές κατηγορίες ισχύος 6,7 και 8 kW, όπως επίσης και δυνατότητα συνδυασμού όλων των προϊόντων της σειράς, εξασφαλίζουν ευελιξία στο σχεδιασμό της εγκατάστασης. Είναι αυτόνομο πως τα νέα Sunny Mini Central διαθέτουν όλες τις λειτουργίες ασφαλείας και άνεσης της κορυφαίας εταιρίας.

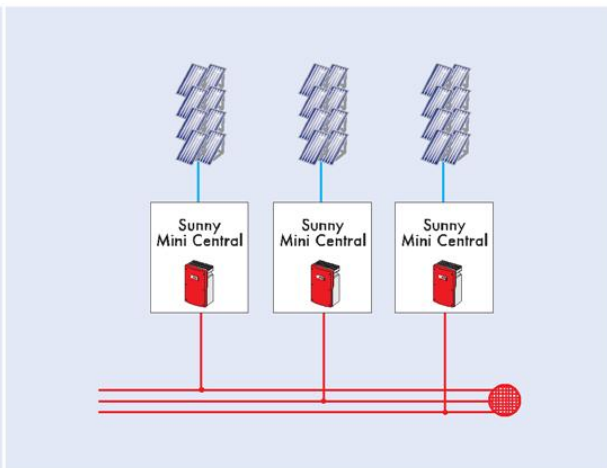
Στην επόμενη σελίδα θα βρείτε τα τεχνικά χαρακτηριστικά που θα σας πείσουν!

Περισσότερες πληροφορίες στην
ιστοσελίδα:

www.SMA.de/SMC8000TL



OptiCool: Σύστημα ψύξης δύο θαλάμων για την επίτευξη της πλήρους ονομαστικής ισχύος σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος έως 40 °C



Παράδειγμα σύνδεσης του Sunny Mini Central (τριφασική σύνδεση δικτύου)

