



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας στη  
Φαρμακοβιομηχανία**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Β. Κορδαλής

**Επιβλέπων:** Μαρία Γ. Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Αύγουστος 2018





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας στη Φαρμακοβιομηχανία

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Β. Κορδαλής

**Επιβλέπων:** Μαρία Γ. Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε απ' την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

-----  
Μ. Γ. ΙΩΑΝΝΙΔΟΥ  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

-----  
Ν. ΘΕΟΔΩΡΟΥ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

-----  
Π. ΤΣΑΡΑΜΠΑΡΗΣ  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Αύγουστος 2018

.....

Δημήτριος Β. Κορδαλής

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

Copyright © Δημήτριος Β. Κορδαλής, 2018  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με τη μελέτη και εγκατάσταση ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος για την τροφοδότηση γραμμής παραγωγής φαρμακευτικού προϊόντος σε φαρμακοβιομηχανία. Η εναλλακτική τροφοδότηση αφορά συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής της εγκατάστασης, της οποίας η λειτουργία είναι απαραίτητη σε οποιαδήποτε κατάσταση κρίσεως, όπου η ηλεκτροδότηση της συνολικής εγκατάστασης από τη ΔΕΗ θα είναι αδύνατη.

Το φωτοβολταϊκό αυτό σύστημα διαθέτει επίσης συσσωρευτές για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και εφεδρική πηγή ενέργειας. Την εφεδρική πηγή ενέργειας θα αποτελέσει μια ντιζελογεννήτρια, η οποία και θα αναλάβει να καλύπτει πιθανές αιχμές φορτίου όταν αυτές εμφανίζονται στο σύστημα αλλά και να φορτίζει τους συσσωρευτές. Πιο συγκεκριμένα:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά σε όλες τις πηγές ενέργειας, συμβατικές και ανανεώσιμες, προκειμένου να καταλήξουμε στην ηλιακή ενέργεια την οποία και εκμεταλλεύονται τα φ/β συστήματα. Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα, κατηγορίες και εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων περιλαμβάνονται στο κεφάλαιο αυτό.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται λόγος για την ηλιακή ακτινοβολία, τη διακύμανσή της αλλά και για τους ηλιακούς συλλέκτες. Ο προσανατολισμός και η βέλτιστη κλίση των ηλιακών συλλεκτών θα μας απασχολήσει στο κεφάλαιο αυτό.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 3, περιλαμβάνεται η θεωρία για το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Υλικά και τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων αλλά και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τόσο των στοιχείων όσο και των πλαισίων αναφέρονται εδώ.

Το τέταρτο κεφάλαιο πραγματεύεται τους συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλυτικά εδώ θα δούμε τη δομή, την αρχή λειτουργίας, τις κατηγορίες, τους τύπους και όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη που περιγράφουν ένα συσσωρευτή.

Ακολουθεί το κεφάλαιο 5 με τα ηλεκτρονικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων δηλαδή τον ανιχνευτή μέγιστου σημείου ισχύος, το μετατροπέα DC-AC και τον ελεγκτή φόρτισης.

Το θεωρητικό κομμάτι της εργασίας τελειώνει με το κεφάλαιο 6 στο οποίο γίνεται μια σύντομη αναφορά στη ντιζελογεννήτρια και τη λειτουργία αυτής κατά την ενσωμάτωση της στο φωτοβολταϊκό σύστημα που μελετάμε.

Η μελέτη του υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος με H/Z, δηλαδή με ντιζελογεννήτρια, για την τροφοδότηση της συγκεκριμένης βιομηχανικής μονάδας γίνεται στο κεφάλαιο 7. Η μελέτη χωρίζεται σε δύο κύρια κομμάτια, στον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης των τμημάτων και στον υπολογισμό του συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί.

Τέλος ακολουθεί ο επίλογος με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη μου.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, φωτοβολταϊκά συστήματα, συσσωρευτής, αυτόνομο σύστημα, αντιστροφεύς, ηλιακή ακτινοβολία, γεννήτρια.

## **Abstract**

The aim of this project is the study of a stand alone photovoltaic system which is used in order to supply a production line of a pharmaceutical industry. Alternative power supply refers to a specific production line of the plant, which is required in any crisis situation, where the electric supply from Hellenic Public Power Corporation will be impossible. This photovoltaic system includes also batteries which store electrical energy and an additional energy source. As an additional energy source will be used a diesel generator which will both covers possible peaks of storage and loads batteries. To be more specific:

In chapter 1 are reported all sources of energy both conventional and renewable in order to result in solar energy which is be exploited by the PV systems. Advantages, disadvantages, categories and applications of PV systems are included in this chapter.

In chapter 2 solar radiation, distribution of solar radiation, solar cells, their optional inclination and orientation are presented.

Chapter 3 that follows includes theory about PV phenomenon and PV cells. Material and technologies of PV cells in additional to electrical characteristics of cells and modules are also referred here.

Chapter 4 is referred to batteries which are used to store electrical energy. Structure, function, categories, types and all characteristics that describe batteries are also presented.

Chapter 5 follows with the electronics of PV systems, shunt controllers, series controllers, MPP charge controller and inverter DC- AC.

Theory ends with chapter 6 in which there is a reference to diesel generator and its function in PV systems.

The study of a hybrid PV diesel system in order to supply the particular production line of the pharmaceutical industry is presented in chapter 7. This study is separated to 2 parts, estimation of energy consumption and estimation of the system that will be finally used.

The project ends with all the conclusions that are resulted from this study.

## **KEY WORDS**

Renewable energy sources, photovoltaic systems, storage systems, autonomous system, inverters, solar radiation, power generator.

## **Ευχαριστίες**

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου σε όσους βοήθησαν για την εκπόνησή της.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην κ. Μαρία Ιωαννίδου, καθηγήτρια Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη βοήθεια, τις υποδείξεις, τις διορθώσεις και την καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Τις πιο θερμές μου ευχαριστίες οφείλω, επίσης, στην οικογένειά μου και ιδιαίτερα στον αδερφό μου, Πέτρο Κορδαλή, για τη βοήθεια και τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου.

## Περιεχόμενα

Σκοπός της Εργασίας.....	12
Βασικά Μηχανήματα που συμμετέχουν στην παραγωγή Τελικού Προϊόντος.....	12
Εισαγωγή.....	13
1.1 Το Ενεργειακό πρόβλημα.....	13
1.2 Πηγές Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	14
1.2.1 Συμβατικές Πηγές Ενέργειας.....	14
1.2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	15
Ηλιακή Ενέργεια.....	22
2.1 Ο Ήλιος.....	22
2.1.1 Η Ακτινοβολία του Ήλιου.....	23
2.1.2 Σύσταση Ηλιακού Φάσματος.....	24
2.1.3 Η Διακύμανση της Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	25
2.2 Προσδιορισμός τοποθεσίας στη γη.....	27
2.3 Ηλιακές Γωνίες.....	28
2.4 Ηλιακή Σταθερά.....	29
2.5 Ο Ηλιακός Συλλέκτης και ο Προσανατολισμός του.....	29
2.5.1 Η βέλτιστη Κλίση του Συλλέκτη.....	30
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	33
3.1 Εισαγωγή.....	35
3.2 Ημιαγωγοί.....	35
3.3 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	36
3.4 Υλικά και Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Στοιχείων.....	37
3.4.1 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Πυριτίου.....	37
3.5 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Στοιχείου.....	40
3.5.1 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου και Χαρακτηριστική Εξίσωση.....	40
3.5.2 I – V Χαρακτηριστική Φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	42
3.5.3 Η τάση ανοικτού κυκλώματος.....	42
3.5.4 Σημείο μέγιστης ισχύος $P_m$ .....	43
3.5.5 Ο συντελεστής πλήρωσης $ff$ (Fill Factor).....	43
3.5.6 Μεταβολή της θερμοκρασίας.....	44
3.5.7 Ο Βαθμός Απόδοσης.....	45
3.5.8 Παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά το βαθμό απόδοσης.....	46



## Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας στη Φαρμακοβιομηχανία

3.6 Η Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια.....	48
3.6.1 Το Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο.....	48
3.6.2 Η Απόδοση του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου.....	49
3.6.3 Η Επίδραση της Θερμοκρασίας και της Ρύπανσης.....	49
3.6.4 Η Ισχύς Αιχμής του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου.....	51
3.7 Φαινόμενο Hot Spot.....	51
3.7.1 Εξήγηση του φαινομένου.....	51
3.7.2 Μέθοδοι θεραπείας.....	53
3.7.3 Στρατηγική παράλληλης/σε σειρά σύνδεσης κυττάρων.....	53
3.7.4 Δίοδοι παράκαμψης.....	53
Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	55
4.1 Η Ανάγκη για Αποθήκευση.....	55
4.2 Ηλιακοί Συσσωρευτές.....	55
4.3 Δομή Συσσωρευτών.....	56
4.4 Αρχή Λειτουργίας Συσσωρευτών.....	57
4.5 Κατηγορίες Στοιχείων και Συσσωρευτών.....	58
4.5.1 Πρωτεύοντα Στοιχεία ή Συσσωρευτές.....	58
4.5.2 Δευτερεύοντα Στοιχεία ή Συσσωρευτές.....	58
4.6 Τύποι Συσσωρευτών.....	58
4.6.1 Συσσωρευτές Μολύβδου.....	59
4.6.2 Συσσωρευτές Μολύβδου-Αντιμονίου (Pb-Sd).....	59
4.6.3 Συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη (Captive Electrolyte LeadAcid Batteries).....	59
4.6.4 Άλλοι Τύποι Συσσωρευτών.....	60
4.7 Κύκλος Λειτουργίας (DUTY CYCLE).....	61
4.7.1 Συσσωρευτές Εκκίνησης (SLI και DIESEL).....	61
4.7.2 Συσσωρευτές Έλξης (MOTIVE POWER, TRACTION).....	61
4.7.3 Στάσιμοι Συσσωρευτές (STATIONARY FLOAT).....	62
4.7.4 Συσσωρευτές Κλειστού Τύπου (SEALED).....	62
4.7.5 Φωτοβολταϊκοί Συσσωρευτές Μικρού Ρυθμού Εκφόρτισης.....	62
4.7.6 Φωτοβολταϊκοί Συσσωρευτές Μέσου Ρυθμού Εκφόρτισης.....	62
4.8 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτή.....	63
4.8.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά.....	63
4.8.2 Χωρητικότητα.....	63
4.8.3 Εκφόρτιση και Επιτρεπόμενο Βάθος Εκφόρτισης.....	64

## Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας στη Φαρμακοβιομηχανία

4.8.4 Αυτοεκφόρτιση.....	64
4.8.5 Φόρτιση.....	65
4.8.6 Χρόνος Ζωής Συσσωρευτή.....	65
4.8.7 Συντελεστής Γήρανσης Συσσωρευτή.....	65
4.8.8 Συντελεστής Φόρτισης και Απόδοση.....	66
4.9 Οι Συσσωρευτές στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	67
4.9.1 Κύκλος Λειτουργίας σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα με Εφεδρική Πηγή.....	67
4.9.2 Αυτόνομα συστήματα με εφεδρική πηγή ενέργειας.....	67
4.9.3 Ονομαστική Χωρητικότητα και Παρεχόμενη Ισχύς από τους Συσσωρευτές κατά τη Λειτουργία τους σε Φωτοβολταϊκό Σύστημα.....	68
Τα Ηλεκτρονικά των Φωτοβολταϊκών.....	69
5.1 Εισαγωγή.....	69
5.2 Μονάδες Μετατροπής Ισχύος.....	69
5.3 Μετατροπέας (inverter) DC-AC.....	70
5.4 Σχεδίαση ενός DC-AC Μετατροπέα.....	72
5.4.1 Πλευρά Εισόδου του Μετατροπέα ( Input side) .....	72
5.4.2 Πλευρά Εξόδου του Μετατροπέα.....	74
5.5 Ελεγκτής φόρτισης.....	76
5.5.1 Παράλληλος Ρυθμιστής Φόρτισης (Shunt controller) .....	77
5.5.2 Ρυθμιστής φόρτισης σε σειρά (Series controller) .....	77
ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΟ ΖΕΥΓΟΣ.....	78
6.1 Εισαγωγή.....	78
6.2 Μηχανές εσωτερικής καύσης.....	78
6.3 Σύγχρονες μηχανές.....	80
6.4 Κριτήρια επιλογής H/Z.....	80
6.5 Φωτοβολταϊκό Υβριδικό Σύστημα με Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος.....	81
Εγκατάσταση Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος σε Βιομηχανική Εγκατάσταση.....	84
7.1 Εισαγωγή.....	84
7.2 Ενεργειακή Κατανάλωση της Γραμμής Παραγωγής.....	84
7.3 Τροφοδότηση του Φωτισμού και της Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου.....	92
7.3.1 Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκών Στοιχείων.....	92
7.3.2 Επιλογή Μετατροπέα.....	96
7.3.3 Επιλογή Συσσωρευτών.....	98

## Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας στη Φαρμακοβιομηχανία

7.3.4 Επιλογή ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους.....	99
7.4 Τροφοδότηση Λοιπών Μηχανημάτων και Κλιματιστικής Μονάδας.....	103
Συμπέρασμα.....	106
Παράρτημα.....	107
Βιβλιογραφία.....	112

## **Σκοπός της Εργασίας**

Ο Ελληνικός Στρατός έχει υπογράψει συμβάσεις με συγκεκριμένες φαρμακοβιομηχανίες για την παραγωγή και διάθεση συγκεκριμένου τύπου φαρμάκων (χάπια, ενέσιμα φάρμακα κλπ.) με αυστηρές προδιαγραφές, τόσο σε ποιοτικά χαρακτηριστικά, όσο και στους χρόνους παράδοσης, ακόμα και σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης. Αυτό σημαίνει ότι οι προδιαγραφές αυτές που απαιτούνται στις συμβάσεις, πρέπει να τηρούνται απόλυτα και σε περιόδους κρίσεως (διακοπή ηλεκτροδότησης μακράς διάρκειας, φυσικές καταστροφές, εχθροπραξίες κλπ.).

Σε μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης η συμφωνία από τον Ελληνικό Στρατό είναι η φαρμακοβιομηχανία να παράξει συγκεκριμένο αριθμό δισκίων (χάπια). Επομένως, η εταιρία πρέπει να φροντίσει την παραγωγή των συγκεκριμένων δισκίων από την αρχή μέχρι το τέλος της παραγωγικής αλυσίδας.

Γι' αυτές τις περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης απαιτείται η δημιουργία πλάνου και η εγκατάσταση εναλλακτικής ηλεκτροδότησης της συγκεκριμένης γραμμής παραγωγής δισκίων, προκειμένου να είναι δυνατή η ηλεκτροδότησή της, χωρίς να είναι απαραίτητη η ηλεκτρική ενέργεια από τη ΔΕΗ. Επομένως, σε αυτή τη γραμμή παραγωγής έχουν επιλεγεί μηχανήματα βέλτιστης ενεργειακής απόδοσης.

## **Βασικά Μηχανήματα που συμμετέχουν στην παραγωγή Τελικού Προϊόντος**

Μία συσκευασία δισκίων (από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως τελικό προϊόν) για να παραχθεί περνάει από συγκεκριμένες φάσεις παραγωγής:

- Αποθήκη πρώτης ύλης: Αποτελείται κυρίως από μηχανήματα ελέγχου θερμοκρασίας και υγρασίας
- Παραγωγή πρώτης ύλης: Εδώ χρησιμοποιείται ο Αναδευτήρας μέσα στον οποίο αναμειγνύονται η δραστική με τη συμπληρωματική ουσία, ένας Ξηραντήρας Ρευστοποιημένης Κλίνης για την ξήρανση του προϊόντος και μια Δισκιοποιητική μηχανή για τη δημιουργία του δισκίου
- Γραμμή συσκευασίας: Αποτελείται από μια μηχανή Δημιουργίας και Πλήρωσης Κυαθίων (Blister) και μια μηχανή τοποθέτησης των κυαθίων στην τελική συσκευασία
- Αποθήκη τελικού προϊόντος: Αποτελείται κυρίως από μηχανήματα ελέγχου υγρασίας και θερμοκρασίας

Για τα δισκία που παράγονται χρησιμοποιείται μόνο μία ειδική αποθήκη, η οποία είναι μικρότερη από τη βασική αποθήκη της φαρμακοβιομηχανίας, διότι τα συγκεκριμένα προϊόντα παραλαμβάνονται κατευθείαν από τη μονάδα του στρατού. Η εταιρία έχει δεσμευτεί πως η αποθήκη αυτή θα χρησιμοποιείται μόνο γι' αυτό το σκοπό.

## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή

#### 1.1 Το Ενεργειακό πρόβλημα

Από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα, όταν άρχισαν οι εφαρμογές του ηλεκτρισμού, μέχρι τις αρχές της 10ετίας του '70, παρατηρείται διεθνώς μία συνεχής συγκέντρωση της παραγωγής σε συνεχώς μεγαλύτερους «Σταθμούς Παραγωγής» και παράλληλα ανάπτυξη των δικτύων Μεταφοράς και Διανομής με συνεχώς μεγαλύτερες τάσεις, λόγω της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Αυτό συνέβη και στην χώρα μας με την ανάπτυξη του Εθνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), η οποία κατά την περίοδο 1956-63 (περίπου) εξαγόρασε τις 300 περίπου ηλεκτρικές εταιρείες που προμήθευαν τότε την ηλεκτρική ενέργεια με μικρά τοπικά δίκτυα.

Όμως, με αφορμή τις «πετρελαϊκές κρίσεις» της 10ετίας του '70, άρχισε να γίνεται διεθνώς συνείδηση η ανάγκη καλύτερης αξιοποίησης της ενέργειας, αφενός μεν για να αξιοποιούνται καλύτερα οι διατιθέμενοι ενεργειακοί πόροι, αφετέρου δε για να περιορίζεται η ρύπανση του περιβάλλοντος. Το θέμα της ενέργειας παραμένει στο επίκεντρο του αιώνα αυτού, θα καθορίσει αναμφίβολα τις εξελίξεις του επόμενου και μπορεί να προσεγγιστεί από τρεις διαφορετικές απόψεις:

- Της εξασφάλισης της αναγκαίας ποσότητας ενέργειας, στην κατάλληλη για την κάθε χρήση μορφή, δηλαδή της ενεργειακής επάρκειας.
- Του κόστους αυτής της ενέργειας.
- Των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη χρήση της.

Αυτές οι τρεις απόψεις συνθέτουν ότι έχει γίνει ευρύτερα γνωστό με τον όρο «ενεργειακό πρόβλημα». Εξαιτίας του ενεργειακού προβλήματος άρχισε σε διεθνές επίπεδο η αναζήτηση Εναλλακτικών Πηγών Ενέργειας, σε αντιστάθμισμα των Συμβατικών Πηγών, όπως είναι το κάρβουνο και το πετρέλαιο, καθώς και της πυρηνικής ενέργειας, η οποία βεβαίως παρουσιάζει τα γνωστά προβλήματα.

Παράλληλα άρχισε μία προσπάθεια για την εξοικονόμηση και γενικότερα την καλύτερη και αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας. Οι παραπάνω παράγοντες συνέβαλαν αποφασιστικά αφενός μεν στην ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), αφετέρου δε στην ανάπτυξη συστημάτων Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ).

## 1.2 Πηγές Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται παγκοσμίως προέρχεται κυρίως από γαιάνθρακες, φυσικό αέριο, πυρηνική ενέργεια και μεγάλα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μόνο 2%. Η τάση πάντως της χρησιμοποίησης των ανανεώσιμων τεχνολογιών δίνει ενθαρρυντικά μηνύματα για το μέλλον.

### 1.2.1 Συμβατικές Πηγές Ενέργειας

Ονομάζονται επίσης μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αποκαλούνται έτσι γιατί δεν είναι δυνατό να ανανεώσουν σε εύλογο, για τον άνθρωπο, χρονικό διάστημα την αποθηκευμένη τους ενέργεια. Η διαδικασία σχηματισμού τους διήρκεσε εκατομμύρια χρόνια. Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν:

#### Ορυκτά καύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα (fossil fuels) είναι ένας γενικός ορισμός που αποδίδεται σε καύσιμα που σχηματίζονται στη γη από υπολείμματα φυτικών ή ζωικών οργανισμών. Τα κυριότερα ορυκτά καύσιμα είναι υδρογονάνθρακες με κυριότερους εκπροσώπους τους γαιάνθρακες, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

Όλες οι παγκόσμιες οικονομίες εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα ενεργειακά από τα ορυκτά καύσιμα. Εκτός από το μειονέκτημα της πεπερασμένης πρώτης ύλης τα ορυκτά καύσιμα ευθύνονται κατά πολύ για τη ρύπανση του πλανήτη και για διάφορα περιβαλλοντολογικά προβλήματα.



Εικόνα 1.1: Μονάδα διύλισης πετρελαίου

#### Πυρηνική ενέργεια

Άλλη πολύ σημαντική πηγή ενέργειας είναι η πυρηνική. Παρόλα αυτά και η πυρηνική ενέργεια σχετίζεται με ορυκτό καύσιμο μιας και το ουράνιο που χρησιμοποιείται είναι ορυκτό και μάλιστα δυσεύρετο. Η πυρηνική ενέργεια είναι μια ιδιαίτερα αμφιλεγόμενη μορφή ενέργειας γιατί παρά το αρκετά χαμηλό κόστος παραγωγής, σε περίπτωση ατυχήματος τα αποτελέσματα θα είναι δραματικά. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι ότι τα απόβλητα μιας τέτοιας παραγωγικής διαδικασίας είναι ιδιαίτερα ραδιενεργά με αποτέλεσμα

να απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις για την επ' αόριστων αποθήκευση των αποβλήτων. Τη μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρισμού από πυρηνική ενέργεια έχει η Γαλλία με 59 αντιδραστήρες και ποσοστό ενεργειακής κάλυψης 78%.



Εικόνα 1.2: Πυρηνικό εργοστάσιο

### 1.2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ονομάζονται αυτές που από τη φύση τους ανανεώνονται και είναι διαρκώς και ασταμάτητα διαθέσιμες σε άφθονη ποσότητα, δηλαδή είναι ανεξάντλητες. Θα διαρκέσουν όσο θα υπάρχει και ο πλανήτης σε μορφή που να μπορούσε να ζει άνθρωπος. Ο ήλιος για παράδειγμα δεν θα πάψει ποτέ (τουλάχιστον για αρκετά εκατομμύρια χρόνια) να λάμπει στον ουρανό και να μας προσφέρει τη φωτεινή και θερμική του ενέργεια. Ακόμη σε αυτή την κατηγορία συγκαταλέγονται η Αιολική ενέργεια, η Γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια Θαλασσιών Κυμάτων κ.α.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εκπέμπουν περιορισμένα ή καθόλου αέρια που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα που δίνουν οι ανανεώσιμες πηγές για τη δημιουργία κατανεμημένων δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για τις περισσότερες ΑΠΕ δεν υπάρχει κόστος πρώτης ύλης, ενώ και το κόστος συντήρησης είναι περιορισμένο. Στο σύνολο τους οι ΑΠΕ υπόσχονται να δώσουν σπουδαίες εναλλακτικές τεχνικές στο ενεργειακό πρόβλημα αλλά και να δώσουν λύσεις στα τεράστια περιβαλλοντολογικά προβλήματα του πλανήτη. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τα μειονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, προκειμένου να υπάρξει βαθύτερη κατανόηση σχετικά με αυτές.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών έως αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή), επιτυγχάνοντας πιο ορθολογική χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν πολλές θέσεις εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση υποβαθμισμένων, οικονομικά και κοινωνικά, περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στη συμβολή των ΑΠΕ (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με γεωθερμική ενέργεια).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό. [3]

Ορισμένα μειονεκτήματα των ΑΠΕ:

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.



Οι περισσότεροι γνωστές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι:

### Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Είναι μια ήπια μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον, πρακτικά ανεξάντλητη, γι' αυτό και είναι ανανεώσιμη. Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1 m/sec, σε ύψος 10 m πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα. Το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την πρώτη περίοδο ωριμότητας, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας.

Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό και η αιολική ενέργεια μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός ανάπτυξης της. Από το 1982, οπότε εγκαταστάθηκε από τη ΔΕΗ το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο, μέχρι και σήμερα έχουν εγκατασταθεί στην Άνδρο, στην Εύβοια, στη Λήμνο, Λέσβο, Χίο, Σάμο και στην Κρήτη εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο συνολικής ισχύος πάνω από 30 MW.



Εικόνα 1.3: Αιολικό Πάρκο

### Υδροηλεκτρική ενέργεια

Σε ποσοστό 16% της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως παράγεται από μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Η εκμετάλλευση υδάτινου δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτει μεγάλες ανάγκες ειδικά σε χώρες όπου υπάρχουν μεγάλα ποτάμια. Έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν περισσότερα χρόνια από ότι ένας

αντιδραστήρας καυσίμου. Υπάρχουν αρκετές χώρες που έχουν μεγάλη ενεργειακή εξάρτηση από τις υδροηλεκτρικές τους εγκαταστάσεις όπως ο Καναδάς και η Βραζιλία.



Εικόνα 1.4: Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο στον ποταμό Ντρίνα

### Γεωθερμική ενέργεια

Γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμφανίζεται με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού. Η ενέργεια αυτή σχετίζεται με την ηφαιστειότητα και τις ειδικότερες γεωλογικές και γεωτεκτονικές συνθήκες της κάθε περιοχής. Είναι μια ήπια και σχετικά ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή, που με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα μπορεί να καλύψει σημαντικές ενεργειακές ανάγκες.

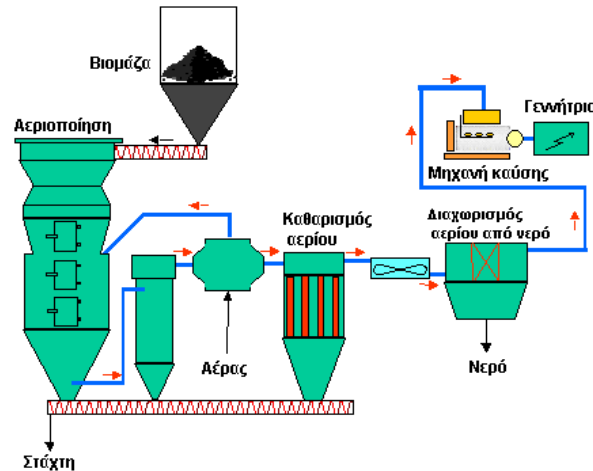


Εικόνα 1.5: Γεωθερμική Ενέργεια

### Βιομάζα

Η ενέργεια της βιομάζας είναι δευτερογενής ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια μετασχηματίζεται από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης. Οι βασικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται είναι το νερό και ο άνθρακας, που είναι άφθονα στη φύση. Βασικό πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ότι παρέχει ενέργεια αποθηκευμένη με χημική μορφή. Η αξιοποίηση της μπορεί να γίνει με μετατροπή της σε μεγάλη ποικιλία προϊόντων με διάφορες μεθόδους και τη χρήση σχετικά απλής τεχνολογίας. Σαν πλεονέκτημά της καταγράφεται και το ότι κατά την παραγωγή και τη

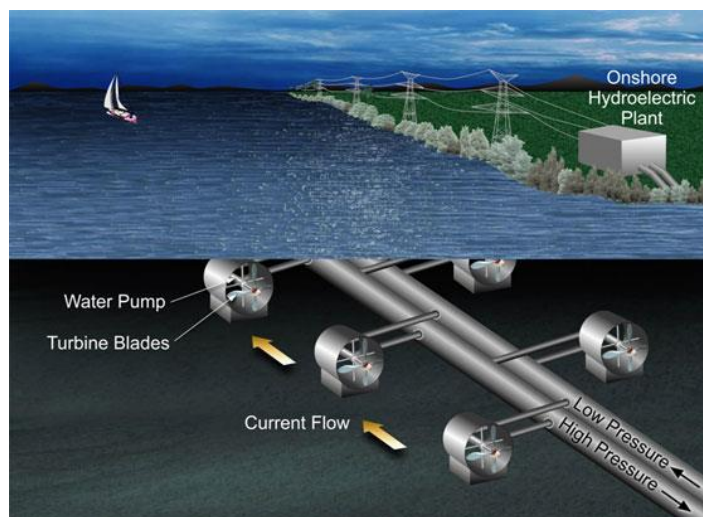
μετατροπή της δεν δημιουργούνται οικολογικά και περιβαλλοντολογικά προβλήματα. Από την άλλη, σαν μορφή ενέργειας η βιομάζα χαρακτηρίζεται από πολυμορφία, χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, λόγω χαμηλής πυκνότητας και/ή υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, εποχικότητα, μεγάλη διασπορά, κλπ. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνεπάγονται πρόσθετες, σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, δυσκολίες στη συλλογή, μεταφορά και αποθήκευσή της. Σαν συνέπεια το κόστος μετατροπής της σε πιο εύχρηστες μορφές ενέργειας παραμένει υψηλό.



Εικόνα 1.6: Διαδικασία παραγωγής ενέργειας από βιομάζα [4]

### Υδροδυναμική ενέργεια

Υδροδυναμική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παρέχεται στον άνθρωπο από τη δύναμη του νερού στη φύση. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος χρήσης της είναι μέσω των υδατοπτώσεων αλλά και των φραγμάτων. Μεγάλη προσπάθεια γίνεται τα τελευταία χρόνια για επενδύσεις σε συστήματα που θα εκμεταλλεύονται την ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας αλλά και των παλιρροιών. Η υδροδυναμική ενέργεια είναι μια καθαρή, ανεξάντλητη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που δεν μολύνει το περιβάλλον και παρέχεται από τη φύση με περίσσεια.



Εικόνα 1.7: Υδροδυναμική ενέργεια

### Ενέργεια θαλασσίων κυμάτων-παλιρροιών

Οι ωκεανοί, οι οποίοι καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη, αποτελούν μια τεράστια αποθήκη ενέργειας. Υπάρχουν τρεις τρόποι για να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια των ωκεανών από:

#### *Ενέργεια Κυμάτων*

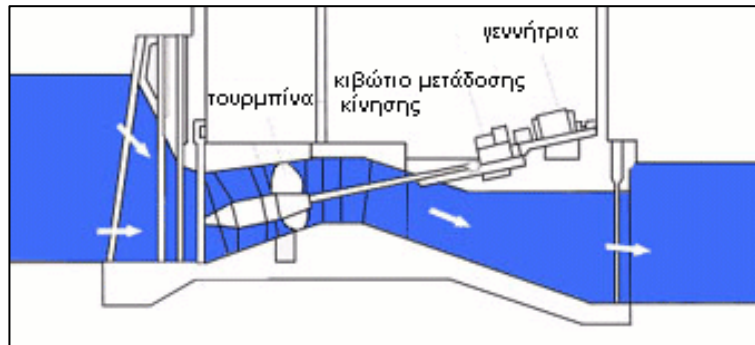
Τα κύματα περικλείουν τεράστια ποσά ενέργειας τα οποία προς το παρόν παραμένουν ανεκμετάλλευτα. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα για την πρακτική αξιοποίηση της ενέργειας αυτής είναι ο ακανόνιστος και τυχαίος χαρακτήρας τους. Στη Χαβάη πάντως (οι ακτές της οποίας χαρακτηρίζονται από ένα σχετικά σταθερό κυματισμό), λειτουργεί ήδη ο πρώτος σταθμός ισχύος 20 MW.



