



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

Μελέτη Φωτοβολταϊκού Πάρκου 60KW

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Β. Ασημακόπουλος

Σπυρίδων Β. Λέτσης

Επιβλέπων : Πέτρος Καραϊσάς
Καθηγητής ΑΤΕΙ Πειραιά

Αθήνα, Ιούνιος 2013

Στην Αθηνά Μωραΐτη γιατί
ένα χαμόγελο της σου φτιάχνει την μέρα!

.....
Γεώργιος Β. Ασημακόπουλος
Σπυρίδων Β. Λέτσης
Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Copyright © Γιώργος Ασημακόπουλος, Σπυρίδων Λέτσης 2013
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 Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά

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 60kWp. Ο συγκεκριμένος φ/β σταθμός μελετήθηκε για το γεωγραφικό πλάτος της Ηλείας.

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, αντικεραυνική προστασία κλπ.), ενώ έμφαση δίνεται στην τελική απόδοση της εγκατάστασης. Τέλος γίνεται μια τεχνοοικονομική 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.

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 60kWp.

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 photovoltaic, 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.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Ο ΗΛΙΟΣ.....	σελ 22
2.2 Η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	σελ 22
2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	σελ 26
2.4 Η ηλιακή ακτινοβολία.....	σελ 31
2.4.1 Άμεση, διάχυτη και ολική ηλιακή ακτινοβολία.....	σελ 31
2.4.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας.....	σελ 33
2.5 Ηλιακός χρόνος.....	σελ 36
2.6 Ηλιακή Γεωμετρία.....	σελ 40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

3.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ	σελ 45
3.1.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	σελ 45
3.1.2 Δημιουργία φωτορεύματος.....	σελ 46
3.1.3 Απορρόφηση της ακτινοβολίας στα φ/β στοιχεία.....	σελ 47
3.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	σελ 48
3.2.1 Το πυρίτιο.....	σελ 48
3.2.2 Η διαμόρφωση της διόδου.....	σελ 49
3.2.3 Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.....	σελ 50
3.2.4 Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο.....	σελ 50
3.2.5 Ribbon πυρίτιο.....	σελ 50
3.2.6 Κρυσταλλικό πυρίτιο λεπτού φιλμ.....	σελ 51
3.2.7 Άμορφο Πυρίτιο.....	σελ 51
3.2.8 Αρσενιούχο γάλλιο.....	σελ 52
3.2.9 Δισεληνιούχος Ιδιούχος χαλκός	σελ 52
3.2.10 Τελλουριούχο κάδμιο.....	σελ 53

3.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ.....	σελ 55
3.3.1 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	σελ 55
3.3.2 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	σελ 55
3.3.3 Η επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης.....	σελ 57
3.3.4 Η ισχύς αιχμής φ/β πλαισίου.....	σελ 58
3.3.5 Φωτοβολταϊκή συστοιχία(string)	σελ 59
3.3.6 Βέλτιστη διάταξη σταθερών συστοιχιών.....	σελ 61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	
4.1 ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	σελ 65
4.2 ΔΙΑΣΥΝΔΕΜΕΝΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	σελ 66
4.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ (DC/DC CONVERTER)	σελ 67
4.4 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ (DC/AC INVERTER)	σελ 73
4.4.1 Μονοφασικός αντιστροφέας	σελ 73
4.4.2 Τριφασικός αντιστροφέας.....	σελ 75
4.4.3 Ηλεκτρική απομόνωση των μετατροπέων ισχύος.....	σελ 78
4.5 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	σελ 79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	
5.1 ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΧΡΗΜΑΤΟΣ.....	σελ 89
5.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΩΝ ΣΧΕΔΙΩΝ	σελ 90
5.2.1 Καθαρή παρούσα αξία.....	σελ 90
5.2.2 Εσωτερικός βαθμός απόδοσης.....	σελ 91
5.2.3 Λόγος οφέλους/κόστους.....	σελ 91
5.2.4 Έντοκη περίοδος αποπληρωμής.....	σελ 91
5.2.5 Παρούσα αξία συνολικού κόστους και ισοδύναμου ετησίου κόστους.....	σελ 92
5.3 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗΣ.....	σελ 93
5.3.1 Κλασικές μορφές χρηματοδότησης.....	σελ 93
5.3.2 Σύγχρονοι χρηματοδοτικοί μηχανισμοί.....	σελ 93
5.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΟΦΛΙΣΗΣ ΔΑΝΕΙΩΝ.....	σελ 95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΜΕΝΟΥ Φ/Β ΣΤΑΘΜΟΥ

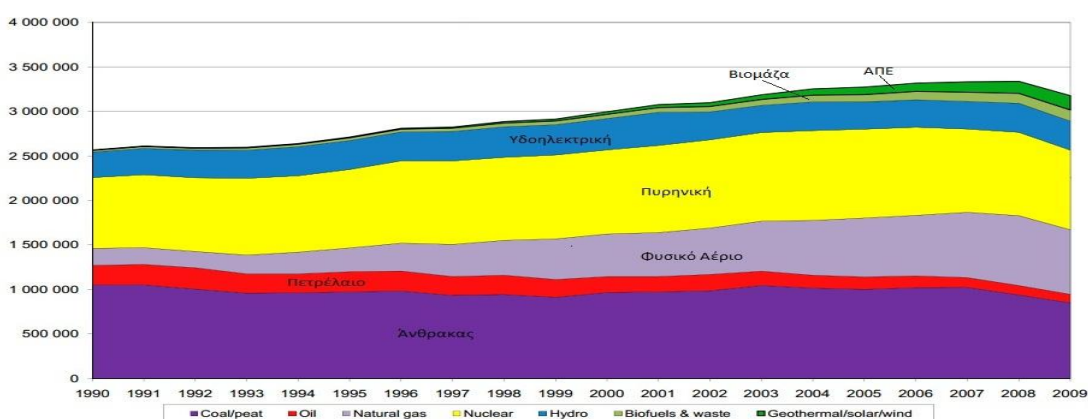
6.1 ΣΕΝΑΡΙΟ.....	σελ 98
6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ.....	σελ 98
6.3 ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	σελ 101
6.3.1 Ηλιακό δυναμικό για την πόλη της Ηλείας.....	σελ 105
6.3.1.1 Σταθερή ετήσια κλίση.....	σελ 105
6.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ.....	σελ 107
6.5 ΕΠΙΛΟΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....	σελ 110
6.6 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ.....	σελ 115
6.6.1 Ανάστροφο ρεύμα.....	σελ 115
6.7 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ.....	σελ 118
6.8 ΓΕΙΩΣΗ.....	σελ 122
6.9 ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	σελ 126
6.9.1 Αναγκαιότητα αντικεραυνικής προστασίας.....	σελ 126
6.9.2 Βλάβες από υπερτάσεις στο σύστημα.....	σελ 126
6.9.3 Στάθμες προστασίας αντικεραυνικού συστήματος.....	σελ 127
6.9.4 Συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων.....	σελ 128
6.9.5 Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας.....	σελ 130
6.9.6 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας.....	σελ 132
6.9.7 Χαρακτηριστικά φ/β πάρκου για αντικεραυνική προστασία.....	σελ 136
6.10 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	σελ 140
6.11 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	σελ 157
6.12 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	σελ 159
6.12.1 Βιωσιμότητα επένδυσης.....	σελ 160
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	σελ 161
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	σελ 165
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	σελ 166

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

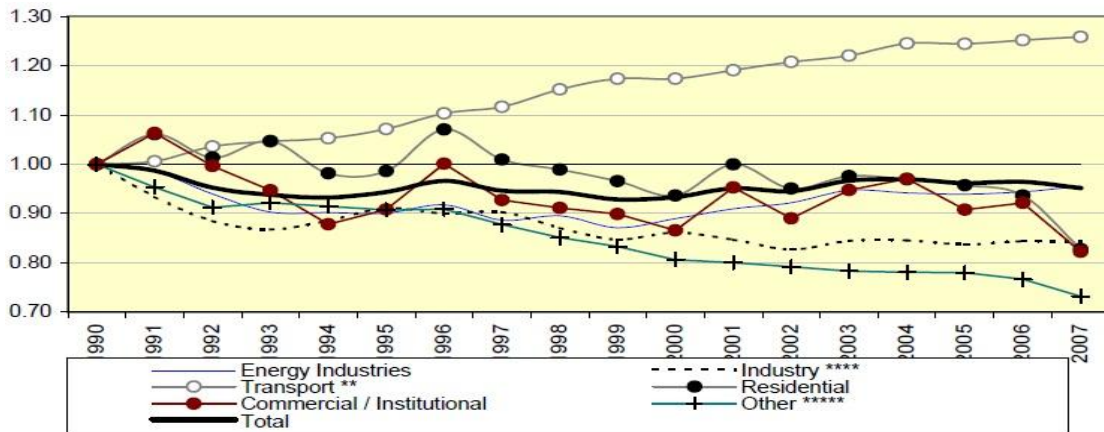
Η αλλαγή του κλίματος έχει ήδη εμφανή αποτελέσματα, που εκτείνονται από την αύξηση της θερμοκρασίας έως την άνοδο της στάθμης της θάλασσας σαν αποτέλεσμα της τήξης των πολικών παγετών, καθώς και τη συχνότερη εμφάνιση καταιγίδων και πλημμύρων. Οι μεταβολές αυτές θα επιφέρουν με τη σειρά τους σοβαρές επιπτώσεις στην ακεραιότητα των οικοσυστημάτων, τους υδατικούς πόρους, τη δημόσια υγεία, την προσφορά τροφής, τη βιομηχανία, τις γεωργικές καλλιέργειες, τις μεταφορές και τις υποδομές.

Οι συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες αναγνωρίζονται ευρέως ως το κύριο αίτιο της καταστροφής του οικοσυστήματος από την άποψη τόσο της εξάντλησης των φυσικών πόρων όσο και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Εξέλιξη της πρωτογενούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε GWh για τα έτη 1990-2009. Πηγή <http://iea.org>

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). Όλα τα μηνύματα δείχνουν πια καθαρά, ότι η συνέχιση της πορείας μας στο μέλλον επιβάλλει την αλλαγή της καθημερινής νοοτροπίας μας και την αναθεώρηση των αξιών της ζωής, σε συνδυασμό με τον επαναπροσδιορισμό της έννοιας και των στόχων της τεχνολογικής ανάπτυξης. Ο ήλιος και ο άνεμος θα έχουν τον πρώτο λόγο στις επόμενες δεκαετίες.



Σχήμα 1.2 Συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την Ευρωπαϊκή Ένωση ανά τομέα για τα έτη 1990-2007.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Τον Ιούνιο του 1992 στο Ρίο, πραγματοποιήθηκε η Σύνοδος Κορυφής για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη. Σε αυτήν έλαβαν μέρος 154 χώρες και οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι οποίες υπέγραψαν μια Σύμβαση - Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις κλιματικές αλλαγές. Η Ελλάδα συμμετείχε στη σύνοδο αυτή και επικύρωσε την σύμβαση. Η σύμβαση δεν έθεσε νομικά δεσμευτικές υποχρεώσεις αλλά τις γενικές αρχές και τη διαδικασία για τη μετέπειτα υιοθέτηση δεσμεύσεων, κυρίως μέσω των τακτικών συνόδων των Κρατών Μερών της.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση με δήλωσή της, που κατετέθη ταυτόχρονα με το έγγραφο επικύρωσης της Σύμβασης, έθεσε σαν συνολικό στόχο της, για όλα τα κράτη-μέλη από κοινού, τη σταθεροποίηση των εκπομπών της διοξειδίου του άνθρακα μέχρι το έτος 2000 στα επίπεδα του 1990.

Το Δεκέμβριο του 1997 στο Κιότο της Ιαπωνίας, υπεγράφη η πρώτη συμφωνία σε παγκόσμιο επίπεδο, γνωστή ως Πρωτόκολλο του Κιότο. Το Πρωτόκολλο στόχευε στη συνολική μείωση των εκπομπών τουλάχιστον κατά 5% την πενταετία 2008-2012 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Για την επίτευξή του, τα ανεπτυγμένα Κράτη - Μέλη του Πρωτοκόλλου καλέστηκαν να εξασφαλίσουν ότι οι εκπομπές τους, για 6 συνολικά αέρια (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, υδροφθοράνθρακες, πλήρως φθοριομένοι υδρογονάνθρακες και εξαφθοριούχο θείο) δεν θα υπερέβαιναν τα όρια που τους τέθηκε με το Πρωτόκολλο αυτό. Πιο συγκεκριμένα, η ΕΕ και τα Κ-Μ της υποχρεώθηκαν να μειώσουν τις εκπομπές των αερίων κατά 8% κατά τη περίοδο 2008-2012 σε σύγκριση με τις εκπομπές του έτους βάσης (1990).

Η Ελλάδα υπέγραψε το Πρωτόκολλο τον Απρίλιο του 1998, παράλληλα με τα υπόλοιπα Κράτη Μέλη της Ε.Ε. και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Όλα τα Κράτη Μέλη της ΕΕ κύρωσαν το Πρωτόκολλο το Μάιο 2002. Η Ελλάδα σύμφωνα με την απόφαση αυτή, δεσμεύτηκε να περιορίσει την αύξηση των εκπομπών της στο +25% για το διάστημα 2008-2012, προκειμένου να συνεισφέρει στο κοινό στόχο της ΕΕ για 8% μείωση των

εκπομπών της για το αυτό διάστημα. Για να ανταποκριθεί στη δέσμευσή της αυτή, η χώρα μας εκπόνησε το Εθνικό Πρόγραμμα μείωσης εκπομπών αερίων φαινόμενου θερμοκηπίου για την περίοδο 2000-2010.

Η πρώτη σύνοδος των Μερών του Πρωτοκόλλου του Κιότο, πραγματοποιήθηκε στο Μόντρεαλ του Καναδά τον Δεκέμβριο του 2005, σε συνδυασμό με την ενδέκατη σύνοδο της Διάσκεψης των Μερών (COP 11). Το Πρωτόκολλο τέθηκε τελικά σε ισχύ το Φεβρουάριο του 2005.

Το Δεκέμβριο του 2009 διεξάχθηκε η Διάσκεψη της Κοπεγχάγης με στόχο να επιτευχθεί μια παγκόσμια συμφωνία για την κλιματική αλλαγή, διάδοχη του Πρωτοκόλλου του Κιότο το οποίο έληγε το έτος 2012. Μια συμφωνία μεταξύ των συμβαλλομένων μερών δηλαδή των διαφόρων κρατών που θα ήταν δεσμευτική για τους υπογράφοντες θέτοντας συγκεκριμένους στόχους και μέτρα μείωσης των εκπομπών και αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής.

Στα τέλη Δεκεμβρίου του 2010 (29 Νοεμβρίου έως 10 Δεκεμβρίου) διεξάχθηκε η επόμενη διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή στο Μεξικό (COP16) αφού η 1^η Περίοδος του Πρωτοκόλλου του Κιότο τελείωνε το 2012 και δεν υπήρχε συμφωνία συνέχειας αλλά ούτε και αντικατάστασής της.

Σήμερα σε παγκόσμιο επίπεδο έχει συμφωνηθεί η συγκράτηση της αύξησης της θερμοκρασίας κάτω των 2 °C, στόχος μείωσης των συνολικών εκπομπών μέχρι το 2050 με αναστροφή της αυξητικής τάσης τους, ετήσιες απογραφές και αναφορές των κρατών ανά διετία στην πρόοδο δράσεων μείωσης των εκπομπών, δημιουργία του πράσινου ταμείου για το κλίμα ώστε να χειριστεί τα κονδύλια για τις επενδύσεις Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας παγκοσμίως, προσφέροντας μεγαλύτερη βοήθεια των ανεπτυγμένων χωρών προς στις αναπτυσσόμενες χώρες.

ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Η ΕΕ στον οδικό χάρτη της ενέργειας για το 2050 θέτει ως κεντρικό στόχο να μειώσει έως το 2050 τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 80%-95% σε σχέση με τα επίπεδα εκπομπών του 1990, μέσω της απανθρακοποίησης του ενεργειακού τομέα, με ταυτόχρονη εξασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού και της ανταγωνιστικότητας της Ευρωπαϊκής Οικονομίας. Βασικά εργαλεία για την επίτευξη αυτού του στόχου καθίστανται οι ΑΠΕ και η εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ το απαιτούμενο κόστος επενδύσεων για την επίτευξη του στόχου προκύπτει ότι θα είναι πιθανά και χαμηλότερο από το κόστος που θα επιβαρύνει την Ευρωπαϊκή οικονομία αν δε ληφθούν τα απαραίτητα αυτά μέτρα.

Η μελλοντική εικόνα του ενεργειακού συστήματος μπορεί να συνοψισθεί στα παρακάτω 10 σημεία:

1. Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 60%-70% έως το 2050 ως προς το 2005

2. Ποσοστό 85-100 % ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, με την αξιοποίηση όλων των εμπορικά ώριμων τεχνολογιών
3. Συνολική διείσδυση ΑΠΕ σε ποσοστό 60%-70% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας μέχρι το 2050
4. Σταθεροποίηση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης λόγω των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας
5. Σχετική αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω εξηλεκτρισμού των μεταφορών και μεγαλύτερης χρήσης αντλιών θερμότητας στον οικιακό και τριτογενή τομέα.
6. Σημαντική μείωση της κατανάλωσης πετρελαιοειδών
7. Αύξηση της χρήσης βιοκαυσίμων στο σύνολο των μεταφορών στο επίπεδο του 31% - 34% μέχρι το 2050
8. Κυρίαρχο το μερίδιο του ηλεκτρισμού στις επιβατικές μεταφορές μικρής απόστασης (45%) και σημαντική αύξηση του μεριδίου των μέσων σταθερής τροχιάς
9. Σημαντικά βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση για το σύνολο του κτιριακού αποθέματος και μεγάλη διείσδυση των εφαρμογών ΑΠΕ στον κτιριακό τομέα
10. Ανάπτυξη μονάδων αποκεντρωμένης παραγωγής και έξυπνων δικτύων

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ - ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΗΛΙΟΣ

Οι νέες εξελιγμένες ενεργειακές τεχνολογίες και οι διαχρονικές περιβαλλοντικές επιταγές, τα διεθνή και ευρωπαϊκά πλαίσια συνεργασίας αλλά και άλλες διακρατικές συμφωνίες και πρωτόκολλα, επιτάσσουν την προσαρμογή και την εναρμόνιση της ελληνικής ενεργειακής αγοράς και του θεσμικού της πλαισίου με τις σύγχρονες διεθνείς τάσεις, αντιλήψεις και επιταγές. Στο επίκεντρο βρίσκονται οι τομείς της απελευθέρωσης της αγοράς φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας, της αύξησης της ανταγωνιστικότητας, της επέκτασης και ενίσχυσης των εγχώριων και διακρατικών δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου και πετρελαίου, της ανεξαρτητοποίησης και του διαχωρισμού της παραγωγής από την προμήθεια, της ελεύθερης επιλογής προμηθευτή, της αύξησης της παραγόμενης ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, της αντίστοιχης μείωσης της παραγόμενης ενέργειας από συμβατικές τεχνολογίες καύσης, της βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας, της εξοικονόμησης της ενέργειας και της προστασίας του περιβάλλοντος.

Ένα έργο που προορίζεται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές με σκοπό την εξαγωγή της προς χώρες της κεντρικής και δυτικής Ευρώπης είναι το Πρόγραμμα ΗΛΙΟΣ.

Στην Ελλάδα λόγω του υψηλού ποσοστού ηλιοφάνειας, οι επενδύσεις σε ηλιακή ενέργεια είναι αποδοτικότερες συγκρινόμενες με τις ίδιες επενδύσεις σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Σε αυτή τη λογική στηρίζεται το Πρόγραμμα ΗΛΙΟΣ το οποίο έχει στέρεα νομική βάση, καθώς η Οδηγία 28/2009 της ΕΕ για την προώθηση των ΑΠΕ προβλέπει μηχανισμούς συνεργασίας μεταξύ κρατών-μελών.

Το σχέδιο «Ηλιος» είναι ένα ενεργειακό επενδυτικό σχέδιο που προβλέπει την εξαγωγή καθαρής ενέργειας από την Ελλάδα προς τις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης.

Τα οφέλη από ένα τέτοιο έργο είναι πολλαπλά, τόσο κατά τη φάση της ανάπτυξης του (απασχόληση, τεχνογνωσία κ.ά.) όσο και κατά τη λειτουργία του (απασχόληση, έσοδα από την πώληση της ενέργειας). Επιπλέον, η ενίσχυση και η ανάπτυξη νέων δικτυακών υποδομών που προβλέπει το έργο, συμβάλλουν ουσιαστικά τόσο στην υλοποίηση των σχεδίων ανάπτυξης των Ευρωπαϊκών διασυνδέσεων όσο και στη δημιουργία της ενιαίας Ευρωπαϊκής αγοράς ενέργειας. Η ανάπτυξη τέτοιων στρατηγικών επενδυτικών σχεδίων, θα ενισχύσει το ενεργειακό ρόλο της Ελλάδας, θα προσφέρει σημαντικά άμεσα οφέλη στην εγχώρια οικονομία, ενώ θα δημιουργήσει και αναπτυξιακές προοπτικές και νέες θέσεις εργασίας στην περιφέρεια.

Ειδικότερα, η επίτευξη του ποσοστού συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή (40%) μέχρι το 2020, που βασίζεται στην αξιοποίηση του οικονομικού δυναμικού ανάπτυξης μεγάλων έργων ΑΠΕ, απαιτεί την ολοκλήρωση των αναγκαίων εργασιών επέκτασης και αναβάθμισης του ηλεκτρικού δικτύου που αφορά τη διασύνδεση των νησιών και την ενίσχυση του ηπειρωτικού δικτύου, καθώς και τη βελτίωση του θεσμικού και κανονιστικού πλαισίου λειτουργίας των μονάδων ΑΠΕ. Ήδη κατά την τελευταία διετία έχουν υλοποιηθεί πολλές και σημαντικές νομοθετικές παρεμβάσεις (N3851/2010 και N4001/2011) που αποσκοπούν σε αυτήν ακριβώς την αντιμετώπιση των εμποδίων και επιτάχυνση της αδειοδοτικής διαδικασίας των έργων ΑΠΕ, ενώ έχει προχωρήσει και ο προγραμματισμός για την ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η υλοποίηση του Εθνικού Σχεδίου για το 2020 θα έχει σαν αποτέλεσμα την δραστική αλλαγή του μείγματος στην παραγωγή της ενέργειας.

Αντίστοιχα, η επίτευξη του στόχου συμμετοχής ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη (20%) βασίζεται στην προώθηση τόσο συγκεκριμένων εργαλείων και μηχανισμών της αγοράς που αφορούν συστήματα και τεχνολογίες ΑΠΕ, όσο και στην διαμόρφωση του απαραίτητου κανονιστικού πλαισίου για τη χρήση αυτών των συστημάτων κυρίως στον κτιριακό τομέα. Ο στόχος συμμετοχής των ΑΠΕ στις μεταφορές (10%), αναμένεται κύρια να επιτευχθεί με τη μεγαλύτερη χρήση βιοκαυσίμων και τη σταδιακή αύξηση της ηλεκτροκίνησης συνολικά στον τομέα των μεταφορών και κυρίως στα μέσα σταθερής τροχιάς.

Ταυτόχρονα η θέσπιση εθνικού ενδεικτικού στόχου για εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι το 2016 (9% της μέσης κατανάλωσης της περιόδου 2001-2005) με τον N3855/2010, συμβάλλει προς τη μείωση της κατανάλωσης με τη θέσπιση και εφαρμογή μέτρων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης που περιλαμβάνονται στον νόμο αυτό.

Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για το 2020, για την επίτευξη των εθνικών στόχων, οδηγεί σε μείωση της έντασης πρωτογενούς ενέργειας κατά 20% και μείωση εκπομπών του ενεργειακού τομέα κατά 20% ως προς το 2005.

Με τον N3851/2010 και σε εφαρμογή της Οδηγίας 2009/28/EK η Ελλάδα έχει καθορίσει την συμμετοχή των ΑΠΕ μέχρι το 2020 σε 20% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας και 40% στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Η επίτευξη των στόχων αυτών προϋποθέτει τη συνδυαστική εφαρμογή θεσμικών, κανονιστικών, οικονομικών και τεχνολογικών μέτρων που αφορούν όλους τους τομείς παραγωγής και χρήσης ενέργειας.

ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

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 κύματα
- Ενέργεια από τους ωκεανούς

Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα

Η πιο απλή και διαδεδομένη μορφή των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων είναι οι γνωστοί σε όλους μας ηλιακοί θερμοσίφωνες, οι οποίοι απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια, τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό, όπως το νερό για παράδειγμα. Η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών, σκουρόχρωμων δηλαδή επιφανειών καλά προσανατολισμένων στον ήλιο, οι οποίες βρίσκονται σε επαφή με νερό και του μεταδίδουν μέρος της θερμότητας που παρέλαβαν. Το παραγόμενο ζεστό νερό χρησιμοποιείται για απλή οικιακή ή πιο σύνθετη βιομηχανική χρήση, τελευταία δε ακόμη και για τη θέρμανση και ψύξη χώρων μέσω κατάλληλων διατάξεων.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η συνολική εγκατεστημένη επιφάνεια συλλεκτών για θέρμανση νερού χρήσης είναι $11 \cdot 10^6 m^2$ και για τις πισίνες είναι $1,6 \cdot 10^6 m^2$. Το 80% είναι εγκατεστημένη στην Ελλάδα (264 m^2 ανά 1000 κατοίκους), στην Αυστρία (203 m^2 ανά 1000 κατοίκους) και στη Γερμανία (52 m^2 ανά 1000 κατοίκους). Ο μέσος όρος στην ΕΕ είναι 26 m^2 ανά 1000 κατοίκους. Στην Ελλάδα μέχρι το 2001 είχαν εγκατασταθεί $3 \cdot 10^6 m^2$ ηλιακών συλλεκτών, εξοικονομώντας 1 TWh_{th} και $1,2 \cdot 10^6$ τόνους διοξειδίου του άνθρακα.

Παθητικά Ηλιακά Συστήματα

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δομικά στοιχεία, κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα μεταξύ τους, ώστε να υποβοηθούν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τον φυσικό φωτισμό των κτιρίων ή για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας μέσα σε αυτά. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούν την αρχή της Βιοκλιματικής Αρχιτεκτονικής και μπορούν να εφαρμοσθούν σε όλους σχεδόν τους τύπους κτιρίων.

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

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 συστήματα στον παραγωγικό μηχανισμό. Πρόκειται για συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Διακρίνονται σε διασυνδεδεμένα και μη στο ηλεκτρικό δίκτυο και χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση καταναλώσεων. Δορυφόροι, φάροι, φωτιστικά δρόμων και οδικές σημάσεις, απομονωμένα σπίτια χρησιμοποιούν παραδοσιακά τα φωτοβολταϊκά συστήματα για την ηλεκτροδότηση τους.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

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 φ/β συστήματα).
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών, όσον αφορά την ισχύ. Απο μερικά Watt μέχρι μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μερικών MW.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Από την άλλη τα κύρια μειονεκτήματα είναι:

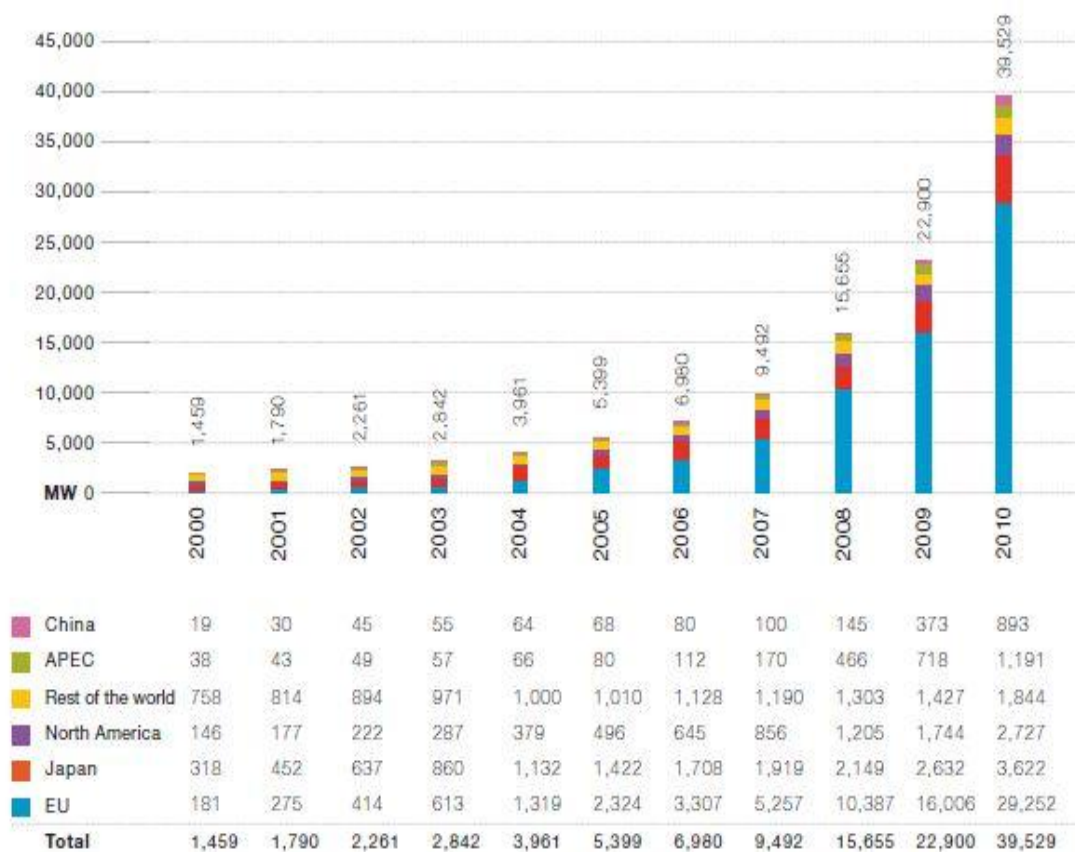
- Υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, το οποίο οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στο υψηλό κόστος κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων και πολύ λιγότερο στο κόστος της υπόλοιπης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός).
- Σε εφαρμογές που απαιτείται η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (αυτόνομα 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.
- Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, οι οποίες αποτελούν έναν απρόβλεπτο παράγοντα, επιτρέποντας μόνο εκτιμήσεις σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα (συνήθως ετήσια).

Εξέλιξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα & Στόχοι για το μέλλον

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται στοιχεία που αφορούν στην εξέλιξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια. Το 2003 στην Ελλάδα, η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ κάλυψε το 11,5% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρισμού και παράχθηκε κατά 9,71% από υδροηλεκτρικές μονάδες, κατά 1,55% από αιολική ενέργεια και κατά 0,23% από βιοαέριο.

Σύμφωνα με βασικά στοιχεία του ηλεκτρικού συστήματος (ΥΠ.ΑΝ, 2005), η κυριότερη πηγή καυσίμου στην Ελλάδα είναι ο εγχώριος λιγνίτης μικρής θερμογόνου δύναμης (70 εκατ. τόνοι) και ποσοστό που ανέρχεται σε 44,1%. Το πετρέλαιο κυρίως για την κίνηση ηλεκτροπαραγωγικών εγκαταστάσεων νησιωτικών συστημάτων μη συνδεδεμένων με την ηπειρωτική χώρα συμμετέχει με ποσοστό 13,5%. Το φυσικό αέριο προερχόμενο από εισαγωγές από τη Ρωσία και σε μορφή LNG (υγροποιημένο φυσικό αέριο) από την Αλγερία καλύπτει το 12,9%. Κατά το ίδιο έτος τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα αναμένεται να παράξουν το 9,1%. Τέλος, η αιολική ενέργεια, τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, η βιομάζα και τα φωτοβολταϊκά θα συγκεντρώσουν ποσοστό τάξης 3,1% ενώ οι εισαγωγές-εξαγωγές θα κληθούν να καλύψουν το υπόλοιπο 5,5%.

Η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ στην Ελλάδα (μη συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων υδροηλεκτρικών) παρουσιάζει σημαντική αύξηση μεταξύ των ετών 2005-07 (λόγω των μέτρων οικονομικής υποστήριξης) και αντιστοιχεί στο 3,3% της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αφορά κυρίως σε αιολικά και μικρά υδροηλεκτρικά, σε μικρό βαθμό τη βιομάζα ενώ ήδη γίνεται αισθητή και η συνεισφορά των φωτοβολταϊκών (ΚΑΠΕ, 2007).



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

Η εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (εξαιρουμένων των υδροηλεκτρικών σταθμών άνω των 10 MW) ήταν 878 MW στο τέλος του 2006 με σταθερά αυξανόμενη ανάπτυξη να έχουν τα αιολικά, τα μικρά υδροηλεκτρικά και η βιομάζα. Ειδικότερα, από 1 μόλις MW συνολικής ισχύος των αιολικών πάρκων το 1990, στο τέλος του 2006, λειτουργούσαν αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 745 MW. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έφθασαν τα 108 MW στο τέλος του 2006 από τα 43 MW της ΔΕΗ το 1997. Τέλος, οι εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής μονάδων επεξεργασίας από βιοαέριο ΧΥΤΑ και συμπαραγωγής από βιοαέριο αποβλήτων (στα Λιόσια και την Ψυτάλλεια) έχουν ηλεκτρική ισχύ 14 και 10 MW αντίστοιχα. Επίσης, η εισαγωγή και διάθεση της βιοαιθανόλης (είδος βιοκαυσίμου, υποκατάστατο της βενζίνης) στην ελληνική αγορά καυσίμων δεν αναμένεται να ξεκινήσει πριν τις αρχές του 2010 αν και από το 2006 έχει ξεκινήσει η παραγωγή βιοκαυσίμων (ΚΑΠΕ, 2007).

Οι εκτιμήσεις για την ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα κατά το έτος 2010, την προσδιορίζουν σε ύψος 68 TWh. Κατά συνέπεια υφίσταται ανάγκη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων υδροηλεκτρικών) της τάξης των 13,7 TWh κατά το 2010. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συμβολή των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων δεν θα μπορεί να υπερβεί το 6,7% της κατανάλωσης του 2010 (~68 TWh), έπεται ότι ποσοστό 13,4% θα πρέπει να προέρχεται από ΑΠΕ προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του 20,1% για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (ΥΠ.ΑΝ, 2005). Τελικά, η ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα για το έτος 2010 διαμορφώνεται ως εξής, όπως φαίνεται και από τον πίνακα.

Τεχνολογία ΑΠΕ	Εγκατεστημένη Ισχύς το 2010 σε MW	Παραγωγή ενέργειας τον Ιαν.2010 σε MWh
Αιολικά Πάρκα	923	231,08
Μικρά Υδροηλεκτρικά (<15MW)	183	1.09
Βιομάζα	41	15.70
Ηλιοθερμικά (ΣΗΘΥΑ)	41	15.52
Φωτοβολταικά	54	4251,47
ΣΥΝΟΛΟ	1342	4594,76

Πίνακας 1.1 : Παραγωγή ενέργειας μονάδων ΑΠΕ διασυνδεδεμένου συστήματος (ΔΕΣΜΗΕ,2010)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Ο Ήλιος

Ο ήλιος αποτελεί την μοναδική πηγή ενέργειας που επηρεάζει τη δυναμική της ατμόσφαιρας και το κλίμα της γης. Ο ήλιος είναι μια αέρια μάζα που αποτελείται βασικά από υδρογόνο. Η θερμοκρασία του είναι μεταξύ $15 \cdot 10^6 - 40 \cdot 10^6 K$ και αποτελείται από αέρια με πυκνότητα μεταξύ $100 - 150 \text{ g/cm}^3$. Αν και ο ήλιος δεν έχει σταθερό μέγεθος, πρακτικά θεωρούμε τη διάμετρό του ίση με $1.391.960 \text{ km}$. Εκπέμπει ακτινοβολία ισχύος $3,72 \cdot 10^{23} \text{ kW}$. Το 90% της ακτινοβολούμενης ενέργειας παράγεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις (βασικά σύντηξη υδρογόνου σε ήλιο).

Ο ήλιος βρίσκεται σε μηχανική ισορροπία από το ίδιο το βάρος του. Το βάρος των αερίων πάνω από κάθε στρώμα βαστάζεται από την πίεση των αερίων και της ακτινοβολίας πάνω στο στρώμα αυτό. Για να διατηρηθεί ισορροπία μεταξύ βάρους και πίεσης, το ποσό της ενέργειας που απελευθερώνεται στο κέντρο του ήλιου και μεταδίδεται στην επιφάνεια είναι ίσο με το ποσό της ενέργειας που ακτινοβολεί.

Η επιφάνεια του ήλιου ονομάζεται φωτόσφαιρα και είναι η πηγή της περισσότερης ορατής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης. Μετά από τη φωτόσφαιρα υπάρχουν διάφορα ακόμη στρώματα που αποτελούνται από διάφορα αέρια σε υψηλές θερμοκρασίες.

2.2 Η θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η ηλεκτρομαγνητική (ΗΜ) ακτινοβολία, αποτελεί διαδεδομένη διαταραχή συνδυασμένου ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Η ταχύτητα διάδοσης του ΗΜ κύματος στον κενό χώρο, προσεγγίζει τα 300.000 km/s . Εκπέμπεται από τους δομικούς λίθους της ύλης (άτομα, μόρια και ιόντα) και η εκπομπή της σχετίζεται με:

A) τη θερμοκρασία των σωμάτων (θερμική ακτινοβολία)

B) τις ηλεκτρονικές αποδιεγέρσεις διεγερμένων δομικών λίθων, που προκαλούνται από άλλη αιτία, εκτός της θερμοκρασίας (π.χ. κατά τις κρούσεις επιταχυνόμενων ιόντων ή ηλεκτρονίων με ιόντα ή μόρια του σώματος, με τη δράση μακροσκοπικού ηλεκτρικού πεδίου είτε μετά από απορρόφηση ΗΜ ακτινοβολίας από τους δομικούς λίθους).

A. Θερμική ακτινοβολία – Θεωρία του μέλανος σώματος

Η ακτινοβολούμενη, από ένα σώμα, εξαιτίας της θερμοκρασίας του, πυκνότητα ισχύος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ανά μονάδα μήκους κύματος $E_{\lambda T}$ (μετρούμενη π.χ. σε $W/m^2 \times nm$), είναι συνάρτηση του μήκους κύματος λ , της θερμοκρασίας του σώματος T και της φύσης του σώματος που ακτινοβολεί. Η συνάρτηση αυτή περιγράφεται με ένα συντελεστή: την ικανότητα εκπομπής ως ιδιότητα του υλικού και το είδος της

επιφάνειας του σώματος. Ο συντελεστής αυτός δηλαδή εξαρτάται από το υλικό, τη θερμοκρασία του καθώς και από την κατεύθυνση εκπομπής της ακτινοβολίας σε σχέση με την κάθετη ακτινοβολία στην επιφάνεια του σώματος.

Το συνδυαστικό κρίκο μεταξύ των δυο εκφράσεων, πρόσθεσε ο Max Planck εισάγοντας την επαναστατική για την εποχή του έννοια της εκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας κατά ποσά (quanta και αντίστοιχα θεωρία των quanta), χωρίς μάλιστα εξαρχής να συνειδητοποιήσει το μέγεθος της προσφοράς του στην επιστήμη.

Το μοντέλο που χρησιμοποίησε βασίζεται στην θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών ταλαντωτών που αντιπροσωπεύουν τις ταλαντώσεις των δομικών λίθων (άτομα, μόρια, ιόντα), των τοιχωμάτων μιας κοιλότητας του σώματος και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τους στο χώρο της κοιλότητας. Η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας συνδέεται άμεσα με ταλαντευόμενα ηλεκτρικά φορτία. Ισοδύναμα αναφερόμαστε στην ταλάντωση της ηλεκτρικής διπολικής ροπής τους.

Αν η κοιλότητα επικοινωνεί προς τα έξω με λεπτό αυλό, η εξερχόμενη, από την οπή ακτινοβολία, σε στενή περιοχή μήκων κύματος, έχει ένταση που καθορίζεται από το μήκος κύματος και την θερμοκρασία T , της κοιλότητας. Αντίστροφα, κάθε ακτίνα προερχόμενη από άλλο σώμα, εισερχόμενη δια του αυλού, στο χώρο της κοιλότητας, απορροφάται από τους ΗΜ ταλαντωτές, που διεγείρονται σε ανώτερες ενεργειακές στάθμες. Δηλαδή η οπή της κοιλότητας λειτουργεί ως παγίδα για την προσπίπτουσα ΗΜ ακτινοβολία και ταυτόχρονα εκπέμπει ιδανικά, ΗΜ ακτινοβολία, που οφείλεται στην θερμική κατάσταση των δομικών του λίθων. Το ιδανικό, ή πρότυπο αυτό σώμα ονομάστηκε **μέλαν (μαύρο) σώμα**.

Το **μέλαν σώμα** έχει την ιδιότητα να εκπέμπει ακτινοβολία με ορισμένη φασματική κατανομή, χαρακτηριστική της θερμοκρασίας του. Απορροφά πλήρως κάθε ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω του, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος λ και τη θερμοκρασία του ή τη θερμοκρασία του σώματος που την εκπέμπει.

Ο Planck υπέθεσε ότι η ενέργεια των ταλαντωτών χαρακτηρίζεται από κβάντωση, δηλαδή στάθμες ενέργειας, έτσι ώστε κάθε ενεργειακή μετάβαση μεταξύ διαδοχικών ενεργειακών σταθμών να σχετίζεται με απορρόφηση, δηλαδή διέγερση από τον ταλαντωτή ή εκπομπή δηλαδή αποδιέγερση ενέργειας.

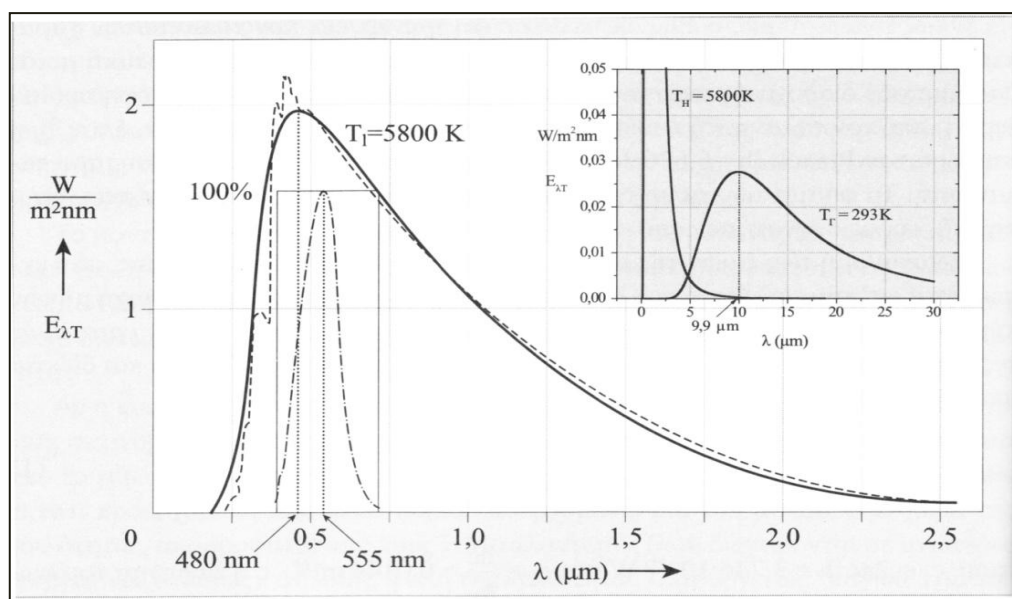
Η κατανομή των τιμών της πυκνότητας ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από την επιφάνεια του μέλανος σώματος, ανά μοναδιαία περιοχή μηκών κύματος, σε κάθε μήκος κύματος λ , αποτελεί τη συνάρτηση φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος $E_{\lambda T}$ ($W/m^2 \cdot nm$). Υπολογίστηκε από τον Planck και δίδεται από τη σχέση:

$$E_{\lambda T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (2.1)$$

όπου $c_1 = 3.746 \times 10^{-16} Wm^2$, $c_2 = 0.0144 mK$.

Στο σχήμα 2.1 αποδίδεται η γραφική παράσταση της φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος $E_{\lambda T}$, που αντιστοιχεί στο φως του ήλιου μας (εστιγμένη καμπύλη), καθώς και η συνεχής καμπύλη του μέλανος σώματος που προσαρμόζεται κατά τον καλύτερο τρόπο στην πειραματική καμπύλη. Η θερμοκρασία μέλανος σώματος, που αντιστοιχεί στη καμπύλη αυτή είναι $T \approx 5800K$ και παρουσιάζει μέγιστο στο $\lambda = 480nm$.

Η απόσταση του μέλανος σώματος από τον ήλιο στο συγκεκριμένο σχήμα είναι $1,5 \times 10^8 Km$ και θεωρείται ως σημειακή πηγή ακτινοβολίας. Στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάστηκε η καμπύλη ευαισθησίας του οφθαλμού του ανθρώπου (διακεκομμένη – εστιγμένη), η οποία εμφανίζει μέγιστο στο $\lambda = 555nm$. Στο ένθετο διάγραμμα, πάνω-δεξιά, δείχνονται δυο καμπύλες φασματικής κατανομής της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας μέλανος σώματος, η μια για την ακτινοβολία της γης (σώμα θερμοκρασίας $20^\circ C$, και η άλλη της ηλιακής ακτινοβολίας, στα όρια της ατμόσφαιρας, με κατάλληλη επιλογή της μονάδας στον άξονα της φασματικής πυκνότητας ισχύος, για λόγους ευκρίνειας της γραφικής παράστασης.



Σχήμα 2.1 Φασματική κατανομή της πυκνότητας ισχύος του ήλιου

Το μοντέλο του μέλανος σώματος αποτελεί την περιγραφή της ιδανικής συμπεριφοράς της ύλης, κατά την εκπομπή και απορρόφηση της ΗΜ ακτινοβολίας. Ο στόχος βέβαια είναι η περιγραφή της συμπεριφοράς των πραγματικών σωμάτων. Κάθε πραγματικό σώμα συμπεριφέρεται με τρόπο που προσεγγίζει περισσότερο ή λιγότερο τη συμπεριφορά του μέλανος σώματος. Ποσοτικά, αυτό εκφράζεται με ένα συντελεστή, την ικανότητα εκπομπής (emittance), $E_{\lambda T}$, ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της εκπεμπόμενης ενέργειας από το πραγματικό σώμα μέσα σε στενή περιοχή μηκών κύματος, προς την εκπεμπόμενη, στην ίδια περιοχή μηκών κύματος, από το μέλαν σώμα, ίδιας θερμοκρασίας. Παίρνει τιμές από 0, όπου έχουμε τέλεια ανακλαστική επιφάνεια ή τέλει ανακλαστήρα, μέχρι 1, όπου έχουμε τον τέλει απορροφητή ή μέλαν σώμα. Οι τιμές αυτές

εξαρτώνται από το υλικό, τη θερμοκρασία του σώματος, από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και την κατεύθυνση παρατήρησης της επιφάνειας. Οι τιμές του για κάθε υλικό, μήκος κύματος και θερμοκρασία, υπολογίζονται και καταχωρούνται σε πίνακες δεδομένων, π.χ. στα βιβλία δεδομένων.

Συνεπώς, με γνωστή την τιμή της ικανότητας εκπομπής $E_{\lambda T}$ ενός σώματος, η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας από την επιφάνεια του σώματος $E_{\lambda T, \sigma}$ δίδεται από τη σχέση:

$$E_{\lambda T, \sigma} = \epsilon_{\lambda T} \times E_{\lambda T} \quad (2.2)$$

όπου $E_{\lambda T}$ είναι η πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας του μέλανος σώματος θερμοκρασίας T , ίδιας με αυτή του πραγματικού.

Αποδείχθηκε από τον Gustav R. Kirchhoff (1824 – 1887) ότι η ικανότητα εκπομπής $E_{\lambda T}$ ενός σώματος ισούται με την αντίστοιχη απορροφητικότητα του, $\alpha_{\lambda T}$. Δηλαδή

$$E_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} \quad \text{Νόμος θερμικής ακτινοβολίας του Kirchhoff}$$

Σύμφωνα με το νόμο αυτό, κάθε σώμα εκπέμπει εκείνα τα μήκη κύματος θερμικής ακτινοβολίας, τα οποία στην ίδια θερμοκρασία μπορεί να απορροφήσει. Ισοδύναμα, αν ένα σώμα θερμοκρασίας T δεν απορροφά μια περιοχή μήκων κύματος της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας, δηλαδή στην περιοχή αυτή ισχύει $\alpha_{\lambda T} \approx 0$ τότε το σώμα αυτό ευρισκόμενο στην ίδια θερμοκρασία, έχει $\epsilon_{\lambda T} \approx 0$. Το μέλαν σώμα χαρακτηρίζεται από $\epsilon_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T} = 1$, σε όλα τα μήκη κύματος.

Στο σχήμα 2.1, δίδεται η γραφική παράσταση της φασματικής πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη γη, στα όρια της ατμόσφαιρας (εστιγμένη καμπύλη). Οι απορροφήσεις που διακρίνονται στο αριστερό τμήμα της, προέρχονται από την απορρόφηση που υφίσταται η ηλιακή ακτινοβολία των εσωτερικών στρωμάτων, καθώς αυτή διαπερνά τα ανώτερα, χαμηλής θερμοκρασίας στρώματα (απορροφήσεις των στοιχείων Fe, Ca, Mg κ.α.). Δίδεται επίσης η γραφική παράσταση της φασματικής έντασης της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος, που προσαρμόζεται κατά τον καλύτερο τρόπο στην πειραματική καμπύλη. Διαπιστώνεται ότι η καμπύλη Planck, με την καλύτερη προσαρμογή, αντιστοιχεί σε $T = 5800 \text{ K}$, η οποία ονομάζεται ενεργός θερμοκρασία του εκπεμπόμενου σώματος.

Η πειραματική καμπύλη της φασματικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας δεν μπορεί να περιγραφεί με μια συγκεκριμένη καμπύλη Planck, επειδή η ακτινοβολία αυτή δεν προέρχεται από σώμα σε θερμοδυναμική ισορροπία. Το ηλιακό φως προέρχεται από διάφορα στρώματα της ηλιακής σφαίρας, διαφορετικών θερμοκρασιών. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται η καμπύλη ευαισθησίας του ανθρώπινου οφθαλμού, που είναι το ορατό φάσμα από περίπου 360nm έως 750nm, με μέγιστο ευαισθησίας στα 555nm.

B. Ακτινοβολία διέγερσης

Η ακτινοβολία αυτή προέρχεται από τις αποδιεγέρσεις των ηλεκτρονικών καταστάσεων των ατόμων της ύλης και όχι λόγω της θερμοκρασίας του σώματος.

Διεγείρουσα αιτία είναι είτε άλλη ακτινοβολία, που προσπίπτει στο σώμα και απορροφάται από τους δομικούς λίθους της ύλης, είτε κρούσεις μεταξύ τους, κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου σε ιονισμένη ύλη. Η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται με αυτό τον τρόπο, εξαρτάται από το ποσοστό των διεγερμένων ατόμων, κατά την συγκεκριμένη ενεργειακή μετάβαση, από την αρχική στην τελική ενέργεια. Ο τρόπος αυτός εκπομπής ακτινοβολίας δεν σχετίζεται με τη θερμοκρασία του σώματος.