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

	SMC 6000TL	SMC 7000TL	SMC 8000TL
Τιμές εισόδου			
Μέγιστη ισχύς DC	6200 W	7200 W	8250 W
Εύρος τάσης DC	335 V - 700 V	335 V - 700 V	335 V - 700 V
Ονομαστική τάση λειτουργίας ($U_{PV,nom}$)	350 V	350 V	350 V
Μέγ. τάση MPP ($U_{MPP,max}$)	500 V	500 V	500 V
Μέγ. τάση DC ($U_{DC,max}$)	700 V	700 V	700 V
Μέγ. ρεύμα εισόδου ($I_{PV,max}$)	19 A	22 A	25 A
Κυμάτωση τάσης DC (U_{GS})	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Μέγ. αριθμός string (παράλληλα)	4	4	4
Σύνδεση DC	Βύσμα σύνδεσης (MC ή Tyco)	Βύσμα σύνδεσης (MC ή Tyco)	Βύσμα σύνδεσης (MC ή Tyco)
Θερμικά ελεγχόμενες μεταβλητές αντιστάσεις	ναι	ναι	ναι
Διάταξη επιτήρησης γείωσης	ναι	ναι	ναι
Προστασία από αναστροφή τάσης	Δίοδος βραχυκύκλωσης	Δίοδος βραχυκύκλωσης	Δίοδος βραχυκύκλωσης
Τιμές εξόδου			
Μέγιστη ισχύς AC ($P_{AC,max}$)	6000 W στους 40 °C	7000 W στους 40 °C	8000 W στους 40 °C
Ονομαστική ισχύς AC ($P_{AC,nom}$)	6000 W	7000 W	8000 W
Μέγ. ρεύμα εξόδου ($I_{AC,max}$)	27 A	31 A	35 A
Συντελεστής παραμόρφωσης ρεύματος δικτύου	< 4 %	< 4 %	< 4 %
Ονομαστική τάση AC ($U_{AC,nom}$)	220 V - 240 V	220 V - 240 V	220 V - 240 V
Ονομαστική συχνότητα AC ($f_{AC,nom}$)	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Συντελεστής ισχύος (cos φ)	1	1	1
Αντοχή σε βραχυκύκλωμα	ναι, ρύθμιση ρεύματος	ναι, ρύθμιση ρεύματος	ναι, ρύθμιση ρεύματος
Σύνδεση δικτύου	Ακροδέκτης εναλλασσόμενου ρεύματος	Ακροδέκτης εναλλασσόμενου ρεύματος	Ακροδέκτης εναλλασσόμενου ρεύματος
Αποδοτικότητα			
Μέγιστη απόδοση (η_{Max})	98 %	98 %	98 %
Ευρο-ετα (η_{Euro})	97,7 %	97,7 %	97,7 %
Ηλεκτρονικά ισχύος			
Σχεδίαση συνδέσεων	H5 γέφυρα (χωρίς μετασχηματιστή)	H5 γέφυρα (χωρίς μετασχηματιστή)	H5 γέφυρα (χωρίς μετασχηματιστή)
Επιτήρηση δικτύου { DIN VDE 0126-1-1}	SMA grid guard 2	SMA grid guard 2	SMA grid guard 2
Αριθμός φάσεων τροφοδοσίας	1	1	1
Περιβλημα			
σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN 60529	IP65 (ανθεκτικό στη σκόνη και στο νερό)	IP65 (ανθεκτικό στη σκόνη και στο νερό)	IP65 (ανθεκτικό στη σκόνη και στο νερό)
Σχεδίαση συστήματος ψύξης	OptiCool	OptiCool	OptiCool
Επιτρεπόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος	-25 °C έως +60 °C	-25 °C έως +60 °C	-25 °C έως +60 °C
Μηχανολογικά μεγέθη			
Βάρος	31 kg	32 kg	33 kg
Πλάτος / Ύψος / Βάθος σε mm	468 / 613 / 242	468 / 613 / 242	468 / 613 / 242
Εξοπλισμός			
Επικοινωνία	Προαιρετικά: RS232/RS485/ασύρματη	Προαιρετικά: RS232/RS485/ασύρματη	Προαιρετικά: RS232/RS485/ασύρματη
Οθόνη	Βασικός εξοπλισμός: Οθόνη 2 γραμμών	Βασικός εξοπλισμός: Οθόνη 2 γραμμών	Βασικός εξοπλισμός: Οθόνη 2 γραμμών
Εγγύηση	5 χρόνια (Προαιρετικά: 10 χρόνια)	5 χρόνια (Προαιρετικά: 10 χρόνια)	5 χρόνια (Προαιρετικά: 10 χρόνια)
Διάταξη απομόνωσης DC	Προαιρετικά: ESS	Προαιρετικά: ESS	Προαιρετικά: ESS
Επιτήρηση εγκατάστασης	Συμβατό π.χ. με Sunny Boy Control, Sunny Beam, Sunny WebBox και Sunny Portal	Συμβατό π.χ. με Sunny Boy Control, Sunny Beam, Sunny WebBox και Sunny Portal	Συμβατό π.χ. με Sunny Boy Control, Sunny Beam, Sunny WebBox και Sunny Portal

www.SMA.de
Καλέστε +49 561 9522 4000

Καινοτομία στη μηχανική συστημάτων
με σκοπό την επιτυχία στα φωτοβολταϊκά





**Certificate for inverters in PV systems connected to the public grid.
Πιστοποιητικό για μετατροπείς σε φωτοβολταϊκά συστήματα συνδεδεμένα στο δημόσιο δίκτυο.**

Transformerless Inverters / Μετατροπείς χωρίς μετασχηματιστή

SB 3300 TL (HC)	SB 4200TL (HC)	SB 5000TL (HC)
SMC 6000TL	SMC 7000TL	SMC 8000TL

Inverters with transformer / Μετατροπείς με μετασχηματιστή

SB 700	SB 1100 (LV)	SB 1700	SB 2500
SB 2800i	SB 3000	SB 3300	SB 3800
SMC 5000(A)	SMC 6000(A)	SMC 7000HV	

Serial number / Αριθμός σειράς: -----

Manufactured by the company / Κατασκευάζονται από την:

**SMA Technologie AG, Hannoversche Strasse 1-5;
D-34266 Niestetal / Γερμανία**

1.) SMA inverters fulfill all safety requirements according to the "Guide of connection of PV-Stations to the low voltage-grid" of PPC.