Εικόνα 1.8: Τρόπος εκμετάλλευσης ενέργειας κυμάτων

#### *Παλιρροϊκή ενέργεια*

Τα εισερχόμενα νερά της παλίρροιας στην ακτή κατά την πλημμυρίδα μπορούν να παγιδευτούν σε φράγματα, οπότε κατά την άμπωτη τα αποθηκευμένα νερά ελευθερώνονται και κινούν έναν υδροστρόβιλο κατά τον ίδιο τρόπο που συμβαίνει και στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Ο πρώτος παλιρροϊκός σταθμός κατασκευάστηκε στην πόλη La Rance της Γαλλίας με μέση ετήσια ισχύ 500 MW.



Εικόνα 1.9: Τρόπος εκμετάλλευσης παλιρροϊκής ενέργεια

### *Θερμική Ενέργεια Ωκεανών*

Η θερμοκρασία της θάλασσας μεταβάλλεται σε σχέση με το βάθος. Για παράδειγμα η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και βάθους ως 600 m μπορεί να φτάσει και τους 20 βαθμούς Κελσίου. Η διαφορά αυτή θερμοκρασίας μπορεί να αποτελέσει μια εκμεταλλεύσιμη μορφή ενέργειας.

### Ηλιακή ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.

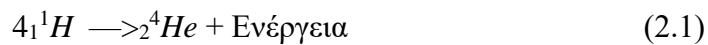
Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών: τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

## Κεφάλαιο 2

### Ηλιακή Ενέργεια

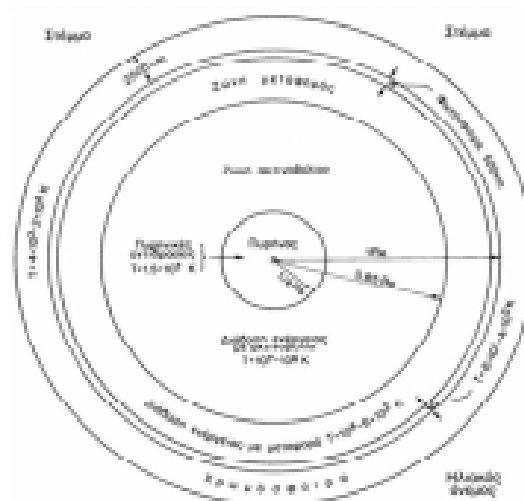
#### 2.1 Ο Ήλιος

Ο ήλιος αποτελείται από 80% υδρογόνο (H<sub>2</sub>), 19% ήλιο (He) και το υπόλοιπο 1% είναι μείγμα περισσότερων από 100 χημικών στοιχείων. Ο ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι με μάζα 2x10<sup>30</sup> kg, ακτίνα 700.000 km, ηλικία 5x10<sup>9</sup> χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι ~5.800 K, ενώ η εσωτερική περίπου 15.000.000 K. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κατά τις οποίες μετατρέπεται το υδρογόνο σε ήλιο. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η πυρηνική αντίδραση:



δικαιολογεί, με το έλλειμμα μάζας, την εκλυόμενη ενέργεια με βάση τη γνωστή σχέση  $E=\Delta m \times c^2$ , από την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein.

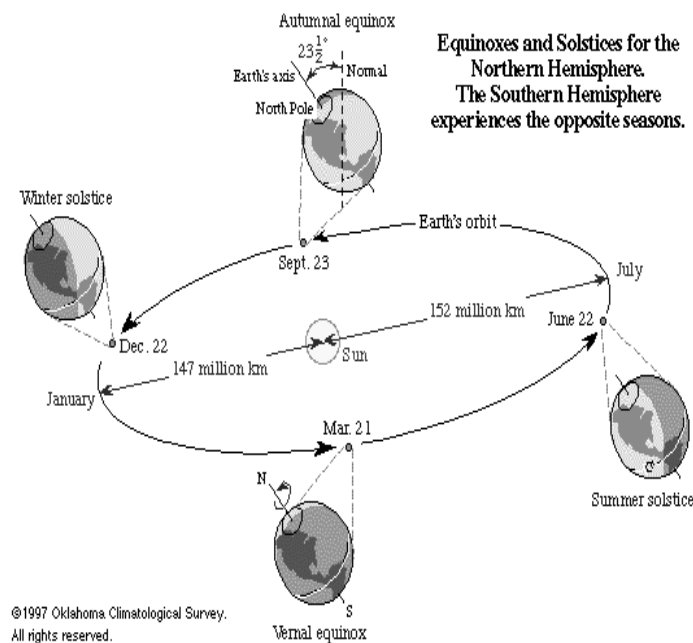
Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου, που μετατρέπεται σε He, εκλύεται ενέργεια ίση με  $U=1,67 \times 10^5$  kWh. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν κυρίως με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και με σωματιδιακή μορφή.



Σχήμα 2.1. Δομή του ήλιου.

### 2.1.1 Η Ακτινοβολία του Ήλιου

Η τροχιά της γης κατά την κίνηση της γύρω απ' τον ήλιο είναι έλλειψη, με τον ήλιο στη μία των εστιών της, με μήκος μεγάλου ημιάξονα,  $a=149,6 \times 10^6$  km και εκκεντρότητα,  $e=0,01673$ . Η απόσταση γης-ήλιου μεταβάλλεται περιοδικά, κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ της μέγιστης τιμής της (περί την 1η Ιουλίου), που ονομάζεται αφήλιο ( $\sim 152,1 \times 10^6$  km) και της ελαχίστης (περί την 1η Ιανουαρίου), που ονομάζεται περιήλιο ( $147,1 \times 10^6$  km).



Σχήμα 2.2. Τροχιά της γης γύρω από τον ήλιο.

Το μήκος του μεγάλου ημιάξονα,  $a$ , προσεγγιστικά  $150.000.000$  km, λαμβάνεται ως μονάδα μήκους σε διαστημικές αποστάσεις, ονομάζεται Αστρονομική Μονάδα και συμβολίζεται ως  $1$  AU (Astronomical Unit). Για να διανύσει την απόσταση αυτή το φως με την ταχύτητα των  $\sim 300.000$  km/s απαιτούνται  $\sim 8,5$  min. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία απομακρύνεται ακτινικά από τον αστέρα προς το διάστημα και άρα η ένταση  $J$  της ακτινοβολίας του μεταβάλλεται αντιστρόφως αναλόγως με το τετράγωνο της απόστασης:

$$J = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (2.2)$$

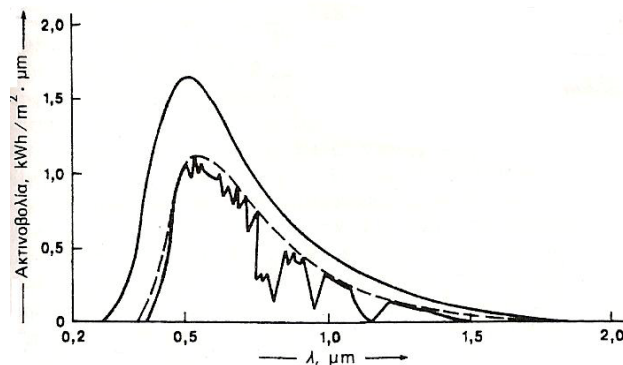
$P$  η ολική,  $\sigma'$  όλα τα μήκη κύματος, εκπεμπόμενη από απ' όλη την επιφάνειά του, ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και  $d$  η απόσταση από τον ήλιο στην οποία μετράται η ένταση.



### 2.1.2 Σύσταση Ηλιακού Φάσματος

Η διαμόρφωση του φάσματος του φωτός που εκπέμπει ο ήλιος προσομοιάζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5.800 K, όση είναι κατά μέσο όρο, η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ήλιου. Η προσέγγιση αυτή είναι επαρκής για τη μελέτη των θερμικών εφαρμογών της ηλιακής ακτινοβολίας, όχι όμως και για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της, αφού αυτή καθορίζεται από τη φωτονική σύσταση της ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει επειδή η δυνατότητα απορρόφησης των φωτονίων της ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό εξαρτάται ουσιαστικά από τη σύγκριση της τιμής της ενέργειάς τους με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού.

Η ανάγκη για λεπτομερή εξέταση της φασματικής σύστασης της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται φανερή παρατηρώντας τις διαφορές του πραγματικού φάσματος του ηλιακού φωτός σε σχέση με αυτό του μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5.800 K, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2.3. Το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην εκπομπή μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5.800 K ( εξωτερική συνεχής γραμμή), το φάσμα της ίδιας πηγής ύστερα από απορροφήσεις από το όζον και από σκεδάσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (ασυνεχής γραμμή) και το πραγματικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης σε συνθήκες μέτριας υγρασίας (εσωτερική συνεχής γραμμή) [5]

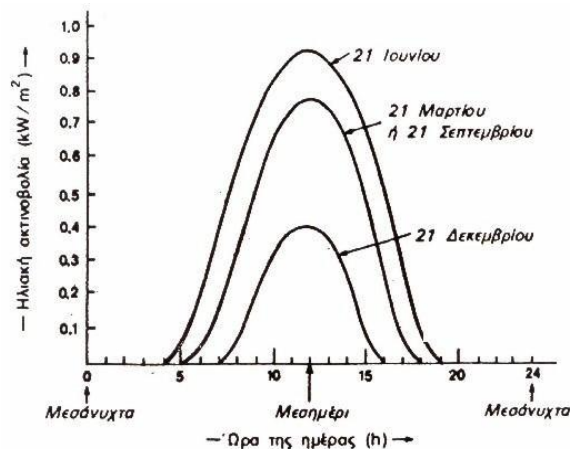
Ενδεικτική άλλωστε της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η εξάρτηση της έντασής της από το υψόμετρο της τοποθεσίας που δέχεται την ακτινοβολία. Έτσι έχει μετρηθεί ότι, ενώ στην επιφάνεια της θάλασσας η μέγιστη τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 900-1000 W/m<sup>2</sup>, η τιμή της αυξάνεται κατά περίπου 7 W/m<sup>2</sup> για κάθε 100 μέτρα ύψους της τοποθεσίας, επειδή μειώνεται αντίστοιχα το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας που διασχίζουν οι ηλιακές ακτίνες.



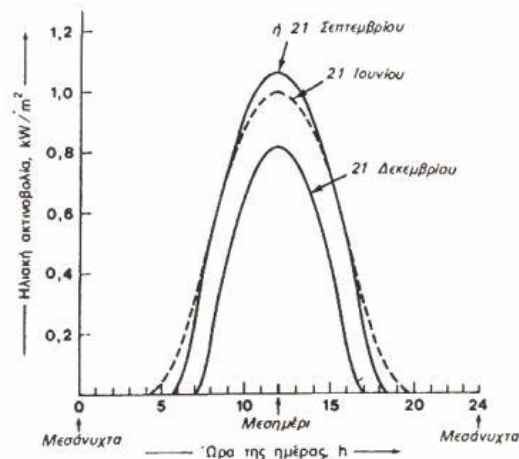
Το όζον, που είναι άφθονο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, απορροφά έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία και ειδικότερα στην περιοχή 0,2-0,35 μm, το μοριακό οξυγόνο απορροφά κυρίως στην περιοχή του ερυθρού (π.χ. 0,63 και 0,69 μm), το διοξείδιο του άνθρακα στο υπέρυθρο (2,7 και 4,3 μm) και οι υδρατμοί στο ερυθρό και στο υπέρυθρο. Επίσης, από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης συνήθως λιγότερο από το 60% είναι άμεση, σε μορφή δέσμης ακτινών, που μπορούν π.χ. να εστιαστούν με κάτοπτρα ή φακούς. Η υπόλοιπη είναι διάχυτη, διότι έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα σ' αυτήν.

### 2.1.3 Η Διακύμανση της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Στα Σχήματα 2.4 και 2.5 φαίνονται παραδείγματα της ομαλής μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας για 3 ενδεικτικές ημερομηνίες (καλοκαίρι, άνοιξη και φθινόπωρο, χειμώνα) σε συνθήκες ιδανικά καθαρού ουρανού. Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. π.χ. στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25 τον χειμώνα, και 13:25 το καλοκαίρι, όταν ισχύει η θερινή ώρα.



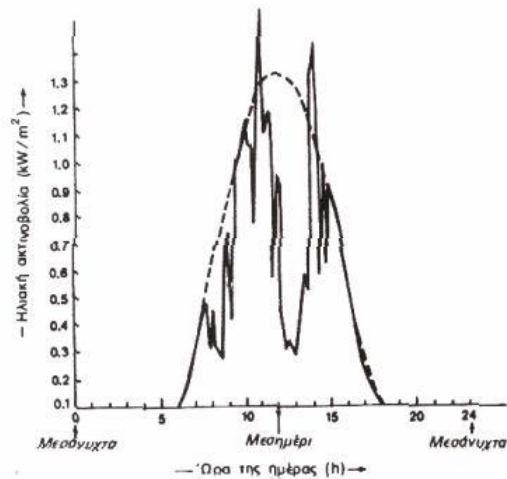
Σχήμα 2.4. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μία οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια τριών χαρακτηριστικών ημερών του έτους (οι ώρες είναι σε ηλιακές τιμές) [5]



Σχήμα 2.5. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας με τον ηλιακό συλλέκτη σε κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου [5]

Έχουμε ήδη τονίσει ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια γίνεται σημαντικά μεγαλύτερη όταν βρίσκεται σε κατάλληλη κλίση, ώστε η πρόσπτωση των ακτίνων να γίνεται κάθετα. Στην περίπτωση αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέγιστη ισχύς της ακτινοβολίας το ηλιακό μεσημέρι στις ευνοϊκότερες ημέρες του έτους δε διαφέρει παρά πολύ από τόπο σε τόπο και η τιμή  $1 \text{ kW/m}^2$  αποτελεί μια πολύ χονδρική, αλλά πάντως γενικά αποδεκτή προσέγγιση.

Στη διάρκεια του έτους, στο βόρειο ημισφαίριο, ο αριθμός των φωτεινών ωρών της ημέρας, η μέγιστη ισχύς καθώς και συνολική ημερήσια ενέργεια που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια, φτάνουν στις μέγιστες τιμές τους στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) και πέφτουν στις αντίστοιχες ελάχιστες τιμές τους στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Στις επιφάνειες, όμως π.χ. που βρίσκονται σε κλίση ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, η μέγιστη τιμή της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι στα ηλιακά μεσημέρια των ισημεριών (21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου), διότι τότε δέχονται κάθετα τις ακτίνες του ήλιου.



Σχήμα 2.6. Διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια των ωρών μιας ημέρας με μερική νέφωση. Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη διακύμανση για καθαρό ουρανό [5]

Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης γίνεται ανώμαλη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Οι παρατηρούμενες απότομες πτώσεις της έντασης οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος. Επίσης, το γρήγορο πέρασμα ενός σμήνους πουλιών ή ενός αεροπλάνου μέσα από τη δέσμη του ηλιακού φωτός που δέχεται ο συλλέκτης καταγράφεται σε μία πολύ οξεία στιγμιαία πτώση της έντασης της ακτινοβολίας. Παρατηρούμε, ακόμη, εξάρσεις που ξεπερνούν τις κανονικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Προφανώς στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα θα συμβαίνει αθροιστική επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας από τον ήλιο, μέσα από ένα άνοιγμα των νεφών, και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.

## 2.2 Προσδιορισμός τοποθεσίας στη γη

Κάθε τοποθεσία πάνω στη Γη προσδιορίζεται μονοσήμαντα από δύο σφαιρικές συντεταγμένες: το γεωγραφικό μήκος και το γεωγραφικό πλάτος. Οι γωνίες μετρούνται από το κέντρο της Γης. Το επίπεδο αναφοράς είναι το επίπεδο του Ισημερινού, το οποίο τέμνει κάθετα τον πολικό άξονα της Γης, και συναντά την επιφάνεια της Γης κατά μήκος του Ισημερινού. Το γεωγραφικό πλάτος ορίζεται από τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του Ισημερινού και τη νοητή γραμμή που ενώνει το κέντρο της Γης με την τοποθεσία που πρόκειται να προσδιοριστεί πάνω στην επιφάνεια της Γης. Οι κύκλοι που τέμνουν την επιφάνεια της Γης παράλληλα με τον Ισημερινό καθορίζουν τις θέσεις πάνω στην επιφάνεια της Γης με κοινό γεωγραφικό πλάτος. Εξ ορισμού το γεωγραφικό πλάτος λαμβάνεται θετικό στο Βόρειο ημισφαίριο και αρνητικό στο Νότιο.

Για τον προσδιορισμό του γεωγραφικού μήκους απαιτείται ένα επίπεδο αναφοράς το οποίο θα τέμνει κάθετα το επίπεδο του Ισημερινού και θα περιλαμβάνει τον πολικό άξονα της Γης. Αυτό το επίπεδο δημιουργεί δύο ημικύκλια από τον έναν πόλο έως τον άλλο, που ονομάζονται μεσημβρινοί. Στο γεωγραφικό μήκος μηδέν βρίσκεται εξ ορισμού ο μεσημβρινός που διέρχεται από το Greenwich στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το γεωγραφικό μήκος οποιασδήποτε τοποθεσίας καθορίζεται από τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο μεσημβρινό αναφοράς και το μεσημβρινό ο οποίος περνάει από την τοποθεσία της θέσης που πρόκειται να προσδιοριστεί. Εξ ορισμού το γεωγραφικό μήκος λαμβάνεται θετικό για τα γεωγραφικά μήκη που βρίσκονται δυτικά του Greenwich.

### 2.3 Ηλιακές Γωνίες

Ως ηλιακές γωνίες ορίζουμε κάποιες γωνίες που αφορούν την θέση του ήλιου σε σχέση με ένα σημείο πάνω στην γη και μας βοηθάνε να προσδιορίσουμε την θέση του σημείου στην επιφάνεια της γης. Ωριαία γωνία  $h$  είναι η γωνία που μετράται στο επίπεδο του ισημερινού μεταξύ της προβολής της ακτίνας  $OP$ , που ενώνει το σημείο πάνω στην επιφάνεια της γης το οποίο μελετάμε με το κέντρο της, και της προβολής της νοητής ευθείας που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ηλίου. Εκφράζει την ώρα της ημέρας σε σχέση με το ηλιακό μεσημέρι. Γωνία απόκλισης του ηλίου  $\delta$ , είναι η γωνιακή απόσταση των ακτινών του ηλίου βόρεια ή νότια του ισημερινού. Η απόκλιση είναι θετική όταν οι ακτίνες είναι βόρεια του ισημερινού και αρνητική όταν οι ακτίνες είναι νότια του ισημερινού. Κατά την διάρκεια του θερινού ηλιοστασίου οι ακτίνες του ηλίου είναι  $23,5^\circ$  βόρεια του ισημερινού της γης και κατά τις ισημερίες η απόκλιση είναι μηδέν. Η γωνία απόκλισης  $\delta$  υπολογίζεται από τον τύπο

$$\delta = 23,45^\circ * \sin[360/365 * (284 + n)]$$

Όπου ο όρος 284 αποδίδει τον αριθμό των ημερών που απαιτούνται να παρέλθουν μετά την εαρινή ισημερία ώστε η θέση του Ήλιου να αντιστοιχεί στην έναρξη του ημερολογιακού έτους. Μία εναλλακτική σχέση είναι η:

$$\delta = 23,450 * \sin[360/365 * (n - 81)]$$

Επιπλέον, υπάρχουν και 2 γωνίες οι οποίες μας βοηθούν να προσδιορίσουμε την θέση του Ηλίου. Αυτές είναι το ύψος και το αζιμούθιο. Ύψος  $\beta$  είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ μιας γωνίας και της οριζόντιας προβολής της και υπολογίζεται από την σχέση

$$\sin\beta = \sin\delta \cdot \sin L + \cos\delta \cdot \cos L \cdot \cos h$$

όπου  $L$  το γεωγραφικό πλάτος. Αντί για το ύψος συχνά χρησιμοποιείται η συμπληρωματική της γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, η οποία ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση ή ζενιθιακή γωνία του ηλίου.

Αζιμούθιο  $Z$  είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της οριζόντιας προβολής της ακτίνας και της διεύθυνσης που λαμβάνεται ως αφετηρία. Μετράται στο οριζόντιο επίπεδο δεξιόστροφα, με αφετηρία τον Βορρά ή τον Νότο.

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

Ο τύπος προσδιορισμού του αζιμούθιου ισχύει ως έχει μόνο όταν  $h \leq 0$ . Στην αντίθετη περίπτωση ( $h > 0$ ) ο τύπος παρέχει το  $-\cos Z$ . Διευκρινίζεται επίσης πως όλες οι γωνίες είναι σε μοίρες.

## 2.4 Ηλιακή Σταθερά

Ως ηλιακή σταθερά ορίζεται η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, σε απόσταση μιας αστρολογικής μονάδας στο όριο της ατμόσφαιρας.

$$I_{sc}' = 1367 \text{ W/m}^2 .$$

Λόγω της μεταβολής της απόστασης ήλιου-γης κατά την διάρκεια του έτους χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό της διαχρονικής μεταβολής της ηλιακής σταθεράς

$$I_{sc} = I_{sc}' * (1 + 0.033 * \cos \left( \frac{360 * dn}{365} \right) )$$

## 2.5 Ο Ηλιακός Συλλέκτης και ο Προσανατολισμός του

Ηλιακός συλλέκτης είναι μια συγκεκριμένη επιφάνεια (με συγκεκριμένες διαστάσεις) που σκοπός της είναι να «μαζεύει» την ηλιακή ακτινοβολία και ανάλογα με την περίπτωση (τεχνολογία που χρησιμοποιείτε) να τη μετατρέψει στην ανάλογη μορφή ενέργειας, ηλεκτρική ενέργεια όταν πρόκειται για φωτοβολταϊκά, θερμική ενέργεια όταν πρόκειται για επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες υγρού μέσου κλπ. Εκείνο που μας ενδιαφέρει είναι με ποιο τρόπο θα τοποθετήσουμε το συλλέκτη μας έτσι ώστε να 'μαζεύει' όσο το δυνατό καλύτερα την ηλιακή ακτινοβολία.

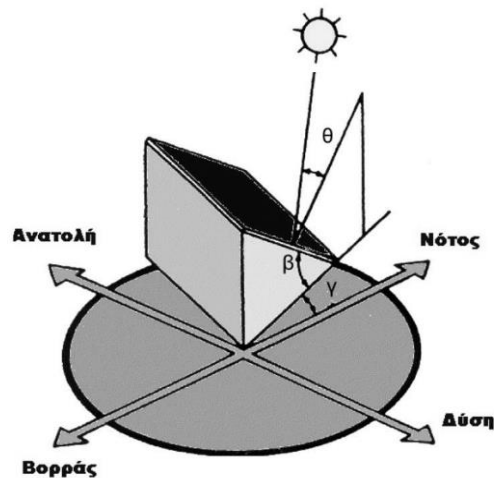


Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επίπεδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες: την κλίση και την αζιμούθια γωνία.

- Η κλίση του συλλέκτη ( $\beta$ ): είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από  $0^\circ$  μέχρι  $180^\circ$ . Για γωνίες  $\beta > 90^\circ$  το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.
- Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη ( $\gamma$ ): είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στον οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον

τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από  $-180^\circ$  μέχρι  $+180^\circ$ . Η γωνία  $-180^\circ$  (που συμπίπτει με την  $+180^\circ$ ) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία  $-90^\circ$  προς την ανατολή, η γωνία  $0^\circ$  προς το νότο και η γωνία  $+90^\circ$  προς τη δύση.

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε ένα επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς τη κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta$ ) είναι  $0^\circ$ . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκύτταρων), ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές. Έτσι, η χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε περιπτώσεις εφαρμογών, όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα.



Σχήμα 2.7: Η κλίση ( $\beta$ ) και η αζιμουθια γωνία ( $\gamma$ ) που χαρακτηρίζουν τον προσανατολισμό ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης [5]

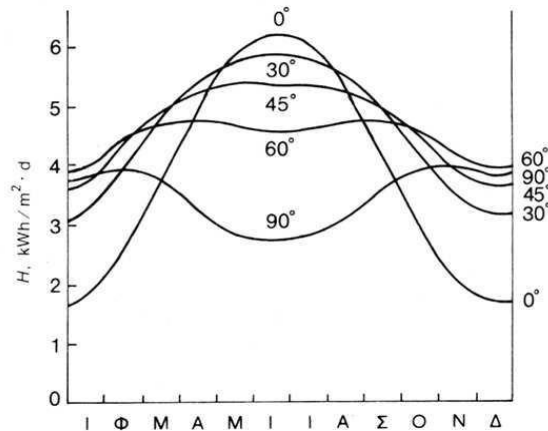
### 2.5.1 Η βέλτιστη Κλίση του Συλλέκτη

Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμουθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη κατά τη διάρκεια του έτους. Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας συνδέεται με τις άλλες γωνίες της ηλιακής γεωμετρίας, που αναφέρθηκαν παραπάνω, με τη σχέση:

$$\cos\theta = \sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega$$

Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και συνήθως τοποθετούνται υπό σταθερή κλίση και προσανατολισμό κατά τη διάρκεια του έτους. Η επιλογή του ευνοϊκού προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη είναι το σημαντικότερο μέτρο για τη βελτίωση του ηλιακού κέρδους. Η θέση του συλλέκτη (προσανατολισμός και κλίση) επηρεάζει την απόδοσή του κατά δύο τρόπους. Πρώτα

επηρεάζει σημαντικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη. Ακόμα η θέση του συλλέκτη επηρεάζει τον συντελεστή διάβασης των διαφανών καλυμμάτων και τον συντελεστή απορρόφησης του απορροφητήρα, αφού οι δύο συντελεστές είναι συναρτήσεις της γωνίας, που η ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη.



Σχήμα 2.8. Παράδειγμα της εξάρτησης της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας  $H$  που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια κατά τη διάρκεια των διαφόρων μηνών του έτους, σε συνάρτηση με την κλίση της. Το παράδειγμα είναι για τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $45^\circ$  και αφορά σε κλίσεις του ηλιακού συλλέκτη ( $\beta$ ) ίσες με  $0^\circ$  (οριζόντιο επίπεδο),  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  και  $90^\circ$  (κατακόρυφο επίπεδο) [5]

Γενικά η μεγαλύτερη ποσότητα της ηλιακής ενέργειας, λαμβάνεται σε μία Νότια προσανατολισμένη κλίση. Εάν η επιφάνεια του συλλέκτη δεν αντικρίζει ακριβώς το νότο, το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας, μειώνεται ελαφρά σε μία γωνία  $30^\circ$  ανατολικά, δυτικά ή νότια. Η κλίση για συστήματα που λειτουργούν όλο το χρόνο είναι  $45^\circ$ , ενώ αντίθετα για συστήματα που λειτουργούν καλοκαιρινούς μήνες π.χ. ξενοδοχεία η κλίση λαμβάνεται μικρότερη περίπου  $25^\circ$ . Έτσι είναι δυνατόν να αξιολογηθεί ορθά η εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων (π.χ. ηλιακοί συλλέκτες) ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοσή τους.

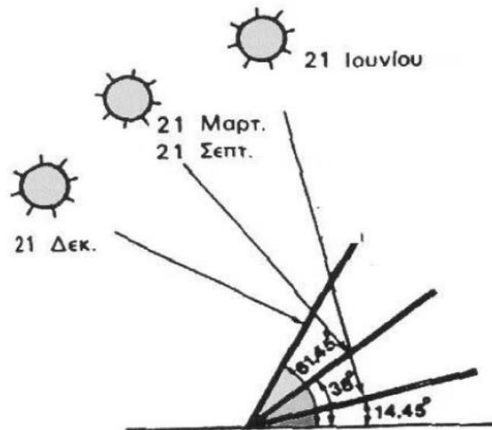
Συνοψίζοντας:

- Η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\varphi$ ).
- Κατά την διάρκεια της θερινής περιόδου: Η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) πρέπει να είναι περίπου  $10^\circ$ - $15^\circ$  μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\varphi$ ).
- Κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου: Η βέλτιστη γωνία κλίσης ( $\beta$ ) πρέπει να είναι περίπου  $10^\circ$ - $15^\circ$  μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ( $\varphi$ ). Αν στο έδαφος

υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση.

- Ο βέλτιστος προσανατολισμός (αζιμούθιο  $\gamma$ ) είναι νότιος ( $\gamma=0^\circ$ ), ενώ απόκλιση κατά  $20^\circ$ - $30^\circ$  από νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια.

Τα ύψη του ήλιου αφορούν τα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια.



Σχήμα 2.9. Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και στην εαρινή (21 Μαρτίου) και τη φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $38^\circ$ , όπως η Αθήνα.

Τα ύψη του ήλιου που απεικονίζονται αφορούν στα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια [5]

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες, από ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Έτσι, όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό.

Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10 - 15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Έτσι, ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα τη διάχυτη ακτινοβολία.

Η ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα της ανάκλασης εκφράζεται από ένα συντελεστή που κυμαίνεται από 0 για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, μέχρι 1 για πλήρη ανάκλαση.



Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, Θάλασσα	0.05
Ασφαλτόστρωμα	0.07
Αγρός με σκοτεινόχρωμα χώμα	0.08
Πράσινος αγρός	0.15
Βραχώδη επιφάνεια	0.20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0.24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου	0.30
Χιόνι	0.60

Πίνακας 2.1. Παραδείγματα τιμών του συντελεστή ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στη συνέχεια ακολουθεί ένας πίνακας με το γεωγραφικό πλάτος (κατά προσέγγιση) διάφορων ελληνικών πόλεων καθώς και οι ζώνες που έχει χωριστεί ο ελλαδικός χώρος ύστερα από μελέτες που έχουν κάνει επιστήμονες με βάση κυρίως τις κλιματολογικές συνθήκες (θερμοκρασία στη διάρκεια της μέρας ή του εικοσιτετραώρου, την υγρασία, την ηλιοφάνεια, τους ανέμους που επικρατούν κλπ).

Πόλη ή περιοχή	Γεωγραφικό πλάτος
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεστιάδα, Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κιλκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα	41 30'
Εσάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41o
Καστοριά, Πτολεμαίδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40 30'
Κόνιτσα, Γρεβενά, Διτόχωρο, Κασσάνδρα, Δήμος	40o
Κέρκυρα, Ήγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος	39 30'
Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Εκόρος, Μυτιλήνη	39
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Αμφιλοχία, Λιβαδειά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	38 30'
Ζάκυνθος, Αιγάλιόδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	38o
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Άργος, Ναύπλιο, Πόρος, Σύρος, Πάτιμος	37 30'
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36 30'
Κύθηρα, Καστελόριζο	36o
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσσοι, Κάρπαθος	35 30'
Χώρα Σφακιών, Ιεράπετρα, Αγ.Νικόλαος Κρήτης, Κύπρος	35

Πίνακας 2.2. Γεωγραφικό πλάτος (προσεγγιστικά) διάφορων ελληνικών πόλεων/περιοχών.



Σχήμα 2.10. Ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας.