Τέτοια ακτινοβολία εκπέμπουν οι πηγές, των οποίων η λειτουργία οφείλεται στην ηλεκτρική εκκένωση που προκαλείται στο αέριο που περιέχουν, όπως είναι οι λάμπες των ατμών νατρίου, υδραργύρου, φθορισμού κ.α.

2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία των σωμάτων, που οφείλεται στη θερμοκρασία τους, περιγράφεται ποσοτικά, με χρήση χαρακτηριστικών μεγεθών, που αφορούν την ίδια και την πηγή της ακτινοβολίας. Αντίστοιχα μεγέθη χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της φωτεινής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε δεδομένη επιφάνεια, όπου χρησιμοποιείται ο όρος φωτομετρία.

Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, χρησιμοποιούνται κατά αποκλειστικότητα τα γενικά μεγέθη ακτινοβολίας τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

α. Ισχύς ή ροή ακτινοβολίας, P (Radiant Power ή Radiant Flux)

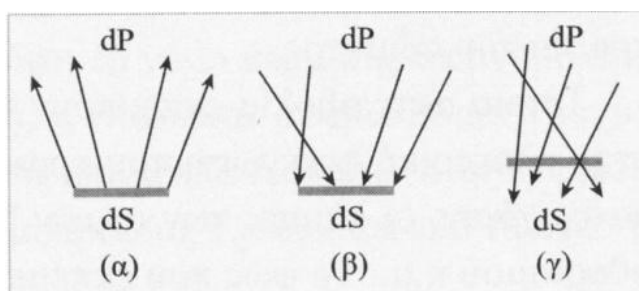
Ορίζεται ως το πηλίκο της ακτινοβολούμενης, σε χρόνο ενέργειας dU , μέσα σε στερεά γωνία $d\Omega$. Δηλαδή

$$P = \frac{dU}{dt} \quad (2.3)$$

Η μονάδα μέτρησης της ισχύος της ακτινοβολίας, στο SI, είναι το 1W. Χρησιμοποιείται επίσης το γράμμα Φ , για την ισχύ της ΗΜ ακτινοβολίας.

β. Πυκνότητα ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας, E (Radiant Exitance, Irradiance)

Η πυκνότητα ισχύος αφορά την ισχύ της ΗΜ ακτινοβολίας σε όλα τα μήκη κύματος, ανά μονάδα επιφάνειας, από την οποία εκπέμπεται (σχήμα 2.2α), ή προς την οποία προσπίπτει ή διαπερνά (σχήμα 2.2β) και από διάφορες κατευθύνσεις (σχήμα 2.2γ).



Σχήμα 2.2 Κατευθύνσεις ακτινοβολίας

Προσδιορίζεται από την σχέση

$$E = \frac{dP}{dS} \quad (2.4)$$

όπου dS είναι η στοιχειώδης επιφάνεια, μέσα από την οποία διέρχεται ή πάνω στην οποία προσπίπτει ή από την οποία εκπέμπεται, η στοιχειώδης ισχύς ακτινοβολίας dP . Η μονάδα μέτρησής της, στο SI, είναι το 1W/m^2 .

γ. Ένταση ακτινοβολίας, J

Ως ένταση ακτινοβολίας ονομάζουμε την ισχύ που διαπερνά κάθετα την μονάδα επιφάνειας, τοποθετημένη στη θέση προσδιορισμού και δίνεται από τη σχέση:

$$J = \frac{dP}{dS^\perp} \quad (2.5)$$

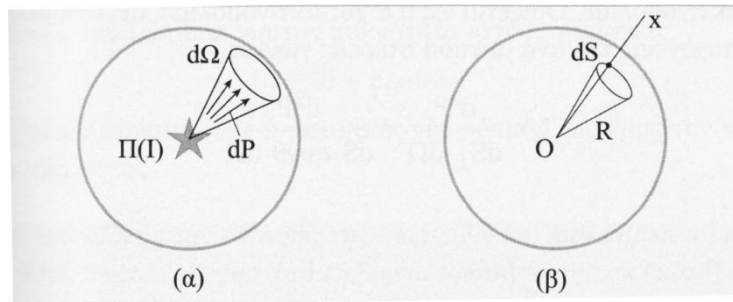
όπου dP , η στοιχειώδης ισχύς ακτινοβολίας, η οποία διαπερνά κάθετα τη στοιχειώδη επιφάνεια dS^\perp . Μονάδα της έντασης της ακτινοβολίας στο SI είναι το 1W/m^2 .

δ. Γωνιακή κατανομή ροής ή ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας, I (Radiant Intensity)

Καθορίζει το ποσό της ροής ακτινοβολίας, dP , ανά μονάδα στερεάς γωνίας $d\Omega$ και υπολογίζεται από τη σχέση (σχήμα 2.3):

$$I = \frac{dP}{d\Omega} \quad (2.6)$$

Η μονάδα μέτρησης της στο SI είναι το 1W/sr.



Σχήμα 2.3: (α) Ορισμός της φωτοβολίας I , της πηγής Π , προς ορισμένη κατεύθυνση (β) Ορισμός της στερεάς γωνίας.

Ορισμός στερεάς γωνίας Ω : Μια στοιχειώδης στερεά γωνία $d\Omega$, με κορυφή O (σχήμα 2.3β), προσδιορίζεται ως εξής: Έστω μια σφαίρα με κέντρο το O και ακτίνα R . Θεωρείστε τις άπειρες ημιευθείες Ox , οι οποίες ξεκινώντας από το κέντρο O , αποκόπτονται από την σφαιρική επιφάνεια ένα τμήμα στοιχειώδους εμβαδού dS . Η αντίστοιχη στερεά γωνία $d\Omega$ ορίζεται από το πηλίκο

$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} \quad (2.7)$$

Η μονάδα της στερεάς γωνίας είναι το 1sr (1 στερακτίνο).

ε. Γωνιακή αφετική ικανότητα, L (Radiance)

Το μέγεθος αυτό αφορά είτε στην εκπομπή ακτινοβολίας από επιφάνεια είτε στη διάδοση της ακτινοβολίας από επιφάνεια και ιδιαίτερα αναφέρεται σε εκτεταμένες πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ορίζεται ως η ισχύ της ακτινοβολίας, dP , ανά μονάδα φαινομένης επιφάνειας και ανά μονάδα στερεάς γωνίας,

$$L = \frac{d^2P}{dS_{\perp} \cdot d\Omega} = \frac{d^2P}{dS \cdot \cos\theta \cdot d\Omega} \quad (2.8)$$

όπου dS_{\perp} (φαινομένη επιφάνεια), η προβολή της στοιχειώδους επιφάνειας της πηγής dS , σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση παρατήρησης ή μέτρησης της διαδιδόμενης ροής

και θ η γωνία της κατεύθυνσης παρατήρησης και της καθέτου στην επιφάνεια της πηγής (σχήμα 2.4). Η μονάδα μέτρησης στο SI, είναι το $1\text{W/m}^2\cdot\text{sr}$

Νόμος Lambert

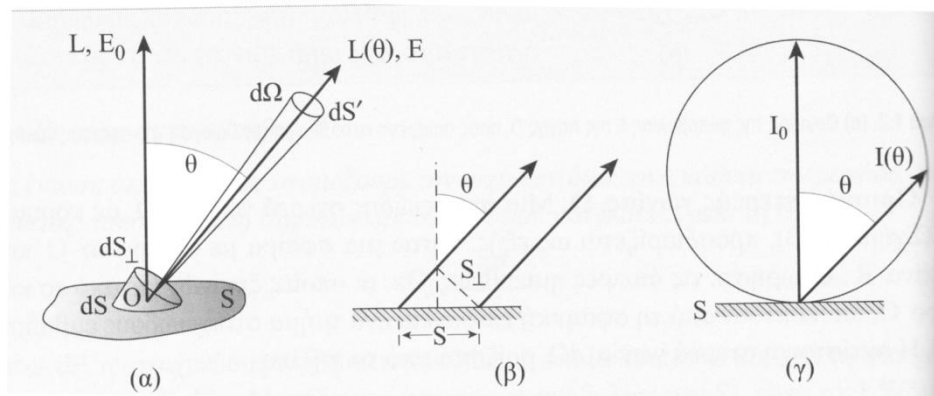
Σε πολλές περιπτώσεις εκπομπής ακτινοβολίας από εκτεταμένες επιφάνειες η γωνιακή αφετική ικανότητα L , εμφανίζεται ανεξάρτητη της γωνίας Θ , της κατεύθυνσης παρατήρησης, σε σχέση με την κάθετη ευθεία στην ακτινοβολούσα επιφάνεια (σχήμα 2.4β). Δηλαδή

$$L(\theta) = L \quad (2.9)$$

Αυτή η χαρακτηριστική συμπεριφορά μερικών πηγών αναφέρεται ως ο νόμος του Lambert. Όσον αφορά στην πυκνότητα ισχύος E την οποία εκπέμπει μια πηγή, που ικανοποιεί το νόμο του Lambert, αυτή ακολουθεί μεταβολή συνημίτονου. Δηλαδή ο νόμος του Lambert για την πυκνότητα ισχύος γράφεται:

$$E = E_0 \cdot \cos \theta \quad (2.10)$$

όπου θ είναι η γωνία πρόσπτωσης ή εκπομπής της δέσμης, ως προς την κάθετη στην επιφάνεια της πηγής.



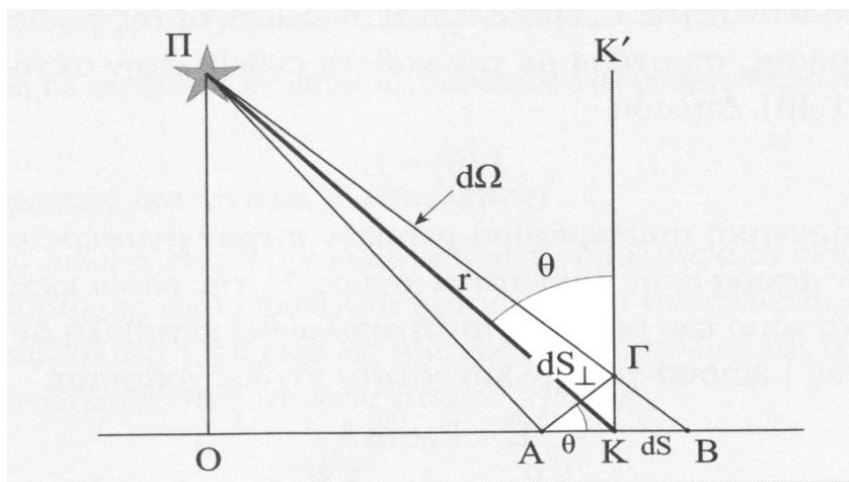
Σχήμα 2.4 (α) Η στοιχειώδης ροή που εκπέμπεται από τη στοιχειώδη επιφάνεια μέσα από τη στοιχειώδη στερεά γωνία $d\Omega$ είναι dP **(β)** Νόμος Lambert **(γ)** Πολικό διάγραμμα κατανομής της φωτοβολίας φωτεινής πηγής εμβαδού S .

στ) Νόμος μεταβολής της έντασης της ακτινοβολίας από σημειακή πηγή. Εξάρτηση της πυκνότητας ισχύος από τη γωνία πρόσπτωσης σε επιφάνεια.

Ας θεωρήσουμε μια πηγή ακτινοβολίας Π η οποία ακτινοβολεί με ισχύ P ισότροπα προς όλες τις κατευθύνσεις. Θέλουμε να εξάγουμε σχέση αναλυτικής έκφρασης της εξάρτησης της πυκνότητας ισχύος $E(r, \theta)$ από την απόσταση r , του σημείου μέτρησης από την πηγή, καθώς επίσης και τη επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης θ των ακτινών σε δεδομένη επιφάνεια. Η $E(r, \theta)$ ισούται με το πηλίκο της ροής dP που περιέχεται σε στερεά γωνία $d\Omega$, δια της επιφάνειας dS πάνω στην οποία προσπίπτει (ίχνος AB , σχήμα 2.5). Η στερεά γωνία $d\Omega$, υπολογίζεται σύμφωνα με τον ορισμό της

$$d\Omega = \frac{dS_{\perp}}{r^2} = \frac{dS \cdot \cos \theta}{r^2} \quad (2.11)$$

όπου dS_{\perp} είναι το εμβαδόν της στοιχειώδους επιφάνειας, κάθετης στη διεύθυνση ΠK , των ακτινών και η οποία αποτελεί προβολή της dS σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση αυτή (στο σχήμα δείχνεται με το ίχνος $A\Gamma$).



Σχήμα 2.5. Νόμος ελάττωσης της πυκνότητας ισχύος σε επίπεδη επιφάνεια. Μέσα από τις επιφάνειες dS και dS_{\perp} περνά η ίδια στοιχειώδης ροή ακτινοβολίας dP που δίνει ως αποτέλεσμα τη σχέση Lambert

Για την πυκνότητα ισχύος πάνω στην επιφάνεια προκύπτει

$$1) \text{ Εξάρτηση από τη γωνία πρόσπτωσης: } E(r, \theta) = \frac{dP}{dS} = \frac{dP}{dS_{\perp}} \cdot \frac{dS_{\perp}}{dS} \leftrightarrow$$

$$E(r, \theta) = E(r, 0) \cdot \cos\theta \quad (\text{Νόμος Lambert}) \quad (2.12)$$

2) Εξάρτηση από την απόσταση: $E(r, 0) = \frac{dP}{dS^\perp} = \frac{dP}{d\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{dS^\perp} = I \cdot \frac{dS^\perp}{r^2} \cdot \frac{1}{dS^\perp} \leftrightarrow$

$$E(r, 0) = \frac{I}{r^2} \quad (2.13)$$

3) Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.12) και (2.13), προκύπτει η γενικότερη σχέση:

$$E(r, \theta) = \frac{I \cdot \cos\theta}{r^2} \quad (2.14)$$

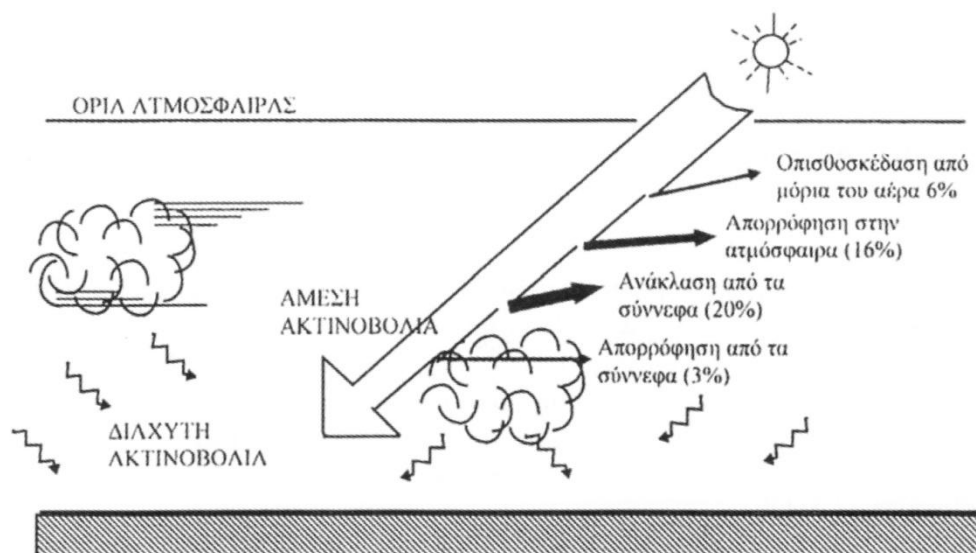
Η σχέση (3) δίνει την αναλυτική εξάρτηση της πυκνότητας ισχύος σε σημείο που απέχει απόσταση r , από την σημειακή πηγή φωτοβολίας I και από τη γωνία θ , με την οποία προσπίπτουν οι ακτίνες στην επιφάνεια (Νόμος ελάττωσης της πυκνότητας ισχύος με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή και εξάρτησης από τη γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια).

2.4 Η ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται με την ηλιακή ακτινοβολία από τον ήλιο ο οποίος βρίσκεται σε μια μέση απόσταση από τη Γη $r_0 = 149,6 \times 10^6 km$ (το μήκος αυτό ορίζεται ως μια αστρονομική μονάδα - AU).

2.4.1. Άμεση, διάχυτη και ολική ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης χωρίζεται στην **άμεση** και **διάχυτη** ακτινοβολία (σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6. Η πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα από την ατμόσφαιρα.

Άμεση ακτινοβολία (G_b ή I_b ή H_b) ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης με ελάχιστη ή χωρίς σκέδαση στην ατμόσφαιρα. (Ο δείκτης b = beam αναφέρεται στην άμεση ακτινοβολία).

Η άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια εξαρτάται από:

- την απορρόφηση και διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα
- το ύψος του ήλιου
- το γεωγραφικό πλάτος του τόπου
- το υψόμετρο του τόπου
- την κλίση της επιφάνειας
- την απόσταση ήλιου – γης
- την απόκλιση του ήλιου.

Διάχυτη ακτινοβολία (G_d ή I_d ή H_d) ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνση της από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα, και από ανάκλαση στην επιφάνεια της γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ύψος του ήλιου, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια (δηλαδή το συντελεστή ανάκλασης της επιφάνειας) του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, των σωματιδίων και των αερίων στην ατμόσφαιρα. (Η διάχυτη ακτινοβολία προσδιορίζεται με τον δείκτη d = diffuse).

Ολική ακτινοβολία (G ή I ή H) ορίζουμε το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της Γης. Για μια οριζόντια επιφάνεια ισχύει, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας ωριαίες τιμές της άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας:

$$I = I_b + I_d \quad (2.15)$$

2.4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

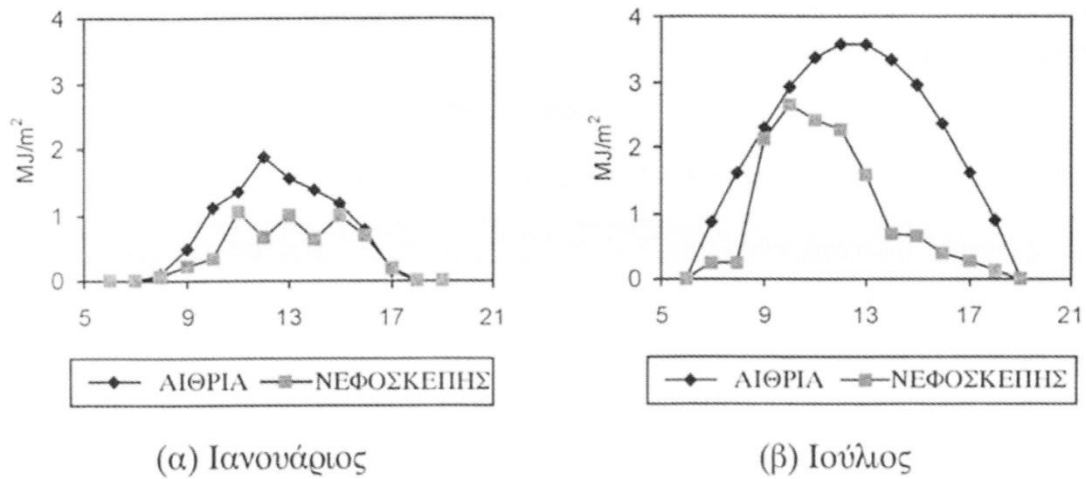
A) Νεφώσεις και αέριες μάζες

Μέχρι την είσοδό της στην ατμόσφαιρα, οι απώλειες της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ελάχιστες. Με την είσοδό της όμως στην ατμόσφαιρα, σημειώνονται σημαντικές απώλειες στην έντασή της. Ανάλογα με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και την παρουσία νεφών, οι απώλειες αυτές μπορεί να είναι σημαντικές, σε σημείο που η άμεση ηλιακή ακτινοβολία να μηδενιστεί. Η **νέφωση** προκαλεί τις μεγαλύτερες απώλειες, αντανακλώνοντας και απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία.

Με πλήρη νέφωση, δεν υπάρχει άμεση ακτινοβολία αλλά μόνο διάχυτη, η οποία είναι ίση με την ολική ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης. Όταν δεν υπάρχουν νέφη (καθαρός ουρανός) η διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλείται από τα μόρια του αέρα και τα άλλα σωματίδια ή αέρια που περιέχονται στην ατμόσφαιρα, και συνεπώς υπάρχει πάντα ένα ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας που συνεισφέρει στο σύνολο. Όταν η ατμόσφαιρα είναι καθαρή, η ηλιακή ακτινοβολία φθάνει τα υψηλότερα δυνατά επίπεδα, η άμεση ακτινοβολία αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής ακτινοβολίας, αλλά πάντα κατά την διάρκεια της ημέρας υπάρχει ένα ποσοστό διάχυτης ακτινοβολίας.

Η **αέρια μάζα** της ατμόσφαιρας, επίσης, την οποία πρέπει να διατρέξει η ηλιακή ακτινοβολία κατά την πορεία της μέσα από την ατμόσφαιρα είναι μια βασική παράμετρος που καθορίζει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της ατμόσφαιρας διαμέσου της οποίας πρέπει να περάσει η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες λόγω της εξασθένισης της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν ο ήλιος είναι χαμηλά στον ορίζοντα, το πάχος της ατμόσφαιρας είναι μεγαλύτερο, συνεπώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης είναι μικρότερη. Για τους ίδιους λόγους τις πρωινές ώρες με την ανατολή του ήλιου και τις απογευματινές ώρες πριν τη δύση του ήλιου, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρότερη.

Παρακάτω (σχήμα 2.7) παρουσιάζονται μετρήσεις σε διαγράμματα της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας [MJ/m^2] σε οριζόντιο επίπεδο στην Αθήνα (στοιχεία από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών) για μια αίθρια και μια νεφοσκεπή ημέρα τον Ιανουάριο και τον Ιούλιο. Συγκρίνοντας τις ημέρες με τις ίδιες καιρικές συνθήκες, είναι φανερή η διαφοροποίηση στα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας.



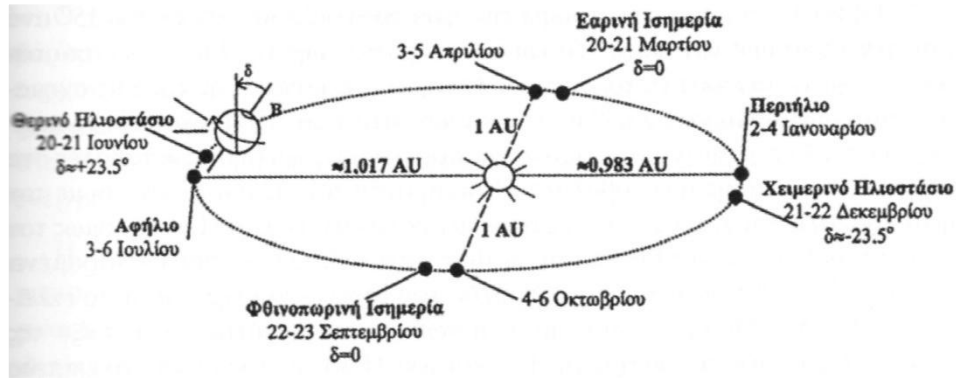
Σχήμα 2.7. Ωριαίες μετρήσεις ολικής ηλιακής ενέργειας κατά την διάρκεια τυπικών ημερών τον μήνα Ιανουάριο και Ιούλιο σύμφωνα με στοιχεία του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διακύμανση της ακτινοβολίας με νεφοσκεπή ουρανό για την περίπτωση του Ιουλίου. Τις πρώτες ώρες της ημέρας τα επίπεδα νέφωσης διατήρησαν τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια σε χαμηλά επίπεδα, ενώ στη συνέχεια παρουσιάστηκε μια απότομη αύξηση λόγω του περιορισμού της νέφωσης (ανοίγματα στη νέφωση για δύο ώρες). Από το μεσημέρι και μετά η επανεμφάνιση της υψηλής νέφωσης, προκάλεσε την δραστική μείωση των τιμών σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές της αίθριας ημέρας.

B) Απόσταση ήλιου - Γης

Με την μεταβολή της θέσης του ήλιου επηρεάζεται η πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα.

Η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται με την ηλιακή ακτινοβολία από τον ήλιο ο οποίος βρίσκεται σε μια μέση απόσταση από τη Γη $r_0 = 149,6 \times 10^6 km$ (το μήκος αυτό ορίζεται ως μια αστρονομική μονάδα - AU). Η Γη κινείται γύρω από τον ήλιο ακολουθώντας μια ελλειπτική τροχιά με μικρή εκκεντρότητα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Η πιο κοντινή απόσταση της Γης από τον ήλιο (Περιήλιο) είναι στις αρχές Ιανουαρίου (απόσταση $d \approx 0.983 \cdot AU$) και η πιο μακρινή απόστασή της από τον ήλιο (Αφήλιο) στις αρχές Ιουλίου (απόσταση $d \approx 1.017 \cdot AU$).



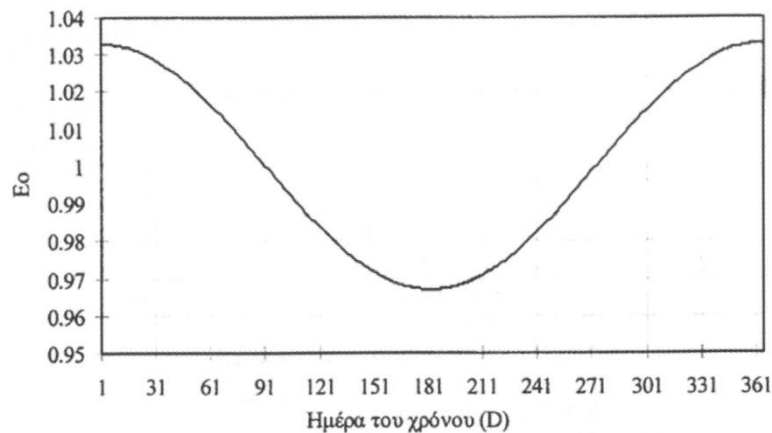
Σχήμα 2.8. Η τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο. Οι τιμές αλλάζουν από χρονιά σε χρονιά

Η ετήσια μεταβολή της απόστασης Ήλιου – Γης, λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο είναι $\pm 1,7\%$ και επαναλαμβάνεται με μικρές αλλαγές από χρόνο σε χρόνο. Η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη είναι περίπου $\pm 3,4\%$.

Η απόσταση Ήλιου – Γης μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(360 \cdot \frac{D}{365}\right) \quad (2.16)$$

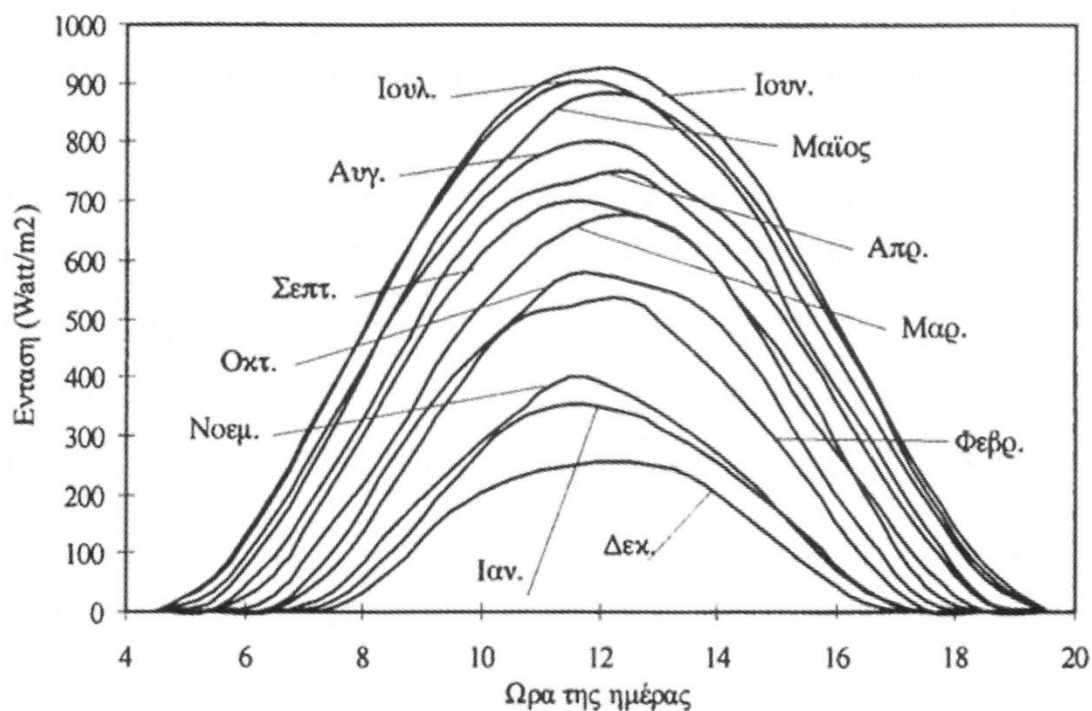
όπου $r_0 = 149,6 \times 10^6 km$ (ισούται με μια Αστρονομική Μονάδα) και D είναι η ημέρα του χρόνου, από $D = 1$ την 1^η Ιανουαρίου μέχρι $D = 365$ την 31^η Δεκεμβρίου. Ο Φεβρουάριος θεωρείται ότι έχει 28 ημέρες, με συνέπεια τα δίσεκτα έτη να παρουσιάζεται μια μικρή διαφοροποίηση στους υπολογισμούς. Η γραφική απεικόνιση της πιο πάνω σχέσης παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9. Ημερήσια μεταβολή της απόστασης Ήλιου – Γης (r) σε συνάρτηση με τη μέση απόσταση (r_0), όπου $E_0 = (r_0/r)^2$

Επομένως βλέπουμε ότι με την μεταβολή της θέσης του ήλιου επηρεάζεται η πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα.

Η μέση ετήσια και ημερήσια μεταβολή της έντασης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για την Αθήνα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10. Ανάλογα με την περίοδο του έτους διαφοροποιείται σημαντικά η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς επίσης και η διάρκεια της ημέρας. Για παράδειγμα η μέγιστη ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας τον Ιούνιο είναι σχεδόν 3,5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του Δεκεμβρίου.



Σχήμα 2.10. Μέση μηνιαία ωριαία ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για την Αθήνα. Στοιχεία από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.

2.5. Ηλιακός χρόνος

Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας απαιτεί τον υπολογισμό της ακριβούς θέσης του ήλιου ως προς τη θέση μιας επιφάνειας πάνω στην οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία.

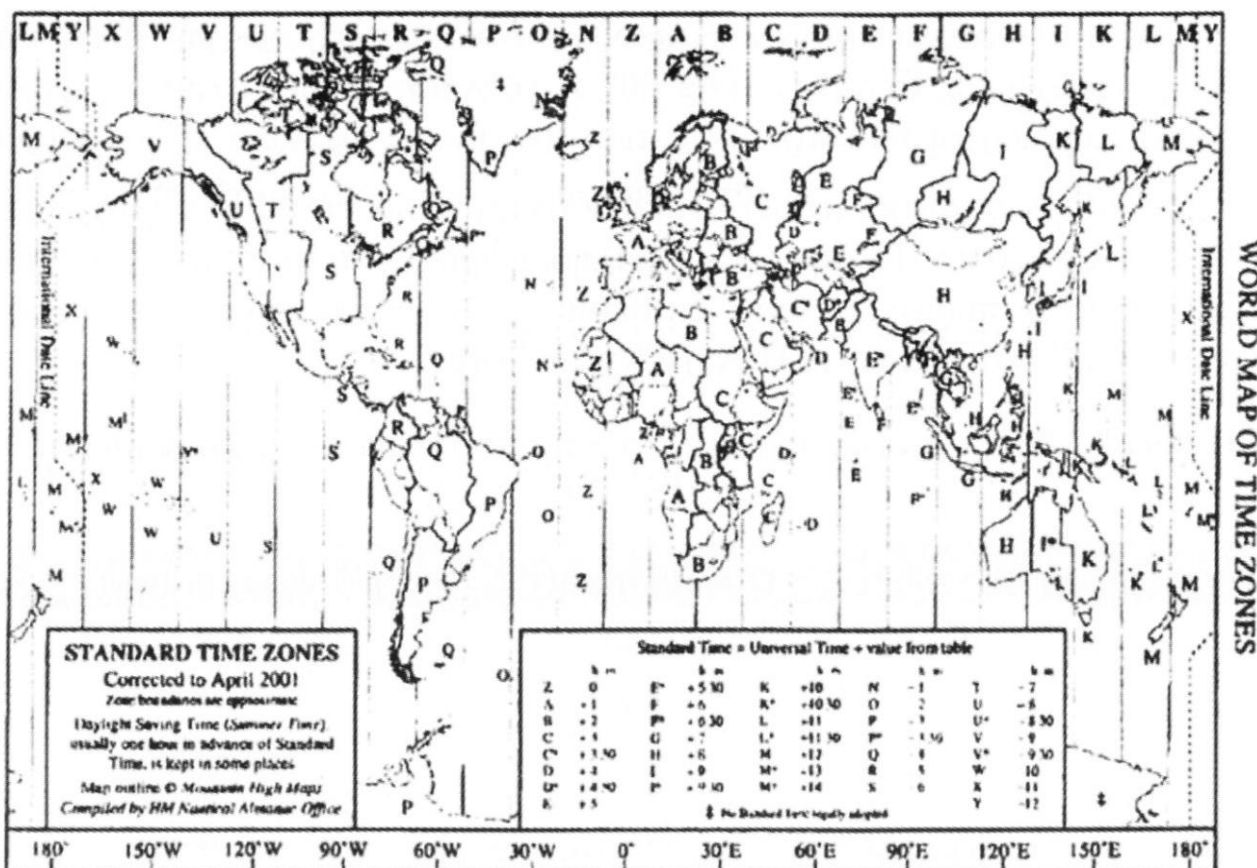
Σε όλους τους υπολογισμούς που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται ο πραγματικός ηλιακός χρόνος (HX).

Η Γη χωρίζεται σε 24 ζώνες που συμβολίζονται με τα γράμματα Α – Υ (σχήμα 2.11.). Κάθε μια από αυτές τις γωνίες έχει γεωγραφικό μήκος 15 μοίρες, δηλαδή 1 ώρα. Για κάθε μια από αυτές τις ζώνες χρησιμοποιείται η ίδια τοπική ώρα.

Ο ηλιακός χρόνος (HX) δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο (TX). Συνεπώς χρειάζεται να γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις σύμφωνα με την σχέση:

$$H_X = T_X \pm 4 \cdot (L_{\sigma\tau} - L_{\tau}) + E_t \quad (2.17)$$

(+) στο δυτικό ημισφαίριο και (-) στο ανατολικό ημισφαίριο, όπου $L_{\sigma\tau}$ είναι ο μεσημβρινός για την ζώνη χρόνου της περιοχής και L_{τ} είναι ο τοπικός μεσημβρινός. Το τοπικό γεωγραφικό μήκος μερικών αντιπροσωπευτικών περιοχών της Ελλάδας δίνεται στον πίνακα 2.5.1. Επίσης μπορεί να χρειασθεί και μια ακόμη διόρθωση του τοπικού χρόνου για τη θερινή ώρα.



Σχήμα 2.11. Παγκόσμιος χάρτης με τις 24 ζώνες (Πηγή: H. M. Nautical Almanac Office).

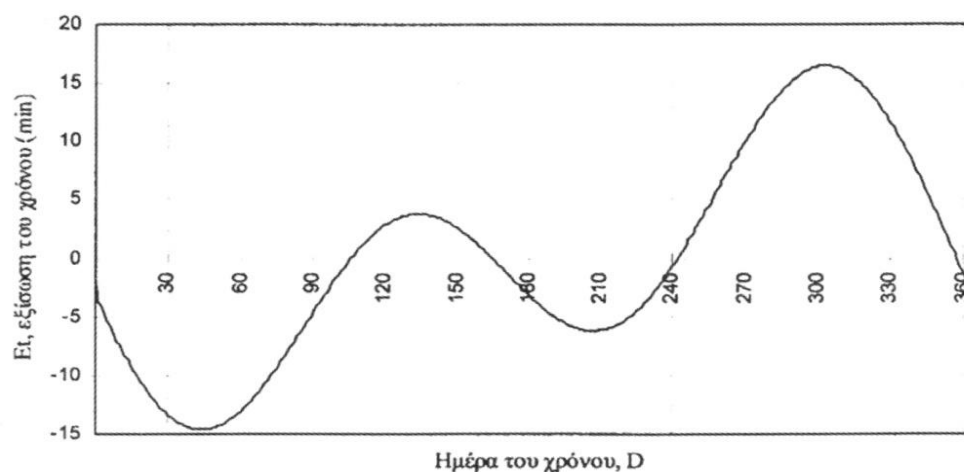
Η παράμετρος E_t υπολογίζεται από την εξίσωση του χρόνου (εξίσωση του Watt), με την οποία λαμβάνεται υπόψη η ελλειπτική τροχιά και η εκκεντρότητα (δηλαδή το κατά πόσο η πραγματική ελλειπτική τροχιά της Γης γύρω από τον ήλιο διαφέρει από την θεωρητική κυκλική τροχιά) της τροχιάς της Γης γύρω από τον ήλιο. Η εξίσωση του χρόνου υπολογίζεται σε λεπτά, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$E_t = 9.87 \cdot \sin(2B) - 7.53 \cdot \cos(B) - 1.5 \cdot \sin(B) \quad (2.18)$$

όπου $B = 360 \cdot \frac{D-81}{364}$ και D είναι η ημέρα του χρόνου, από $D = 1$ την 1^η Ιανουαρίου μέχρι $D = 365$ την 31^η Δεκεμβρίου.

Η ετήσια διακύμανση της παραμέτρου E_t παρουσιάζεται στο σχήμα 2.12. Ο διορθωτικός συντελεστής είναι μηδέν τέσσερις φορές το χρόνο.

Η Ελλάδα βρίσκεται στην Τρίτη ζώνη ανατολικά του Greenwich (0^0 γεωγραφικό μήκος), μεταξύ του γεωγραφικού μήκους 20^0 Α και 30^0 Α. Ο προσδιορισμός του σταθερού γεωγραφικού μήκους για τον υπολογισμό της ώρας στην ευρύτερη περιοχή της Ελλάδας, είναι 30^0 Α (δηλαδή 2 ώρες διαφορά από το Greenwich, αφού η Γη περιστρέφεται περί τον άξονά της κατά 15^0 ανά ώρα).



Σχήμα 2.12. Η ετήσια διακύμανση της εξίσωσης του χρόνου (E_t).

Το τυπικό γεωγραφικό μήκος μερικών αντιπροσωπευτικών περιοχών της Ελλάδας δίνεται στο πίνακα 2.1

Πίνακας 2.1. Γεωγραφικό μήκος και πλάτος αντιπροσωπευτικών περιοχών της Ελλάδας.

Περιοχή	Γεωγραφικό Μήκος (°)	Γεωγραφικό Πλάτος (°)
Αθήνα	23,54	37,9
Ηράκλειο	25,6	35,5
Θεσσαλονίκη	23	40,5
Ιωάννινα	20,65	39,7
Κομοτηνή	25,5	41,05
Μυτιλήνη	26,2	39,1

Παράδειγμα 1: Υπολογίστε τον πραγματικό ηλιακό χρόνο στις 11:00 τοπική χειμερινή ώρα την 17^η Οκτωβρίου και στις 9:30 θερινή ώρα την 21^η Μαΐου στην Αθήνα ($L_{\tau} = 23,75^{\circ} A$).

Η 17^η Οκτωβρίου είναι η 290^η ημέρα του χρόνου ($D = 290$), συνεπώς

$$B = 360 \cdot \frac{290 - 81}{364} = 206,7^{\circ}$$

και από την εξίσωση του χρόνου έχουμε:

$$E_t = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B) = 9,87 \cdot \sin(413,4) - 7,53 \cdot \cos(206,7) - 1,5 \cdot \sin(206,7) = 15,325 \text{ min}$$

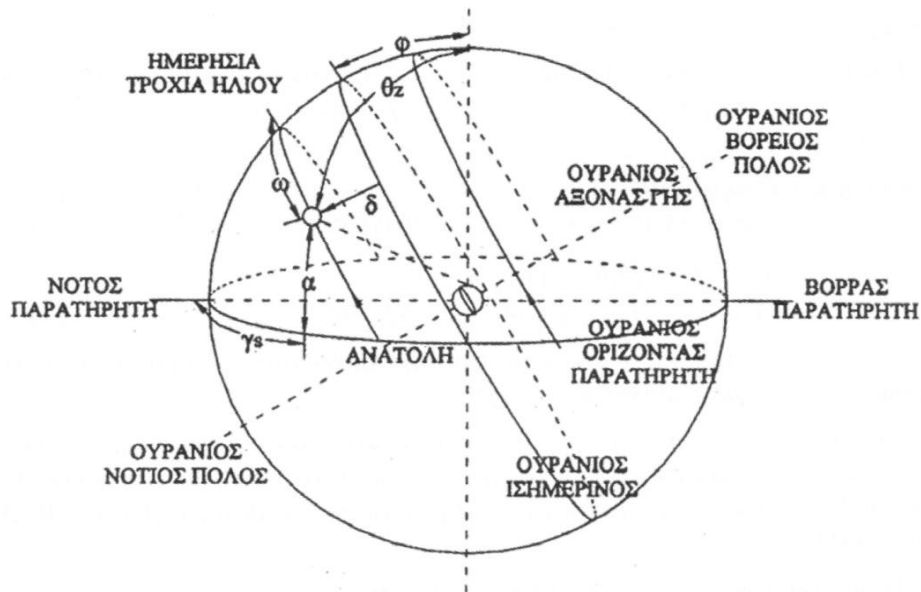
Συνεπώς ο ηλιακός χρόνος είναι:

$$H_X = T_X \pm 4 \cdot (L_{\sigma\tau} - L_{\tau}) + E_t = 10 \text{ h } 50 \text{ min } 19.2 \text{ sec}$$

Για την 21^η Μαΐου, $D = 141$, $B = 59.34^{\circ}$, $E_t = 3.528 \text{ min}$, $H_X = 9 \text{ h } 8 \text{ min } 31 \text{ sec}$, και λόγω της θερινής ώρας $H_X = 8 \text{ h } 8 \text{ min } 31 \text{ sec}$.

2.6. Ηλιακή Γεωμετρία

Ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει στην επιφάνεια της Γης, βασίζεται σε διάφορες τριγωνομετρικές σχέσεις μεταξύ της θέσης του ήλιου στον ουράνιο θόλο και τις συντεταγμένες μιας επιφάνειας πάνω στη Γη. Οι βασικές γωνίες που συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς παρουσιάζονται στο σχήμα 2.13 με την φαινομενική τροχιά του ήλιου όπως φαίνεται από έναν παρατηρητή επάνω στη Γη. Κάθε παράμετρος αναλύεται στη συνέχεια.



Σχήμα 2.13: Οι συντεταγμένες του ήλιου σε σχέση με έναν παρατηρητή στην επιφάνεια της Γης.

Η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού εκφράζεται με την **ωριαία γωνία** (ω). Η θέση του ήλιου στις 12 το μεσημέρι είναι η μεσημβρία δηλαδή το μέσο της ημέρας σε πραγματικό ηλιακό χρόνο.

Εξαιτίας της περιστροφής της Γης περί τον άξονά της κατά 15^0 μοίρες ανά ώρα, κάθε χρονική στιγμή πριν και μετά την μεσημβρία μπορεί να εκφραστεί είτε μέσω του ηλιακού χρόνου, είτε μέσω της ωριαίας γωνίας για τους μαθηματικούς υπολογισμούς. Η ωριαία γωνία είναι μηδέν την μεσημβρία και έχει αρνητικές τιμές το πρωί και θετικές το απόγευμα.

Παράδειγμα 1.: Υπολογίστε την ωριαία γωνία για πραγματικό ηλιακό χρόνο στις 9:00 και στις 15:30.

Για τις 9:00 έχουμε $\omega = (9 - 12)hr \cdot \frac{15^\circ}{hr} = -45^\circ$.

Για τις 15:30 έχουμε $\omega = (15,5 - 12)hr \cdot \frac{15^\circ}{hr} = 52,5^\circ$.

Η **ζενιθιακή γωνία** (σχήμα 2.4.3) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos \theta_Z = (\sin \delta \cdot \sin \varphi) + (\cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega) = \sin \alpha$$

όπου:

φ = γεωγραφικό πλάτος της περιοχής (το γεωγραφικό πλάτος μερικών αντιπροσωπευτικών περιοχών της Ελλάδας δίνεται στον πίνακα 2.3.1.),

ω = ωριαία γωνία για τη δεδομένη χρονική στιγμή και

δ = **ηλιακή απόκλιση** η οποία υπολογίζεται για κάθε ημέρα του χρόνου (D).

Η **ηλιακή απόκλιση** μεταβάλλεται συνεχώς. Είναι μηδέν κατά την εαρινή ισημερία και την φθινοπωρινή ισημερία (ίση διάρκεια ημέρας και νύχτας) και ισούται με $+23,5^\circ$ το θερινό ηλιοστάσιο και $-23,5^\circ$ το χειμερινό ηλιοστάσιο (για το Β ημισφαίριο). Κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου, η μέγιστη μεταβολή του (δ) είναι μικρότερη από $0,5^\circ$. Συνεπώς αν η ηλιακή απόκλιση θεωρηθεί σταθερή για 24 ώρες, έχουμε ένα μέγιστο σφάλμα στους υπολογισμούς των άλλων ηλιακών γωνιών (που παρουσιάζονται στη συνέχεια) μεγέθους $0,5^\circ$. Υπάρχουν κάποιες εξισώσεις με τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε με μεγάλη ακρίβεια την ηλιακή απόκλιση (εξίσωση του Spencer, εξίσωση του Perrin de Brichambaut, εξίσωση του Cooper).

Η εξίσωση του Cooper (1969) είναι η πιο απλή από τις αναφερόμενες και μπορούμε να επιτύχουμε ικανοποιητική ακρίβεια στους υπολογισμούς:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{D+284}{365}\right) \quad (2.19)$$

Η ετήσια μεταβολή της ηλιακής απόκλισης χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Cooper φαίνεται στο σχήμα 2.14

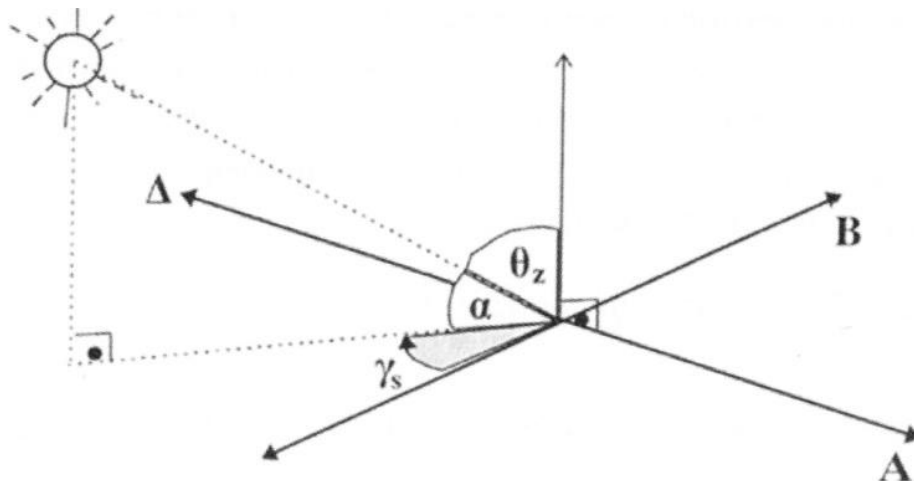


Σχήμα 2.14: Ηλιακή απόκλιση (δ) από την εξίσωση του Cooper.

Το **ηλιακό ύψος α** (σχήμα 2.15) είναι το γωνιακό ύψος του ήλιου πάνω από τον ορίζοντα του παρατηρητή ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) και ισχύει ότι:

$$\alpha = 90 - \theta_z \quad (2.20)$$

Το ηλιακό ύψος μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους. Η θέση του ήλιου και η ημερήσια πορεία του το χειμώνα είναι χαμηλά στον ορίζοντα οπότε το ηλιακό ύψος έχει χαμηλές τιμές. Το καλοκαίρι ο ήλιος είναι πιο ψηλά στον ορίζοντα και το ηλιακό ύψος έχει μεγαλύτερες τιμές. Η φαινομενική εποχιακή διαφοροποίηση της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα, είναι αποτέλεσμα της ηλιακής απόκλισης, δηλαδή της μετατόπισης του άξονα περιστροφής της Γης σε σχέση με το επίπεδο πάνω στο οποίο κινείται η Γη γύρω από τον ήλιο.

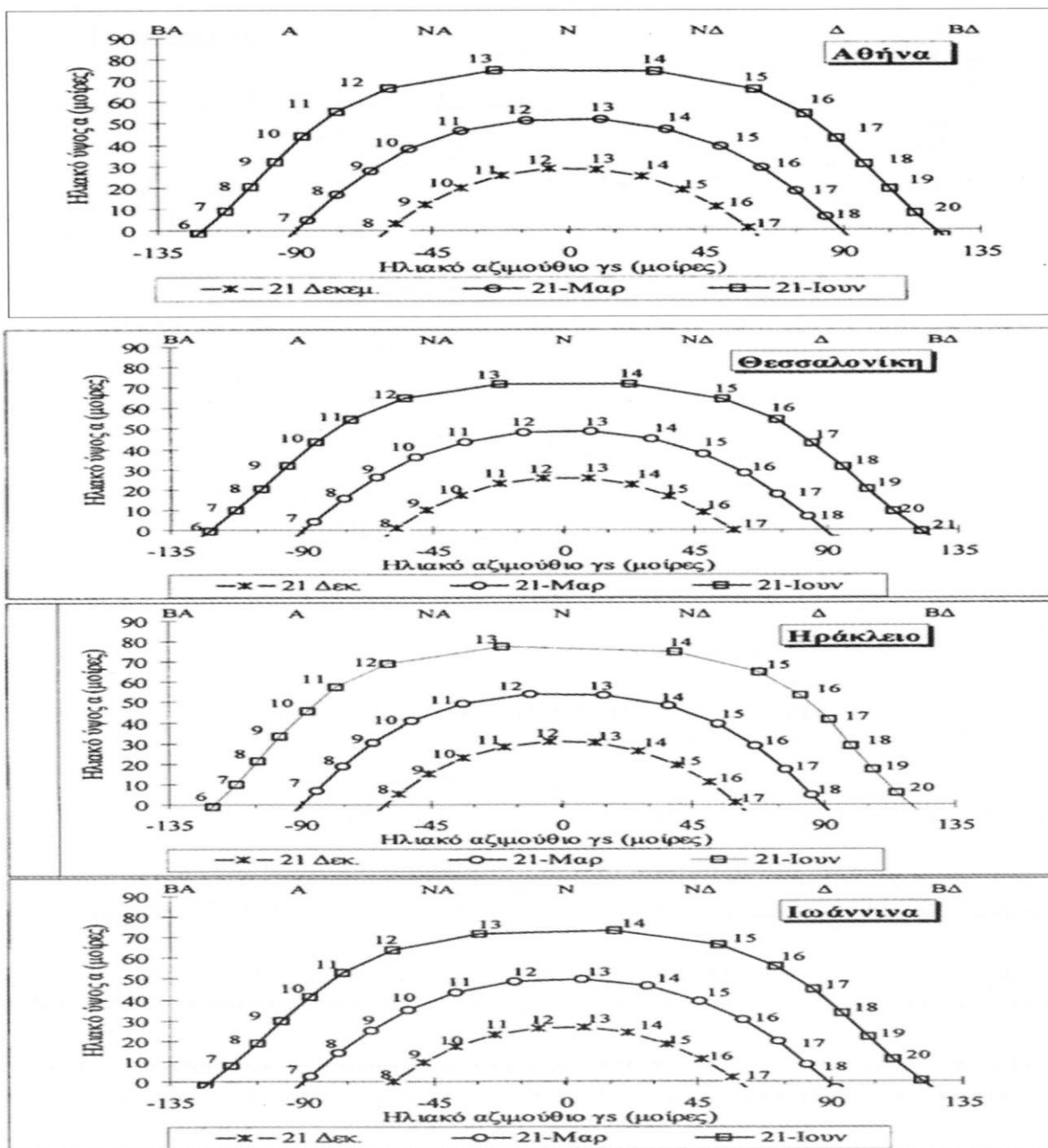


Σχήμα 2.15: Ορισμός της ζενιθιακής γωνίας (θ_z), του ηλιακού ύψους (α) και του ηλιακού αζιμούθιου (γ_s).