2.) If the distribution line - for any reason - gets disconnected from the public grid the PV installations (especially the inverter) will not maintain voltage on the distribution line.

3.) The disconnection and connection of the inverter to the point of power injection is done with internal relays which are controlled by a software which will initiate :

- an automatic (re-)connection to the public grid provided that voltage and frequency are **within the range** of $0,8 \times V_{nom} - 1,15 \times V_{nom}$ and 49,5 Hz - 50,5 Hz.
- an **immediate** (< 0,5 s) disconnection if the voltage, the frequency or both are not within these limits
- the software with its adjustments can not be accessed by the end-user.

4.) Reconnection time after clearance of grid failure is not shorter than 180 s.

5.) In case of transformerless inverter, the injected DC current into the grid is < 0,5 % of nominal current.

6) The inverter has been tested during final factory test and the above mentioned limits have been checked.

7.) The total harmonic distortion of the output current (THDI) is lower than 4 %.

8.) For active anti islanding protection, a sophisticated impedance measurement acc. to the DIN VDE 0126-1-1 (2.06) is implemented inside the inverter.

1.) Οι μετατροπείς της SMA ικανοποιούν όλες τις απαιτήσεις ασφαλείας σύμφωνα με τον «Οδηγό σύνδεσης φωτοβολταϊκών σταθμών στο δίκτυο χαμηλής τάσης» της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ).

2.) Εάν, για οποιονδήποτε λόγο, η γραμμή διανομής αποσυνδεθεί από το δημόσιο δίκτυο, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (ιδίως ο μετατροπέας) δεν διατηρούν τάση στη γραμμή διανομής.

3.) Ο μετατροπέας συνδέεται στο σημείο εισαγωγής ισχύος και αποσυνδέεται από αυτό με τη βοήθεια εσωτερικών ηλεκτρονόμενων που ελέγχονται μέσω λογισμικού το οποίο πραγματοποιεί:

- αυτόματη (επανα-)σύνδεση στο δημόσιο δίκτυο, εφόσον οι τιμές τάσης και συχνότητας εμπίπτουν εντός του εύρους $0,8 \times V_{nom} - 1,15 \times V_{nom}$ και 49,5 Hz - 50,5 Hz.
- άμεση (< 0,5 s) αποσύνδεση, εφόσον η τάση, η συχνότητα ή και τα δύο μεγέθη δεν εμπίπτουν εντός του προαναφερόμενου εύρους τιμών
- ο τελικός χρήστης δεν έχει πρόσβαση στο λογισμικό ούτε στις ρυθμίσεις του.

4.) Ο χρόνος επανασύνδεσης μετά την επαναφορά του δικτύου είναι τουλάχιστον 180 s.

5.) Σε μετατροπείς χωρίς μετασχηματιστή, το συνεχές ρεύμα (DC) που εισάγεται στο δίκτυο είναι < 0,5 % του ονομαστικού ρεύματος.

6) Ο μετατροπέας έχει υποβληθεί σε τελικές εργοστασιακές δοκιμές και έχουν ελεγχθεί τα όρια ισχύος του μαγνητικού πεδίου που αναφέρονται πιο πάνω.

7.) Η συνολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου (THDI) είναι μικρότερη από 4 %.

8.) Για την ενεργό προστασία του δικτύου από τη νησιδοποίηση, εντός του μετατροπέα πραγματοποιείται μέτρηση σύνθετης αντίστασης σύμφωνα με το πρότυπο DIN VDE 0126-1-1 (2.06).

Niestetal, 25.01.2007

SMA Technologie AG

i.V. Tobias Henne

Head of Department Product Management Solar Technology

Zert_N_GR-12-BG1707