## Κεφάλαιο 3

### Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία

#### 3.1 Εισαγωγή

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών και η καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία εκδηλώνουν μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση ακτινοβολίας που δέχονται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει τάση μέχρι 0,5- 1,0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA ανά  $\text{cm}^2$  της επιφανείας του. Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων καθορίζεται με κυριότερο κριτήριο όπως θα δούμε και στη συνέχεια, την τιμή του ενεργειακού διακένου του η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου. Ως συντελεστής απόδοσης ή απλούστερα ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου 25% και μπορούν να πραγματοποιηθούν με φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5 eV.

#### 3.2 Ημιαγωγοί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς που είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραεδρική κρυσταλλική δομή όπως το πυρίτιο (Si). Στα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δε διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Όταν όμως απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή.

Τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου P, θα ενωθούν με ηλεκτρόνια σθένους των γειτονικών ατόμων Si και θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς (Σχήμα 3.2). Το πέμπτο ηλεκτρόνιο (φορέας πλειονότητας) θα συγκρατείται πολύ χαλαρά από το θετικό πυρηνικό φορτίο του P και με λίγη ενέργεια μπορεί να αποσπασθεί και να κινηθεί σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο, αφήνοντας ένα ανιόν (P<sup>+</sup>) που μένει ακίνητο στο πλέγμα. Δηλαδή το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται στο πλέγμα σαν δότης ηλεκτρονίων (τύπος-η ημιαγωγός). Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενών ατόμων B σε πλεγματικές θέσεις του Si, δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων στους δεσμούς (Σχήμα 3.2). Με την απορρόφηση ενός μικρού ποσού ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να καλύψει την κενή θέση, αφήνοντας παράλληλα στην προηγούμενη θέση του μια οπή και μετατρέποντας το άτομο B σε κατιόν (B<sup>-</sup>). Δηλαδή, το τρισθενές άτομο

συμπεριφέρεται σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων (φορείς μειονότητας) ή δότης οπών (τύπος- p ημιαγωγός).

### **3.3 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο**

Είναι γνωστό ότι τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται 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, μία 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 πεδίου.

Τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός όψη του, τύπου n στο παράδειγμα του σχήματος, παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, e-) ή προς τα πίσω (οι οπές, h+), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από δίοδους άλλων π.χ. από δίοδους Σότκν που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

Συμπερασματικά, η συνεργασία των δύο προαναφερθέντων παραγόντων, του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου των δύο σε επαφή φωτοαγωγίμων υλικών και του φωτός, παράγει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο:

$$\text{Επαφή υλικών} + \text{φως} = \text{Φωτοβολταϊκό φαινόμενο}$$

### **3.4 Υλικά και Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών Στοιχείων**

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

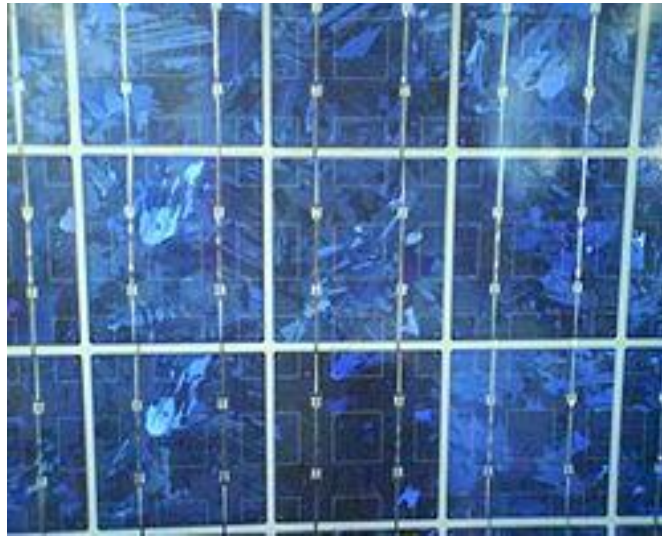
- Τεχνολογία παραγωγής ημιαγώγιμων υλικών με κρυσταλλική δομή, την πλειοψηφία των οποίων αποτελεί το πυρίτιο.
- Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film), η οποία ονομάζεται έτσι επειδή το πάχος των στοιχείων είναι πολύ μικρό (μερικά μόνο μm).
- Άλλες τεχνολογίες που σκοπό έχουν να γίνει λιγότερο ενεργοβόρα η παραγωγή του καθαρού πυριτίου, περιορίζοντας τις απώλειες σε ακριβό καθαρό πυρίτιο (π.χ. μέθοδος EFG, edge defined film fed growth και μέθοδος String Process). Οι κρύσταλλοι και η μορφή λεπτού φιλμ διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά την απόδοση απορρόφησης του φωτός, την απόδοση μετατροπής της μια μορφής ενέργειας στην άλλη, την τεχνολογία κατασκευής και το κόστος κατασκευής

#### **3.4.1 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Πυριτίου**

Το υλικό, που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία των Φ/Β κυψελίδων, είναι το πυρίτιο (Si). Στην άμμο, το πυρίτιο περιέχεται με τη μορφή του οξειδίου του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>). Το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα (99,99999%). Τα Φ/Β στοιχεία Πυριτίου διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής. Οι διαφορετικοί τύποι είναι οι εξής:

- Φ/Β στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου (Single-crystal Silicon)

Το βασικό υλικό είναι μονο-κρυσταλλικό. Το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (Wafer ~ 300μm). Η απόδοσή τους, με τη μορφή κυψελίδας, κυμαίνεται από ~ 21% έως ~24%, ενώ με τη μορφή των Φ/Β πλαισίων μεταξύ 13 έως 16%. Χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής. Χρώμα: Σκούρο μπλε.



Εικόνα 3.1 : Φ/Β στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου (Single-crystal Silicon)

- Φ/Β στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multicrystalline Silicon mc-Si)

Δυνατότητα κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Συνήθως κόβονται σε τετραγωνικής μορφής στοιχεία. Αποτελούνται από λεπτά επιστρώματα πάχους 10 έως 50  $\mu\text{m}$ . Στην επιφάνεια της κυψελίδας διακρίνονται σε διαφορετικές μονοκρυσταλλικές περιοχές. Τα όριά τους αποτελούν θέσεις παγίδευσης των φορέων. Άρα, όσο μικρότερο το συνολικό μήκος των οριακών περιοχών μέσα στο δεδομένης διάστασης Φ/Β στοιχείο, τόσο καλύτερη η ηλεκτρική αγωγιμότητά τους. Γενικά, όσο μεγαλύτερες οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού Φ/Β στοιχείου, τόσο υψηλότερη η απόδοση του, η οποία κυμαίνεται από 17% έως ~20%, σε εργαστηριακή μορφή κυψελίδας και από 10% έως και 14% σε βιομηχανική μορφή Φ/Β πλαισίου. Χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα.. Το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το χρώμα τους είναι γαλάζιο.



Εικόνα 3.2 : Φ/Β στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multicrystalline Silicon mc-Si)

- Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon)

Τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων (films), θεωρητικά πολύ χαμηλού κόστους παραγωγής εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού. Το λεπτό επίστρωμα σχηματίζεται πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους. Η απόδοση των Φ/Β στοιχείων αυτών μειώνεται έντονα, στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα του 6% έως 8%. Σήμερα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων Φ/Β στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος.

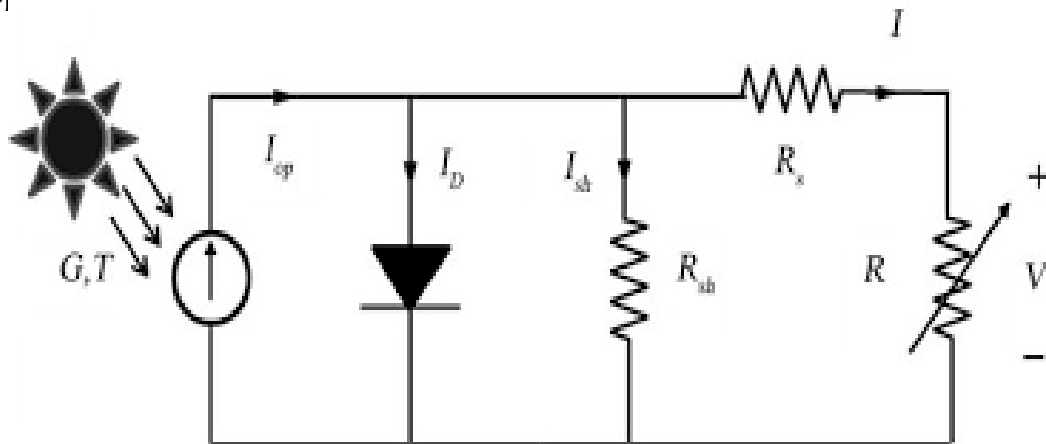


Εικόνα 3.3 : Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon)

### 3.5 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

#### 3.5.1 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου και Χαρακτηριστική Εξίσωση

Για να γίνει μια εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία διάοδο και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο διάγραμμα του σχήματος 3.7 παρακάτω. Στο ισοδύναμο αυτό δε συμπεριλαμβάνεται η αντίσταση λόγω της κίνησης των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια, όπως ακόμα και η μη άπειρη αντίσταση διαμέσου της διόδου και τα αναπόφευκτα ρεύματα διαρροής.



Εικόνα 3.4 : Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Η βασική εξίσωση του ιδανικού ηλιακού κυττάρου είναι η εξής:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) I_L$$

όπου  $I$  = το ρεύμα του κυττάρου.

$V$  = η τάση του κυττάρου.

$I_L$  = το φωτόρευμα.

$I_0$  = το ρεύμα κόρου της διόδου που δίνεται από τη σχέση

$$I_0 = A \left( \frac{qD_e N_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h N_i^2}{L_h N_D} \right)$$



Όπου

$A$  = διατομή του κυττάρου.

$n_i = n = p$  = ενδογενής συγκέντρωση ηλεκτρονίων (οπών) σε καθαρό κρύσταλλο πυριτίου.  
 $L_e$  = μήκος διάχυσης ηλεκτρονίων

$\tau_e$  = διάρκεια ζωής ηλεκτρονίων σαν φορέων μειονότητας = ο χρόνος μεταξύ της δημιουργίας ενός φορέα σε υλικό που αποτελεί φορέα μειονότητας και της επανασύνδεσης του με φορέα πλειονότητας.

$L_h$  = μήκος διάχυσης οπών

Ωστόσο στην πράξη κανένα ηλιακό κύτταρο δεν είναι ιδανικό γι' αυτό τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει, αφενός την αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, που είναι παράλληλα συνδεδεμένη στα άκρα της διόδου, αφετέρου την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.

Η χαρακτηριστική εξίσωση για το παραπάνω ηλιακό κύτταρο είναι η εξής:

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}}$$

όπου  $I$  = το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου.

$I_L$  = φωτόρευμα.

$I_0$  = ρεύμα κόρου διόδου.

$q$  = φορτίο ηλεκτρονίου.

$V$  = τάση στην έξοδο του κυττάρου.

$R$  = σε σειρά αντίσταση του κυττάρου. Παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά τη ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό (συνήθως τύπου-n) που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως και αποτελείται από πολύ λεπτό στρώμα, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού-ωμικής επαφής και την ωμική επαφή. Τυπικές τιμές της  $R_s$ , για καλής ποιότητας Φ/Β στοιχεία: 0,1 Ω έως 0,3 Ω.

$V + IR_s = V_D$  = τάση της διόδου επαφής μέσα στο κύτταρο.

$A$  = σταθερά με τιμές 1 και 2. Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής.

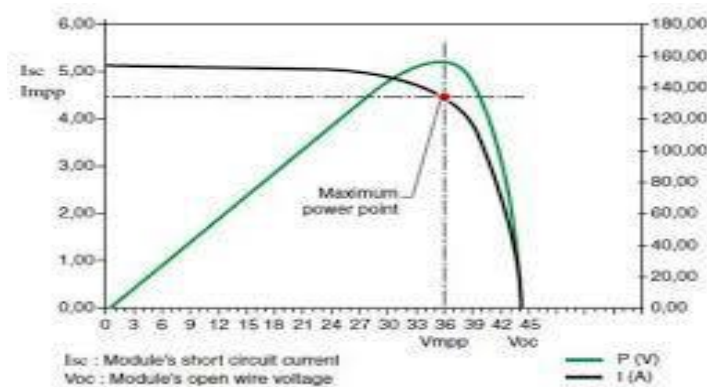
$K$  = Σταθερά Boltzmann.

$T$  = απόλυτη θερμοκρασία.

$R_{sh}$  = παράλληλη αντίσταση του κυττάρου. Σχετίζεται με τη διαρροή του ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Η τιμή της  $R_{sh}$  σε πολύ καλής απόδοσης Φ/Β στοιχεία είναι μεγαλύτερη των 103 Ω.

### 3.5.2 I – V Χαρακτηριστική Φωτοβολταϊκού στοιχείου

Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το Φ/Β στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Η γραφική παράσταση μεταξύ ρεύματος στην έξοδο ( I ) και τάσεως στην έξοδο ( V ) ενός ηλιακού κυττάρου καλείται I – V χαρακτηριστική και έχει επικρατήσει να παριστάνεται στο πρώτο τεταρτημόριο.



Εικόνα 3.5 : I – V Χαρακτηριστική Φωτοβολταϊκού στοιχείου

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας (και θερμοκρασίας) και για μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (βραχυκυκλωμένη κατάσταση με μέγιστη τιμή ρεύματος,  $I_{sc}$  και μηδενική τάση) και άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης,  $V_{oc}$  ). Συνεπώς οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν την καμπύλη είναι: Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  είναι το ρεύμα για  $V = 0$  και αν θεωρήσουμε την  $R_s$  πολύ μικρή είναι ίσο με το φωτόρευμα  $I_L$ .

### 3.5.3 Η τάση ανοικτού κυκλώματος $V_{oc}$

Είναι η τάση για  $I = 0$  και αν θεωρήσουμε τη  $R_{sh}$  πολύ μεγάλη τότε από την εξίσωση (3.4) προκύπτει:

$$V_{oc} = \frac{AKT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right)$$

Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  καθορίζεται, αφενός από τα χαρακτηριστικά της επαφής p-n, όπως το βασικό υλικό, τη συγκέντρωση των προσμείξεων και τη θερμοκρασία και αφετέρου από την ένταση της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

#### 3.5.4 Σημείο μέγιστης ισχύος $P_m$

Στο σημείο αυτό αντιστοιχεί ρεύμα  $I_m$  και τάση  $V_m$  και βρίσκεται στο σημείο από το οποίο μπορούμε να κατασκευάσουμε το ορθογώνιο με την μεγαλύτερη επιφάνεια μέσα στη  $I - V$  καμπύλη. Μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και το σημείο  $P_m$  παριστάνει τη βέλτιστη αντίσταση φορτίου  $R_{Lopt}$ , που έχει κλίση  $1/R_{Lopt} = I_m / V_m$ . Επίσης, η  $I - V$  χαρακτηριστική είναι εφαπτόμενη σε κάποια καμπύλη σταθερής ισχύος στο σημείο μέγιστης ισχύος, όπου  $dP / dV = 0$  και επειδή το σημείο επαφής δε μπορεί να καθορισθεί επακριβώς για καμπύλες που κατασκευάζονται με βάση πειραματικά δεδομένα είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μια  $P - V$  καμπύλη και να εντοπιστεί το μέγιστο αυτής.

#### 3.5.5 Ο συντελεστής πλήρωσης $ff$ (Fill Factor)

Ο συντελεστής ποιότητας (παράγοντας πληρότητας ή πλήρωσης)  $ff$  (fill factor) είναι ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_m = V_m * I_m$  ενός  $\Phi/B$  στοιχείου ή  $\Phi/B$  πλαισίου γενικότερα, προς το γινόμενο της τάσεως ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  επί το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , αντίστοιχα, για τη δεδομένη πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και είναι ένα μέτρο του πόσο “τετράγωνη” είναι η  $I - V$  καμπύλη.

$$ff = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

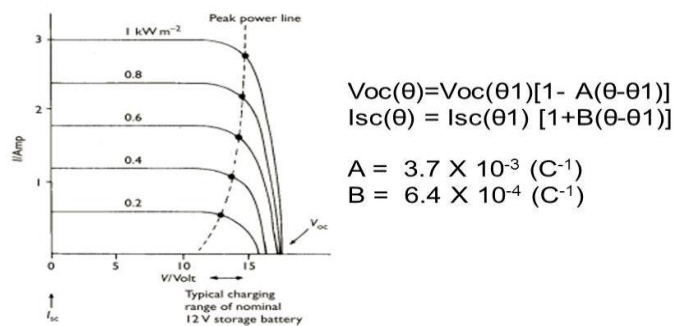
Είναι ουσιαστικά συνάρτηση μόνο της τάσεως ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  επειδή εξαρτάται κυρίως απ' αυτήν. Αν ορίσουμε μια κανονικοποιημένη τάση

( $U_{oc} = V_{oc}/(AKT/q)$ ) η ιδανική (μέγιστη) τιμή του δίνεται από τον εμπειρικό τύπο:

$$ff_o = \frac{U_{oc} - \ln(U_{oc} + 0,72)}{U_{oc} + 1} \quad \text{για } U_{oc} > 10$$

Οι τιμές του, που καθορίζονται από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες, είναι μεταξύ 0 και 1 και πιο συγκεκριμένα τυπικές τιμές του είναι μεταξύ 0,7 και 0,85. Η τιμή αναφοράς του δίδεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του  $ff$ , τόσο περισσότερο η λειτουργία του  $\Phi/B$  στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος στην περιοχή τάσεων 0- $V_{oc}$ . Σ' αυτές τις περιπτώσεις η διάταξη χαρακτηρίζεται αφενός από μικρή ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά, αφετέρου από μεγάλη τιμή παράλληλης αντίστασης. Τυπικές τιμές 0,7 με 0,9 χαρακτηρίζουν  $\Phi/B$  στοιχεία με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση αντίστοιχα. Έχοντας δει τη μεταβολή της τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  και του

ρεύματος βραχυκυκλώσεως  $I_{sc}$  συναρτήσει της ακτινοβολίας, μπορούμε να δούμε πως μεταβάλλεται και η  $I - V$  χαρακτηριστική του κυττάρου όταν μεταβάλλεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του καθώς και ποιες μεταβολές στις παραμέτρους της  $I - V$  χαρακτηριστικής θα προκληθούν με μεταβολή της θερμοκρασίας. Μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας Όταν μεταβάλλεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του κυττάρου και τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας), μεταβάλλεται και η  $I - V$  χαρακτηριστική του κυττάρου και μάλιστα η απόκριση είναι πολύ γρήγορη (σταθερά χρόνου της τάξεως των msec). Για τους περισσότερους τύπους ηλιακών κυττάρων που έχουν σχεδιασθεί για λειτουργία σε ένταση ακτινοβολίας μιας περίπου ηλιακής σταθεράς, η μορφή της  $I - V$  καμπύλης δε μεταβάλλεται ουσιαστικά με την ένταση στην περιοχή 0,5-2 ηλιακές σταθερές, το ρεύμα  $I_{sc}$  πρακτικά μεταβάλλεται αναλογικά με την ένταση, η τάση  $V_{oc}$  μεταβάλλεται λιγότερο (λογαριθμικά εξάρτηση)



Εικόνα 3.6 :  $I - V$  Χαρακτηριστική πυριτίου που χρησιμοποιείται για φόρτιση μπαταριών

### 3.5.6 Μεταβολή της θερμοκρασίας

Όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του κυττάρου προκαλούνται οι παρακάτω μεταβολές στις παραμέτρους της  $I - V$  χαρακτηριστικής. Με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου:

- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  αυξάνεται ελαφρά (εξαρτάται βέβαια και από την ένταση της ακτινοβολίας και οφείλεται σε μεταβολή της δυνατότητας συλλογής των φορέων, αφού και το ενεργειακό χάσμα μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας).

Τυπικές τιμές:

$$\frac{dI_{sc}}{dT} = 0,01 \frac{mAcm^{-2}}{^{\circ}C}$$

• Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  μειώνεται (οφείλεται σε μεταβολή των χαρακτηριστικών αγωγής της διόδου). Τυπικές τιμές:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = -2,2 \text{ mV}/^{\circ}C$$

• Η ισχύς  $P_m$  ( $P_{mp}$  ή  $P_{max}$ ) μειώνεται, ενώ μεταβάλλεται και η μορφή της καμπύλης (το σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης γίνεται πιο στρογγυλεμένο με αύξηση της θερμοκρασίας). Τυπικές τιμές:

$$\frac{dP_m}{dT} = -0,4 \text{ έως } -0,5 \% /^{\circ}C$$

### 3.5.7 Ο Βαθμός Απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτρικού κυττάρου δίνεται από την εξής σχέση :

$$n = \frac{V_{oc} I_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} I_{sc} ff}{P_{in}}$$

Όπου,

$P_{in}$  είναι η ολική ισχύς της προσπίπτουσας στο κύτταρο ακτινοβολίας.

Ο βαθμός απόδοσης των ηλιακών κυττάρων του εμπορίου βρίσκεται στην περιοχή 12 μέχρι 14%, ενώ σε πειραματικά μοντέλα έχουν επιτευχθεί μεγαλύτερες τιμές. Ο θεωρητικά μέγιστος δυνατός βαθμός απόδοσης, με βάση τη σχέση, εξαρτάται από τις μέγιστες τιμές των  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  και  $ff$ , κυρίως όμως από τα δύο πρώτα, διότι όπως έχει αναφερθεί η μέγιστη τιμή του  $ff$  είναι συνάρτηση του  $V_{oc}$ . Έτσι προκύπτει για το πυρίτιο η μέγιστη τιμή της  $V_{oc}$  περίπου 100 mV. Η αντίστοιχη μέγιστη τιμή του  $ff$  είναι 0,84 οπότε μπορεί να υπολογιστεί η μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης. Μια λογική εκτίμηση της ελάχιστης τιμής του  $I_0$  που προκύπτει συναρτήσει του ενεργειακού χάσματος είναι:

$$I_0 = 1,5 * 10^5 e^{\frac{-E_g}{kT}}$$

Αυτή η σχέση δείχνει ότι η μέγιστη τιμή του  $V_{oc}$  ελαττώνεται, όταν ελαττώνεται το ενεργειακό χάσμα, τάση που είναι αντίθετα από εκείνη που ισχύει για το  $I_{sc}$ . Κατά συνέπεια θα υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του ενεργειακού χάσματος που θα δίνει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης όπως φαίνεται στο σχήμα όπου η μέγιστη απόδοση

συμβαίνει για ενεργειακό χάσμα στην περιοχή (1,4-1,6 eV). Το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου (1,1 eV) είναι μικρότερο από το βέλτιστο αλλά η θεωρητικά μέγιστη απόδοση είναι ακόμα πολύ υψηλή, ενώ το GaAs έχει ένα σχεδόν βέλτιστο ενεργειακό χάσμα (1,4 eV).

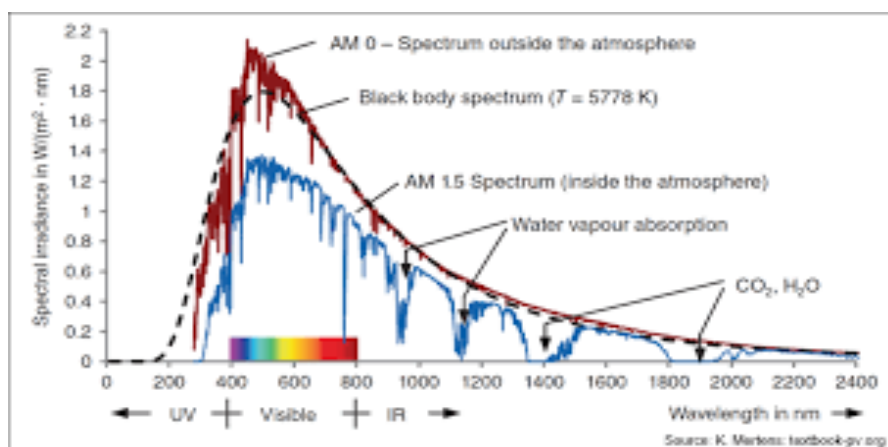
### 3.5.8 Παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά το βαθμό απόδοσης

Οι παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για τη σχετικά χαμηλή τιμή, τόσο θεωρητική όσο και πρακτική, του βαθμού απόδοσης είναι:

- **Ανάκλαση:** Μη επεξεργασμένη επιφάνεια πυριτίου ανακλά ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας της τάξεως του 30%. Επεξεργασία της επιφάνειας με χημικά μέσα και/ή επίστρωση με αντιανακλαστικά υλικά περιορίζει δραστικά τις ανακλάσεις μέχρι την τάξη του 3%.

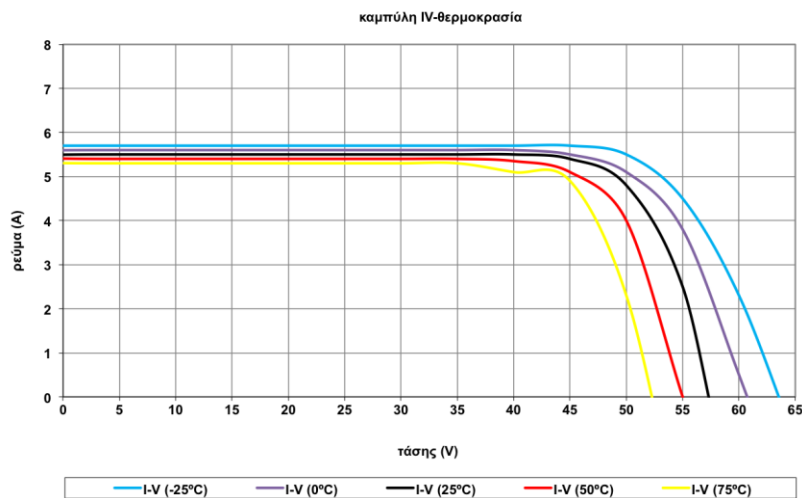
- **Σκίαση από τις επαφές:** Η ανάγκη της κατασκευής ηλεκτροδίων τόσο στην επιφάνεια του υλικού τύπου-p όσο και του υλικού τύπου-n συνεπάγεται τη δημιουργία ενός μεταλλικού πλέγματος επαφών στην επιφάνεια του κυττάρου που εκτίθεται στο ηλιακό φως. Αυτό συμβαίνει επειδή η αντίσταση στην επιφανειακή κίνηση των φορέων στο πάνω επιφανειακό στρώμα του κυττάρου είναι μεγάλη και πρέπει να υπάρχουν πολλά σημεία απαγωγής των φορέων (ηλεκτρικές επαφές) με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν τα ωμικά φαινόμενα. Το αποτέλεσμα για τα ηλεκτρόδια είναι μια γεωμετρία μεταλλικού πλέγματος στην πάνω επιφάνεια του κυττάρου, που έχει σαν συνέπεια ένα ποσοστό 5-15% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να εκτρέπεται.

- **Ατελής εκμετάλλευση της ενέργειας των φωτονίων:** Όπως είναι γνωστό η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος έχει διαφορετικές εντάσεις σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Δηλαδή στον κρύσταλλο, προσπίπτουν φωτόνια που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών ενέργειας τα οποία είναι δυνατόν ή να διαπεράσουν το κύτταρο, ή να απορροφηθούν παράγοντας μόνο θερμότητα υπό μορφή ταλαντώσεων των ατόμων, ή να δημιουργήσουν ζεύγος ηλεκτρονίων- οπών, ή να δημιουργήσουν ζεύγος ηλεκτρονίων- οπών και η επιπλέον ενέργεια τους να μετατραπεί σε θερμότητα. Αυτός ο παράγοντας με τους τέσσερις μηχανισμούς του και μόνο περιορίζει τη μέγιστη δυνατή απόδοση στο 44%.



Εικόνα 3.7 : Χαρακτηριστική διαφόρων ακτινοβολιών ανά μήκος κύματος

- Επανασύνδεση: Αυτή μπορεί να συμβεί με διάφορους μηχανισμούς στον κυρίως όγκο του ημιαγωγού στις επιφάνειες και στις ατέλειες του υλικού.
- Αντίσταση: Μη ικανοποιητικές τιμές τόσο της εν σειρά αντίστασης  $R_s$  όσο και της παράλληλης  $R_{sh}$  τείνουν να ελαττώσουν το συντελεστή  $ff$ , ενώ σε ακραίες περιπτώσεις ακόμη και τα  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  με τελική συνέπεια τη μείωση της απόδοσης.
- Θερμοκρασία: Οι φυσικοί μηχανισμοί που καθορίζουν τη σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και βαθμού απόδοσης είναι αρκετά πολύπλοκοι. Πάντως τόσο οι αρκετά υψηλές και οι αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες τείνουν να μειώσουν σημαντικά το βαθμό απόδοσης.



Εικόνα 3.8 : I – V χαρακτηριστική για διάφορες θερμοκρασίες

- **Γήρανση:** Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, άρα και της ισχύος αιχμής του, λόγω γενικότερης αλλοίωσης του φωτοβολταϊκού κυττάρου ως ενσωματωμένου τμήματος του Φ/Β πλαισίου. Οι αιτίες της γήρανσης είναι πολλές όπως αποχρωματισμός των κυττάρων, ράγισμα του γυαλιού κάλυψης, διαχωρισμός του ειδικού πλαστικού μόνωσης από την υγρασία της πίσω πλευράς, και κακή λειτουργία των καλωδιώσεων και του κιβωτίου συνδέσεων.

Μετρήσεις μακράς διάρκειας σε πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου δίδουν μείωση της αποδοτικότητας του κάτω από πρότυπες συνθήκες ~ 1% κατ' έτος χρήσης (ρυθμός γήρανσης).

### **3.6 Η Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια**

#### **3.6.1 Το Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο**

Το βασικό χαρακτηριστικό κάθε φωτοβολταϊκής 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.

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 μέχρι 0,5 V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μόλις 0,4 W περίπου. Γι' αυτό, τα Φ/Β στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση Φ/Β γεννητριών τοποθετούνται ανά 10 ως 50 περίπου σε ένα πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Στο πλαίσιο, τα στοιχεία συνδέονται στη σειρά σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση μιας επιθυμητής τάσης π.χ. η σύνδεση 35 στοιχείων στη σειρά δίνει περίπου 15-20 V, που είναι κατάλληλη, αν αφαιρέσουμε τις διάφορες απώλειες για τη φόρτιση των συνηθισμένων συσσωρευτών μόλυβδου. Τα πλαίσια είναι κατασκευασμένα με μορφή σάντουιτς. Δηλαδή, τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό φύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) ή από ενισχυμένο πλαστικό, που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου, ενώ η εμπρός όψη τους καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού. Το εμπρός και πίσω φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με την βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Διαμορφώνεται έτσι το Φ/Β πλαίσιο, που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση των Φ/Β γεννητριών.

- **Φωτοβολταϊκό πάνελ (PV panel):** Ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να εγκατασταθεί σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση
- **Φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array):** Μια ομάδα από φωτοβολταϊκά πλαίσια ή πάνελ με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης.