Η **αζιμούθια γωνία του ήλιου γ_s** (σχήμα 2.15) ορίζεται μεταξύ του επιπέδου του μεσημβρινού και του παρατηρητή (δηλαδή τον νότιο προσανατολισμό) και του επιπέδου της προβολής του ήλιου πάνω στην επιφάνεια της γης ($0^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$), με αρνητικές τιμές στα ανατολικά και με θετικές τιμές στα δυτικά, ενώ ισούται με μηδέν όταν ο ήλιος βρίσκεται ακριβώς στο νότο.

Επομένως, η αζιμούθια γωνία του ήλιου περιγράφει τον προσανατολισμό (θέση) του ήλιου σε σχέση με τον παρατηρητή.

Για παράδειγμα, η ωριαία θέση του ήλιου σε σχέση με τον προσανατολισμό και το ύψος του ήλιου για 5 πόλεις της Ελλάδας, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.16. Ο χρόνος που σημειώνεται είναι ο τοπικός χρόνος. Το χειμώνα, το ηλιακό μεσημέρι είναι πολύ κοντά με τον τοπικό χρόνο, ενώ κατά την διάρκεια του καλοκαιριού υπάρχει σημαντική απόκλιση της μεσημβρίας από τον τοπικό χρόνο.



Σχήμα 2.16. Η θέση του ήλιου κατά την διάρκεια τριών αντιπροσωπευτικών ημερών (21 Δεκεμβρίου, 21 Μαρτίου, 21 Ιουνίου) σε διάφορες ελληνικές πόλεις. Ο χρόνος που σημειώνεται είναι ο τοπικός χρόνος.

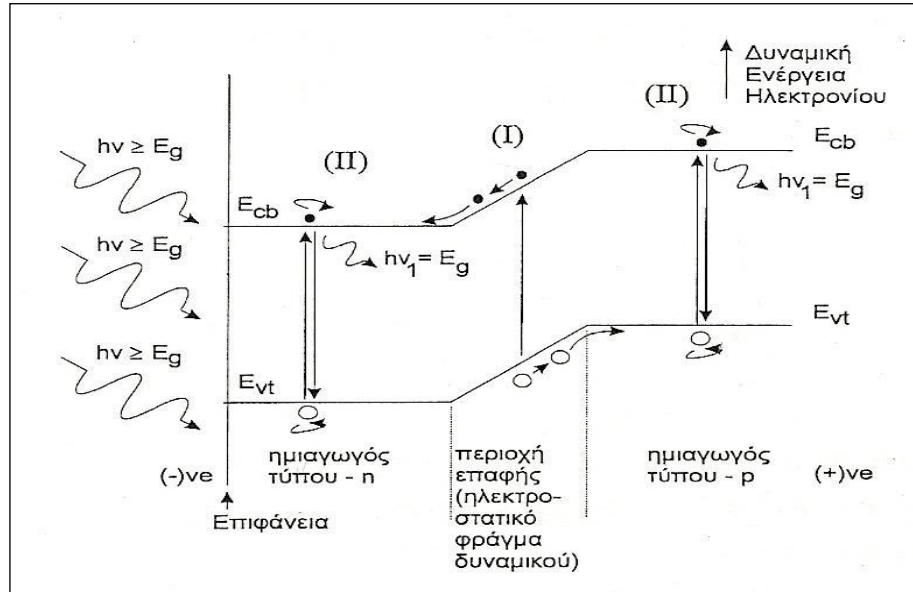
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

3.1 Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Με τον όρο φωτοβολταϊκό φαινόμενο αναφερόμαστε στη δημιουργία διαφοράς δυναμικού στα άκρα μιας διόδου η οποία ακτινοβολείται με ηλιακή ενέργεια. Για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η ακτινοβολία παράγεται συνεχές ρεύμα από τη διόδο της τάξεως των 0.5V-1V. Το αντίστοιχο παραγόμενο ρεύμα εξαρτάται από το υλικό κατασκευής τους και την ένταση της προσπίπτουσας στην επιφάνεια τους ακτινοβολία και κυμαίνεται από 20mA/cm² έως 40mA/cm². Όταν διακοπεί η ακτινοβολία της διόδου σταματάει και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

3.1.1 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Τα ηλιακά στοιχεία είναι diodes ημιαγωγού με την μορφή ενός δίσκου, που δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου. Η αναγκαιότητα ύπαρξης του ηλεκτροστατικού φράγματος πηγάζει από την απαίτηση για διαχωρισμό των θετικών και αρνητικών φορέων φορτίου και την συγκέντρωσή τους πάνω στις δυο όψεις του ηλιακού στοιχείου, δηλαδή τη φωτιζόμενη και την πίσω όψη τους. 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. Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται σαν σφαίρες μάζας που κυλούν πάνω σε ένα κεκλιμένο επίπεδο, ενώ οι οπές συμπεριφέρονται σαν φουσαλίδες που αιωρούνται μέσα σε ένα υγρό (Σχήμα 3.1). Στο μοντέλο αυτό, το ηλεκτρόνιο (σφαίρα) ελαχιστοποιεί τη δυναμική του ενέργεια κινούμενο προς τα κάτω, ενώ η οπή (φουσαλίδα) ελαχιστοποιεί τη δυναμική της ενέργειας κινούμενη προς τα άνω σε ένα διάφραγμα δυναμικής ενέργειας. Για παράδειγμα σε μια diode p-n τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται φορτία στις δυο αντικρινές επιφάνειες και να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δυο τμημάτων του ηλιακού στοιχείου, για όσο διάστημα υπάρχει η οπτική διέγερση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου.



Σχήμα 3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Ηλιακό στοιχείο που αποτελείται από την επαφή ημιαγωγού τύπου-n και τύπου-p. Διάγραμμα της δυναμική ενέργειας των ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια.

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 3.1, στο ηλιακό στοιχείο προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ενέργεια τιμής $E = h\nu \geq E_g$. 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. Στην περιοχή (I) το δημιουργούμενο ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής διαχωρίζεται από το ηλεκτροστατικό πεδίο. Στο σχήμα τα ηλεκτρόνια (σφαίρες) κυλούν πάνω στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας και μεταφέρονται στην περιοχή τύπου-n. Κατ' αναλογία, οι οπές (φυσαλίδες) ολισθαίνουν μόλις κάτω από την περιοχή της ζώνης σθένους και μεταφέρονται προς την περιοχή τύπου-p για να ελαχιστοποιήσουν τη δυναμική τους ενέργεια. Στις περιοχές (II) δεν διαχωρίζονται χωρικά οι παραγόμενοι φορείς οπότε, αφού ζήσουν το χρόνο ζωής τους, επανασυνδέονται και χάνονται εκπέμποντας ένα φωτόνιο ενέργειας:

$$E = h \cdot \nu = E_g \quad (3.1)$$

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

$$I_\phi = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda F) [1 - R(\lambda F)] \Phi(\lambda F d \lambda) \quad (3.2)$$

Όπου e το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

$R(\lambda F)$ ο δείκτης ανάκλασης για ακτινοβολία μήκους κύματος λ

$\Phi(\lambda F)$ το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι $\lambda + d\lambda$

$S(\lambda F)$ 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 : $\lambda_g = hc/E_g$

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.

3.1.3 Απορρόφηση της Ακτινοβολίας στα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται πάνω στην επιφάνειά τους και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα για τα φωτόνια εκείνα με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενό του. Έτσι, η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγωγίμο υλικό του στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο εκείνο το μέρος της ενέργειας που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ενώ το υπόλοιπο μεταφέρεται σαν κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από το δεσμό και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα.

Η ενέργεια ενός φωτονίου E συνδέεται με την συχνότητα της ακτινοβολίας ν και με το μήκος κύματος λ με τις σχέσεις:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.3)$$

Όπου: h : η σταθερά του Planck ($h=6,3 \times 10^{-34}$ Js)

c : η ταχύτητα του φωτός ($c=3 \times 10^8$ m/s)

Αν το ενεργειακό διάκενο είναι σε μονάδες eV και το μήκος κύματος σε μm τότε το μέγιστο χρησιμοποιήσιμο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό ενεργειακού διακένου E_g , θα είναι:

$$\lambda_g = \frac{1,238}{E_g} \quad (3.4)$$

3.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών 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 μερικά μόνο μμ.
- Άλλες τεχνολογίες που σκοπό έχουν να γίνει λιγότερο ενεργοβόρα η παραγωγή του καθαρού πυριτίου, περιορίζοντας τις απώλειες σε ακριβό καθαρό πυρίτιο.

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 ιδιότητες (έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή διακένου) δεν είναι ιδεώδεις για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής των ηλιακών στοιχείων. Η αιτία είναι ίσως ότι το πυρίτιο έχει ήδη ένα πλούσιο παρελθόν 3-4 δεκαετιών σαν το κύριο υλικό των διατάξεων των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής. Επομένως οι ιδιότητές του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στην αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, με ικανοποιητική χημική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής.

Τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου έχουν λειτουργήσει με απολύτως ικανοποιητική αξιοπιστία σε ακραίες συνθήκες, τόσο σε διαστημικές όσο και σε επίγειες. π.χ. σε διαστημόπλοια σε τροχιά προς τον πλανήτη Δία με ένταση ακτινοβολίας μόλις 50 W/m² και θερμοκρασία -120 °C, ή σε άλλα διαστημόπλοια σε τροχιά προς τον Ερμή και την Αφροδίτη με ένταση ακτινοβολίας 2,5 KW/M² και θερμοκρασίας 140 °C, ή σε συστήματα συγκεντρωμένου φωτός, στην επιφάνεια της γης, ισχύος εκατοντάδων ήλιων. Επίσης, σε πλαίσια τοποθετημένα σε κορυφές βουνών εκτεθειμένα σε χιονοθύελλες και ταχύτητες ανέμου πάνω από 100 Km/h, στο έντονο διαβρωτικό περιβάλλον της θαλάσσιας ατμόσφαιρας, σε περιοχές με μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές κλπ. Ενδεικτικό της επιτυχίας των ηλιακών στοιχείων πυριτίου είναι ο εντυπωσιακός ρυθμός της αύξησης της παραγωγής τους. Πριν από είκοσι χρόνια, η ετήσια παραγωγή των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου δεν ξεπερνούσε, σε συνολική ισχύ αιχμής, τα λίγα KWp, και προορίζονταν αποκλειστικά για τηλεπικοινωνιακούς, μετεωρολογικούς και ερευνητικούς δο-

ρυφόρους. Σήμερα η ετήσια παραγωγή τους έχει φτάσει τα 10 MWp (αύξηση περίπου 1000 φορές), από τα οποία μόλις τα 150 KWp προορίζονται για δορυφορικές ή άλλες διαστημικές εφαρμογές, ενώ το υπόλοιπο χρησιμοποιείται σε επίγειες φωτοβολταϊκές διατάξεις.

Σύμφωνα με ένα θεωρητικό υπολογισμό, η απόδοση των ηλιακών στοιχείων πυριτίου μπορεί να φθάσει μέχρι 23,92% για συνθήκες AM1. Ο υπολογισμός έχει γίνει για ηλιακό στοιχείο πάχους 100μm με εμπρός τμήμα τύπου ή πάχους 0,2μm και ζώνη εξάντλησης πάχους 0,15 μm. Το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας θεωρήθηκε 150 μm και ο μέσος χρόνος ζωής τους 20 μs , περίπου. Ένα τέτοιο στοιχείο θα έδινε τάση ανοικτοκύκλωσης $V_{DC} = 0,7 \text{ V}$ και πυκνότητα βραχυκυκλωμένου φωτορεύματος $I_{\Phi} = 40 \text{ mA/cm}^2$, περίπου. Στις πρακτικές εφαρμογές τα ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου μεγάλης επιφάνειας έχουν απόδοση περίπου 10-12% ή λίγο μεγαλύτερη.

3.2.2 Η διαμόρφωση της διόδου

Συνήθως, η διόδος των ηλιακών στοιχείων πυριτίου διαμορφώνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η εμπρός τους όψη να είναι τύπου n με προσμίξεις ατόμων φωσφόρου, και το πίσω τμήμα να είναι τύπου p με προσμίξεις ατόμων βορίου. Κατασκευάζονται όμως επίσης στοιχεία με αντίθετη ένωση, δηλαδή εμπρός τύπου p και πίσω τύπου n, κυρίως για διαστημικές εφαρμογές, διότι έχουν μεγαλύτερη αντοχή στις ισχυρές ακτινοβολίες.

Για τους περισσότερους ημιαγωγούς, ο συντελεστής απορρόφησης έχει μία περίπου σταθερή (και μεγάλη) τιμή για όλα τα φωτόνια που απορροφούν, ενώ για το πυρίτιο αυξάνει αργά με τη μείωση του μήκους κύματος των φωτονίων. Έτσι, όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία, όπως είναι το ηλιακό φως, το μέρος της εκείνο που έχει μικρό σχετικά μήκος κύματος, απορροφάται ολόκληρο σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια. Αν π.χ. το εμπρός τμήμα του στοιχείου είναι τύπου n, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι οπές που δημιουργούνται από το φως να συναντήσουν αμέσως ελεύθερα ηλεκτρόνια (τα οποία αφθονούν στο τμήμα του τύπου n ως φορείς πλειονότητας) και να επανασυνδεθούν, πριν προλάβουν να διαχυθούν προς τη ζώνη εξάντλησης της διόδου. Για αυτό, το εμπρός τμήμα των ηλιακών στοιχείων πυριτίου κατασκευάζεται σε πολύ λεπτό πάχος (της τάξης του μm) ώστε οι περισσότεροι φορείς, που δημιουργούνται με την απορρόφηση της ακτινοβολίας, να έχουν την ευκαιρία να πλησιάσουν προς τη ζώνη εξάντλησης και να εκτραπούν υπό την επίδραση του πεδίου της. Έτσι, καθώς οι οπές οδηγούνται προς τμήμα τύπου p και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια

προς το τμήμα τύπου n, όπου και οι μεν και οι δε είναι φορείς πλειονότητας, η πιθανότητα να μην συναντήσουν αντίθετους φορείς και να μην επανασυνδεθούν (και επομένως να μπορέσουν να συμβάλλουν στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου) είναι μεγάλη. Όσο καθαρότερος είναι ένας ημιαγωγός, τόσο μεγαλύτερο μήκος διάχυσης έχουν οι φορείς του και τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχουν, ως φορείς μειονότητας, να φτάσουν στη ζώνη εξάντλησης της διόδου. Παράλληλα, για την αύξηση της παραπάνω πιθανότητας, επιδιώκεται να αποκτήσει μεγάλο πάχος η ζώνη εξάντλησης της διόδου, που πετυχαίνεται με τη διαμόρφωση του εμπρός τμήματος σε τύπου p+

(δηλαδή με μεγάλη συγκέντρωση δοτών) ενώ στο τμήμα p η συγκέντρωση αποδεκτών είναι σχετικά μικρή. Συνηθισμένες τιμές για τα ηλιακά στοιχεία του εμπορίου είναι $N_D=5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ και $N_A=10^{16} / \text{cm}^3$ περίπου

3.2.3 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%.

3.2.4 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 %.

3.2.5 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.

3.2.6 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 υποστρώμα. 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-SiTFC 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-SiTFC 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-SiTFC 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.

3.2.7 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 %.

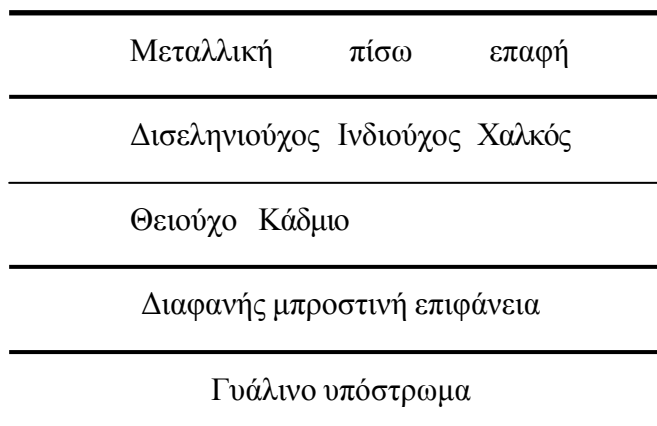
3.2.8 Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

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 συνθητισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, όταν θερμανθούν στους 200 °C. Η αντίστοιχη μείωση στα στοιχεία πυριτίου παρατηρείται ήδη στους 120 °C.

3.2.9 Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe₂ ή CIS)

Το ημιαγωγίμο υλικό του δισεληνιούχου ινδιούχου χαλκού είναι ένα ημιαγωγίμο 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 3.2.



Σχήμα 3.2 Δομή του ηλιακού στοιχείου CIS[2].

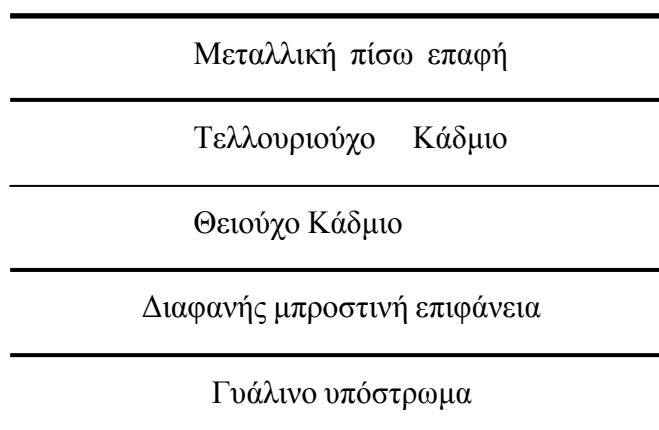
Μια σημαντική προσπάθεια έχει αφιερωθεί στην άνοδο της τεχνολογίας CIS κυρίως από τη SIEMENS. Έχουν φτιαχτεί στοιχεία CIS του εμπορίου, η απόδοση των οποίων πλησιάζει το 10%. Πλεονεκτούν σε σχέση με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, καθώς δεν εμφανίζουν βαθμιαία πτώση της απόδοσης για μια περίοδο μερικών 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.

3.2.10 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 3.3.

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.

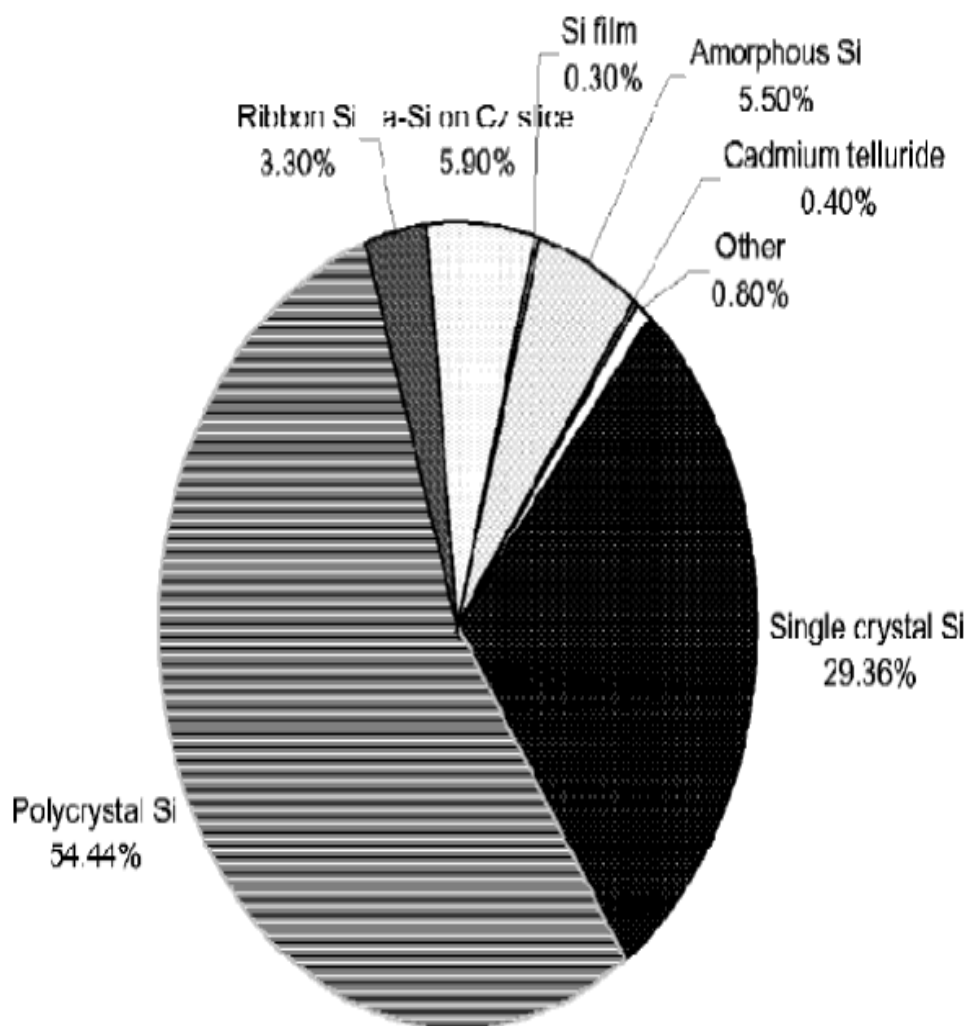


Σχήμα 3.3 Δομή του ηλιακού στοιχείου CdTe[2].

Μια ακόμα τεχνολογία είναι αυτή της ηλεκτροτυπίας. Η τεχνολογία αυτή είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για τα στοιχεία CdTe, λόγω της πολύ μικρής 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 3.4. 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 3.4 Μερίδιο αγοράς των διαφόρων τεχνολογιών φ/β κυψελών για το 2002[13].

3.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Το βασικό και χαρακτηριστικό συστατικό κάθε φ/β εγκατάστασης είναι η φ/β γεννήτρια, που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα φ/β ηλιακά στοιχεία. Και εδώ, όπως είδαμε ότι συμβαίνει γενικότερα στη φ/β ορολογία χρησιμοποιούνται και άλλες ονομασίες, όπως ηλιακή μπαταρία, ηλιακή ηλεκτρογεννήτρια κλπ. Μια φ/β γεννήτρια αποτελείται από πλαίσια που ενώνονται και συγκροτούν συστοιχίες.

3.3.1 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Η τάση και η ισχύς των φ/β στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Ειδικότερα, η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο φ/β στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις 0.5V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μέχρι μόλις 0.4W περίπου. Γι' αυτό, τα φ/β στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση φ/β γεννητριών τοποθετούνται, ανά 10 ως 50 περίπου, σε ενιαίο πλαίσιο, με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο, τα στοιχεία συνδέονται στη σειρά, σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση μιας επιθυμητής τάσης.

Τα πλαίσια είναι κατασκευασμένα στο εργοστάσιο. Τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) ή αποενισχυμένο 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.

Τα φ/β πλαίσια του εμπορίου δεν έχουν τυποποιημένες διαστάσεις και ισχύεις. Σε συμβατικές συνθήκες αιχμής έχουν συνήθως, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή, τάση εξόδου από περίπου 4V μέχρι 22V. Πριν βγουν στο εμπόριο, τα φ/β πλαίσια υποβάλλονται συνήθως σε μια σειρά από αυστηρές δοκιμές ποιοτικού ελέγχου με θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, καθώς και σε δοκιμασία 5ημερης συνεχούς παραμονής σε ατμόσφαιρα σχετικής υγρασίας 95% και θερμοκρασίας 95 βαθμών κελσίου, για να ελεγχθεί η στεγανότητα τους.

3.3.2 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το κάθε φ/β πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (απόδοση, τάση, ισχύ κλπ.), που προφανώς διαμορφώνονται από τα αντίστοιχα μεγέθη των χωριστών ηλιακών στοιχείων που περιέχει. Ο συντελεστής απόδοσης του φ/β πλαισίου (η_m) εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φ/β πλαίσιο (P_{max}),

προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του (S). 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.

Ο συντελεστής απόδοσης ενός πλαισίου δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{G \cdot S_m} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{G \cdot S_m} \quad (3.5)$$

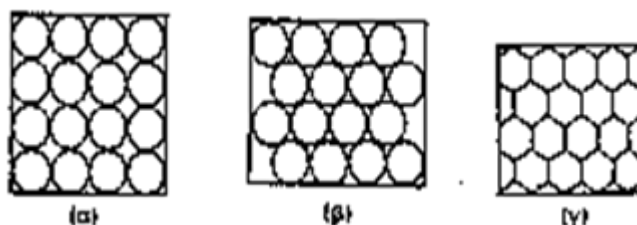
Την ίδια τιμή θα είχε και ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ενέργειας E_{max} που παράγει το φ/β πλαίσιο επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται επί το ίδιο χρονικό διάστημα:

$$\eta_m = \frac{E_{max}}{H \cdot S_m} \quad (3.6)$$

Για τον συντελεστή κάλυψης του πλαισίου (σ_k) ισχύει η σχέση:

$$\eta_m = \eta \cdot \sigma_k \quad (3.7)$$

Η τιμή του σ_k εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο φ/β πλαίσιο. Συνήθως κυμαίνεται από περίπου 0,78 για τα κυκλικά στοιχεία σε παράλληλες στοιχημένες σειρές και φτάνει μέχρι σχεδόν 1,00 (πρακτικά μέχρι 0,98) για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία (σχήμα 3.5)



Σχήμα 3.5 Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των ηλιακών στοιχείων στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης είναι περίπου 0,78 για την περίπτωση (α), 0,88 για την περίπτωση (β), και 0,98 για τα εξαγωνικά στοιχεία της περίπτωσης (γ).

3.3.3 Η επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης

Η απόδοση των φ/β στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Όμως ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα φ/β πλαίσια αντιστοιχεί σε μια συμβατική θερμοκρασία, που συχνά, ιδίως τους θερινούς μήνες, διαφέρει αξιόλογα από την πραγματική θερμοκρασία του στοιχείου. Έχει μετρηθεί ότι αφενός, και κυρίως, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα ηλιακά στοιχεία αποκτούν κατά τη λειτουργία τους θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος κατά 25C έως 30C, ανάλογα και με την ταχύτητα του ανέμου. Ως μέσο όρο, στους υπολογισμούς μας, παίρνουμε συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας κατά 30C.

Είδαμε ότι για τη διόρθωση του παραπάνω σφάλματος χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής σ_{θ} , με τον οποίο πολλαπλασιάζουμε τον συντελεστή απόδοσης των ηλιακών στοιχείων. Το ίδιο εφαρμόζουμε και για τα φ/β πλαίσια. Δηλαδή, για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική, ως συντελεστή απόδοσης των φ/β πλαισίων παίρνουμε το γινόμενο $\eta_{n^*} \sigma_{\theta}$.

Στη συμβατική θερμοκρασία ο σ_{θ} , είναι ίσος με τη μονάδα, και για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0.005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή. Π.χ. στην Αθήνα, τον μήνα Ιούλιο, που έχουμε μέση θερμοκρασία του αέρα, στις φωτεινές ώρες της ημέρας, σχεδόν 30C, η μέση θερμοκρασία των ηλιακών στοιχείων του φ/β πλαισίου θα είναι περίπου 60C και επομένως η τιμή του συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης του φ/β πλαισίου θα είναι περίπου:

$$\sigma_{\theta} = 1,00 - (60 - 20) * 0,005 = 0,8$$

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 επικάθηση 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 ρύπανση 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 επιφάνεια 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 επιφάνειας του προκύπτει:

$$\eta_m = \sigma_p \cdot \eta_{m,k} \quad (3.8)$$

όπου $\eta_{m,k}$ η απόδοση του ,όταν είναι καθαρό.

3.3.4 Η ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Συχνά ,δεν είναι διαθέσιμα όλα τα λεπτομερειακά κατασκευαστικά δεδομένα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φ/β πλαισίων (διαστάσεις, συντελεστής κάλυψης, συντελεστής απόδοσης των ηλιακών στοιχείων κλπ.),αλλά δίνεται μόνο μια ενδεικτική ισχύς αιχμής (P_a),που αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το φ/β πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 ηλίου, δηλαδή 1kw/m^2 .

Οι μονάδες ισχύος ,που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός φ/β πλαισίου, μιας ολόκληρης φ/β εγκατάστασης ή και ενός ηλιακού στοιχείου, ονομάζονται συχνά βατ αιχμής(w_p ,peak watts) και κιλοβάτ αιχμής (kwp). Δηλαδή, χρησιμοποιείται ο ίδιος όρος και συμβολισμός (άλλωστε ουσιαστικά είναι το ίδιο πράγμα),όπως για το μέτρο της επιφάνειας των φ/β στοιχείων που γνωρίσαμε προηγουμένως.

$$P_a \text{ (kwp)} = 1 \text{ (kw/m}^2) \times S \text{ (m}^2) \times n_p \quad (3.9)$$

Στην περίπτωση, λοιπόν, που γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής P_a ,για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του φ/β πλαισίου ,αντί για την παραπάνω σχέση χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη σχέση:

$$E \text{ (kwh/d)} = \Pi \text{ (kwh/m}^2 \cdot \text{d)} \times \frac{P_a \text{ (kwp)}}{1 \text{ (} \frac{\text{kw}}{\text{m}^2})} \times \sigma_\theta \times \sigma_p \quad (3.10)$$

Για να έχουμε πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς ενός φ/β πλαισίου χρειάζονται:

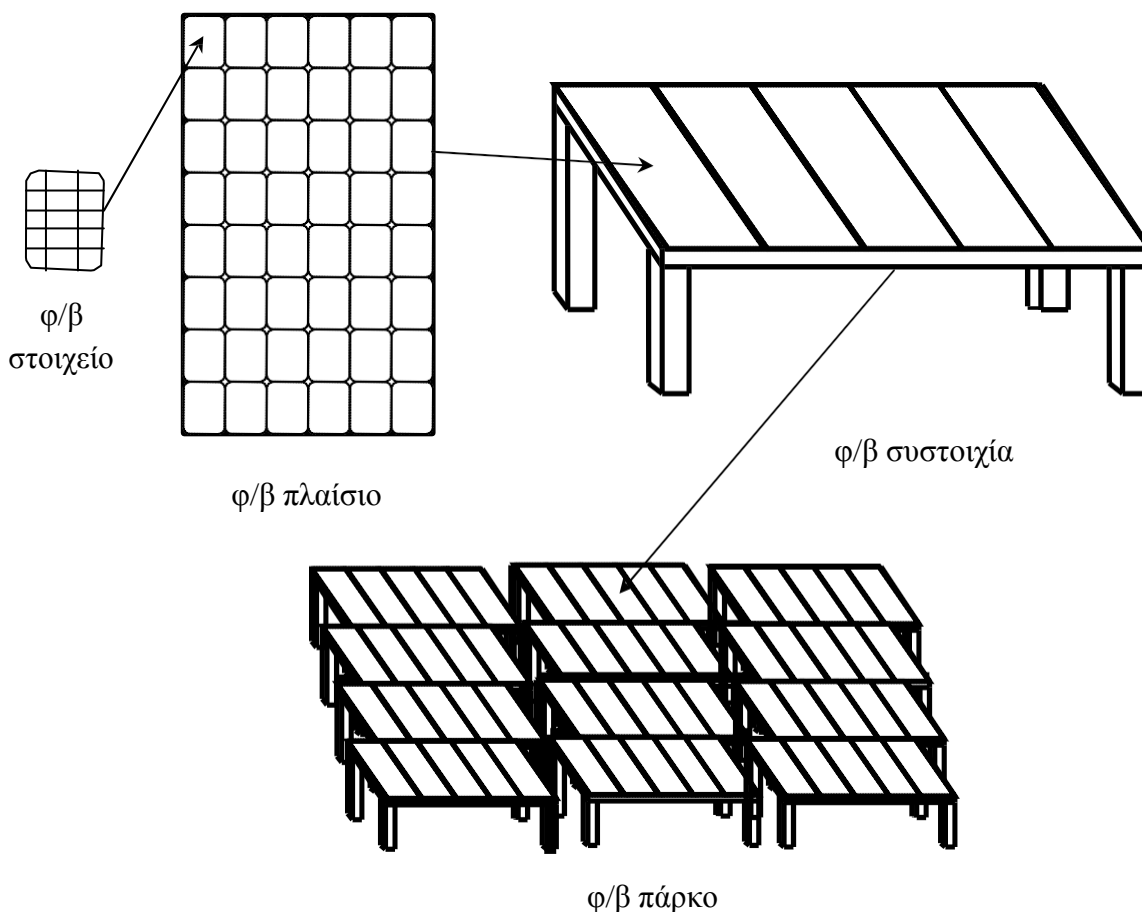
- 1.Ισχύς αιχμής (P_a),σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
- 2.Ανοιχτοκυκλωμένη τάση (V_{oc}),σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
- 3.Βραχυκυκλωμένη ένταση ρεύματος (I_{sc}),σε συμβατική θερμοκρασία-ακτινοβολία.
- 4.Τάση (V_m) στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική ακτινοβολία.
- 5.Ένταση ρεύματος (I_m),στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
- 6.Συντελεστής πλήρωσης (FF),που ορίζεται ως ο λόγος $\frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}}$
- 7.Συντελεστής απόδοσης (η_p),σε συμβατική θερμοκρασία και συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης (σ_θ)
- 8.Συντελεστής κάλυψης (σ_κ)
- 9.Διηλεκτρική αντοχή, δηλαδή η ελάχιστη τάση που προκαλεί ηλεκτρική διάσπαση ανάμεσα στα ηλιακά στοιχεία και στο μεταλλικό περίβλημα του φ/β πλαισίου.

3.3.5 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 σε πλαίσια τα να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες 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 3.6.



Σχήμα 3.6 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. 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.

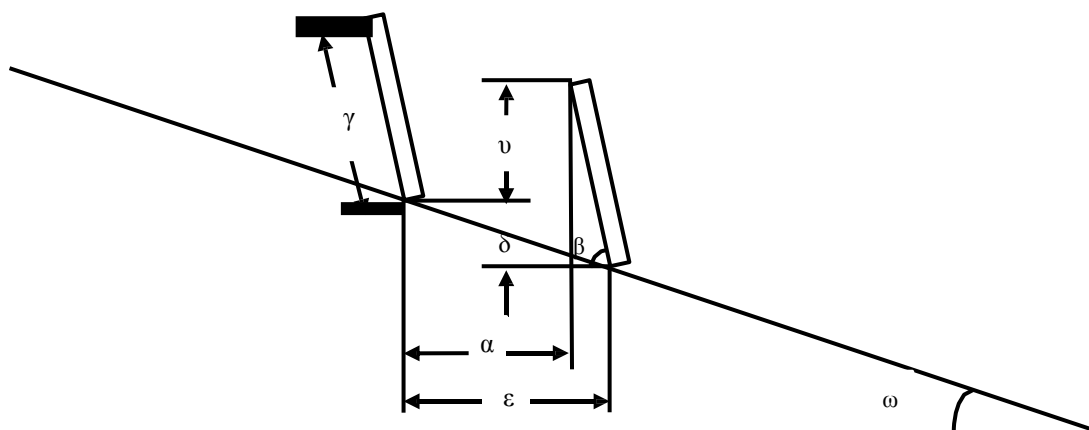
Συστοιχίες με ανακλαστήρες/κάτοπτρα

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.

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 ακτινών, 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.

3.3.6 Βέλτιστη διάταξη σταθερών συστοιχιών



Σχήμα 3.7 Διάταξη φ/β συστοιχιών σε πλαγία κλίσης $\kappa = \tan\omega$, με απόλυτα νότιο προσανατολισμό.

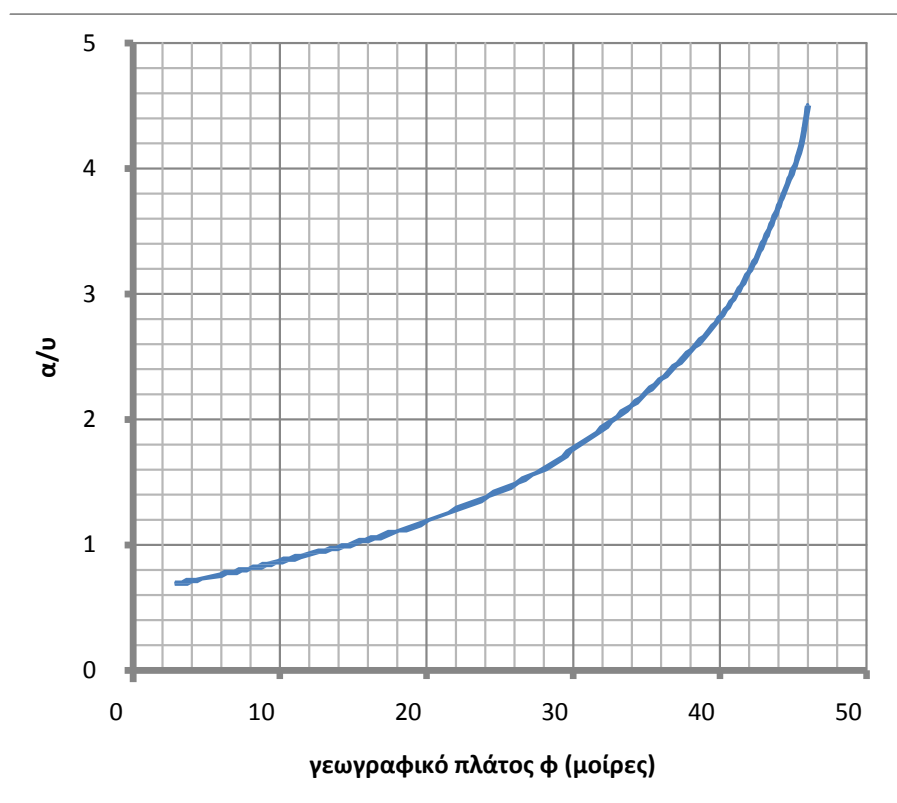
Καταρχήν είναι πολύ σημαντικό σε μια φ/β εγκατάσταση, οι φ/β συστοιχίες να μην σκιάζονται από παρακείμενα εμπόδια (δέντρα, κτίρια, βουνά κλπ.). Σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος ϕ , η προϋπόθεση ανοιχτού ορίζοντα θεωρείται ότι εξασφαλίζεται όταν η γωνία του ύψους (β_ϵ) των γειτονικών συστοιχιών,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

$$\beta_\epsilon \leq 48^\circ - \phi \quad (3.11)$$

Στο σχήμα 3.7 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 3.8. Το διάγραμμα προέρχεται από την εταιρία Monegon και είναι εμπειρικό. Συνδέει τον λόγο της ελεύθερης απόστασης α προς το ύψος των συστοιχιών υ, με το γεωγραφικό πλάτος φ του τόπου (Σχήμα 3.8).

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

$$\frac{\alpha}{\upsilon} = 0,0042 \varphi^2 - 0,1661\varphi + 2,8653 \quad (3.12)$$



Σχήμα 3.8 Η καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης α 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 3.7 και τη τιμή από το διάγραμμα Monegon:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = \gamma \sin \beta - \delta \\ \frac{\alpha}{u} = \text{σταθερα διαγραμματος Monegon} \\ \varepsilon = \alpha + \cos \beta \\ \kappa = \tan \omega = \frac{\delta}{\varepsilon} \end{array} \right.$$

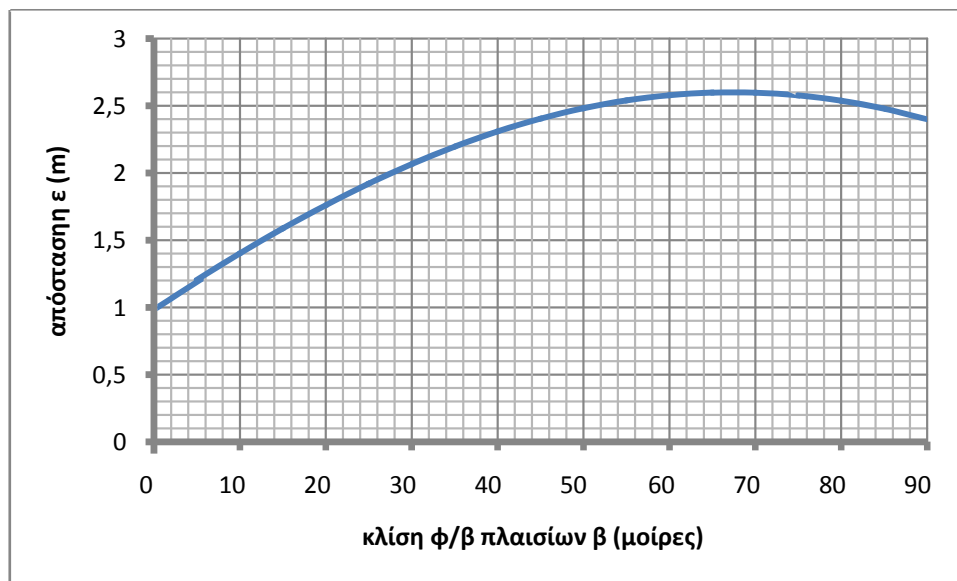
Πρέπει να τονιστεί ότι η κλίση κ μπορεί να πάρει και αρνητικές τιμές, όταν έχουμε υπερύψωση της νότιας πλευράς, που συνεπάγεται και αρνητικές τιμές της παραμέτρου δ .

Επιλύοντας το παραπάνω σύστημα καταλήγουμε στη σχέση:

$$E = \gamma \cdot \frac{\frac{\alpha}{\beta} \sin \beta + \cos \beta}{1 + \frac{\alpha}{u} \cdot \kappa} \quad (3.13)$$

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

Στο παρακάτω σχήμα 3.9 φαίνεται η μεταβολή της απόστασης ε σε σχέση με την κλίση της συστοιχίας.



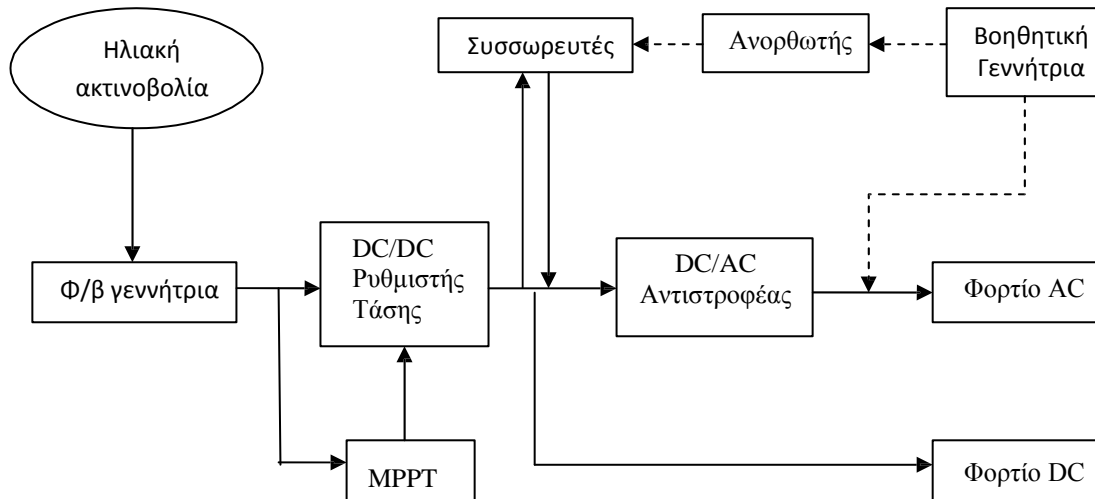
Σχήμα 3.9 Καμπύλη απόστασης ε σε σχέση με την κλίση των συστοιχιών, για συστοιχίες με ύψος 1m και μηδενική κλίση εδάφους.

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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια επισκόπηση των συστατικών που συνθέτουν ένα πλήρες φωτοβολταϊκό σύστημα, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως την κατανάλωση των φορτίων.

4.1 ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ



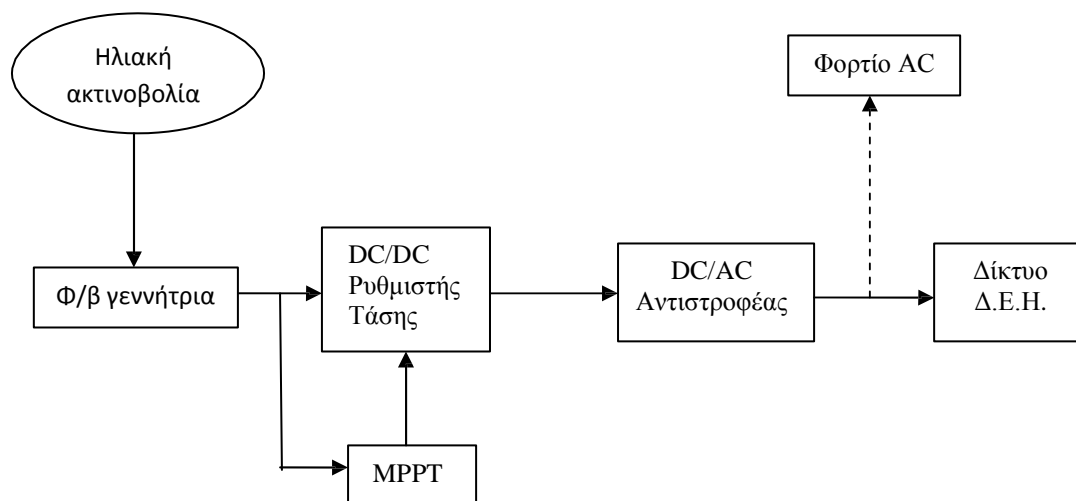
Σχήμα 4.1 Απλοποιημένο διάγραμμα αυτόνομου φ/β συστήματος. Εάν χρησιμοποιηθεί μια βοηθητική πηγή ενέργειας, όπως φαίνεται στο σχήμα με την διακεκομμένη γραμμή, τότε το σύστημα καλείται υβριδικό φ/β σύστημα.

Η συνηθέστερη, άλλα και η πληρέστερη ,εφαρμογή της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η κατασκευή αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Δηλαδή εγκαταστάσεων 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 ηλεκτρική ενέργεια ή να στέλνουν την ενδεχόμενη περίσσεια της παραγόμενης φ/β ηλεκτρικής ενέργειας. Το βασικό χαρακτηριστικό ενός αυτόνομου φ/β συστήματος, όπως άλλωστε κάθε φ/β εγκατάστασης, είναι η φ/β γεννήτρια, στους ηλιακούς συλλέκτες της οποίας γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Όπως δείχνει και το (Σχήμα 4.1),το σύστημα περιλαμβάνει επίσης ,ανάλογα με το είδος της κατανάλωσης και τον βαθμό της απαιτούμενης αξιοπιστίας, συσσωρευτές για την αποθήκευση της περίσσειας της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανεπαρκής ή ανύπαρκτη, διατάξεις για τη ρύθμιση και τη μετατροπή της τάσης και τη ρύθμιση της ισχύος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος, άλλες διατάξεις προστασίας και ελέγχου και συχνά, μια βοηθητική γεννήτρια, συνήθως ένα ηλεκτροπαραγωγικό ζεύγος που να λειτουργεί με καύση βενζίνης ή πετρελαίου ντίζελ, για την αντιμετώπιση έκτακτων περιστάσεων (συντήρηση ή βλάβη του συστήματος , τρο-

φοδότηση πρόσθετων φορτίων ,επικουρική λειτουργία σε απρόβλεπτα μεγάλες περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας κλπ.). 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 ΔΙΑΣΥΝΔΕΜΕΝΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ



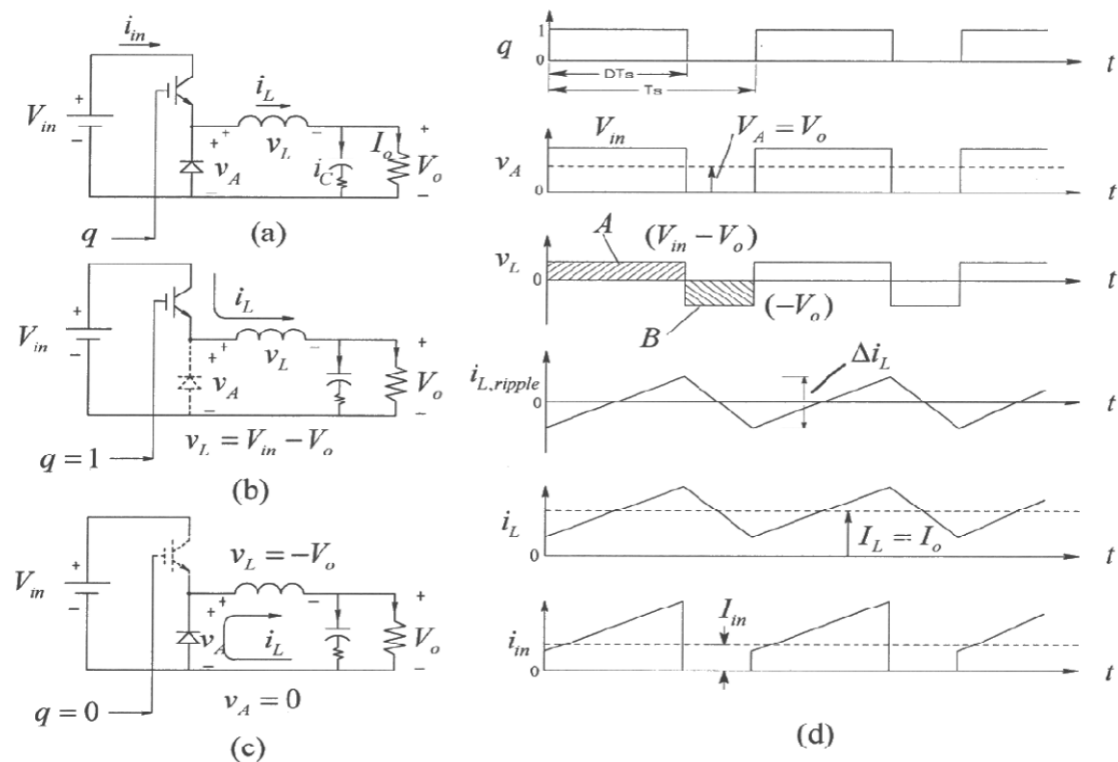
Σχήμα 4.2 Απλοποιημένο διάγραμμα διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος

Το διασυνδεδεμένο φ/β σύστημα αποτελείται από μία συστοιχία φ/β στοιχείων ,η οποία μέσω ενός αντιστροφέα είναι διασυνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο. Συνήθως σε εφαρμογές μικρής εγκατεστημένης ισχύος, όπου τα φωτοβολταϊκά πρέπει να καλύψουν συγκεκριμένο φορτίο, το δίκτυο χρησιμοποιείται ως μέσο για την προσωρινή αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Σε κεντρικά συστήματα μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος, η παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά ενέργεια παρέχεται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσωπική όπως και για επαγγελματική χρήση (ιδιωτικές κατοικίες, γραφεία, εργοστάσια, σταθμούς παραγωγής ρεύματος κλπ.).Στο σχήμα 4.2 φαίνεται μια τυπική διάταξη ενός διασυνδεδεμένου συστήματος. Ο αντιστροφέας μετατρέπει το DC ρεύμα σε AC,το οποίο ικανοποιεί τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού δικτύου (σε ένταση ,συχνότητα κλπ.).Στη συνέχεια τροφοδοτείται ,μέσω κατάλληλων διακοπών ,στο κεντρικό δίκτυο, είτε σε επίπεδο διανομής για τα μικρά , οικιακά έργα, είτε στη μέση τάση για τα μεγαλύτερα έργα σε γήπεδα και αγροτεμάχια.

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 (a) Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού, (b) Διακόπτης κλειστός, (c) Διακόπτης ανοιχτός, (d) Κυματομορφές για συνεχόμενο ρεύμα εξόδου.

Το κύκλωμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού φαίνεται στο σχήμα 4.3(a). Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η διόδος 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 έξοδο του συνεχής 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:

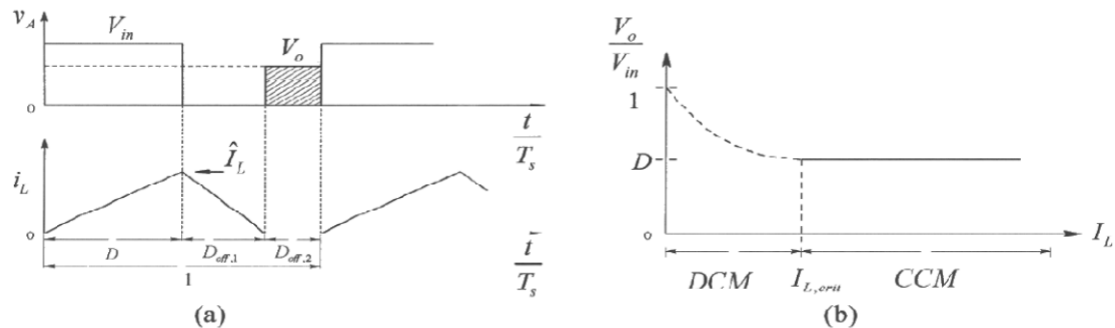
$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (4.2)$$

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:

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

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).

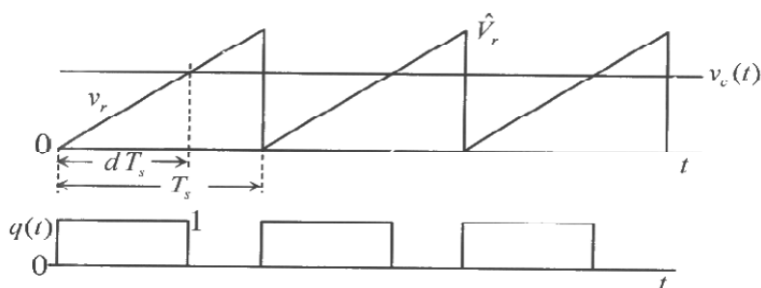
Έλεγχος με την τεχνική PWM

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:

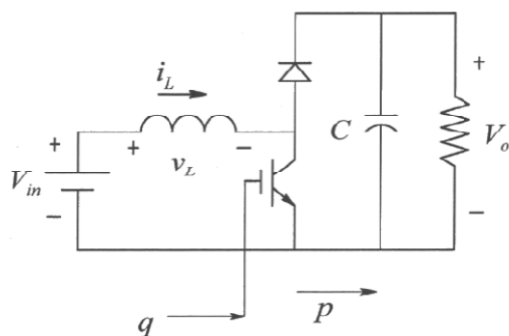
$$D = \frac{V_c}{V_r} \quad (4.4)$$

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 .



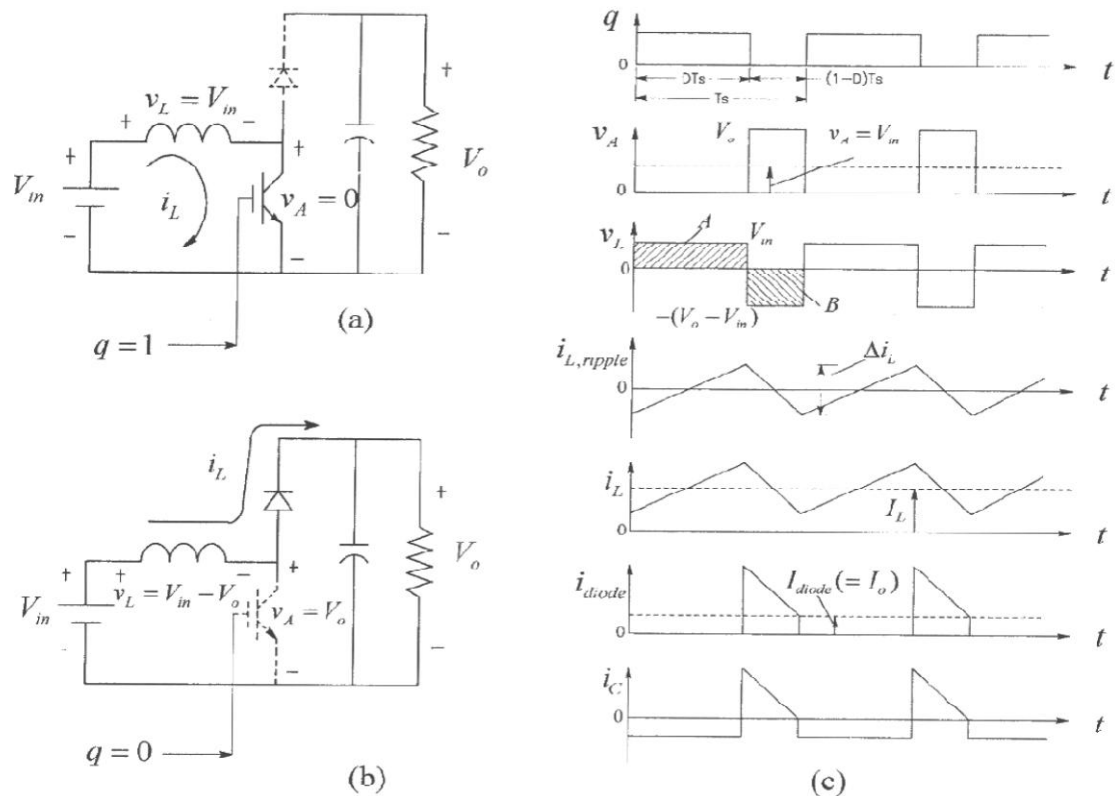
Σχήμα 4.5 Έλεγχος της τάσης εξόδου με την τεχνική PWM.

Μετατροπέας Ανύψωσης (Step-Up Converter ή Boost Converter)

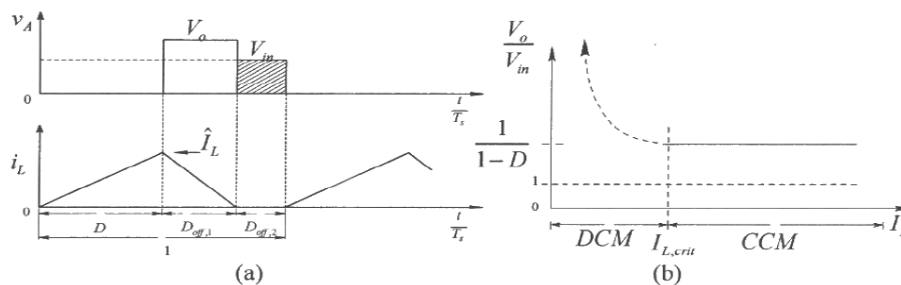


Σχήμα 4.6 Μετατροπέας ανύψωσης.

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 διάδος 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 διάοδο 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:

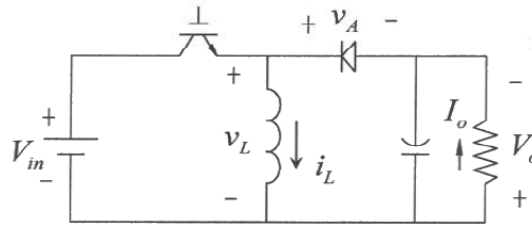
$$V_o = \frac{ton+toff}{toff} V_{in} = \frac{T_s}{T_s-ton} = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (4.5)$$

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:

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

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)).

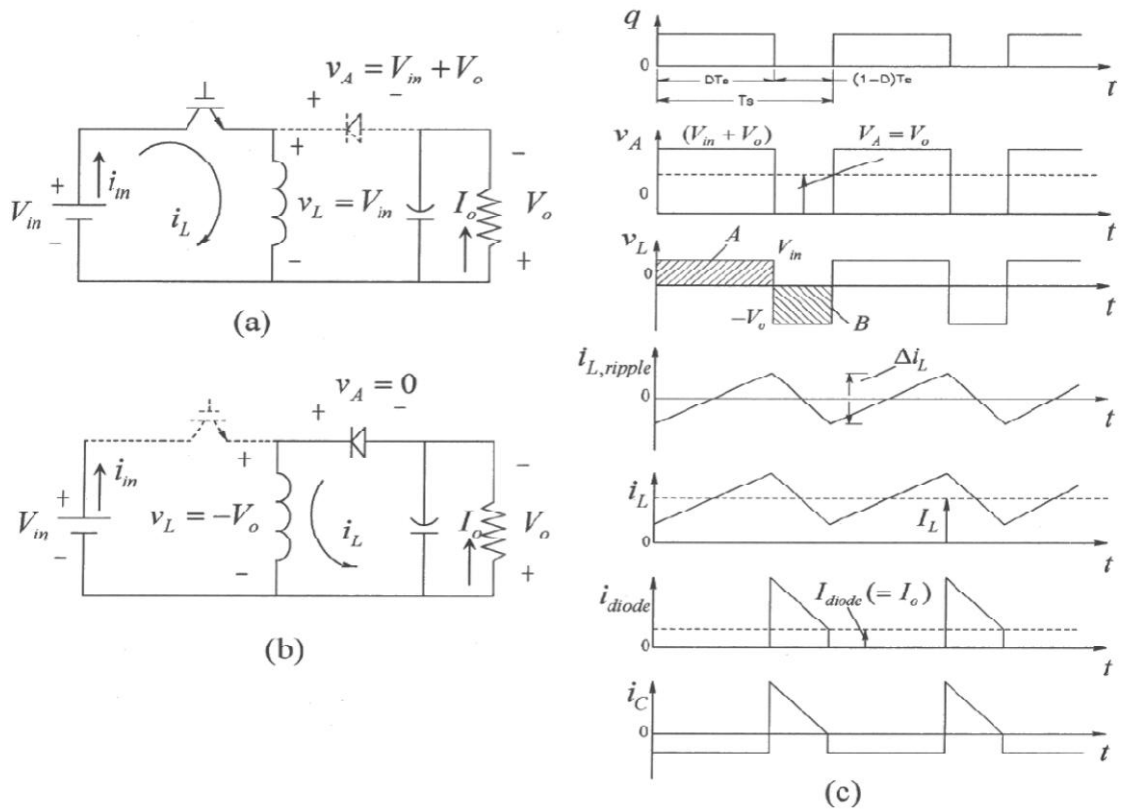
Η σχέση που συνδέει την μέση τιμή της τάσης εισόδου με την τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει:

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

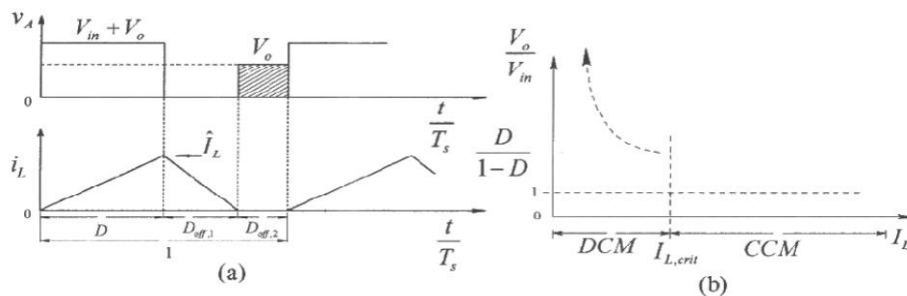
όπου παρατηρούμαι ότι η τάση εξόδου μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη από την τάση εισόδου ανάλογα με την τιμή του συντελεστή D .

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:

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



Σχήμα 4.10 Μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού. (α) Διακόπτης κλειστός, (β) Διακόπτης ανοιχτός, (γ) Κυματομορφές για συνεχόμενο ρεύμα εξόδου.

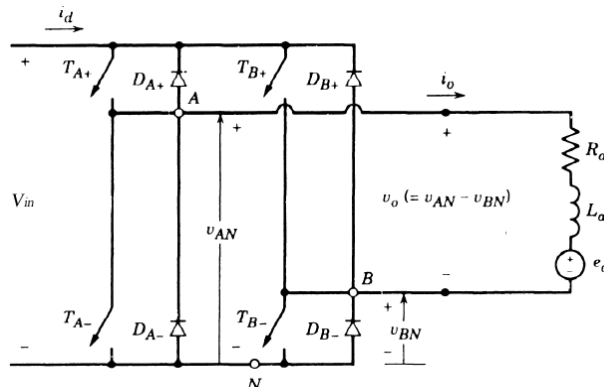


Σχήμα 4.11 Μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού στη κατάσταση διακοπόμενου ρεύματος (DCM).

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 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ (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.

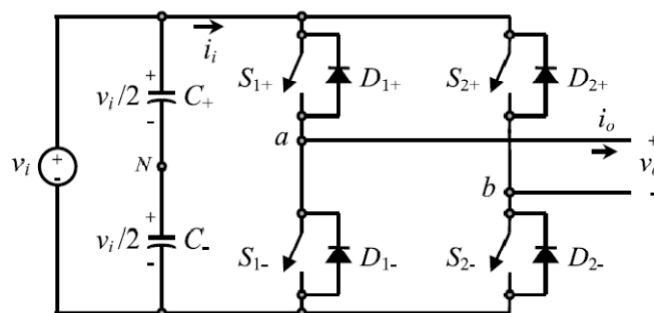
4.4.1 Μονοφασικός αντιστροφέας

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 4.13).

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 4.13 Τοπολογία μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας ελεγχόμενου από πηγή τάσης.

Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με την τεχνική SPWM, δημιουργούνται δύο κυματομορφές. Μια τριγωνική κυματομορφή πλάτους v_{\otimes} , 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_{\otimes} 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:

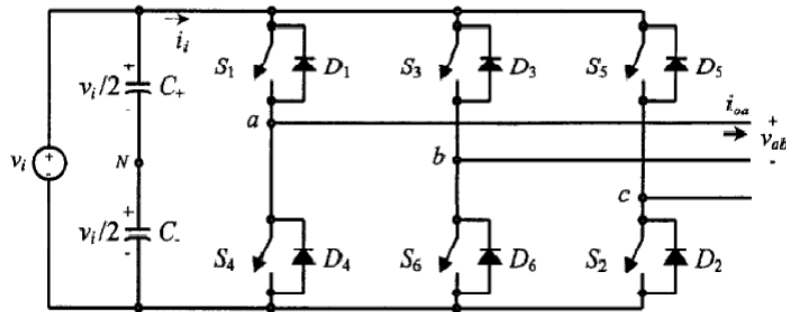
$$m_f = \frac{f_a}{f_c} \quad (4.9)$$

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

$$m_a = \frac{v_C}{v_\Delta} \quad (4.10)$$

4.4.2 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 4.14, ενώ οι επιτρεπόμενοι συνδυασμοί των καταστάσεων των διακοπών δίνονται στον πίνακα 4.2.



Σχήμα 4.14 Τοπολογία τριφασικού αντιστροφέα ελεγχόμενου από πηγή τάσης.

Παρατηρούμε 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 4.1 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.

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.

Συγκεκριμένα:

$$h = l * m_f \pm k \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad (4.10)$$

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:

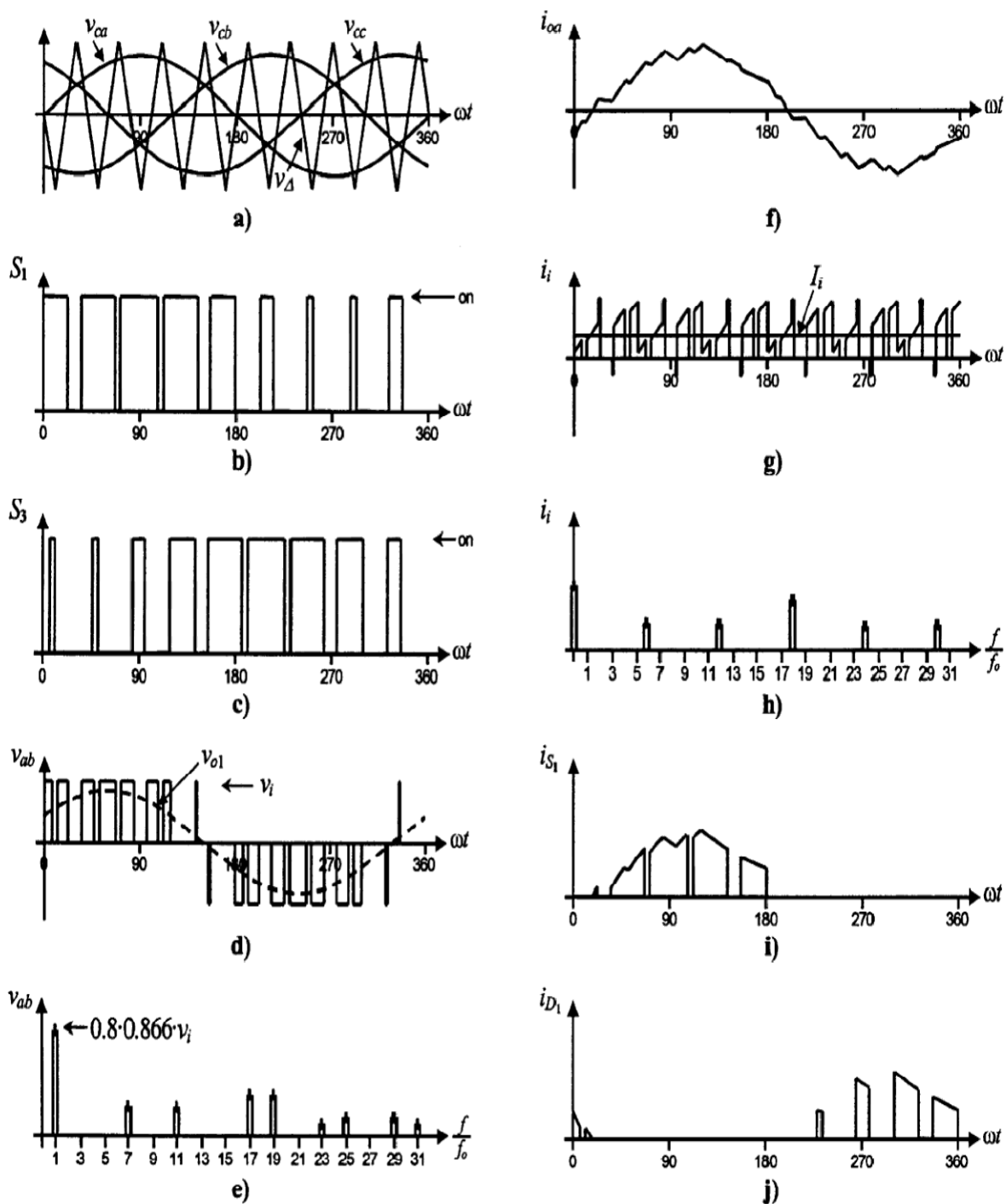
$$m_f \pm 2, m_f \pm 4, \dots, 2m_f \pm 1, 2m_f \pm 5, \dots, 3m_f \pm 2, 3m_f \pm 4, \dots, \text{κτλ.} \quad (4.11)$$

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

$$V_{ab,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} m_a v_i \quad (4.12)$$

Ενώ στην περίπτωση της υπερδιαμόρφωσης προκύπτει:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} v_i < V_{ab,1} < \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} v_i \quad (4.13)$$



Σχήμα 4.15 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 .

4.4.3 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 αντιστροφέας 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 αντιστροφέα. 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 αντιστροφέας 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 αντιστροφέα 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 αντιστροφέα, 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.

4.5 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Ορισμοί και Βασικές Έννοιες

Σημείο Σύνδεσης στο Δίκτυο (ΣΣΔ)

Είναι το σημείο του δικτύου Μέσης Τάσης (MT) όπου συνδέονται οι εγκαταστάσεις του παραγωγού και βρίσκεται πάντα στην έξοδο των εγκαταστάσεων αυτών. Στο ΣΣΔ εγκαθίσταται η διάταξη μέτρησης της ενέργειας την οποία απορροφούν οι εγκαταστάσεις του παραγωγού από το δίκτυο. Η ενέργεια που αποδίδει ο παραγωγός στο δίκτυο και αυτή που απορροφά από το δίκτυο για τις ιδιοκαταναλώσεις του υποσταθμού του μεταφέρονται πάντα μέσω της ίδιας παροχής. Το ΣΣΔ αποτελεί το φυσικό όριο διαχωρισμού αρμοδιοτήτων και ευθύνης μεταξύ ΔΕΗ και παραγωγού.

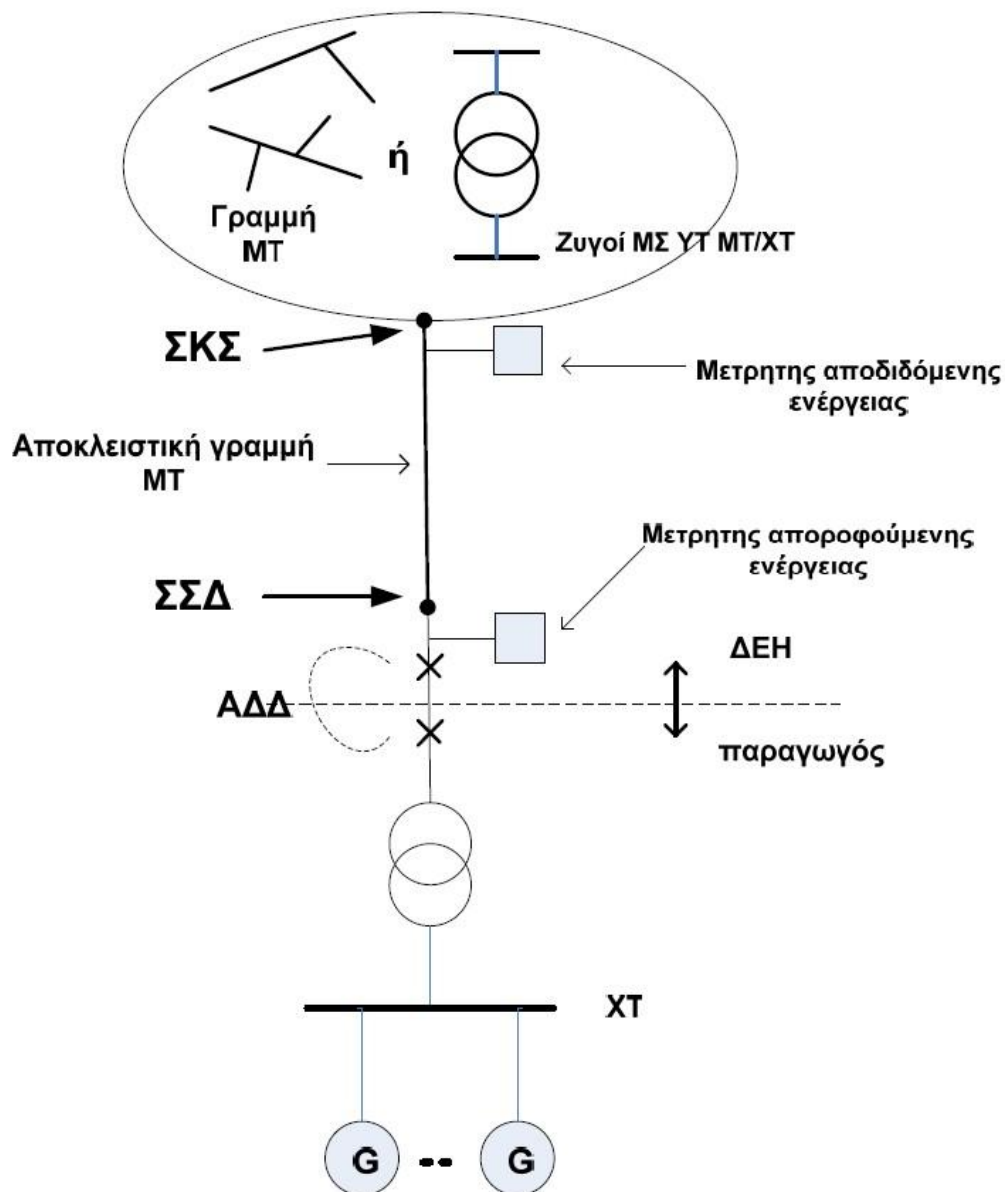
Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ)

Είναι το πλησιέστερο προς τις εγκαταστάσεις του παραγωγού σημείο σύνδεσης του δικτύου, στο οποίο συνδέεται (ή μπορεί να συνδεθεί μελλοντικά) άλλος χρήστης (καταναλωτής ή παραγωγός). Είναι δηλαδή το σημείο στο οποίο το διασυνδεδετικό δίκτυο του παραγωγού συναντά το κοινόχρηστο δίκτυο. Το ΣΚΣ αποτελεί το σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό των προκαλούμενων επιπτώσεων στη λειτουργία του δικτύου από την εγκατάσταση παραγωγής. Γενικά το ΣΚΣ και το ΣΣΔ μπορεί να συμπίπτουν αλλά μπορεί να είναι και διαφορετικά. Για παράδειγμα στην περίπτωση παραγωγών που συνδέονται στη MT μέσω αποκλειστικής γραμμής το ΣΣΔ και το ΣΚΣ είναι διαφορετικά. Το ΣΣΔ λαμβάνεται στο πλησιέστερο προς τον παραγωγό άκρο της γραμμής ενώ το ΣΚΣ λαμβάνεται στο άλλο άκρο της γραμμής.

Αυτόματος Διακόπτης Διασύνδεσης (ΑΔΔ)

Είναι το στοιχείο εκείνο που επιτρέπει τη ζεύξη ή απομόνωση των εγκαταστάσεων παραγωγής από το δίκτυο. Ο ΑΔΔ ελέγχεται μέσω κατάλληλου εξοπλισμού (πχ ηλεκτρονόμων προστασίας). Να πούμε εδώ ότι ο ΑΔΔ μπορεί να εμπίπτει είτε στην αρμοδιότητα της ΔΕΗ με έξοδα του παραγωγού, κάτι που συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις, είτε στην αρμοδιότητα του παραγωγού με τις ρυθμίσεις που απαιτεί η ΔΕΗ.

Στο σχήμα 4.16 αποσαφηνίζονται οι έννοιες του ΣΣΔ και του ΣΚΣ σε περίπτωση διαμόρφωσης σύνδεσης με αποκλειστική γραμμή. Φαίνονται επίσης τα όρια ευθύνης παραγωγού και ΔΕΗ.



Σχήμα 4.16 Οι έννοιες του ΣΣΔ και του ΣΚΣ σε περίπτωση διαμόρφωσης σύνδεσης με αποκλειστική γραμμή και τα όρια ευθύνης παραγωγού και ΔΕΗ.

Εγκατάσταση Παραγωγής

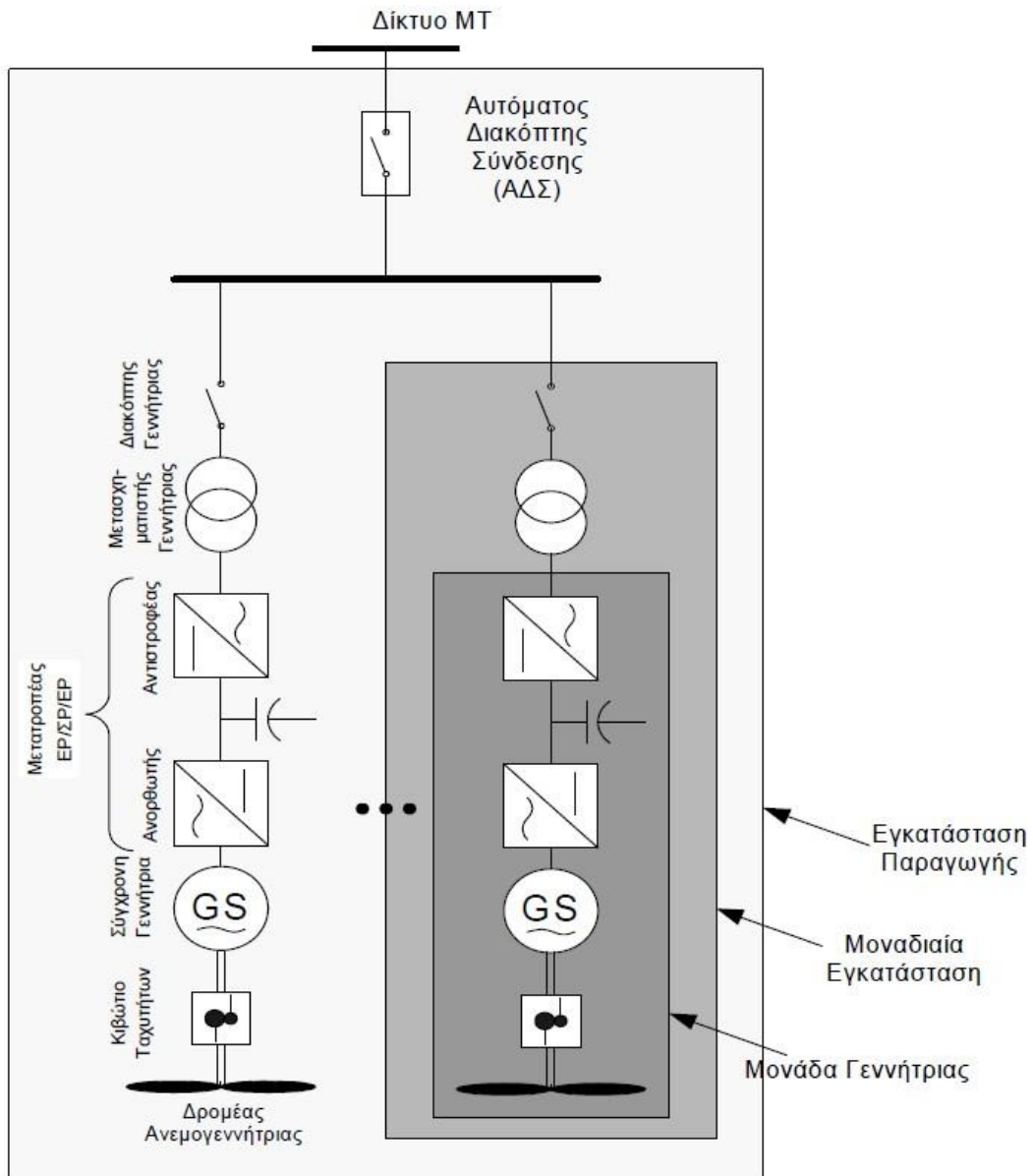
Είναι το τμήμα της εγκατάστασης στο οποίο υπάρχουν μια ή περισσότερες μονάδες γεννητριών για παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων και όλων των απαιτούμενων ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών. Μια εγκατάσταση χρήστη του δικτύου μπορεί να αποτελείται αποκλειστικά από την εγκατάσταση παραγωγής ή να περιλαμβάνει και άλλα φορτία.

Μοναδιαία Εγκατάσταση

Το τμήμα της εγκατάστασης παραγωγής που περιλαμβάνει μια μονάδα γεννήτριας συμπεριλαμβανομένων και όλων των απαιτούμενων για τη λειτουργία της ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών. Όρια της μοναδιαίας εγκατάστασης είναι το σημείο στο οποίο είναι συνδεδεμένη με άλλη μοναδιαία εγκατάσταση ή με την υπόλοιπη εγκατάσταση του χρήστη ή με το δίκτυο. Η εγκατάσταση παραγωγής είναι δυνατόν να αποτελείται αποκλειστικά από μια μοναδιαία εγκατάσταση.

Μονάδα Γεννήτριας

Το τμήμα της μοναδιαίας εγκατάστασης το οποίο παράγει ενέργεια συμπεριλαμβανομένου και του μετατροπέα ισχύος.
Στο σχήμα 4.17 διακρίνονται τα όρια της εγκατάστασης παραγωγής, της μοναδιαίας εγκατάστασης και της μονάδας γεννήτριας σε ένα σύστημα με ανεμογεννήτριες συνδεδεμένο στη μέση τάση.



Σχήμα 4.17 Εγκατάσταση Ανεμογεννήτριας που συνδέεται με το Δίκτυο MT.

Γενικές Προϋποθέσεις για τη Σύνδεση

Σε γενικές γραμμές σε ότι αφορά κατασκευαστικά ζητήματα αλλά και σε ζητήματα διαμόρφωσης της σύνδεσης των εγκαταστάσεων διανεμημένης παραγωγής, εφαρμόζονται κανόνες ανάλογοι εκείνων που ισχύουν στη σύνδεση καταναλωτών αντίστοιχου ισχύος.

Τρόπος σύνδεσης

Βασική αρχή για την επιλογή του τρόπου σύνδεσης μιας εγκατάστασης κατανεμημένης παραγωγής είναι ότι αυτή θα πρέπει να γίνεται με τον οικονομικότερο τρόπο χωρίς όμως να παραβιάζονται τα όρια διαταραχών όπως αυτά καθορίζονται από τους αντίστοιχους κανονισμούς της ΔΕΗ όπως αντίστοιχα ισχύει και για τις εγκαταστάσεις των καταναλωτών. Γενικά για τις εγκαταστάσεις κατανεμημένης παραγωγής (ΚΠ) ενδείκνυται να συνδέονται κατά το δυνατόν πιο κοντά προς τις καταναλώσεις, ώστε να περιορίζονται οι ροές επί των γραμμών και των μετασχηματιστών (Μ/Σ) του δικτύου, χωρίς βέβαια να δημιουργούνται καταστάσεις εκτός των επιτρεπόμενων ορίων αλλά αντίθετα να υπάρχει βελτίωση των τάσεων και ελαχιστοποίηση των απωλειών.

Βασικό κριτήριο για την επάρκεια του δικτύου και του τρόπου σύνδεσης αποτελεί το μέγεθος της εγκατάστασης καθώς και οι υφιστάμενες συνθήκες της περιοχής όπως για παράδειγμα κατοικημένη ή όχι περιοχή, προοπτική σύνδεσης και άλλων εγκαταστάσεων στο προσεχές μέλλον κλπ. Έτσι για ισχύς μεγαλύτερες των 100 kW ως 20 MW η εγκατάσταση θα πρέπει να συνδέεται στο δίκτυο μέσης τάσης. Η εξέταση για τον προσδιορισμό του ΣΚΣ πρέπει να αρχίζει από το πιο κοντινό στην εγκατάσταση σημείο του δικτύου και βαθμιαία να εξετάζεται η δυνατότητα σύνδεσης σε σημεία πλησιέστερα προς τον υποσταθμό (Υψηλής Τάσης/Μέσης Τάσης, ΥΤ/ΜΤ), δηλαδή σε σημεία με υψηλότερη στάθμη βραχυκύκλωσης. Τέτοιου είδους μελέτη είναι εκτός των ορίων της παρούσας διπλωματικής.

Για μικρές σχετικά ισχύεις μέχρι 5MW θα πρέπει να εξετάζεται η δυνατότητα σύνδεσης σε υφιστάμενη γραμμή. Εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος μέχρι 8MW μπορεί να συνδέονται με αποκλειστική γραμμή στους ζυγούς ΜΤ του πλησιέστερου υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ.

Για εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος μέχρι 20MW πρέπει αρχικά να εξετάζεται από τη ΔΕΗ η δυνατότητα σύνδεσης σε υφιστάμενο ή νέο υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ μέσω αποκλειστικού δικτύου. Η εγκατάσταση ιδιαίτερου μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ (σε υφιστάμενο ή νέο υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ) θα επιδιώκεται για ισχύεις άνω των 10 MW.

Γενικά περί διατάξεων ζεύξης και προστασίας

Οι βασικές αρχές για τον καθορισμό και επιλογή των διατάξεων ζεύξης και προστασίας είναι οι ακόλουθες.

Το προσωπικό της ΔΕΗ θα πρέπει να έχει δυνατότητα εύκολης πρόσβασης και να μπορεί να πραγματοποιείται η εξασφαλισμένη απομόνωση της εγκατάστασης από το δίκτυο, ώστε να είναι δυνατή η ασφαλής και απρόσκοπτη εκτέλεση των εργασιών σε αυτό.

Τα εγκαθιστάμενα μέσα προστασίας πρέπει να εξασφαλίζουν την απομόνωση της εγκατάστασης σε περίπτωση ανωμαλιών στο δίκτυο ώστε αφενός να αποφεύγονται

βλάβες του εξοπλισμού της εγκατάστασης αφετέρου να εξασφαλίζεται ότι δε θα δημιουργηθούν επικίνδυνες καταστάσεις για τους λοιπούς χρήστες του δικτύου. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να εξετάζονται οι λειτουργίες των προστασιών στις συνηθέστερες περιπτώσεις ανωμαλιών όπως βραχυκυκλώματα στο εσωτερικό της εγκατάστασης και στο δίκτυο, η απομονωμένη λειτουργία της εγκατάστασης κλπ.. Τα συγκεκριμένα θα αναλυθούν παρακάτω πιο εμπεριστατωμένα.

Διατάξεις Ζεύξης και Προστασίας

Προϋποθέσεις για τις διατάξεις ζεύξης και προστασίας

Γενικά οι διατάξεις ζεύξης και προστασίας πρέπει να εξασφαλίζουν τα ακόλουθα:

A. Τη δυνατότητα χειροκίνητης ζεύξης απόζευξης ολόκληρης της εγκατάστασης από το δίκτυο ή επιμέρους τμημάτων αυτής. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού αρκεί η διάταξη ζεύξης να διαθέτει κατάλληλο στοιχείο ζεύξης δηλαδή τουλάχιστον διακόπτη φορτίου.

B. Την αυτόματη απομόνωση από το δίκτυο ολόκληρης της εγκατάστασης ή τμημάτων αυτής, σε περίπτωση σφάλματος στοιχείων του δικτύου ή της εγκατάστασης. Για το σκοπό αυτό πρέπει να υπάρχει αυτόματος διακόπτης διασύνδεσης ο οποίος να είναι εφοδιασμένος με κατάλληλες διατάξεις ελέγχου και προστασίας. Αυτές πρέπει ρυθμίζονται έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να συνεργάζονται επιλογικά με προηγούμενα μέσα προστασίας του δικτύου. Πρέπει για παράδειγμα να υπάρχει επιλογική προστασία με τα διακοπτικά στοιχεία της ΔΕΗ στη αναχώρηση της γραμμής ΜΤ. Η ΔΕΗ προτείνει για το σκοπό αυτό τον εφοδιασμό των αυτόματων διακοπών με κατάλληλους ηλεκτρονόμους υπέρεντασης. Κατά κανόνα το ρεύμα σφάλματος από τη μεριά του δικτύου είναι αρκετά μεγάλο ώστε το άνοιγμα των αντίστοιχων διακοπών να είναι εξασφαλισμένο. Αντίθετα το ρεύμα σφάλματος από τη μεριά της εγκατάστασης είναι συχνά ανεπαρκές για να εξασφαλίσει το άνοιγμα των διακοπών. Για το λόγο αυτό η απόζευξή της εγκατάστασης για σφάλματα του Δικτύου επιτυγχάνεται συνήθως μέσω των προστασιών που σχετίζονται με τις απαιτήσεις Γ, Δ, Ε. Αυτό έχει να κάνει και με προστασία έναντι ασύμμετρων σφαλμάτων.

Γ. Την πρόληψη ανώμαλων λειτουργικών καταστάσεων και βλαβών στοιχείων της εγκατάστασης σε περίπτωση διαταραχών του δικτύου (πχ βυθίσεις και επαναφορά της τάσης). Η επίτευξη του Γ εξασφαλίζεται συνήθως με την προστασία κάθε μονάδας.

Δ. Την αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας της εγκατάστασης και τμήματος του δικτύου απομονωμένου από το υπόλοιπο Σύστημα (αποφυγή δηλαδή νησιδοποιημένης λειτουργίας) ή και μόνης της εγκατάστασης εφόσον δεν προβλέπεται από το σχεδιασμό της. Για το σκοπό αυτό απαιτείται τουλάχιστον η εγκατάσταση ηλεκτρονόμων ορίων τάσης και συχνότητας στον διακόπτη διασύνδεσης. Οι ηλεκτρονόμοι ορίων τάσης συμβάλλουν και στην απομόνωση της εγκατάστασης από το δίκτυο σε περιπτώσεις σφαλμάτων στη μεριά του δικτύου αφού τότε παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις των τάσεων από τις ονομαστικές τους τιμές. Οι ηλεκτρονόμοι ορίων συχνότητας-σε συνδυασμό με την επιτήρηση των ορίων τάσης-αφορούν κυρίως την ανίχνευση της νησιδοποίησης αφού μετά την αποσύνδεση παρουσιάζονται έντονες μεταβολές της συχνότητας. Σε ειδικές περιπτώσεις ιδίως μεγάλων εγκαταστά-

σεων αν κριθεί αναγκαίο μπορεί να είναι σκόπιμη και η εγκατάσταση προστασιών που να εξασφαλίζουν πληρέστερα την απομόνωση της εγκατάστασης σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος στο δίκτυο, έστω και σε σχετικά μεγάλους χρόνους. Κάτι τέτοιο αποφασίζεται σε συνεργασία του παραγωγού και της ΔΕΗ.

Ε. Τον κατά το δυνατόν περιορισμό της άσκοπης αποσύνδεσης της εγκατάστασης από το δίκτυο, η οποία αποσύνδεση, εκτός από οικονομικές επιπτώσεις στον παραγωγό, μπορεί να δημιουργεί και προβλήματα ευστάθειας στο Σύστημα. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η κατάλληλη ρύθμιση ορίων και χρόνων διέγερσης όλων των παραπάνω προστασιών για να υπάρχει η ορθή επιλογική συνεργασία με προηγούμενα μέσα προστασίας του Δικτύου.

Ρυθμίσεις προστασιών

Οι παρακάτω ρυθμίσεις αφορούν στο μέσο προστασίας που επιφορτίζεται με τον ρόλο του ΑΔΔ και καθορίζονται από τη ΔΕΗ με κριτήριο την προστασία του Δικτύου από ανώμαλες λειτουργικές καταστάσεις. Οι επιλογές και ρυθμίσεις των μέσων που αφορούν την προστασία της εγκατάστασης κατανεμημένης παραγωγής καθορίζονται από τον ίδιο τον παραγωγό (σχήμα 4.18).

1. Το σύστημα προστασίας του ΑΔΔ πρέπει να περιλαμβάνει και προστασίες ορίων τάσεως και συχνότητας, δηλαδή προστασίες έναντι υπότασης/υπέρτασης και υποσυχνότητας/ υπερσυχνότητας. Η επιτήρηση τάσης πρέπει να γίνεται και στις τρεις φάσεις ώστε να ανιχνεύονται ακόμα και μονοφασικές διαταραχές. Η επιτήρηση της συχνότητας αρκεί να γίνεται σε μια μόνο φάση. Στον πίνακα του σχήματος 4.18 που ακολουθεί δίνονται ενδεικτικά περιοχές ρύθμισης των ορίων τάσης και συχνότητας καθώς και τυπικές ρυθμίσεις αυτών. Οι ρυθμίσεις μπορούν να τροποποιούνται με βάση τις εκάστοτε συνθήκες.

Προστασίες της διασύνδεσης με το δίκτυο της ΜΤ					
Τύπος ηλεκτρονόμου	Περιοχή ρύθμισης τιμής διέγερσης	Συνιστώμενη ρύθμιση			
		Τύπου Α		Τύπου Β	
		Τιμή Διέγερσης	Χρονική Καθυστέρηση	Τιμή Διέγερσης	Χρονική Καθυστέρηση
Υπότασης	$0.70 \cdot U_n \div 1.00 \cdot U_n$	$0.85 \cdot U_n$	0.8 s	$0.80 \cdot U_n$	1.2s
Υπέρτασης	$1.00 \cdot U_n \div 1.15 \cdot U_n$	$1.10 \cdot U_n$	0.8 s	$1.15 \cdot U_n$	1.2 s
Υποσυχνότητας	$47 \div 50$ Hz	49.5 Hz	0.8 s	47.5 Hz	1.2 s
Υπερσυχνότητας	$50 \div 52$ Hz	50.5 Hz	0.8 s	51.5 Hz	1.2 s

Σχήμα 4.18 Ρύθμιση των διατάξεων προστασίας σε σύνδεση με την Μ.Τ.

2. Για τον καθορισμό επιλογής του ΑΔΔ και τον καθορισμό και ρύθμιση των προστασιών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η απόκριση τους στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Για σφάλματα εντός της εγκατάστασης ο ΑΔΔ θα πρέπει να ανοίγει πριν από την οριστική θέση εκτός λειτουργίας του προηγούμενου μέσου του δικτύου. Για παράδειγμα ο ΑΔΔ πρέπει να ανοίξει πριν από το διακόπτη στην αναχώρηση της γραμμής αν υπάρξει σφάλμα στην εγκατάσταση παραγωγής. Αυτό επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της χρονικής καθυστέρησης του στοιχείου ελέγχου του ΑΔΔ για προστασία έναντι υπερέντασης βραχυκύκλωσης.
- Για σφάλματα επί της γραμμής σύνδεσης της εγκατάστασης παραγωγής τα οποία πρέπει να απομονώνονται και από την πλευρά της εγκατάστασης με το άνοιγμα του ΑΔΔ (αναφέρεται κυρίως σε αποκλειστικές γραμμές σύνδεσης).
- Για σφάλματα σε άλλα σημεία του δικτύου οπότε θα πρέπει να εξετάζεται το ενδεχόμενο ανεπιθύμητων λειτουργιών των προστασιών.

3. Για εγκαταστάσεις των οποίων η ισχύς δεν είναι αρκετά μεγάλη, και γενικά συνδέονται σε γραμμές ΜΤ που τροφοδοτούν και καταναλωτές, η σύνδεση της εγκατάστασης παραγωγής δεν επιβάλλει την τροποποίηση των υφιστάμενων ρυθμίσεων των προστασιών του Δικτύου, αν και πάντα πρέπει να γίνεται σχετικός έλεγχος.

Σε περιπτώσεις αποκλειστικών γραμμών σύνδεσης η προστασίες επιλέγονται προφανώς με βάση την προστασία της γραμμής σύνδεσης και της εγκατάστασης παραγωγής. Στην Ελλάδα, τουλάχιστον προς το παρόν, το ποσοστό της συνολικής ισχύος της διανεμημένης παραγωγής είναι σχετικά μικρό. Έτσι η απόζευξη της διανεμημένης παραγωγής, λόγω κάποιου σφάλματος ή άλλης διαταραχής της συχνότητας ή της τάσης του Δικτύου, δεν έχει ουσιαστική επίπτωση στο Δίκτυο. Ωστόσο η συχνή θέση εκτός λειτουργίας των εγκαταστάσεων διανεμημένης παραγωγής εκτός των δυσμενών οικονομικών επιπτώσεων για τον παραγωγό συνεπάγεται αυξημένες καταπονήσεις των μονάδων αλλά και αύξηση του εύρους των διαταραχών στο Δίκτυο. Μπορούμε έτσι να διακρίνουμε τις 2 ακόλουθες περιπτώσεις:

- Εγκαταστάσεις κατανεμημένης παραγωγής μικρής ισχύος, μέχρι 5MW, που συνδέονται συνήθως σε υφιστάμενες γραμμές και μπορούν να επιλέγονται οι ρυθμίσεις του τύπου Α του πίνακα του σχήματος 4.18 για τις προστασίες του ΑΔΔ. Τα βασικά χαρακτηριστικά της προστασίας έναντι υπερέντασης του διακόπτη ισχύος (ΔΙ) ΜΤ στην αναχώρηση της γραμμής από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ, θα επιδιώκεται να μην τροποποιούνται. Πρέπει όμως να εξασφαλίζεται η επιλογική συνεργασία του ΑΔΔ με τον ΔΙ. Αυτό γίνεται με την εξασφάλιση της συνεργασίας των Ηλεκτρονόμων Η/Ν υπερέντασης του ΑΔΔ και των Η/Ν Χρονικής Καθυστέρησης (ΧΚ) του ΔΙ της γραμμής ή οποιουδήποτε άλλου μέσου παρεμβάλλεται. Ειδικότερα για την καθυστέρηση ορίων τάσης και συχνότητας η τιμή 0.8 sec προτείνεται για να μην υπάρχει άνοιγμα του ΑΔΔ ακόμα και σε περίπτωση παροδικών σφαλμάτων που εκκαθαρίζονται με την πρώτη ταχύτατη επαναφορά του ΔΙ. Τροποποιήσεις των ρυθμίσεων μπορούν να γίνουν μετά από αίτημα των παραγωγών. Επίσης τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των προστασιών της γραμμής θα πρέπει να τίθενται υπόψη του παραγωγού.

- Εγκαταστάσεις μεγάλης σχετικά ισχύος (>5MW): Συνδέονται με αποκλειστικές γραμμές ΜΤ ή και μέσω ιδιαίτερου μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ. Οι προστασίες του ΑΔΔ μπορεί να ρυθμίζονται σε ευρύτερα όρια, όπως τα Τύπου Β στον πίνακα του σχήματος 4.18. Έτσι περιορίζεται η πιθανότητα αποζεύξεως της εγκαταστάσεως λόγω διαταραχών στο σύστημα ή σε άλλες γραμμές του δικτύου.

Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί (και γενικά ενδείκνυται) να τίθενται εκτός, ή να ρυθμίζονται σε πολύ υψηλές τιμές, οι ηλεκτρονόμοι στιγμιαίας λειτουργίας του ΔΙ στην αναχώρηση της γραμμής ΜΤ στην οποία συνδέεται η εγκατάσταση παραγωγής.