### 3.6.2 Η Απόδοση του 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. Επομένως, όμοια με την σχέση που ορίζει το συντελεστή πλήρωσης, ο συντελεστής απόδοσης του Φ/Β πλαισίου ( $n_{\pi}$ ) εκφράζει το λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το Φ/Β πλαίσιο ( $P_{\pi}$ ) προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του  $S$ . Προφανώς, την ίδια τιμή θα έχει και ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ενέργειας  $E$  που παράγει το Φ/Β πλαίσιο επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται επί το ίδιο χρονικό διάστημα. Δηλαδή:

$$n_{\pi} = \frac{P_{\pi}}{HS} \left( \frac{W}{(W/m^2)m^2} \right)$$

$$n_{\pi} = \frac{E}{\Pi S} \left( \frac{kW}{(kW/m^2)m^2} \right)$$

όπου  $\Pi$  είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου.

Η τιμή του  $n_{\pi}$  είναι φανερό ότι εξαρτάται όχι μόνο από τη μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων ( $n$ ), αλλά και από τον συντελεστή κάλυψης του πλαισίου ( $\sigma_{\kappa}$ ), που ορίζεται 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 την συνολική επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου. Βρίσκουμε εύκολα ότι θα ισχύει η σχέση:

$$n_{\pi} = n\sigma_{\kappa}$$

Η τιμή του  $\sigma_{\kappa}$  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 κυκλικά στοιχεία σε παράλληλες στοιχισμένες σειρές και φτάνει μέχρι σχεδόν 1,00 (πρακτικά μέχρι 0,98) για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία.

### 3.6.3 Η Επίδραση της Θερμοκρασίας και της Ρύπανσης

Όπως είδαμε 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 μία συμβατική θερμοκρασία 20° C, που συχνά, ιδίως στους 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 την λειτουργία τους θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος κατά 25 ως 30° C, ανάλογα και με την ταχύτητα του ανέμου.

Ως μέσο όρο στους υπολογισμούς μας παίρνουμε συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας κατά 30° C. Για τη διόρθωση του παραπάνω σφάλματος χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής  $\sigma_\theta$  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:

$$n_\pi \cdot \sigma_\theta$$

Σε συμβατική θερμοκρασία ο  $\sigma_\theta$  είναι ίσος με την μονάδα και για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή. Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας του από την επικάθιση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά.

Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνει περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των Φ/Β πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές σε συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη.

Όταν η Φ/Β γεννήτρια βρίσκεται σε μια περιοχή όπου εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β πλαίσια, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας ( $\sigma_\rho$ ), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο Φ/Β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ όταν η επιφάνεια του είναι τελείως καθαρή. Η τιμή του  $\sigma_\rho$  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 κτλ. Έτσι, όποτε είναι απαραίτητο, ως συντελεστή απόδοσης των Φ/Β πλαισίων για τους υπολογισμούς μας, παίρνουμε το γινόμενο του ενδεικτικού συντελεστή απόδοσης  $n_\pi$ , που δίνεται για συμβατική θερμοκρασία και καθαρή επιφάνεια, επί τους συντελεστές διόρθωσης για τη θερμοκρασία  $\sigma_\theta$  και για τη ρύπανση  $\sigma_\rho$ . Δηλαδή, η προηγούμενη σχέση παίρνει τη γενικότερη μορφή:

$$E = \Pi \cdot S \cdot n_\pi \cdot \sigma_\theta \cdot \sigma_\rho$$

### 3.6.4 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 ήλιου, δηλαδή  $1 \text{ kW/m}^2$ . Οι μονάδες ισχύος που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός Φ/Β πλαισίου μιας ολόκληρης Φ/Β εγκατάστασης ή ενός ηλιακού στοιχείου ονομάζονται συχνά βατ αιχμής ( $W_p$ , Watt peak) και κιλοβάτ αιχμής ( $kW_p$ ). Δηλαδή χρησιμοποιείται ο ίδιος όρος και συμβολισμός (άλλωστε ουσιαστικά είναι και το ίδιο πράγμα) όπως για το μέτρο της επιφάνειας των Φ/Β στοιχείων που γνωρίσαμε προηγουμένως. Από την σχέση που δίνει την απόδοση  $\eta_p$  είναι φανερό ότι:

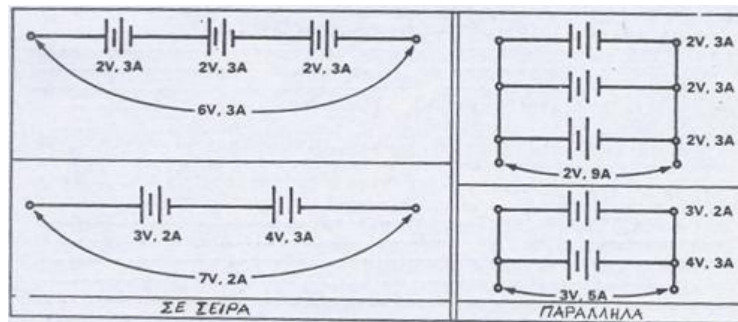
$$P_a (kW_p) = 1 \left( \frac{kW}{m^2} \right) S (m^2) \eta_p$$

## **3.7 Φαινόμενο Hot Spot**

### 3.7.1 Εξήγηση του φαινομένου

Οι αιτίες της μη προσαρμογής των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας είτε ενυπάρχουν και οφείλονται σε κατασκευαστικούς λόγους κατά τη μαζική παραγωγή τους, είτε προκύπτουν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Από τις τελευταίες, πρωτεύουσα θέση κατέχει η μερική ή ολική σκίαση ενός ή περισσότερων κυττάρων και μπορεί να οφείλεται σε σύννεφα, παρακείμενα δένδρα, κτίρια, πουλιά κλπ. Άλλη αιτία είναι η θραύση ενός ή περισσότερων κυττάρων και μπορεί να οφείλεται σε διαφορετική διαστολή μεταξύ του κυττάρου και του υλικού πάνω στο οποίο στηρίζεται, σε χαλάζι, σε ελαττωμένη αντοχή που προέκυψε κατά τη διάρκεια της κατασκευής του ή της ενσωμάτωσής του στο πλαίσιο. Ας σημειωθεί ότι η ολική θραύση ενός κυττάρου σημαίνει από ηλεκτρική άποψη, ανοιχτό κύκλωμα. Τέλος, μια άλλη αιτία μπορεί να είναι ανοιχτοκυκλωμένες ηλεκτρικές συνδέσεις και να οφείλεται σε διαφορετική θερμική διαστολή κλπ.

Επίσης, είναι γνωστό ότι οι τάσεις σε σειρά προστίθενται, ενώ παράλληλα είναι ισοδύναμες με την τιμή της μικρότερης τάσης. Επιπλέον, ρεύματα παράλληλα προστίθενται, ενώ σε σειρά είναι ισοδύναμα με την τιμή του μικρότερου σχήματος (σχήμα 3.17). Έτσι, αν δύο κύτταρα με ανόμοια χαρακτηριστικά συνδεθούν σε σειρά η συμπεριφορά τους (που απαιτεί να διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα), περιγράφεται αν αθροίσουμε τις τάσεις των δύο κυττάρων για τις διάφορες τιμές του ρεύματος.

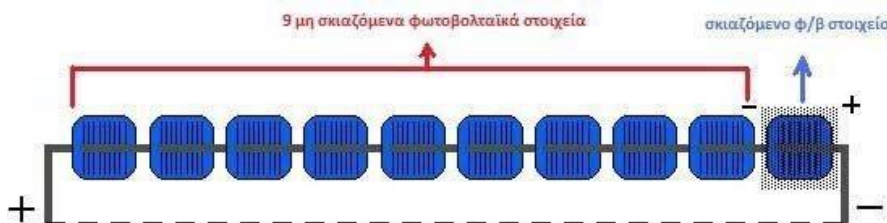


Σχήμα 3.9. Βασικός συνδυασμός, σε σειρά και παράλληλα, πηγών τάσεως και ρεύματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά [3]

Ισχυρές αποκλίσεις από την προσαρμογή των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας είναι δυνατόν να προκαλέσουν απώλεια της ικανότητας παραγωγής ισχύος από τα «καλύτερα», από άποψη χαρακτηριστικών κύτταρα. Με άλλα λόγια, η μη προσαρμογή των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας συνεπάγεται ότι η συνολική ισχύς εξόδου θα είναι μικρότερη από το άθροισμα των ισχύων των επί μέρους κυττάρων. Η απώλεια αυτή ισχύος καλείται απώλεια προσαρμογής (mismatch loss) και αποτελεί ένα φαινόμενο με μεγάλο ενδιαφέρον, ιδιαίτερα για κύτταρα συνδεδεμένα σε σειρά.

Η μη προσαρμογή των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας, εκτός από μείωση της ισχύος εξόδου, είναι δυνατόν να προκαλέσει κι ένα άλλο φαινόμενο, ιδιαίτερα σημαντικό, που καλείται φαινόμενο hot-spot. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε ανάστροφη πόλωση ενός ή περισσοτέρων κυττάρων και συνεπάγεται υπερθέρμανσή τους, που πολλές φορές μπορεί να είναι καταστροφική.

Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο hot-spot συμβαίνει όταν υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, συνδεδεμένο σε σειρά με κάποια άλλα, που δίνει χαμηλό ρεύμα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Δηλαδή, αν μια αλυσίδα από κύτταρα βραχυκυκλωθεί (σχήμα 3.18) τότε η ισχύς που παράγουν τα μη σκιαζόμενα στοιχεία καταναλώνεται δια μέσω του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το σκιαζόμενο στοιχείο μειώνει το ρεύμα δια μέσω των μη σκιαζόμενων στοιχείων, προκαλώντας τα «καλά» στοιχεία να παράγουν υψηλότερη τάση η οποία μπορεί να προκαλέσει ανάστροφη πόλωση του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Έτσι, η ενέργεια που χάνεται στο σκιαζόμενο στοιχείο μετατρέπεται σε θερμότητα (υπερβολική τοπική αύξηση της θερμοκρασίας) με πιθανό αποτέλεσμα την θραύση ή ακόμη και την πλήρη καταστροφή του πλαισίου.



Σχήμα 3.10. Διάταξη φ/β στοιχείων σε σειρά με ένα σκιαζόμενο.

### 3.7.2 Μέθοδοι θεραπείας

Επειδή τα κύτταρα μιας συστοιχίας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της είναι δυνατόν να μην έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά είναι πιθανό να προκύψουν τα δύο φαινόμενα που μελετήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (μείωση ισχύος εξόδου και φαινόμενο hot-spot) και να δημιουργηθούν προβλήματα. Με σκοπό να μειώσουμε την επίδραση των προβλημάτων αυτών στην λειτουργία της συστοιχίας και να απομακρύνουμε τον κίνδυνο δυσάρεστων καταστάσεων, ακολουθούμε συνήθως δύο στρατηγικές: είτε χρησιμοποιούμε πλεονάζουσες συνδέσεις είτε συνδέουμε παράλληλα διόδους παράκαμψης.

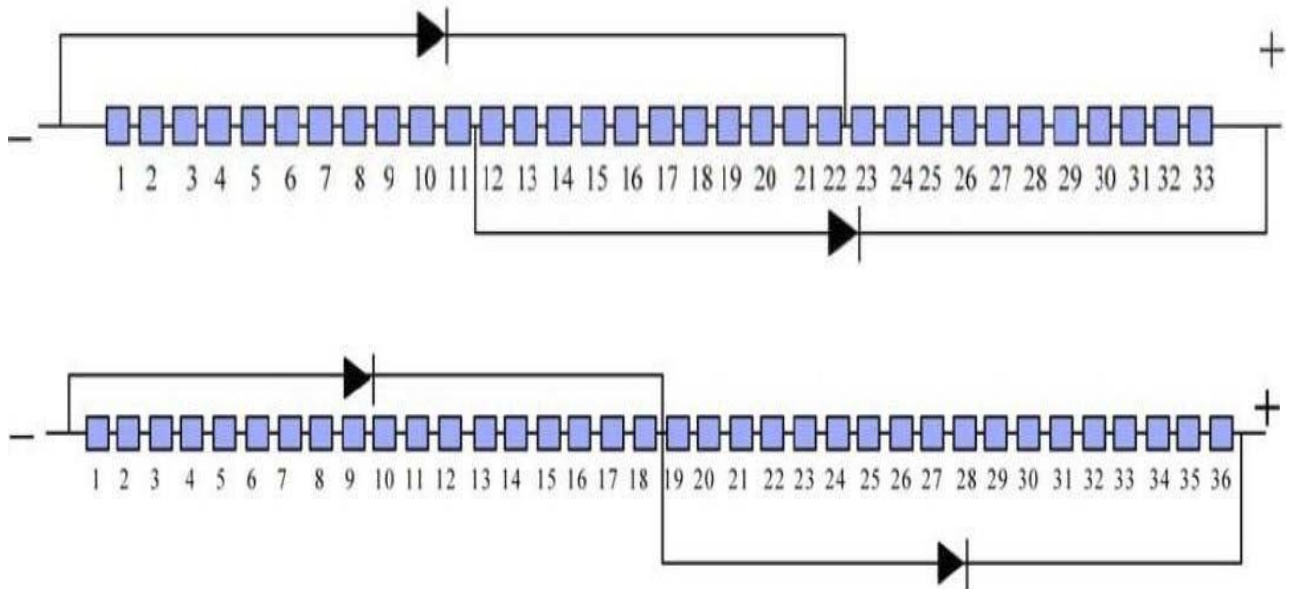
### 3.7.3 Στρατηγική παράλληλης/σε σειρά σύνδεσης κυττάρων

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

### 3.7.4 Δίοδοι παράκαμψης

Το καταστροφικό φαινόμενο hot-spot είναι δυνατόν να αποφευχθεί με τη χρήση μιας παρακαμπτήριας διόδου (δίοδος παράκαμψης). Μια δίοδος συνδέεται παράλληλα με μια σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων, την οποία θέλουμε να προστατέψουμε, αλλά με αντίθετη πόλωση. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, κάθε στοιχείο είναι ορθά πολωμένο και η δίοδος που είναι ανάστροφα πολωμένη, απλά αποτελεί ένα κομμάτι ανοιχτού ουσιαστικά κυκλώματος με αποτέλεσμα το ρεύμα να μην επιλέγει τον δρόμο αυτό. Όμως, όταν ένα στοιχείο πολωθεί ανάστροφα και εμφανιστεί μια διαφορά του ρεύματος βραχυκυκλώσεως μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων της σειράς, τότε η δίοδος άγει και προστατεύει το «προβληματικό» στοιχείο.

Πρακτικά, θα έπρεπε να είχαμε μια δίοδο για κάθε στοιχείο. Αυτό όμως είναι ανέφικτο λόγω του υψηλού κόστους κι έτσι χρησιμοποιείται μια δίοδος κατά μήκος μιας ομάδας στοιχείων. Ο μέγιστος αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων που μπορεί να καλύπτει μια δίοδος είναι περίπου 15 (στοιχεία/δίοδο). Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν δύο τρόπους τοποθέτησης διόδων κατά τους οποίους είτε παρουσιάζεται αλληλοεπικάλυψη στοιχείων, είτε και όχι (σχήμα 3.19).



Σχήμα 3.11. (α) στοιχεία που επικαλύπτονται και (β) στοιχεία που δεν επικαλύπτονται

## Κεφάλαιο 4

### Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας

#### 4.1 Η Ανάγκη για Αποθήκευση

Ένα μέρος της ενέργειας που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι ανάγκη να αποθηκευτεί, ώστε να χρησιμοποιηθεί μετά τη δύση του ήλιου, τη νύχτα, πριν την ανατολή του ήλιου, όταν δεν επαρκεί η ηλιακή ακτινοβολία ή κατά τη διάρκεια συνεχών ημερών με νεφελώδη ουρανό. Η στατιστική κατανομή της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας ενός τόπου και η δυνατότητα μετατροπής μέρους αυτής σε καθαρή για το περιβάλλον ηλεκτρική ενέργεια, δεδομένου του τρέχοντος επιπέδου της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, καθιστά όλο και πιο συχνά επιτακτική τη χρήση των ηλιακών κυττάρων ως γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Τα στατιστικά δεδομένα της ηλιοφάνειας ενός τόπου αντιπαρατιθέμενα στην ίδια τη φύση του φαινομένου, που χαρακτηρίζεται από τις έντονες και συχνά γρήγορες μεταβολές, τόσο κατά τη διάρκεια του έτους όσο και κατά τη διάρκεια της μέρας, θα περιόριζαν τρομερά το εύρος των δυνατών εφαρμογών χωρίς τη δυνατότητα της αποταμίευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα περισσότερα από τα συστήματα αποθήκευσης που υπάρχουν δεν προσφέρονται για το σκοπό αυτό είτε λόγω μεγάλου αρχικού κόστους, είτε λόγω μη προσαρμογής των δυνατοτήτων αποθήκευσης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η άντληση και η αποθήκευση νερού, ο συμπιεσμένος αέρας, η θερμική αποθήκευση, η παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου, η αποθήκευση σε σφονδύλους κτλ.

#### 4.2 Ηλιακοί Συσσωρευτές

Τη λύση του προβλήματος της συχνής ασυμφωνίας ζήτησης και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της δυνατότητας της αποταμίευσης της, την παρέχουν οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες). Μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια, ο συσσωρευτής, την αποθηκεύει σε χημική μορφή, για να την αποδώσει στην αρχική της μορφή όταν υπάρξει ζήτηση. Η χημική αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια συσσωρευτών φαίνεται ότι αποτελεί την πλέον κατάλληλη μέθοδο αποθήκευσης για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

Τα πλεονεκτήματα ενός Φ/Β συστήματος με συσσωρευτές είναι η δυνατότητα να παρέχουν ενέργεια σε περιόδους που δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, η δυνατότητα να καλύπτουν στιγμιαίες αιχμές ζήτησης φορτίου, η ύπαρξη σταθερής τάσης στο σύστημα, η ικανότητα αποθήκευσης της επί πλέον της ενεργειακής ζήτησης ενέργειας ώστε να μειώνονται οι απώλειες κτλ. Από την άλλη μεριά, η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος, το αυξημένο κόστος, ο αυξημένος χρόνος και το κόστος συντήρησης και πολλές φορές η μειωμένη αξιοπιστία μπορούν να καταγραφούν στα μειονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος.



Εικόνα 4.1 : Συσσωρευτής

### **4.3 Δομή Συσσωρευτών**

Ένας συσσωρευτής αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή/και παράλληλα και ο τρόπος σύνδεσής τους εξαρτάται από την επιθυμητή τάση εξόδου και τη χωρητικότητα της συστοιχίας. Το στοιχείο αποτελείται από τρία βασικά συστατικά:

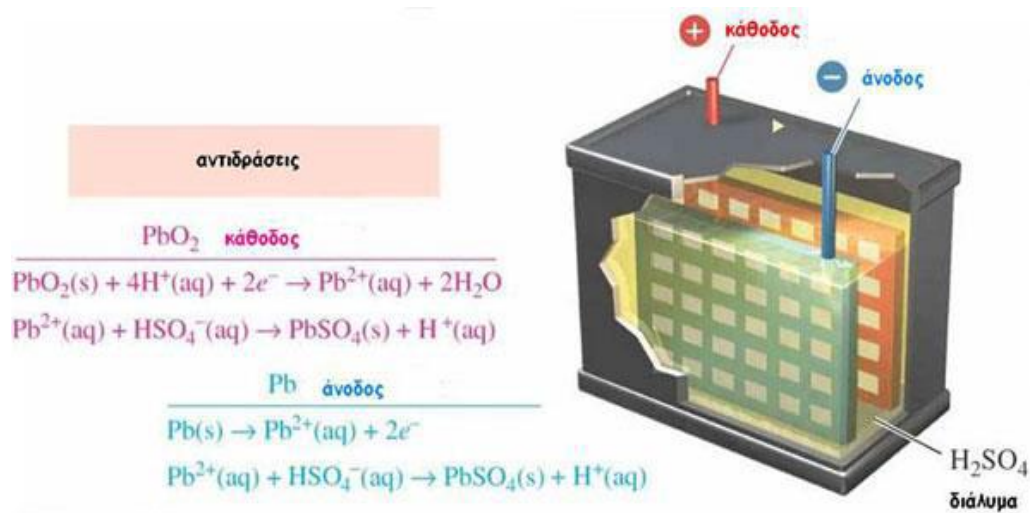
Την άνοδο, η οποία δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.

Την κάθοδο, η οποία δέχεται τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.

Τον ηλεκτρολύτη (ιονικός αγωγός) ο οποίος αποτελεί το μέσο για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του στοιχείου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως κάποιο διάλυμα που συμβάλλει στην ιονική αγωγιμότητα της διάταξης. Σε ένα πρακτικό σύστημα, η άνοδος επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω: καλή αγωγιμότητα, σταθερότητα, ευκολία κατασκευής και μικρό κόστος. Συνήθως τα υλικά που επιλέγονται για την κατασκευή ανόδων είναι τα μέταλλα. Η κάθοδος πρέπει να είναι ένας καλός οξειδωτικός παράγοντας και να μην αλληλεπιδρά χημικά με τον ηλεκτρολύτη. Συνήθως τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη κατασκευή καθόδων είναι τα οξείδια μετάλλων. Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει καλή ιονική αγωγιμότητα. Η άνοδος και η κάθοδος είναι ηλεκτρικά απομονωμένες μέσα στο στοιχείο για την αποφυγή εσωτερικού βραχυκυκλώματος, αλλά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Στις κατασκευές των στοιχείων χρησιμοποιείται ένα υλικό διαχωρισμού για να διαχωρίσει τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου. Το υλικό διαχωρισμού είναι διαπερατό από τον ηλεκτρολύτη, έτσι ώστε να διατηρηθεί η ιονική αγωγιμότητα του στοιχείου. Κατάλληλα υλικά μπορούν να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για τη μείωση της εσωτερικής τους αντίστασης. Το στοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί σε πολλά σχήματα: κυλινδρικό, επίπεδο ή πρισματικό. Τα στοιχεία σφραγίζονται με διάφορους τρόπους για να αποφευχθεί η διαρροή του ηλεκτρολύτη. Μερικά στοιχεία διαθέτουν βαλβίδες για να επιτρέπουν τη διαφυγή των αερίων που παράγονται κατά τη λειτουργία τους. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η δομή ενός συσσωρευτή όπου διακρίνονται τα δομικά χαρακτηριστικά που έχουν περιγραφεί παραπάνω.

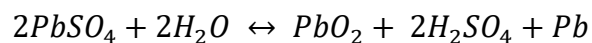




Εικόνα 4.2 : Δομή ενός συσσωρευτή

#### 4.4 Αρχή Λειτουργίας Συσσωρευτών

Ο μηχανισμός της λειτουργίας των συσσωρευτών στηρίζεται σε μία αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία, η οποία για τους συσσωρευτές μολύβδου περιγράφεται από την αντίδραση:



Η κατεύθυνση προς τα δεξιά αντιστοιχεί στη διαδικασία της εκφόρτισης, ενώ η αντίθετη στη φόρτιση του συσσωρευτή. Πιο συγκεκριμένα, κατά την αρχική επαφή των μολύβδινων πλακών με το ηλεκτρολυτικό διάλυμα H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, λεπτό επιφανειακό στρώμα των ηλεκτροδίων μετατρέπεται από Pb σε PbSO<sub>4</sub>. Κατά τη φόρτιση υπό τάση λίγο μεγαλύτερη της ονομαστικής τάσης της διάταξης, το ηλεκτρόδιο που είναι συνδεδεμένο στον αρνητικό πόλο της πηγής φόρτισης, ανάγεται σε μεταλλικό μόλυβδο (Pb), με σπογγώδη μορφή και το άλλο που είναι συνδεδεμένο με το θετικό πόλο της πηγής, οξειδώνεται προς PbO<sub>2</sub>, φαιού χρώματος. Ένας συσσωρευτής αποτελείται από μία συνάθροιση κυψελίδων και η ονομαστική του τάση είναι το άθροισμα των ονομαστικών τάσεων των κυψελίδων του. Έτσι, ο συσσωρευτής που χρησιμοποιούμε, με ονομαστική τιμή 60Volt αποτελείται από 30 κυψελίδες ονομαστικής τιμής 2Volt η καθεμία.

## **4.5 Κατηγορίες Στοιχείων και Συσσωρευτών**

### **4.5.1 Πρωτεύοντα Στοιχεία ή Συσσωρευτές**

Τα πρωτεύοντα στοιχεία (ή συσσωρευτές) δε γίνεται να επαναφορτιστούν, γι' αυτό εκφορτίζονται μία φορά και στη συνέχεια αποσύρονται. Ο πρωτεύων συσσωρευτής είναι μία ικανοποιητική και συνήθως φθηνή πηγή ενέργειας. Τα γενικά πλεονεκτήματά τους είναι η γενικά μεγάλη ζωή τους όταν βρίσκονται αποθηκευμένοι, η μεγάλη πυκνότητα ενέργειας για μικρούς ή μεσαίους ρυθμούς εκφόρτισης, η μικρή ή έως καθόλου ανάγκη για συντήρηση, η ευκολία χρήσης και το μικρό αρχικό κόστος. Διάφορες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται πρωτεύοντες συσσωρευτές είναι φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμός, φωτογραφικός εξοπλισμός, παιχνίδια κ.α. Οι πιο συνηθισμένοι πρωτεύοντες συσσωρευτές είναι κυλινδρικοί ή επίπεδοι.

### **4.5.2 Δευτερεύοντα Στοιχεία ή Συσσωρευτές**

Τα δευτερεύοντα στοιχεία (ή συσσωρευτές) μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά μετά την εκφόρτιση, μέχρι να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση πριν τη εκφόρτιση. Αυτό γίνεται με την εφαρμογή ρεύματος με την αντίθετη φορά από αυτή του ρεύματος εκφόρτισης. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούνται μεγάλες ισχύεις. Πιο συγκεκριμένα, οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Τις εφαρμογές στις οποίες ο συσσωρευτής εκφορτίζεται μόνο όταν είναι απαραίτητο και φορτίζεται από μία πηγή τάσης ή ρεύματος. Τέτοιες εφαρμογές είναι τα συστήματα αεροπλάνων, συστήματα έκτακτης ανάγκης και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.
- Τις εφαρμογές στις οποίες ο συσσωρευτής χρησιμοποιείται ως κύρια πηγή ενέργειας και επαναφορτίζεται μετά τη χρήση αντί να αποσύρεται. Τέτοιες εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν τις φορητές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, ηλεκτρικά οχήματα και γενικά εφαρμογές τις οποίες δε μπορούν να καλύψουν οι πρωτεύοντες συσσωρευτές.

Οι δευτερεύοντες συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακά πυκνότητα, υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης και καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Μερικοί συσσωρευτές, οι οποίοι είναι γνωστοί και ως μηχανικά επαναφορτιζόμενοι, φορτίζονται με την αντικατάσταση ενός από τα ηλεκτρόδια, συνήθως της μεταλλικής διόδου. Τους βασικότερους εκπροσώπους αυτής της κατηγορίας, που είναι και πλέον κατάλληλοι για φωτοβολταϊκά συστήματα, αποτελούν οι συσσωρευτές μολύβδου (LEAD-ACID) και οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (NICKEL-CADMIUM).

## **4.6 Τύποι Συσσωρευτών**

Έχει ήδη αναφερθεί ότι τα υλικά του κράματος στο πλέγμα των πλακών κατηγοριοποιούν τους συσσωρευτές μολύβδου και νικελίου σε υποκατηγορίες. Αυτοί οι συνδυασμοί, μαζί με άλλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, καθορίζουν τις

ιδιαιτερότητες των επιδόσεων τους και τις εφαρμογές για τις οποίες είναι περισσότερο κατάλληλοι.

#### 4.6.1 Συσσωρευτές Μολύβδου

Γνωστοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι συσσωρευτών μολύβδου είναι:

- Οι συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sb).
- Οι συσσωρευτές μολύβδου-ασβεστίου (Pb-Ca), οι οποίοι χωρίζονται σε υγρού καταλύτη με ανοικτή ή με σφραγισμένη βαλβίδα εξαέρωσης.
- Οι υβριδικοί συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου / μολύβδου-ασβεστίου.
- Οι μολύβδου με δεσμευμένο καταλύτη που μπορεί να είναι gelled ή absorbed glass material (AGM)

#### 4.6.2 Συσσωρευτές Μολύβδου-Αντιμονίου (Pb-Sd)

Ιδιαίτερα για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπου δεν υπάρχει εναλλακτική λύση παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και όπου οι μεταβολές της ηλιοφάνειας μπορούν να είναι έντονες και μακρόχρονες, απαραίτητοι είναι οι συσσωρευτές που έχουν μεγάλη χωρητικότητα, μπορούν να υποστούν βαθιά εκφόρτιση και συχνά απαιτείται μία καλή σχέση κόστους και διάρκειας ζωής. Για ένα τέτοιο σύστημα, καλή επιλογή θα αποτελούσε ένας συσσωρευτής μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sd). Αυτοί είναι συσσωρευτές με εξαιρετικά χαρακτηριστικά, όσο αφορά τις δυνατότητες βαθιάς εκφόρτισης και υψηλού ρυθμού εκφόρτισης. Έχουν επίσης μεγάλη διάρκεια ζωής και υφίστανται μικρή διάχυση των ενεργών υλικών τους. Μειονέκτημα τους είναι ο μεγάλος βαθμός αυτοεκφόρτισης που υφίστανται και που οδηγεί στην ανάγκη να υπερφορτίζονται με αποτέλεσμα τη μεγάλη απώλεια υγρών που εξαρτάται και από τις θερμοκρασίες λειτουργίας.

#### 4.6.3 Συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη (Captive Electrolyte LeadAcid Batteries)

Πολύ δημοφιλής επιλογή για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι οι συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη (Captive Electrolyte Lead-Acid Batteries), λόγω της στεγανότητας τους και της ευκολίας μετακίνησης που παρουσιάζουν. Το γεγονός ότι δεν έχουν απαιτήσεις συντήρησης (ούτε και δυνατότητα), σε συνδυασμό με την ευκολία στη

μετακίνηση τους καθιστά ιδανικούς για συστήματα σε απομακρυσμένα ή δυσπρόσιτα μέρη. Πάνω από τα μισά απομακρυσμένα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα τους χρησιμοποιούν.

#### 4.6.4 Άλλοι Τύποι Συσσωρευτών

Εκτός από τους συσσωρευτές μολύβδου έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς και έχουν κυκλοφορήσει στο εμπόριο ή βρίσκονται ακόμα υπό μελέτη διάφοροι άλλοι τύποι συσσωρευτών όπως οι συσσωρευτές νικελίου. Γνωστοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι συσσωρευτών νικελίου είναι:

- Οι συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου
- Οι συσσωρευτές Νικελίου- Σιδήρου
- Οι συσσωρευτές Νικελίου- Ψευδαργύρου
- Οι συσσωρευτές REDOX

##### Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου

Ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου σε νερό. Στα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών αυτών περιλαμβάνονται η δυνατότητα μεγάλων ρυθμών, μεγάλη διάρκεια ζωής, δυνατότητα υπερφόρτισης, σχετικά σταθερή τάση λειτουργίας συναρτήσει της στάθμης φόρτισης, ικανότητα παραμονής σε μέτρια στάθμη φόρτισης χωρίς πολλές φθορές. Χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές, φορητά εργαλεία, σαν εφεδρικές πηγές και σε διαστημικές εφαρμογές. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος και η μικρή χωρητικότητα.