Οποσδήποτε όμως θα εξασφαλίζεται η επιλογική συνεργασία των Η/Ν υπερεντάσεως του ΑΔΔ με τους Η/Ν ΧΚ του Δ/Ι στην αναχώρηση της Γραμμής.

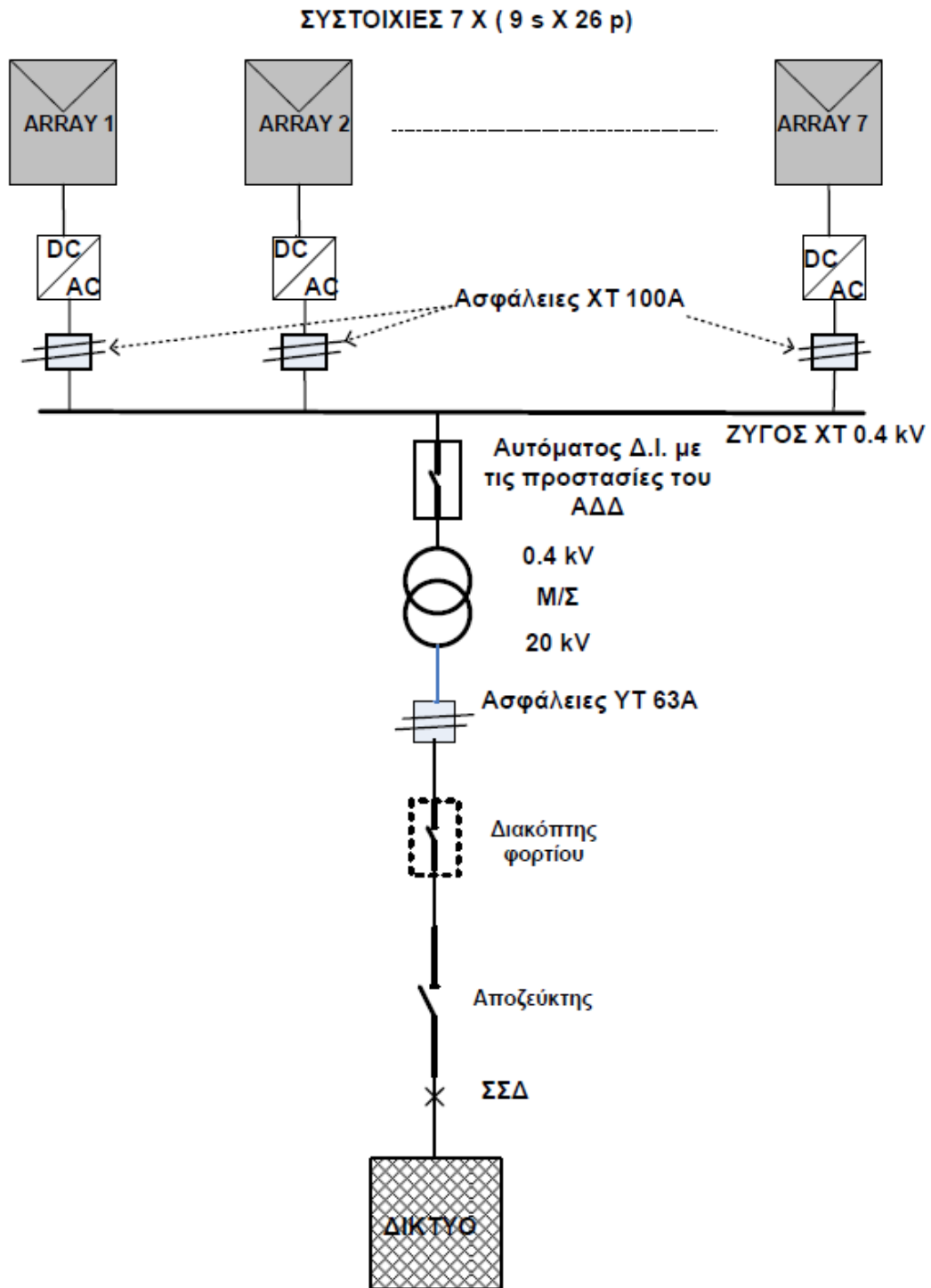
Με τα παραπάνω επιτυγχάνεται μείωση της συχνότητας των άνευ λόγου αποζεύξεων του ΑΔΔ ή και η μη διακοπή της παραγωγής, εφόσον και οι μηχανές που εγκαθιστά ο παραγωγός έχουν τη δυνατότητα να παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια ανάλογων διαταραχών (και βεβαίως έχουν επιλεγεί αντίστοιχα διευρυμένα όρια και χρόνοι διέγερσης για τις ίδιες προστασίες των γεννητριών).

4. Για την ανίχνευση της απομονωμένης λειτουργίας της εγκατάστασης μπορεί να χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις ειδικοί ηλεκτρονόμοι, οι οποίοι π.χ. ελέγχουν τον ρυθμό μεταβολής του ανύσματος της τάσης, του φορτίου, της συχνότητας κλπ. Τα μέσα αυτά είναι αποδεκτά κατόπιν εγκρίσεως από τις αρμόδιες υπηρεσίες της ΔΕΗ, αλλά δεν μπορούν να υποκαταστήσουν τις βασικές λειτουργίες που παρουσιάζονται στον πίνακα του σχήματος 4.18 για την προστασία της διασύνδεσης, χωρίς ειδική εξέταση. Επίσης, σε ειδικές περιπτώσεις εγκαταστάσεων παραγωγής μεγάλου μεγέθους, μπορεί να εφαρμοστεί η αλληλένδεση (transfer trip) του ΑΔΔ της εγκατάστασης με τον διακόπτη στην αναχώρηση της γραμμής ΜΤ. Με τον τρόπο αυτόν εξασφαλίζεται η άμεση απόζευξη της εγκατάστασης για οποιαδήποτε διαταραχή προκαλεί το άνοιγμα του διακόπτη της γραμμής και αποκλείεται η ασύγχρονη επανάζευξή του.

5. Μετά από λειτουργία απόζευξης του ΑΔΔ, η ζεύξη του μπορεί να γίνεται είτε μετά από συνεννόηση με τη ΔΕΗ, αν υπάρχουν ειδικοί λόγοι, ή συνηθέστερα αυτόματα. Σε κάθε περίπτωση η επανάζευξη πρέπει να καθυστερεί μέχρι να επανέλθει η τάση και η συχνότητα του δικτύου εντός της προβλεπόμενης ζώνης κανονικής λειτουργίας, ή και άλλους λόγους. Για την προστασία της εγκατάστασης παραγωγής, συνιστάται να προβλέπεται χρονική καθυστέρηση της τάξης των λεπτών της ώρας μεταξύ της επανόδου του δικτύου σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και της ζεύξης της εγκατάστασης, ώστε να έχουν ολοκληρωθεί ενδεχόμενοι χειρισμοί στο δίκτυο. Για εγκαταστάσεις με δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας, η ζεύξη αυτή θα πρέπει να πραγματοποιείται από αυτόματο σύστημα συγχρονισμού ακριβείας.

Συνολική επισκόπηση των μέσων προστασίας και ζεύξης μέχρι το Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ)

Στην παρούσα εργασία έχουμε ήδη παρουσιάσει σχετική μελέτη προστασίας της εγκατάστασης παραγωγής έναντι υπερεντάσεων (εξαιτίας πιθανών υπερφορτίσεων και βραχυκυκλωμάτων) που μπορεί να παρουσιαστούν στο εσωτερικό της εγκατάστασης (ΧΤ) αλλά και στις 2 πλευρές του ΜΣ ανύψωσης. Η εκτίμηση των διατάξεων προστασίας και των ρυθμίσεων τους αφορούν πρωτίστως στην εξασφάλιση των στοιχείων της εγκατάστασης απέναντι σε υπερεντάσεις του παραπάνω τύπου. Με βάση το παρόν κεφάλαιο στο σχήμα 4.19 παρουσιάζουμε το σύνολο των διατάξεων ζεύξης και προστασίας μέχρι και το σημείο κοινής σύνδεσης της εγκατάστασης με το δίκτυο της ΔΕΗ.



Σχήμα 4.19 Διατάξεις Προστασίας και Ζεύξης

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 – ΕΒΑ (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:

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

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:

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

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:

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

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

$$EAC = \frac{d \cdot (1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \cdot C_0 + C$$

Όπου ο πρώτος όρος αντανakλά 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 ανα-

λαμβάνει 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 επενδύόμενο 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 60kWp**

6.1 ΣΕΝΑΡΙΟ

Σκοπός της μελέτης είναι η εγκατάσταση ενός φ/β σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θα έχει ονομαστική ισχύ περί τα 60kW_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 Ολυμπία. 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 είναι ομαλή, στη διεύθυνση Βορρά- Νότου και στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης. 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 άνεμοι με μέσο όρο 4 m/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

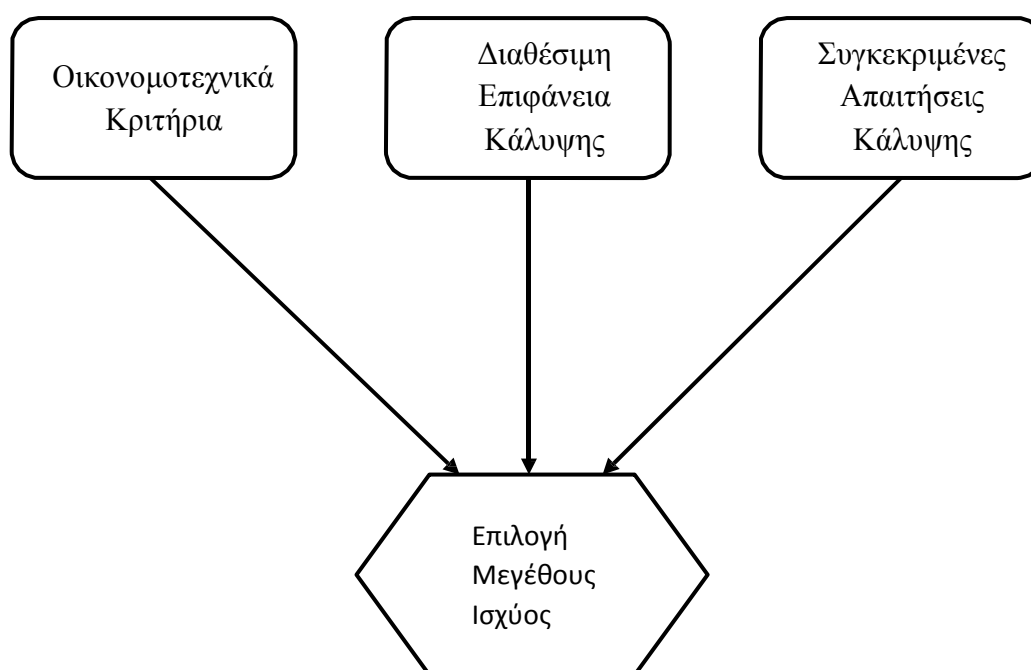
Κριτήρια επιλογής ισχύος

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 επισκευσιμότητας). 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

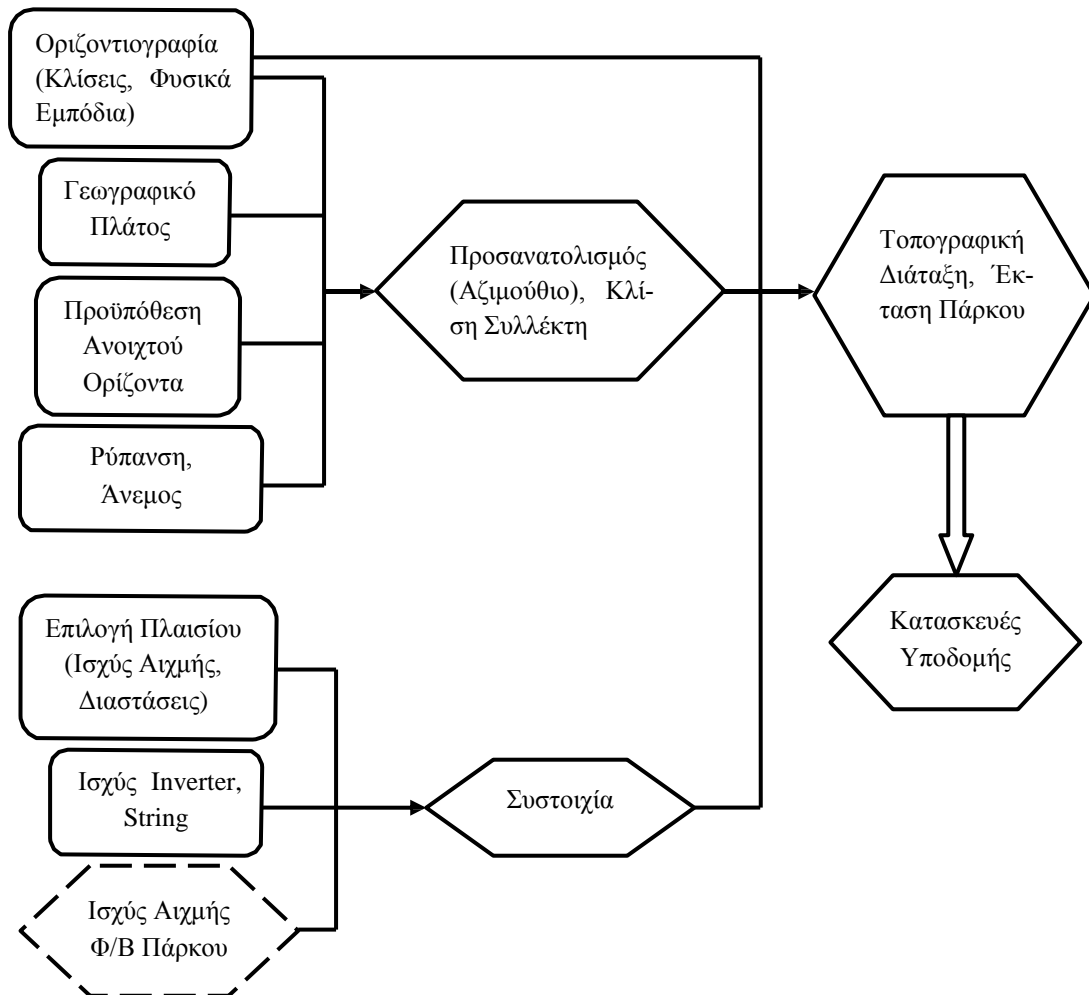
6.1

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 απαραίτη-

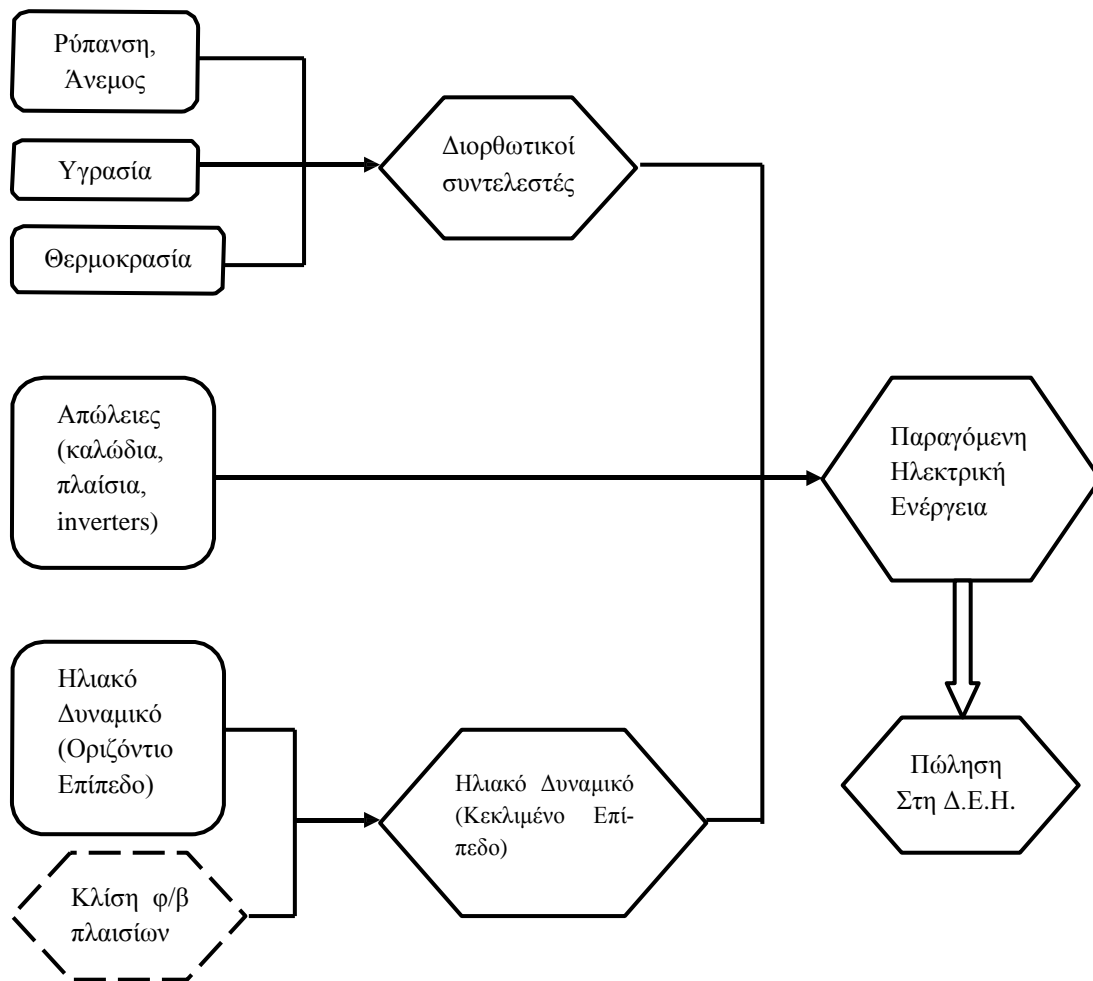
των υποδομών, πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.2 τα κυρίαρχα μεγέθη που το καθορίζουν είναι ο προσανατολισμός και η κλίση των συλλεκτών, η μορφολογία του εδάφους και η κυκλωματική διάταξη της συστοιχίας, που με τη σειρά τους καθορίζονται από την επιλογή πλαισίου, 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.



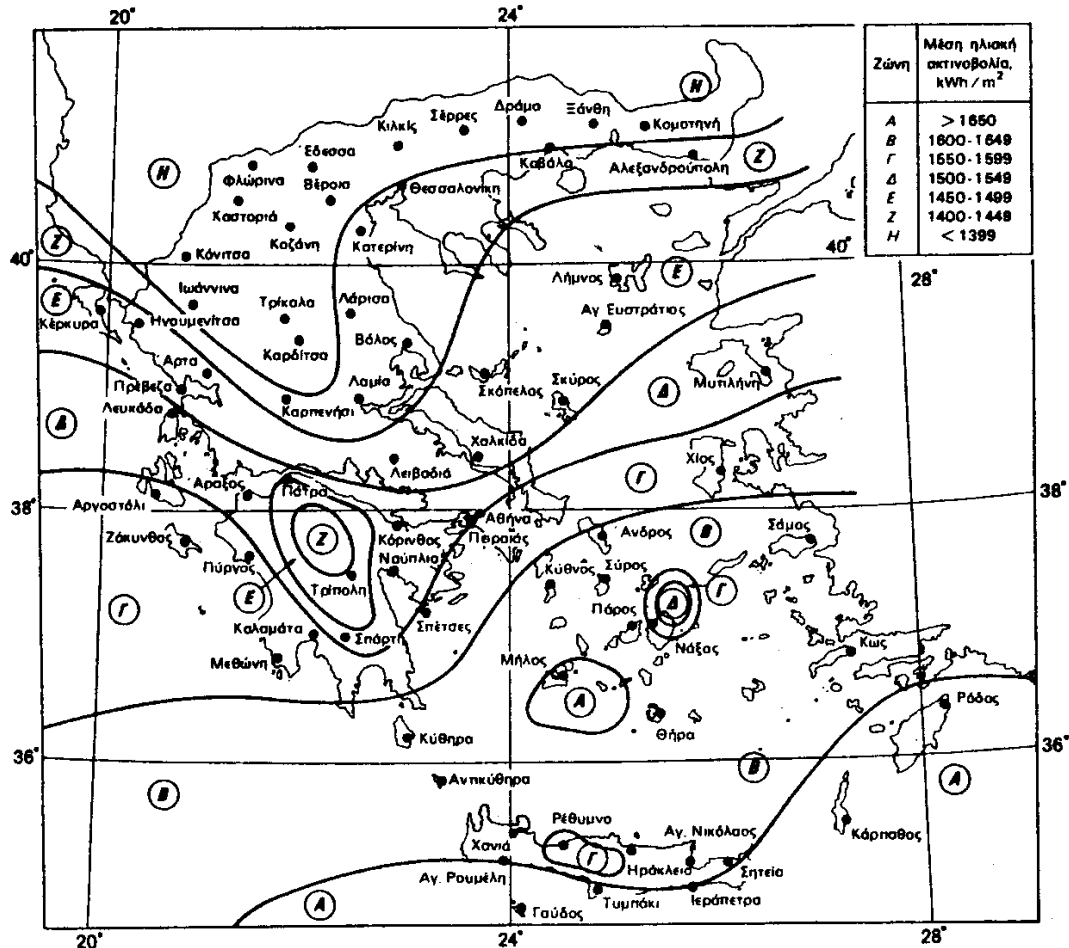
Σχήμα 6.3 Αλγόριθμος υπολογισμού παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας φ/β πάρκου.

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 χώρας, 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

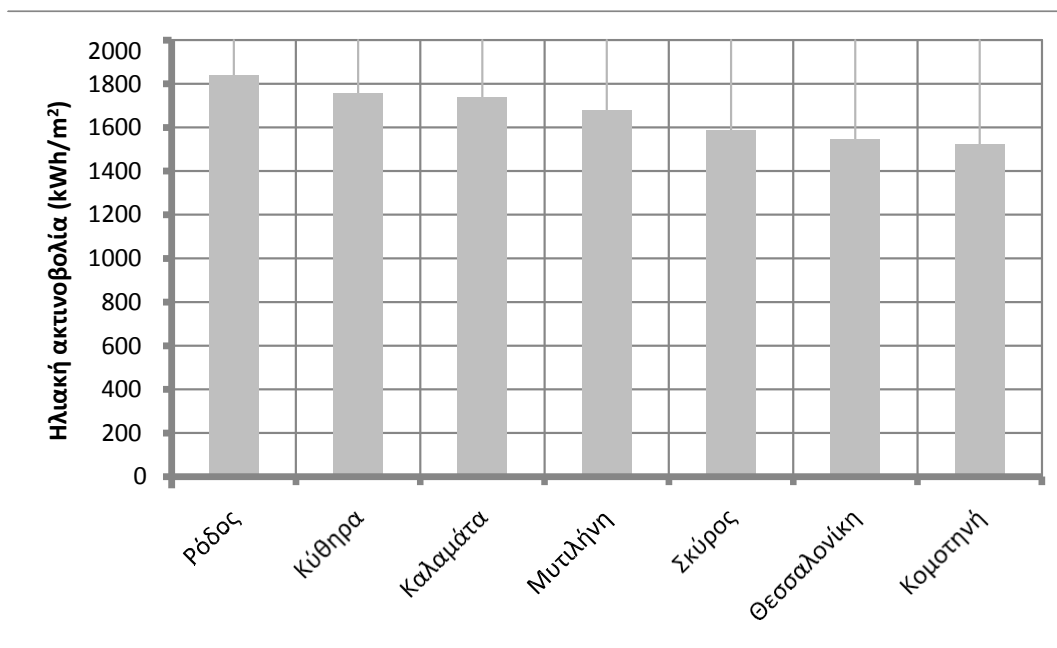
γεωγραφικό πλάτος. Στο σχήμα 6.6 φαίνονται οι καμπύλες της ηλιακής ακτινοβολίας συναρτήσει της κλίσης για τις 7 παραπάνω πόλεις.

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

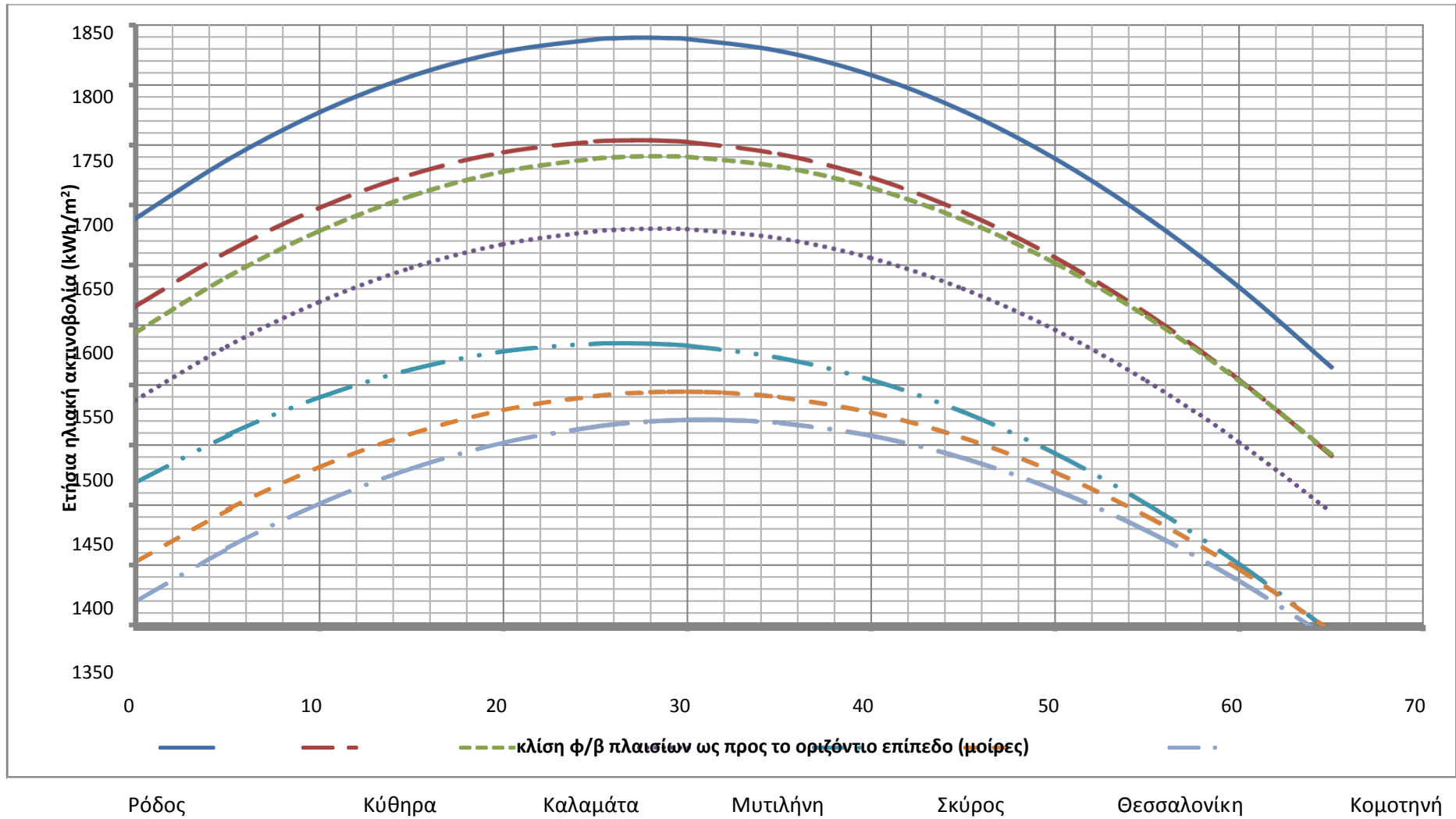
Πίνακας 6.2

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



6.3.1 Ηλιακό δυναμικό για την πόλη της Ηλείας

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 Ηλεία, όπου θα εγκατασταθεί η φ/β γεννήτρια, καθώς και οι τιμές της για κλίσεις από 0° μέχρι 35° υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

Παρατηρούμε ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης β_{opt} είναι κοντά στις 30° και διαφέρει σημαντικά από το γεωγραφικό πλάτος της Ηλείας που είναι $37,542^\circ$. 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	1745.51
5	1804.59
10	1897.53
15	1898.6
20	1928.27
25	1945.75
26	1948.46
27	1949.64
28	1959,6
29	1949.54
30	1951.95
31	1951.32
32	1950.66
35	1945.73

Πίνακας 6.4 Περιέχει την ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, την ακτινοβολία σε γωνία 30 μοιρών, την άμεση ακτινοβολία, τον λόγο της κοσμικής ακτινοβολίας.

Month	H_h	$H(30)$	DNI	I_{opt}	D/G	T_{24h}	N_{DD}
Jan	2110	3210	2810	60	0.47	7.2	338
Feb	2800	3740	2980	51	0.49	7.8	298
Mar	4240	5100	4230	40	0.42	9.5	259
Apr	5430	5800	4850	25	0.40	12.5	114
May	6720	6580	5990	12	0.36	17.5	21
Jun	7850	7350	7670	6	0.28	21.6	3
Jul	8040	7690	8580	9	0.22	23.8	2
Aug	7230	7550	7870	21	0.24	23.9	5
Sep	5250	6140	5580	36	0.33	20.2	34
Oct	3660	4820	4130	48	0.40	16.4	122
Nov	2500	3760	3410	58	0.42	12.0	245
Dec	1910	2940	2500	61	0.51	8.7	311
Year	4820	5400	5060	31	0.34	15.1	752

H_h : Irradiation on horizontal plane (Wh/m²/day)

$H(30)$: Irradiation on plane at angle: 30deg. (Wh/m²/day)

DNI : Direct normal irradiation (Wh/m²/day)

I_{opt} : Optimal inclination (deg.)

D/G : Ratio of diffuse to global irradiation (-)

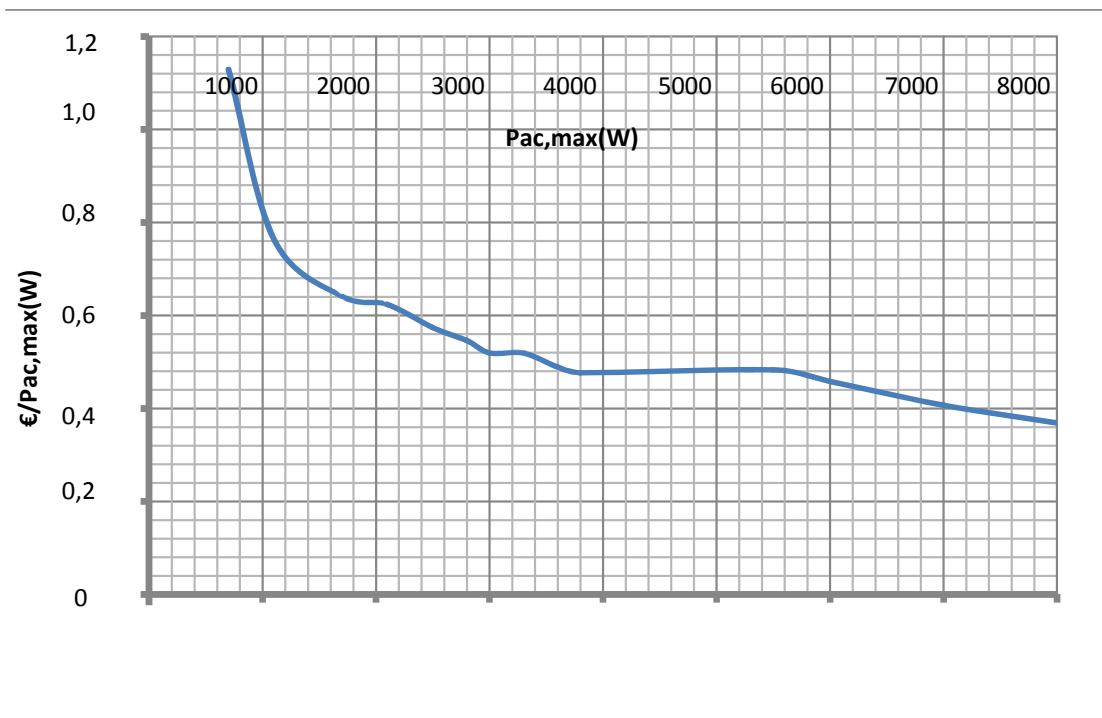
T_{24h} : 24 hour average of temperature (°C)

N_{DD} : Number of heating degree-days (-)

6.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

Η επιλογή των αντιστροφέων 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 αντιστροφέων μεγάλης ισχύος, γιατί η διαφορά στην τιμή είναι αρκετά μεγάλη και η πολυπλοκότητα του φ/β συστήματος μικρή (Σχήμα 6.7). Ως ακραίο παράδειγμα θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι το συγκεκριμένο φ/β πάρκο ισχύος 60kWp 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 αντιστροφέων 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 πλαϊσίων 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 αρκεί 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 6.7 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 60kWp, 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 TRIPOWER 15000 TL/20000TL, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για εγκαταστάσεις μέσης και μεγάλης ισχύος. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών των αντιστροφέων φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα, ενώ αναλυτικά datasheet δίνονται στα παραρτήματα.

SUNNY TRIPOWER 15000TL /20000TL

	15000TL	20000TL
Τιμές Εισόδου		
Μέγιστη ισχύς DC	15260W	20450W
Εύρος τάσης DC	580V-800V	580V-800V
Ονομαστική τάση DC	350V	350V
Μέγιστη τάση DC	1000V	1000V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου	36A	36A
Διακύμανση τάσης DC	<10%	<10%
Μέγιστος αριθμός παράλληλων string	6	6
Τιμές Εξόδου		
Μέγιστη ισχύς AC	6000W στους 40°C	7000W στους 40°C
Ονομαστική ισχύς AC	15000W	20000W
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	24A	26A
Ονομαστική τάση AC	230V-400V	230V-400V
Ονομαστική συχνότητα AC	50Hz	50Hz
Απόδοση		
Μέγιστη απόδοση	98,5%	98,5%
Euro-eta	98,3%	97,2%
Μηχανολογικά στοιχεία		
Βάρος	45 kg	45 kg
Ύψος/Μήκος/Πλάτος/ (mm)	665/680/265	665/680/265

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του πλήθους των αντιστροφών 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.

Εξετάζοντας τον αντιστροφέα SUNNY TRIPOWER 15000TL, παρατηρούμε ότι η ισχύς εισόδου είναι 15.2kW. Λαμβάνοντας υπόψη όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω για την ισχύ αιχμής των πλαισίων προκύπτει ότι η ιδανική ισχύς στην είσοδό του κυμαίνεται έως 20% αυξημένη. Οι τιμές αυτές μας οδηγούν στην επιλογή 4 τέτοιων αντιστροφών, που θα δέχονται στη είσοδό τους (60.000/4≈15000Wp). Τα αντίστοιχα μεγέθη για τους άλλους αντιστροφείς προκύπτουν με τον ίδιο τρόπο και είναι: 3 αντιστροφείς SUNNY TRIPOWER 20000TL που θα δέχονται στη είσοδο ισχύ περί τα 20000Wp.

Είναι ακόμα προφανές ότι αν πρέπει να επιλέξουμε ανάμεσα στους 2 προφανώς συμφέρει ο αντιστροφέας SUNNY TRIPOWER 15000TL, 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 αντιστροφών είναι ενδεικτικές, ενώ οι ακριβείς τιμές 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 6.5.

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 6.5 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%	<input type="checkbox"/> Ομοιόμορφη μοριακή δομή <input type="checkbox"/> Μεγάλος βαθμός απόδοσης	<input type="checkbox"/> Υψηλό κόστος παραγωγής <input type="checkbox"/> Μεγάλες απώλειες κατά τη διαδικασία κοπής <input type="checkbox"/> Ενεργοβόρα διαδικασία παραγωγής
Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο	10-14%	<input type="checkbox"/> Οικονομικότερη παραγωγική διαδικασία από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο <input type="checkbox"/> Τετραγωνικά δισκία επιτρέπουν μεγαλύτερο δείκτη κάλυψης	<input type="checkbox"/> Χαμηλότερη απόδοση συγκρινόμενη με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο <input type="checkbox"/> Μεγάλες απώλειες κατά τη διαδικασία κοπής
Ribbon Πυρίτιο	Έως 15%	<input type="checkbox"/> Λιγότερες απώλειες πυριτίου στην παραγωγή	<input type="checkbox"/> Χειρότερη ποιότητα πυριτίου από αυτή του μον/κού
Thin-film Πυρίτιο	Έως 17% (ραγδαία εξελισσόμενη έρευνα)	<input type="checkbox"/> Λιγότερο χρησιμοποιούμενο υλικό <input type="checkbox"/> Όχι μεγάλες απαιτήσεις σε υλικό υποστρώματος <input type="checkbox"/> Πολλά υποσχόμενη τεχνολογία	<input type="checkbox"/> Περιορισμένες εμπορική παραγωγή μέχρι σήμερα
Άμορφο Πυρίτιο	6-9%	<input type="checkbox"/> Χαμηλό κόστος παραγωγής συγκρινόμενο με το κρυσταλλικό πυρίτιο <input type="checkbox"/> Υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας	<input type="checkbox"/> Μικρός βαθμός απόδοσης <input type="checkbox"/> Βαθμιαία μείωση της απόδοσης με την πάροδο του χρόνου
Αρσενικούχο γάλλιο	25-30%	<input type="checkbox"/> Μεγάλος βαθμός απόδοσης <input type="checkbox"/> Υψηλή θερμική αδράνεια	<input type="checkbox"/> Υψηλό κόστος παραγωγής (5πλασιο του κρυσταλλικού πυρι-
Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός	Έως 10%	<input type="checkbox"/> Υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας <input type="checkbox"/> Δεν εμφανίζει βαθμιαία πτώση της απόδοσης όπως το άμορφο πυρίτιο	<input type="checkbox"/> Πολύπλοκο υλικό <input type="checkbox"/> Αυξημένα μέτρα προστασίας κατά την παραγωγική διαδικασία <input type="checkbox"/> 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. Επιλέχθηκε μεγάλη εταιρία που δραστηριοποιείται για πολλά χρόνια στο χώρο, έχει την απαραίτητη τεχνογνωσία και η αντοχή των προϊόντων (γεγονός υψίστης σημασίας για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις) έχει αποδειχθεί στη πράξη. Η εταιρία αυτή είναι η Upsolar.

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.

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 $220W_p$ και $245W_p$.

Τα πλαίσια αυτά είναι τα: UP-M220P, UP-M240P, UP-M245P, ονομαστικής ισχύος $220W_p$, $240W_p$ και $245W_p$ αντίστοιχα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται στον πίνακα 6.6 και αναλυτικά datasheet δίνονται στο παράρτημα..

Πίνακας 6.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων φ/β πλαισίων εταιρίας Upsolar

UPSOLAR UP			
Ηλεκτρική απόδοση υπό στάνταρ συνθήκες (STC*)			
	UP-M220P	UP240P	UP245P
Ονομαστική μέγιστη ισχύς P_m	220	240	245
Ονομαστική Τάση Φόρτισης V_m	28.7	30.2	30.4
Ονομαστικό Ρεύμα Φόρτισης I_m	7.67	7.95	8.06
Τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc}	36.7	37.6	378
Ρεύμα Βραχυκύκλωσης I_{sc}	8.25	8.40	8.45
Τάση μέγιστης ισχύος του συστήματος	1000	1000	1000
Κυψέλες	60	60	60
Τεχνολογία	Πολυκρυσταλλικό	Πολυκρυσταλλικό	Πολυκρυσταλλικό
Βάρος	41.9	41.9	41.9

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:

- a) 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).
- b) 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.
- c) Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όλα τα πλαίσια, που θα χρησιμοποιηθούν σε όλη την εγκατάσταση θα είναι τα ίδια.

Έστω ότι επιλέγονται 4 αντιστροφείς SMA Tripower STP15000TL, ο καθένας εκ των οποίων πρέπει να δέχεται στην είσοδο του 15000 Wp για να φτάσουμε τα 60kWp 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 να συνδυαστεί με τον συγκεκριμένο αντιστροφέα (σκοπός πάντα είναι, η εγκατεστημένη ισχύς να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στα 60kWp, χωρίς όμως να τα ξεπερνάει) είναι το UP240P.

Το επόμενο βήμα είναι να βρεθεί ο κατάλληλος αριθμός των πλαισίων και η κυκλωματική σύνδεσή τους. Υπολογίζεται ότι σε κάθε αντιστροφέα πρέπει να συνδεθούν.:

A) 1. Αντιστροφείας : 62 πλαίσια x 240Wp=14880Wp

2. Αντιστροφείας : 62 πλαίσια x 240Wp=14880Wp

Τα πλαίσια αυτά οργανώνονται σε 2 παράλληλα string των 24 πλαισίων και 1 string των 14 πλαισίων. Αυτό σημαίνει ότι η είσοδος του αντιστροφεία δέχεται:

$$24 \text{ πλαίσια εν σειρά } \times 30.2\text{V} = 724.8\text{V}$$

$$14 \text{ πλαίσια σε σειρά } \times 30.2\text{V} = 422.8\text{V}$$

επί συνόλου 3 string ανά αντιστροφή), που είναι η απαραίτητη τάση εισόδου προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ισχύς εξόδου. Ακόμα δέχεται:

$$2 \text{ παράλληλα string } \times 7,95\text{A} = 15.9\text{A}$$

B) 1. Αντιστροφείας : 63 πλαίσια x 240Wp=15120Wp

2. Αντιστροφείας : 63 πλαίσια x 240Wp=15120Wp

Τα πλαίσια αυτά οργανώνονται σε 2 παράλληλα string των 24 πλαισίων και 1 string των 15 πλαισίων. Αυτό σημαίνει ότι η είσοδος του αντιστροφεία δέχεται:

$$24 \text{ πλαίσια εν σειρά } \times 30.2\text{V} = 724.8\text{V}$$

$$15 \text{ πλαίσια σε σειρά } \times 30.2\text{V} = 453\text{V}$$

επί συνόλου 3 string ανά αντιστροφή), που είναι η απαραίτητη τάση εισόδου προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ισχύς εξόδου. Ακόμα δέχεται:

$$2 \text{ παράλληλα string } \times 7,95\text{A} = 15.9\text{A}$$

που παρατηρούμε ότι βρίσκεται μέσα στα όρια του αντιστροφεία. Ο συνολικός αριθμός των φ/β πλαισίων της εγκατάστασης προκύπτει: **250 φ/β πλαίσια.**

Τέλος η συνολική ισχύς της εγκατάστασης είναι:

$$14880 * 2 \text{ αντιστροφείες} + 15120 * 2 \text{ αντιστροφείες} = 60000\text{wp}$$

που είναι ακριβώς στο επιθυμητό. Πρέπει να τονιστεί ότι ο συνδυασμός αυτός δίνει συνολική ισχύ εγκατάστασης ακριβώς την επιθυμητή. Για αυτό τον λόγο επιλέγεται ο συγκεκριμένος συνδυασμός πλαισίου-αντιστροφεία.

6.6 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

Είναι πολύ βολικό να επιλεγούν οι συστοιχίες του φ/β πάρκου να αποτελούνται από 24 φ/β πλαίσια και 14 φ/β πλαίσια με την κυκλωματική σύνδεση που περιγράφηκε παραπάνω. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχει ένας αντιστροφέας ανά 3 συστοιχίες. Έτσι το πλήθος των καλωδίων δεν είναι μεγάλο όπως θα ήταν σε άλλες κυκλωματικές διατάξεις.

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. 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 δίοδος 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.

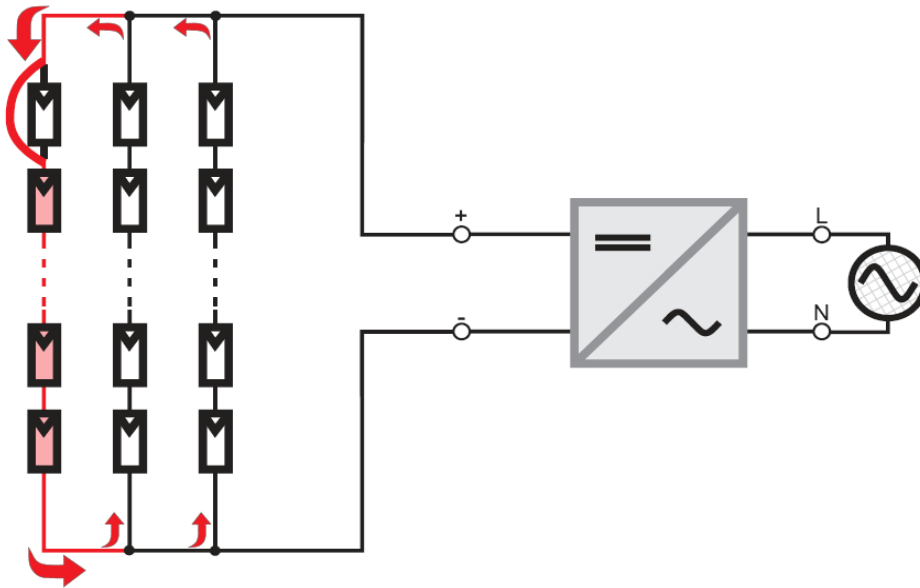
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.8 η τιμή του ανάστροφου ρεύματος ισούται με το συνολικό ρεύμα βραχυκύκλωσης των υπολοίπων strings. Στην περίπτωση της συστοιχίας, που έχει επιλεγεί για την εγκατάσταση του φ/β πάρκου, η τιμή αυτή προκύπτει:

$$\text{Ανάστροφο Ρεύμα} = (2 \text{ παράλληλα strings} - 1) \times 8,40\text{A} = 16,8\text{A}$$

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.

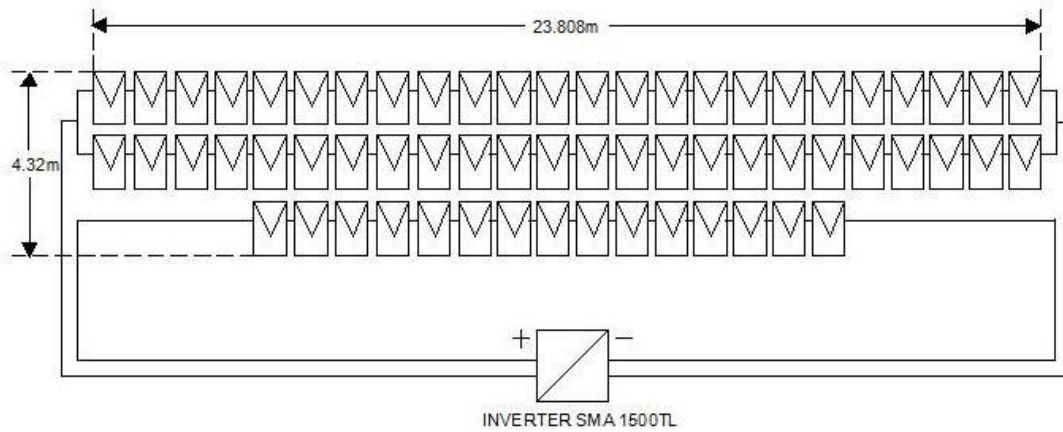
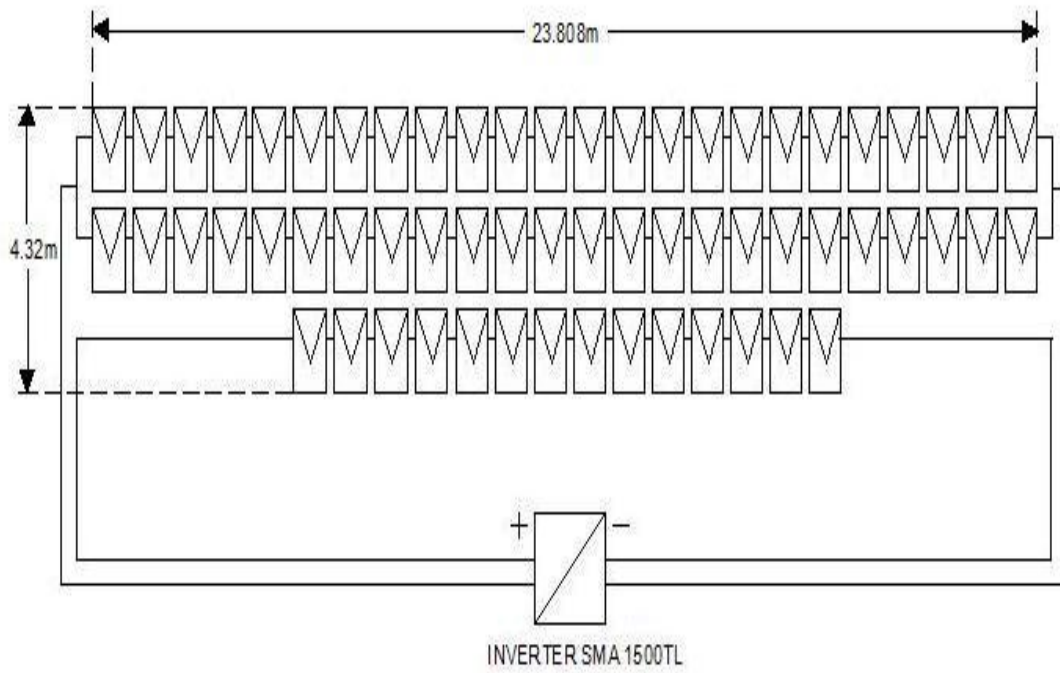


Σχήμα 6.8 Φαινόμενο της αντίστροφης ροής ρεύματος[SMA].

- **Δίοδοι φραγής (String Diodes).** Οι διόδους 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 διόδου μπορεί να αναιρέσει 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 διόδους 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 την διαστασιολόγηση όπως στην κυκλωματική διάταξη του σχήματος 6.9.

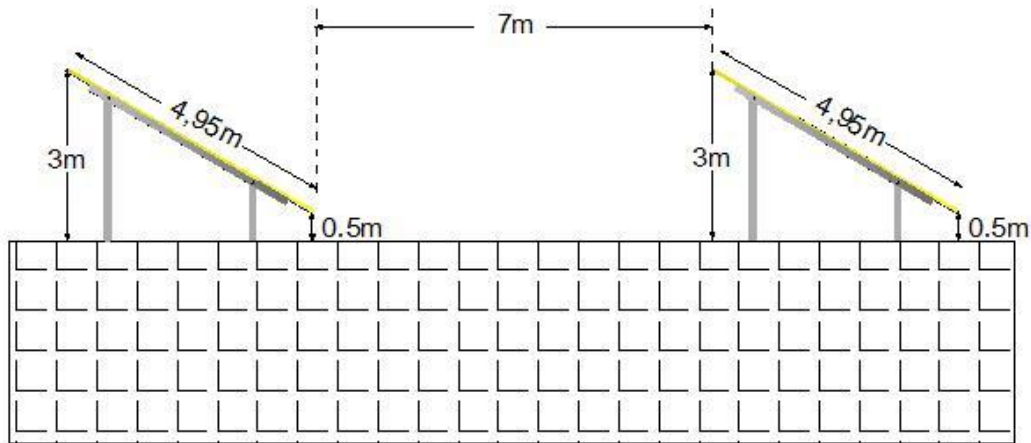


Σχήμα 6.9: Διαστασιολόγηση Φ/Β πλαισίων διάταξη Α και Β

6.7 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

Σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, η οποία βρίσκεται εντός κάποιων ορίων μέσα σε έναν αγρό, θέλουμε τα σημεία στα οποία θα εγκατασταθούν οι βάσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, οι αντιστροφείς, τα καλώδια κτλ. να έχουν την βέλτιστη τοποθέτηση. Πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τις διαστάσεις του χωραφιού, για να υπολογίσουμε τον τρόπο που θα τοποθετήσουμε τις συστοιχίες, και να υπάρχει ελεύθερος χώρος για να έχουμε άνετη πρόσβαση στην εγκατάστασή μας. Επίσης πρέπει να υπολογίσουμε τις αποστάσεις των συστοιχιών ώστε να μην επηρεάζεται η προσλαμβανόμενη ηλιακή ενέργεια στις επιφάνειες των πλαισίων (φαινόμενο της σκίασης μεταξύ γειτονικών συστοιχιών). Τέλος πρέπει να τοποθετήσουμε τα πλαίσια ως προς το οριζόντιο επίπεδο και ο προσανατολισμός τους να είναι προς το νότο (αζιμούθια γωνία 180°).

Αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε την ελάχιστη απόσταση (ε) μεταξύ δυο συνεχόμενων συστοιχιών κατά τη διεύθυνση Βορρά – Νότος (σχήμα 6.10).



Σχήμα 6.10: Απόσταση μεταξύ δυο συνεχόμενων συστοιχιών που θα τοποθετηθούν κατά τη διεύθυνση Βορρά-Νότου προσανατολισμένες προς το Νότο με κλίση των πλαισίων 30° . Το έδαφος δεν έχει κλίση στη διεύθυνση Βορρά-Νότου.

Γνωρίζουμε ότι:

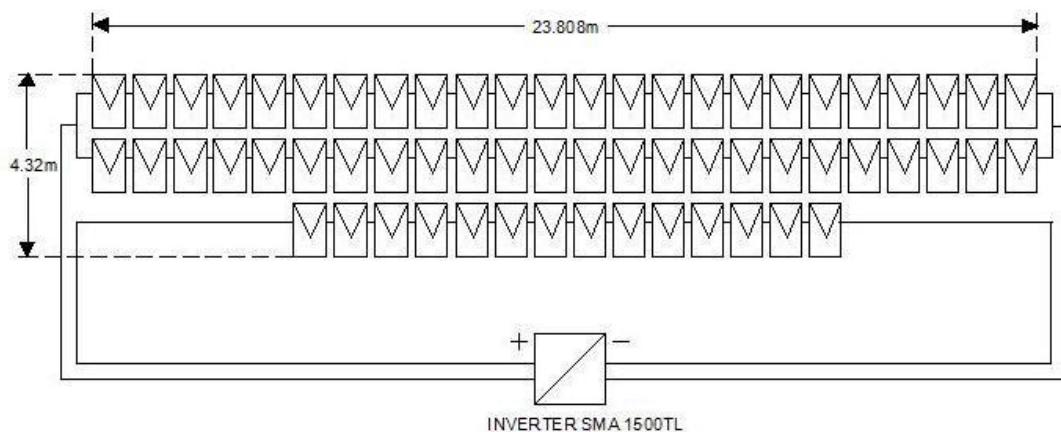
- Η κλίση της πλαγιάς κατά τη διεύθυνση Βορρά-Νότου είναι 0° ($\kappa = 0$).
- Η κλίση β των πλαισίων επιλέχθηκε ίση με 30° που είναι και η βέλτιστη τιμή ($\beta = 30^\circ$).
- Το ύψος γ της συστοιχίας είναι περίπου 3m. Το ύψος γ το υπολογίσαμε από τον τριγωνομετρικό τύπο του ημιτόνου ($\sin\beta$ για $\beta = 30^\circ$) για την εύρεση του μήκους των πλευρών του τριγώνου και προσθέσαμε την υπερύψωση του κάτω μέρους της συστοιχίας (0.5m).
- Το γεωγραφικό πλάτος της Ηλείας είναι 37.542° . Επομένως σύμφωνα με το διάγραμμα της εταιρείας Monegon, προκύπτει ο λόγος της ελεύθερης απόστασης α προς το ύψος v , $\frac{\alpha}{v} = 2,52$

Από τη παρακάτω σχέση που μας δίνει την απόσταση (ε) μεταξύ των συστοιχιών έχουμε:

$$\varepsilon = \gamma \cdot \frac{\frac{\alpha}{v} \cdot \sin \beta + \cos \beta}{1 + \frac{\alpha}{v} \cdot \kappa} = 3 \cdot \frac{2,52 \cdot \sin 30^\circ + \cos 30^\circ}{1 + 2,52 \cdot 0} = 6,378m \cong 7m$$

Στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης δεν έχουμε κλίση για αυτό το λόγο δε θα υπάρχει σκίαση μεταξύ των πάνελ που βρίσκονται στα δύο άκρα της συστοιχίας. Επομένως τα ακραία πάνελ θα έχουν το ίδιο ύψος. Υπολογίσαμε ότι ο αριθμός των πλαισίων που θα χρησιμοποιήσουμε είναι 250 (κεφ. 6.7). Θα τοποθετήσουμε τέσσερις συστοιχίες και για κάθε συστοιχία έναν αντιστροφέα. Οι δύο συστοιχίες θα έχουν ίσο αριθμό πλαισίων, 62 πλαίσια η κάθε μια, και οι άλλες δυο συστοιχίες θα έχουν ίσο αριθμό πλαισίων 63 πλαίσια η κάθε μια, δηλαδή σύνολο 250 πλαίσια.

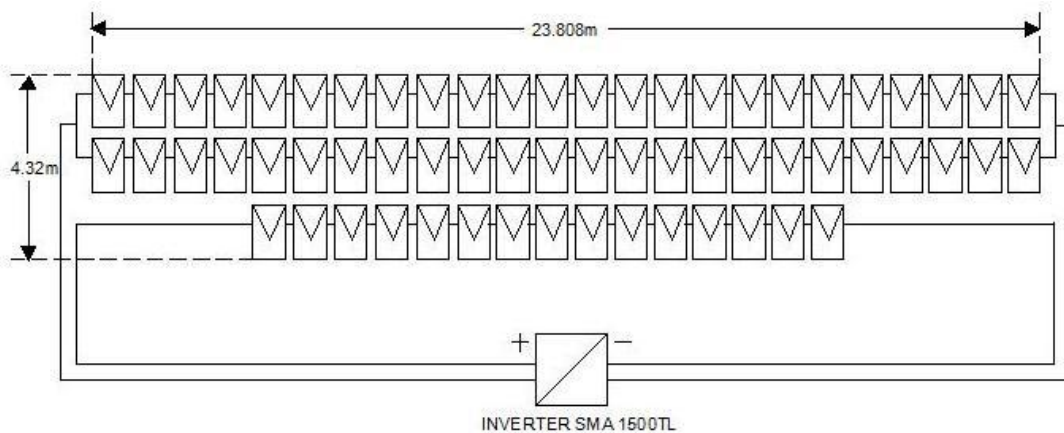
Θα τοποθετήσουμε στις δυο πρώτες συστοιχίες δύο σειρές με 24 πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά και τα άκρα τους παράλληλα προς τον αντιστροφέα και 14 πλαίσια σε σειρά και τα άκρα τους συνδεδεμένα στον αντιστροφέα (Σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.11: Κυκλωματική διάταξη μιας συστοιχίας με 2 παράλληλα string των 24 πλαισίων, και 1 string των 14 πλαισίων συνδεδεμένα με τον αντιστροφέα.

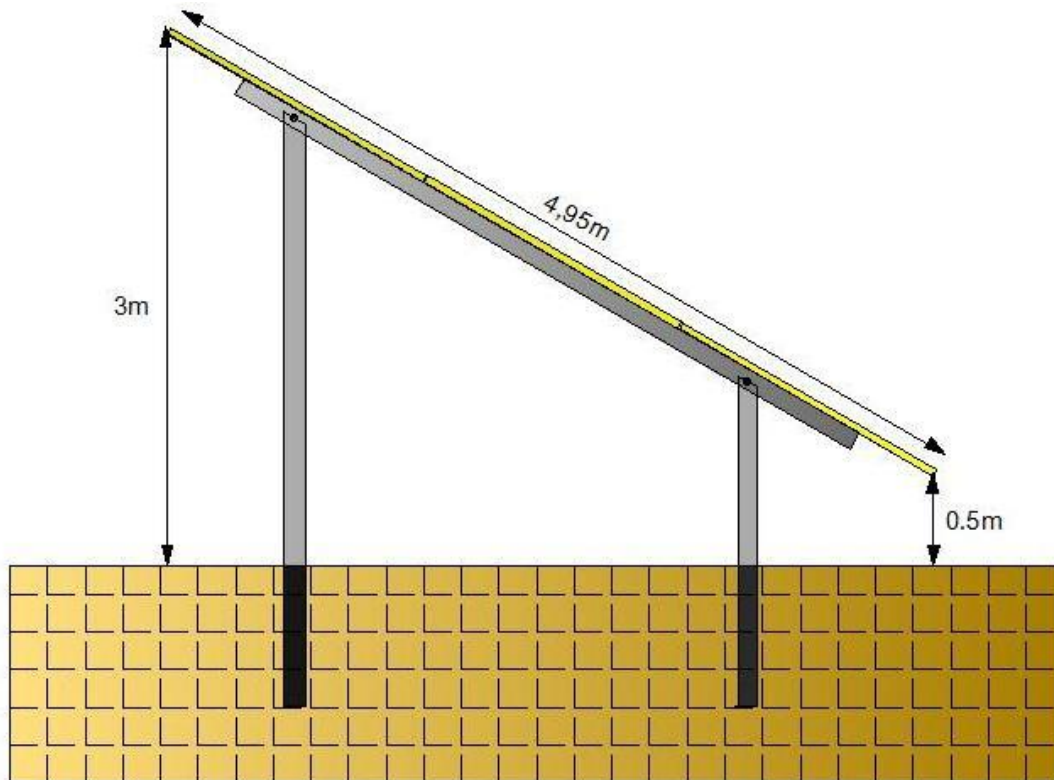
Η δεύτερη συστοιχία θα είναι ίδια με αυτή του παραπάνω σχήματος.

Οι άλλες δυο συστοιχίες θα έχουν 2 παράλληλα string των 24 πλαισίων συνδεδεμένα με τον αντιστροφέα και ένα string των 15 πλαισίων συνδεδεμένο στον αντιστροφέα (Σχήμα 6.12).



Σχήμα 6.12: Κυκλωματική διάταξη με 2 παράλληλα string των 24 πλαισίων συνδεδεμένα με τον αντιστροφέα και ένα string των 15 πλαισίων συνδεδεμένο στον αντιστροφέα.

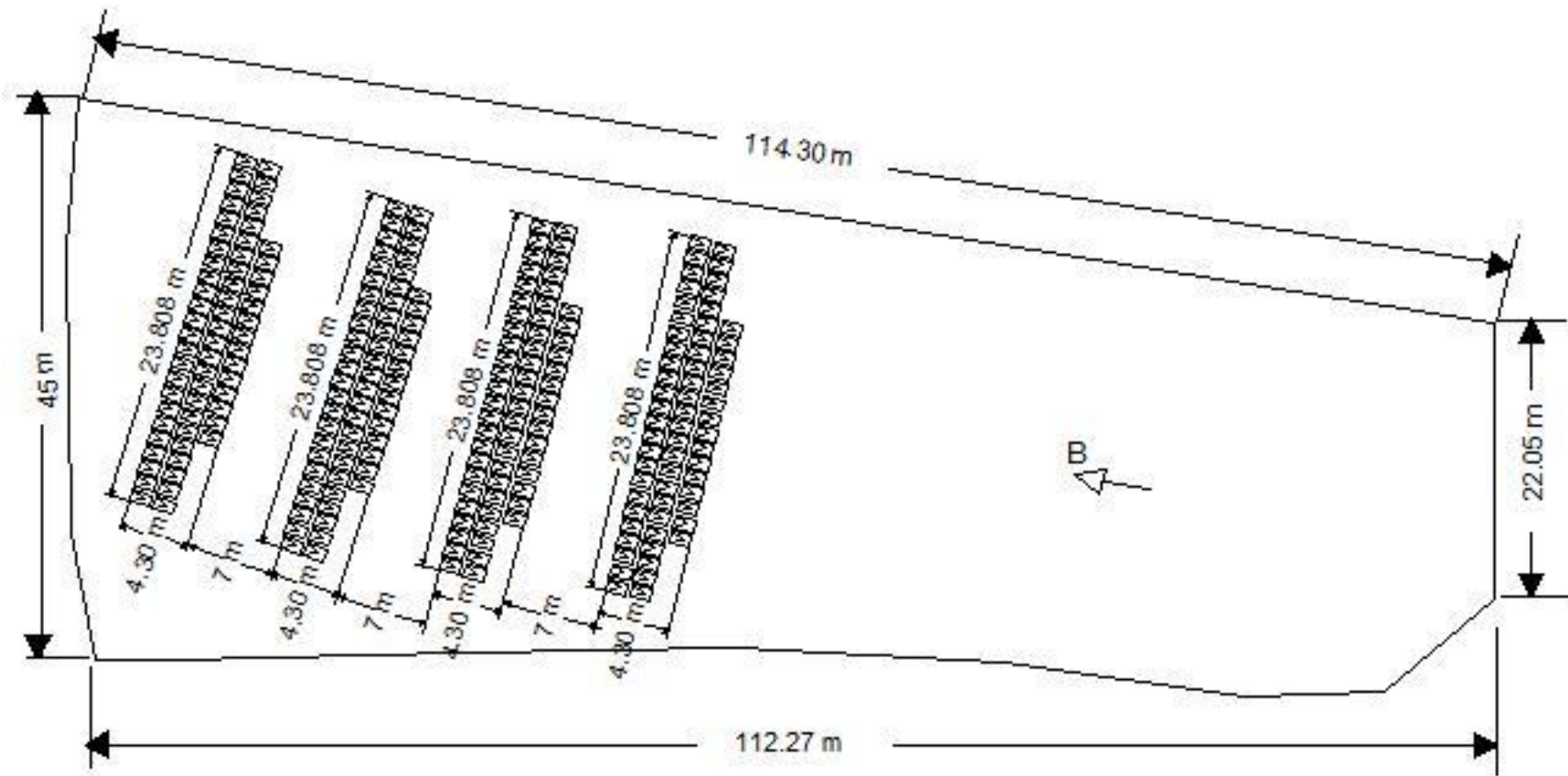
Τα πλαίσια είναι τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο χωρίς να υπάρχει απόσταση μεταξύ τους κατά μήκος και κατά πλάτος σε τριπλή σειρά. Το μήκος της κάθε συστοιχίας όπως φαίνεται στο σχήμα είναι 23.808m και το πλάτος της 4.32m. Η κλίση που θα τοποθετήσουμε τα πλαίσια είναι 30° . Παρακάτω στο σχήμα 6.13 φαίνεται η πλάγια όψη της συστοιχίας με κλίση 30° και προσανατολισμό προς το Νότο.



Σχήμα 6.13: Διάταξη συστοιχίας (πλάγια όψη) με την βάση στήριξης των πλαισίων

Το μέγιστο ύψος που έχει η βάση στήριξης από το έδαφος είναι 3m και υπολογίσαμε ότι η απόσταση που πρέπει να έχουν οι συστοιχίες μεταξύ τους για να μην σκιάζονται τα πλαίσια είναι 7m.

Σύμφωνα με το τοπογραφικό σχέδιο της περιοχής που θα εγκαταστήσουμε το φωτοβολταϊκό πάρκο πρέπει να υπολογίσουμε την βέλτιστη διάταξη των συστοιχιών ώστε να είμαστε εντός των ορίων περιφράξης του αγρού και να υπάρχει άνετη πρόσβαση στην εγκατάσταση μας. Βλέποντας το τοπογραφικό σχέδιο του αγρού και μετρώντας τις αποστάσεις κατά μήκος και πλάτος υπολογίσαμε που θα τοποθετήσουμε τις συστοιχίες. Το τοπογραφικό σχέδιο μαζί με την φωτοβολταϊκή εγκατάσταση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6.14.



Σχήμα 6.14: Τοπογραφική διάταξη του φωτοβολταϊκού σταθμού.

6.8 ΓΕΙΩΣΗ

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

1. **Γείωση λειτουργίας.** Ονομάζεται η γείωση ενός σημείου ενός ενεργού κυκλώματος (π.χ. γείωση του ουδέτερου ενός ΜΣ, η γείωση του ουδέτερου αγωγού του συστήματος). 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 χρησιμοποιείται 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. 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 θεμελίων των κτιρίων, μέσα στο σκυρόδεμα. Επειδή το έδαφος και το σκυρόδεμα των θεμελίων είναι υγρό όλο το έτος συνήθως, ο θεμελιακός γειωτής έχει σχετικά χαμηλή αντίσταση γείωσης. Τιμές των 2Ω ή μικρότερες δεν είναι σπάνιες. Ο αγωγός του γειωτή μπορεί να είναι:

- Ταινίες γαλβανισμένου χάλυβα ελάχιστων διαστάσεων 30mm x 3.5mm ή 25mm x 4mm. Συνιστώνται διαστάσεις 40x5 ή 50x4,

- Βέργα γαλβανισμένου χάλυβα ελάχιστης διαμέτρου 10mm. Συνίσταται διάμετρος 12mm.

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).

Ο γειωτής πρέπει να περιβάλλεται παντού από δονημένο συμπακνωμένο σκυρόδεμα. Μετά από την εκσκαφή των θεμελίων κατασκευάζεται μια στρώση από σκυρόδεμα πάχους 6-10cm. Εκεί πάνω τοποθετείται ή μια ταινία με την πλατιά της πλευρά όρθια ή μια χαλύβδινη βέργα κυκλικής διατομής. Το σκυρόδεμα τοποθετείται για να καλύπτει την ταινία από διάβρωση. Η όρθια τοποθέτηση της ταινίας εξασφαλίζει μια άνετη τοποθέτηση και η ταινία λυγίζει καλύτερα στις γωνίες του κτιρίου. Ακολούθως τοποθετείται ο οπλισμός των θεμελίων και ακολούθως εκχύνεται, γεμίζοντας με σκυρόδεμα όλο το θεμέλιο. 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 στο περιβάλλον που εγκαθίστανται, ικανότητα να άγουν το αναμενόμενο ηλεκτρικό ρεύμα σφάλματος και επαρκή μηχανική αντοχή ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση της ηλεκτρικής συνέχειας. Το σκυρόδεμα πρέπει να είναι αντοχής B 225 ή περιεκτικότητας 300kg τσιμέντου ανά m³. Η τοποθέτηση του γειωτή μέσα στο σκυρόδεμα στη βάση των θεμελίων εξασφαλίζει αντοχή στη διάβρωση και στις μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον ο γειωτής είναι σε υγρό έδαφος όπου η αγωγιμότητα είναι μεγάλη.

Στην φ/β εγκατάσταση που μελετάται, σαν σύστημα γείωσης χρησιμοποιήσαμε τη θεμελιακή γείωση. Η ταινία γείωσης τοποθετείται περιμετρικά της φωτοβολταϊκής γεννήτριας σε απόσταση περίπου ενός μέτρου από αυτή. Επειδή η διαστάσεις του φ/β πάρκου είναι μεγάλες σε μήκος 40x26 m², χωρίσαμε την θεμελιακή γείωση σε έξι βρόγχους (Σχήμα 6.15). Έτσι δημιουργήσαμε ένα μήκος της ταινίας γείωσης $l = 40 \cdot 4 + 26 \cdot 4 = 224m$ και μειώσαμε την αντίσταση του συστήματος της θεμελιακής γείωσης. Η ταινία γείωσης είναι κατασκευασμένη από γαλβανισμένο χάλυβα διαστάσεων 30x3.5 mm². Με τη χρήση ειδικών στηριγμάτων την τοποθετήσαμε σε βάθος περίπου 1m μέσα στο έδαφος. Κατασκευάσαμε μια στρώση από σκυρόδεμα πάχους 10cm και φτιάξαμε τον οπλισμό των θεμελίων για την στήριξη των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Συνδέσαμε τρεις βάσεις της κάθε συστοιχίας με την ταινία γείωσης. Επιλέξαμε να συνδέσουμε την ταινία γείωσης στις δύο ακραίες και στην μεσαία βάση στήριξης της κάθε συστοιχίας. Έτσι η απόσταση της αναμονής γείωσης που συνδέθηκε στις βάσεις από την ταινία γείωσης είναι μικρή. Έπειτα γεμίσαμε με σκυρόδεμα όλο το θεμέλιο. Κρατήσαμε έξω από το σκυρόδεμα τις αναμονές γείωσης και τις επισημάναμε με χρωματισμό για να τις προστατέψουμε. Οι λήψεις της θεμελιακής γείωσης είναι κατασκευασμένες από γαλβανισμένο χάλυβα, όπως και οι βάσεις στήριξης των συστοιχιών. Υπολογίσαμε την τιμή της αντίστασης του συστήματος γείωσης της εγκατάστασης με την βοήθεια της εξίσωσης που συνδέει το μήκος της ταινίας γείωσης, το πάχος της και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η ειδική αντίσταση του εδάφους για αγρό είναι $\rho = 100\Omega \cdot m$. Ο θεμελιακός γειωτής έχει διαστάσεις 30x3,5mm² και το συνολικό

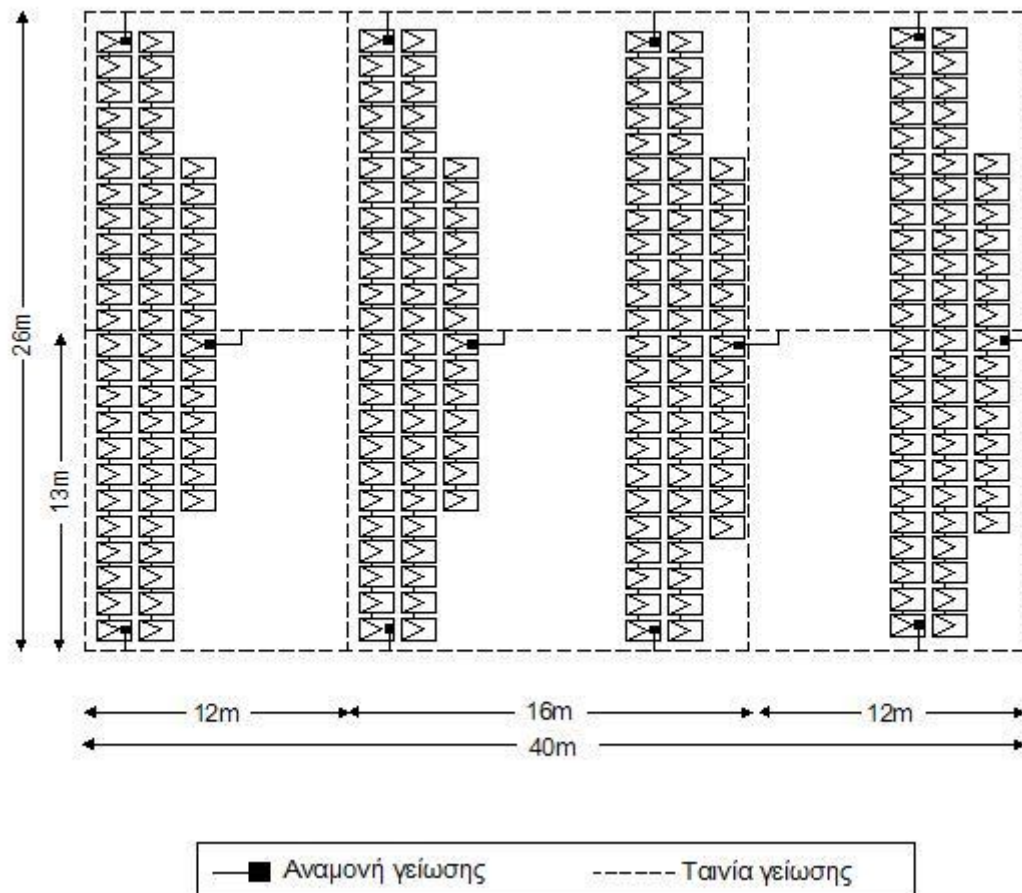
του μήκος είναι $l = 224m$. Ο συντελεστής A είναι η διατομή του αγωγού του θεμελιακού γειωτή. Η εξίσωση αυτή δίνεται παρακάτω:

Για το γειωτή ταινίας το ισοδύναμο πάχος d του αγωγού δίνεται από τη σχέση:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 30 \cdot 3,5}{\pi}} = 11,5624mm$$

Η συνολική αντίσταση της θεμελιακής γείωσης για βάθος περίπου 1m είναι:

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \ln \frac{2 \cdot l}{d} = \frac{100}{\pi \cdot 224} \ln \frac{2 \cdot 224}{11,5624} = 0,52\Omega$$



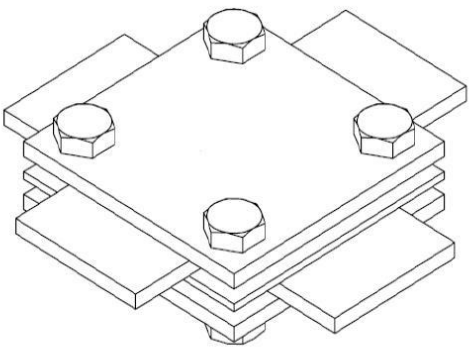
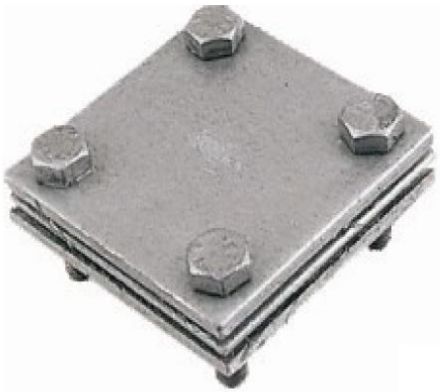
Σχήμα 6.15: Κάτοψη της εγκατάστασης της θεμελιακής γείωσης με ταινία και αναμονές της γείωσης.

Η ταινία γείωσης που χρησιμοποιήσαμε έχει διαστάσεις 30x3.5mm, είναι χαλύβδινη θερμά επιψευδαργυρωμένη και είναι εργαστηριακά δοκιμασμένη. Χρησιμοποιείται ως συλλεκτήριος αγωγός, ως αγωγός καθόδου και ως αγωγός γείωσης (Σχήμα 6.16). Το μήκος της είναι 29m ανά τεμάχιο.



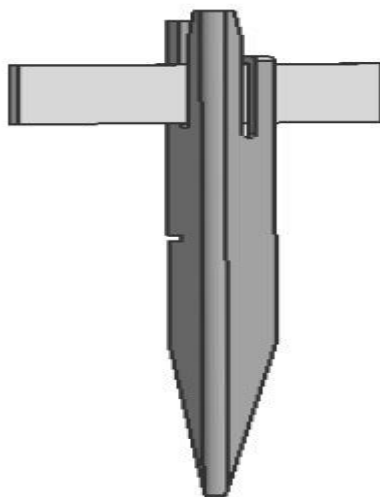
Σχήμα 6.16: Ταινία γείωσης (της εταιρείας ελέμκο)

Ο σφιγκτήρας της ταινίας γείωσης που χρησιμοποιήσαμε αποτελείται από δυο εξωτερικά πλακίδια διαστάσεων 60x60x4mm και ένα ενδιάμεσο πλακίδιο διαστάσεων 60x60x2mm το οποίο παρεμβάλλεται ανάμεσα στους αγωγούς ώστε να αυξάνεται η επιφάνεια επαφής μεταξύ τους (Σχήμα 6.17). Η σύσφιξη επιτυγχάνεται με δυο εξάγωνες βίδες από χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο διαστάσεων M8x30mm και δυο περικόχλια M8 χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο. Τοποθετείται εντός του σκυροδέματος. Η κατηγορία ικανότητας εκφόρτισης ρεύματος όπως αναφέρεται στις δοκιμές που έχει περάσει είναι CLASS H – 100kA (10/350μs) και είναι κατάλληλος για εγκατάσταση συστήματος αντικεραυνικής προστασίας στάθμης ΙΙΙ.

Συνδεσμολογία	Φωτογραφία
	

Σχήμα 6.17: Σφιγκτήρας γείωσης (της εταιρείας ελέμκο)

Για την κατακόρυφη τοποθέτηση της ταινίας γείωσης χρησιμοποιήσαμε στηρίγματα-ορθοστάτες κατάλληλους να δέχονται το πάχος της ταινίας γείωσης (σχήμα 6.18).



Σχήμα 6.18: ορθοστάτης γείωσης (Σχέδιο της εταιρείας ελέμκο)

Ο ορθοστάτης είναι κατασκευασμένος από χάλυβα θερμά επιψευδαργυρωμένο και στο κάτω μέρος του φέρει μύτη που λειτουργεί σαν οδηγός βάθους τοποθέτησης.

Η συνολική αντίσταση της θεμελιακής γείωσης έχει πολύ μικρή τιμή, το φ/β πάρκο το έχουμε χωρίσει σε 6 βρόγχους δημιουργώντας έτσι ισοδυναμικές επιφάνειες, έχουμε γειώσει με την βοήθεια των αναμονών γείωσης όλες τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, τα αλεξικέραυνα που θα τοποθετήσουμε, τους αντιστροφεείς, την παροχή της ΔΕΗ, τους ηλεκτρικούς πίνακες κτλ.

6.9 ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

6.9.1. Αναγκαιότητα αντικεραυνικής προστασίας στο φωτοβολταϊκό σύστημα

Το φωτοβολταϊκό πάρκο είναι ισχύος 60 KW και αποτελείται από 250 φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία καλύπτουν αρκετά μεγάλη έκταση, επομένως ο κίνδυνος πτώσης κεραυνού στο πάρκο και δημιουργία υπέρτασης είναι μεγάλος. Επίσης το κόστος επένδυσης είναι μεγάλο και η προστασία της εγκατάστασης από την πτώση κεραυνών κρίνεται απαραίτητη.

6.9.2 Βλάβες από υπερτάσεις στο φωτοβολταϊκό σύστημα

Οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις των κεραυνών μπορούν να προκαλέσουν πολύ σοβαρές βλάβες στο φωτοβολταϊκό σύστημα. Οι βλάβες αυτές χωρίζονται στο τραυματισμό ζωντανών οργανισμών, στις υλικές βλάβες και στα σφάλματα στα ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά συστήματα. Οι παραπάνω βλάβες μπορούν να προκαλέσουν διαφόρων τύπων απώλειες στο υπό προστασία αντικείμενο οι οποίες είναι: η απώλεια ανθρώπινης ζωής, η απώλεια υπηρεσιών στους καταναλωτές, η απώλεια της πολιτιστικής κληρονομιάς και οι οικονομικές απώλειες. Τέλος, ανάλογα με το σημείο που θα χτυπήσει ο κεραυνός οι παραπάνω βλάβες χωρίζονται σε: πλήγμα μέσα στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, πλήγμα κοντά στη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, πλήγμα στις υπηρεσίες που συνδέονται στην εγκατάσταση και πλήγμα στις κοντινές υπηρεσίες που συνδέονται με την εγκατάσταση.

6.9.2. (α) Υπερτάσεις στην DC πλευρά της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Στην DC πλευρά της εγκατάστασης βρίσκονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ενδεχόμενη υπέρταση από την πτώση κεραυνού μπορεί να προκαλέσει τα εξής πλήγματα στο φ/β σύστημα:

- Γαλβανική σύζευξη: καταστροφή της μόνωσης του φ/β εξοπλισμού.
- Επαγωγική σύζευξη: η ηλεκτρική εκκένωση προκαλεί ένα μαγνητικό πεδίο τόσο γύρω από το κανάλι της εκκένωσης όσο και από τους αγωγούς της εξωτερικής αντικεραυνικής προστασίας. Αυτή η αλλαγή του πεδίου προκαλεί υπερτάσεις σε όλους τους βρόγχους των καλωδίων του συστήματος. Όχι μόνο τα άμεσα αλλά και τα έμμεσα πλήγματα στην εγκατάσταση επάγουν υπερτάσεις.
- Χωρητική σύζευξη: το ηλεκτρικό πεδίο ενός σύννεφου που προκαλεί καταιγίδα, δημιουργεί ένα διαχωρισμό φορτίου στα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη και στου ημιαγωγούς της εγκατάστασης. Τη στιγμή της εκκένωσης το ηλεκτρικό πεδίο καταρρέει και μια νέα μεταφορά φορτίου εμφανίζεται. Το φορτίο διαρρέει όλους τους αγωγούς που συνδέονται με τη γη σαν μεταβατική υπέρταση.

6.9.2. (β) Υπερτάσεις στην AC πλευρά της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Επειδή η συγκεκριμένη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση συνδέεται με το δίκτυο, όλες οι εξωτερικές υπηρεσίες που εισέρχονται στην εγκατάσταση μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση υπερτάσεων.

6.9.3. Στάθμες προστασίας αντικεραυνικού συστήματος

Ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) δεν μπορεί ποτέ να εξασφαλίσει την απόλυτη προστασία τη κατασκευής, ωστόσο μπορεί να μειώσει σε αποδεκτό βαθμό τις επιζήμιες επιπτώσεις του κεραυνού σε αυτή. Ο σχεδιασμός του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας συνίσταται στην επιλογή της αποδεκτής στάθμης προστασίας.

Οι στάθμες προστασίας ενός συστήματος (ΣΑΠ) είναι τέσσερις και σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα του (ΣΑΠ) στην προστασία της εγκατάστασης (Πίνακας 6.7).

Στάθμη προστασίας	Αποτελεσματικότητα ΣΑΠ
I	0.98
II	0.95
III	0.90
IV	0.80

Πίνακας 6.7

Παρακάτω στον πίνακα 6.8 φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων του κεραυνού ανάλογα με την στάθμη προστασίας.

Παράμετροι κεραυνού	Στάθμη προστασίας		
	I	II	III
Μέγιστο εύρος ρεύματος (kA)	200	150	100
Ολικό φορτίο C	300	225	150
Κρουστικό φορτίο C	100	75	50
Ειδική ενέργεια (kJ/Ω)	10000	5600	2500
Μέση κλίση (kA/μs)	200	150	100

Πίνακας 6.8

Παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της κατάλληλης στάθμης προστασίας είναι οι διαστάσεις, η θέση και το υλικό της κατασκευής, η κατηγορία στην οποία αυτή κατατάσσεται σύμφωνα με την χρήση της, οι συνέπειες που θα έχει η καταστροφή της στον άνθρωπο ή στο περιβάλλον καθώς και η κεραυνική δραστηριότητα στην περιοχή. Για την επιλογή της κατάλληλης στάθμης αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να ληφθούν υπόψη η συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων της κατασκευής και η αποδεκτή συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων της κατασκευής.

6.9.4 Συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή

Η συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή, N_d , εκφράζει τον μέσο αριθμό άμεσων κεραυνικών πληγμάτων που μπορούν να συμβούν σε μια κατασκευή ανά έτος και μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$N_d = N_g \cdot A_e \cdot 10^{-6} \text{ πλήγματα κεραυνού ανά έτος } \left[\frac{\text{ΠΛΗΓΜΑΤΑ}}{\text{ΕΤΟΣ}} \right], \text{ όπου}$$

- N_g είναι η μέση ετήσια πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος, που εκφράζει τον αναμενόμενο μέσο αριθμό πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο και έτος στην περιοχή εγκατάστασης της κατασκευής
- A_e είναι η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια της κατασκευής (σε m^2), που ορίζεται ως μια επίπεδη επιφάνεια εδάφους που έχει την ίδια μέση ετήσια συχνότητα πληγμάτων κεραυνού όπως η κατασκευή.

Η μέση ετήσια πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος (N_g) δίνεται από ειδικούς χάρτες που δείχνουν τη μέση συχνότητα πτώσεως κεραυνού ανά km^2 . Σύμφωνα με την IEC, αν η ακριβής τιμή της δεν είναι διαθέσιμη μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά από την παρακάτω εξίσωση:

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \text{ πλήγματα κεραυνού ανά } km^2 \text{ και έτος } \left[\frac{\text{ΠΛΗΓΜΑΤΑ}}{km^2 \cdot \text{ΕΤΟΣ}} \right].$$

όπου T_d είναι ο αριθμός των ημερών καταιγίδας ανά έτος. Ως ημέρα καταιγίδας για μια συγκεκριμένη περιοχή ορίζεται η ημέρα για την οποία στη περιοχή αυτή έχει γίνει αντιληπτός ο θόρυβος της βροντής και έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο της αστραπής δηλαδή του κεραυνού.

Ο αριθμός των ημερών καταιγίδας T_d δίνεται από χάρτες ισοκεραυνικών καμπυλών που έχουν συντάξει για το σκοπό αυτό πολλές χώρες. Στο σχήμα 6.19 παρουσιάζεται ο χάρτης ισοκεραυνικών καμπυλών της Ελλάδας.

Η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια A_e της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης εφόσον πρόκειται για συνδυασμό ορθογώνιων κατασκευών δίνεται από την εξίσωση:

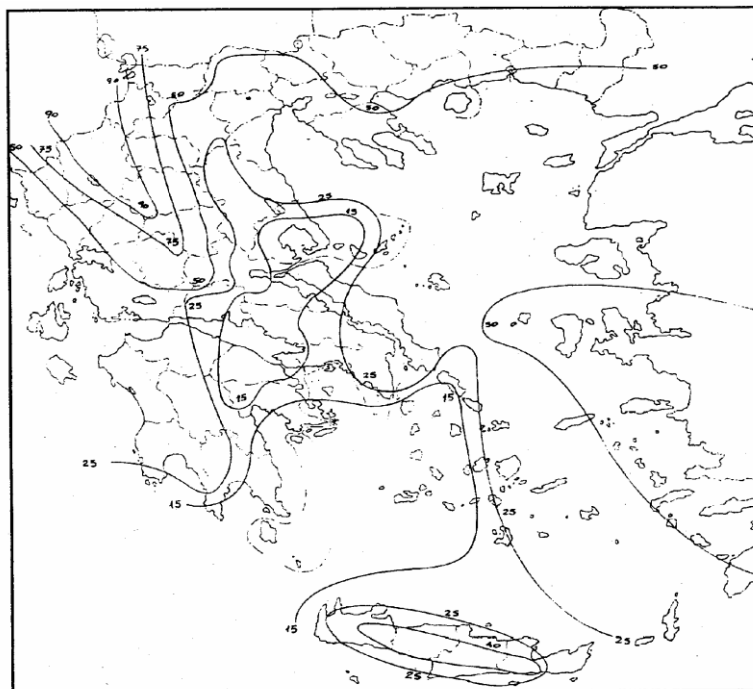
$$A_e = L \cdot W + 6 \cdot H \cdot (L + W) + 9 \cdot \pi \cdot H^2$$

όπου L το μήκος, W το πλάτος και H το ύψος της κατασκευής.

Σύμφωνα με την τοπογραφική διάταξη της φ/β εγκατάστασης, θεωρούμε σαν ύψος αυτής το μέγιστο ύψος που φθάνουν τα φ/β πλαίσια όταν είναι τοποθετημένα στις βάσεις στήριξής τους που είναι $H = 3m$. Το μήκος των συστοιχιών αθροίζοντας και τις μεταξύ τους αποστάσεις είναι

$L = 4 \cdot 4.3 + 3 \cdot 7 = 38.2 \cong 40m$. Το πλάτος των συστοιχιών είναι $W = 23.808 \cong 26m$. Υπολογίζουμε και την ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση γειννίασης που πρέπει να έχουν τα φ/β πλαίσια από τους αγωγούς του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Επομένως έχουμε:

$$A_e = L \cdot W + 6 \cdot H \cdot (L + W) + 9 \cdot \pi \cdot H^2 = 40 \cdot 26 + 6 \cdot 3 \cdot (40 + 26) + 9\pi \cdot 3^2 = 2482,469 m^2$$



Σχήμα 6,19 : Χάρτης ισοκεραυνικών καμπυλών Ελλάδας

Ο αριθμός των ημερών καταιγίδας για την πόλη της Ηλείας σύμφωνα με τον χάρτη ισοκεραυνικών καμπυλών της Ελλάδας είναι $T_d = 25$. Επομένως η μέση ετήσια πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος N_g είναι προσεγγιστικά:

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} = 0,04 \cdot 25^{1,25} = 2,2361 \left[\frac{\text{ΠΛΗΓΜΑΤΑ}}{\text{km}^2 \cdot \text{ΕΤΟΣ}} \right]$$

Επομένως η συχνότητα των άμεσων κεραυνικών πληγμάτων στην φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι:

$$N_d = N_g \cdot A_e = 2,2361 \cdot 2482,469 \cdot 10^{-6} = 0,005551 \left[\frac{\text{ΠΛΗΓΜΑΤΑ}}{\text{ΕΤΟΣ}} \right]$$

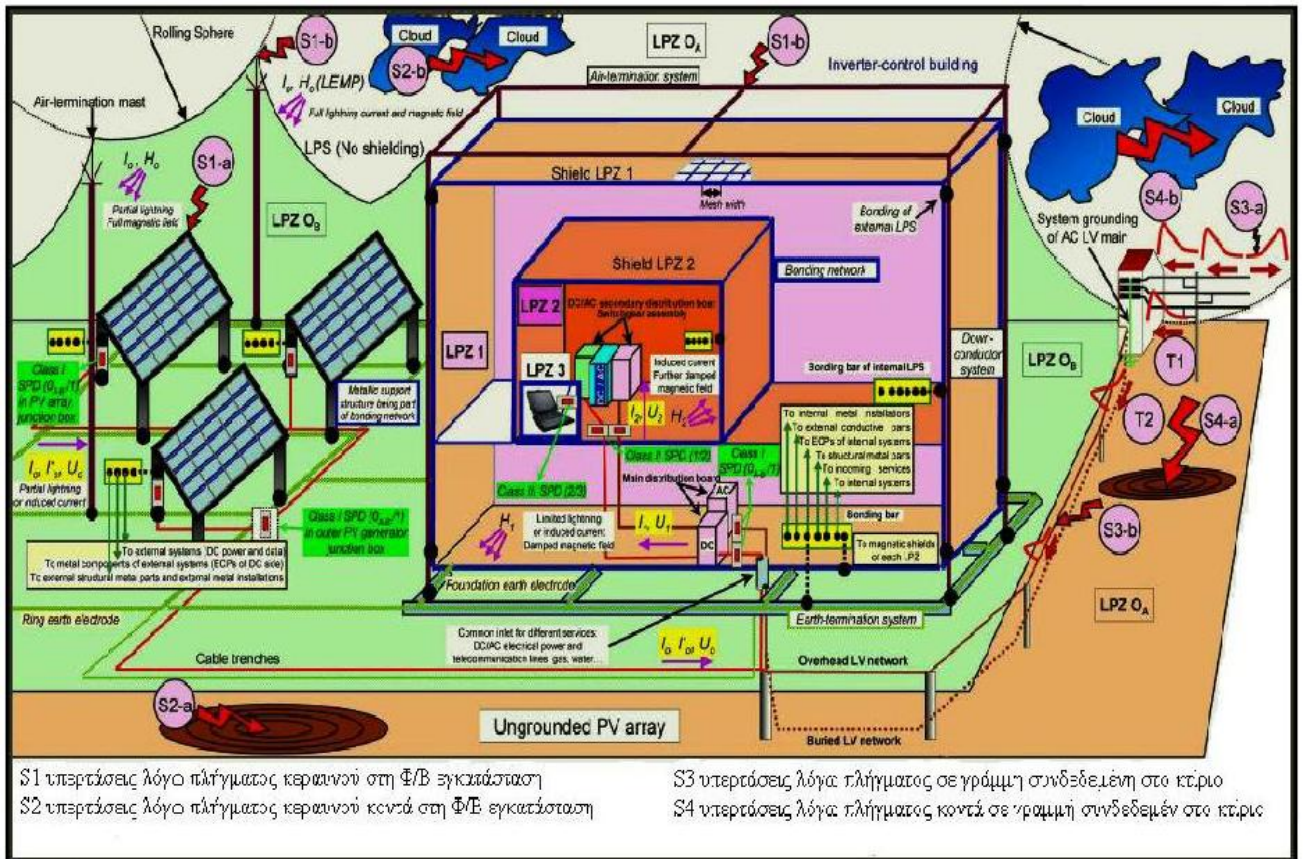
Συνήθως οι φ/β εγκαταστάσεις απαιτούν στάθμη προστασίας τουλάχιστον III για αυτό για τη μελέτη της αντικεραυνικής προστασίας επιλέξαμε αυτή την στάθμη προστασίας παρόλο που η συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων έχει χαμηλή τιμή.

6.9.5. Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας, ισοδυναμικές συνδέσεις και θωράκιση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Η αντικεραυνική προστασία μιας φ/β εγκατάστασης βασίζεται στη γενική αρχή του διαχωρισμού της σε ζώνες αντικεραυνικής προστασίας. Οι ζώνες αντικεραυνικής προστασίας (ΖΑΠ) είναι περιοχές εντός και εκτός της εγκατάστασης, όπου οι αναμενόμενες ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις του κεραυνού είναι καθορισμένες σε σχέση με την επικινδυνότητά τους και επομένως μπορούν να περιοριστούν. Οι ΖΑΠ οριοθετούνται από σημαντικές αλλαγές των ηλεκτρομαγνητικών συνθηκών, αποτελώντας περιοχές αυξανόμενης απαίτησης ηλεκτρομαγνητικής προστασίας βαίνοντας από την εξωτερική περιοχή της εγκατάστασης, όπου υπάρχει κίνδυνος άμεσου πλήγματος, προς το εσωτερικό της όπου πρέπει να εξασφαλιστεί η ηλεκτρομαγνητική ατρωσία των συσκευών. Κατά την προστασία της κατασκευής οριοθετούνται οι παρακάτω ΖΑΠ:

- ΖΑΠ 0_A : Ζώνη που περιέχει στοιχεία της κατασκευής εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις του κεραυνού είναι μη περιορισμένες.
- ΖΑΠ 0_B : Ζώνη που περιέχει στοιχεία της κατασκευής μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις του κεραυνού είναι μη περιορισμένες.
- ΖΑΠ 0_γ : Ζώνη που περιέχει στοιχεία της κατασκευής μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα και όπου το τμήμα του ρεύματος του κεραυνού που μπορεί να τα διαρρεύσει είναι περιορισμένο σε σχέση με την ΖΑΠ 0_B. Στην ζώνη αυτή οι ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις του κεραυνού μπορούν να περιοριστούν ανάλογα με τα μέτρα θωράκισης που λαμβάνονται.
- Ακόλουθες ζώνες (ΖΑΠ 2,1...) : Ζώνη που απαιτείται περαιτέρω μείωση του ρεύματος του κεραυνού καθώς και περαιτέρω εξασθένιση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε σχέση με την αμέσως προηγούμενη ΖΑΠ.

Πιο συγκεκριμένα για την περίπτωση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, ο διαχωρισμός τους σε ΖΑΠ καθώς επίσης και οι ισοδυναμικές συνδέσεις στα όρια των ζωνών αυτών και η θωράκιση, φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 6.19.



Σχήμα 6.19: Ζώνη αντικεραυνικής προστασίας, ισοδυναμικές συνδέσεις και θωράκιση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Όπως βλέπουμε από το παραπάνω σχήμα, το εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να προστατεύει όλα τα σημεία της φ/β εγκατάστασης. Στη συνέχεια περιγράφεται η εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας.

Η εξωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας έχει στόχο να συλλάβει τον κεραυνό πριν αυτός πλήξει την υπο προστασία κατασκευή και να διοχετεύσει το ρεύμα του από το σημείο του πλήγματος στη γη, χωρίς αυτό να προκαλέσει θερμικές και μηχανικές ζημιές στην εγκατάσταση και επικίνδυνες υπερτάσεις για τους ανθρώπους και το υλικό. Η εξωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας αποτελείται από:

- Το συλλεκτήριο σύστημα που προορίζεται να δέχεται τους κεραυνούς,
- το σύστημα των αγωγών καθόδου το οποίο εξασφαλίζει την όδευση του ρεύματος του κεραυνού από το συλλεκτήριο σύστημα προς τη γη και
- το σύστημα γείωσης που άγει και διαχέει το ρεύμα του κεραυνού στο έδαφος.

Για τον προσδιορισμό της ζώνης προστασίας που παρέχει το συλλεκτήριο σύστημα χρησιμοποιούνται η μέθοδος της γωνίας προστασίας, η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας και η μέθοδος του πλέγματος αγωγών για την προστασία επίπεδων επιφανειών.

6.9.6. Αντικεραυνική προστασία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας με την μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας

Η φ/β γεννήτρια, δηλαδή η DC πλευρά της φ/β εγκατάστασης, βρίσκεται συνήθως στην ΖΑΠ O_B (σχήμα 6.19). Η φ/β γεννήτρια περιλαμβάνει τα φ/β πλαίσια, την DC καλωδίωση και τα κουτιά διασύνδεσης της γεννήτριας. Επειδή είναι ιδιαίτερα εκτεθειμένη στα κεραυνικά πλήγματα, η εγκατάσταση εξωτερικής αντικεραυνικής προστασίας είναι απαραίτητη. Η σχεδίασή της βασίζεται στη στάθμη III αντικεραυνικής προστασίας που επιλέγεται για φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος μεγαλύτερης των 10 KW. Εμείς επιλέξαμε την στάθμη III και η μελέτη μας βασίστηκε στην μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας που εξηγείται παρακάτω.

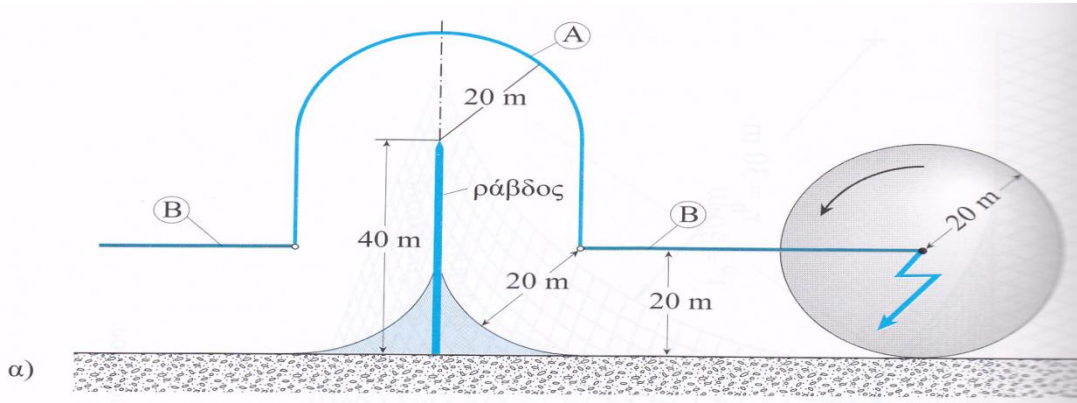
Όταν μια εκκένωση πλησιάζει γειωμένα αντικείμενα σε μια συγκεκριμένη απόσταση, τότε αυτή θα προχωρήσει δηλαδή ο κεραυνός θα πέσει στο πλησιέστερο αντικείμενο. Αυτή η συγκεκριμένη απόσταση λέγεται μέθοδος της κυλιόμενης ή κεραυνικής σφαίρας. Η ακτίνα της σφαίρας επιλέγεται από 60m έως 20m ανάλογα με την στάθμη προστασίας (Πίνακας 6.9).

Στάθμη προστασίας	Ακτίνα κυλιόμενης σφαίρας r_b (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60

Πίνακας 6.9: Περιοχές προστασίας συλλεκτήριων εγκαταστάσεων κατά IEC Publication 1024-1, ΕΛΟΤ 1197, για διάφορες στάθμες προστασίας I...IV με την μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας ακτίνας r_b

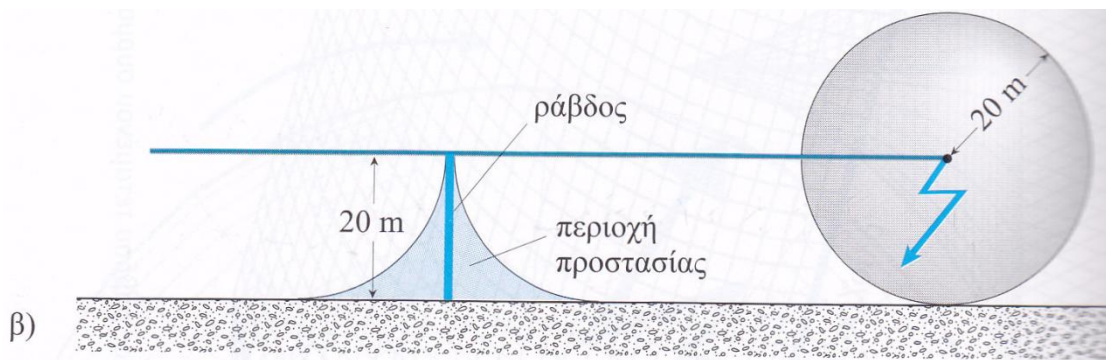
Ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζουμε την περιοχή προστασίας μπορεί να συμπτυχθεί στο εξής: Θεωρούμε μια κυλιόμενη σφαίρα ακτίνας r_b να κυλιέται παντού πάνω στη συλλεκτήρια εγκατάσταση και τη γη. Τα σημεία που δεν αγγίζει η σφαίρα είναι προστατευμένα.

Παρακάτω (σχήμα 6.20) είναι εγκατεστημένο ένα αλεξικέραυνο ράβδου μήκους 40m. Εκκενώσεις που πλησιάζουν δεξιά ή αριστερά της ράβδου σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής (B), οδηγούνται κατευθείαν στη γη. Εκκενώσεις που πλησιάζουν οποιοδήποτε σημείο της καμπύλης A, οδηγούνται στο αλεξικέραυνο ράβδου. Αντικείμενα που βρίσκονται στη σκιαγραφημένη περιοχή είναι προστατευμένα.



Σχήμα 6.20 (α): Κυλιόμενη κεραυνική σφαίρα σε περιοχή προστασίας ράβδου 40m.

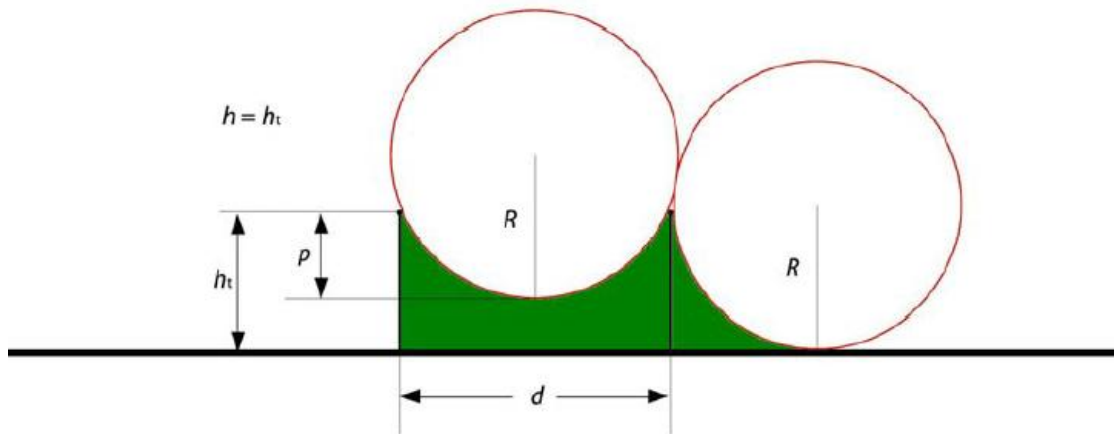
Παρακάτω στο σχήμα 6.21(β) φαίνεται και η περίπτωση όπου το αλεξικέραυνο ράβδου έχει ύψος 20m και η κεραυνική σφαίρα ακτίνα 20m.



Σχήμα 6.21

Σε περίπτωση συστήματος δυο κατακόρυφων ράβδων ύψους h_i που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d , όπως φαίνεται στο σχήμα 6.22, το βάθος εισχώρησης (p) της σφαίρας ακτίνας R εντός του χώρου μεταξύ των ράβδων, μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

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



Σχήμα 6.22: Ζώνη προστασίας δύο παράλληλων τεταμένων συρμάτων

Εφόσον απαιτείται η προστασία όλου του χώρου μεταξύ των διατάξεων σύλληψης του κεραυνού, η απόσταση εισχώρησης της κυλιόμενης σφαίρας πρέπει να είναι μικρότερη από το ύψος h_t . Η παραπάνω σχέση ισχύει και στην περίπτωση τεσσάρων κατακόρυφων ράβδων ίσου ύψους, τοποθετημένες στις γωνίες μιας τετράγωνης επιφάνειας ή ορθογώνιας επιφάνειας όπου η απόσταση d είναι ίση με την διαγώνιο του σχηματιζόμενου τετραγώνου ή ορθογώνιου από τις τέσσερις ράβδους και δίνεται από τη σχέση

$$d = \sqrt{A^2 + B^2}$$

όπου A, B είναι οι πλευρές αυτής της επιφάνειας.

Στην περίπτωση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας ως επιφάνεια αναφοράς λαμβάνεται το υψηλότερο σημείο του φωτοβολταϊκού πάνελ.

Ένα άλλο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπίσουμε είναι η ηλεκτρική απομόνωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Ανάμεσα σε μια εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας και τον μεταλλικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό της κατασκευής μπορεί να δημιουργηθεί κατά την πτώση κεραυνού μη ελεγχόμενη υπερπήδηση ηλεκτρικού σπινθήρα εάν δεν υπάρχει μεταξύ τους η απαραίτητη απόσταση ασφαλείας. Η διαχωριστική απόσταση S μεταξύ των αγωγών και των τμημάτων της εγκατάστασης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τιμή D που λέγεται ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση γειτνίασης, δηλαδή :

$$S \geq D \text{ όπου } D = k_i \cdot \frac{k_c}{k_m} \cdot L \quad [m]$$

Το k_i εξαρτάται από την επιλεγθείσα στάθμη προστασίας σύμφωνα με το παρακάτω πίνακα 6.10.

Στάθμη προστασίας	k_i
I	0.1
II	0.075
III - IV	0.05

Πίνακας 6.10

Επομένως για στάθμη προστασίας III επιλέγουμε $k_i = 0.05$.

Το k_c είναι ο συντελεστής διαχωρισμού του ρεύματος και εξαρτάται από την τοπολογία του συστήματος. Αν οι αγωγοί καθόδου του κεραύνιου ρεύματος είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους, στα άκρα τους, έξω από το έδαφος, τότε το ρεύμα του κεραυνού διαμοιράζεται προτού καταλήξει στη γη. Ανάλογα με το πόσοι αγωγοί είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους λαμβάνει τις εξής τιμές: 1 για έναν αγωγό καθόδου, 0,66 για δύο αγωγούς καθόδου και 0,44 για περισσότερους αγωγούς καθόδου συνδεδεμένους μεταξύ τους, συμμετρικά τοποθετημένοι στις τρεις διαστάσεις της κατασκευής με απόσταση μεταξύ τους 20m.

Στην εγκατάσταση μας 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 $k_c = 1$.

Το k_m εξαρτάται από το διαχωριστικό μέσο που παρεμβάλλεται μεταξύ των εγκαταστάσεων που ελέγχεται η γειτνίασή τους. Στην περίπτωση των φ/β εγκαταστάσεων είναι 1 γιατί έχουμε αέρα.

Το L (m) είναι το μήκος του αγωγού καθόδου από το σημείο που ελέγχεται η γειτνίαση μέχρι το πλησιέστερο σημείο ισοδυναμικής σύνδεσης.

Στην περίπτωση των φ/β εγκαταστάσεων για την απόσταση ασφαλείας πρέπει να ισχύει $S \geq 0.5m$ ακόμα και αν το S υπολογίζεται μικρότερο από αυτή τη τιμή.

6.9.7. Χαρακτηριστικά του φ/β πάρκου όπου πραγματοποιείται η εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας

Επιλέξαμε σαν εγκατάσταση γείωσης να χρησιμοποιήσουμε την θεμελιακή γείωση του φ/β πάρκου. Αν επιλέξουμε να τοποθετήσουμε 4 αλεξικέραυνα, ένα σε κάθε γωνία του ορθογώνιου που σχηματίζεται στην κάτοψη του πάρκου για συνολικές διαστάσεις αυτού $40 \times 26 \text{ m}^2$ τότε η διαγώνιος που σχηματίζεται έχει μήκος:

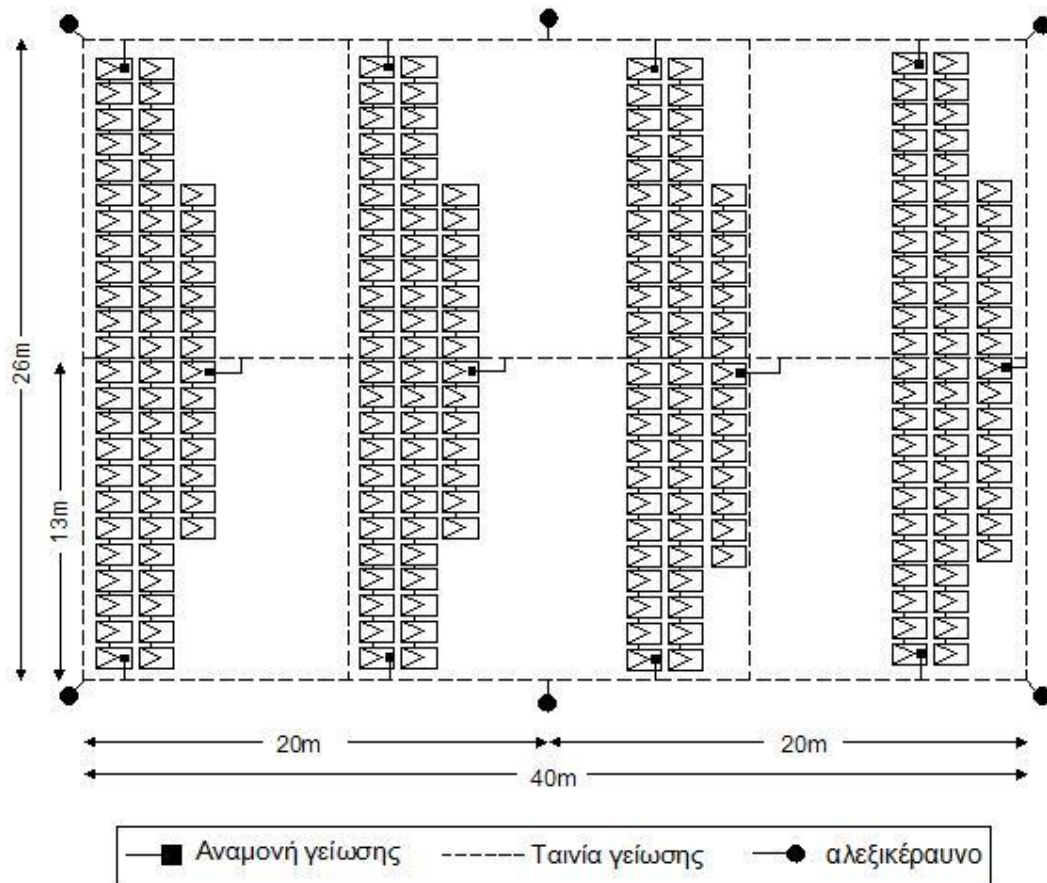
$$d = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{40^2 + 26^2} = 47,71 \text{ m}$$

και το βάθος εισχώρησης της σφαίρας για ακτίνα της σφαίρας $R = 45\text{m}$ θα είναι:

$$p = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = 6,85 \text{ m}$$

επομένως θα πρέπει να τοποθετήσουμε αλεξικέραυνα σε ύψος μεγαλύτερο των 6,85m πάνω από το μέγιστο ύψος που φθάνουν τα πλαίσια, δηλαδή περίπου 10 μέτρα από το έδαφος. Αυτό θα είναι αντιαισθητικό και επίσης θα έχουμε πρόβλημα με την σκίαση που θα δημιουργεί το αλεξικέραυνο στα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Για αυτό το λόγο επιλέξαμε να τοποθετήσουμε έξι αλεξικέραυνα τύπου ακίδας έτσι ώστε να μειώσουμε το ύψος της ακίδας πάνω από το υψηλότερο σημείο των πλαισίων. Τα τρία αλεξικέραυνα τα τοποθετήσαμε στα δυο άκρα και στη μέση της μιας πλευράς με το μεγαλύτερο μήκος 40 μέτρων και τα άλλα τρία στη απέναντι πλευρά αντιστοίχως. Έτσι σχηματίσαμε δύο νοητά ορθογώνια με διαστάσεις $20 \times 13 \text{ m}^2$ το καθένα, τα οποία καλύπτουν όλες τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες (Σχήμα 6.23).



Σχήμα 6.23: Θεμελιακή γείωση και αντικεραυνική προστασία

Η διαγώνιος που σχηματίζεται μεταξύ των αλεξικέραυνων σε αυτά τα νοητά ορθογώνια έχει μήκος:

$$d = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{20^2 + 13^2} = 23,85 \text{ m}$$

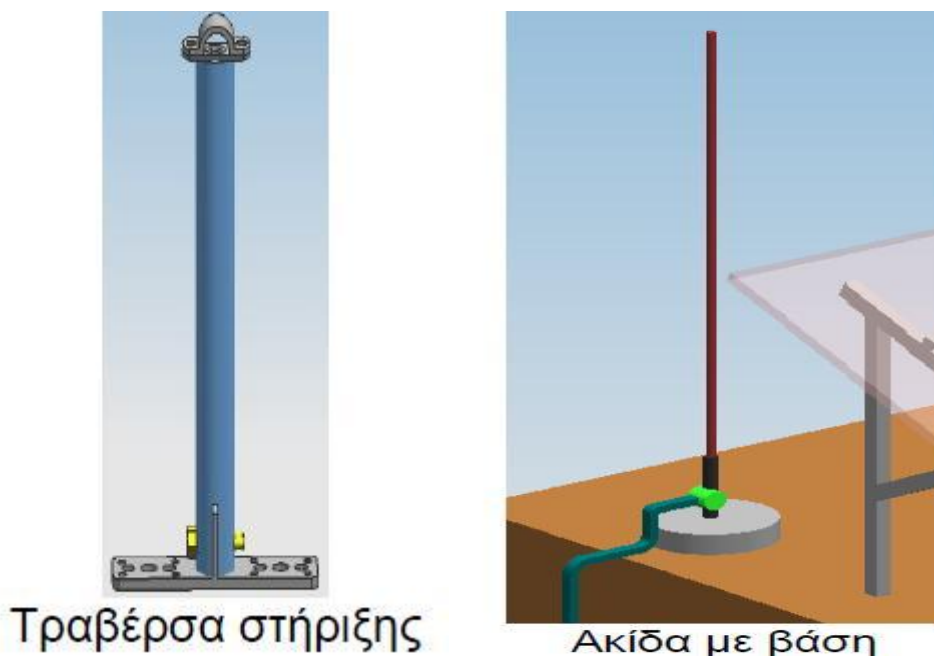
και το βάθος εισχώρησης της σφαίρας είναι:

$$p = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = 1,61 \text{ m}$$

Επομένως το αλεξικέραυνο που θα τοποθετήσουμε πρέπει να απέχει από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες ύψος μεγαλύτερο του 1,61m. Αφού το υψηλότερο σημείο από το έδαφος που φθάνει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι 3m, πρέπει να τοποθετήσουμε τα αλεξικέραυνα σε ύψος μεγαλύτερο από 4.61m από το έδαφος.

Για την προστασία της εγκατάστασης από άμεσο κεραυνικό πλήγμα επιλέξαμε να τοποθετήσουμε ακίδες διαστάσεων $\Phi 16 \times 3000 \text{mm}$ που είναι κατασκευασμένες από κράμα αλουμινίου και επιτρέπεται η σύνδεσή τους σε εξωτερικό χώρο με αντικείμενα επιψευδαργυρωμένου χάλυβα. Η ακίδα έχει περάσει με επιτυχία τις δοκιμές που προβλέπονται από το πρότυπο ΕΛΟΤ.

Η ακίδα στηρίζεται στο κάτω μέρος της σε βάση από σκυρόδεμα διαστάσεων $\Phi 340 \times 100 \text{mm}$ η οποία φέρει σωλήνα $3/4"$, ύψους 100mm , εντός του οποίου τοποθετείται η ακίδα και συσφίγγεται μέσω δυο κοχλιών $M8 \times 20 \text{mm}$. Στο μέσο της περίπου στηρίζεται με τραβέρσα κατασκευασμένη από μονωτικό υλικό υψηλής μηχανικής αντοχής και κατάλληλης διηλεκτρικής αντοχής ώστε να προσφέρεται ασφαλής στήριξη και να επιτυγχάνεται πλήρης ηλεκτρική απομόνωση της ακίδας από τις μεταλλικές βάσεις στήριξης των φωτοβολταϊκών στοιχείων (σχήμα 6.24).



Σχήμα 6.24: Ακίδα με τη βάση στήριξής της από σκυρόδεμα που συνδέεται μέσω αγωγού καθόδου με την θεμελιακή γείωση και τραβέρσα για τη στήριξη της ακίδας με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Οι ακίδες θα συνδεθούν στο κάτω μέρος τους μέσω συνδέσμων με την θεμελιακή γείωση της εγκατάστασης.

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση γεινίασης S μεταξύ της εγκατάστασης των ακίδων αντικεραυνικής προστασίας και των φωτοβολταϊκών συστοιχιών πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τιμή D , όπως αναφέραμε παραπάνω, δηλαδή :

$$S \geq D \text{ όπου } D = k_i \cdot \frac{k_c}{k_m} \cdot L \text{ [m]}$$

Για στάθμη προστασίας III επιλέγουμε $k_i = 0.05$. Οι αγωγοί καθόδου του κεραυνίου ρεύματος είναι συνδεδεμένες με την θεμελιακή γείωση στο υπέδαφος και σε κανένα άλλο σημείο πάνω από το έδαφος, οπότε το ρεύμα του κεραυνού δεν διαμοιράζεται προτού καταλήξει στη γη επομένως ο συντελεστής $k_c = 1$. Το διαχωριστικό μέσο που παρεμβάλλεται μεταξύ των ακίδων αντικεραυνικής προστασίας και των φωτοβολταϊκών συστοιχιών είναι ο αέρας οπότε $k_m = 1$. Το L (m) είναι το μήκος του αγωγού καθόδου από το σημείο που ελέγχεται η γειννίαση μέχρι το πλησιέστερο σημείο ισοδυναμικής σύνδεσης και είναι 3m που είναι το μέγιστο ύψος των φωτοβολταϊκών συστοιχιών από το έδαφος. Επομένως η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση γειννίασης είναι:

$$D = k_i \cdot \frac{k_c}{k_m} \cdot L = 0,05 \cdot \frac{1}{1} \cdot 3 = 0.15m$$

Επειδή όμως στην περίπτωση των φ/β εγκαταστάσεων για την απόσταση ασφαλείας πρέπει να ισχύει $S \geq 0.5m$ ακόμα και αν το S υπολογίζεται μικρότερο από αυτή τη τιμή επιλέξαμε να τοποθετήσουμε τις ακίδες, με την βάση στήριξής τους σε απόσταση 1m από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Οι ακίδες στο μέσο τους περίπου στηρίζονται μέσω τραβέρσας με τις μεταλλικές βάσεις στήριξης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η τραβέρσα είναι κατασκευασμένη από μονωτικό υλικό υψηλής μηχανικής αντοχής και κατάλληλης διηλεκτρικής αντοχής ώστε να προσφέρει ασφαλή στήριξη και να επιτυγχάνεται πλήρως η ηλεκτρική απομόνωση της ακίδας από τις μεταλλικές βάσεις στήριξης των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

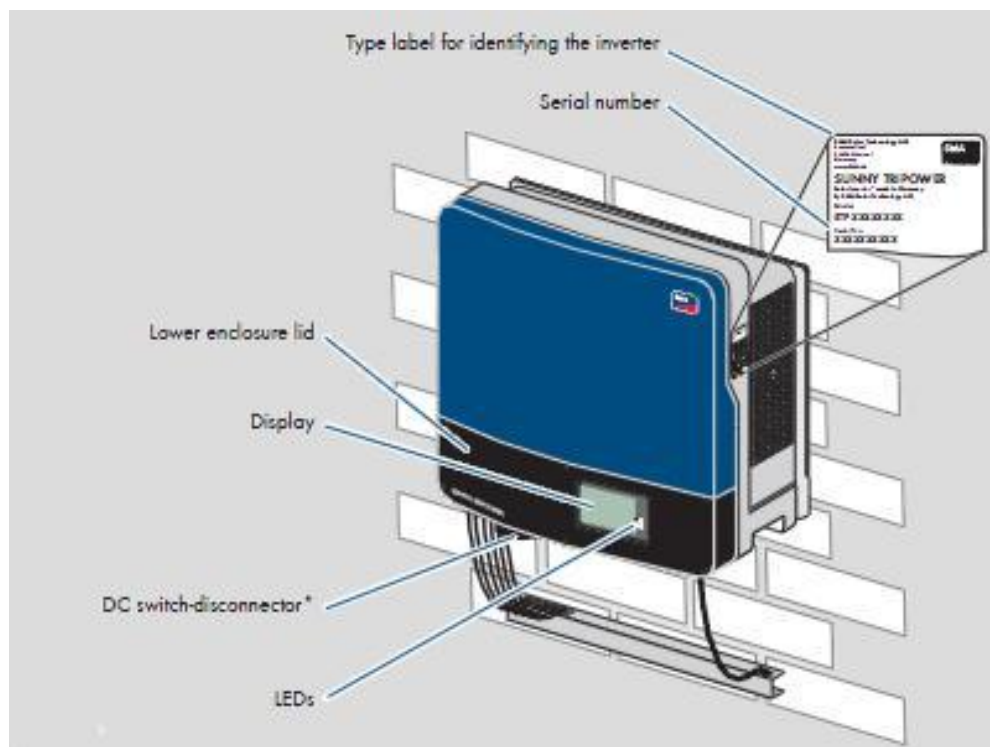
6.10 ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Αντιστροφείς

Για την επιλογή των αντιστροφέων αποφασίστηκε η επιλογή από τέσσερα τεμάχια τριφασικών αντιστροφέων, όπως αναφέραμε παραπάνω, της εταιρείας SMA με ονομασία Sunny Tripower 15000TL. Η μέγιστη ισχύς DC εισόδου του αντιστροφέα είναι 15260W και η ονομαστική ισχύς εξόδου του αντιστροφέα είναι 15000W για AC τάση 230V συχνότητας 50Hz. Η επιλογή έγινε με γνώμονα την απλοποίηση της εγκατάστασης αφού απαιτείται ένας αντιστροφέας ανά μια φ/β συστοιχία, ο οποίος θα τοποθετηθεί στο κέντρο της συστοιχίας, στηριζόμενος στις βάσεις στήριξης των φ/β πλαισίων κάτω από τα φ/β πλαίσια. Με τον τρόπο αυτό θα ελαχιστοποιήσουμε τις απώλειες μεταφοράς στην πλευρά του συνεχούς ρεύματος. Επιπλέον η επιλογή τριφασικών αντιστροφέων μας εξασφαλίζει ισοκατανομή του φορτίου στις τρεις φάσεις, ασχέτως του αριθμού των αντιστροφέων, αν και ανισοκατανομή φορτίου ως 20% είναι αποδεκτή από τη ΔΕΗ.



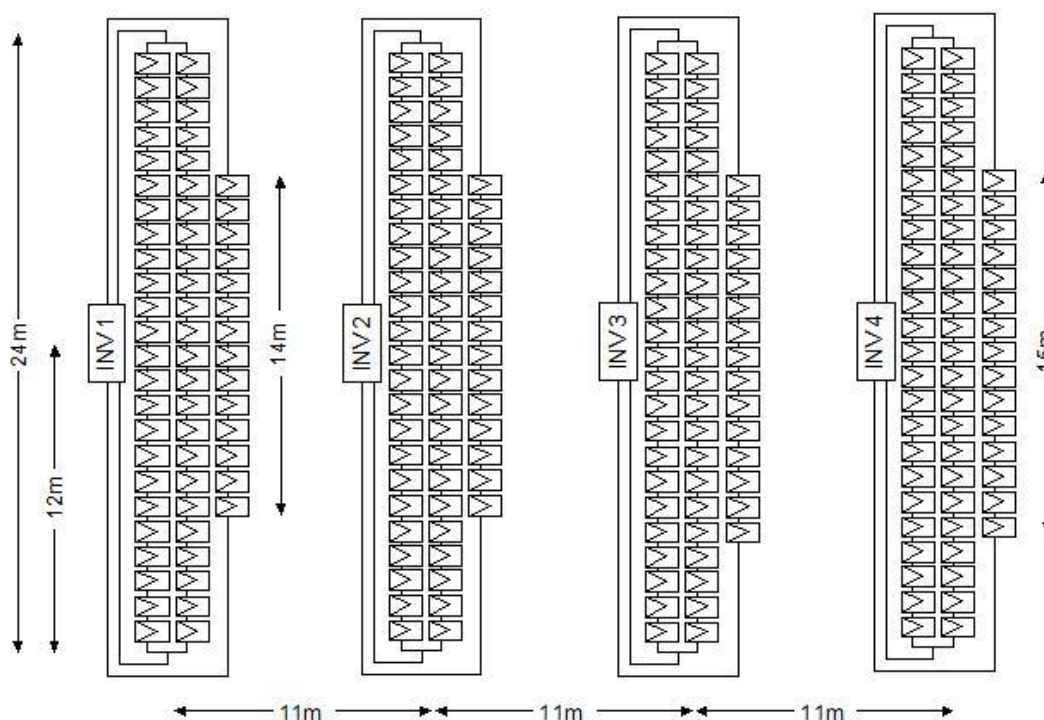
Σχήμα 6.25: Αντιστροφέας Sunny Tripower 15000TL



Σχεδιασμός καλωδιώσεων

Βασικό κριτήριο για τον σχεδιασμό των καλωδιώσεων είναι οι μικρότερες όσο το δυνατό αποστάσεις. Για αυτό το λόγο επιλέξαμε να τοποθετήσουμε το κάθε αντιστροφέα στο κέντρο της αντίστοιχης συστοιχίας, έτσι ώστε να μειωθεί το μήκος των καλωδίων, ελαχιστοποιώντας έτσι τις απώλειες μεταφοράς στην πλευρά του συνεχούς ρεύματος.

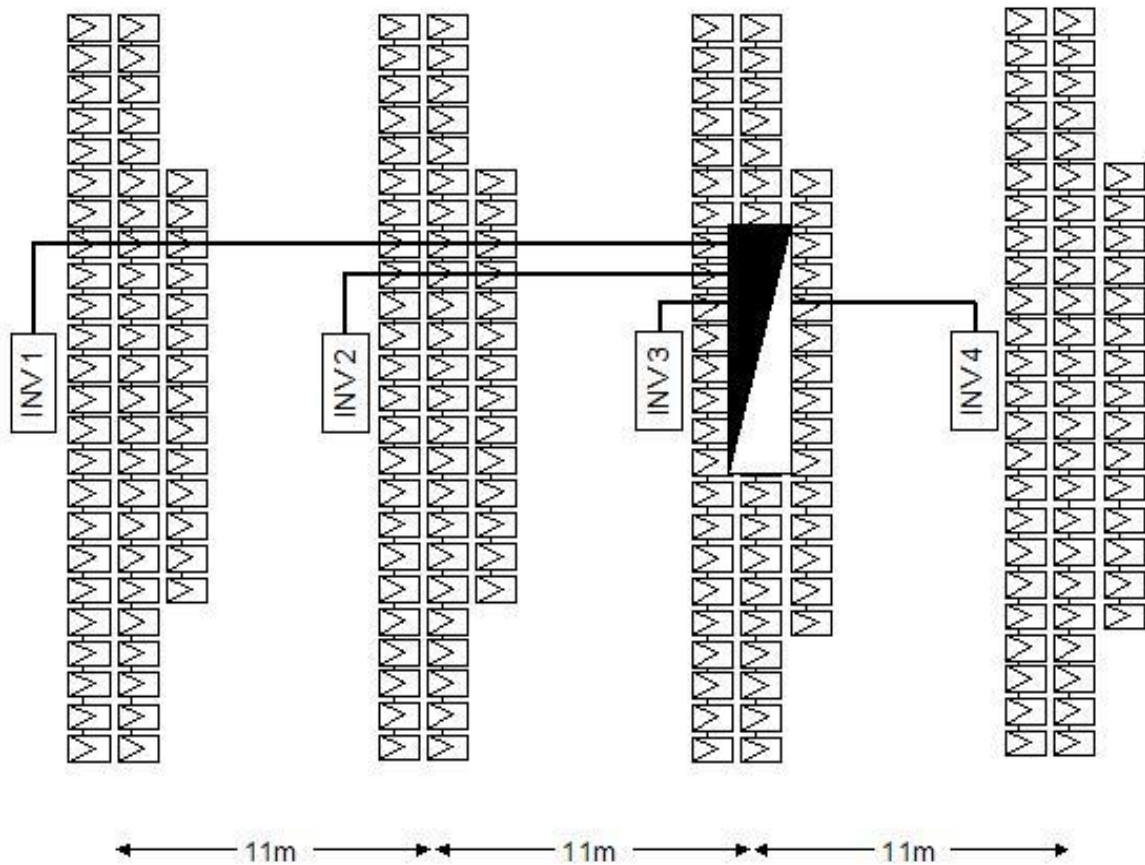
Συνολικά χρησιμοποιήσαμε 250 πλαίσια. Οι δύο συστοιχίες έχουν από 62 πλαίσια η κάθε μια τα οποία οργανώνονται σε 2 παράλληλα string των 24 πλαισίων και 1 string των 14 πλαισίων. Τα δυο παράλληλα string έχουν ρεύμα στα άκρα τους 15,9A με το οποίο τροφοδοτούμε τη μια είσοδο του αντιστροφέα και το άλλο string με τα 14 πλαίσια τροφοδοτεί τον αντιστροφέα (INV1, INV2) με ρεύμα 7,95A. Οι άλλες δυο συστοιχίες έχουν από 63 πλαίσια η κάθε μια, τα οποία οργανώνονται σε 2 παράλληλα string των 24 πλαισίων και 1 string των 15 πλαισίων. Το ρεύμα στις εισόδους του αντιστροφέα (INV3, INV4) είναι όπως προηγουμένως. Παρακάτω παρουσιάζεται η κυκλωματική διάταξη σύνδεσης πλαισίων – αντιστροφέων (Σχήμα 6.26).



Σχήμα 6.26 : Κυκλωματική διάταξη σύνδεσης πλαισίων – αντιστροφέων.

Τα δυο παράλληλα string των 24 πλαισίων τροφοδοτούν τον αντιστροφέα με ρεύμα 15,9A και το συνολικό μήκος των καλωδίων είναι 24m (12m από την θετική πολικότητα και 12m από την αρνητική) από τα άκρα της συστοιχίας στον αντιστροφέα. Το string με τα 14 πλαίσια τροφοδοτεί τον αντιστροφέα με ρεύμα 7,95A και το συνολικό μήκος των καλωδίων είναι 14m (7m από τη θετική πολικότητα και 7m από την αρνητική) από τα άκρα της συστοιχίας στον αντιστροφέα. Το string με τα 15 πλαίσια τροφοδοτεί τον αντιστροφέα με ρεύμα 7,95A και το συνολικό μήκος των καλωδίων είναι 15m (7,5m από τη θετική πολικότητα και 7,5m από την αρνητική) από τα άκρα της συστοιχίας στον αντιστροφέα.

Οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων δύο γειτονικών συστοιχιών όπου έχουμε εγκαταστήσει τους αντιστροφείς είναι 11m. Οι εξόδοι όλων των αντιστροφέων συγκεντρώνονται σε ένα πίνακα Pillar τον οποίο τον τοποθετούμε σε ένα σημείο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιήσουμε τα μήκη των καλωδίων από την έξοδο του αντιστροφέα μέχρι τον πίνακα αυτόν. Για αυτό το λόγο το πίνακα τον τοποθετήσαμε κάτω από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία όπου βρίσκεται ο τρίτος αντιστροφέας (INV 3) όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 6.27.



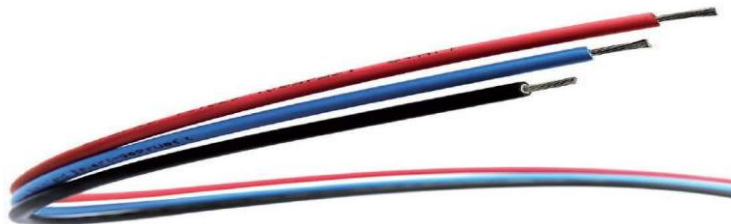
Σχήμα 6.27: Σύνδεση των εξόδων των αντιστροφέων με τον πίνακα Pillar

Τοποθετώντας τον πίνακα σε αυτό το σημείο μειώνουμε συνολικά το μήκος των καλωδίων και επίσης τα καλώδια του αντιστροφέα 1 (INV 1) δεν ξεπερνούν σε μήκος τα 22m περίπου. Επίσης ο πίνακας αυτός τοποθετείται κάτω από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία και έτσι δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα σκίασης στην εγκατάσταση.

Υπολογισμός διατομών καλωδίων

ΚΑΛΩΔΙΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Τα καλώδια με τα οποία ενώνονται μεταξύ τους τα φ/β πλαίσια έχουν μήκος 1m και διατομή 4mm² και είναι πιστοποιημένα κατά IEC και UL PV WIRE. Είναι ηλιακού τύπου, απόλυτα στεγανοποιημένα και κατάλληλα για την σύνδεση των πάνελ (ευλύγιστα) και την επίτευξη της επιθυμητής ισχύος (Σχήμα 6.28)



Σχήμα 6.28: Καλώδια ένωσης των ΦΒ πλαισίων

Στην πίσω πλευρά του φ/β πλαισίου υπάρχει ένα κουτί διακλάδωσης (Huber and Suhner IP67 Radox HA3) το οποίο είναι εφοδιασμένο με τρεις διόδους bypass για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση μεμονωμένων κυψελών και να διασφαλισθεί η αξιόπιστη λειτουργία του συνολικού Φ/Β συστήματος (Σχήμα 6.29).



Σχήμα 6.29 : Κουτί διακλάδωσης μεμονωμένο



Σχήμα 6.30 : Κουτί διακλάδωσης στερεωμένο την οπίσθια πλευρά του ΦΒ πλαισίου.

Η στήριξη των DC καλωδίων πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλου τύπου δεματικών στην οπίσθια πλευρά των πλαισίων. Για να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα επαγωγής υπερτάσεων στα άκρα των στοιχειοσειρών, όλα τα DC καλώδια (+, -) ακολουθούν την ίδια διαδρομή έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επιφάνεια του βρόγχου που περιλαμβάνεται. Τέλος η μέγιστη τάση που αντέχει το συνολικό σύστημα (DC καλώδια, πλαίσια, κουτιά διακλάδωσης, βύσματα) είναι 1000V DC.

ΚΑΛΩΔΙΑ DC ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΜΕ ΤΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ

Για τη σύνδεση κάθε σειράς των ΦΒ στοιχείων με τον αντιστροφέα χρησιμοποιήσαμε καλώδιο τύπου H07RN-F 1x6mm². Πρόκειται για πολύκλινα, εύκαμπτα καλώδια με μόνωση και μανδύα από ελαστικό υψηλής αντοχής (φυσικό λάστιχο ή στυρολοβουνοδιένιο και πολυχλωροπρένιο). Τα καλώδια ακολουθούν τις προδιαγραφές ΕΛΟΤ 410 και HD 361. Ενδείκνυνται για χρήση σε ξηρούς, υγρούς ή βρεγμένους χώρους στο ύπαιθρο. Επίσης μπορούν να εγκατασταθούν πάνω στο σουβά ή μέσα σε σωλήνες ενταφιασμένα. Για την καλύτερη διάκριση των καλωδίων χρησιμοποιούνται διαφορετικοί χρωματισμοί ανάλογα με την πολικότητα των ισχύων που μεταφέρουν. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται κόκκινο για τον θετικό πόλο και μαύρο για τον αρνητικό (Σχήμα 6.31).



Σχήμα 6.31 : Καλώδιο τύπου H07RN-F 1x6mm²

Οι προδιαγραφές του καλωδίου είναι οι εξής:

- Εύρος θερμοκρασίας από – 40 °C έως 120 °C
- Επιτρεπτή τάση λειτουργίας 2KV DC
- Αναμενόμενη διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 25 ετών
- Ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία UV
- Δυνατότητα εγκατάστασης σε εξωτερικούς χώρους ή εντός σωλήνων ή καναλιών
- Μανδύας και μόνωση από φυσικό λάστιχο και νεοπρένιο με εξαιρετική αντοχή στη θερμοκρασία

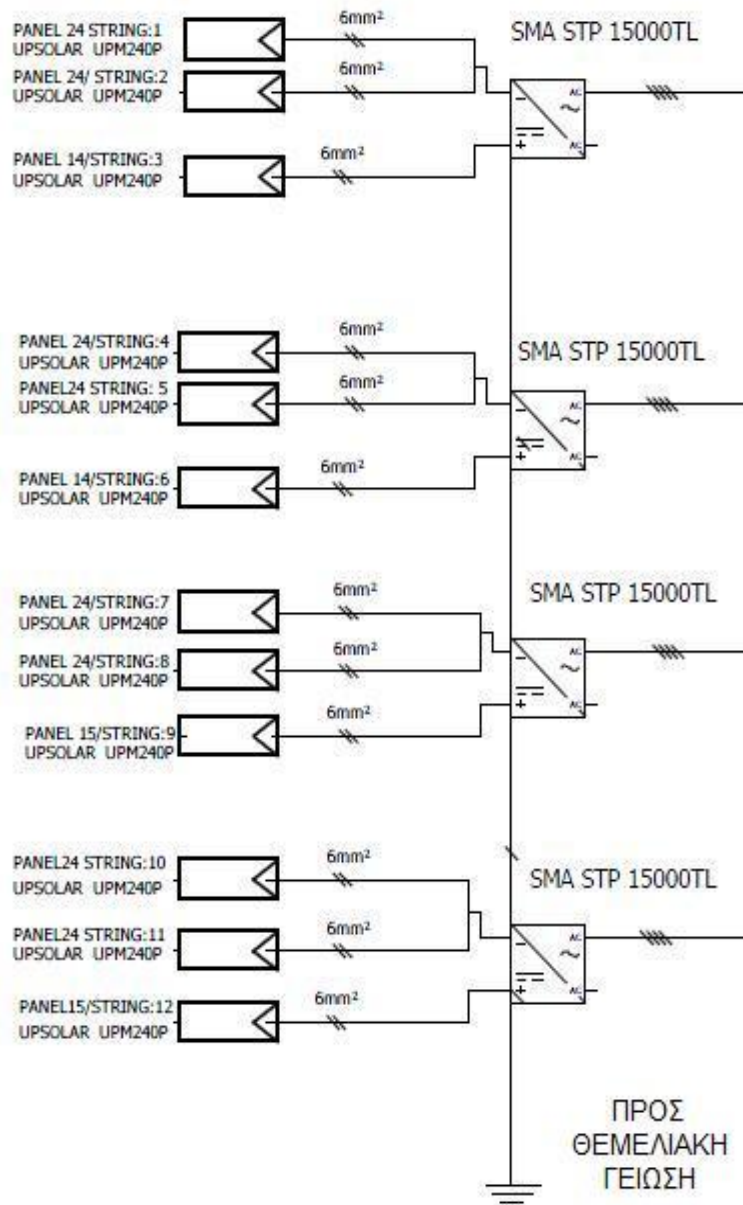
Στα άκρα της κάθε στοιχειοσειράς χρησιμοποιούμε βύσματα MC4 IP67 (αρσενικό – θηλυκό των 25A για διατομές 4 – 6mm²) για να συνδέσουμε τα DC ηλιακά καλώδια με τον αντιστροφέα. Τα βύσματα αυτά τα επιλέγουμε σύμφωνα με την διατομή του καλωδίου που χρησιμοποιούμε και το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα φόρτισής τους. Το μέγιστο ρεύμα που δέχεται ο αντιστροφέας στην εγκατάσταση μας είναι 15.9A και το καλώδιο σύνδεσης των ΦΒ πλαισίων με τους αντιστροφέες έχει διατομή 6mm². Για αυτό το λόγο επιλέξαμε τα παρακάτω βύσματα (Σχήμα 6.32).



Σχήμα 6.32: Βύσματα φωτοβολταϊκών MC4 (διατομή 4-6mm², 25A, έως 1000V DC)

Για την εγκατάσταση των βυσμάτων χρησιμοποιούνται ειδικά εργαλεία (κλειδιά, πρέσες) που παρέχονται από την εταιρεία παραγωγής τους.

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα σύνδεσης των στοιχειοσειρών με τους αντιστροφέες (σχήμα 6.33)



Σχήμα 6.33: Ηλεκτρολογικό σχέδιο σύνδεσης των στοιχειοσειρών με τους αντιστροφείς στην πλευρά του συνεχούς ρεύματος.

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι έχουμε χωρίσει το ΦΒ πάρκο σε τέσσερις συστοιχίες. Η κάθε συστοιχία αποτελείται από τρεις στοιχειοσειρές. Οι δύο πρώτες συστοιχίες είναι ίδιες δηλαδή η κάθε μια έχει δυο στοιχειοσειρές (strings) των 24 πλαίσια συνδεδεμένες παράλληλα μεταξύ τους και μια ξεχωριστή στοιχειοσειρά των 14 πλαίσια που είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Στις άλλες δυο συστοιχίες η διαφορά είναι ότι η ξεχωριστή στοιχειοσειρά αποτελείται από 15 πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά.

ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ ΜΕ ΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ PILLAR ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ AC

Κάθε αντιστροφέας δέχεται στην είσοδό του ρεύμα 15.9A από τις δυο παράλληλες στοιχειοσειρές και 7.95A από την άλλη στοιχειοσειρά. Ο αντιστροφέας αυτός έχει τη δυνατότητα να συνδέεται με δυο διαφορετικές σε αριθμό πλαισίων συστοιχίες. Για αυτό το λόγο δεν μας επηρεάζει η διαφορά τάσης στις εισόδους του. Η ονομαστική ισχύς εξόδου του αντιστροφέα είναι $P_{INV,εξ} = 15000W$. Ο αντιστροφέας είναι τριφασικός επομένως το ρεύμα ανά φάση στην έξοδο του είναι:

$$I_{INV,φ} = \frac{P_{INV,εξ}}{V_{πολ.} \cdot \sqrt{3}} = \frac{15000}{400 \cdot \sqrt{3}} = 21,65A$$

Τα καλώδια του αντιστροφέα που συνδέονται από την έξοδο του με το πίνακα Pillar, τοποθετούνται εντός εδάφους σε βάθος περίπου 0.7m μέσα σε σωλήνες για να προστατεύονται. Για να υπολογίσουμε την διατομή των καλωδίων πρέπει να ακολουθήσουμε το πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384. Σύμφωνα με αυτό (ΕΛΟΤ HD 384.5.521) η μέγιστη συνεχής επιτρεπόμενη ένταση σε A για θαμμένα καλώδια δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_0 \cdot f_{\theta} \cdot f_c \cdot f_i \quad , \text{όπου}$$

I_0 είναι η ένταση αναφοράς και είναι ανάλογη της διατομής του καλωδίου. Η ένταση αυτή διαρρέει συνεχώς τους αγωγούς, δηλαδή ο συντελεστής φόρτισης είναι $m=1$, δίνεται στον **Πίνακα 6.13** και ισχύει για το παρακάτω σενάριο:

- Βάθος ταφής 0.7m
- Θερμοκρασία εδάφους 20 °C
- Ειδική θερμική αντίσταση εδάφους $k = 2.5 K \cdot m/W$ (K=βαθμός Κέλβιν)
- ένα σύστημα μονοφασικό ή τριφασικό

f_{θ} είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τη θερμοκρασία του εδάφους που δίνεται στον **Πίνακα 6.15**

f_c είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από την ειδική αγωγιμότητα του εδάφους και δίνεται στον **Πίνακα 6.14**

f_i είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το πλήθος των συστημάτων που γειτνιάζουν όταν τα καλώδια βρίσκονται μέσα σε σωλήνες στο έδαφος και δίνεται στον **Πίνακα 6.16**

Ο συντελεστής φόρτισης για τους παρακάτω πίνακες είναι $m=1$. Όμως το ΦΒ σύστημα έχει μικρότερο συντελεστή φόρτισης αφού δεν παρέχει ενέργεια στο δίκτυο την νύχτα επομένως τα καλώδια δεν φορτίζονται συνεχώς. Αυτό όμως δεν επηρεάζει τις μετρήσεις μας, γιατί οι διατομές των καλωδίων στους πίνακες υπολογίζονται για μεγαλύτερη καταπόνησή τους δηλαδή για συνεχή φόρτιση.





ΚΛΙΜΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ 0.7 m (°C)
Τροπικά	25 - 40 ⁰
Υποτροπικά	15 - 30 ⁰
Μεσαία κλίματα	10 - 20 ⁰

Πίνακας 6.11 : Θερμοκρασία εδάφους ανάλογα με το κλίμα

Η θερμική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από την υγρασία του και μειώνεται με την υγρασία. Η δημοσίευση IEC 60 287 προτείνει να λαμβάνονται οι εξής τιμές:

ΚΛΙΜΑ	ΕΔΑΦΟΣ	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ K·m/W
Συνεχώς υγρό κλίμα	Πολύ υγρό	0,7
Κανονική βροχόπτωση	Υγρό	1,0
Σπάνια βροχόπτωση	Ξηρό	2,0
Λίγη ή καθόλου βροχή	Πολύ ξηρό	3,0

Πίνακας 6.12 : Επιλογή ειδικής θερμικής αντίστασης εδάφους ανάλογα με την αγωγιμότητα του εδάφους.

Αγωγός mm ²	Μόνωση			
	PVC		EPR ή XLPE	
	Πλήθος φορτιζόμενων αγωγών			
	2 	3 	2 	3 
1,5	22	18	26	22
2,5	29	24	34	29
4	38	31	44	37
6	47	39	56	46
10	63	52	73	61
16	81	67	95	79
25	104	86	121	101
35	125	103	146	122
50	148	122	173	144
70	183	151	213	178
95	216	179	252	211
120	246	203	287	240
150	278	230	324	271
185	312	258	363	304
240	361	297	419	351
300	408	336	474	396

Πίνακας 6.13 : Μέγιστα συνεχώς επιτρεπόμενα ρεύματα (A) καλωδίων χαμηλής τάσης εγκατεστημένων στο έδαφος. Μόνωση από PVC, EPR ή XLPE, αγωγός από χαλκό, για ημιτονοειδές ρεύμα 50 Hz.

Ειδική θερμική αντίσταση K·m/W	1	1,5	2	2,5	3
Συντελεστής διόρθωσης	1,18	1,1	1,05	1	0,96

Πίνακας 6.14 : Συντελεστής διόρθωσης f_c για ειδική θερμική αντίσταση εδάφους διαφορετική από 2,5 K·m/W. Εφαρμόζονται για τη διόρθωση των τιμών του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος.

Θερμοκρασία εδάφους °C	Μόνωση	
	PVC	EPR ή XLPE
10	1,10	1,07
15	1,05	1,04
25	0,95	0,96
30	0,89	0,93
35	0,84	0,89
40	0,77	0,85
45	0,71	0,80
50	0,63	0,76
55	0,55	0,71
60	0,45	0,65
65	–	0,60
70	–	0,53
75	–	0,46
80	–	0,38

Πίνακας 6.15 : Συντελεστές διόρθωσης f_θ για θερμοκρασία εδάφους διαφορετική από 20°C. Εφαρμόζονται για τη διόρθωση των τιμών του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος.

Μονοπολικά ή πολυπολικά καλώδια					
Πλήθος κυκλωμάτων	Απόσταση μεταξύ καλωδίων (α)*				
	Μηδενική (σε επαφή)	Μια διάμετρος καλωδίου	1,25 m	0,75 m	0,5 m
2	0,75	0,80	0,85	0,90	0,90
3	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85
4	0,60	0,60	0,70	0,75	0,80
5	0,55	0,55	0,65	0,70	0,80
6	0,50	0,55	0,60	0,70	0,80

Πίνακας 6.16 : Συντελεστής διόρθωσης f_i για περισσότερα από ένα κυκλώματα για καλώδια θαμμένα κατευθείαν στο έδαφος. Εφαρμόζονται για τη διόρθωση των τιμών του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος.

Για τον υπολογισμό των συντελεστών διόρθωσης του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος φόρτισης των αγωγών από τους αντιστροφείς στο Pillar εργαστήκαμε ως εξής:

- Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε καλώδιο τύπου H07RN-F διατομής $5 \times 16 \text{mm}^2$ με μόνωση EPR. Οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από χαλκό. Το μέγιστο συνεχώς επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης του αγωγού αυτού (**Πίνακας 6.13**) είναι $I_0 = 79 \text{A}$.
- Το έδαφος στην περιοχή της Ηλείας έχει θερμοκρασία 25°C το καλοκαίρι επομένως από το **Πίνακα 6.15** $f_\theta = 0,96$.
- Στην Ηλεία το έδαφος είναι υγρό γιατί έχουμε κανονική βροχόπτωση και επιλέξαμε ειδική θερμική αντίσταση του εδάφους $1,5 \text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$ οπότε από το **Πίνακα 6.14** $f_c = 1,1$.
- Το καλώδιο που χρησιμοποιούμε είναι πολυπολικό, το πλήθος φορτιζόμενων αγωγών είναι 3, και έχουμε 4 διαφορετικά τριφασικά συστήματα αφού έχουμε τέσσερις αντιστροφείς. Η απόσταση μεταξύ των καλωδίων είναι μηδενική, γιατί τα καλώδια τρέχουν μαζί από τους αντιστροφείς προς τον πίνακα Pillar, είναι θαμμένα εντός εδάφους σε βάθος περίπου 0,7 m, επομένως από **πίνακα 6.16** $f_i = 0,6$.