##### Συσσωρευτές Νικελίου- Σιδήρου

Ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου σε νερό. Στα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών αυτών περιλαμβάνονται η μεγάλη διάρκεια ζωής και η δυνατότητα να υπερφορτίζονται και να υπερεκφορτίζονται με ελάχιστη μόνιμη βλάβη, ενώ στα μειονεκτήματα το σχετικά υψηλό κόστος και ο μικρός βαθμός απόδοσης.

##### Συσσωρευτές Νικελίου- Ψευδαργύρου

Η χημική αντίδραση είναι όμοια με τους προηγούμενους με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούν ηλεκτρόδιο ψευδαργύρου στη θέση του σιδήρου. Τα πλεονεκτήματά τους είναι η μεγάλη πυκνότητα ισχύος και ενέργειας που τους κάνει κατάλληλους για συσσωρευτές έλξης, ενώ σαν μειονεκτήματα έχουν τη μικρή διάρκεια ζωής, σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης και το υψηλό κόστος.

### Συσσωρευτές REDOX

Τα ενεργά υλικά είναι διάλυμα  $\text{CrCl}_2$  σε νερό για το θετικό ηλεκτρόδιο και διάλυμα  $\text{FeCl}_3$  σε νερό για το αρνητικό ηλεκτρόδιο και αποθηκεύονται σε χωριστά δοχεία εκτός του στοιχείου, όπου βρίσκονται τα δυο ηλεκτρόδια και κυκλοφορούν με τη βοήθεια αντλιών. Στα πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνονται η μεγάλη διάρκεια ζωής, η δυνατότητα υπερφόρτωσης χωρίς μόνιμη βλάβη, η δυνατότητα ρύθμισης της τάσης με την πρόθεση επί πλέον στοιχείων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, ενώ στα μειονεκτήματα οι ενεργειακές (παρασιτικές) απαιτήσεις για τη λειτουργία των βοηθητικών συσκευών κ.α. Τέλος, πρέπει να τονισθεί ότι βρίσκονται υπό μελέτη και άλλοι τύποι συσσωρευτών που καθένας παρουσιάζει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

### 4.7 Κύκλος Λειτουργίας (DUTY CYCLE)

Μια πλήρης φόρτιση μαζί με την επόμενη επαναφόρτιση αναφέρεται σαν ένας κύκλος (CYCLE). Οι συσσωρευτές ανάλογα με τον τρόπο χρησιμοποίησης χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες, που καθεμιά παρουσιάζει ιδιαίτερα κρίσιμα χαρακτηριστικά.

#### 4.7.1 Συσσωρευτές Εκκίνησης (SLI και DIESEL)

Χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση (STARTING), φωτισμό (LIGHTING) και ανάφλεξη (IGNITION) αυτοκινήτων και ντιζελομηχανών. Έχουν μεγάλους ρυθμούς εκφόρτισης και αποδίδουν μεγάλα ποσά ενέργειας σε μικρές χρονικές περιόδους με μικρό βάθος εκφόρτισης, σχετικά χαμηλό κόστος, μεγάλη ταχύτητα αυτοεκφόρτισης, διάρκεια ζωής 2-5 χρόνια για αυτοκίνητα και μέχρι 8 χρόνια για ντιζελομηχανές και μικρή διάρκεια ζωής σε κύκλους (200 κύκλους για 50% DOD και 3-5 κύκλους για 80-100% DOD).

#### 4.7.2 Συσσωρευτές Έλξης (MOTIVE POWER, TRACTION)

Χρησιμοποιούνται σε ανυψωτικά μηχανήματα, ηλεκτρικούς συρμούς ορυχείων, υποβρύχια και εν γένει ηλεκτροκίνητα οχήματα. Έχουν μεγάλη ταχύτητα αυτοεκφόρτισης και όταν δεν εκφορτίζονται σε βάθος μπορεί να διαρκέσουν 5-15 χρόνια.

#### 4.7.3 Στάσιμοι Συσσωρευτές (STATIONARY FLOAT)

Χρησιμοποιούνται σε τηλεφωνικά συστήματα, συστήματα αδιάλειπτου παροχής και εν γένει εφεδρικά συστήματα. Αρχίζουν να παρέχουν ενέργεια μόνο όταν η κύρια τροφοδοσία πάθει κάποια βλάβη με ρυθμούς εκφόρτισης  $C / 8$  μέχρι  $2C$  ανάλογα με την εφαρμογή. Έχουν διάρκεια ζωής 15-30 χρόνια

#### 4.7.4 Συσσωρευτές Κλειστού Τύπου (SEALED)

Δε χρειάζονται συνήθως συντήρηση (πρόσθεση νερού) διότι χρησιμοποιούν πλάκες ενισχυμένες με ασβέστιο που ελαχιστοποιούν την έκλυση αερίων, καταλύτη για επανασύνδεση των αερίων και βαλβίδες ασφαλείας.

#### 4.7.5 Φωτοβολταϊκοί Συσσωρευτές Μικρού Ρυθμού Εκφόρτισης

Χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα που σχεδιάζονται για ελάχιστη συντήρηση με μικρούς ρυθμούς εκφόρτισης ( $C / 500$ ), να αντέχουν στις χαμηλές θερμοκρασίες, με μεγάλη διάρκεια ζωής (5-15 χρόνια) και μικρή ταχύτητα αυτοεκφόρτισης.

#### 4.7.6 Φωτοβολταϊκοί Συσσωρευτές Μέσου Ρυθμού Εκφόρτισης

Χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο ή με εφεδρική πηγή ενέργειας. Είναι συνήθως τροποποιημένοι συσσωρευτές έλξης (π.χ. περιέχουν περισσότερο ηλεκτρολύτη, ώστε να μειώσουν τις απαιτήσεις σε συντήρηση, λιγότερο ανθεκτικές από μηχανική άποψη κτλ). Έχουν μέσους ρυθμούς και μεγάλο ημερήσιο βάθος εκφόρτισης.

## **4.8 Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτή**

### **4.8.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά**

Τα στοιχεία που προσδιορίζουν τις δυνατότητες ενός ηλεκτρικού συσσωρευτή είναι η ονομαστική τάση στους πόλους του, που εκφράζεται με την έννοια της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (HEΔ) και η ονομαστική χωρητικότητά του. Η HEΔ μετρείται σε Volt και ισούται με την πολική τάση του συσσωρευτή όταν δεν είναι συνδεδεμένος σε καταναλωτή.

Οι τιμές των HEΔ των διαφόρων τύπων συσσωρευτών (Pb- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NiCd, Ni-Fe, Ni- Zn, Sodium- Sulphur, Zinc- Bromide, Zinc- Chloride, Lithium- Metal Sulphide, Nickel-Hydrogen) κυμαίνονται μεταξύ 1V και ~4V ανά στοιχείο. Για να προκύψει μια διάταξη συσσώρευσης σε υψηλότερη HEΔ, όμοια ηλεκτρικά στοιχεία συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους. Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου συσσωρευτή μολύβδου είναι 2,25 V. Έτσι, οι τυπικές ονομαστικές τάσεις με τις οποίες κυκλοφορούν, με την τυπική εμπορική τους μορφή οι συσσωρευτές μολύβδου είναι 6V, 12V 24V και 48 V.

### **4.8.2 Χωρητικότητα**

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα συσσωρευτή ή που μπορεί να αποδοθεί από αυτόν είναι η χωρητικότητα C του συσσωρευτή. Η χωρητικότητα συνήθως καθορίζεται για ένα συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης ή περίοδο εκφόρτισης. Εξαρτάται από αρκετούς σχεδιαστικούς παράγοντες, στους οποίους συμπεριλαμβάνονται η ειδική πυκνότητα του ηλεκτρολύτη, η ποσότητα του ενεργού υλικού, ο αριθμός, ο σχεδιασμός και οι φυσικές διαστάσεις των πλακών (ηλεκτροδίων). Λειτουργικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρητικότητα είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, το βάθος της εκφόρτισης (ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας που αποδόθηκε από τη μπαταρία), η τάση της μπαταρίας στο τέλος της εκφόρτισης (τάση αποκοπής), η θερμοκρασία, η ηλικία της μπαταρίας και το ιστορικό της χρήσης της (κακή χρήση κτλ). Η συνήθης μονάδα έκφρασης της χωρητικότητας του συσσωρευτή είναι το Amberhour (Ah) και ο ρυθμός εκφόρτισης εκφράζεται ως το κλάσμα της χωρητικότητας C προς τη διάρκεια της περιόδου εκφόρτισης σε ώρες (π.χ. εκφόρτιση σε 120 ώρες ισοδυναμεί με ρυθμό εκφόρτισης C /120). Φυσικά, η μονάδα του ρυθμού εκφόρτισης είναι το Amber. Μερικές φορές, η χωρητικότητα σε αποθηκευμένη ενέργεια του συσσωρευτή εκφράζεται σε Kilowatt-hour (KWh) και υπολογίζεται προσεγγιστικά πολλαπλασιάζοντας τη χωρητικότητα σε Ah με την ονομαστική τάση του συσσωρευτή και διαιρώντας με 1000. Μέτρο της χωρητικότητας του συσσωρευτή είναι η κατάσταση φόρτισης (state of charge ή SOC), που ορίζεται σαν το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας και εκφράζεται ως το ποσοστό της ενέργειας ενός πλήρως φορτισμένου συσσωρευτή. Έτσι, ένας συσσωρευτής του οποίου τα 3/4 της ενέργειας του έχουν αφαιρεθεί, δηλαδή έχει εκφορτιστεί κατά 75%, λέγεται ότι βρίσκεται στο 25% SOC.



#### 4.8.3 Εκφόρτιση και Επιτρεπόμενο Βάθος Εκφόρτισης

Το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης (depth of discharge ή DOD ) είναι το μέγιστο ποσοστό της χωρητικότητας το οποίο μπορεί να αποδοθεί από τη μπαταρία. Συνήθως καταδεικνύεται από την τάση αποκοπής ή τάση βάθους εκφόρτισης και από το ρυθμό εκφόρτισης. Στα τυπικά φωτοβολταϊκά συστήματα προβλέπεται μία τάση αποκοπής του φορτίου από τη συσκευή του ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών και έτσι καθορίζεται το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης για δεδομένο ρυθμό εκφόρτισης. Οι τιμές του επιτρεπόμενου DOD μπορούν να είναι από 80% έως και 15% της χωρητικότητας ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας. Το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης πρέπει να μειώνεται θέτοντας την τάση αποκοπής του φορτίου στην συσκευή ρυθμιστή φόρτισης σε κατάλληλο σημείο. Το αποτέλεσμα θα είναι ο συσσωρευτής να μην εκφορτίζεται πλήρως και η θερμοκρασία στερεοποίησης να διατηρείται χαμηλά. Το κόστος θα είναι η μείωση της αυτονομίας του συστήματος μπαταρίας-συσσωρευτή. Για να διατηρείται η αυτονομία, η χωρητικότητα του συσσωρευτή πρέπει να επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη, τόσο τη μείωση της σε χαμηλές θερμοκρασίες όσο και το DOD στις θερμοκρασίες αυτές. Η τάση του βάθους εκφόρτισης σχετίζεται με το ρυθμό εκφόρτισης για τον οποίο είναι καθορισμένη η χωρητικότητα.

#### 4.8.4 Αυτοεκφόρτιση

Η αυτοεκφόρτιση είναι η διαδικασία κατά την οποία ο συσσωρευτής υφίσταται μείωση του SOC (state of charge), χωρίς να είναι συνδεδεμένος με κάποια κατανάλωση.

Τα αίτια είναι οι εσωτερικοί χημικοί μηχανισμοί ή άλλες απώλειες της μπαταρίας και σημαντικοί παράγοντες στη διαδικασία της αυτοεκφόρτισης είναι τα ενεργά υλικά και τα στοιχεία του κράματος του πλέγματος που επιλέχθηκαν κατά τον σχεδιασμό του συσσωρευτή. Τυπικό μέγεθος αυτοεκφόρτισης είναι η απώλεια του 0,7% του SOC ανά ημέρα και για το λόγο αυτό, οι συσσωρευτές πρέπει να βρίσκονται σε συνθήκες συντηρητικής φόρτισης ακόμα και αν δεν υπάρχει κατανάλωση. Τυπικοί ρυθμοί αυτοεκφόρτισης ενός συσσωρευτή είναι:

- Σε θερμοκρασία 5° C, η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 2% ανά μήνα.
- Σε θερμοκρασία 15° C, η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 4% ανά μήνα.
- Σε θερμοκρασία 25° C, η χωρητικότητα ελαττώνεται κατά 10% ανά μήνα.

#### 4.8.5 Φόρτιση

Η φόρτιση του συσσωρευτή είναι η διαδικασία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος προς το συσσωρευτή. Οι μέθοδοι φόρτισης που εφαρμόζονται από τους ρυθμιστές φόρτισης στα φωτοβολταϊκά συστήματα, διαφέρουν γενικά από αυτές που εφαρμόζουν οι κατασκευαστές για να καθορίσουν τις επιδόσεις της μπαταρίας. Οι προδιαγραφές δεν περιορίζουν κατά κανόνα το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή εφόσον δεν γίνει υπέρβαση της τάσης εκλύσεως αερίων. Ωστόσο, η τάση εκλύσεως αερίων γίνεται μικρότερη καθώς το ρεύμα φόρτισης γίνεται μεγαλύτερο. Άλλος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για το επιδιωκόμενο SOC είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η χωρητικότητα του συσσωρευτή, μειώνεται όμως η τάση εκλύσεως αερίων. Έτσι, το μέγιστο SOC που μπορεί να επιτευχθεί σε δεδομένη θερμοκρασία, κατά κάποιο τρόπο φράσσεται από την τάση εκλύσεως αερίων.

#### 4.8.6 Χρόνος Ζωής Συσσωρευτή

Οι συσσωρευτές δεν πρέπει να υφίστανται παρατεταμένη φόρτιση σε πολύ υψηλή τάση γι' αυτούς (Overcharging), ούτε να εκφορτίζονται κάτω από ένα όριο (Overdischarging). Ο κανόνας αυτός είναι πολύ σημαντικός και καθορίζει το χρόνο ζωής τους. Η υπερφόρτιση έχει ως αποτέλεσμα την ηλεκτρόλυση και συνακόλουθα, την παραγωγή υδρογόνου με ταυτόχρονη έντονη ελάττωση της στάθμης του ηλεκτρολυτικού διαλύματος (απώλεια νερού). Ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών εκφράζεται σε κύκλους λειτουργίας, καθένας από τους οποίους περιλαμβάνει τις διαδικασίες εκφόρτισης και φόρτισής του. Η χωρητικότητα, C του συσσωρευτή δεν παραμένει σταθερή. Μειώνεται όσο αυξάνουν οι κύκλοι λειτουργίας. Ένας πρακτικός κανόνας που προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά των συσσωρευτών και ουσιαστικά περιγράφει το χρόνο ζωής τους, είναι ο ακόλουθος: Το γινόμενο βάθους εκφόρτισης επί τους κύκλους λειτουργίας είναι με καλή προσέγγιση σταθερό:

$$\beta_{εκφ} N_k = \text{σταθερό}$$

όπου  $N_k$  το πλήθος των κύκλων λειτουργίας του συσσωρευτή

#### 4.8.7 Συντελεστής Γήρανσης Συσσωρευτή

Η χωρητικότητα του συσσωρευτή ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου, δηλαδή, με την αύξηση του αριθμού των κύκλων λειτουργίας του. Η μείωση αυτή (γήρανση) πρέπει να

ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό της αρχικής χωρητικότητας του συσσωρευτή, ώστε μέσα στο χρόνο ζωής του να διατηρεί τη δυνατότητα να καλύπτει ημερησίως την ενέργεια που απαιτούν οι καταναλώσεις της εφαρμογής, με το αυτό βάθος εκφόρτισης,  $\beta$ . Η εμπειρία έχει δείξει ότι, η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μειώνεται σταδιακά και περί το πέρας της ζωής του έχει πέσει στο 80% της αρχικής ονομαστικής χωρητικότητάς του. Συνεπώς, ως τυπική τιμή του συντελεστή γήρανσης του συσσωρευτή λαμβάνεται η τιμή,  $n_{\gamma\beta} = 0,8$

#### 4.8.8 Συντελεστής Φόρτισης και Απόδοση

Τα αμπερώρια (Ah) που είναι απαραίτητα για τη φόρτιση ενός συσσωρευτή και την αύξηση του SOC κατά ένα συγκεκριμένο ποσοστό είναι κατά κανόνα περισσότερα από τα Ah που αποδίδει όταν εκφορτιστεί κατά το ίδιο ποσοστό του SOC. Έτσι, ορίζεται ο συντελεστής φόρτισης ως το κλάσμα της εισερχόμενης ποσότητας Ah προς την εξερχόμενη ποσότητα Ah, δηλαδή ισχύει:

$$\text{Απόδοση Ενέργειας} = \frac{\text{Εξερχόμενη Ενέργεια (kW)}}{\text{Εισερχόμενη Ενέργεια (kW)}}$$

Όταν φορτίζεται ένας συσσωρευτής, ένα ποσοστό της τάξεως του 10-20% της προσφερόμενης σ' αυτόν ενέργειας χάνεται, θερμαίνοντας τον ηλεκτρολύτη ή προκαλώντας ηλεκτρόλυση. Έτσι ένας συσσωρευτής χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο βαθμό απόδοσης ενέργειας,  $n_E$ . Ορίζεται ως ο λόγος του ηλεκτρικού έργου που αποδίδει ο συσσωρευτής κατά την εκφόρτιση ( $W = V I t$ ), δια του έργου που του προσφέρθηκε κατά την προηγούμενη φόρτισή του. Τυπική τιμή 80-85%.

$$n_E = \frac{W_{\text{εκφόρτισης}}}{W_{\text{φόρτισης}}}$$

Εκτός από το βαθμό ενεργειακής απόδοσης, χρησιμοποιείται επίσης ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης φορτίου,  $n_q$ , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του φορτίου κατά την εκφόρτιση, προς το φορτίο κατά τη φόρτιση. Τυπική τιμή  $n_q = 90\%$ .

$$n_q = \frac{Q_{\text{εκφόρτισης}}}{Q_{\text{φόρτισης}}}$$

#### **4.9 Οι Συσσωρευτές στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα**

Για τη σωστή εκλογή, σχεδίαση και λειτουργία των συσσωρευτών στα φωτοβολταϊκά συστήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές παράμετροι όπως:

- Τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.
- Οι συσκευές προσαρμογής και ελέγχου της ισχύος.
- Το φορτίο.
- Οι μετεωρολογικές συνθήκες.
- Ο συγκεκριμένος τύπος του συσσωρευτή.

##### **4.9.1 Κύκλος Λειτουργίας σε Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα με Εφεδρική Πηγή**

Ο τρόπος με τον οποίο θα λειτουργήσει ένας συσσωρευτής επηρεάζει τόσο τον τύπο όσο και την ιδιαίτερη κατασκευή των στοιχείων του. Σ' ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ο κύκλος λειτουργίας των συσσωρευτών καθορίζεται κυρίως από:

- Το προφίλ του φορτίου.
- Την προσπίπτουσα ακτινοβολία και τη χρονική σχέση της με το φορτίο.
- Την ύπαρξη ή μη εφεδρικής πηγής ενέργειας.

##### **4.9.2 Αυτόνομα συστήματα με εφεδρική πηγή ενέργειας**

Στα συστήματα αυτά υπάρχει μια εφεδρική πηγή (ντιζελογεννήτρια), ενώ για περιόδους χαμηλής ακτινοβολίας ή μεγάλης ζήτησης υπάρχουν και συσσωρευτές με χωρητικότητα που κυμαίνεται από μερικές ώρες μέχρι μερικές μέρες, ανάλογα με το ποσοστό του φορτίου που πρέπει να καλύψει το ηλιακό σύστημα και τις κλιματολογικές συνθήκες. Γενικά ο κύκλος λειτουργίας είναι παρόμοιος με των συσσωρευτών των διασυνδεδεμένων στο δίκτυο. Ωστόσο αν υπάρχει διαθέσιμη αρκετή χωρητικότητα (μερικές μέρες) προκύπτουν κάπως χαμηλότεροι ρυθμοί φόρτισης/εκφόρτισης και λιγότεροι πλήρεις κύκλοι στη μονάδα του χρόνου.

#### 4.9.3 Ονομαστική Χωρητικότητα και Παρεχόμενη Ισχύς από τους Συσσωρευτές κατά τη Λειτουργία τους σε Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω καταλήγουμε σε ένα συσσωρευτή ονομαστικής χωρητικότητας  $C_N$ . Η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα  $C$  δίνεται από:

$$C = C_N \times \beta$$

όπου  $\beta$  είναι το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή. Η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποταμιευθεί και να ανακτηθεί σε ιδανικές συνθήκες, σε κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης είναι:

$$E = C \times \beta = C_N \times \beta \times V$$

Ο συντελεστής απόδοσης των συσσωρευτών μολύβδου  $\alpha$ , δηλαδή ο λόγος της μέγιστης ποσότητας της ενέργειας που ανακτάται προς την ενέργεια που είχε απορροφηθεί από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια σε κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης είναι περίπου 85%. Επομένως, αν η ηλεκτρική ενέργεια που ζητάμε να δίνει ο συσσωρευτής είναι  $E$  η ενεργός χωρητικότητα του  $C$  θα πρέπει να αντιστοιχεί σε ενέργεια φόρτισης  $E_\varphi$ , ίση με:

$$E_\varphi = \frac{E}{\alpha}$$

Και τότε η ονομαστική χωρητικότητά του είναι:

$$C_N = \frac{E_\varphi}{V \times \beta} = \frac{E}{\alpha \times \beta \times V}$$

## Κεφάλαιο 5

### Τα Ηλεκτρονικά των Φωτοβολταϊκών

#### 5.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα Φ/Β πλαίσιο είναι υπό μορφή συνεχούς ρεύματος (DC). Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (AC) είναι απαραίτητη για τη χρήση πολλών κοινών συσκευών όπως και για τη σύνδεση στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο και επιτυγχάνεται με ένα μετατροπέα τάσης συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα ή αλλιώς μετατροπέας DC-AC. Η αποδοτικότητα των μετατροπέων είναι γενικά μεγαλύτερη από 90%, όταν λειτουργούν πάνω από το 10% της μέγιστης παραγωγής τους και μπορεί να φτάσει έως και 96%. Οι μετατροπείς που συνδέονται άμεσα με τα φωτοβολταϊκά ενσωματώνουν μια ηλεκτρονική διάταξη ανίχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος (Maximum Power Point Tracker - MPPT), ρυθμίζοντας συνεχώς τη σύνθετη αντίσταση φορτίων έτσι ώστε ο μετατροπέας να εξάγει πάντα τη μέγιστη ενέργεια από το σύστημα.

Οι μετατροπείς υπάγονται σε δύο-κύριες κατηγορίες: αυτο-συγχρονιζόμενος και συγχρονισμένος βάση μίας σύνδεσης. Ο πρώτος μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα, ενεργοποιούμενος από την πηγή ενέργειας, δηλαδή μόλις υπάρχει ρεύμα από τα Φ/Β τότε ενεργοποιείται για να μην σπαταλάει ρεύμα από τους συσσωρευτές. Αυτοί που υπάγονται στη δεύτερη κατηγορία ενεργοποιούνται και ελέγχονται από το δίκτυο. Αυτό είναι απαραίτητο για να διατηρήσει το δίκτυο σταθερή ποιότητα ρεύματος και να αποφευχθούν τυχόν ατυχήματα. Αυτής της κατηγορίας οι μετατροπείς σταματάνε όταν υπάρχει βλάβη στο δίκτυο για πρόληψη ηλεκτροπληξίας στα συνεργεία της ΔΕΗ. Παραδοσιακά, ένας μετατροπέας χρησιμοποιείται για ολόκληρη τη συστοιχία.

Ξεχωριστοί μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικές συστοιχίες Φ/Β σε περίπτωση που η εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγάλη. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοπιστία, καθώς εάν προκύψει κάποιο πρόβλημα σε μια μονάδα, απομονώνεται χωρίς να σταματήσει την παραγωγή το υπόλοιπο σύστημα.

#### 5.2 Μονάδες Μετατροπής Ισχύος

Μονάδες μετατροπής ισχύος είναι οι μονάδες εκείνες που αναλαμβάνουν την προσαρμογή μεταξύ συστοιχίας, συσσωρευτή, φορτίων και εφεδρικής πηγής ενέργειας (αν υπάρχει) μετατρέποντας την «ακατέργαστη» DC ισχύ εξόδου από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία σε ισχύ «κατάλληλης ποιότητας» και σύμφωνης με τις απαιτήσεις του φορτίου. Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία παράγει DC ισχύ με μεταβολές της τάσης της τάξης του 30%. Αν οι ανάγκες του φορτίου περιορίζονται σε DC ισχύ (π.χ. φωτισμός, DC κινητήρας, άλλα ωμικά φορτία) τότε ο

πιο απλός συνδυασμός είναι η απ' ευθείας σύνδεση της συστοιχίας με ένα συσσωρευτή, μέσω διόδου αντεπιστροφής και στη συνέχεια με το φορτίο. Η διάδος αντεπιστροφής τοποθετείται για αποφυγή της εκφόρτισης των συσσωρευτών διαμέσου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, αν μειωθεί σημαντικά η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συνδυασμός αυτός συνίσταται μόνο όταν το μέγιστο ρεύμα της συστοιχίας είναι μικρότερο από το 5% της χωρητικότητας των συσσωρευτών.

Σε πολλά DC συστήματα, οι μεταβολές της τάσης που οφείλονται σε μεταβολή των καιρικών συνθηκών και χειροτέρευση των χαρακτηριστικών τους κυττάρων λόγω γήρανσης, αντισταθμίζονται με έλεγχο της τάσης της συστοιχίας με τη βοήθεια ρυθμιστών τάση. Έτσι, παρέχεται ισχύς σε σταθερή τάση με σκοπό να προστατεύσουμε το συσσωρευτή και το φορτίο από ακραίες τιμές της τάσης με όλες τις γνωστές συνέπειες.

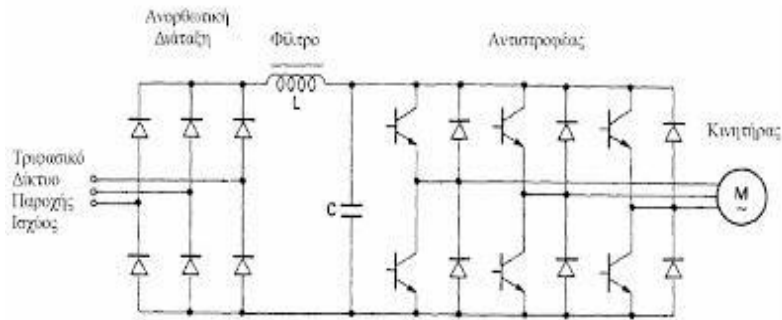
Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θέλουμε να εξάγουμε από τη συστοιχία το μέγιστο δυνατό ποσό ενέργειας, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή το σημείο λειτουργίας να αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Αν το σύστημα είναι αυτόνομο και περιλαμβάνει συσσωρευτές ο αριθμός των σε σειρά συνδεδεμένων στοιχείων των συσσωρευτών πρέπει να είναι κατάλληλος, ώστε η τάση του συσσωρευτή να βρίσκεται στη γειτονιά της τάσης που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος της συστοιχίας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας.

Σε κάθε περίπτωση, δεν υπάρχει αυτή η προσαρμογή λόγω μεταβολής της ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών (SOC), του ρυθμού φόρτισης/εκφόρτισης των συσσωρευτών, με συνέπεια τη μείωση του συνολικού βαθμού απόδοσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια μονάδα που ονομάζεται ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker), που ακολουθώντας κατάλληλη στρατηγική ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος επιτυγχάνει την απαιτούμενη προσαρμογή. Αν οι ανάγκες του φορτίου απαιτούν AC ισχύ (που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση) χρησιμοποιείται κι ένας αντιστροφέας, inverter, ώστε να μετατρέπει την DC σε AC ισχύ.

Επίσης, στις παραπάνω μονάδες μετατροπής της ισχύος μπορούμε να κατατάξουμε και τις μονάδες ελέγχου του συστήματος που μπορεί να περιλαμβάνουν: αυτόματη εκκίνηση και θέση εκτός λειτουργίας, εκτίμηση του SOC των συσσωρευτών, θέση σε λειτουργία της εφεδρικής πηγής ενέργειας, κατανομή φορτίου, εντοπισμό σφαλμάτων/αυτόματη διόρθωση, διακόπτες, γείωση, άλλα συστήματα προστασίας, συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής δεδομένων κλπ.

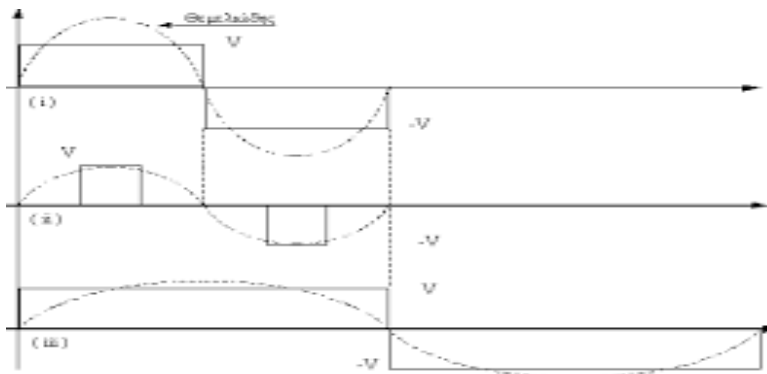
### **5.3 Μετατροπείας (inverter) DC-AC**

Ο Inverter είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη (μονοφασική ή τριφασική). Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε περιπτώσεις που διαθέτουμε πηγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσεως και καταναλωτές εναλλασσόμενης, όπως συμβαίνει στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές οικιακής χρήσεως. Αποτελείται από ηλεκτρονικούς διακόπτες (bipolar transistors ισχύος, MOSFETs, thyristors κλπ), η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σειράς τετραγωνικών παλμών διαδοχικά ορθών και ανεστραμμένων (Inversion).



Εικόνα 5.1 : Ανορθωτική διάταξη [6]

Μία βελτιωμένη έκδοση inverter αποτελεί εκείνος του οποίου η τάση εξόδου παρουσιάζεται με τη μορφή του διαμορφωμένου ημιτόνου (modified sine inverter), όπως εμφανίζεται στο σχήμα



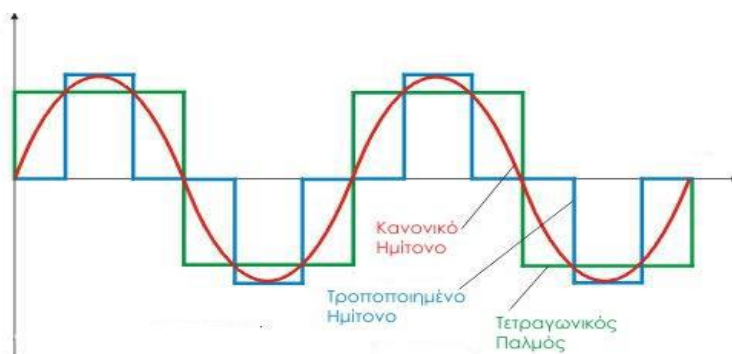
Εικόνα 5.2 : Τάση εξόδου inverter [6]

Με κατάλληλη ρύθμιση των χρόνων κλεισίματος – ανοίγματος των διακοπών, επιτυγχάνουμε μικρή τροποποίηση της κυματομορφής εξόδου του, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι ο αρνητικός τετραγωνικός παλμός είναι μετατοπισμένος χρονικά, σε σχέση με το θετικό, κατά  $T/6$  της περιόδου της συνολικής κυματομορφής. Το χρονικό εύρος των τετραγωνικών τμημάτων είναι  $T/3$ . Το πλεονέκτημα αυτής της διαμορφωμένης τετραγωνικής κυματομορφής είναι ότι περιορίζεται το μέγεθος των ανωτέρων αρμονικών και άρα περιορίζεται δραστικά η παραμόρφωση σήματος.



Η περίπτωση με μετατόπιση  $\tau = T/6$  μεταξύ των αντεστραμμένων παλμών χαρακτηρίζεται από μικρότερη παραμόρφωση, που επιβάλουν οι ανώτερες αρμονικές στο σήμα της θεμελιώδους. Οι inverters αυτού του είδους χρησιμοποιούνται, ευρέως, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στις συσκευές που τροφοδοτούν και παρουσιάζουν αρκετά καλή απόδοση (μέχρι και 96%, σε πλήρες φορτίο).

Γενικά, η απόδοση των inverters είναι αρκετά υψηλή εξαρτώμενη από το ποσοστό του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί. Απαιτείται υψηλή απόδοση, όχι μόνο όταν τροφοδοτείται το πλήρες φορτίο (100%), αλλά και όταν αυτό είναι μειωμένο. Συγκεκριμένα, βασικό απαιτούμενο χαρακτηριστικό ενός inverter είναι η υψηλή απόδοση (>90%) ακόμα και όταν το φορτίο είναι μόνο 10% του πλήρους. Σημειώνεται, επίσης, ότι η λειτουργία τους συνοδεύεται, κατά περίπτωση από παραγωγή μεγάλου πλήθους αρμονικών υψηλών συχνοτήτων (κυρίως με τον απλό τετραγωνικό παλμό), που περιορίζονται με ειδικά ηλεκτρονικά φίλτρα.



Εικόνα 5.3 : Κανονικό ημίτονο σε σύγκριση με τετραγωνικό παλμό [6]

## 5.4 Σχεδίαση ενός DC-AC Μετατροπέα

### 5.4.1 Πλευρά Εισόδου του Μετατροπέα ( Input side)

Επί της ουσίας πρόκειται για την πλευρά του μετατροπέα που συνδέεται με την έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, η οποία παρέχει ισχύ υπό συνεχή dc τάση και ρεύμα. Τα μεγέθη που παραθέτουμε σε αυτήν την παράγραφο αναφέρονται στην dc πλευρά της συσκευής, δηλαδή σε συνεχές ρεύμα και τάση.

### Κατάσταση λειτουργίας

Ο μετατροπέας έχει ενσωματωμένες στην είσοδο του ηλεκτρονικές διατάξεις που επεξεργάζονται κατάλληλα το ρεύμα και την τάση εξόδου της φ/β συστοιχίας, ώστε για κάθε χρονική στιγμή να απορροφάμε τη μέγιστη ισχύ από τη συστοιχία. Η παραγωγή και άρα απορρόφηση μέγιστης ισχύος όπως είδαμε αντιστοιχεί στο MPP σημείο λειτουργίας. Με τη

χρήση τέτοιων διατάξεων το σημείο λειτουργίας διατηρείται σταθερά στο MPP, προφανώς για τις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η κατάσταση λοιπόν λειτουργίας του μετατροπέα λαμβάνεται να αντιστοιχεί πάντα στο MPP.

#### Ελάχιστη και μέγιστη MPP τάση

Οι δύο αυτές χαρακτηριστικές τιμές της τάσης ορίζουν ένα «παράθυρο τάσης», άνω και κάτω όριο τάσης, μέσα στο οποίο ο inverter δύναται να αναζητήσει το MPP. Όταν καθορίζουμε την τάση MPP εξόδου της συστοιχίας αυτή θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στο «παράθυρο τάσης» του μετατροπέα. Το MPP όπως είδαμε καθορίζεται από το ρεύμα  $I_{MPP}$  και την τάση  $V_{MPP}$ . Τα μεγέθη αυτά παρέχονται από τους κατασκευαστές των πλαισίων αλλά αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC), όπου η θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων λαμβάνεται  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Στις πραγματικές συνθήκες, η θερμοκρασία λειτουργίας είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη και το MPP μετατοπίζεται. Έτσι μια καλή προσέγγιση για τον υπολογισμό του MPP της γεννήτριας, ώστε να εξεταστεί αν αυτό βρίσκεται μέσα στο παράθυρο τάσης είναι η θερμοκρασία να λαμβάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας για  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  με  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Μέγιστη τάση

Είναι η απόλυτη μέγιστη dc τάση κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες που μπορεί να δεχθεί στην είσοδό του ο μετατροπέας. Η μέγιστη τάση εξόδου της συστοιχίας δεν πρέπει να υπερβαίνει αυτή την τιμή. Πρέπει λοιπόν να εξετάζουμε αν η  $V_{oc}$  της συστοιχίας είναι μικρότερη από το συγκεκριμένο όριο τάσης. Για να είμαστε στην ασφαλή πλευρά, ή ακτινοβολία λαμβάνεται στους 1000, ενώ για τη θερμοκρασία μια καλή προσέγγιση είναι  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  για την Ευρώπη. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η  $V_{oc}$  ελαττώνεται.

#### Κατώφλι ισχύος (Power threshold)

Είναι η ελάχιστη ισχύς εισόδου που χρειάζεται ο inverter για να λειτουργήσει. Μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ισχύς που καταναλώνει ο ίδιος ο inverter για τη λειτουργία του.

#### Μέγιστο φωτοβολταϊκό ρεύμα ( $I_{pvmax}$ )

Είναι το απόλυτο μέγιστο αποδεκτό ρεύμα στην είσοδο του inverter. Για τη διαστασιολόγηση του συστήματος συνήθως εξετάζεται η απαίτηση το  $I_{mpp}$  της συστοιχίας να είναι μικρότερο από την παραπάνω τιμή.

#### Λοιπά στοιχεία

Άλλα στοιχεία τα οποία μπορεί κανείς να βρει στους καταλόγους με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κατασκευαστών, αλλά δε χρησιμοποιούνται από το συγκεκριμένο πρόγραμμα για το σχεδιασμό και την εξομοίωση είναι τα εξής:

Η Ονομαστική Φωτοβολταϊκή Ισχύς που είναι μια συνήθης καθοριζόμενη παράμετρος για τους inverter. Εννοείται ως η συνιστώμενη ονομαστική ισχύς της φ/β συστοιχίας σε STC συνθήκες.

Η Μέγιστη Φωτοβολταϊκή Ισχύς η τιμή της οποίας μπορεί να δίνεται μερικές φορές. Η σημασία της δεν είναι σαφώς ορισμένη. Μπορεί να γίνει αντιληπτή, ως η απόλυτη μέγιστη ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε STC συνθήκες αν και ο ακριβής της ορισμός διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή.

#### 5.4.2 Πλευρά Εξόδου του Μετατροπέα

Εννοείται η πλευρά του μετατροπέα που συνδέεται στο δίκτυο ή εν γένει στο φορτίο που τροφοδοτεί. Προφανώς στην πλευρά εξόδου έχουμε εναλλασσόμενη (AC) τάση και ρεύμα. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που εξετάζονται στις επόμενες υποπαραγράφους αναφέρονται στην ac πλευρά του μετατροπέα.

#### Ονομαστική ισχύς

Η ονομαστική ισχύς είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μεγέθη για τους μετατροπείς. Εννοείται ως η ισχύς που μπορεί να παρέχει διαρκώς στο δίκτυο. Όταν έχουμε υπέρβαση των ορίων, δηλαδή σε ακραίες περιπτώσεις υπερπαραγωγής ισχύος στο MPP, εφαρμόζεται κάποια μέθοδος περιορισμού, π.χ. μετατόπιση του σημείου λειτουργίας της I -V χαρακτηριστικής. Η ονομαστική ισχύς είναι το μόνο από τα μεγέθη που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης.

#### Μέγιστη AC ισχύς

Η σημασία της δεν είναι σαφώς ορισμένη αν και μερικές φορές παρέχεται από τους κατασκευαστές. Μπορεί να εννοηθεί ως η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει ο μετατροπέας στην έξοδο του για ένα χρονικό διάστημα, μετά την υπέρβαση του οποίου επέρχεται η υπερθέρμανση της συσκευής οπότε και πρέπει να σταματήσει η λειτουργία της στο σημείο αυτό. Δεν χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα.

#### Ονομαστική AC τάση

Είναι η τάση υπό την οποία παρέχει την ονομαστική ισχύ του ο μετατροπέας στην έξοδό του. Εξαρτάται από την τάση του δικτύου για την οποία είναι σχεδιασμένος να συνδέεται ο μετατροπέας. Για μετατροπείς που συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο XT η ονομαστική πολική τάση εξόδου της συσκευής είναι στα 0.4 kV. Υπάρχουν και μετατροπείς με τάση εξόδου στα 20 kV.

### Ονομαστικό AC ρεύμα

Είναι το ρεύμα που δίνει στην έξοδο του ο μετατροπέας για ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή ονομαστική τάση και ονομαστική ισχύ.

### Μονοφασική ή τριφασική σύνδεση

Προφανώς αναφέρεται στον τρόπο σύνδεσης του μετατροπέα στην έξοδο του. Συνήθως έχουμε μονοφασική σύνδεση για μετατροπείς μικρότερους των 3 kW, ενώ τριφασική σύνδεση για μεγαλύτερους μετατροπείς.

### Συχνότητα δικτύου

Οι περισσότεροι μετατροπείς μπορούν να συνδεθούν σε δίκτυο με συχνότητα 50 Hz και 60 Hz. Για την Ελλάδα λαμβάνουμε 50 Hz.

### Απόδοση

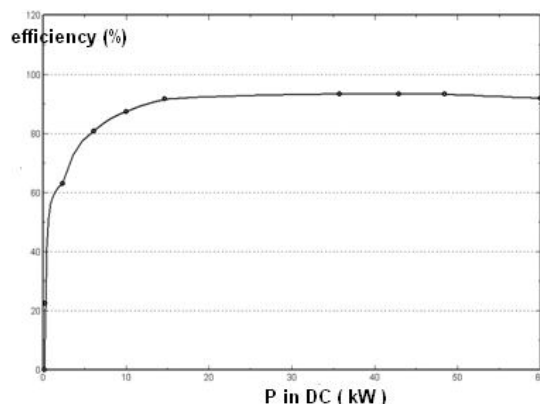
Γενικά οι μετατροπείς χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (93%-97%), η οποία όμως εξαρτάται από τη στιγμιαία ισχύ. Υπάρχει η απαίτηση ο μετατροπέας να έχει μεγάλη απόδοση και για μικρή ισχύ, συγκεκριμένα 90% για 10% της ονομαστικής ισχύος. Προφανώς αναφέρεται στον τρόπο σύνδεσης του μετατροπέα στην έξοδο του. Συνήθως έχουμε μονοφασική σύνδεση για μετατροπείς μικρότερους των 3 kW, ενώ τριφασική σύνδεση για μεγαλύτερους μετατροπείς.

### Συχνότητα δικτύου

Οι περισσότεροι μετατροπείς μπορούν να συνδεθούν σε δίκτυο με συχνότητα 50 Hz και 60 Hz. Για την Ελλάδα λαμβάνουμε 50 Hz.

### Απόδοση

Γενικά οι μετατροπείς χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (93%-97%), η οποία όμως εξαρτάται από τη στιγμιαία ισχύ. Υπάρχει η απαίτηση ο μετατροπέας να έχει μεγάλη απόδοση και για μικρή ισχύ, συγκεκριμένα 90% για 10% της ονομαστικής ισχύος.



Εικόνα 5.4: Απόδοση μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος εισόδου της συσκευής

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ακόμα ότι οι κατασκευαστές δίνουν την «ευρωπαϊκή απόδοση», που επιχειρεί να περιγράψει την απόδοση της συσκευής για τη μέση παραγωγή ισχύος στις συνθήκες λειτουργίας ενός έτους. [7]

### **5.5 Ελεγκτής φόρτισης**

Η φόρτιση των συσσωρευτών μέσω της φωτοβολταϊκής συστοιχίας απαιτεί συνεχή έλεγχο της κατάστασης φόρτισης τους, ώστε όταν αυτοί φτάσουν στην κατάσταση μέγιστης φόρτισης να διακόπτεται η διαδικασία. Έτσι αποφεύγεται η υπέρταση του συσσωρευτή, η οποία θα είχε ως συνέπεια την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου λόγω ηλεκτρόλυσης και συνακόλουθα μείωση της στάθμης του διαλύματος. Αντίστοιχα, απαιτείται έλεγχος του συσσωρευτή όσο αυτός τροφοδοτεί την κατανάλωση, ώστε να προληφθεί η καταστροφική κατάσταση υπερεκφόρτισης.

Γενικά ο ελεγκτής φόρτισης- εκφόρτισης, στην πιο περιορισμένη του μορφή, εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση της υπερφόρτισης, και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης, στην περίπτωση της υπερεκφόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις, η διακοπή αυτή προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει, προς τα άνω και αντίστοιχα προς τα κάτω ορισμένα όρια τάσης, όπου ενεργοποιούνται οι ηλεκτρικοί διακόπτες.

Μια μονάδα ελέγχου φόρτισης- εκφόρτισης, περιλαμβάνει σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων είτε μικροελεγκτές, που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες, είτε ηλεκτρομηχανικούς (ρελέ), είτε ηλεκτρονικούς ισχύος. Σε κάθε περίπτωση, στο κύκλωμα παρεμβάλλεται μια διόδος, για την προστασία του συστήματος αποθήκευσης από εκφόρτιση, μέσω της διάταξης ή του υπόλοιπου συστήματος.

### 5.5.1 Παράλληλος Ρυθμιστής Φόρτισης (Shunt controller)

Χαρακτηριστικό αυτού του ρυθμιστή είναι το ότι το ελεγχόμενο στοιχείο είναι συνδεδεμένο παράλληλα με το φωτοβολταϊκό σύστημα (shunt controller), με δυνατότητα να λειτουργεί, είτε μεταβαλλόμενο γραμμικά, ανάλογα με τη μέγιστη φόρτιση (Σχήμα 5.10(α)), είτε ως διακόπτης ON/OFF (Σχήμα 5.10(β)). Στην περίπτωση του παράλληλου ρυθμιστή, όταν επιτευχθεί η μέγιστη φόρτιση (όριο τάσης) το ελεγχόμενο σημείο βραχυκυκλώνει το φωτοβολταϊκό σύστημα, χωρίς να προκαλείται καμία βλάβη σε αυτό. Έτσι, απομονώνεται το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα αποθήκευσης της.

### 5.5.2 Ρυθμιστής φόρτισης σε σειρά (Series controller)

Η βασική αρχή λειτουργίας της δεύτερης διάταξης ελέγχου φόρτισης βασίζεται στη χρήση δύο διακοπών S1, S2. Ο πρώτος διακόπτει το ρεύμα από το σύστημα ενέργειας στο σύστημα αποθήκευσης, όταν η τάση φόρτισης φτάσει στο όριό της. Την ίδια στιγμή ενεργοποιείται ο διακόπτης S2, ο οποίος εισάγει στην έξοδο του συστήματος ενέργειας, ένα στοιχείο απόδοσης ( $\Sigma$ ) της επί πλέον ενέργειας, την οποία δεν έχει την δυνατότητα να απορροφήσει το σύστημα αποθήκευσης. Το στοιχείο απόδοσης, πρέπει να μπορεί να αποβάλλει εύκολα την αποδιδόμενη σε αυτό ενέργεια, προς το περιβάλλον. Ο ρυθμιστής αυτός ονομάζεται ρυθμιστής με το ελεγχόμενο στοιχείο (S1) σε σειρά (Series controller) και μπορεί να ελέγξει τη φόρτιση συσσωρευτών από το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις του ρυθμιστή, με διαφορές που εντοπίζονται στον τρόπο που προσεγγίζεται η τελική κατάσταση φόρτισης, από καθεμιά από αυτές. Η διάταξη φόρτισης συμπληρώνεται από παρόμοια διάταξη ελέγχου εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, με σκοπό την προστασία του συσσωρευτή από υπερεκφόρτιση (overdischarging) και η οποία συνήθως ενσωματώνεται στην πρώτη. Διακόπτει το κύκλωμα παροχής ενέργειας από το συσσωρευτή στην κατανάλωση, όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή μειούμενη φτάσει ορισμένη τιμή (disconnect setpoint).

## Κεφάλαιο 6

### ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΟ ΖΕΥΓΟΣ

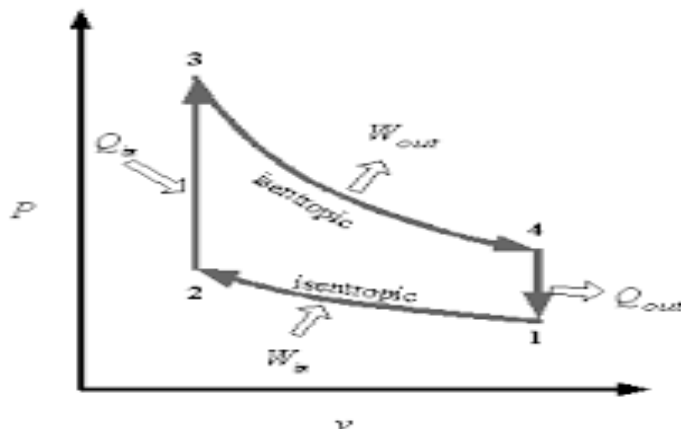
#### 6.1 Εισαγωγή

Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος είναι ένα ζεύγος μηχανών που αποτελείται από μια κινητήρια μηχανή (παλιότερα εξωτερικής καύσης, σήμερα εσωτερικής) και μια ηλεκτρογεννήτρια. Σήμερα κατασκευάζονται Η/Ζ διαφόρων μεγεθών και τύπων, ανάλογα με το σκοπό και την ισχύ τους, το είδος του ρεύματος που παράγουν κ.ά.. Στα Η/Ζ μεγάλης ισχύος χρησιμοποιείται πετρελαιοκινητήρας με καύσιμο πετρέλαιο diesel (ντιζελοκινητήρας), παρόμοιος με αυτόν των πετρελαιοκίνητων αυτοκινήτων, αλλά με μεγαλύτερη ιπποδύναμη. Αντίθετα, στα μικρής ισχύος Η/Ζ χρησιμοποιείται ένας μικρός βενζινοκινητήρας. Επίσης, τα Η/Ζ μεγάλης ισχύος διαθέτουν μια τριφασική σύγχρονη γεννήτρια (εναλλακτήρα), ενώ τα Η/Ζ μικρότερης ισχύος μια μονοφασική γεννήτρια (φορητή ηλεκτρογεννήτρια)

#### 6.2 Μηχανές εσωτερικής καύσης

Για το κινητήριο σύστημα του Η/Ζ χρησιμοποιούνται μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ), οι οποίες διακρίνονται σε εμβολοφόρες και σε περιστροφικές, με τις δεύτερες να μην είναι τόσο δημοφιλείς. Οι εμβολοφόρες μηχανές χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τους κινητήρες otto (ή βενζινοκινητήρες) και τους κινητήρες diesel και καθένας εξ' αυτών λειτουργεί με βάση τον αντίστοιχο θερμικό κύκλο λειτουργίας, δηλαδή τον κύκλο otto ή τον κύκλο diesel. Ο κύκλος diesel έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται σήμερα σε εφαρμογές που απαιτούνται βαρέως τύπου κινητήρες, αφού έχει τα εξής πλεονεκτήματα σε σχέση με τον κύκλο otto:

- Παρουσιάζει μεγάλο βαθμό συμπίεσης (άρα μειωμένη κατανάλωση).
- Ο βαθμός απόδοσης είναι ανεξάρτητος από το φορτίο.
- Εκπέμπει λιγότερο CO στην ατμόσφαιρα.
- Καταναλώνει καύσιμο λιγότερο πηκτικό από τη βενζίνη, άρα και φθηνότερο. Ο κύκλος diesel είναι ένας ιδανικός τυποποιημένος κύκλος του αέρα που αποτελείται από τέσσερα στάδια, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 6.1 και συνοψίζονται ως εξής



Εικόνα 6.1 : Κύκλος Diesel

- 1 → 2: Ισεντροπική (αδιαβατική) συμπίεση
- 2 → 3: Αντιστρέψιμη θέρμανση υπό σταθερή πίεση
- 3 → 4: Ισεντροπική (αδιαβατική) εκτόνωση
- 4 → 1: Ισόογκη αποβολή θερμότητας. Ο θεωρητικός κύκλος λειτουργίας του τετράχρονου πετρελαιοκινητήρα ολοκληρώνεται με τέσσερις διαδρομές του εμβόλου ή δύο διαδρομές του στροφαλοφόρου άξονα

Στο σχήμα βλέπουμε να εισρέει αέρας στον κύλινδρο (a) από την βαλβίδα εισαγωγής, ενώ στο δεύτερο κύλινδρο (b) (όπου έχουν κλείσει πλέον οι βαλβίδες) ο αέρας βρίσκεται υπό πίεση 30-40 bar και θερμοκρασία 600-700 οC. Στον αμέσως επόμενο κύλινδρο (c) εγχέονται σταγόνες πετρελαίου, το οποίο αναφλέγεται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, κινώντας το έμβολο. Στον τελευταίο κύλινδρο (d) βλέπουμε τη βαλβίδα εξαγωγής να αποβάλει από το θάλαμο του κυλίνδρου τα καυσαέρια και τον κινητήρα να έχει ολοκληρώσει έναν κύκλο λειτουργίας.



### **6.3 Σύγχρονες μηχανές**

Το ρόλο της γεννήτριας του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους συνήθως αναλαμβάνει μια σύγχρονη μηχανή. Αποτελείται από το δρομέα, που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και από το στάτη που φέρει ένα τριφασικό τύλιγμα. Ο στάτης είναι μία κοίλη κυλινδρική κατασκευή από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων, που φέρει διαμήκεις αύλακες στην εσωτερική του επιφάνεια [50]. Στις αύλακες αυτές τοποθετούνται τα τυλίγματα του στάτη, που διευθετούνται σε τρεις συμμετρικές ζώνες (μία για κάθε φάση), οι οποίες απέχουν μεταξύ τους κατά 120°. Ο δρομέας είναι μία συμπαγής σιδηρομαγνητική κατασκευή, που τοποθετείται στον άξονα της μηχανής και περιστρέφεται μέσα στο στάτη. Στο δρομέα τυλίγεται, επίσης, το τύλιγμα πεδίου, που τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς ρεύματος, τη διεγέρτρια. Αυτή μπορεί να είναι μία γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που προσαρμόζεται στον ίδιο άξονα με αυτόν της μηχανής ή μία ξεχωριστή πηγή συνεχούς ρεύματος που συνδέεται στο τύλιγμα του πεδίου με ψήκτρες.

Ο χαρακτηρισμός «σύγχρονη» προέρχεται από το γεγονός, ότι ο δρομέας στρέφεται σύγχρονα (με την ίδια ταχύτητα) με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται από τη διέγερση του συνεχούς ρεύματος.

Ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα διακρίνουμε δύο είδη μηχανών, τη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα (που είναι ουσιαστικά δρομέας δύο πόλων) και τη μηχανή με έκτυπους πόλους. Ο συμπαγής δρομέας του πρώτου τύπου φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα διέγερσης και προστατεύεται με σφήνες έναντι των φυγοκεντρικών δυνάμεων. Οπότε, συνήθως χρησιμοποιείται σε γεννήτριες υψηλής ταχύτητας. Ο δεύτερος τύπος μηχανών έχει εξέχοντες πόλους, γύρω από τους οποίους τυλίγεται το τύλιγμα διέγερσης και χρησιμοποιείται σε γεννήτριες μικρής ταχύτητας. Τέλος, ο δρομέας των σύγχρονων μηχανών και των δύο τύπων φέρει ως επί το πλείστον ένα ακόμη τύλιγμα, που ονομάζεται τύλιγμα απόσβεσης. Αυτό έχει ως σκοπό να αποσβένει τις ταλαντώσεις του δρομέα, να βοηθάει στην εκκίνηση της Σ.Μ. μέχρι αυτή να φτάσει το σύγχρονο αριθμό στροφών και να αποσβένει το αριστερόστροφο μαγνητικό πεδίο, το οποίο δρα αντίθετα του κανονικού (δεξιόστροφου).

### **6.4 Κριτήρια επιλογής Η/Ζ**

Ένα Η/Ζ συνοδεύεται συνήθως (ανάλογα με το μέγεθός του και την εγκατάσταση που πρέπει να καλύψει) από ένα ειδικό σύστημα σταθεροποίησης τάσης (automatic voltage regulator-AVR). Το σύστημα αυτό επιτρέπει να τροφοδοτηθούν φορτία ευαίσθητα στις αλλαγές της τιμής της τάσης. Το ζητούμενο κατά την επιλογή ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους είναι η κάλυψη της αναμενόμενης από το μικροδίκτυο ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με το ελάχιστο δυνατό κόστος λειτουργίας. Στην περίπτωση μεγάλων εγκαταστάσεων, η αναμενόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνάρτηση του χρόνου κι η γεννήτρια θα πρέπει να είναι

σε θέση να καλύψει τουλάχιστον το μέγιστο αυτής της συνάρτησης. Προκειμένου να μπορούν να καλυφθούν και κάποιες απρόβλεπτες αιχμές φορτίου, η επιλογή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη ένα συντελεστή ασφάλειας της τάξης του 20-25%. Επομένως, το κατάλληλο H/Z επιλέγεται με βάση το μέγιστο σημείο της αναμενόμενης καμπύλης ζήτησης φορτίου, τον επιθυμητό συντελεστή ασφάλειας και τα σχετικά οικονομικά κριτήρια (κόστος απόκτησης, κόστος συντήρησης, κλπ.)

## **6.5 Φωτοβολταϊκό Υβριδικό Σύστημα με Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος**

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στο κόστος μιας αυτόνομης ντιζελογεννήτριας είναι το γεγονός ότι η τιμή του αργού πετρελαίου αυξάνεται και σαν συνέπεια αυτού και η τιμή σε εθνικό επίπεδο του πετρελαίου έχει αυξηθεί κατά 400% τα τελευταία 10 έτη. Επιπλέον η χρήση μιας ντιζελογεννήτριας για την παραγωγή ενέργειας όλο το 24ωρο σημαίνει ότι αυτή θα πρέπει να αντικαθίσταται κάθε έτος ή να απαιτεί γενική επισκευή. Επιπλέον τα τρέχοντα έξοδα της επένδυσης αυτής αυξάνουν το συνολικό κόστος λειτουργίας της. Ακόμη σημαντική οικονομική επιβάρυνση αποτελούν και τα λειτουργικά έξοδα της ντιζελογεννήτριας τα οποία και είναι η μηνιαία συντήρηση, τα ανταλλακτικά, το κόστος καυσίμων αλλά και η μεταφορά τους και τέλος ο καθαρισμός και το λάδι της μηχανής.

Μια γεννήτρια ντίζελ, αν και έχει μικρό κόστος αγοράς, έχει γενικά υψηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, ενώ είναι επιβαρυντική για το περιβάλλον λόγω των αερίων που παράγονται από την καύση του πετρελαίου. Χαρακτηριστικό είναι ότι σε χαμηλό, σχεδόν μηδενικό φορτίο, η ντιζελογεννήτρια χρησιμοποιεί το 30% του καυσίμου που θα χρησιμοποιούσε σε πλήρες φορτίο. Αυτά τα προβλήματα εξαλείφονται με τη συνεργασία φωτοβολταϊκών στοιχείων με ντιζελογεννήτρια και μπαταρίες έτσι ώστε να ομαλοποιείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και να μειώνεται το κόστος της.

Η βέλτιστη επιλογή της ισχύος των φωτοβολταϊκών λαμβάνει πρωτίστως υπόψη την αξιολόγηση του ποσού της προσπίπτουσας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, με μονάδα μέτρησης τα W/m<sup>2</sup>. Συνήθως ενδιαφέρει η ολική ηλιακή ακτινοβολία στη διάρκεια μιας ώρας, η οποία οδηγεί στην εκτίμηση της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ επίσης σημαντικές πληροφορίες είναι η ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία και η μηνιαία ολική ακτινοβολία. Στη συνέχεια πρέπει να επιλεχτεί ο τύπος και η ισχύς της ντιζελογεννήτριας που θα ενσωματωθεί στον υβριδικό σταθμό. Μια γεννήτρια βενζίνης είναι πιο οικονομική από μία ντιζελογεννήτρια, αλλά έχει μικρότερη διάρκεια ζωής και μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας. Συνήθως γεννήτριες βενζίνης χρησιμοποιούνται όταν το σύστημα έχει διαστασιολογηθεί έτσι ώστε οι ΑΠΕ να καλύπτουν εξολοκλήρου το φορτίο και το χρόνο που δε μπορούν να ανταποκριθούν. Οι γεννήτριες βενζίνης τροφοδοτούν με ισχύ και αποθηκεύουν ενέργεια στα μέσα αποθήκευσης, τα οποία είναι κατά κύριο λόγο μπαταρίες.

Αν υπάρχουν όμως μεγάλες διακυμάνσεις στην καμπύλη του φορτίου τότε καταλληλότερη είναι η ντιζελογεννήτρια, έτσι ώστε να καλύπτει με μικρό κόστος τις αιχμές του ημερήσιου φορτίου ή γενικά όταν η διαστασιολόγηση είναι τέτοια ώστε οι ΑΠΕ να καλύπτουν μερικώς το φορτίο. Εφόσον επιλεγεί το είδος της γεννήτριας που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να γίνει

η διαστασιολόγησή του, η οποία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Ο κυριότερος από αυτούς είναι η αιχμή του φορτίου. Δηλαδή θα πρέπει η γεννήτρια να έχει την ικανότητα να καλύπτει την αιχμή του φορτίου. Επομένως παράγοντας είναι το είδος του φορτίου που πρέπει να καλυφθεί. Έτσι, αν το φορτίο είναι για παράδειγμα ωμικό τότε δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις από τη γεννήτρια για σταθερή συχνότητα του δικτύου, του οποίου αποτελεί πηγή. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική σχεδιασμού του υβριδικού συστήματος όπου ο αντιστροφέας συνήθως δε λειτουργεί ταυτόχρονα με τη ντιζελογεννήτρια και η διαστασιολόγηση του ανορθωτή συνήθως καθορίζεται από τη χωρητικότητα των μπαταριών.

Μια άλλη λύση είναι οι δύο μετατροπείς ισχύος να αποτελούν ένα μετατροπέα διπλής κατεύθυνσης που χρησιμοποιούνται ευρέως σε ένα τέτοιο σύστημα. Για λόγους οικονομίας και εάν η χωρητικότητα των μπαταριών είναι τέτοια που είναι αδύνατο να καλυφθεί το φορτίο αιχμής μέσω του αντιστροφέα, τότε ο αντιστροφέας μπορεί να είναι χαμηλότερης ισχύος και το φορτίο αιχμής να καλύπτεται απευθείας από τη ντιζελογεννήτρια. Στην περίπτωση που οι απαιτήσεις του φορτίου είναι τέτοιες που να απαιτείται όσο το δυνατόν σταθερή συχνότητα, τότε θα πρέπει η συχνότητα του φορτίου να καθορίζεται από την έξοδο του αντιστροφέα. Η τελευταία περίπτωση είναι και η πιο δαπανηρή.

## Κεφάλαιο 7

### Εγκατάσταση Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος σε Βιομηχανική Εγκατάσταση

#### 7.1 Εισαγωγή

Στη συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής θα λειτουργούν τα απολύτως απαραίτητα, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η μεγαλύτερη διάρκεια και απλότητα στη διαδικασία, καθώς μιλάμε πάντα για κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, όπου απαιτείται η αποδοτική λειτουργία της, ακόμα και στο χειρότερο σενάριο.

Για κάθε ενεργειακή μελέτη απαιτείται ένα μέγεθος αναφοράς. Στη συγκεκριμένη μελέτη το πιο σωστό μέγεθος αναφοράς είναι η παρτίδα τελικού προϊόντος, άρα όλες οι παρακάτω καταναλώσεις αφορούν την ολοκλήρωση μίας παρτίδας. Είναι, επίσης, σημαντικό να τονιστεί πως κάθε φορά λειτουργεί μόνο ένα τμήμα της γραμμής παραγωγής. Επομένως, είναι αδύνατη η ταυτόχρονη λειτουργία δύο τμημάτων της παραγωγικής διαδικασίας για εξοικονόμηση χρόνου.

Όπως προαναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, τα κύρια βήματα που ακολουθούνται στη διαδικασία παραγωγής του τελικού προϊόντος είναι τα ακόλουθα:

- Αποθήκευση πρώτων υλών
- Παραγωγή φαρμακευτικής ουσίας
- Παραγωγή δισκίων
- Συσκευασία
- Αποθήκευση έτοιμου προϊόντος

#### 7.2 Ενεργειακή Κατανάλωση της Γραμμής Παραγωγής

Η συνολική έκταση της συγκεκριμένης γραμμής παραγωγής είναι 360m<sup>2</sup>. Οι χώροι όπου εκτελείται το κάθε βήμα, πρέπει να διαχωρίζονται μεταξύ τους, βάσει των οδηγιών GMP (Good Manufacturing Practice) [28] οι οποίες διέπουν τη φαρμακοβιομηχανία. Είναι ευκολότερη η καταγραφή ενεργειακής κατανάλωσης ανά χώρο, με εξαίρεση την Κλιματιστική Μονάδα, η οποία τροφοδοτεί με ελεγχόμενο τρόπο (θερμοκρασία, υγρασία, ποσότητα) με φιλτραρισμένο αέρα όλους τους χώρους της γραμμής παραγωγής και την Κεντρική Μονάδα

Ελέγχου, η οποία διαθέτει Ηλεκτρονικούς Υπολογιστές και Οθόνες για τον έλεγχο των μηχανών που συμμετέχουν στην παραγωγή.

#### Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα

*Ενεργειακή Κατανάλωση*

10 kW

*Ώρες Ημερήσιας Λειτουργίας*

24h

#### Κεντρική Μονάδα Ελέγχου

*Ενεργειακή Κατανάλωση*

2 Επιτραπέζιοι Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές:  $2 \cdot 120 \text{ W} = 0,24 \text{ kW}$ , 32h/παρτίδα

2 Οθόνες ελέγχου:  $2 \cdot 50 \text{ W} = 0,1 \text{ kW}$ , 32h/παρτίδα

*Ώρες Ημερήσιας Λειτουργίας*

8h

#### Αποθήκη Πρώτων Υλών

Η πρώτη ύλη για ένα δισκίο αποτελείται από δύο ουσίες, τη δραστική και τη συμπληρωματική ουσία. Αυτές οι ουσίες παραλαμβάνονται και ζυγίζονται στην αποθήκη πρώτων υλών και συντηρούνται σε συγκεκριμένες συνθήκες στους 24-25 °C. Η αποθήκη πρώτων υλών αποτελείται από ράφια τύπου Dexion. Η όποια ενεργειακή κατανάλωση του χώρου προκύπτει μόνον από τα φωτιστικά σώματα.

*Εμβαδό*

100m<sup>2</sup>

*Ενεργειακή Κατανάλωση*

Φωτισμός : 12 Φωτιστικά Σώματα τύπου LED Panel 55 W, 6400lm= 0,66 kW, 2h/παρτίδα

#### Χώρος Παραγωγής Φαρμακευτικής Ουσίας

Ύστερα από την παραλαβή των πρώτων υλών από την αποθήκη, οι δύο ουσίες αναμειγνύονται στον ειδικό Αναδευτήρα σε συγκεκριμένη αναλογία και για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια. Ακολουθεί η εξαγωγή των ουσιών από τον Αναδευτήρα σε μορφή Πρωτοβάθμιας Ιλύος (Λάσπης) και η εισαγωγή τους στον Ξηραντήρα Ρευστοποιημένης Κλίνης, όπου εκεί αφυγραίνεται το προϊόν για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια, με αποτέλεσμα να εξέρχεται από αυτό σε μορφή πούδρας.

*Εμβαδό*

60m<sup>2</sup>

*Ενεργειακή Κατανάλωση*

Αναδευτήρας:

Κινητήρας Κάδου 11kW, 4h/παρτίδα

Κινητήρας Μαχαιριών 4 kW, 4h/παρτίδα

Ξηραντήρας Ρευστοποιημένης Κλίνης: 16 kW, 4h/παρτίδα

Φωτισμός : 6 Φωτιστικά Σώματα τύπου LED Panel 55 W, 6400lm= 0,33 kW, 9h/παρτίδα



Εικόνα 7.1: Αναδευτήρας TURBULA T10 B



Εικόνα 7.2: Ξηραντήρας Ρευστοποιημένης Κλίνης DE LAMA DLST/L

#### Χώρος Παραγωγής Δισκίων

Από το Χώρο Παραγωγής Φαρμακευτικής Ουσίας, το προϊόν παραλαμβάνεται και οδηγείται στο κομμάτι της παραγωγής δισκίου (δισκιοποίηση). Τα δισκία παράγονται στη Δισκιοποιητική μηχανή, μπαίνουν σε ειδική σακούλα και μεταφέρονται στο χώρο της συσκευασίας.

#### *Εμβαδό*

40m<sup>2</sup>

#### *Ενεργειακή Κατανάλωση*

Δισκιοποιητική Μηχανή: 6 kW, 8h/παρτίδα

Φωτισμός : 4 Φωτιστικά Σώματα τύπου LED Panel 55 W, 6400lm= 0,22 kW, 9h/παρτίδα



Εικόνα 7.3: Δισκιοποιητική Μηχανή IWKA Manesty

#### Χώρος Συσκευασίας

Η Γραμμή Συσκευασίας αποτελείται από 2 συνδεδεμένες σε σειρά μεταξύ τους μηχανές, τη Μηχανή Δημιουργίας και Πλήρωσης Κυαθίων (Blister) και τη Μηχανή Τοποθέτησης των Καρτελών Κυαθίων στην τελική συσκευασία.

#### *Εμβαδό*

60m<sup>2</sup>

#### *Ενεργειακή Κατανάλωση*

Μηχανή Δημιουργίας και Πλήρωσης Κυαθίων (Blister): 15 kW, 6h/παρτίδα

Μηχανή Τοποθέτησης των Καρτελών Κυαθίων στην τελική συσκευασία: 3,5 kW, 6h/παρτίδα



Φωτισμός : 6 Φωτιστικά Σώματα τύπου LED Panel 55W, 6400lm= 0,33 kW, 8h/παρτίδα



Εικόνα 7.4: Μηχανή Δημιουργίας και Πλήρωσης Κυαθίων (Blister) της εταιρίας Romaco



Εικόνα 7.5: Μηχανή Τοποθέτησης των Καρτελών Κυαθίων στην τελική συσκευασία της εταιρίας Romaco

Αποθήκη Έτοιμου Προϊόντος

Οι τελικές συσκευασίες εγκιβωτίζονται σε χαρτοκιβώτια και τοποθετούνται πάνω σε παλέτες. Η όποια ενεργειακή κατανάλωση του χώρου προκύπτει μόνον από τα φωτιστικά σώματα.

*Εμβαδό*

100m<sup>2</sup>

*Ενεργειακή Κατανάλωση*

Φωτισμός : 12 Φωτιστικά Σώματα τύπου LED Panel 55W, 6400lm= 0,66kW, 2h/παρτίδα

Για τη μελέτη μας θα κάνουμε την παραδοχή ότι το εργοστάσιο θα παράγει μία παρτίδα τη φορά. Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή του Κεφαλαίου 7, κάθε φορά λειτουργεί μόνο ένα τμήμα της γραμμής παραγωγής και δεν υφίσταται ταυτόχρονη λειτουργία δύο τμημάτων της παραγωγικής διαδικασίας. Είναι, επομένως, φυσικό, να είναι αδύνατη η ολοκλήρωση της παραγωγής μιας παρτίδας τελικού προϊόντος σε μία ημέρα, δηλαδή σε 8 ώρες. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή ολοκληρώνεται σε 3 ημέρες, η ανάλυση των οποίων γίνεται παρακάτω:

- 1<sup>η</sup> Ημέρα:

Κλιματισμός: 24h\*10kW=240kWh

Λειτουργία Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου: 8h\*0,34kW=2,72kWh

Φωτισμός Αποθήκης Πρώτων Υλών: 2h\*0,66kW=1,32kWh

Φωτισμός Χώρου Παραγωγής Φαρμακευτικής Ουσίας:  
9h\*0,33kW=2,97kWh

Λειτουργία Αναδευτήρα: 4h\*15kW= 60kWh

Λειτουργία Ξηραντήρα: 4h\*16kW= 64kWh

Συνολική Κατανάλωση: 371,01kWh

- 2<sup>η</sup> Ημέρα:

Κλιματισμός: 24h\*10kW=240kWh

Λειτουργία Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου: 8h\*0,34kW=2,72kWh

Φωτισμός Χώρου Παραγωγής Δισκίων: 9h\*0,22kW=1,98kWh

Λειτουργία Δισκιοποιητικής Μηχανής: 8h\*6kW=48kWh

Συνολική Κατανάλωση: 292,7kWh

- 3<sup>η</sup> Ημέρα:

Κλιματισμός: 24h\*10kW=240kWh

Λειτουργία Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου: 8h\*0,34kW=2,72kWh

Φωτισμός Χώρου Συσκευασίας: 8h\*0,33kW=2,64kWh

Λειτουργία Μηχανής Blister: 6h\*15kW=90kWh

Λειτουργία Μηχανής Τοποθέτησης στην τελική συσκευασία:

$6h \cdot 3,5kW = 21kWh$

Φωτισμός Αποθήκης Έτοιμου Προϊόντος:  $2h \cdot 0,66kW = 1,32kWh$

Συνολική Κατανάλωση: 357,68kWh

Επομένως, για την παραγωγή μιας παρτίδας έτοιμου προϊόντος, απαιτούνται συνολικά 1021,39 kWh.

Έχοντας, πλέον, καταγεγραμμένες όλες τις καταναλώσεις κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, παρατηρώ ότι ο καθημερινός φωτισμός κάθε χώρου, καθώς και η Μονάδα Κεντρικού Ελέγχου, μπορούν να τροφοδοτηθούν ανεξάρτητα με την εγκατάσταση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος με φωτοβολταϊκά στοιχεία, συσσωρευτές και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Είναι, επομένως, απαραίτητη η καταγραφή των συνολικών καταναλώσεων του Φωτισμού και της Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου για κάθε ημέρα παραγωγής.

Η τροφοδότηση όλων των υπόλοιπων στοιχείων, δηλαδή των μηχανημάτων και της κλιματιστικής μονάδας, θα γίνει με την εγκατάσταση μιας γεννήτριας πετρελαίου.

Συνολική Κατανάλωση Φωτισμού και Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου:

1<sup>η</sup> Ημέρα: 7,01kWh

2<sup>η</sup> Ημέρα: 4,7kWh

3<sup>η</sup> Ημέρα: 6,68kWh

Το φορτίο αιχμής του συστήματος των φωτοβολταϊκών το έχουμε την πρώτη και την τρίτη ημέρα. Την πρώτη ημέρα, αυτό συμβαίνει όταν για δύο ώρες υπάρχει ταυτόχρονος φωτισμός της Αποθήκης Πρώτων Υλών και του Χώρου Παραγωγής Φαρμακευτικής Ουσίας, ενώ παράλληλα τροφοδοτούνται τα συστήματα της Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου. Τη δεύτερη ημέρα, συμβαίνει όταν για δύο ώρες υπάρχει ταυτόχρονος φωτισμός του Χώρου Συσκευασίας και της Αποθήκης Έτοιμου Προϊόντος, ενώ παράλληλα τροφοδοτούνται τα συστήματα της Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου. Το φορτίο αιχμής, και στις δύο αυτές περιπτώσεις, είναι 1,33kW. Πρέπει, επομένως, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και οι συσσωρευτές που θα επιλέξουμε να μπορούν να καλύψουν αυτό το φορτίο κάθε στιγμή.

Συνολική Κατανάλωση Λοιπών Στοιχείων:

1<sup>η</sup> Ημέρα: 364kWh

2<sup>η</sup> Ημέρα: 288kWh

3<sup>η</sup> Ημέρα: 351kWh

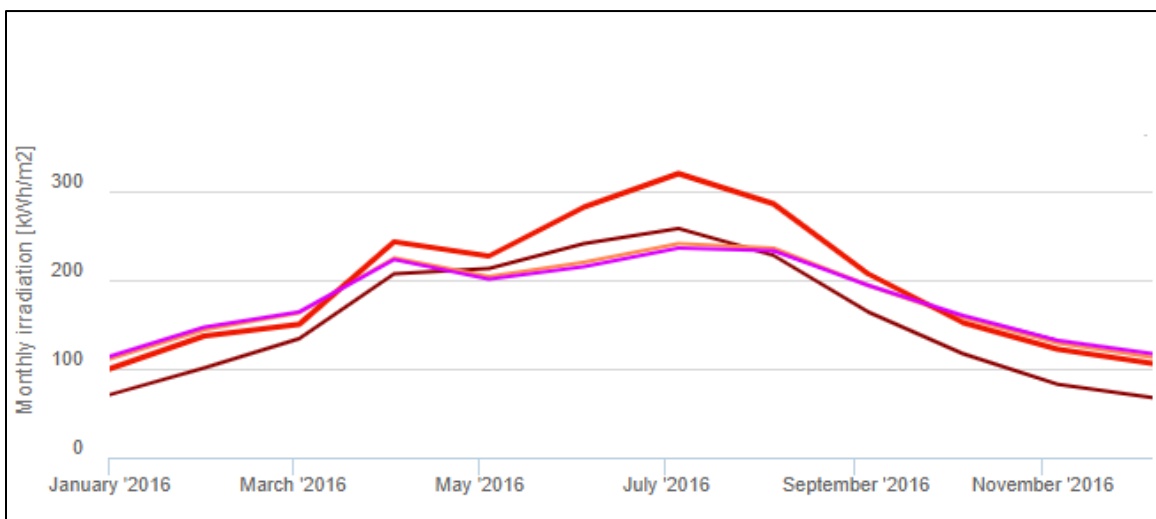
Το φορτίο αιχμής του υπόλοιπου συστήματος, το οποίο θα τροφοδοτείται από τη γεννήτρια, είναι ξεκάθαρο ότι παρουσιάζεται την τρίτη ημέρα της παραγωγής, κατά την ταυτόχρονη λειτουργία της Μηχανής Δημιουργίας και Πλήρωσης Κυαθίων (Blister), της Μηχανής Τοποθέτησης των Καρτελών Κυαθίων στην τελική συσκευασία και της Κλιματιστικής Μονάδας. Κατά τη λειτουργία τους, η συνολική κατανάλωση ενέργειας ισούται με  $15\text{kW} + 3,5\text{kW} + 10\text{kW} = 28,5 \text{ kW}$ , το οποίο αποτελεί το φορτίο αιχμής.

### **7.3 Τροφοδότηση του Φωτισμού και της Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου**

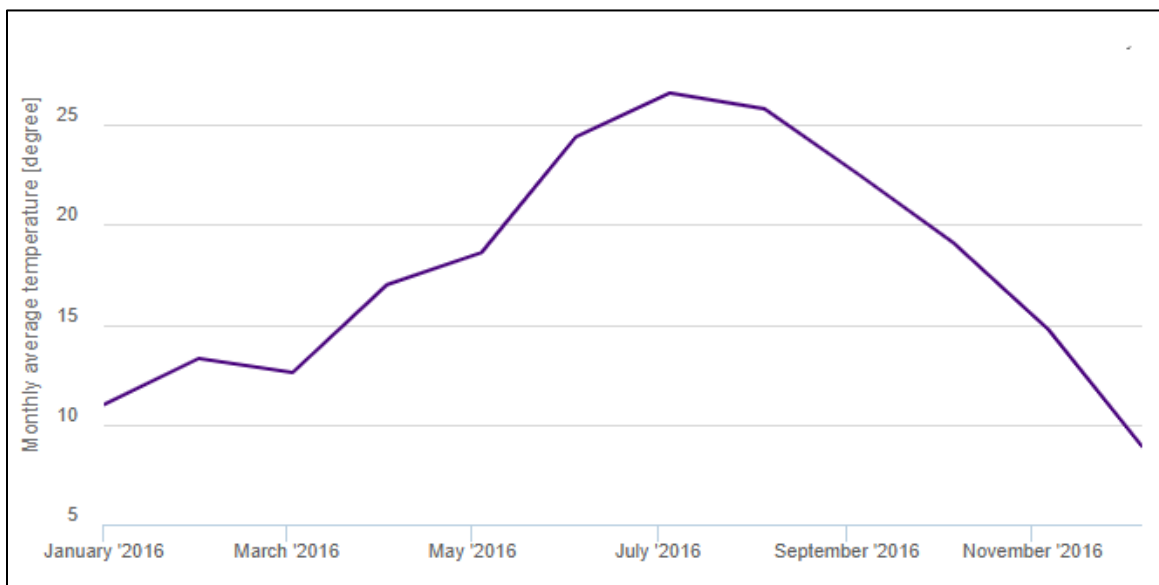
#### **7.3.1 Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκών Στοιχείων**

Η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών στοιχείων θα γίνει σε συγκεκριμένο τμήμα της ταράτσας του εργοστασίου. Θα πρέπει να γίνει έρευνα για την σωστή επιλογή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, τα οποία θα καλύπτουν πλήρως μαζί με τους συσσωρευτές και το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος τις ενεργειακές ανάγκες του φωτισμού και των συστημάτων της Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου.

Για τη μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας της περιοχής που βρίσκεται η φαρμακοβιομηχανία, η οποία είναι προάστιο της Ανατολικής Αττικής, χρησιμοποιώ το πρόγραμμα «PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM» [17] της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα δεδομένα που εξάγονται για τη συγκεκριμένη περιοχή, βρίσκονται στην Εικόνα 7.6 και Εικόνα 7.7.



Εικόνα 7.6: Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στην τοποθεσία που μελετάται [17]



Εικόνα 7.7: Μηνιαία Θερμοκρασία στην τοποθεσία που μελετάται [17]

Για το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης χρησιμοποιώ το πρόγραμμα Sunny Design Web [18]. Εισάγω τις καταναλώσεις που κατέγραψα προηγουμένως, καθώς και τα δεδομένα που αφορούν την περιοχή της βιομηχανικής εγκατάστασης. Έτσι, προκύπτουν τα διευρυμένα δεδομένα της εργασίας αυτής, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 7.8.

Διευρυμένα δεδομένα εργασίας

---

**Ρυθμίσεις τοποθεσίας**

- Η τοποθεσία είναι **Athens** στην **Greece (Southern Europe)**
- Το υψόμετρο από τη ΜΣΘ ανέρχεται σε **338 m**
- Η κλιμάκωση της ακτινοβολίας ανέρχεται σε **100 %**

Επεξεργασία

---

**Λιπομέτρες εργασίας**

- Όνομα εργασίας: **Φωτισμός και Κεντρική Μονάδα Ελέγχου**
- Αριθμός εργασίας **δεν έχει καταχωρηθεί**
- Σχόλιο **δεν έχει καταχωρηθεί**
- Πελάτης **δεν έχει καταχωρηθεί**

Επεξεργασία

---

**Ρυθμίσεις θερμοκρασίας**

- Το **Θερμοκρασία περιβάλλοντος** χρησιμοποιείται
- Η ελάχιστη θερμοκρασία ανέρχεται σε **-9 °C**
- Η θερμοκρασία σχεδιασμού είναι **29 °C**
- Η μέγιστη θερμοκρασία ανέρχεται σε **38 °C**

Επεξεργασία

---

**Ηλεκτρική σύνδεση του συστήματος**

- **Χαμηλή τάση** με τάση δικτύου **230V (230V / 400V)**
- Η ανοχή τάσης είναι **+/- 10 %**
- **Τριφασική σύνδεση**
- Το μέγιστο μη αντισταθμισμένο φορτίο **5,00 kVA** συνυπολογίζεται

Επεξεργασία

---

**Απώλειες αγωγού**

- Οι απώλειες ισχύος DC **δεν λαμβάνονται υπόψη** στην πρόγνωση της απόδοσης
- Οι απώλειες ισχύος AC **δεν λαμβάνονται υπόψη** στην πρόγνωση της απόδοσης

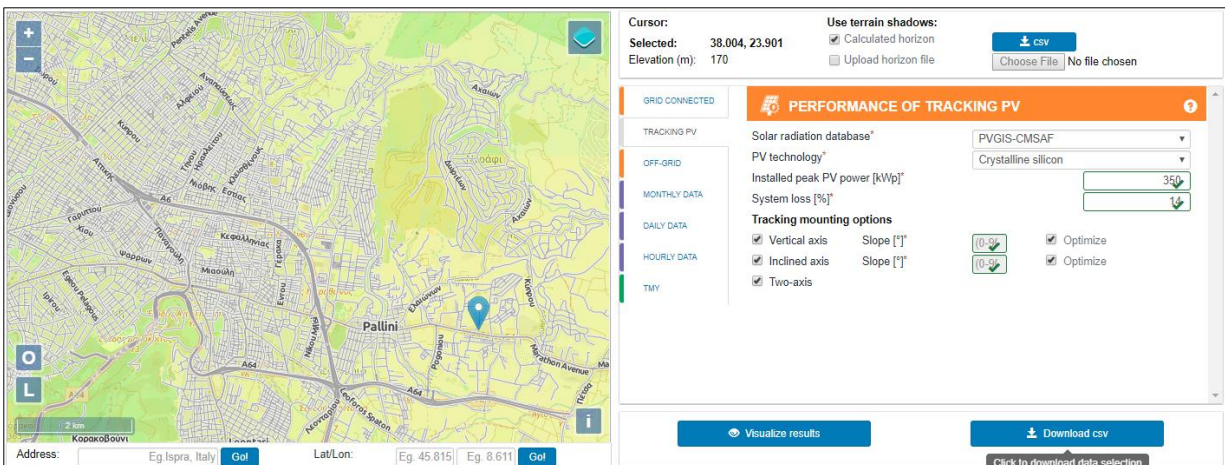
Επεξεργασία

Εικόνα 7.8: Διευρυμένα δεδομένα εργασίας [18]

Στη συνέχεια, εισάγω φορτίο αιχμής 2kW, το οποίο είναι σκοπίμως μεγαλύτερο από το πραγματικό φορτίο αιχμής που υπολόγισα προηγουμένως, καθώς επιθυμώ να υπολογιστεί μια πρόσθετη εφεδρική ισχύς.

Είναι απαραίτητη η εύρεση της βέλτιστης γωνίας κλίσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ο τρόπος εγκατάστασης επηρεάζει τη θέρμανση των ηλιακών κυψελών σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η συγκεκριμένη γωνία βρέθηκε πάλι με τη χρήση του προγράμματος «PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM» [17], όπου έγινε υπολογισμός της βέλτιστης γωνίας για κάθε μήνα, εισάγοντας τις συντεταγμένες της περιοχής της βιομηχανικής εγκατάστασης.

## Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας στη Φαρμακοβιομηχανία



Εικόνα 7.9: Υπολογισμός βέλτιστων γωνιών στο πρόγραμμα «PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM» [17]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.10, η βέλτιστη κλίση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι 34° ενώ ο βέλτιστος προσανατολισμός τους είναι 53°. Στο πρόγραμμα Sunny Design Web [18] μου δίνεται η δυνατότητα να αλλάξω το αζιμούθιο και την κλίση των Φ/Β μονάδων. Επομένως, εισάγω αυτά τα νέα δεδομένα στο πρόγραμμα.

Summary			
<b>Provided inputs:</b>			
Location [Lat/Lon]:	38.004, 23.901		
Horizon:	Calculated		
Database used:	PVGIS-CMSAF		
PV technology:	Crystalline silicon		
PV installed [kWp]:	350		
System loss [%]:	14		
Simulation outputs	Vertical axis	Inclined axis	Two-axis
Slope angle [°]:	53 (opt)	34 (opt)	-
Yearly PV energy production [kWh]:	780000	786000	809000
Yearly in-plane irradiation [kWh/m <sup>2</sup> ]:	2790	2810	2900
Year-to-year variability [kWh]:	25900.0	26300.0	27800.0
Changes in output due to:			
Angle of incidence [%]:	1.3	1.3	1.2
Spectral effects [%]:	0.6	0.5	0.5
Temperature and low irradiance [%]:	6.4	6.5	6.7
<b>Total loss [%]:</b>	<b>20.1</b>	<b>20.2</b>	<b>20.3</b>

Εικόνα 7.10: Αποτελέσματα που αφορούν τις βέλτιστες γωνίες τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων [17]

Δύο κορυφαίες εταιρίες παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η Sunpower και η Panasonic Sanyo. Μετά από σχετική έρευνα στην αγορά και τις προδιαγραφές των φωτοβολταϊκών στοιχείων, επιλέγω στην εγκατάσταση να τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία της Sunpower και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο Sunpower SPR-X22-360, με ισχύ 360W και απόδοση 22,2%. [23]



Εικόνα 7.11: Sunpower SPR-X22-360 [23]

Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι έχουν μεγαλύτερη ισχύ από άλλα στοιχεία παρόμοιων διαστάσεων, με αποτέλεσμα στον ίδιο χώρο που διαθέτουμε να συλλέγουμε πολύ μεγαλύτερο φορτίο ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικά τα στοιχεία της Sunpower έχουν πρόσθετα τεχνολογικά πλεονεκτήματα και μεγαλύτερη αντοχή, αξιοπιστία και διάρκεια ζωής έως 40 χρόνια ενώ, παράλληλα, συγκριτικά με αυτά της Sanyo, τα στοιχεία της Sunpower παράγουν σε πραγματικές συνθήκες 7% περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα.

Θα εγκαταστήσω 10 συνολικά φωτοβολταϊκά στοιχεία Sunpower SPR-X22-360, τα οποία θα τοποθετηθούν σε δύο σειρές. Στην πρώτη σειρά θα υπάρχουν εγκατεστημένα 6 στοιχεία, ενώ στη δεύτερη τα υπόλοιπα 4. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση των 10 φωτοβολταϊκών στοιχείων παρέχει ισχύ κορυφής 3,6kWp.

### 7.3.2 Επιλογή Μετατροπέα



Είναι απαραίτητη η τοποθέτηση στην εγκατάσταση του κατάλληλου μετατροπέα (Inverter). Επιλέγεται ο μετατροπέας SB3.6-1AV-40 της εταιρίας SMA, ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 7.12.



Εικόνα 7.12: Μετατροπέας SB3.6-1AV-40 της εταιρίας SMA [18]

Παρακάτω, παρατίθενται τα δεδομένα για την απόδοση του συγκεκριμένου μετατροπέα:

- Λόγος Ονομαστικής Ισχύος ( $\frac{\text{Ονομαστική DC Ισχύς}}{\text{Ισχύς Κορυφής}} = 108\%$ )
- Βαθμός Απόδοσης = 96,2%
- Ετήσια ενεργειακή απόδοση = 5306,36 kWh
- Ειδ. ενεργειακή απόδοση = 1474 kWh/kWp
- Ποσοστό απόδοσης (Σχέση μεταξύ πραγματικής με θεωρητικής απόδοσης) = 87,1%

Στον Πίνακα 7.1 είναι καταγεγραμμένα όλα τα τεχνικά στοιχεία που αφορούν το σύστημα Μετατροπέα-Φωτοβολταϊκών Στοιχείων.

<b>Παράμετροι</b>	<b>Μετατροπέας</b>	<b>Είσοδος A</b>	<b>Είσοδος B</b>
Max. ισχύς DC	3,88 kW	2,16 kWp	1,44 kWp
Min. τάση DC	100 V	320 V	214 V
Χαρακτηριστική Φ/B τάση		335 V	224 V
Max. τάση DC (Μετατροπέας)		452 V	301 V
Max. ρεύμα εισόδου ανά ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος		5,9 A	5,9 A
Max. ρεύμα βραχυκύκλωσης ανά ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος		6,5 A	6,5 A

Πίνακας 7.1: Τεχνικά στοιχεία που αφορούν το σύστημα Μετατροπέα-Φωτοβολταϊκών Στοιχείων [18]

### 7.3.3 Επιλογή Συσσωρευτών

Προκειμένου να είναι δυνατή η αποθήκευση ενός μέρους της ενέργειας που παράγεται από το σύστημα των 10 φωτοβολταϊκών πάνελ, είναι απαραίτητη η επιλογή ενός συστήματος συσσωρευτών. Με αυτό τον τρόπο θα είναι δυνατή η εκμετάλλευση της ενέργειας, μετά τη δύση του ηλίου, πριν την ανατολή του ήλιου, όταν δεν επαρκεί η ηλιακή ακτινοβολία ή κατά τη διάρκεια συνεχών ημερών με νεφελώδη ουρανό. Στην περίπτωση της συγκεκριμένης γραμμής παραγωγής της φαρμακοβιομηχανίας δεν μας απασχολούν οι νυχτερινές ώρες, καθώς η παραγωγή πραγματοποιείται τις 8 πρωινές ώρες.

Στην εγκατάσταση θα τοποθετηθούν 3 συσσωρευτές μολύβδου, χωρητικότητας 87Ah (20kWh), όπου για χρήση θα είναι διαθέσιμο το 50% της χωρητικότητάς τους. Επομένως, η

ωφέλιμη χωρητικότητα των συσσωρευτών είναι 43,5Ah (10kWh). Η ονομαστική τάση κάθε συσσωρευτή είναι 48V και η εφεδρική ισχύς του συστήματος συσσωρευτών είναι 9,9kW.



Εικόνα 7.13: Συσσωρευτής Sunny Island 4.4 m της εταιρίας SMA [18]

#### 7.3.4 Επιλογή ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους

Στο συγκεκριμένο συστήματα αυτόνομου δικτύου πρέπει να λειτουργεί παράλληλα με τον φωτοβολταϊκό μετατροπέα και το σύστημα συσσωρευτών και ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Η συγκεκριμένη γεννήτρια θα συνδεθεί, μέσω κατάλληλης διάταξης, στους παραπάνω συσσωρευτές. Με αυτόν τον τρόπο μηδενίζεται η πιθανότητα ύπαρξης ελλείματος ηλεκτρικής ενέργειας στο κομμάτι της εγκατάστασης που μελετάω.

Είναι απαραίτητη η εύρεση γεννήτριας, η οποία θα είναι συμβατή στο σύστημά μου. Πιο συγκεκριμένα, η γεννήτριά μου πρέπει να έχει ενεργό ισχύ τουλάχιστον 6,5kW. Επιλέγω την γεννήτρια Kraft KDG 8500 ESA. Η συγκεκριμένη γεννήτρια λειτουργεί με πετρέλαιο, είναι κλειστού τύπου και αθόρυβη. Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά της βρίσκονται στον Πίνακα 7.2

<b>Kraft KDG 8500 ESA</b>	
Απόδοση Γεννήτριας	8 KVA
Βάρος	171 Kg
Ισχύς Κινητήρα	13 HP
Τάση AC	230 V
Χρόνος Λειτουργίας / Δοχείο	7 hours
Χωρητικότητα Δοχείου Καυσίμου	16 ltr
Τάση DC	12 V
Διαστάσεις ΜxΠxΥ	92x53x74 cm

Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικά στοιχεία γεννήτριας Kraft KDG 8500 ESA

Η κατανάλωση πετρελαίου της συγκεκριμένης γεννήτριας είναι:

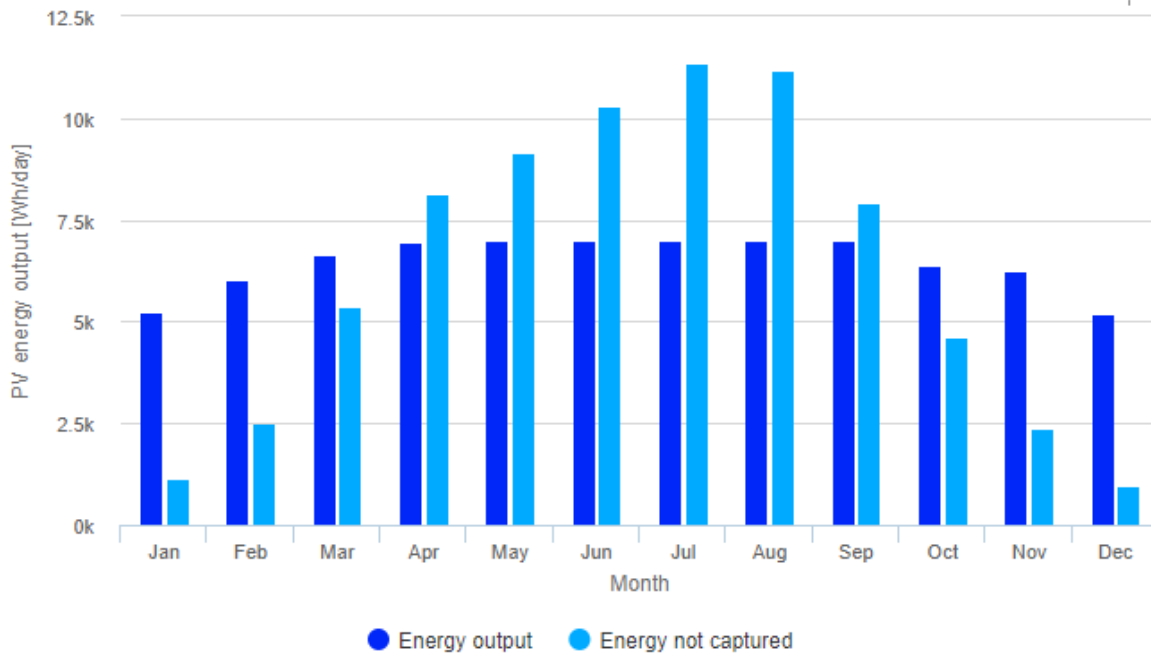
- 1,1 L/h για το 50% του φορτίου της γεννήτριας
- 1,5 L/h για το 75% του φορτίου της γεννήτριας
- 1,9 L/h για το 100% του φορτίου της γεννήτριας



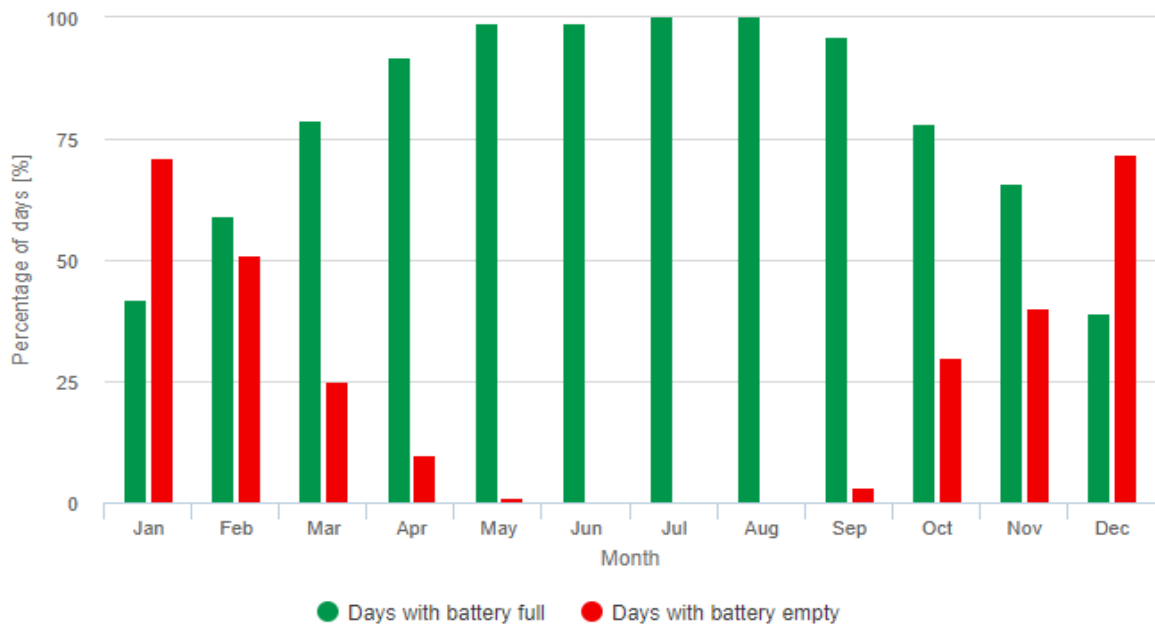
Εικόνα 7.14: Γεννήτρια κλειστού τύπου Kraft KDG 8500 ESA

Εισάγοντας στο πρόγραμμα «PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM» όλα τα δεδομένα της εγκατάστασης, η οποία σχεδιάστηκε στο Sunny Design Web, μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες, τόσο για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που θα εγκατασταθούν, όσο και για τους συσσωρευτές του υβριδικού συστήματος. Στην Εικόνα 7.15 παρουσιάζεται η εκτιμώμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατά τη διάρκεια ενός έτους, ενώ στην Εικόνα 7.16, παρουσιάζεται η εκτιμώμενη κατάσταση των συσσωρευτών για κάθε μήνα.

Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας στη Φαρμακοβιομηχανία



Εικόνα 7.15: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία για κάθε μήνα του έτους, για τη συγκεκριμένη περιοχή [17]



Εικόνα 7.16: Εκτιμώμενη κατάσταση συσσωρευτών για κάθε μήνα του έτους [17]

#### **7.4 Τροφοδότηση Λοιπών Μηχανημάτων και Κλιματιστικής Μονάδας**

Όπως προαναφέρθηκε, η απαιτούμενη ενέργεια για τη λειτουργία των μηχανημάτων που συμμετέχουν στην παραγωγή μιας παρτίδας έτοιμου προϊόντος θα καλυφθεί πλήρως, σε μία ενδεχόμενη κατάσταση κρίσεως, με την εγκατάσταση γεννήτριας.

Υπολογίσαμε, προηγουμένως, πως η μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση πραγματοποιείται την πρώτη ημέρα της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς τότε λειτουργεί η Κλιματιστική Μονάδα, ο Αναδευτήρας και ο Ξηραντήρας. Τη συγκεκριμένη ημέρα απαιτείται συνολική ενέργεια 364kWh.

Έχει, επίσης, υπολογιστεί πως το φορτίο αιχμής του συγκεκριμένου συστήματος, παρουσιάζεται κατά την ταυτόχρονη λειτουργία της Μηχανής Δημιουργίας και Πλήρωσης Κυαθίων (Blister), της Μηχανής Τοποθέτησης των Καρτελών Κυαθίων στην τελική συσκευασία και της Κλιματιστικής Μονάδας και ισούται με 28,5 kW. Επομένως, η γεννήτρια που θα επιλέξω πρέπει να καλύπτει το συγκεκριμένο φορτίο αιχμής. Προφανώς, δεν θα επιλέξω μία γεννήτρια ισχύος ακριβώς ίσης με το φορτίο αιχμής, καθώς πρέπει η πιθανότητα να υπάρξει έλλειμμα ηλεκτρικής ενέργειας να είναι μηδενική.

Για τους λόγους που προανέφερα, επιλέγω την τοποθέτηση της γεννήτριας GSW45Y της εταιρίας Pramac [32]. Είναι μια τριφασική γεννήτρια πετρελαίου σιωπηλού τύπου με ενεργό ισχύ 35kW. Λεπτομερή τεχνικά χαρακτηριστικά για τη συγκεκριμένη γεννήτρια βρίσκονται στον Πίνακα 7.3.

Generating Set	
Stand by power LTP kW/kVA	36,0/45,0
Prime power PRP kW/kVA	35,2/44,0
Voltage Volt / Frequency Hz	400 / 50
Phases	3
Engine	
Brand	Yanmar
Model	4TNV98T
Cooling system	Water
Fuel	Diesel
Number and disposition of cylinders	4 in line
Displacement cc	3319
Aspiration	Turbo
Speed rpm	1500
Stand by power LTP kW	45,5
Prime power PRP kW	41,4
Fuel consumption at 75% / 100% PRP L/h	8,7 / 11,6

Πίνακας 7.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά γεννήτριας Pramac GSW45Y

Όπως βλέπουμε από τα στοιχεία του Πίνακα, η συγκεκριμένη γεννήτρια καταναλώνει σε μέσο όρο 10,15 L/h. Όπως έχει προαναφερθεί, η αιχμή φορτίου που πρέπει να καλύψει η γεννήτρια είναι 28,5kW. Αυτό σημαίνει ότι, προκειμένου να μην υπάρξει έλλειμα ενέργειας, η γεννήτρια θα πρέπει να λειτουργεί τουλάχιστον στο 80,9% της ενεργού ισχύος της. Από τον πίνακα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της, αντλούμε πως αυτό απαιτεί κατανάλωση 10 λίτρων πετρελαίου ανά ώρα λειτουργίας.



Προκειμένου να έχουμε μία ακριβή αποτύπωση της πραγματικότητας στην κατανάλωση πετρελαίου της γεννήτριας, θα αναλύσω την κατανάλωση για κάθε μία από τις τρεις ημέρες της παραγωγής.

- 1<sup>η</sup> Ημέρα:  
 $L = 8h * 6L + 16h * 3,5L = 104 L$
- 2<sup>η</sup> Ημέρα:  
 $L = 8h * 5,3L + 16h * 3,5L = 99 L$
- 3<sup>η</sup> Ημέρα:  
 $L = 8h * 9,5L + 16h * 3,5L = 132 L$

Επομένως, συνολικά για τις τρεις ημέρες της παραγωγής, η γεννήτρια καταναλώνει 335 λίτρα πετρελαίου.



Εικόνα 7.17: Τριφασική γεννήτρια Pramac GSW45Y ενεργού ισχύος 35kW [32]

## **Συμπέρασμα**

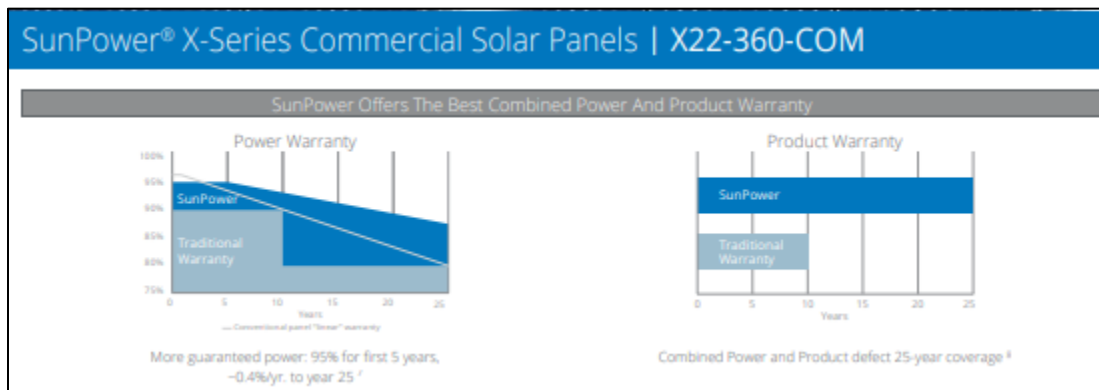
Όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 7, στην εγκατάσταση θα λειτουργούν δύο γεννήτριες, όπου η μία θα υποστηρίζει το δίκτυο των φωτοβολταϊκών στοιχείων και των συσσωρευτών, ενώ η δεύτερη θα παρέχει ενέργεια για τη λειτουργία των Μηχανημάτων και της Κλιματιστικής Μονάδας. Είναι, επομένως, απαραίτητο η φαρμακοβιομηχανία να διαθέτει οποιαδήποτε στιγμή αρκετή ποσότητα πετρελαίου, προκειμένου να είναι δυνατή η λειτουργία των συγκεκριμένων γεννητριών.

Έχει, ήδη, υπολογιστεί πως η συνολική κατανάλωση πετρελαίου της μεγαλύτερης γεννήτριας Pramac GSW45Y και για τις τρεις ημέρες της παραγωγής είναι 335 λίτρα. Επίσης, η λειτουργία της μικρότερης γεννήτριας Kraft KDG 8500 ESA, η οποία υποστηρίζει το υβριδικό σύστημα, υπολογίζω ότι και για τις τρεις ημέρες είναι περίπου 10 λίτρα. Άρα, συνολικά, για τρεις ημέρες παραγωγής απαιτούνται 345 λίτρα πετρελαίου.

Η φαρμακοβιομηχανία έχει αποφασίσει την εγκατάσταση μίας δεξαμενής 2000 λίτρων, η οποία θα είναι μόνιμα συνδεδεμένη και με τις δύο γεννήτριες. Αυτό σημαίνει πως με τη συγκεκριμένη δεξαμενή, η συγκεκριμένη γραμμή παραγωγής που μελετάω θα έχει αυτονομία για την παραγωγή 5 παρτίδων έτοιμου προϊόντος.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν είναι αντικείμενο μελέτης το κόστος της εγκατάστασης του αυτόνομου συστήματος για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της γραμμής παραγωγής, καθώς η φαρμακευτική εταιρία είναι υποχρεωμένη να διαθέτει τη συγκεκριμένη αυτονομία. Σίγουρα για μία εταιρία του φαρμακευτικού κλάδου η επένδυση αυτή δεν θεωρείται ιδιαίτερα ακριβή, ειδικά αν αναλογιστεί κανείς τα κέρδη από τη σύμβαση που έχει υπογραφεί με τον Ελληνικό Στρατό, για την προμήθεια των συγκεκριμένων παρτίδων έτοιμου προϊόντος.

## Παράρτημα



Εικόνα Π1: Τεχνικά στοιχεία φωτοβολταϊκού πάνελ SunPower X22-360-COM

Electrical Data	
SPR-X22-360-COM	
Nominal Power (P <sub>nom</sub> ) <sup>11</sup>	360 W
Power Tolerance	+5/-3%
Avg. Panel Efficiency <sup>12</sup>	22.2%
Rated Voltage (V <sub>mpp</sub> )	59.1 V
Rated Current (I <sub>mpp</sub> )	6.09 A
Open-Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	69.5 V
Short-Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	6.48 A
Max. System Voltage	1000 V UL & 1000 V IEC
Maximum Series Fuse	15 A
Power Temp Coef.	-0.29% / °C
Voltage Temp Coef.	-167.4 mV / °C
Current Temp Coef.	2.9 mA / °C

Εικόνα Π2: Τεχνικά στοιχεία φωτοβολταϊκού πάνελ SunPower X22-360-COM

Tests And Certifications	
Standard Tests <sup>13</sup>	UL1703 (Type 2 Fire Rating), IEC 61215, IEC 61730
Quality Certs	ISO 9001:2008, ISO 14001:2004
EHS Compliance	RoHS, OHSAS 18001:2007, lead free, REACH SVHC-163, PV Cycle
Sustainability	Cradle to Cradle Certified™ Silver (eligible for LEED points) <sup>14</sup>
Ammonia Test	IEC 62716
Desert Test	10.1109/PVSC.2013.6744437
Salt Spray Test	IEC 61701 (maximum severity)
PID Test	Potential-Induced Degradation free: 1000 V <sup>9</sup>
Available Listings	UL, TUV, JET, CEC

Εικόνα Π3: Τεχνικά στοιχεία φωτοβολταϊκού πάνελ SunPower X22-360-COM

Operating Condition And Mechanical Data	
Temperature	-40° F to +185° F (-40° C to +85° C)
Impact Resistance	1 inch (25 mm) diameter hail at 52 mph (23 m/s)
Appearance	Class B
Solar Cells	96 Monocrystalline Maxeon Gen III
Tempered Glass	High-transmission tempered anti-reflective
Junction Box	IP-65, MC4 compatible
Weight	41 lbs (18.6 kg)
Max. Load	Wind: 50 psf, 2400 Pa, 244 kg/m <sup>2</sup> front & back Snow: 112 psf, 5400 Pa, 550 kg/m <sup>2</sup> front
Frame	Class 2 silver anodized; stacking pins

Εικόνα Π4: Τεχνικά στοιχεία φωτοβολταϊκού πάνελ SunPower X22-360-COM

STATIONARY RANGE / SOUNDPROOF VERSION

## GSW SERIES PROFESSIONAL ENERGY

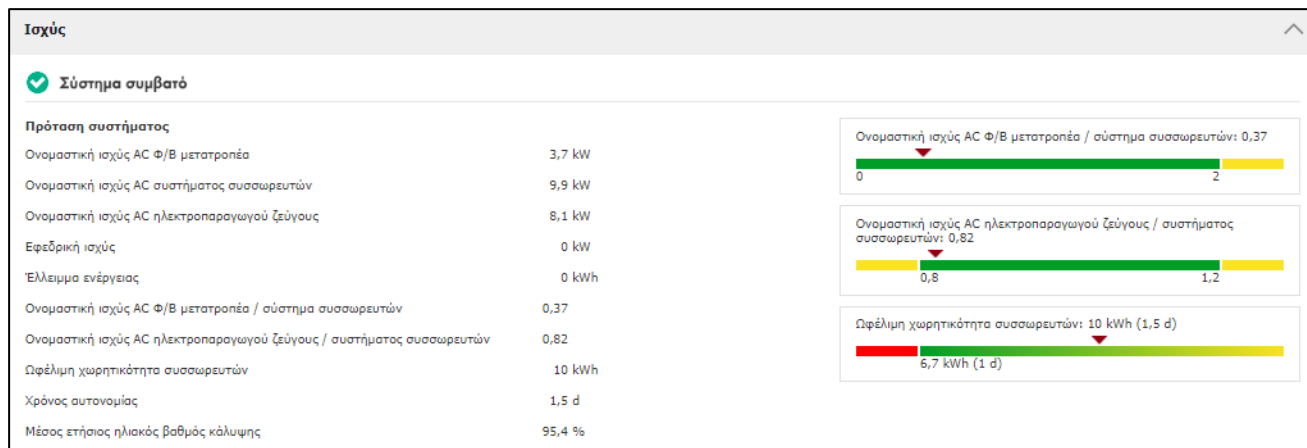
This range of generators is suitable for any applications; low noise, security, greatly extended running time and versatility make GSW series the perfect choice for the business.



GENERATING SET	GSW40T	GSW45T	GSW40P <sup>1)</sup>	GSW45P <sup>1)</sup>
STAND BY POWER LTP (kW/kVA)	26,4/33,8	36,8/46,0	24,2/30,3	36,0/45,8
PRIME POWER PFP (kW/kVA)	25,8/32,3	36,2/44,0	23,7/29,6	35,2/44,8
VOLTAGE (V) / FREQUENCY (Hz)	400 / 50	400 / 50	400 / 50	400 / 50
PHASES	3	3	3	3
<b>ENGINE</b>				
BRAND	Tanmar	Tanmar	Perkins	Perkins
MODEL	479v38	479v50	1103A-33G	1103A-337G
COOLING SYSTEM	Water	Water	Water	Water
FUEL	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel
NUMBER AND DISPOSITION OF CYLINDERS	4 in line	4 in line	3 in line	3 in line
DISPLACEMENT cc	3210	3270	3100	3100
ASPIRATION	Natural	Turbo	Natural	Turbo
STARTING SYSTEM / ELECTRIC CIRCUIT (V/Hz)	Electric / 12	Electric / 12	Electric / 12	Electric / 12
SPEED (rpm)	1500	1500	1500	1500
SPIDER GOVERNOR	Mechanical	Mechanical	Mechanical	Mechanical
STAND BY POWER LTP (kW)	37,5	45,5	30,4	45,5
PRIME POWER PFP (kW)	36,1	44,4	27,7	43,3
FUEL CONSUMPTION at 75% / 100% PFP (L/h)	5,1 / 6,1	6,7 / 11,5	5,1 / 5,8	7,8 / 10,4
<b>ALTERNATOR</b>				
TYPE	Brushless	Brushless	Brushless	Brushless
POLES	4	4	4	4
VOLTAGE REGULATION SYSTEM	Electronic	Electronic	Electronic	Electronic
<b>OVERALL DIMENSIONS AND WEIGHT</b>				
LENGTH (mm)	2000	2000	2000	2000
WIDTH (mm)	920	920	920	920
HEIGHT (mm)	1210	1210	1210	1210
WEIGHT (kg)	765	815	929	917
FUEL TANK CAPACITY (L)	80	80	80	80
RUNNING TIME at 75% / 100% PFP (h)	11,6 / 9,3	7,9 / 5,9	13,2 / 7,0	8,7 / 6,5
NOISE PRESSURE (dB(A) at 7 m) (dB(A))	67	67	65	63
GUARANTEED SOUND POWER LEVEL (dB(A))	57	57	58	58

Εικόνα Π5: Τεχνικά στοιχεία γεννήτριας GSW45

## Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας στη Φαρμακοβιομηχανία

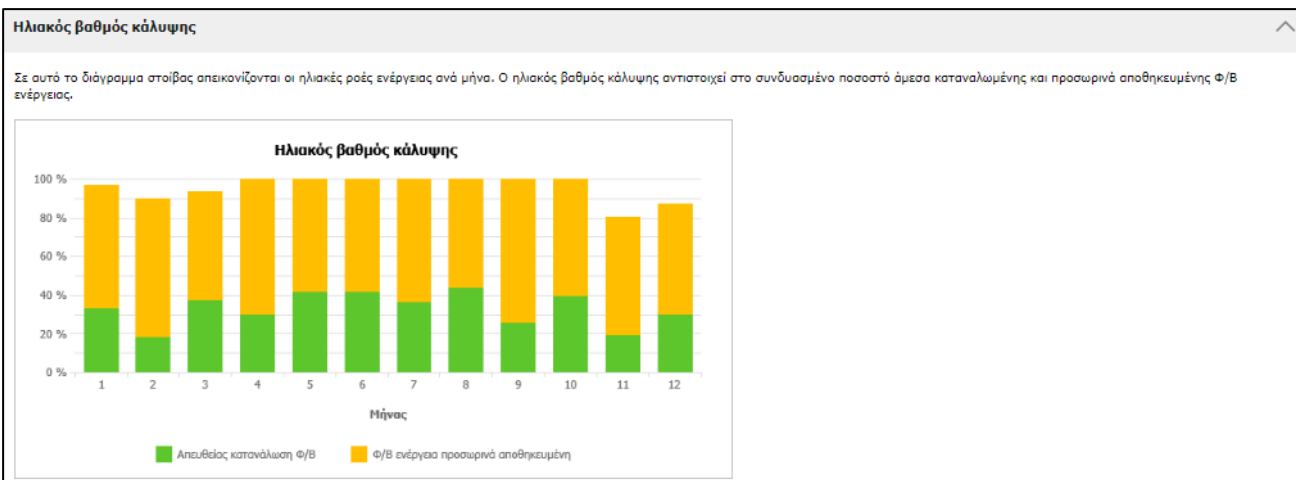


Εικόνα Π6: Αποτελέσματα αυτόνομου υβριδικού συστήματος, όπως αποτυπώνονται στο πρόγραμμα Sunny Design Web



Εικόνα Π7: Αποτελέσματα αυτόνομου υβριδικού συστήματος, όπως αποτυπώνονται στο πρόγραμμα Sunny Design Web

## Μελέτη Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας στη Φαρμακοβιομηχανία



Εικόνα Π8: Αποτελέσματα αυτόνομου υβριδικού συστήματος, όπως αποτυπώνονται στο πρόγραμμα Sunny Design Web

**Πληροφορίες εργασίας**

Φ/Β εγκατάσταση		Σύστημα συσσωρευτών	
Συνολικός αριθμός φωτοβολταϊκών μονάδων	10	Αριθμός των μετατροπέων συσσωρευτή	3
Ισχύς κορυφής	3,60 kWp	Ονομαστική ισχύς AC	9,90 kW
Αριθμός Φ/Β μετατροπέων	1	Ισχύς κορυφής 30 λεπτών AC του Sunny Island	13,20 kW
Ονομαστική ισχύς AC των Φ/Β μετατροπέων	3,68 kW	Συσσωρευτές	Μολύβδου
Ενεργή ισχύς AC	3,68 kW	Συνολική ονομαστική χωρητικότητα	20,00 kWh
Σχέση ενεργής ισχύος	102,2 %	Ωφέλιμη χωρητικότητα συσσωρευτών	10,00 kWh
Μέγ. διαθέσιμη Φ/Β ενέργεια	5.306,36 kWh	Ετήσια παροχή χωρητικότητας δικτύου του συσσωρευτή	96
Συντ.ενεργ. χρήση	100 %	Προσωρινά αποθηκευμένη Φ/Β ενέργεια	1.786 kWh
Ειδ. ενεργειακή απόδοση	1474 kWh/kWp		
Απώλειες ισχύος (σε % της φωτοβολταϊκής ενέργειας)	---		
Μη αντισταθμισμένο φορτίο	3,68 kVA	<b>Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος</b>	
Χρησιμοποιημένη Φ/Β ενέργεια	2.715,63 kWh	Φαινόμενη ισχύς	8,13 kVA
Χρησιμοποιημένο ποσοστό Φ/Β ενέργειας	51,2 %	Ενεργός ισχύς	6,50 kW
Ποσοστό Φ/Β στην τροφοδοσία ενέργειας (κατά τη διάρκεια της ημέρας)	253 %	Ετήσια παραγωγή ενέργειας του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους	130,92 kWh
Μέσος ετήσιος ηλιακός βαθμός κάλυψης	95,4 %	Ετήσια κατανάλωση καυσίμου	46 l
		Μέση ενεργειακή αποδοτικότητα	---

Εικόνα Π9: Αποτελέσματα αυτόνομου υβριδικού συστήματος, όπως αποτυπώνονται στο πρόγραμμα Sunny Design Web

## **Βιβλιογραφία**

[1] «Stand – Alone Photovoltaic Systems handbook of recommended design practices», Sandia National Laboratories, 1995

[2] [https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy)

[3] «Ηπιες Μορφές Ενέργειας II», Θωμάς Ζαχαρίας, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2007

[4] [http://users.sch.gr/imarinakis/biomass\\_energy.htm](http://users.sch.gr/imarinakis/biomass_energy.htm)

[5] «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία», Κ. Καγκαράκη, εκδόσεις Συμμετρία, 1992

[6] «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Ι. Φραγκιαδάκης, εκδόσεις Ζήτη, 2007

[7] «Σχεδιασμός Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού Συστήματος για την Τροφοδότηση Αγροκίας», διπλωματική εργασία της Φ. Μπουγιούκου, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010

[8] «Φυσική των φ/β στοιχείων», Βασιλική Περράκη, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2008

[9] «Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Νεοκλέους-Κωνσταντινίδη, Ίων, 1991

[10] «Batteries and charge control in stand – alone photovoltaic systems», James P. Dunlop, Florida energy center, 1997

[11] «Photovoltaic Systems», Klaus Preiser

[12] «Photovoltaics in Buildings», Frierich Sick and Thomas Erge, James & James Ltd, London, 1996

[13] «Stand Alone PV System Design»



[14] «Νέες τεχνολογίες των φ/β στοιχείων», Βασιλική Περράκη, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2008.

[15] «Ένας πρακτικός οδηγός για τα φωτοβολταϊκά», Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών

[16] «Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος», διπλωματική εργασία της Μαρίας Μαρκάτου, Πανεπιστήμιο Πατρών

[17] [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_static/en/intro\\_tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_static/en/intro_tools.html)

[18] <https://www.sunnydesignweb.com/sdweb/#/Home>

[19] «Τεχνοοικονομική ανάλυση και σχεδίαση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών απομακρυσμένης αγροτικής εγκατάστασης», του Αντώνιου - Χριστόφορου Μ. Χατζηγεωργίου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

[20] «Διαχείριση Δεδομένων Μέτρησης της Ηλιακής Ακτινοβολίας», διπλωματική εργασία του Παναγιώτη Κεραμιτζή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010

[21] «Τεχνοοικονομική Μελέτη και Σύγκριση Υβριδικών Συστημάτων. Εφαρμογή σε Αυτόνομη Κατοικία», διπλωματική εργασία των Δ. Σαραφianού και Μ. Σειραγάκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2009

[22] «Photovoltaics in Buildings», Frierich Sick and Thomas Erge, James & James Ltd, London, 1996

[23] <https://us.sunpower.com/sites/sunpower/files/media-library/data-sheets/ds-x22-series-360-commercial-solar-panels.pdf>

[24] «Renewable and Efficient Electric Power Systems», Gilbert M. Masters

[25] <https://www.wholesalesolar.com/>

[26] <https://www.sciencedirect.com/science>

[27] Στέφανος Ν. Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα, 2000

[28] [https://en.wikipedia.org/wiki/Good\\_manufacturing\\_practice](https://en.wikipedia.org/wiki/Good_manufacturing_practice)

[29] «Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις» Τόμος 1 (Κτιριακές ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις), Π.Δ. Μπούρκας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2012

[30] «Planning and Installing Photovoltaic Systems- A guide for installers, architects and engineers», second edition, Earthscan

[31] «Παραμετρική Μελέτη Μηδενισμού Σκίασης Ηλιακών Συλλεκτών-Κώδικας-Εφαρμογές», διπλωματική εργασία του Σταμάτιου Καλάκιου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010

[32] <https://www.petrogloublanas.gr/userfiles/file/GSW%2030-45.pdf>

[33] John J. Grainger, William D. Stevenson, “Power System Analysis”, International Editions, 1994