Επομένως η διορθωμένη μέγιστη συνεχώς επιτρεπόμενη φόρτιση του αγωγού αυτού ($5 \times 16 \text{mm}^2$) είναι:

$$I = I_0 \cdot f_\theta \cdot f_c \cdot f_i = 79 \cdot 0,96 \cdot 1,1 \cdot 0,6 = 50 \text{A}$$

Έχουμε περιθώριο να χρησιμοποιήσουμε αγωγό μικρότερης διατομής. Αν χρησιμοποιήσουμε αγωγό $5 \times 10 \text{mm}^2$ από τον **πίνακα 6.13** έχουμε $I_0 = 61 \text{A}$. Επομένως η διορθωμένη τιμή της μέγιστης συνεχώς επιτρεπόμενης φόρτισης του αγωγού είναι:

$$I = I_0 \cdot f_\theta \cdot f_c \cdot f_i = 61 \cdot 0,96 \cdot 1,1 \cdot 0,6 = 39 \text{A}$$

Για αγωγό $5 \times 6 \text{mm}^2$ έχουμε από το **πίνακα 6.13** $I_0 = 46 \text{A}$. Επομένως η διορθωμένη τιμή της μέγιστης συνεχώς επιτρεπόμενης φόρτισης του αγωγού είναι:

$$I = I_0 \cdot f_{\theta} \cdot f_c \cdot f_i = 46 \cdot 0,96 \cdot 1,1 \cdot 0,6 = 29 \text{A}$$

Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης για αυτό τον αγωγό ($5 \times 6 \text{mm}^2$) είναι 29A και είμαστε οριακά σε σχέση με το ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα.

Για το λόγο αυτό επιλέγουμε τελικά να χρησιμοποιήσουμε καλώδια H07RN-F διατομής $5 \times 10 \text{mm}^2$ που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 6.34.



Σχήμα 6.34 : Καλώδιο H07RN-F $5 \times 10 \text{mm}^2$

Το καλώδιο αυτό είναι ανθεκτικό σε όλες τις καιρικές συνθήκες, βραδύκαυστο και μπορεί να αντέξει σε υψηλές μηχανικές καταπονήσεις. Οι χρωματισμοί του είναι: για τις τρεις φάσεις μαύρο, γκριζο, καφέ, ουδέτερος μπλε και η γείωση κίτρινο/πράσινο.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΤΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

Η πτώση τάσης πρέπει να περιορίζεται στο 4%. Δηλαδή για πολική τάση 400V η πτώση τάσης πρέπει να είναι μικρότερη των 16V και για φασική τάση 230V η πτώση τάσης πρέπει να είναι μικρότερη των 9.2V. Εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του καλωδίου (p), το μήκος του (L), το ρεύμα (I) που διαρρέει τον αγωγό και την διατομή του (S) και για τριφασικό κύκλωμα δίνεται από τη σχέση:

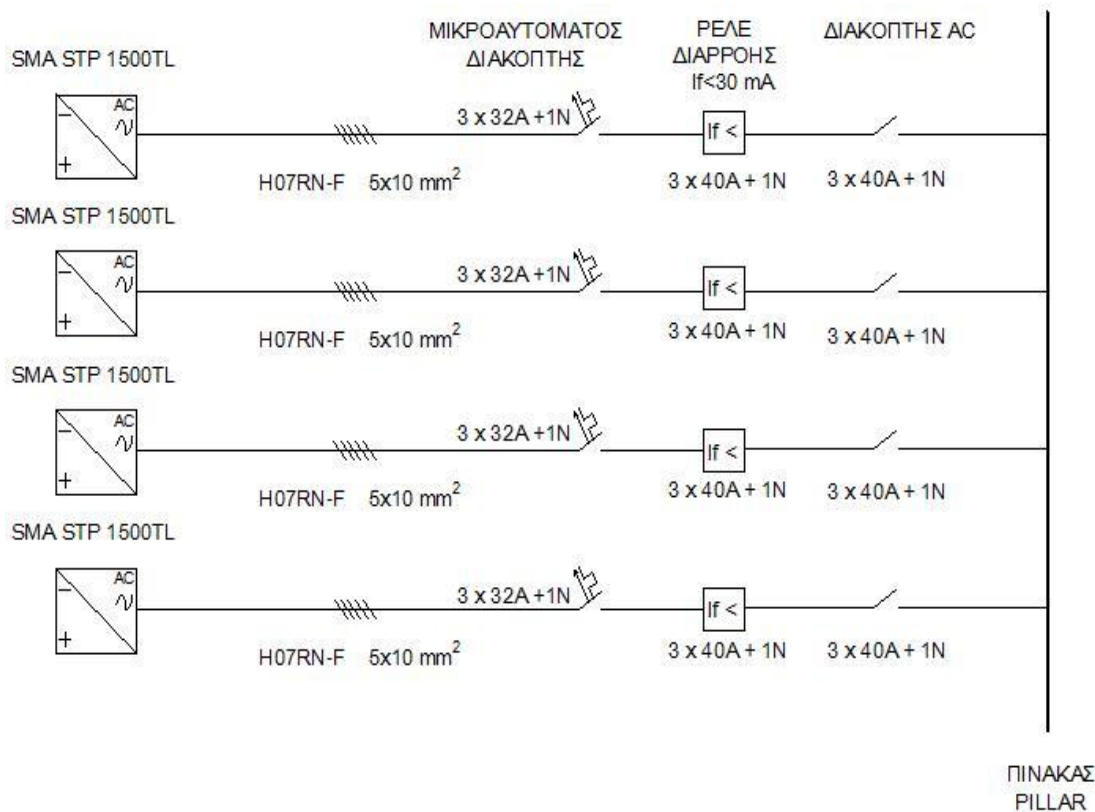
$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot p \cdot L \cdot I \cdot \cos \varphi}{S}$$

Στην εγκατάσταση μας το μεγαλύτερο μήκος καλωδίου από τον αντιστροφέα της πιο μακρινής συστοιχίας μέχρι το πίνακα Pillar είναι περίπου 25m (Σχήμα 6.27). Το μέγιστο ρεύμα που αποδίδει ο αντιστροφέας είναι 22A ανά φάση, ο συντελεστής ισχύος για ονομαστική ισχύ είναι 1 και το καλώδιο είναι από χαλκό οπότε $p = 0.0175$. Η διατομή του καλωδίου που χρησιμοποιούμε είναι 10mm^2 . Επομένως η πτώση τάσης της πιο απομακρυσμένης γραμμής είναι:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot 0.0175 \cdot 25 \cdot 22 \cdot 1}{10} = 1.67V$$

Επομένως η πτώση τάσης δεν υπερβαίνει το 4% της ονομαστικής τάσης του δικτύου.

Παρακάτω έχουμε σχεδιάσει το ηλεκτρολογικό σχέδιο στην πλευρά του ΕΡ από τους αντιστροφείς στον πίνακα Pillar (Σχήμα 6.35). Κάθε αντιστροφέας στο πίνακα Pillar συνδέεται σε σειρά με μικροαυτόματο διακόπτη 3x32A + 1N (τρεις φάσεις και ο ουδέτερος), διακόπτη διαφυγής έντασης 3x40A + 1N (τρεις φάσεις και ο ουδέτερος) με ευαισθησία αντίδρασης σε μέγιστο ρεύμα διαρροής 30mA και διακόπτη φορτίου 3x40A + 1N (τρεις φάσεις και ο ουδέτερος) για το χειροκίνητο χειρισμό (ενεργοποίηση / απενεργοποίηση) της γραμμής.



Σχήμα 6.35: Ηλεκτρολογικό σχέδιο στην πλευρά του ΕΡ από τους αντιστροφείς στον πίνακα Pillar.

Τον μικροαυτόματο διακόπτη τον τοποθετήσαμε για την προστασία της εγκατάστασης από βραχυκύκλωμα ή υπερφόρτιση.

Τον Δ.Δ.Ε τον τοποθετήσαμε για να παρέχει προστασία από άμεση επαφή ανθρώπων ή ζώων με μέρη στο ΦΒ σύστημα όπου μπορεί να υπάρχει κάποια διαρροή τάσης. Λόγου χάριν στους αντιστροφείς που

δέχονται μεγάλη τάση από τα ΦΒ πλαίσια είναι πιθανόν να υπάρξει επικίνδυνη διαρροή τάσης λόγω κακής σύνδεσης των καλωδίων ή καταστροφής της μόνωσής τους.

Ο διακόπτης φορτίου χρησιμεύει όταν θέλουμε να κάνουμε έλεγχο (συντήρηση, επισκευή βλάβης) στην εγκατάστασή μας.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν προϊόντα στην αγορά που συνδυάζουν αυτόματο διακόπτη διαρροής με ενσωματωμένο μικροαυτόματο για λόγους εξοικονόμησης χώρου στον πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ PILLAR

Οι έξοδοι όλων των αντιστροφών συγκεντρώνονται στον πίνακα Pillar όπου ομαδοποιούνται σε τρεις φάσεις και στην συνέχεια αναχωρεί μια τριφασική γραμμή για να συνδεθεί με το γενικό πίνακα της εγκατάστασης. Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε τον πίνακα Pillar (Σχήμα 6.36) λόγω της φύσης της εγκατάστασής μας. Οι πίνακες Pillar χρησιμοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους για εγκαταστάσεις φωτισμού, τροφοδότησης κινητήρων, φωτοβολταϊκά συστήματα κ.α. λόγω του ότι αντέχουν σε αντίξοες καιρικές συνθήκες γιατί έχουν μεγάλη στεγανότητα. 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.

Τον πίνακα Pillar τον τοποθετήσαμε σε ένα σημείο τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιήσουμε το συνολικό μήκος των καλωδίων από τους αντιστροφείς μέχρι τον πίνακα αυτόν, όπως αναφέρουμε παραπάνω (Σχήμα 6.27). Επίσης ο πίνακας αυτός τοποθετείται κάτω από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία και έτσι δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα σκίασης στην εγκατάσταση.



Σχήμα 6.36 : Εξωτερικός πίνακας Pillar

ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΙΝΑΚΑ PILLAR ΜΕ ΤΟ ΓΕΝΙΚΟ ΠΙΝΑΚΑ

Τα καλώδια που θα χρησιμοποιήσουμε για τη σύνδεση του πίνακα Pillar με το γενικό πίνακα θα τα εγκαταστήσουμε εντός εδάφους σε βάθος περίπου 0.7m. Για την προστασία των καλωδίων θα τα τοποθετήσουμε μέσα σε κατάλληλης διατομής χαλυβδοσωλήνα. Για να βρούμε τη διατομή του καλωδίου που θα χρησιμοποιήσουμε πρέπει να υπολογίσουμε την συνολική φόρτιση του καλωδίου. Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε καλώδιο PVC J1VV-R (NYY), το οποίο αποτελείται από μανδύα και μόνωση PVC, είναι πολύκλωνο καλώδιο ισχύος κατάλληλο για σταθερή εγκατάσταση εντός εδάφους για μέγιστη ονομαστική πολική τάση συστήματος 1KV. Για διατομή καλωδίου $5 \times 35 \text{mm}^2$, σύμφωνα με το κανονισμό ΕΛΟΤ HD 384, η μέγιστη συνεχώς επιτρεπόμενη φόρτιση του καλωδίου αυτού για 3 φορτιζόμενους αγωγούς είναι (Πίνακας 6.13) $I_0 = 103 \text{A}$. Για θερμοκρασία εδάφους 25°C ο συντελεστής διόρθωσης από Πίνακα 6.15 είναι: $f_\theta = 0,95$. Η ειδική θερμική αντίσταση του εδάφους είναι $1,5 \text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$ οπότε από Πίνακα 6.14 το $f_c = 1,1$. Δεν έχουμε γεινίαση μεταξύ περισσότερων από ένα κυκλωμάτων γιατί έχουμε ένα τριφασικό σύστημα επομένως από Πίνακα 6.16 ο συντελεστής ομαδοποίησης είναι $f_i = 1$. Επομένως η διορθωμένη μέγιστη συνεχής επιτρεπόμενη ένταση για καλώδιο J1VV-R $5 \times 35 \text{mm}^2$ είναι:

$$I = I_0 \cdot f_\theta \cdot f_c \cdot f_i = 103 \cdot 0,95 \cdot 1,1 = 108 \text{A}$$

Η συνολική ένταση ρεύματος ανά φάση από το Pillar (ομαδοποίηση των αντιστροφών) ως το γενικό πίνακα είναι λιγότερο από 88A, επομένως μας κάνει διατομή $5 \times 35 \text{mm}^2$. Η απόσταση από το Pillar μέχρι το γενικό πίνακα θα είναι στη χειρότερη περίπτωση 40m. Επομένως το μήκος του καλωδίου θα είναι 40m.

Πρέπει όμως να ελέγξουμε την πτώση τάσης και τις απώλειες ισχύος που έχουμε στη γραμμή αυτή από το Pillar μέχρι το γενικό πίνακα για αυτό το μήκος καλωδίου. Η πτώση τάσης για τριφασικό σύστημα πρέπει να είναι μικρότερη από 16V. Για την πτώση τάσης ισχύει:

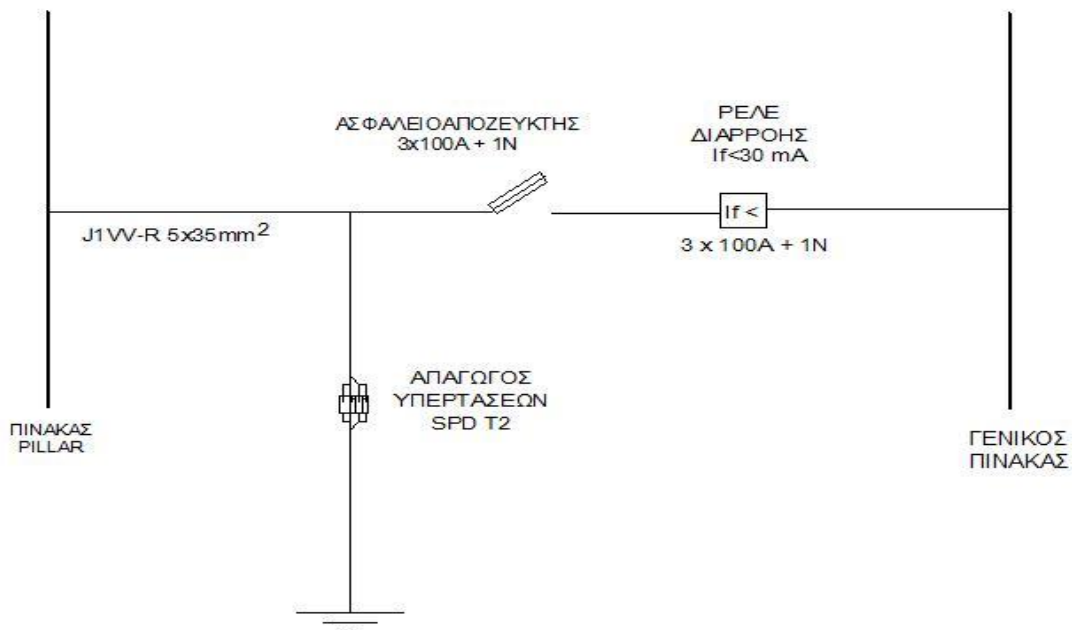
$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot p \cdot L \cdot I \cdot \cos \varphi}{S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,0175 \cdot 40 \cdot 88 \cdot 1}{35} = 3,1 \text{V}$$

Δεν υπάρχει πρόβλημα μεγάλης πτώσης τάσης στην γραμμή μας είμαστε εντός των ορίων.

Πρέπει να υπολογίσουμε και τις απώλειες ισχύος της γραμμής. Οι απώλειες ισχύος δίνονται από τη σχέση:

$$P_{\text{απ}} \% = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot L \cdot I_\phi \cdot 100}{S \cdot U_{\text{ΠΟΛ}} \cdot \cos \varphi} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,0175 \cdot 40 \cdot 88 \cdot 100}{35 \cdot 400 \cdot 1} = 0,76\%$$

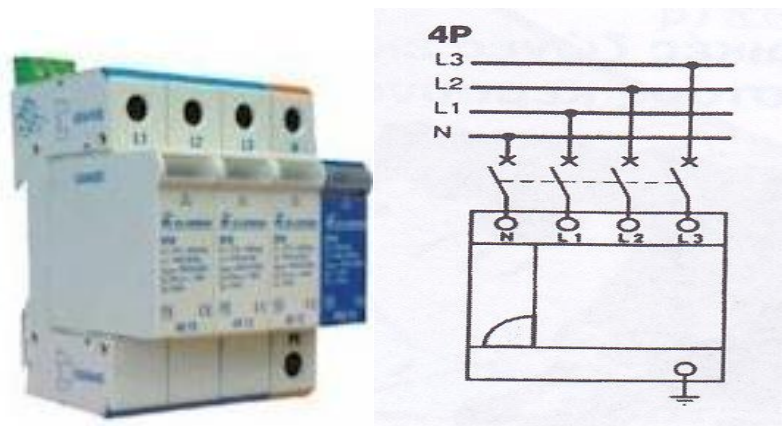
Οι απώλειες των καλωδίων έχουν χαμηλή τιμή (είναι μικρότερες από 1%) επομένως το καλώδιο J1VV-R 5x35mm² είναι κατάλληλο για την μεταφορά της ενέργειας από τους αντιστροφείς στο γενικό πίνακα με ελάχιστες απώλειες. Παρακάτω (Σχήμα 6.37) έχουμε προσθέσει το ηλεκτρολογικό σχέδιο από την έξοδο του πίνακα Pillar μέχρι το γενικό πίνακα.



Σχήμα 6.37: Ηλεκτρολογικό σχέδιο από το πίνακα Pillar ως το Γενικό Πίνακα της εγκατάστασης.

Στο σχέδιο έχουμε συνδέσει στο γενικό πίνακα της εγκατάστασης έναν απαγωγό κρουστικών ρευμάτων και υπερτάσεων (S.P.D. Surge Protection Devices). Ο απαγωγός αυτός συνδέεται στο γενικό πίνακα της εγκατάστασης μας πριν από τη σύνδεση με το δίκτυο της ΔΕΗ και προστατεύει την εγκατάσταση από επικίνδυνες κρουστικές υπερτάσεις που μπορεί να εισχωρήσουν από εξωτερικά δίκτυα όπως της ΔΕΗ, του ΟΤΕ.

Το ΦΒ πάρκο βρίσκεται σε απομονωμένο σημείο (χωρίς γειτνιάζοντα κτίρια) και κινδυνεύει από κεραυνικά πλήγματα. Για το λόγο αυτό ο απαγωγός που επιλέξαμε αντέχει κρουστικά ρεύματα κυματομορφής 8/20 μs και έχει μεγάλη ικανότητα απαγωγής κρουστικού ρεύματος $I_{max}=40kA$. Είναι τριφασικός συνδέεται με τις τρεις φάσεις και τον ουδέτερο του συστήματος για να διοχετεύσει επικίνδυνες υψηλές υπερτάσεις προς την θεμελιακή γείωση. Οι υποδοχές των ακροδεκτών του είναι κατάλληλες για καλώδιο διατομής 35mm². Επίσης έχει οπτική ένδειξη καλής λειτουργίας. Παρακάτω (Σχήμα 6.38) φαίνεται ο απαγωγός υπερτάσεων που χρησιμοποιούμε και το ηλεκτρολογικό σχέδιο σύνδεσης του.



Σχήμα 6.38: Εικόνα απαγωγού υπερτάσεων και ηλεκτρολογικό σχέδιο σύνδεσης του με την εγκατάσταση.

ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

Για την παρακολούθηση και την καταγραφή των αποδόσεων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης χρησιμοποιήσαμε ένα σύστημα ελέγχου της εταιρείας SMA. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα καταγραφικό όργανο το Sunny Boy Control σε συνδυασμό 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 email ή Fax.

Το λογισμικό Sunny Data Control εγκαθίσταται στον Η/Υ και επιτρέπει στο χρήστη να έχει πρόσβαση στην εγκατάσταση από οποιοδήποτε σημείο και αν βρίσκεται. Έτσι μπορεί να ελέγχει την τρέχουσα κατάσταση της εγκατάστασης και της 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 αντιστροφών, 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:

$$E = P \cdot CF \cdot 8760 \quad (6.3)$$

Όπου P η εγκατεστημένη ισχύς του πάρκου, CF ο συντελεστής χρησιμοποίησης ή εκμετάλλευσης ισχύος (Capacity Factor), και 8760 οι ώρες ενός χρόνου.

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης CF δίνεται από τη σχέση:

$$CF = \frac{P_{\sigma}}{P_p} \quad (6.4)$$

Όπου P_{σ} η μέση ημερήσια ισχύς $P_{\sigma} = \frac{E_{\sigma}}{T}$ και P_p η εγκατεστημένη ισχύς και E_{σ} η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το φ/β πάρκο:

$$E_{\sigma} = \eta_{\sigma} \cdot H_t \cdot S \quad (6.5)$$

$$P_{\sigma} = \frac{E_{\sigma}}{T} \quad (6.6)$$

Όπου η_{σ} είναι ο μέσος συντελεστής απόδοσης φ/β συστοιχίας, H_t η μέση ημερήσια τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και S το εμβαδόν επιφάνειας.

Για το πάρκο έχουμε:

$$E_{\sigma} = 0,14 \cdot 5400 \cdot 406,72 = 307480,32 \text{ wh}$$

$$P_{\sigma} = 307480,32 / 24 = 12811,68$$

$$CF = 12811,68 / 60000 = 0,213528$$

Και τέλος για την συνολική ενέργεια του πάρκου έχουμε:

$$E = 60000 \cdot 0,213528 \cdot 8760 = 112.230 \text{ kw}$$

Αρα η ετήσια συνολική ενεργεία του πάρκου είναι **112.230 kw**

Πίνακας 6.11 Στον πίνακα φαίνεται η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία για 30 μοίρες, η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα για τις ώρες της ημέρας με ηλιοφάνεια T_a , η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα για 24 ώρες T_{24} .

Month	H_h	H_{opt}	$H(30)$	D/G	T_D	T_{24h}	N_{DD}
Jan	2120	3230	3200	0.46	7.4	6.3	370
Feb	2810	3790	3770	0.47	8.2	7.0	328
Mar	4230	5100	5090	0.41	10.1	8.8	287
Apr	5440	5820	5830	0.39	13.3	11.8	137
May	6750	6610	6630	0.35	18.7	16.9	31
Jun	7870	7360	7410	0.27	23.1	21.0	8
Jul	8080	7710	7750	0.22	25.4	23.3	5
Aug	7260	7580	7600	0.23	25.3	23.3	11
Sep	5330	6260	6250	0.32	21.2	19.4	48
Oct	3710	4930	4900	0.39	17.5	15.6	151
Nov	2500	3800	3770	0.41	12.6	11.1	284
Dec	1910	2960	2930	0.50	8.8	7.7	347
Year	4850	5440	5440	0.33	16.0	14.4	2007

H_h : Irradiation on horizontal plane (Wh/m²/day)

H_{opt} : Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m²/day)

$H(30)$: Irradiation on plane at angle: 30deg. (Wh/m²/day)

D/G : Ratio of diffuse to global irradiation (-)

T_D : Average daytime temperature (°C)

T_{24h} : 24 hour average of temperature (°C)

N_{DD} : Number of heating degree-days (-)

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 60kWp. 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
UPSOLAR UP 240	Τεμάχιο	250	244 €	61000 €
SMA-STP 15000TL	Τεμάχιο	4	3.207,16 €	12.828 €
ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	Τεμάχιο	1	1500 €	1500 €
ΠΡΟΣΘΕΤΟ ΥΛΙΚΟ ΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ				350 €
ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΕΣ / ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ				500 €
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ	Τεμάχιο	4	2.000 €	8000 €
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ (ΚΑΛΩΔΙΑ, ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ κ.τ.λ.)				8000 €
ΛΟΙΠΑ ΕΞΟΔΑ (ΓΡΑΦΕΙΟΚΡΑΤΙΚΑ κ.τ.λ.)				2.500 €
ΣΥΝΟΛΟ				94.700 €

Έπειτα παρουσιάζεται η τιμή πώλησης της ενέργειας, εφόσον πρόκειται για διασυνδεδεμένο σύστημα με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη από 100kWp, τότε η τιμή της ενέργειας είναι 0,12€/kWh.

ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Έτος	Διασυνδεδεμένο		Μη Διασυνδεδεμένο
	A	B	Γ
	>100kW	≤100kW	(ανεξαρτήτως ισχύος)
2013 Φεβρουάριος	9,5	12,0	10,0
2013 Αύγουστος	9,5	12,0	10,0
2014 Φεβρουάριος	9,0	11,5	9,5
2014 Αύγουστος	9,0	11,5	9,5
Για κάθε έτος ν από το 2015 και μετά	$1,1 \times \mu\text{ΟΤ}\Sigma_{\nu-1}$	$1,2 \times \mu\text{ΟΤ}\Sigma_{\nu-1}$	$1,1 \times \mu\text{ΟΤ}\Sigma_{\nu-1}$
μΟΤΣ _{ν-1} : Μέση Οριακή Τιμή Συστήματος κατά το προηγούμενο έτος ν-1			

6.12.1 Βιωσιμότητα επένδυσης

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΣ ΣΤΘΜΟΣ

1. Γενική Περιγραφή		
1.1	Συνολική Ισχύς Σταθμού	60000 Wp
1.2	Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας	112230 kWh
2. Συνολική Επένδυση		
2.1	Κόστος Εξοπλισμού και Εγκατάστασης	94700 €
2.2	Κόστος Απόκτησης Εκτάσεως	0 €
2.3	Συνολικό Κόστος	94700 €
3. Τιμές Πώλησης		
3.1	Τιμή Πώλησης Ενέργειας (με προσαύξηση 2,5% ετησίως)	0.12€/kWh
4. Ετήσια Αποτελέσματα		
4.1	Έσοδα από Πώληση Ενέργειας	13.468€

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 60kWp, το οποίο κατατάσσει το έργο στα μεσαίας κλίμακας. 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. 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, αλλά εξετάστηκε η σταθερή κλίση των συστοιχιών στις 30° κατά τη διάρκεια του έτους. Μελέτη έγινε και για την εναλλαγή της κλίσης των συστοιχιών στην διάρκεια του έτους και διαπιστώθηκε ότι τα ενεργειακά οφέλη (περίπου 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 συστοιχιών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για την πόλη της Ηλείας 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 αξιόλογη απόδοση είναι τα φ/β πλαίσια από μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό πυριτίο. 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. Σημαντικότερες 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 Β-Ν 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 ότι μέχρι και σήμερα η βιωσιμότητα των φ/β επενδύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παρέμβαση του κράτους και ουσιαστικά είναι ελάχιστα επικερδής για ένα επενδυτή χωρίς τα αναγκαία μέτρα στήριξης (π.χ. επιδοτήσεις).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Α. ΜΠΑΛΑΡΑΣ, ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Α. ΑΡΓΥΡΙΟΥ, ΦΩΤΗΣ Ε. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ, ΣΕΛΚΑ-4Μ ΤΕΚΔΟΤΙΚΗ, ΑΘΗΝΑ 2006.
2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΩΝ, ΠΕΤΡΟΣ ΝΤΟΚΟΠΟΥΛΟΣ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ, COPYRIGHT 2005.
3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, Ι. Ε. ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ, 3^Η ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ.
4. ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ, ΤΟΜΟΣ Α', ΦΙΛΙΠΠΟΣ ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ Φ. Ι. ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ, ΑΘΗΝΑ 2010.
5. ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ, ΝΙΚΟΣ Μ. ΚΙΜΟΥΛΑΚΗΣ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ, ΑΘΗΝΑ 2006.
6. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ, ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ν. ΜΑΝΙΑΣ, ΕΚΤΗ ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ, ΑΘΗΝΑ 2007.
7. ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΚΑΠΛΑΝΗΣ Ν. ΣΩΚΡΑΤΗΣ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΙΩΝ, ΑΘΗΝΑ 2003.
8. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ – ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, ΤΣΑΛΙΔΗΣ ΦΙΛΙΠΠΟΣ Γ., ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΚΔΟΣΗΣ 1985.
9. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ, ΠΕΡΔΙΟΣ ΣΤΑΜΑΤΗΣ Δ., 3^Η ΕΚΔΟΣΗ, ΣΕΛΚΑ-4Μ ΤΕΚΔΟΤΙΚΗ, ΑΘΗΝΑ 2011.
10. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΘΕΜΕΛΙΑΚΗ ΓΕΙΩΣΗ, ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ, ΕΛΟΤ-1424, 3/11/2006.
11. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΚΕΡΑΥΝΟΥΣ, ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ, ΕΛΟΤ-1197, 17/6/2002.
12. ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ 100 KW, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΓΕΩΡΓΙΟΣ Λ. ΚΤΕΝΙΔΗΣ, ΑΘΗΝΑ 2008.
13. ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΑΝΑΣΤΟΠΟΥΛΟΥ ΑΓΓΕΛΙΚΗ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2009.

Ακόμα χρησιμοποιήθηκαν πολλές πληροφορίες από το διαδίκτυο. Παρακάτω δίνονται κάποιες διευθύνσεις από τις οποίες αντλήθηκαν πληροφορίες για την συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

14. www.sma.de
15. www.tee.gr
16. www.ypan.gr
17. www.iea.org
18. www.elemco.gr
19. www.Schneider-electric.gr
20. www.dehn-international.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



CONTACT

If you have technical problems, first contact your installer. The following information is required in order to provide you with the necessary assistance:

- Inverter device type
- Inverter serial number
- Type and number of the PV modules connected
- Event number and display message on the inverter
- Optional equipment, e.g. communication products
- Confirmation of whether or not a multi-function relay is used

SMA Solar Technology AG

Sonnenallee 1
34266 Niestetal, Germany
www.SMA.de

SMA Service Line

Inverters: +49 561 9522 1499
Communication: +49 561 9522 2499
Fax: +49 561 9522 4699
E-Mail: ServiceLine@SMA.de

Installer Contact

PV Inverter

SUNNY TRIPOWER 15000TL Economic Excellence

SUNNY TRIPOWER 15000TL High Efficiency

SUNNY TRIPOWER 20000TL Economic Excellence

SUNNY TRIPOWER 20000TL High Efficiency

User Manual








STP20TLHE-8A-8EN122221 | IMEN-STP20TLHE | Version 2.1













EXPLANATION OF SYMBOLS







Symbols on the Inverter

	Inverter	This symbol defines the function of the green LED. The green LED indicates the operating state of the inverter.
	Observe the documentation	This symbol defines the function of the red LED. The red LED indicates a fault. If the red LED lights up, contact your installer.
	Bluetooth	This symbol defines the function of the blue LED. The blue LED indicates that communication via Bluetooth is activated.
	QR-Code**	By scanning this code, the solar power professional installing the inverter can register the inverter and take part in the SMA bonus programme.
	Danger	There are special requirements for earthing.

* QR-Code® is a registered trademark of DENSO WAVE INCORPORATED.

Symbols on the Type Label

	Danger to life due to high voltages	The inverter operates at high voltages. All work on the inverter must be carried out by skilled persons only.
	Risk of burns due to hot surfaces	The inverter can become hot during operation. Avoid contact during operation.
	Observe the documentation	Observe all documentation that is supplied with the inverter.
	DC	Direct current
	Without transformer	The inverter does not have a transformer.
	AC	Three-phase alternating current with neutral conductor
	Proper disposal	Do not dispose of the inverter together with the household waste.
	CE marking	The inverter complies with the requirements of the applicable EC directives.
	Device class ID	The inverter is equipped with a wireless component and complies with device class 2.
	Degree of protection	The inverter is protected against dust deposits in the interior and against splashes of water from all angles.

	Outdoor	The inverter is suitable for outdoor installation.
	RAL quality mark for solar products	The inverter complies with the requirements of the German Institute for Quality Assurance and Labelling.
	Certified safety	The inverter is VDE-tested (Association for Electrical, Electronic and Information Technologies) and complies with the requirements of the German Equipment and Product Safety Act.
	Australian mark of conformity	The inverter complies with the requirements of the applicable Australian guidelines.
	Korean mark of conformity	The inverter complies with the requirements of the applicable Korean guidelines.
	Chinese mark of conformity	The inverter complies with the requirements of the applicable Chinese guidelines.

GLOSSARY

Bluetooth*

Bluetooth is a radio technology that allows the inverter and other communication devices to communicate with each other. For Bluetooth communication, the Bluetooth devices do not need to be within sight of each other.

DC switch-disconnector

The DC switch-disconnector enables the inverter to be safely disconnected from the PV array. The DC switch-disconnector may be operated by skilled persons only.

Energy

Energy is the power which a system can supply or consume within a certain time unit. Energy is measured in Wh (watt hours). If, for instance, your inverter feeds in for half an hour at 3,000 W and half an hour at 2,000 W, it will have fed a total of 2,500 Wh into the electricity grid.

Multi-function relay

The multi-function relay is an optional accessory to the inverter. The multi-function relay acts as an interface for managing a fault indicator or another external load. Depending on the parameters and measured values, the inverter determines when the connected load is switched on and off.

Power

Power is the product of voltage and electrical current strength. Power is measured in W (watts). The power shown in the display is an instantaneous value. It indicates the power your inverter is currently feeding into the electricity grid.

PV

Abbreviation for photovoltaics.

*The Bluetooth® word mark and logos are registered trademarks owned by Bluetooth SIG, Inc. and any use of this mark by SMA Solar Technology AG is under licence.

SAFETY PRECAUTIONS

⚠ DANGER

Danger to life due to high voltages in the inverter

Even when no external voltage is connected, there may still be high voltages present in the inverter.

- Do not open the inverter.
- Electrical installation, repair and retrofitting may only be carried out by a skilled person.

⚠ CAUTION

Risk of burns due to hot enclosure parts

- During operation, only touch the lower enclosure lid and the display.



Yield loss due to poor heat dissipation

- Do not place any objects on the enclosure.

CLEANING THE INVERTER

NOTICE

Damage to the display by use of cleaning agents

- If the inverter is dirty, clean the enclosure lid, the display and the LEDs using only clean water and a cloth.

DISPLAY

The display updates the measured values of your PV plant every five seconds.

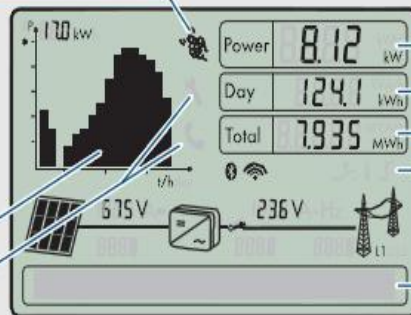
You can operate the display by tapping it:

Tapping once: to activate the backlight, to scroll to the next text line, to switch between the power graph of the last 16 feed-in hours and the energy yields of the last 16 days.

Tapping twice: the display alternates automatically between the firmware version, the serial number of the inverter, the Bluetooth NetID, the configured country data set and display language.

Power and yield curve

An error has occurred: contact installer.



Type label for identifying the inverter

Serial number

Lower enclosure lid

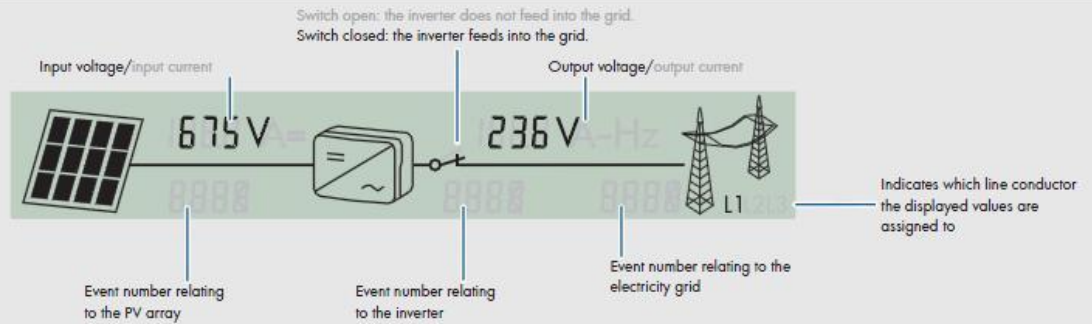
Display

DC switch-disconnector*

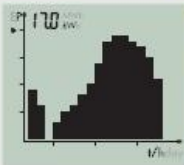
LEDs

*optional

PLANT OVERVIEW



POWER AND YIELD CURVE



The power and energy of the inverter are displayed as diagrams. The daily power graph is displayed by default.

The right-hand flashing bar of the power graph represents the current hour. If the inverter does not feed any power to the electricity grid over a longer period of time (e.g. during the hours of darkness or if the PV modules are covered with snow), a gap is inserted into the chart. The bar for the current hour is updated automatically every five seconds. After four seconds, the bar disappears for one second and then displays the current value.

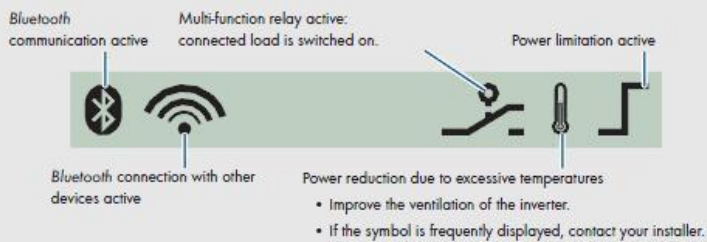
By tapping on the enclosure lid, you can alternate between displays, and the graph will switch to show the energy yields of the last 16 days.

POWER DISPLAY

The power and energy of the inverter are displayed in the three fields: "Power", "Day" and "Total". The display is updated every five seconds.

Power	8.12 kW	The power that the inverter is currently feeding into the electricity grid.
Day	124.1 kWh	The energy fed into the electricity grid on this particular day. This equals the energy generated from the inverter's start-up in the morning to the current time.
Total	7935 MWh	The total energy that the inverter has fed into the electricity grid during its entire operating time.

DISPLAY OF ENABLED FUNCTIONS



LED SIGNALS

Green LED is on	The inverter is in operation.
Green LED is flashing	Conditions for grid connection are not yet fulfilled.
Red LED is on	An error has occurred. <ul style="list-style-type: none"> Contact installer.
Blue LED is on	Bluetooth communication is activated.
Blue LED is flashing	The inverter has been identified via Sunny Explorer by activating the "Find device" parameter.

MEASUREMENT ACCURACY

The display values may deviate from the actual values and must not be used as a basis for invoicing. The parameters captured by the inverter are required for operational control and to regulate the current to be fed into the electricity grid. The inverter does not have a calibrated meter.

Sunny Tripower 15000TL	
Είσοδος (DC)	
Μέγιστη ισχύς DC ($\cos \phi=1$)	15260 W
Μέγιστη τάση εισόδου	1000 V
Εύρος τάσης σημείου μέγιστης ισχύος @ τάση δικτύου 230V	580 V – 800 V
Ελάχιστη τάση εισόδου/ Τάση έναρξης τροφοδοσίας	570 V / 620 V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου	36 A
Μέγιστο ρεύμα εισόδου ανά στοιχειοσειρά	36 A
Αριθμός ανεξάρτητων εισόδων MPP/ στοιχειοσειρών ανά είσοδο MPP	1 / 6
Έξοδος (AC)	
Ονομαστική ισχύς (230 V, 50 Hz)	15000 W
Μέγιστη φαινόμενη ισχύς AC	15000 VA
Ονομαστική τάση AC	3 / N / PE, 230 / 400 V
Εύρος ονομαστικής τάσης AC	160 V – 280 V
Συχνότητα δικτύου AC/ Εύρος	50 Hz, 60Hz / -6 Hz ... +5 Hz
Ονομαστική συχνότητα δικτύου/ Ονομαστική τάση δικτύου	50 Hz / 230 V
Μέγιστο ρεύμα εξόδου	24 A
Συντελεστής ισχύος σε ονομαστική ισχύ	1
Ρυθμιζόμενος συντελεστής πρόσφυσης	0,8
Φάσεις τροφοδοσίας/ Φάσεις σύνδεσης	3 / 3
Βαθμός απόδοσης	
Μέγιστος βαθμός απόδοσης/ Ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης	98,5 % / 98,3 %
Διατάξεις προστασίας	

Αποζεύκτης εισόδου	Προαιρετικός εξοπλισμός
Επιτήρηση σφάλματος γείωσης/ Επιτήρηση δικτύου	ναι / ναι
Απαγωγί υπέρτασης DC (τύπου II)	Δεν διατίθεται
Προστασία αντίστροφης πολικότητας DC/Αντοχή σε βραχυκύκλωμα AC/ Γαλβανική απομόνωση	ναι / ναι / Δεν διατίθεται
Μονάδα επιτήρησης ρεύματος διαρροής ευαίσθητη σε όλους τους τύπους ρεύματος	ναι
Κατηγορία προστασίας (κατά το πρότυπο IEC 62103)/Κατηγορία υπέρτασης (κατά το πρότυπο IEC 60664-1)	I / III
Γενικά χαρακτηριστικά	
Διαστάσεις (Π/Υ/Β) σε mm	665 / 680 / 265
Βάρος	45kg / 99,2 lb
Εύρος τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας	-25 °C ... +60 °C / 13 °F ... 140 °F
Εκπομπή θορύβου, τυπική	51 dB(A)
Ιδιοκατανάλωση (νύχτα)	1 W
Τοπολογία/Σύστημα ψύξης	Χωρίς μετασηματιστή/OptiCool
Κατηγορία προστασίας ηλεκτρονικού συστήματος/Περιοχή σύνδεσης (κατά το πρότυπο IEC 60529)	IP65 / IP54
Κλιματική κατηγορία (κατά το πρότυπο IEC 60721-3-4)	4K4H
Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή σχετικής υγρασίας (χωρίς συμπύκνωση)	100 %
Εξοπλισμός	
Σύνδεση DC	SUNCLIX
Σύνδεση AC	Ελατηριωτός συνδετήρας
Οθόνη	Γράφημα
Διεπαφές: RS485 / Bluetooth / Ρελέ πολλαπλών	Προαιρετικός εξοπλισμός/ ναι / Προαι-

λειτουργιών	ρετικός εξοπλισμός
Διεπαφές: Webconnect / Speedwire	Προαιρετικός εξοπλισμός/ Προαιρετικός εξοπλισμός
Εγγύηση: 5 / 10 / 15 / 20 / 25 χρόνια	ναι / προαιρετικός εξοπλισμός / προαιρετικός εξοπλισμός / προαιρετικός εξοπλισμός / προαιρετικός εξοπλισμός
Πιστοποιητικά και άδειες (περισσότερα κατόπιν αιτήματος)	CE, VDE 0126-1-1, RD 661/2007, PPC, AS 4777, EN 50438*, C10/11, UTE C15-712-1, G59/2, VDE-AR-N 4105, BDEW 2008, RD 1699
Πιστοποιητικά και άδειες (υπό σχεδιασμό)	CEI 0-21
* Δεν ισχύει για όλα τα εθνικά παραρτήματα του προτύπου EN 50438	
Προσωρινά δεδομένα: Έκδοση Μάρτιος 2012 - Στοιχεία υπό ονομαστικές συνθήκες	
Χαρακτηρισμός τύπου	STP 15000TLEE-10

Στοιχείο PV, πολυκρυσταλλικό, 60 κυψελών



Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Μοντέλο	UP-M220P	UP-M225P	UP-M230P	UP-M235P	UP-M240P	UP-M245P
Μέγ. ισχύς P _m (Wp)	220	225	230	235	240	245
Τάση μέγ. ισχύος V _m (V)	28,7	29,2	29,7	30,0	30,2	30,4
Ένταση μέγ. ισχύος I _m (A)	7,67	7,71	7,75	7,84	7,95	8,06
Τάση σε ανοιχτό κύκλωμα V _{oc} (V)	36,7	37,0	37,2	37,4	37,6	37,8
Ένταση ρεύματος βραχυκυκλώματος I _{sc} (A)	8,25	8,27	8,30	8,35	8,40	8,45
Απόδοση στοιχείου	13,4%	13,8%	14,1%	14,4%	14,9%	15,1%
Μέγιστη τάση του συστήματος (V)	1000 (IEC) / 600 (UL)					
Αντοχή Ισχύος	± 3%					
Μέγιστο ρεύμα (A) σε κάθε φάση	20					

Εξαρτήματα και μηχανικά στοιχεία

Εμπρός κρύσταλλο	Γυαλί ασφαλείας υψηλής διαύγειας, 0,125" // 3,2 mm - CSG
Κουτί διακλάδωσης	Huber+Suhner (IP 67) Radox HA3
Δίοδος	3 δίοδοι - ST STPS1545CG
Καλώδια	1,0m H+S, Radox Smart // (0,0062 in ² // 4 mm ² , 12AWG) πιστοποιημένα κατά IEC και UL, PV Wire
Βύσματα	MC4 IP67 , πιστοποιημένα κατά IEC και UL
Πλαίσιο	Χρώμα ανοδωμένου αλουμινίου τύπου 6063-T5
Υλικό περιβλήματος	EVA (πάχους 0,019"//0,50mm ± 0,001"//0,03mm)
Υλικό επιφάνειας πίσω μέρους	Λευκό TPT (πάχους 0,012"//0,32mm ± 0,001"//0,03mm)
Εύρος θερμοκρασίας	Από -40°C έως +90°C
Μέγιστο φορτίο	45lbs/ft ² (Πρότυπο UL) // 5400 Pa (Πρότυπο IEC)
Αντοχή σε κρούση	Χαλύβδινο σφαιρίδιο, 1,18 lbs // 535 g, από ύψος 51" // 1,3 m

Προδιαγραφές

Κυψέλες	Φωτοβολταϊκές κυψέλες πολικρυσταλλικού πυριτίου 6" x 6" // 156 mm x 156 mm
Αριθμός κυψελών	60 (6 x 10)
Διαστάσεις (in // mm)	64,57 x 39,06 x 1,57 // 1640 x 992 x 40
Βάρος (lb // kg)	41,9 // 19,0

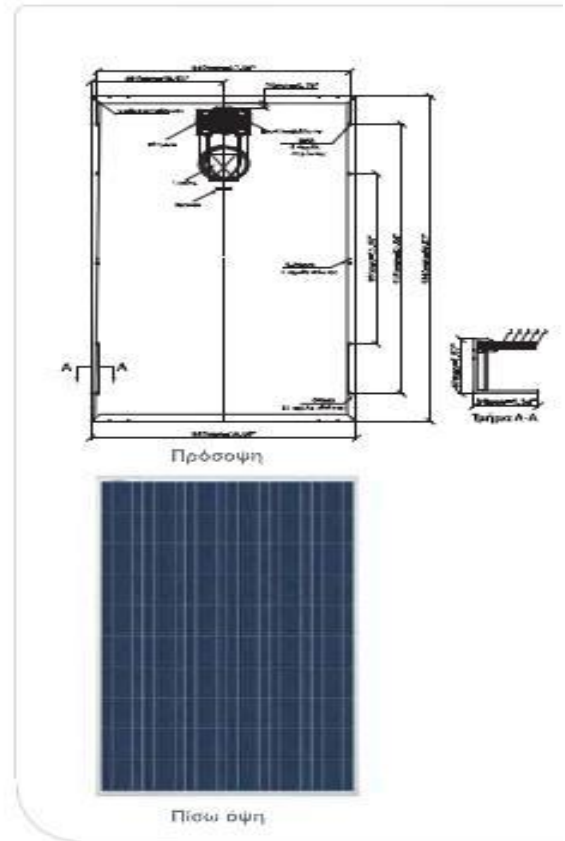
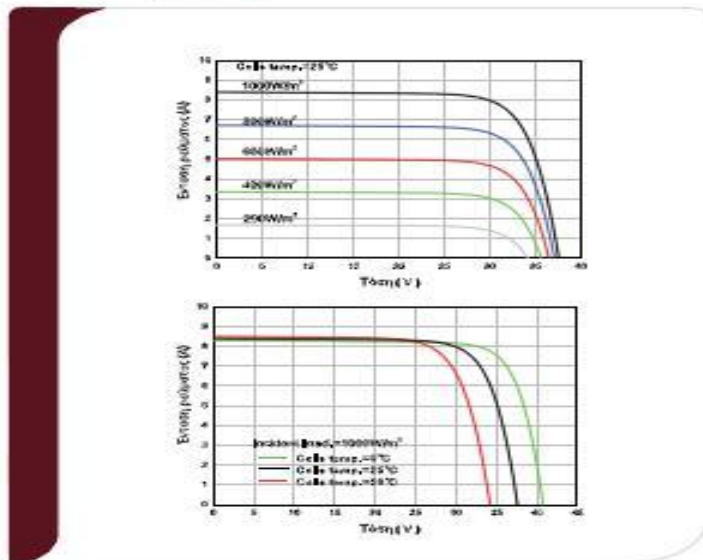
Διαθέσιμες επιλογές

Χωρίς πλαίσιο
Πλαίσιο Znp

Συντελεστές θερμοκρασίας

NOCT (°C)	45 ± 2
Συντελεστής θερμοκρασίας Isc (%/°C)	0,05 ± 0,01
Συντελεστής θερμοκρασίας Voc (%/°C)	-0,32 ± 0,02
Συντελεστής θερμοκρασίας Im (%/°C)	-0,02 ± 0,02
Συντελεστής θερμοκρασίας Vm (%/°C)	-0,42 ± 0,03
Συντελεστής θερμοκρασίας Pm (%/°C)	-0,43 ± 0,05

IV καμπύλες



ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ :

- STC: Ακτινοβολία 1000W/m², θερμοκρασία του στοιχείου 25°C, AM=1,5
- Τα δεδομένα που αφορούν την ονομαστική τιμή θερμοκρασίας λειτουργίας των παρακάτω κυψελών είναι ενδεικτικά
- Απόκλιση των συντελεστών Vm(V), Im(A), Voc(V) και Isc(A) της τάξης του ±10%

ΕΓΓΥΗΣΗ :

Εγγύηση προϊόντος: 10 έτη



Η Ursolar σας φέρνει ακόμα καλύτερα για εμάς που παράγουμε από καλύτερα ηλιακά κύτταρα, σε αυτές τις μεγάλες εγκαταστάσεις. Έτσι η απόδοσή μας αυξάνεται κι ακόμα περισσότερο.

Περαιτέρωτική επισκόπηση πολιτικών για PowerGuard PowerCLIP

Η πολιτική εγγύησης της Ursolar για το PowerCLIP καλύπτει τυχόν κατασκευαστικά ελαττώματα, αποκλιμακωμένα μεγέθη, λόγω εφόδου εκτός των καθορισμένων ορίων κομψής εξασθένισης, ενώ η παροχή κάλυψης αρχίζει αμέσως.

Το πρόγραμμα είναι διαθέσιμο για αγορά σε όλα τα μοντέλα που πωλούνται από την Ursolar Group Co, Ltd και τις θυγατρικές εταιρίες. Η χρηματοδότηση των βλαβών εξυπαρξιών που κατατέθηκαν από πολλούς πελάτες σύμφωνα με την εγγύηση της Ursolar είναι εγγυημένη για όλα τα μοντέλα που καλύπτονται από την πολιτική εγγύηση PowerCLIP.

Το πρόγραμμα αφορά μη ακυρότητα, ανεκκλήτη κάλυψη και καταβολή του πλήρους ποσού. Αυτό σημαίνει ότι οι έγκυρες αιτήσεις θα αποζημιώνονται, ανεξαρτήτως του αθροίσματος της άσκησης της Ursolar για χρονική περίοδο 25 ετών, από το φορέα A.M. Best, αξιολογημένο σε επίπεδο "A" (άριστο) ή από άλλους, διεθνώς αναγνωρισμένους φορείς ασφαλιστικών υπηρεσιών.

Πιστοποιήσεις:

