



**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**“Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων”**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ  
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ»**

**“DESIGN OF AUTONOMOUS HYBRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM”**



**Υπεύθυνος Καθηγητής : Δρ. Καραϊσάς Πέτρος**

**Φοιτητής: Ζήρας Κοσμάς**

**Α.Μ. 49**

**Αιγάλεω**

**Οκτώβριος 2017**



Copyright © Ζήρας Κοσμάς

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 της 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	1
Executive Summary .....	2
Κεφάλαιο 1 : Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	3
1.1 Εισαγωγή.....	3
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	4
1.2.1 Αιολική ενέργεια.....	4
1.2.2 Γεωθερμική ενέργεια.....	6
1.2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια.....	7
1.2.4 Βιομάζα.....	9
1.3 Ηλιακή ενέργεια και η ηλιακή ακτινοβολία.....	10
1.3.1 Ηλιακή ενέργεια.....	10
1.3.2 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας .....	11
1.3.3 Ηλιακή γεωμετρία.....	12
1.3.4 Προσανατολισμός ηλιακού συλλέκτη.....	13
Κεφάλαιο 2 : Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	13
2.1 Συστήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	15
2.1.1 Απομονωμένα ή εκτός δικτύου φωτοβολταϊκά συστήματα.....	15
2.1.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο.....	17
2.1.3 Πλεονεκτήματα.....	19
2.1.3 Μειονεκτήματα.....	19
2.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	20
2.3 Φωτόρευμα.....	21
2.4 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	22
2.4.1 Μονοκρυσταλλικού πυριτίου.....	22
2.4.2 Πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	22
2.4.3 Άμορφου πυριτίου.....	23
2.4.4 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών επιστρώσεων.....	23

2.5 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	25
2.5.1 Ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού συστήματος.....	25
2.5.2 I – V Χαρακτηριστική φωτοβολταϊκού συστήματος.....	27
2.5.3 Βαθμός απόδοσης.....	34
2.6 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια.....	37
2.6.1 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	37
2.6.2 Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	39
2.6.3 Φαινόμενο Hot – Spot .....	40
2.6.4 Μέθοδοι θεραπείας.....	42
Κεφάλαιο 3 : Ανεμογεννήτρια.....	43
3.1 Ταχύτητα ανέμου.....	43
3.1.1 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σύμφωνα με το ύψος.....	43
3.1.2 Επίδραση εμποδίων στη ροή του ανέμου.....	44
3.2 Είδη αιολικών μηχανών.....	45
3.3 Τεχνολογία ανεμογεννήτριας.....	46
3.4 Ισχύς ανεμογεννητριών.....	48
3.5 Μικρής Ισχύος Ανεμογεννήτρια.....	50
3.5.1 Δομικά στοιχεία μικρών ανεμογεννητριών.....	50
3.5.2 Πτερύγια μικρών ανεμογεννητριών.....	51
3.5.3 Προσανατολισμός μικρών ανεμογεννητριών.....	51
3.5.4 Συστήματα ελέγχου ταχύτητας.....	52
3.5.5 Γεννήτριες μικρών ανεμογεννητριών.....	53
3.5.6 Πύργοι στήριξης μικρών ανεμογεννητριών.....	53
Κεφάλαιο 4 : Αντιστροφέας ( Inverter ).....	55
4.1 Εισαγωγή.....	55
4.2 Μονάδες μετατροπής Ισχύος.....	56
4.3 Αντιστροφέας.....	58
4.3.1 Γενικά στοιχεία.....	58
4.3.2 Κατηγορίες αντιστροφέων.....	59
4.3.3 Αρχή λειτουργίας αντιστροφέα.....	60
4.4 Σχεδίαση ενός DC – AC μετατροπέα.....	63

4.4.1 Πλευρά εισόδου του μετατροπέα.....	63
4.4.1.1 Κατάσταση λειτουργίας.....	63
4.4.2 Πλευρά εξόδου του μετατροπέα.....	65
4.5 Ελεγκτής φόρτισης.....	67
4.5.1 Παράλληλος ρυθμιστής φόρτισης ( Shunt Controller ).....	68
4.5.2 Ρυθμιστής φόρτισης σε σειρά ( Series Controller ).....	69
Κεφάλαιο 5 : Μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.....	70
5.1 Εισαγωγή.....	70
5.2 Ηλεκτρικοί συσσωρευτές.....	70
5.3 Δομή συσσωρευτών.....	71
5.4 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών.....	73
5.5 Κατηγορίες στοιχείων και συσσωρευτών.....	74
5.5.1 Πρωτεύοντα στοιχεία ή συσσωρευτές.....	74
5.5.2 Δευτερεύοντα στοιχεία ή συσσωρευτές.....	74
5.6 Τύποι συσσωρευτών.....	75
5.7 Κύκλος λειτουργίας ( Duty Cycle ).....	85
5.7.1 Συσσωρευτές εκκίνησης.....	85
5.7.2 Συσσωρευτές έλξης.....	85
5.7.3 Στάσιμοι συσσωρευτές.....	86
5.7.4 Συσσωρευτές κλειστού τύπου (Sealed).....	86
5.7.5 Συσσωρευτές μικρού ρυθμού εκφόρτισης.....	86
5.7.6 Συσσωρευτές μέσου ρυθμού εκφόρτισης.....	86
5.8 Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός συσσωρευτή.....	86
5.8.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.....	86
5.8.2 Χωρητικότητα.....	87
5.8.3 Εκφόρτιση και επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης.....	88
5.8.4 Αυτοεκφόρτιση.....	88
5.8.5 Φόρτιση.....	89
5.8.6 Χρόνος ζωής συσσωρευτή.....	89
5.8.7 Συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή.....	90
5.8.8 Συντελεστής φόρτισης και απόδοση.....	90

5.9 Οι συσσωρευτές στα αυτόνομα υβριδικά ενεργειακά συστήματα.....	91
5.9.1 Κύκλος λειτουργίας σε αυτόνομα υβριδικά ενεργειακά συστήματα με εφεδρική πηγή.....	91
Κεφάλαιο 6 : Οικιακό αυτόνομο υβριδικό σύστημα ενέργειας.....	93
6.1 Επιμέρους τμήματα της εγκατάστασης.....	93
6.1.1 Ανεμογεννήτρια.....	93
6.1.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ.....	95
6.1.3 Μπαταρία.....	96
6.1.4 Ρυθμιστής Φόρτισης.....	97
6.1.5 Μετατροπέας.....	97
6.1.6 Ανεμόμετρο.....	98
6.1.7 Πυρανόμετρο.....	99
6.1.8 Θερμοζεύγη.....	99
Κεφάλαιο 7: Μελέτη αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος για την τροφοδότηση οικίας 120 τ.μ. ....	100
7.1 Εισαγωγή.....	100
7.2 Ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης κατοικίας.....	101
7.3 Καταμερισμός της ισχύος ζήτησης.....	103
7.4 Υπολογισμός υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος.....	110
Συμπεράσματα.....	118
Βιβλιογραφία.....	120

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια το πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας από συμβατικές πηγές μπορεί να επιλυθεί μέσω της συλλογής και μετατροπής της αιολικής και ηλιακής ενέργειας όπου και θα μετατραπούν σε ηλεκτρισμό, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στον περιορισμό της κατανάλωσης ορυκτών πόρων και στην προστασία του περιβάλλοντος. Για την εκμετάλλευση του ηλιακού και αιολικού δυναμικού έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι ανεμογεννήτριες.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται η συνδυασμένη χρήση της αιολικής και ηλιακής ενέργειας με στόχο την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών μίας οικίας. Δια αυτό το λόγο εξετάστηκε ως προς την ενεργειακή του συμπεριφορά ένα σύστημα αποτελούμενο από μία συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων και μίας μικρής ανεμογεννήτριας. Στα αρχικά κεφάλαια αναφερόμαστε γενικά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως επίλυση της ενεργειακής κρίσης η οποία αναπτύχθηκε πριν λίγες δεκαετίες. Καθώς αργότερα εξετάζουμε με περισσότερο βάθος το φωτοβολταϊκό φαινόμενο καθώς και πως αυτό συνεισφέρει στην λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Στα ίδια πλαίσια κινούμαστε και στην ανεμογεννήτριας καθώς η κινητήρια δύναμή μας είναι ο άνεμος. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια απαιτεί κάποιες μετατροπές ώστε να είναι χρήσιμη σε μία οικία εξ' ου και αναφερόμαστε ενδελεχώς στους αντιστροφείς ή με την κοινή και διεθνή ονομασία inverter. Οι αντιστροφείς – inverters μετατρέπουν το συνεχές σε εναλλασσόμενο ρεύμα ώστε να καταναλωθεί απευθείας από τις ανάγκες της οικίας είτε να αποθηκευτεί σε συσσωρευτές κατάλληλους για την συγκεκριμένη ενέργεια με σκοπό τη χρήση της σε στιγμές με ακατάλληλο καιρό.

Στο τέλος της εργασίας μας πραγματοποιούμε εκτενή μελέτη ναί μεν στην παραγομένη ηλεκτρική ενέργεια από τις συγκεκριμένες πηγές ενέργειας αλλά και στην κατανάλωση αυτής από τις σύνηθες εγκατεστημένες ηλεκτρικές συσκευές της οικίας.

Λέξεις κλειδιά : Ενέργεια, Φωτοβολταϊκά πλαίσια, ανεμογεννήτρια, αντιστροφέας – inverter, συσσωρευτές, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



## **EXECUTIVE SUMMARY**

In the recent past years a common solution has been found to the daily energy consumption and that is the accumulation of the wind and solar power and afterwards transformed in energy power. This contributes to the reduction of natural resources consumption and to the environment protection. For that cause new and different wind and solar technologies have been invented, some of which are the solar panel systems and the wind generators.

In this diploma thesis we study the combined use of wind and solar energy to fulfill the power need of a household. For that reason an autonomous hybrid system was examined, composed of a series of solar panels and a small wind generator. Furthermore, in the first chapter we mention the energy solution by renewable energy sources which developed in the recent decades. Later on we, in depth, examine the photovoltaic phenomenon and how it works in a solar panel .We examine as well the wind generators, but the wind is our power source instead. The energy power needs some adjustments and transformations to be useful in the household so we study the energy inverters. Inverters transform the direct current into alternative current so it can be consumed by the electric household needs or to be stored in several suitable batteries in case of a power grid failure or of bad weather conditions.

Finally, a wide study is taking place not only for the energy power that is produced but for the common energy needs of a household as well.

**Keywords :** Energy, Solar panels, wind generator, inverter, batteries, renewable energy sources.

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## ‘Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας’

### 1.1 Εισαγωγή

Από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα μέχρι και σήμερα η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας έχει αυξηθεί με γεωμετρική πρόοδο. Ο πιο σύνηθες τρόπος παραγωγής ενέργειας ήταν και είναι η καύση πετρελαίου και άλλων ορυκτών όπως ο λιγνίτης. Αυτός μεν ο τρόπος είναι άκρως επιβλαβής για το περιβάλλον καθώς ελευθερώνονται, μέσω της καύσης, αέρια που καταστρέφουν με γρήγορο ρυθμό το περιβάλλον. Ύστερα από την πετρελαϊκή κρίση του 1973 και τα ατυχήματα που προκλήθηκαν σε διάφορους πυρηνικούς σταθμούς, όπως στο Τσερνόμπιλ, ήρθαν στο προσκήνιο εναλλακτικές πηγές ενέργειας, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μερικές εξ αυτών είναι η αιολική, γεωθερμική και η ως επί το πλείστον γνωστότερη ηλιακή ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά πάρκα αυξάνονται διαρκώς καθώς όχι μόνο με το χρόνο αποκτούν μικρότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας αλλά είναι επίσης φιλικά προς το περιβάλλον. Κάθε εγκατεστημένο κιλοβάτ φωτοβολταϊκού στοιχείου συμβάλλει ετησίως στην αποφυγή 1.5 τόνου διοξειδίου του άνθρακα και άλλως βλαβερών αερίων. Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο το 2007 επαναβεβαίωσε τη δέσμευση της Κοινότητας για την ανάπτυξη ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μετά το 2010. Όλες οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν δεσμευτεί να επιτύχουν ένα συγκεκριμένο στόχο μέχρι το 2020, ότι το μερίδιο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας να αποτελείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για την Ελλάδα συγκεκριμένα το μερίδιο της ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για το έτος 2020 ορίστηκε σε 18 % περίπου το τριπλάσιο (6.9 %) από ότι ήταν πριν 12 χρόνια.

## 1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

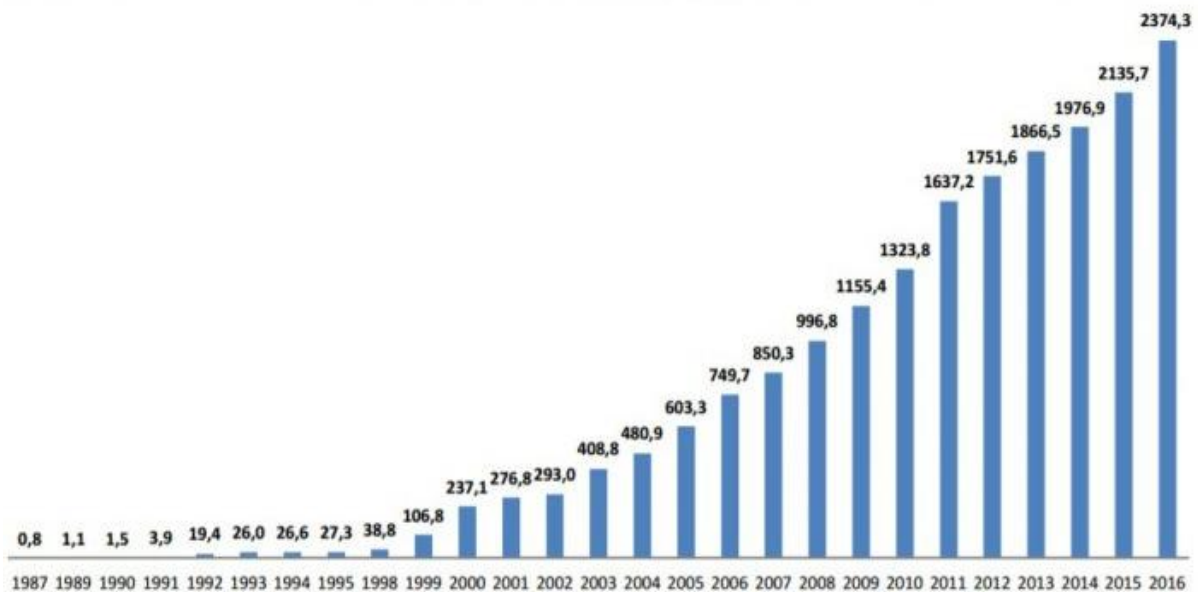
### 1.2.1 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από τη μετακίνηση μαζών της ατμόσφαιρας. Οι μετακινήσεις του αέρα ( άνεμοι ) δημιουργούνται από τις μεταβολές και τις διαφορετικές από τόπο σε τόπο τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές της πίεσης οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση ( απορρόφηση ενέργειας ) της ατμόσφαιρας κάθε τόπου από τον Ήλιο. Για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργεια χρησιμοποιούμε τις ανεμογεννήτριες με τις οποίες μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με συστηματικό τρόπο άρχισε παγκοσμίως στις αρχές της δεκαετίας του '80. Η αιολική ενέργεια θεωρείται ως μία από τις ανεξάντλητες ανανεώσιμες πηγές καθώς ο ήλιος πάντα θα αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα ως προς την ανάπτυξη των ανέμων. Ο άνεμος είναι μία ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη σε όλες τις παραμέτρους πηγή ενέργειας. Η δέσμευση και χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής, είναι ως εκ τούτου μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Η σχεδίαση και η κατασκευή μιας αποδοτικής και παράλληλα οικονομικής ανεμομηχανής δεν είναι εύκολη δουλειά. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες ανεμομηχανές χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα επιτεύγματα στην τεχνολογία των υλικών, στη μηχανολογία, ηλεκτρονική και αεροδυναμική έχουν ανεβάσει σε υψηλά επίπεδα την απόδοσή τους μειώνοντας συνεχώς το κόστος της παραγόμενης Η μελέτη ενός συστήματος ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει την αεροδυναμική σχεδίαση και τη μελέτη εφαρμογής στην οποία περιλαμβάνονται η μηχανολογική μελέτη και σχεδίαση, η μελέτη του ηλεκτρολογικού συστήματος και τα ηλεκτρολογικά συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Η αεροδυναμική σχεδίαση αποτελεί προϋπόθεση για το σχεδιασμό ενός συστήματος δέσμευσης και μετατροπής της ενέργειας του ανέμου, ενώ η ηλεκτρομηχανολογική μελέτη είναι το αμέσως επόμενο και αναγκαίο στάδιο για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, κατά τον αποδοτικότερο και πλέον συμφέροντα τεχνοοικονομικό τρόπο.

ενέργειας.



### Total installed MW per year



Σχήμα 1.1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αιολικών πάρκων στην Ελλάδα.

Η πρώτη μεγάλη ανεμογεννήτρια, γνωστή ως Smith – Putman σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε στις Η.Π.Α. Η σχεδίαση της άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του '30 και οι δοκιμές της έγιναν στις αρχές της δεκαετίας του '40. Η ισχύς της ήταν 1250 kW και είχε δύο πτερύγια από χάλυβα με διάμετρο περιστροφής 53 μέτρα, τοποθετημένα σε έναν πύργο ύψους 33.5 μέτρων.

Το σύγχρονο ενδιαφέρον με κρατική χρηματοδότηση άρχισε στις Η.Π.Α το 1973. Το πρόγραμμα της πρώτης μεγάλης ανεμογεννήτριας με τον κωδικό Mod-0 ανατέθηκε στη NASA και περιλάμβανε τη σχεδίαση, κατασκευή και δοκιμή μιας ανεμογεννήτριας ισχύος 100 kW με διάμετρο 38 μέτρα. Σκοπός του προγράμματος αυτού ήταν η εξαγωγή πληροφοριών και συμπερασμάτων για την εκπόνηση ενός ευρύτερου προγράμματος αιολικής ενέργειας. Στην Ευρώπη την πρωτοπορία στην αγορά των ανεμογεννητριών κατέχει η Δανία. Άλλες χώρες με ανεπτυγμένο το κλάδο σχεδίασης και κατασκευής ανεμογεννητριών είναι η Ολλανδία, η Βρετανία, το Βέλγιο και πρόσφατα η Ιταλία και η Ισπανία.

Στη χώρα μας έγινε μία προσπάθεια από την Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία πριν από μερικά χρόνια για τη μερική κατασκευή και συναρμολόγηση ανεμογεννητριών Βρετανικής σχεδίασης. Για διάφορους λόγους που έχουν σχέση με τη Βρετανική εταιρία η προσπάθεια δεν παρουσίασε τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Η απόφαση, όμως της Δ.Ε.Η να εκμεταλλευτεί σε σημαντικό βαθμό τη αιολική ενέργεια και η αναμενόμενη απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας δημιουργούν τις πολύ καλές προοπτικές στην αγορά των

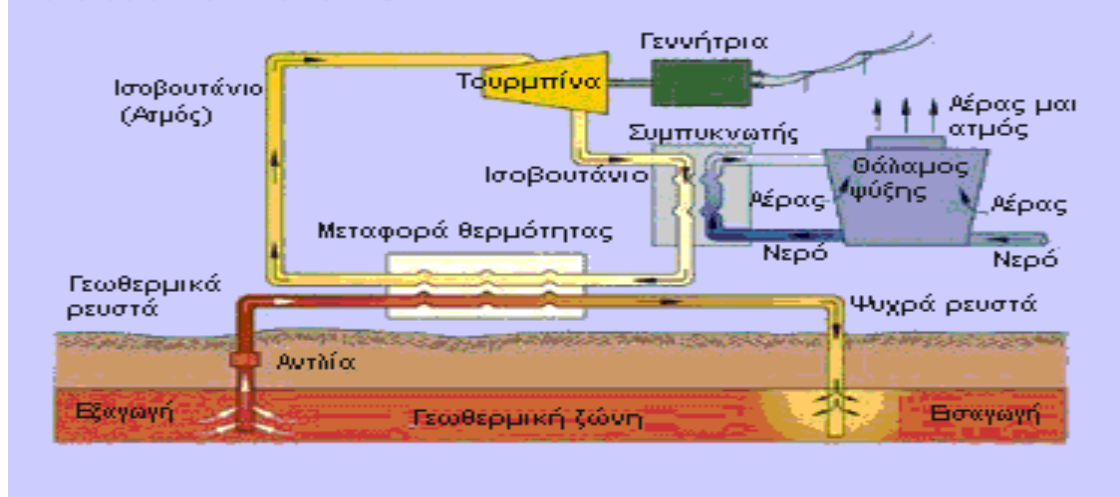
ανεμογεννητριών. Εάν δε ληφθεί υπόψη ότι τις περισσότερες εταιρίες της παγκόσμιας αγοράς σχεδιάζουν τις κατασκευές τους με βάση τυποποιημένα εξαρτήματα και συστήματα, είναι φανερό ότι και η Ελλάδα μπορεί τουλάχιστον στην εσωτερική αγορά να συμπεριλάβει και εγχώριες κατασκευές.

### *1.2.2 Γεωθερμική ενέργεια*

Η γεωθερμική ενέργεια προέρχεται από το εσωτερικό της γης είτε μέσω ηφαιστειακών εκροών είτε μέσω ρηγμάτων του υπεδάφους που αναβλύζουν ατμούς και θερμό νερό. Ανάλογα με τη θερμοκρασία των ρευστών που ανέρχονται στην επιφάνεια η γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζεται ως υψηλής ενθαλπίας ( για θερμοκρασίες μικρότερες από 100 ), μέσης ενθαλπίας ( για θερμοκρασίες 100 – 150 ) και χαμηλής ενθαλπίας ( για θερμοκρασίες μικρότερες από 100 ). Η γεωθερμική ενέργεια υψηλής ενθαλπίας χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρισμού σ' όλο τον κόσμο.

Η προέλευση της θερμότητας της γης δεν είναι με ακρίβεια γνωστή. Υπάρχουν διάφορες θεωρίες που αναφέρονται στους μηχανισμούς που συμμετέχουν στην παραγωγή της. Επικρατέστερη θεωρείται αυτή που αναφέρεται στη διάσπαση των ραδιενεργών ισότοπων του ουρανίου, θορίου, καλίου και άλλων στοιχείων. Η μάζα της γης είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την επιφάνειά της και καλύπτεται από υλικά χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας με αποτέλεσμα η θερμότητά της να συγκρατείται στο εσωτερικό της. Ο ρυθμός απωλειών από την επιφάνεια του πλανήτη μας είναι πολύ μικρός περίπου  $8 \times 10^{-2}$  W/m. Η θερμοκρασία της γης αυξάνεται με το βάθος, η μέση δε γεωθερμική βαθμίδα στις ηπείρους για μάζες που βρίσκονται σχετικά κοντά στην επιφάνεια είναι 300 C/km, δηλαδή για κάθε χιλιόμετρο βάθους η θερμοκρασία αυξάνεται 300 Ψ. Σε πολύ μεγάλα βάθη η θερμοκρασία δεν είναι με ακρίβεια γνωστή. Στα όρια μεταξύ μανδύα και φλοιού πιστεύεται ότι η θερμοκρασία φτάνει στους 6000 C ενώ στο κέντρο της γης στους 60000 C . Φαίνεται ότι η παραγωγή θερμότητας από ραδιενεργά ισότοπα είναι συγκεντρωμένη περισσότερο στο φλοιό παρά στον πυρήνα με αποτέλεσμα η γεωθερμική βαθμίδα να μειώνεται με το βάθος.

Χρήση γεωθερμικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος



Φωτογραφία 1.1 Χρήση γεωθερμικής ενέργειας

### Εφαρμογές :

α. Η πρώτη βασίζεται στη χρήση της θερμότητας της γης για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και άλλες χρήσεις (θέρμανση κτιρίων, θερμοκηπίων). Αυτή η θερμότητα μπορεί να προέρχεται από γεωθερμικά γκάζια που φθάνουν με φυσικό τρόπο της επιφάνεια της γης ή με γεώτρηση στο φλοιό της γης σε περιοχές που η θερμότητα βρίσκεται αρκετά κοντά στην επιφάνεια. Αυτές οι πηγές είναι συνήθως από μερικές εκατοντάδες μέχρι 3000 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της γης.

β. Η δεύτερη εφαρμογή της γεωθερμικής ενέργειας εκμεταλλεύεται τις θερμές μάζες εδάφους ή υπογείων υδάτων για να κινήσουν θερμικές αντλίες για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης.

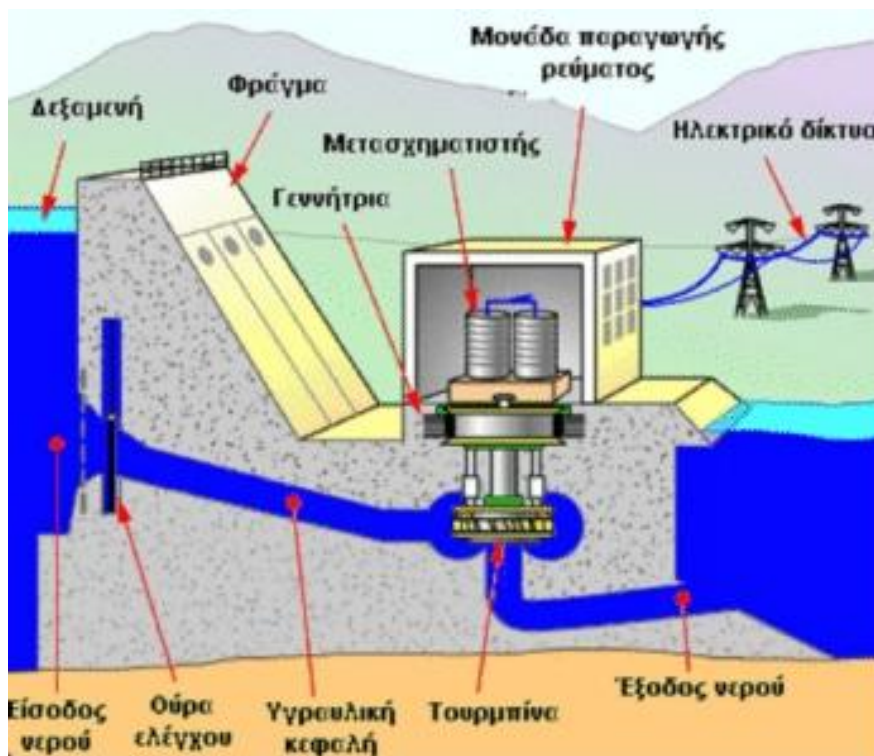
Η χρήση γεωθερμικής ενέργειας παράγει παγκοσμίως 8.000 MWe ηλεκτρικού ρεύματος και 4.000 MWt θερμικής ενέργειας.

### 1.2.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του νερού των ποταμών και της μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια στροβίλων και ηλεκτρογεννητριών. Η ενέργεια αυτή διαχέεται στη φύση από δίνες και ρεύματα καθώς το νερό ρέει κατηφορικά σε ρυάκια, χείμαρρους και ποτάμια μέχρι να φτάσει στη θάλασσα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του αποθηκευμένου νερού και όσο ψηλότερα βρίσκεται τόσο περισσότερη είναι η ενέργεια που περιέχει. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μία πραγματικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας που στηρίζεται στην εκμετάλλευση των ποταμών και των τεχνητών ή φυσικών φραγμάτων.

Ο πρώτος υδροηλεκτρικός σταθμός χτίστηκε το 1882 στο Appleton, Wisconsin και παράγαγε 12.5 kW και παρείχε φως σε δύο χαρτοβιομηχανίες και ένα σπίτι. Υδροηλεκτρικά εργοστάσια ποικίλουν σε μέγεθος από αρκετές εκατοντάδες κιλοβάτ σε αρκετές εκατοντάδες MW αλλά μερικοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν ικανότητες μέχρι και 10.000 MW και παρέχουν ηλεκτρισμό σε εκατομμύρια ανθρώπους.

Η μετατροπή της ενέργειας των υδατοπτώσεων με τη χρήση υδροηλεκτρικών έργων (υδατοταμιευτήρας, φράγμα, κλειστός αγωγός πτώσεως, υδροστρόβιλος, ηλεκτρογεννήτρια, διάφυγα φυγής) παράγει την υδροηλεκτρική ενέργεια. Οι υδροηλεκτρικές μονάδες εκμεταλλεύονται τη φυσική ποσότητα νερού καθώς η υπερίσχυση ακτινοβολία διασπά τα μόρια του νερού σε ιόντα. Ταυτόχρονα νέες ποσότητες νερού εμφανίζονται λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας έτσι ώστε η συνολική ποσότητα του νερού να διατηρείται περίπου σταθερή.



Φωτογραφία 1.2 Υδροηλεκτρικό εργοστάσιο

Η λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων βασίζεται στην κίνηση του νερού λόγω διαφοράς μανομετρικού ύψους μεταξύ των σημείων εισόδου και εξόδου. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται ένα φράγμα που συγκρατεί την απαιτούμενη ποσότητα νερού στον δημιουργημένο ταμιευτήρα. Κατά τη διέλευσή του από τον αγωγό πτώσεως κινεί έναν

στρόβιλο ο οποίος θέτει σε λειτουργία τη γεννήτρια. Μία τουρμπίνα που είναι εγκατεστημένη σε μεγάλη μονάδα μπορεί να ζυγίζει μέχρι 172 τόνους και να περιστρέφεται με 90 rpm. Η ποσότητα του ηλεκτρισμού που παράγεται καθορίζεται από αρκετούς παράγοντες. Δύο από τους σημαντικότερους είναι ο όγκος του νερού που ρέει και η διαφορά μανομετρικού ύψους μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του ταμιευτήρα και του στροβίλου. Η ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγεται είναι ανάλογη των δύο αυτών μεγεθών. Συνεπώς ο παραγόμενος ηλεκτρισμός εξαρτάται από την ποσότητα του νερού του ταμιευτήρα. Για το λόγο αυτό μόνο σε περιοχές με σημαντικές βροχοπτώσεις, πλούσιες πηγές και κατάλληλη γεωλογική διαμόρφωση είναι δυνατόν να κατασκευαστούν υδροηλεκτρικά έργα. Συνήθως η ενέργεια που τελικώς παράγεται χρησιμοποιείται μόνο συμπληρωματικά ως προς άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας καλύπτοντας φορτία αιχμής. Στη χώρα μας η υδροηλεκτρική ενέργεια ικανοποιεί περίπου το 9 % των ενεργειακών μας αναγκών σε ηλεκτρισμό.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, υδροηλεκτρικά εργοστάσια έχουν χωρητικότητα 675.000 μεγαβάτ ετησίως και παράγουν από 2.3 τρισεκατομμύρια κιλοβατώρες ηλεκτρικής ενέργειας ισοδύναμη ενέργεια με 3.6 δις. Βαρέλια πετρελαίου.

#### 1.2.4 Βιομάζα

Η πηγή ενέργειας που προέρχεται από την οργανική ύλη ονομάζεται βιομάζα. Η οργανική ύλη αυτή περιλαμβάνει το ξύλο, υπολείμματα γεωργικών και δασικών δραστηριοτήτων, υπολείμματα κτηνοτροφικών ομάδων καθώς και ύλες από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού. Ο σκοπός είναι η παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Ο όρος "βιοισχύς" περιγράφει τα συστήματα που χρησιμοποιούν πρώτες ύλες βιομάζας αντί των συνήθων ορυκτών καυσίμων ( φυσικό αέριο, άνθρακα ) για ηλεκτροπαραγωγή, ενώ ως "βιοκαύσιμα" αναφέρονται κυρίως τα υγρά καύσιμα μεταφορών που υποκαθιστούν πετρελαϊκά προϊόντα όπως το βιοντίζελ και την αιθανόλη. Η παραγωγή βιοντίζελ το 2008 ήταν 12 δις λίτρα και της αιθανόλης 67 δις λίτρα.

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 πλεονέκτημα της καταγράφεται και το ότι κατά την παραγωγή και την μετατροπή της δε 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



υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, εποχικότητα, μεγάλη διασπορά κ.λπ. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνεπάγονται πρόσθετες, σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, δυσκολίες στη συλλογή, μεταφορά και αποθήκευση της. Σαν συνέπεια το κόστος μετατροπής της σε πιο εύχρηστες μορφές ενέργειας παραμένει υψηλό. Η παγκόσμια παραγωγή βιομάζας αυξήθηκε το 2008 κατά 2 GW φτάνοντας συνολικά τα 52 GW. Η μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας από βιομάζα πραγματοποιείται από τις Η.Π.Α και ακολουθούν Βραζιλία και Φιλιππίνες.

### **1.3 Ηλιακή ενέργεια και ηλιακή ακτινοβολία**

#### *1.3.1 Ηλιακή ενέργεια*

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από τον ήλιο. Φτάνει σχεδόν αμετάβλητη στο ανώτατο στρώμα της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας, διαμέσου του διαστήματος, και στη συνέχεια κατά τη διέλευσή της από την ατμόσφαιρα υπόκειται σε σημαντικές αλλαγές που οφείλονται στη σύσταση της ατμόσφαιρας. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σημείο στην επιφάνεια της γης μια δεδομένη χρονική στιγμή χαρακτηρίζεται από την ένταση και την διεύθυνση πρόσπτωσης. Στην επιφάνεια της γης φτάνει μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας που προέρχεται άμεσα από τον ήλιο (άμεση ηλιακή ακτινοβολία), ενώ το υπόλοιπο είτε απορροφάται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας είτε ανακλάται πάλι προς το διάστημα ή προς την επιφάνεια της γης. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετά από διαδοχικές ανακλάσεις δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και καλείται διάχυτη ακτινοβολία. Η γη δέχεται ετήσια ηλιακή ενέργεια με ακτινοβολία της τάξης του  $173 \times 10^{15}$  W. Σε ένα εικοσιτετράωρο κάθε μέτρο επιφάνειας της γης δέχεται κατά μέσο όρο 4 – 6 KWh ηλιακής ενέργειας με ακτινοβολία 800 – 2500 KWh/m<sup>3</sup> ετησίως. Η ποσότητα αυτή είναι περίπου η διπλάσια από αυτή που θα μπορούσε ποτέ να ληφθεί από το σύνολο των μη ανανεώσιμων πηγών της Γης ( Π.χ Φυσικό αέριο , άνθρακα κτλ ) και περισσότερη από αυτή που καταναλώνει σήμερα ο άνθρωπος σε ένα χρόνο. Για αυτό κρίνεται σκόπιμη η πρακτική εκμετάλλευση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για :

1. Την άμεση παραγωγή θερμότητας, με ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα.  
Αν η παραγόμενη θερμότητα είναι υψηλής θερμοκρασίας τότε μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού και στη συνέχεια μηχανικής ενέργειας ( με ατμοστρόβιλους ). Η μηχανική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτή τη περίπτωση αναφερόμαστε σε θερμική παραγωγή ηλεκτρισμού από την ηλιακή ενέργεια.

2. Την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με δύο τρόπους : θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η θερμική αξιοποίηση περιλαμβάνει συλλογή της ηλιακής ενέργειας για να παραχθεί θερμότητα κυρίως για θέρμανση νερού και μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση ατμοστροβίλων.

### *1.3.2 Διακύμανση Ηλιακής Ακτινοβολίας*

Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. 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 δε είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι π.χ. στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25 το χειμώνα και 13:25 το καλοκαίρι όταν ισχύει η θερινή ώρα. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μία επίπεδη επιφάνεια γίνεται σημαντικά μεγαλύτερη όταν βρίσκεται σε κατάλληλη κλίση ώστε η πρόσπτωση των ακτίνων να γίνεται κάθετα. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη ισχύς της ακτινοβολίας κατά το ηλιακό μεσημέρι, στις ευνοϊκότερες ημέρες του έτους, δε διαφέρει πάρα πολύ από τόπο σε τόπο και η τιμή  $1 \text{ kW/m}^2$  αποτελεί μία πολύ χονδρική αλλά πάντως γενικά αποδεκτή προσέγγιση.

Στη διάρκεια του έτους στο βόρειο ημισφαίριο ο αριθμός των φωτεινών ωρών της ημέρα, η μέγιστη ισχύς καθώς και η συνολική ενέργεια που δέχεται μία οριζόντια επιφάνεια φτάνουν στις μέγιστες τιμές τους στις 21 Ιουνίου και πέφτουν στις αντίστοιχες τιμές στις 21 Δεκεμβρίου. Στις επιφάνειες όμως που βρίσκονται σε κλίση ίση με το γεωγραφικό παράλληλο του τόπου η μέγιστη τιμή της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι στα ηλιακά μεσημέρια των ισημερινών ( 21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου) διότι τότε δέχονται κάθετα τις ακτίνες του ήλιου. Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης γίνεται ανώμαλη. Οι παρατηρούμενες απότομες πτώσεις της έντασης οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος. Επίσης το γρήγορο 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 νεφρών και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.

### 1.3.3 Ηλιακή Γεωμετρία

- **Αέριος μάζα** : Το ποσοστό που αναλογεί από το μήκος της μάζας της ατμόσφαιρας το οποίο διασχίζει η δέσμη της άμεσης ακτινοβολίας ως προς το μήκος της μάζας της ατμόσφαιρας που θα περνούσε εάν ο ήλιος ήταν στο ζενίθ του. Κατά συνέπεια στη στάθμη της θάλασσας όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ  $60^\circ$  το  $\mu=1$  και  $\mu=2$ . Για γωνίες από  $0 - 70^\circ$  ισχύει κατά προσέγγιση

$$AM = 1/\cos\theta_z$$

Τιμή AM	Συμβατικές Συνθήκες	Ισχύς Ακτινοβολίας Ηλιακής W/m <sup>2</sup>
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα	1350
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας	1060
AM2	Απόσταση ήλιου $60^\circ$ από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας.	880
AM3	Απόσταση ήλιου $70.5^\circ$ . Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας.	750

Πίνακας 1.1 Ισχύς Ηλιακής Ακτινοβολίας

- **Άμεση ακτινοβολία** : Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει απ' ευθείας από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα (αναφέρεται συχνά και ως direct or beam radiation).
- **Διάχυτη ακτινοβολία** : Η ηλιακή ακτινοβολία που έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα (αναφέρεται και ως diffuse radiation).
- **Συνολική Ακτινοβολία ( total solar radiation)** : Το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια ( συνήθως οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας είναι μετρήσεις της συνολικής ακτινοβολίας σε μία οριζόντια επιφάνεια, συχνά καλούμενη κοσμική ακτινοβολία).

- **Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας  $G$**  : Μονάδα  $W/m^2$  ή  $mW/cm^2$  , είναι ο ρυθμός με τον οποίο η ακτινοβολία προσπίπτει σε μία επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας. Το σύμβολο  $G$  χρησιμοποιείται για να εκφράσει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, με τους κατάλληλους δείκτες για την άμεση , τη διάχυτη ή τη συνολική ακτινοβολία.
- **Πυκνότητα ενέργειας ακτινοβολίας** : Μονάδα  $J/m^2$ , η προσπίπτουσα ενέργεια σε μία επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας. Υπολογίζεται από την ολοκλήρωση της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός καθορισμένου έτους, συνήθως μία ώρα ή μία μέρα. Η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία είναι ένας όρος που ισχύει συγκεκριμένα για την ακτινοβολία ηλιακής ενέργειας.
- **Ηλιακή ώρα ( Solar time )** : Η ηλιακή ώρα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό όλων των γωνιών που αναφέρονται στον ήλιο και διαφέρει από την τοπική ώρα εξαιτίας την κλίσης του άξονα της γης και της ελλειπτικής τροχιάς της γύρω από τον ήλιο.

#### 1.3.4 Προσανατολισμός ηλιακού συλλέκτη

Βασικά στοιχεία καθορισμού του προσανατολισμού ενός συλλέκτη είναι η γωνία κλίσης και το αζιμούθιό του, μετρούμενο ως προς την κατεύθυνση του Νότου. Η κατεύθυνση αυτή χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη τιμή της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας.

Ο προσδιορισμός της αληθούς διεύθυνσης Βορρά – Νότου μπορεί να γίνει είτε με τη βοήθεια σχετικών οργάνων, όπως είναι η μαγνητική και η γυροσκοπική πυξίδα είτε με προσδιορισμό της χρονικής στιγμής του ηλιακού μεσημεριού, με τη μέθοδο που θα περιγραφεί στη συνέχεια. Η χρησιμοποίηση της πυξίδας προϋποθέτει τη γνώση της μαγνητικής απόκλισης για το δεδομένο τόπο, με βάση στοιχεία από σχετικούς πίνακες ή χάρτες. Για τον ακριβή προσδιορισμό των γωνιών χρησιμοποιούνται γωνιομετρικά όργανα ακριβείας, όπως ο θεοδόλιχος ή το ταχύμετρο, σε συνδυασμό με την πυξίδα.

Η μέθοδος προσδιορισμού της κατεύθυνσης του αληθούς Νότου σε ένα τόπο, με βάση το ηλιακό μεσημέρι βασίζεται στον προσδιορισμό της διεύθυνσης της σκιάς που δημιουργεί μία κατακόρυφη λεπτή ράβδος σε οριζόντιο επίπεδο τη στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο της φαινόμενης ημερήσιας τροχιάς του. Ο καθορισμός της κατάστασης αυτής απαιτεί γνώση της αντίστοιχης χρονικής στιγμής, με βάση τον τοπικό χρόνο, όπως τον

δείχνει ένα ρολόι. Για να προσδιοριστεί η χρονική στιγμή του ηλιακού μεσημεριού, με βάση τον επίσημο χρόνο, απαιτούνται :

- Η ζώνη πολιτικού χρόνου και το γεωγραφικό μήκος του τόπου
- Η χρονική διόρθωση με βάση την εξίσωση χρόνου για τη συγκεκριμένη ημέρα του έτους.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### “Φωτοβολταϊκά Στοιχεία”

#### 2.1 Συστήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χαρακτηρίζονται από μεγάλο εύρος εφαρμογών με κριτήριο την απαίτηση ισχύος. Το εύρος αυτό αναφέρεται στην κάλυψη ηλεκτρικής ισχύος καταναλωτικών προϊόντων χαμηλής ισχύος, όπως φωτισμός δρόμου, έως συστήματα μεγάλης ισχύος όπως μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα.

##### 2.1.1 Απομονωμένα ή εκτός δικτύου φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα απομονωμένα συστήματα δεν είναι συνδεδεμένα σε κάποιο εθνικό ή τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για αυτό ονομάζονται επίσης και φωτοβολταϊκά συστήματα εκτός δικτύου (off-grid). Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που χρειάζεται ηλεκτρική ισχύς σε κάποιο σημείο όπου είναι αδύνατη η μεταφορά ενέργειας ή αν υπάρχει η επιθυμία πλήρους αυτονομίας ηλεκτρικής ενέργειας από κάποιο δίκτυο και έχουν τυπικές τιμές ισχύος 100 Wp έως 200 kWp. Οπότε τα απομονωμένα συστήματα χωρίζονται σε 2 κατηγορίες :

##### **α . Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα :**

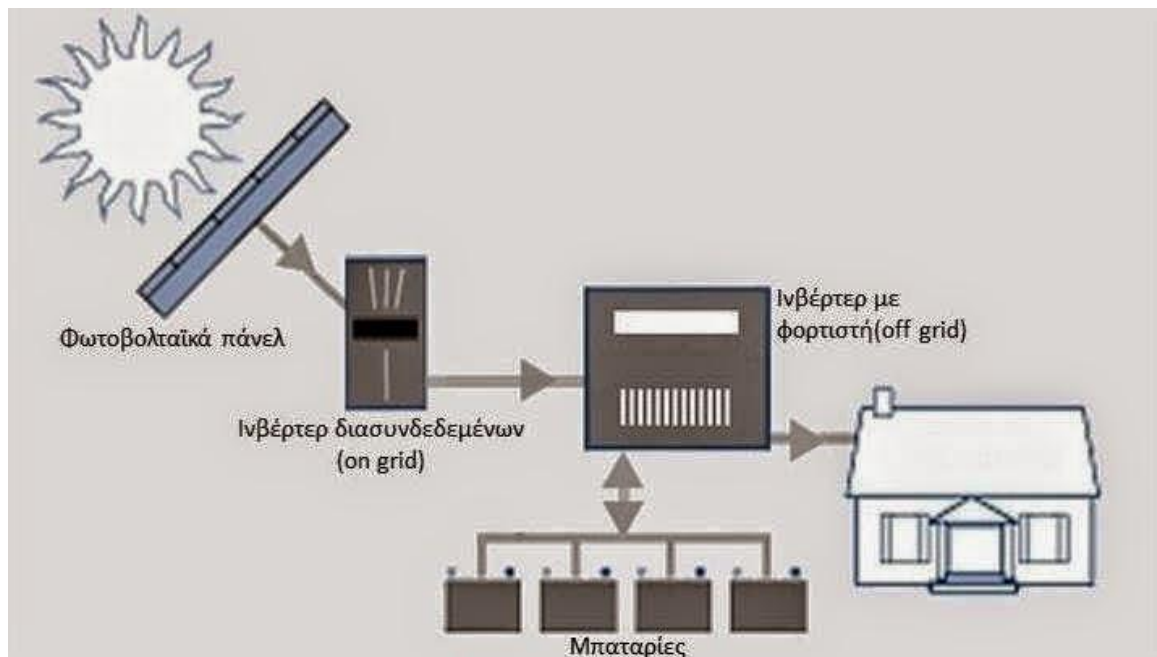
Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα η αναγκαία ηλεκτρική ενέργεια παράγεται αποκλειστικά από φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι άμεση στους καταναλωτές ή μέσω συσσωρευτών. Επίσης η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι συνεχούς ή εναλλασσόμενης τάσης.



Εικόνα 2.1 Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Σύμφωνα με τα παραπάνω υπάρχει διάκριση των αυτόνομων συστημάτων ως εξής :

- Άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου ( Direct – Coupled) : Στα συγκεκριμένα συστήματα η παραγόμενη ενέργεια αποδίδεται απευθείας στο φορτίο και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στις οποίες δεν απαιτείται τακτική λειτουργία του συστήματος καθώς και σε φορτία συνεχούς ρεύματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα συστήματα άντλησης νερού.
- Με αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας : Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν συσσωρευτές για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Σχεδιάζονται σύμφωνα με τις επιθυμητές μέρες αυτονομίας πράγμα το οποίο καθορίζει το μέγεθος των συσσωρευτών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα τροφοδοσίας φωτισμού οδών, διατάξεων πυρανίχνευσης δασικών εκτάσεων, τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού σε δύσβατες περιοχές, τροχόσπιτων και φάρων σε θαλάσσιες περιοχές.



Σχήμα 2.1 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα με άμεση τροφοδοσία ή με αποθήκευση της παραγόμενης.

Τα βασικά μέρη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι

1. Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες
2. Οι αντιστροφείς
3. Οι μετατροπείς τάσης DC / AC
4. Οι ελεγκτές φόρτισης μπαταριών
5. Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης

### **β . Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα:**

Όταν η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια δεν καλύπτεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα τότε χρησιμοποιείται ο συνδυασμός της με κάποια άλλη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι πηγές μπορεί να είναι συμβατικών καυσίμων. Κυρίως χρησιμοποιούνται ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ή ανεμογεννήτριες αντίστοιχα. Συχνά στα συστήματα αυτά προβλέπεται αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν εφαρμογές στις οποίες υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω όπως εξοχικές κατοικίες.

#### *2.1.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο*

Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι συνδεδεμένα σε κάποιο δίκτυο ηλεκτρικής παροχής αντλώντας από αυτό την ηλεκτρική ισχύ την οποία δεν μπορούν να καλύψουν καθιστώντας μη απαραίτητη την αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης μπορεί να συνιστούν μεγάλη ισχύος κεντρικούς φωτοβολταϊκούς σταθμούς με ισχύ μεγαλύτερη των 50 kWp, η οποία διοχετεύεται στο κεντρικό δίκτυο ή να είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο ως κατανεμημένα συστήματα. Τα κατανεμημένα συστήματα αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των παγκοσμίων συνδεδεμένων στο δίκτυο φωτοβολταϊκών συστημάτων με τυπικό μέγεθος 1,5 kWp έως 20 kWp.





Εικόνα 2.2 Φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο.

Διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο αλληλεπίδρασης τους με το δίκτυο :

*α. Φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούν το δίκτυο ως βοηθητική πηγή ενέργειας :*

Το σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει τις μέσες μηνιαίες ενεργειακές απαιτήσεις στην εφαρμογή. Στις περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ζήτησης ή αστοχίας του φωτοβολταϊκού συστήματος το δίκτυο καλύπτει τη ζήτηση ισχύος.

*β. Φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία λειτουργούν με συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο:*

Το σύστημα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει τις ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής. Στην ιδανική περίπτωση η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση ή μεγαλύτερη με την ενέργεια του δικτύου προς την εφαρμογή. Χαρακτηριστική εφαρμογή αποτελεί η ενσωμάτωση συστημάτων σε κατοικίες και κτίρια.

### 2.1.3 Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων

- Λειτουργούν αθόρυβα, καθαρά, χωρίς κατάλοιπα, αποφεύγοντας τη μόλυνση του περιβάλλοντος.
- Λειτουργούν χωρίς κινητά μέρη, με ελάχιστη συντήρηση.
- Λειτουργούν χωρίς καύσιμα.
- Λειτουργούν και με νεφελώδη ουρανό ( διάχυτη ακτινοβολία).
- Δεν χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια σε αντίθεση με τα θερμικά συστήματα.
- Κατασκευάζονται από πυρίτιο, ένα από τα πλέον εν αφθονία στοιχεία.
- Πλέον αποδοτικά σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Έχουν γρήγορη απόκριση σε ξαφνικές μεταβολές της ηλιοφάνειας.
- Αν ένα κομμάτι πάθει βλάβη το σύστημα συνεχίζει τη λειτουργία του μέχρι την αντικατάστασή του.
- Μεγάλες δυνατότητες σε μία ευρεία περιοχή ισχύων (από mW μέχρι MW).
- Έχουν μεγάλο λόγο ισχύος /βάρους επομένως είναι κατάλληλα για εγκατάσταση σε στέγες
- Είναι κατάλληλα για επιτόπιες εφαρμογές όπου δεν υπάρχει ή δε συμφέρει η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου.
- Είναι δυνατόν να συναρμολογηθούν τυποποιημένα στοιχεία μαζικής παραγωγής σε σύστημα οποιουδήποτε μεγέθους ( και βαθμό απόδοσης πρακτικά ανεξάρτητο του μεγέθους) για να καλύψουν μικρές, μεσαίες και μεγάλες ενεργειακές ανάγκες.

### 2.1.4 Μειονεκτήματα φωτοβολταϊκών συστημάτων

- Το σχετικά υψηλό κόστος αγοράς και η έλλειψη επιδοτήσεων ήταν ως πριν λίγο ο κυριότερος λόγος για τη στασιμότητα της ελληνικής αγοράς φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Τα φωτοβολταϊκά όπως άλλωστε και όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και ασήμαντο λειτουργικό κόστος, αντίθετα με τις συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες που συνήθως έχουν σχετικά μικρότερο αρχικό επενδυτικό κόστος και υψηλά λειτουργικά κόστη. Το κλίμα αυτό όμως τώρα αλλάζει δραματικά. Πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει τα τελευταία χρόνια σημαντικά προγράμματα ενίσχυσης των φωτοβολταϊκών, με γενναίες επιδοτήσεις τόσο της

αγοράς και εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, όσο και της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας.

- Ο απαραίτητος περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό για να αποφευχθεί η μείωση της απόδοσης από τη ρύπανση.
- Υπάρχει ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών με ανεμογεννήτριες και συμβατικές μηχανές παραγωγής λόγω ετεροχρονισμού φορτίου και παραγωγής.

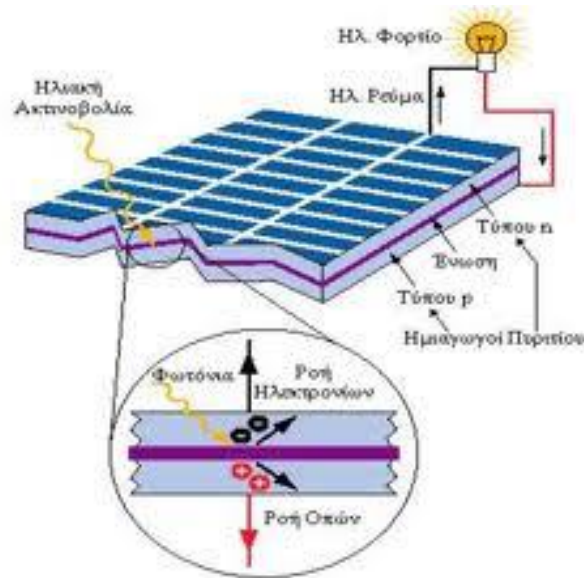
Τα κυριότερα μέρη των φωτοβολταϊκών γεννητριών και ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία εκδηλώνουν μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής του  $\epsilon$  και την ένταση ακτινοβολίας που δέχονται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει τάση μέχρι 0.5 V – 1.0 V και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20 – 40 mA/cm<sup>2</sup> της επιφάνειας του. Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων καθορίζεται με κυριότερο κριτήριο την τιμή του ενεργειακού διακένου του  $\eta$  οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου.

Ως συντελεστής απόδοσης ή απλούστερα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά 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.

## **2.2 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο**

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ζεύγος φορέων ( ενός ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας και μιας οπής στη ζώνη σθένους). Από τα παραγόμενα ζεύγη φορέων εκείνα που θα βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n δέχονται τη δύναμη του ηλεκτροστατικού πεδίου της διόδου με σκοπό τη μείωση της δυναμικής τους ενέργειας. Αυτό έχει ως συνέπεια

τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων προς την επαφή  $-n$  και των οπών προς την επαφή τύπου  $-p$ , δημιουργώντας μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της διόδου. Η παραπάνω διάταξη συμπεριφέρεται ως ορθά πολωμένη διόδος και ως πηγή ηλεκτρικού ρεύματος για όσο διάστημα δέχεται την ακτινοβολία. Η διαδικασία της δημιουργίας διαφοράς δυναμικού στις όψεις ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



Εικόνα 2.3 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

## 2.3 Φωτόρευμα

Η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου προκαλεί τη διέγερσή του με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν μετατρέπουν όλη την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται από την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού και διαχέεται προς το περιβάλλον, ενώ από το υπόλοιπο μέρος απορροφώνται ορισμένα μήκη κύματος. Τα φωτόνια που η ενέργεια τους είναι μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού χάνονται με τη μορφή θερμικών απωλειών από την πίσω όψη του στοιχείου, ενώ τα φωτόνια των οποίων η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού απορροφώνται από το υλικό παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.

## 2.4 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να κατασκευαστούν με πολλούς τρόπους καθώς και με διάφορα υλικά. Ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής τους τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να διακριθούν σε δύο ομάδες. Η πρώτη χρησιμοποιεί την τεχνολογία thick film, η οποία εφαρμόζεται συνήθως σε οικιακές χρήσεις, ενώ η δεύτερη ομάδα χρησιμοποιεί την τεχνολογία thin film. Το υλικό που χρησιμοποιείται κατά κόρον σήμερα για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων στη βιομηχανία είναι το πυρίτιο (Si). Φωτοβολταϊκά στοιχεία όμως κατασκευάζονται από σύνδεσμο άλλων υλικών, όπως θείουχος κάδμιο (CdS), αρσενιούχο γάλλιο (GaAs), τελουριούχο κάδμιο (CdTe), χαλκού-ίνδιου-σελήνιου (CuInSe), χαλκού-γάλλιου-δισεληνίου (CuGaSe<sub>2</sub>), χαλκού-ίνδιου-θείου (CuInS) κ.α. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων.

### 2.4.1 Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Single Crystalline Silicon)

Το βασικό υλικό κατασκευής των φωτοβολταϊκών αυτών είναι το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Το πάχος των υλικών αυτών είναι σχετικά μεγάλο, περίπου 300 μm. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου με τη μορφή πλαισίων κυμαίνεται από 13 – 18 % και χαρακτηρίζεται από το υψηλό κόστος κατασκευής.

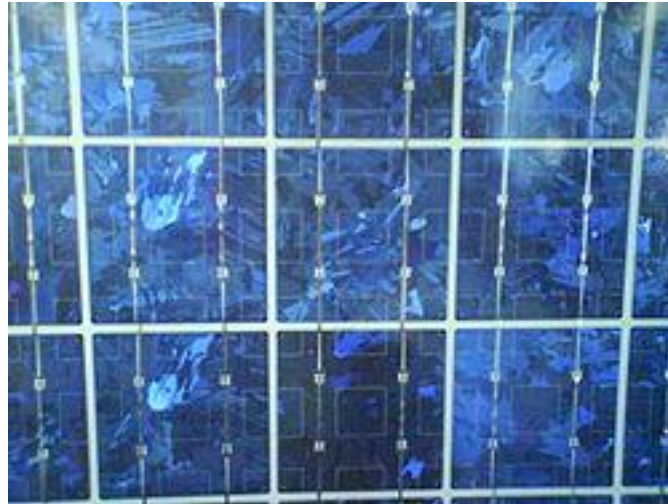


Εικόνα 2.4 Πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου

### 2.4.2 Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multi Crystalline Silicon)

Η κατασκευή φωτοβολταϊκών πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι πιο γρήγορη και έχει μικρότερο κόστος σε σχέση με αυτή των φωτοβολταϊκών μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα στοιχεία αυτά κόβονται σε τετραγωνική μορφή και αποτελούνται από λεπτά στρώματα

πάχους 10 έως 50  $\mu\text{m}$ . Γενικά όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου τόσο υψηλότερη απόδοση παρουσιάζει. Τα φωτοβολταϊκά αυτού του είδους έχουν αποδόσεις από 10 – 14 % υπό την μορφή πλαισίου.



Εικόνα 2.5 Πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

#### 2.4.3 Άμορφου πυριτίου (*Amorphous Silicon*)

Τα φωτοβολταϊκά αυτού του είδους έχουν χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τα προηγούμενα είδη. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων πάχους  $10^{-4}$  mm οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση πυριτίου πάνω σε ένα υπόστρωμα από γυαλί ή αλουμίνιο πάχους 1 – 3 mm. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου κυμαίνεται από 6 – 8 % ενώ σε εργαστηριακό περιβάλλον έχουν επιτευχθεί μεγαλύτερες αποδόσεις που αγγίζουν το 15 %.

#### 2.4.4 Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών επιστρώσεων (*Thin film Photovoltaic*)

Στην κατηγορία αυτή εκτός από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου λεπτής επίστρωσης ανήκουν και φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευασμένα από άλλα υλικά. Τα σημαντικότερα υλικά κατασκευής των φωτοβολταϊκών αυτών είναι η ένωση  $\text{Cu}^2\text{S}/\text{CdS}$ , ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός ( $\text{CuInSe}_2$ ), το Τελουριούχο Κάδμιο ( $\text{CdTe}$ ) και το Αρσενικό Γάλλιο ( $\text{GaAs}$ ). Η απόδοση των παραπάνω στοιχείων κυμαίνεται από 10 έως 25 % και παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το πυρίτιο.

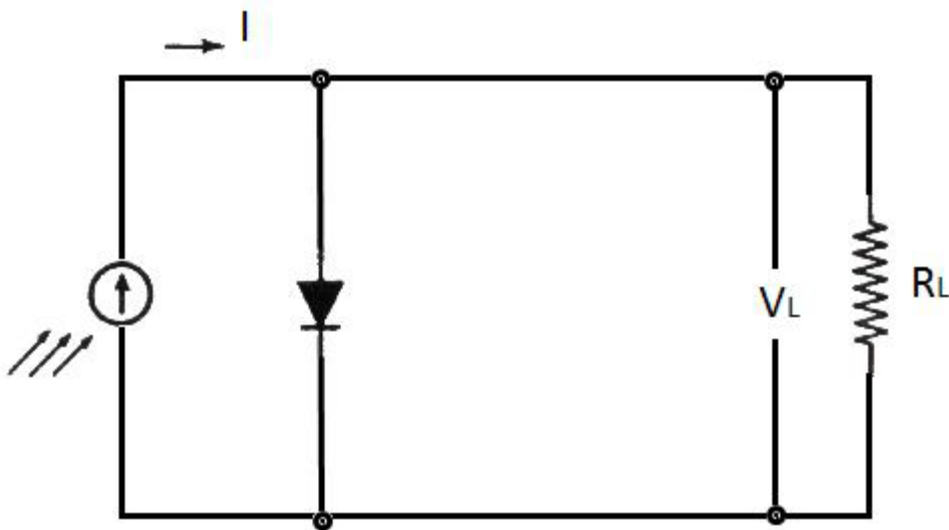
α/α	Βασικά Υλικά Φωτοβολταϊκού Στοιχείου	Χαρακτηριστικά	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
1	Ετεροένωση Cu <sub>2</sub> S/CdS	Πολυκρυσταλλικό Απόδοση 10 %	Μικρό κόστος κατασκευής	Μη σταθερής απόδοσης φωτοβολταϊκό στοιχείο.
2	Δισεληνδιούχος Χαλκός CuInSe <sub>2</sub>	Άμεσο ενεργειακό διάκενο, υψηλή απορρόφηση σε λεπτό στρώμα. Εργαστηριακή απόδοση 12-13 % Με προσθήκη Ga βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά του. (Εργαστηριακή απόδοση: 17%). Απόδοση βιομηχανικού προϊόντος (πλαισίου): 8 – 11 %.	Χαμηλό κόστος κατασκευής, σταθερότητα ισοδύναμη του c – Si.	Χαμηλή απόδοση βιομηχανικού προϊόντος.
3	Τελουριούχο Κάδμιο CdTe	Ιδανικό ενεργειακό διάκενο.	Εξαιρετική εκμετάλλευση ηλιακού φάσματος.	Μη επαναλήψιμες ιδιότητες. Δυσκολία δημιουργίας μεταλλικών επαφών.
4	Αρσενιούχο Γάλλιο GaAs	Παρουσιάζει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση 25.5 % Χρήση σε διαστημικές εφαρμογές.	Υψηλή ενεργειακή απόδοση βιομηχανικού φωτοβολταϊκού πλαισίου 22 %.	Υψηλό κόστος κατασκευής.

Πίνακας 3.1 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία λεπτών επιστρωμάτων.

## 2.5 Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

### 2.5.1 Ηλεκτρικό Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου θεωρείται ότι αποτελεί από μία πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία διόδο. 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.



Σχήμα 2.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η βασική εξίσωση του ιδανικού κυττάρου είναι η εξής :

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad (3.1)$$

Όπου

$I$  = το ρεύμα του κυττάρου.

$V$  = η τάση του κυττάρου.

$I_L$  = το φωτόρευμα.

$I_0$  = το ρεύμα κόρου της διόδου το οποίο δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$I_0 = A \left( \frac{qD_e n_1^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_1^2}{L_n N_D} \right)$$



Όπου

$A$  = διατομή του κυττάρου

$n_1 = n = p$  = ενδογενής συγκέντρωση ηλεκτρονίων ( οπών ) σε καθαρό κρύσταλλο πυριτίου.

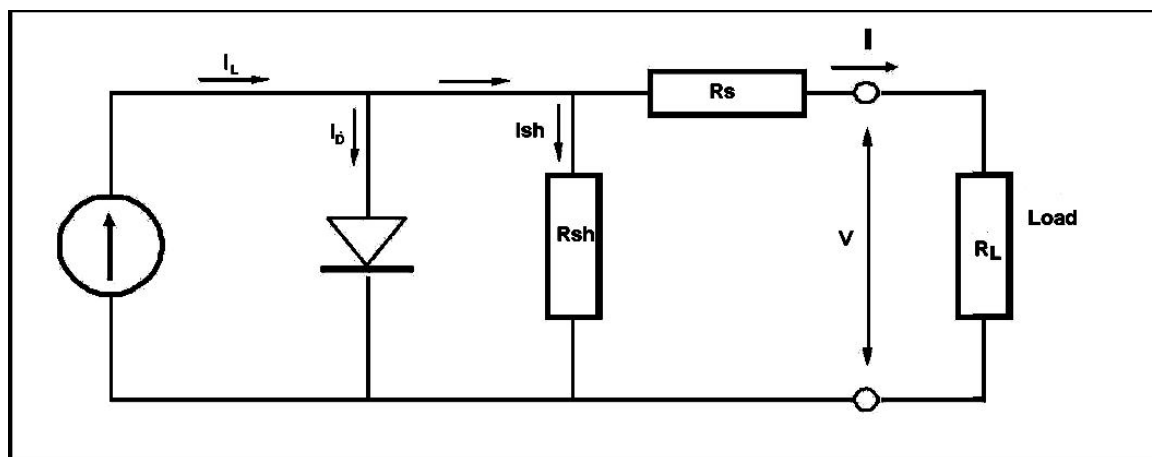
$L_e$  = μήκος διάχυσης ηλεκτρονίων  $\sqrt{D_e \tau_e}$ .

$\tau_e$  = 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  $\sqrt{D_h \tau_h}$

$\tau_h$  = διάρκεια ζωής οπών σαν φορέων μειονότητας.

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 και αφετέρου την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύει από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο.



Σχήμα 2.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου με τις παράλληλες και σε σειρά αντιστάσεις,  $R_{sh}$  και  $R_s$  αντίστοιχα.

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

$$I = I_L - I_o \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V}{R_{sh}}$$

$I$  = το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου

$I_L$  = φωτόρευμα

$I_0$  = ρεύμα κόρου διόδου

$q$  = φορτίο ηλεκτρονίου

$V$  = τάση στην έξοδο του κυττάρου

$R_s$  = 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  $-p$  και την ωμική επαφή. Τυπικές τιμές  $R_s$  , για καλής ποιότητας φωτοβολταϊκά στοιχεία :  $0,1 \Omega$  έως  $0,3 \Omega$ .

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

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

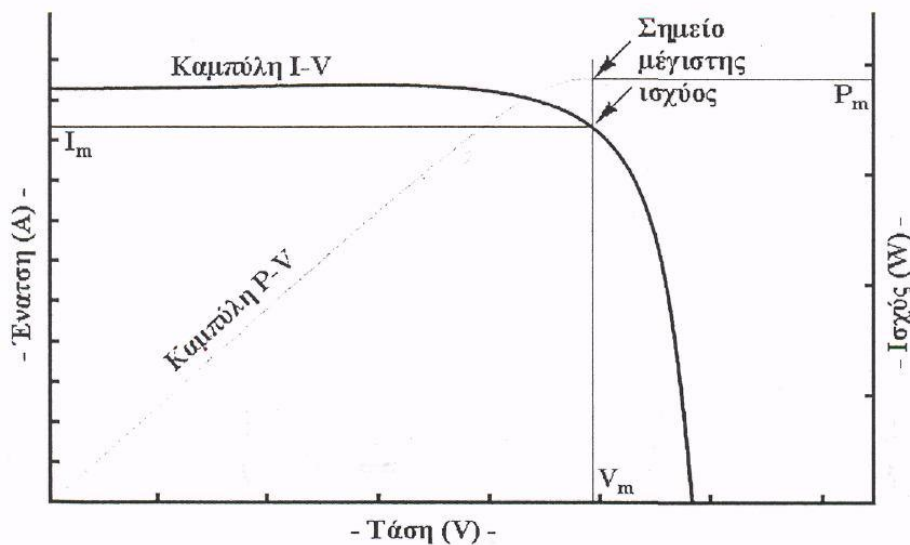
$K$  = Σταθερά Boltzmann.

$T$  = 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  $R_{sh}$  σε πολύ καλής απόδοσης φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι μεγαλύτερη των  $10^3 \Omega$ .

### 2.5.2 $I - V$ Χαρακτηριστική Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μία 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 του ρεύματος στην έξοδο ( $I$ ) και τάσεως στην έξοδο ( $V$ ) ενός ηλιακού κυττάρου καλείται  $I - V$  χαρακτηριστική και έχει επικρατήσει να παριστάνεται στο πρώτο τεταρτημόριο.



Σχήμα 2.4 Αναπαράσταση καμπυλών P – V και I – V φωτοβολταϊκού στοιχείου (πυριτίου) σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.

Για σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας – ακτινοβολίας 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  $I_{sc}$*

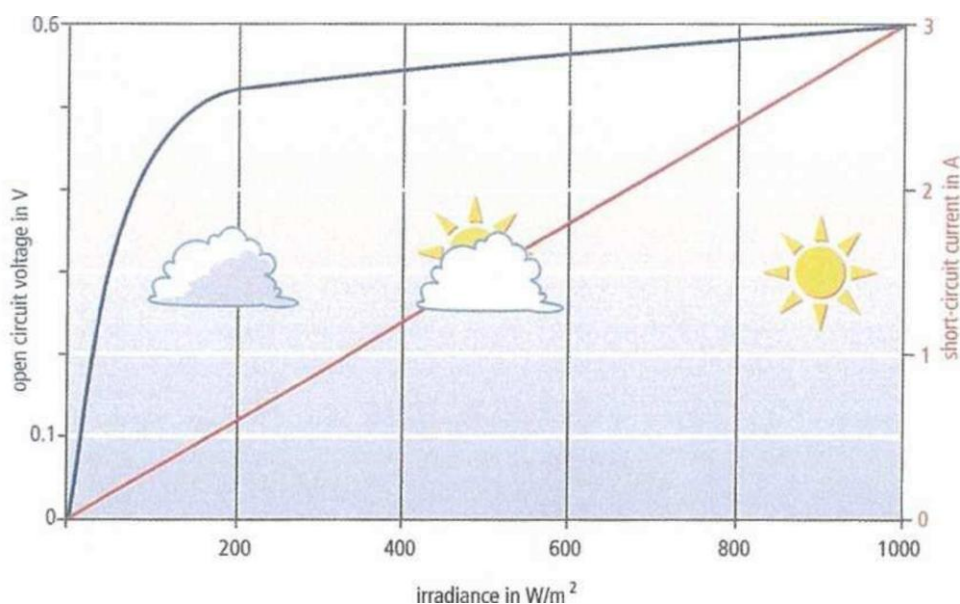
Είναι το ρεύμα για  $V = 0$  και αν θεωρήσουμε την  $R_s$  πολύ μικρή είναι ίσο με το φωτόρευμα  $I_L$ .

*Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$*

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

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

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



Σχήμα 2.5 . Η μεταβολή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης  $V_{oc}$  (μπλε καμπύλη) και της βραχυκυκλωμένης έντασης  $I_{sc}$  του ρεύματος (κόκκινη καμπύλη) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου (πυριτίου) σε συνάρτηση με την ισχύ της ακτινοβολίας  $H$  , που δέχεται ανά μονάδα επιφάνειάς του.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι:

- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης,  $I_{sc}$  , του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι ανάλογο της πυκνότητας ισχύος,  $H$  , της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κυψελίδα.
- Η τάση ανοικτού κυκλώματος αρχικά αυξάνει, σχετικά απότομα, ως συνάρτηση της πυκνότητας ισχύος,  $H$  , της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κυψελίδα παραμένοντας στη συνέχεια, σχεδόν ανεξάρτητη της  $H$  . Δηλαδή, με το πρώτο φως της ημέρας, η τάση ανοικτού κυκλώματος παίρνει τιμή που μεταβάλλεται αργά (ποσοστιαία μεταβολή), μέσα στο υπόλοιπο χρονικό διάστημα μιας αίθριας ημέρας, σχεδόν μέχρι τη δύση.

### **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 τη μεγαλύτερη επιφάνεια μέσα στην  $I - V$  καμπύλη. Μία ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και το σημείο  $P_m$  παριστάνει

τη βέλτιστη αντίσταση φορτίου  $R_{Lopt}$ , που έχει κλίση 1/

$$R_{Lopt} = I_m / V_m .$$

Επιπλέον, η  $I - V$  χαρακτηριστική είναι εφαπτόμενη σε κάποια καμπύλη σταθερής ισχύος στο σημείο μέγιστης ισχύος όπου  $dP/dV = 0$  και επειδή το σημείο επαφής δεν μπορεί να καθοριστεί επακριβώς για καμπύλες που κατασκευάζονται με βάση πειραματικά δεδομένα είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μια  $P - V$  καμπύλη και να εντοπιστεί το μέγιστο αυτής.

### **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 φωτοβολταϊκού στοιχείου ή φωτοβολταϊκού 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 (τύπος 3.6) 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:

$$ff_o = \frac{U_o - \ln(U_{oc} + 0.72)}{U_{oc} + 1}$$

για  $U_{oc} > 10$

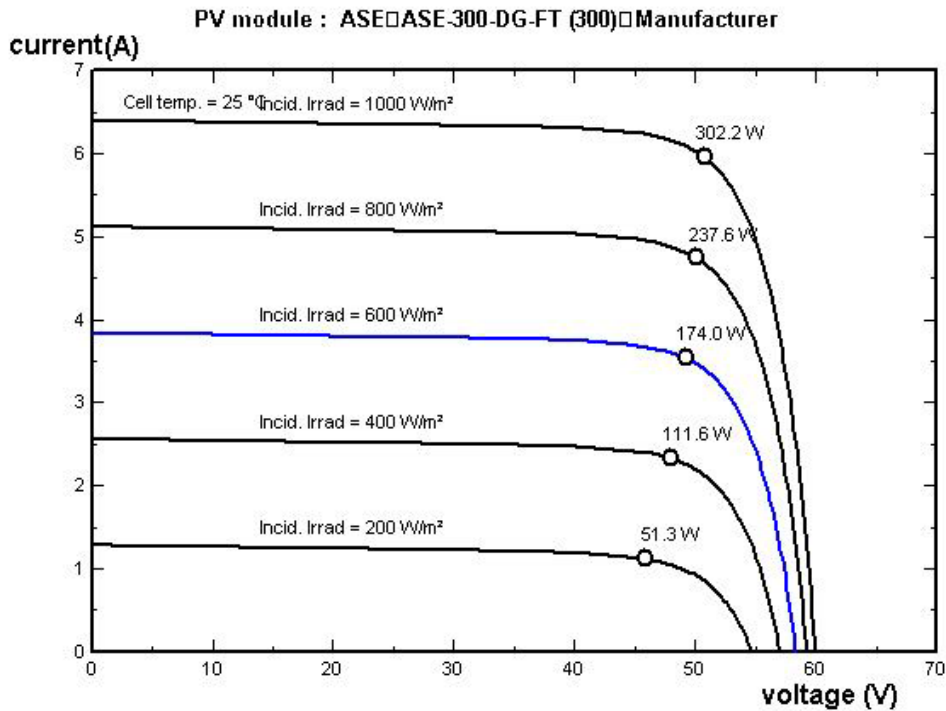
Οι τιμές του καθορίζονται από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες, είναι μεταξύ 0 και 1 και πιο συγκεκριμένα οι τυπικές τιμές του είναι μεταξύ 0,7 και 0,85. Η τιμή αναφοράς του δίδεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του  $ff$ , τόσο περισσότερο η λειτουργία του φωτοβολταϊκού 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 φωτοβολταϊκά 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  $\mu\text{sec}$ ). 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 (λογαριθμική εξάρτηση).



Σχήμα 2.6 Χαρακτηριστικές  $I - V$  για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία λειτουργίας πλαισίου παραμένει σταθερή στους 25° C. Με τη μείωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας παρατηρείται σημαντική μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της παραγόμενης ισχύος στο MPP. Αντίθετα η τάση ανοιχτοκύκλωσης μετατοπίζεται ελαφρά.

### 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:

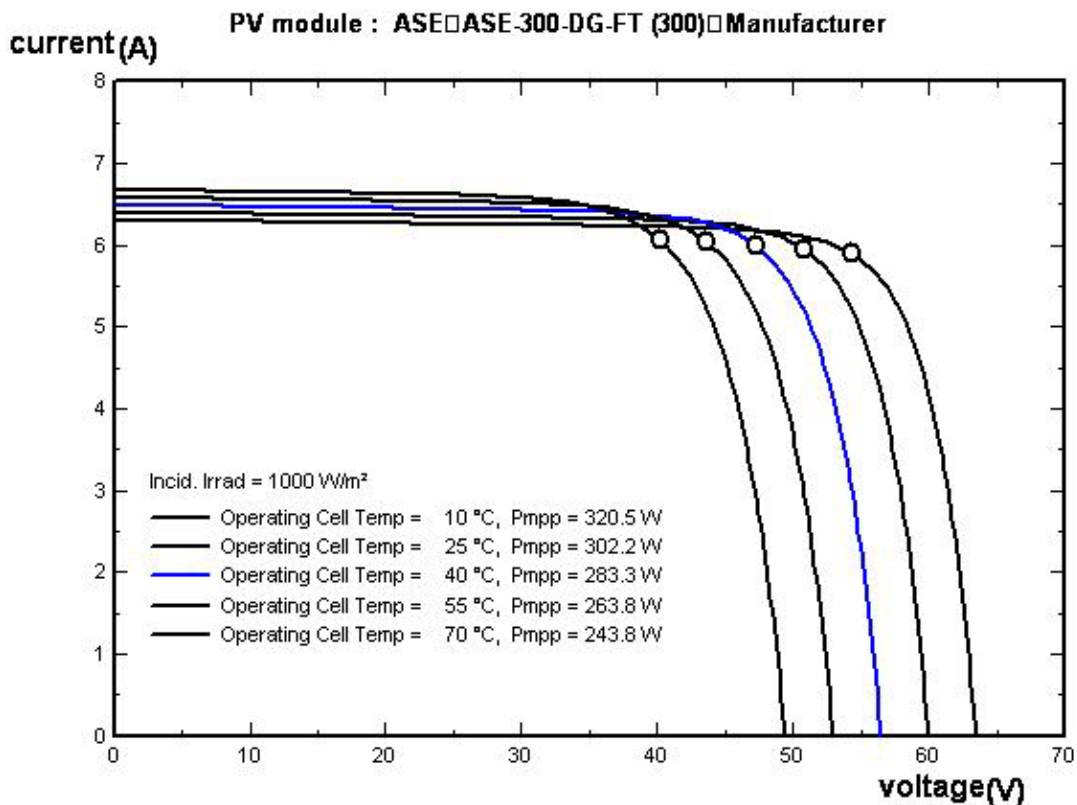
$$\frac{dI_{sc}}{dT} = 0.01 \text{ mA}/^{\circ} \text{C}$$

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

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

- Η ισχύς  $P_m$  ( $P_{mpp}$  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 :

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



Σχήμα 2.7 Χαρακτηριστικές  $I - V$  για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας των κυττάρων του πλαισίου. Η τιμή της προσπίπτουσας ολικής ακτινοβολίας παραμένει σταθερή στα 1000 W/m<sup>2</sup>. Με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των κυττάρων του πλαισίου παρατηρείται μετατόπιση του MPP που αντιστοιχεί σε μείωση της παραγόμενης ισχύος. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται ελαφρά. Η τάση  $V_{oc}$  μειώνεται περισσότερο αισθητά κάτι που οφείλεται στην μεταβολή των χαρακτηριστικών αγωγής της διόδου.



### 2.5.3 Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης του ηλιακού κυττάρου δίνεται από τη 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:

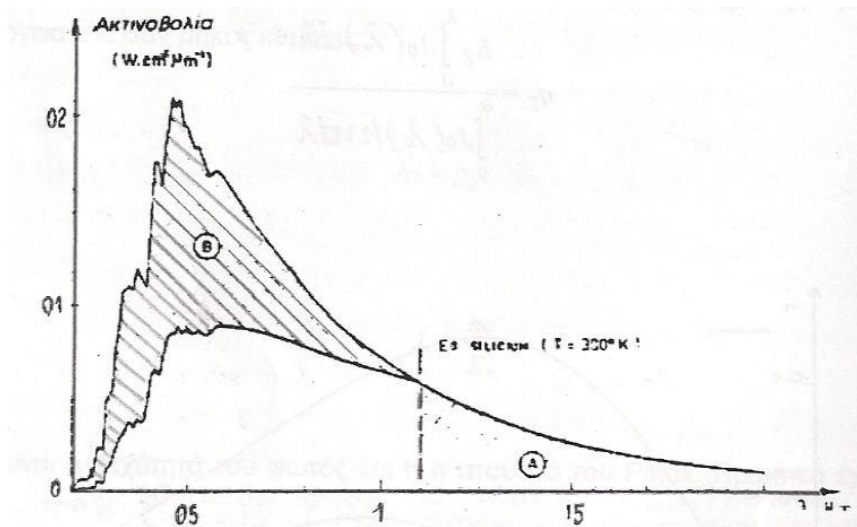
$$I_0 = 1.5 * 10^5 * \exp\left(-\frac{E_g}{KT}\right)$$

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).

### Παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά το βαθμό απόδοσης

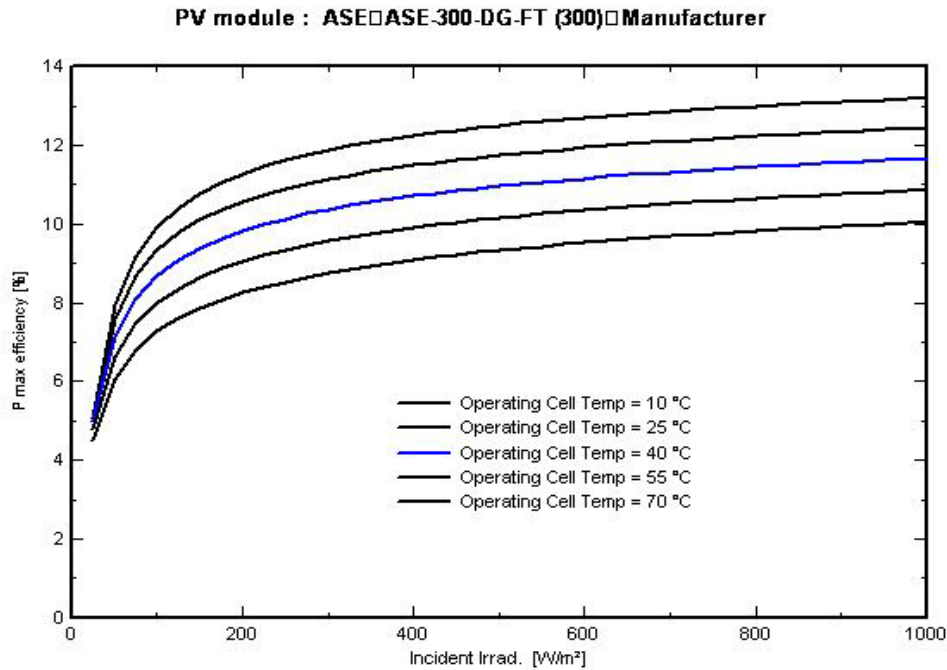
Οι παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για τη σχετικά χαμηλή τιμή, τόσο θεωρητική όσο και πρακτική, του βαθμού απόδοσης είναι:

- **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 αντανακλαστικά 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%.



Σχήμα 2.8 Χάραξη του ηλιακού φάσματος AM0 για ένα ηλιακό κύτταρο Si. Η ζώνη A αντιστοιχεί στη χαμένη ενέργεια από τα φωτόνια τα μη απορροφώμενα. Η ζώνη B αντιστοιχεί στην περίσσεια ενέργειας, μη χρησιμοποιούμενη, των φωτονίων ενέργειας ανώτερης από  $E_g$ .

- 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 (σχήμα 3.14).



Σχήμα 2.9. Όπως αναμενόταν η μέγιστη απόδοση του πλαισίου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας για τις ίδιες συνθήκες ακτινοβολίας.

- **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 αποδοτικότητάς του κάτω από πρότυπες συνθήκες ~ 1% κατ' έτος χρήσης (ρυθμός γήρανσης).

## 2.6 Φωτοβολταϊκή Γεννήτρια

### 2.6.1 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο

Το βασικό χαρακτηριστικό κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία.

Η τάση και η ισχύς των φωτοβολταϊκών 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 φωτοβολταϊκό 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 φωτοβολταϊκά στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση φωτοβολταϊκών 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 μολύβδου. 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 πανέλα με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης.

### 2.6.2 Απόδοση Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Το κάθε φωτοβολταϊκό 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 φωτοβολταϊκού πλαισίου ( $n$ ) εκφράζει το λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ( $P$ ) 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 φωτοβολταϊκό πλαίσιο επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται επί το ίδιο χρονικό διάστημα. Δηλαδή:

$$n_x = \frac{P_x}{H * S} * \left[ \frac{W}{(W/m^2) * m^2} \right]$$

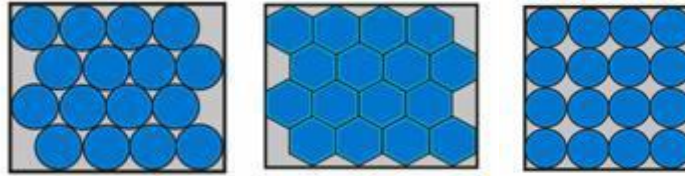
$$n_x = \frac{E}{\Pi * S} * \left[ \frac{kW}{(kW/m^2) * m^2} \right]$$

όπου

$\Pi$  είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η τιμή του  $n$  είναι φανερό ότι εξαρτάται όχι μόνο από τη μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων ( $n$ ), αλλά και από τον συντελεστή κάλυψης του πλαισίου ( $\sigma_k$ ), 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 φωτοβολταϊκού πλαισίου. Βρίσκουμε εύκολα ότι θα ισχύει η σχέση:

$$n_x = n * \sigma_k$$



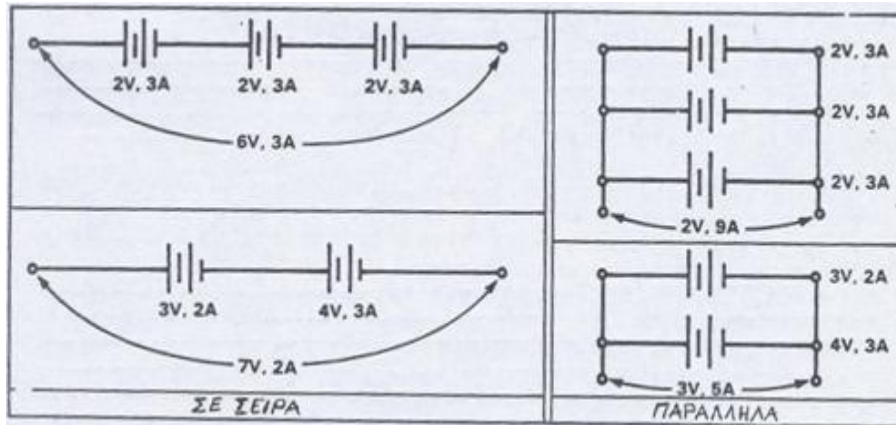
Σχήμα 2.10 Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των ηλιακών στοιχείων στα Φ/Β πλαίσια. Οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης είναι περίπου 0,78 για την περίπτωση (α), 0,88 για την περίπτωση και 0,98 για τα εξαγωνικά στοιχεία της περίπτωσης (γ).

Η τιμή του εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο φωτοβολταϊκό 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.

### 2.6.3 Φαινόμενο Hot – Spot , Απώλεια Ισχύος.

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 2.11. Βασικός συνδυασμός, σε σειρά και παράλληλα, πηγών τάσεως και ρεύματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

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, το οποίο 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 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 τη θραύση ή ακόμη και την πλήρη καταστροφή του πλαισίου.



#### 2.6.4 Μέθοδοι θεραπείας

Επειδή τα κύτταρα μιας συστοιχίας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της είναι δυνατόν να μην έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά είναι πιθανό να προκύψει το φαινόμενο που μελετήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο (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.

#### **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.

## Κεφάλαιο 3ο

### “Ανεμογεννήτρια”

#### 3.1 Ταχύτητα ανέμου

Η κίνηση του ανέμου ακολουθεί τους νόμους της μηχανικής των ρευστών, οι οποίοι διέπουν τη τυρβώδη ροή ενός ρευστού. Συνεπώς η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα ιδιαίτερο μεταβλητό μέγεθος, το οποίο εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις ακόμα και σε μικρά χρονικά διαστήματα. Ακολουθώντας την θεωρητική ανάλυση που ισχύει για τυρβώδη πεδία, η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου εκφράζεται σαν άθροισμα της μέσης ταχύτητας του ανέμου  $\bar{V}$  και μιας διακύμανσης  $V'(t)$  :

$$V(t) = \bar{V} + V'(t)$$

ενώ η μέση ταχύτητα ανέμου σε μια χρονική περίοδο  $T$  δίνεται σαν :

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V(t') dt$$

Εξετάζοντας το πεδίο ταχυτήτων μιας περιοχής, είναι σημαντικό να καταγραφούν και οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Συνήθως για τη στατιστική πρόβλεψη των μέγιστων ταχυτήτων του ανέμου χρησιμοποιούνται οι μέσες ωριαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου για ένα χρονικό διάστημα. Το στατιστικό παράδειγμα που προκύπτει αναλύεται με στατιστικές μεθόδους και προσδιορίζεται η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου που σχετίζεται με τη μέγιστη καταπόνηση των τμημάτων μιας αιολικής μηχανής και κατ' επέκταση με το χρόνο ζωής της.

##### 3.1.1 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σύμφωνα με το ύψος

- ένταση του ανέμου μεταβάλλεται με την αύξηση του ύψους. Στο οποίο γίνεται η καταγραφή του αιολικού δυναμικού. Το πάχος της ατμόσφαιρας μέσα στο οποίο συμβαίνει η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, το ορικό στρώμα, εκτείνεται από μερικά μέτρα έως και 2 Km.

Για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας σε μια περιοχή με τη μεταβολή του ύψους χρησιμοποιούνται σχέσεις, οι οποίες ανάγουν την ταχύτητα του ανέμου σε ένα

συγκεκριμένο ύψος αναφοράς σε οποιοδήποτε ύψος. Στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες αναλυτικές σχέσεις της μεταβολής του ανέμου με το ύψος. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

1. Η λογαριθμική σχέση (log-law) η οποία εκφράζεται σαν:

$$\frac{V_{(z)}}{V_{(z_1)}} = \frac{\ln\left[\frac{z}{z_0}\right]}{\ln\left[\frac{z_1}{z_0}\right]}$$

και δίνει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 'z' από το έδαφος σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου σε ένα ύψος αναφοράς 'z<sub>1</sub>' .

2. Η εκθετική σχέση ( power law ) η οποία εκφράζεται σαν :

$$\frac{V_{(z)}}{V_{(z_1)}} = \left(\frac{z}{z_1}\right)^a$$

Και δίνει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 'z' από το έδαφος συναρτήσει της παραμέτρου 'α' της οποίας η τιμή εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και τη διεύθυνση του ανέμου. Οι τιμές αυτής της παραμέτρου κυμαίνονται μεταξύ του 0,07 για παγωμένες επιφάνειες και του 0,47 για αστικές περιοχές.

### 3.1.2 Επίδραση εμποδίων στη ροή του ανέμου

Σημαντική επίδραση στην ταχύτητα του ανέμου έχει η παρουσία μεμονωμένων εμποδίων, π.χ. ενός δέντρου ή μιας κατοικίας, στο πεδίο ροής του ανέμου. Γύρω από ένα εμπόδιο και κυρίως, πίσω από αυτό, κατά την διεύθυνση του ανέμου δημιουργείται χώρος έντονων διαταράξεων που χαρακτηρίζεται ως σκιά του ανέμου. Η επίδραση των αναταράξεων εκτείνεται, πίσω από το εμπόδιο, σε μήκος μέχρι και δεκαπέντε φορές το ύψος του εμποδίου και πάνω από αυτό μέχρι το διπλάσιο του ύψους του (σχήμα 10). Για αυτό το λόγο σε περιοχές εγκατάστασης αιολικών μηχανών εξετάζεται ιδιαίτερα η διαμόρφωση του πεδίου ροής .



Σχήμα 3.1 Χώρος ισχυρών αναταράξεων γύρω από την περιοχή μεμονωμένου εμποδίου

### 3.2 Είδη Αιολικών Μηχανών

Οι αιολικές μηχανές έχουν ως σκοπό την αξιοποίηση του μεγαλύτερου ποσοστού της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμογεννητριών είναι οι ακόλουθες :

- Οριζοντίου άξονα ( Horizontal axis-head on ) : στους οποίους ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου.
- Οριζοντίου άξονα ( Horizontal axis – crosswind ) : στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης αλλά κάθετος στη διεύθυνση του ανέμου.
- Καθέτου άξονα ( Vertical axis ) στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στη ροή του ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα μπορούν να διαχωριστούν σε σχέση με τη θέση του δρομέα ως προς το πύργο στήριξης και τη διεύθυνση του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες που έχουν το δρομέα μπροστά από τον πύργο είναι τύπου up – wind ενώ αυτές που έχουν το δρομέα πίσω από το πύργο είναι τύπου down – wind. Από την άλλη πλευρά οι πιο διαδεδομένες ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα είναι οι μηχανές τύπου Darrieus και οι μηχανές τύπου Savonius.

Οι μοντέρνες ανεμογεννήτριες ταξινομούνται επίσης ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων τους σε ταχύστροφες και σε αργόστροφες ανάλογα με την τιμή ενός αδιάστατου μεγέθους γνωστού ως παράμετρος περιστροφής  $\lambda$  ( tip speed ratio). Η παράμετρος αυτή μπορεί να υπολογιστεί από την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πτερυγίου , την ακτίνα του δρομέα της ανεμογεννήτριας  $R$  και την ταχύτητα του ανέμου  $V_W$  από την παρακάτω σχέση :

$$\lambda = \frac{\omega * R}{V_w}$$

Ακόμα οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται ανάλογα με τη μηχανική ισχύ N που παρέχουν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες.

1. Μικρές ανεμογεννήτριες, όταν η ονομαστική ισχύς τους είναι μεταξύ :

$$50 \text{ W} \leq N \leq 10 \text{ kW}$$

2. Μεσαίες ανεμογεννήτριες, όταν η ονομαστική ισχύς τους είναι μεταξύ :

$$10 \text{ kW} \leq N \leq 200 \text{ kW}$$

3. Μεγάλες ανεμογεννήτριες, όταν η ονομαστική ισχύς του είναι :

$$200 \text{ kW} \leq N$$

Τέλος μία παράμετρος που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό και την ταξινόμηση των ανεμογεννητριών είναι η παράμετρος στιβαρότητας ( solidity ) της κατασκευής 'σ' . Η στιβαρότητα συνήθως ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού όλων των πτερυγίων, προς το εμβαδόν της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή.

Για αιολικές μηχανές οριζοντίου άξονα η παράμετρος αυτή υπολογίζεται από τη σχέση

$$\sigma = \frac{z * c * R^2}{\pi * R}$$

ενώ για αιολικές κατακόρυφου άξονα υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\sigma = \frac{z * c}{R}$$

όπου z είναι ο αριθμός των πτερυγίων, R η ακτίνα του δρομέα και c το πλάτος των πτερυγίων της φτερωτής.

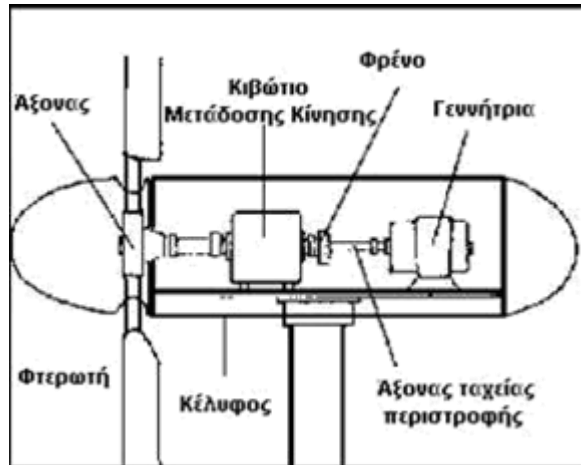
### 3.3 Τεχνολογία Ανεμογεννητριών

Μία ανεμογεννήτρια αποτελείται από τα παρακάτω μέρη :

- **Ρότορας (δρομέας):** Οι πτέρυγες του δρομέα έχουν σχεδιαστεί ώστε να γυρίζουν με τον άνεμο, περιστρέφοντας στη γεννήτρια. Σε μεγάλες κυρίως

ανεμογεννήτριες, με σκοπό την αύξηση των στροφών της γεννήτριας συνδέεται κατάλληλα κιβώτιο ταχυτήτων.

- **Πτερύγια:** Τα πτερύγια είναι το τμήμα της ανεμογεννήτριας πάνω στο οποίο δημιουργείται άνωση από τον άνεμο που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ροπής στον άξονα περιστροφής με συνέπεια την περιστροφή τους. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν δύο ή τρία πτερύγια.
- **Κέλυφος:** Το κέλυφος βρίσκεται πάνω από τον πύργο και περιλαμβάνει πολλά μηχανικά και ηλεκτρονικά τμήματα τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι το κιβώτιο ταχυτήτων, τους άξονες υψηλής/χαμηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια και το φρένο.
- **Γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρισμού:** Η γεννήτρια είναι υπεύθυνη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν η ταχύτητα του ανέμου αποκτήσει τέτοια τιμή ώστε να περιστραφούν τα πτερύγια. Οι γεννήτριες χωρίζονται σε μεγάλες κατηγορίες: (α) τις σύγχρονες και (β) τις ασύγχρονες μηχανές.
- **Κιβώτιο ταχυτήτων:** Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι το τμήμα της ανεμογεννήτριας που φροντίζει να αυξάνει τις στροφές του άξονα που καταλήγει στην γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Σύστημα διεύθυνσης και προσανατολισμού:** Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα απαιτούν ένα μηχανισμό, ο οποίος να τις στρέφει προς την διεύθυνση του ανέμου. Για αυτό το λόγο η άτρακτος της Α/Γ στηρίζεται συνήθως σε έναν μηχανικό στροφέα ο οποίος δέχεται εντολές από ένα ηλεκτρονικό σύστημα παρακολούθησης της διεύθυνσης του ανέμου.
- **Σύστημα προστασίας:** Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες διαθέτουν μηχανισμούς που τις θέτει εκτός λειτουργίας για λόγους ασφάλειας όταν η ένταση της ταχύτητας του ανέμου είναι πολύ υψηλή.
- **Πύργος στήριξης:** Ο πύργος υψώνει την άτρακτο της ανεμογεννήτριας σε μεγάλο ύψος ώστε να εκμεταλλευτεί τις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Ο πύργος στήριξης απαιτεί ιδιαίτερο σχεδιασμό καθώς θα πρέπει να διαθέτει μεγάλο ύψος ενώ ταυτόχρονα να είναι γερός έτσι ώστε να αντέχει τα δυναμικά φορτία που οφείλονται τόσο στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας όσο και στις καιρικές συνθήκες που επικρατούν.



Σχήμα 3.2 Τμήματα ανεμογεννήτριας.

### 3.4 Ισχύς Ανεμογεννήτριας

Το ποσοστό της μηχανικής ισχύος του ανέμου που είναι διαθέσιμο προς εκμετάλλευση, εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου  $V_w$ , από τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του έλικα  $\omega$ , την ακτίνα του δρομέα  $R$  και τη σχεδίαση της φτερωτής. Η ενέργεια που αποσπάται από τον άνεμο ( ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας ) δίνεται από τη σχέση :

$$P_w = \frac{1}{2} * \rho * C_p * A * V_w^3$$

όπου

$\rho$  = η πυκνότητα του αέρα ( kg/ m<sup>3</sup> )

$A = \pi R^2$  το εμβαδόν της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγια ( m<sup>2</sup> )

$V_w$  = η ταχύτητα του ανέμου ( m/s )

$C_p$  = εξαρτάται αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος

Η χαρακτηριστική παράμετρος για την αποδοτικότητα της ανεμογεννήτριας είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  , ο οποίος εκφράζει σε ποιο βαθμό μετατρέπεται η ενέργεια που περιέχεται στον άνεμο. Ο συντελεστής  $C_p$  εξαρτάται από την παράμετρο περιστροφής  $\lambda$  , την ταχύτητα του ανέμου  $V_w$  , τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του έλικα

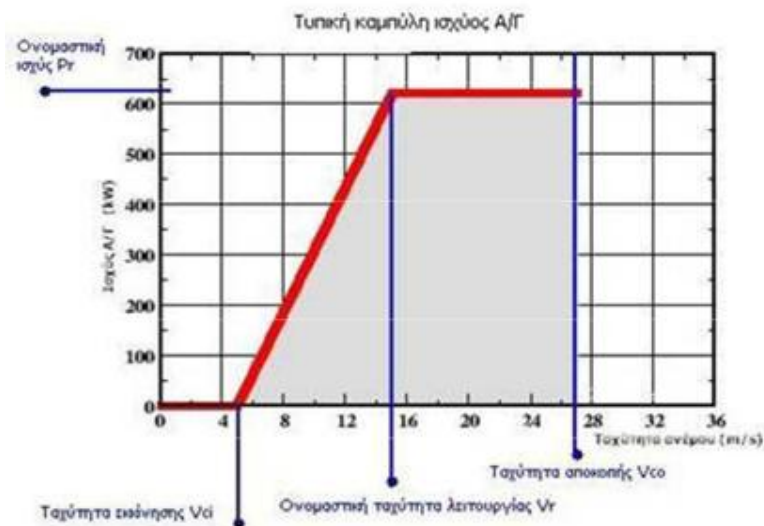
$\omega$ , τον τύπο της γεννήτριας, το σχήμα και τη γωνία  $\beta$  των πτερυγίων. Η ανώτατη τιμή του συντελεστή ισχύος είναι γνωστή και ως όριο Betz και αντιστοιχεί στην τιμή  $C_{p,max} = \frac{16}{27} = 0.593$

Για τον καθορισμό του συντελεστή  $C_p$  για δεδομένες τιμές της παραμέτρου  $\lambda$  και της γωνίας  $\beta$  χρησιμοποιείται ένας γενικός προσεγγιστικός τύπος για διάφορους τύπους ανεμογεννητριών :

$$C_p = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 * \beta - C_4 \right) * e^{\frac{-C_1}{\lambda_1}} + C_6 * \lambda$$

όπου 
$$\lambda_1 = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - C_1 * \beta} - \frac{C_8}{\beta^{3+1}}}$$

και  $C_1$  έως  $C_8$  συντελεστές που προκύπτουν από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 3.3 Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας.

Η ισχύς εξόδου μίας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και κάθε αιολική μηχανή έχει μια χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος. Η καμπύλη αυτή καθορίζει την απόδοση της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου ( σχήμα 4.3 ) και χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα εκκίνησης  $V_{ci}$  της ανεμογεννήτριας, την ονομαστική



ταχύτητα λειτουργίας  $V_f$  και την ταχύτητα αποκοπής  $V_{co}$  της ανεμογεννήτριας. Η ταχύτητα εκκίνησης είναι η ταχύτητα εκείνη στην οποία η ανεμογεννήτρια αρχίζει να παράγει ισχύ ενώ η ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας είναι η ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια παράγει την ονομαστική της ισχύ. Τέλος η ταχύτητα αποκοπής είναι η τιμή της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας στην οποία παύει να λειτουργεί για λόγους ασφαλείας.

### 3.5 Μικρές Ισχύος Ανεμογεννήτριες

Οι μικρές ανεμογεννήτριες αναφέρονται σε αιολικά συστήματα τα οποία έχουν ονομαστική ισχύ έως 10 kW. Οι ανεμογεννήτριες αυτές έχουν διάμετρο από 0.58 m έως 8 m και τοποθετούνται συνήθως σε πύργους με ύψος που κυμαίνεται από 10 m έως τα 40 m.

Οι μικρές ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες ανάλογα με την ονομαστική ισχύ εξόδου τους, οι οποίες είναι:

1. Micro wind turbines με ονομαστική ισχύ  $50 \leq N \leq 1 \text{ kW}$
2. Mid – range wind turbines με ονομαστική ισχύ  $1 \text{ kW} \leq N \leq 5 \text{ kW}$
3. Mini wind turbines με ονομαστική ισχύ  $5 \text{ kW} \leq N \leq 10 \text{ kW}$

#### 3.5.1 Δομικά Στοιχεία Μικρών Ανεμογεννητριών

Μια μικρή ανεμογεννήτρια γενικά αποτελείται από ένα δρομέα με πτερύγια, έναν κινητήρα, έναν πύργο στήριξης και ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που αποτελείται από την απαραίτητη καλωδίωση, ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία), ένα ρυθμιστή φόρτισης και ένα μετατροπέα τάσης. Όπως και στις μεγάλες ανεμογεννήτριες, οι μικρές ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα, με τον αριθμό των πτερυγίων τους να ποικίλει.

Το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένων μικρών ανεμογεννητριών κατέχουν οι οριζοντίου άξονα γεννήτριες και ιδιαίτερα αυτές που διαθέτουν τρία πτερύγια καθώς λειτουργούν αποδοτικότερα σε σχέση με αυτές που διαθέτουν περισσότερα πτερύγια λόγω καλύτερης αεροδυναμικής σχεδίασης. Από την άλλη πλευρά οι μικρές ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα παρόλο τα πλεονεκτήματα που διαθέτουν δεν είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς λόγω της χαμηλής απόδοσής και του μεγαλύτερου κόστους τους σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα.

### 3.5.2 Πτερύγια Μικρών Ανεμογεννητριών

Τα πτερύγια είναι το τμήμα της ανεμογεννήτριας που θέτει σε κίνηση το δρομέα της ανεμογεννήτριας ο οποίος με τη σειρά κινεί τη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σχεδιασμός αυτών των πτερυγίων καθορίζεται από το μέγεθος και τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας καθώς και από το υλικό κατασκευής τους.

Έχει παρατηρηθεί ότι η μηχανική αντοχή των πτερυγίων στη βάση στήριξής τους μειώνεται με την αύξηση του αριθμού τους. Οι μικρές ανεμογεννήτριες που διαθέτουν τρία πτερύγια λειτουργούν πιο ομαλά, γεγονός που οφείλεται στη σταθερή τιμή στις ροπές σε σχέση με την περιστροφική κίνηση της ανεμογεννήτριας. Παράλληλα, οι ανεμογεννήτριες αυτές παρουσιάζουν χαμηλότερο επίπεδο θορύβου και είναι οικονομικά πιο αποδοτικές. Για αυτούς τους κυρίως λόγους, οι ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια είναι η πιο κοινή σχεδιαστική επιλογή για τους περισσότερους κατασκευαστές μικρών ανεμογεννητριών παρόλο που άλλοι εξακολουθούν να χρησιμοποιούν δύο ή και περισσότερα από τρία πτερύγια.

Τα πτερύγια των μικρών ανεμογεννητριών είναι κυρίως κατασκευασμένα από συνθετικά υλικά όπως υαλοβάμβακα με αφρώδη πυρήνα, πολυεστέρα με ενισχυμένο γυαλί, ξύλο και ανοξείδωτο σίδηρο. Αυτά τα συνθετικά υλικά έχουν το πλεονέκτημα ότι παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στις καιρικές συνθήκες και υψηλή τιμή του λόγου της ακαμψία - βάρους πτερυγίων. Επιπλέον, τα υλικά αυτά είναι ανθεκτικά στη διάβρωση και συμπεριφέρονται σαν μονωτές στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος.

### 3.5.3 Προσανατολισμός Μικρών Ανεμογεννητριών

Οι περισσότερες μικρές ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα χρησιμοποιούν την “ουρά” τους για να προσανατολιστούν προς τη διεύθυνση του ανέμου. Το ουραίο τμήμα το χρησιμοποιούν κατά αντιστοιχία με τους μηχανισμούς στροφής των μεγάλων ανεμογεννητριών, οι οποίοι δεν είναι δυνατόν να τοποθετηθούν σε μικρές ανεμογεννήτριες κυρίως λόγω κόστους, βάρους και διαστάσεων. Στην εικόνα 4.1 φαίνεται μία μικρή ανεμογεννήτρια με τρία πτερύγια μαζί με το ουραίο τμήμα της.



Εικόνα 3.1 Μικρή ανεμογεννήτρια ( Air – X Wind)

#### 3.5.4 Συστήματα Ελέγχου Ταχύτητας Μικρής Ανεμογεννήτριες

Παρόλο, που οι υψηλές ταχύτητες ανέμου οδηγούν σε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας, είναι δυνατόν σε πολλές περιπτώσεις να προκαλέσουν ζημιά. Με σκοπό την προστασία της ανεμογεννήτριας αλλά και την ασφάλεια των ανθρώπων της περιοχής εγκατάστασης, οι μικρές ανεμογεννήτριες διαθέτουν διάφορους μηχανισμούς πέδησης και ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής τους. Στα νεότερα μικρά αιολικά συστήματα χρησιμοποιούνται δύο είδη τεχνικών ελέγχου, τις παθητικές τεχνικές ελέγχου και τις ενεργητικές τεχνικές ελέγχου.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκει ο έλεγχος απώλειας στήριξης (stall control). Ο έλεγχος με βάση αυτή την τεχνική στηρίζεται στη καμπύλωση των πτερυγίων όταν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί σημαντικά. Ειδικότερα, όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή, τα πτερύγια καμπυλώνονται λόγω της μεγάλης αεροδυναμικής αντίστασης με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η γωνία προσβολής μεταξύ των πτερυγίων και του ανέμου. Αυτό έχει ως συνέπεια την εκτροπή της ανεμογεννήτριας από τη διεύθυνση του ανέμου με ταυτόχρονη μείωση των στροφών της φτερωτής. Σε πολλές ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος η εκτροπή από τη διεύθυνση του ανέμου πραγματοποιείται με την καμπύλωση της ατράκτου της ανεμογεννήτριας σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου.

Οι ενεργητικές τεχνικές ελέγχου στηρίζονται στον έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (pitch control). Στις ανεμογεννήτριες που διαθέτουν αυτόν τον έλεγχο, ένα ηλεκτρονικό

σύστημα ελέγχει συνεχώς την ισχύ εξόδου, η οποία όταν γίνει πολύ υψηλή ‘ δίνει’ εντολή στο δρομέα των πτερυγίων να στραφεί και υπό κάποια γωνία. Σε αυτή τη θέση, η ταχύτητα περιστροφής ελαττώνεται σημαντικά προστατεύοντας την ανεμογεννήτρια. Όταν οι συνθήκες επανέλθουν σε φυσιολογικά επίπεδα, τα πτερύγια επανέρχονται στην αρχική τους θέση.

### 3.5.5 Γεννήτριες Μικρών Ανεμογεννήτριες

Οι περισσότερες μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν βηματικές γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (Permanent magnet generators). Η λειτουργία των γεννητριών μόνιμου μαγνήτη στηρίζεται στην αντίδραση που έχει ο ρότορας (δρομέας) μόνιμου μαγνήτη της ανεμογεννήτριας μέσα σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

Το παραπάνω είδος γεννητριών υπάγονται στις ασύγχρονες μηχανές, κάτι που σημαίνει ότι δεν μπορούν να συνδεθούν απευθείας με το εναλλασσόμενο (AC) δίκτυο. Αυτό συμβαίνει λόγω της αστάθειας που υπάρχει στην παραγόμενη τάση και συχνότητα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται μετατροπείς οι οποίοι σταθεροποιούν την τάση με σκοπό είτε την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας είτε τη σύνδεση με το υπάρχον εναλλασσόμενο δίκτυο.

### 3.5.6 Πύργοι Στήριξης Μικρών Ανεμογεννητριών

Όπως οι μεγάλες ανεμογεννήτριες έτσι και οι μικρές χρησιμοποιούν πύργους στήριξης για την ανύψωση της ατράκτου της μηχανής στον αέρα. Οι πύργοι αυτοί όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω θα πρέπει να είναι αρκετά ψηλοί, ώστε η ανεμογεννήτρια να βρίσκεται ψηλότερα από την τυρβώδη ζώνη κοντά στο έδαφος αλλά ταυτόχρονα και ανθεκτικοί ώστε να αντέχουν τις δυνάμεις που δέχονται από τον άνεμο.

Οι πύργοι των μικρών ανεμογεννητριών ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά:

- (α) τους πύργους δικτυωτού πλέγματος
- (β) τους πύργους με μονό σωλήνα.

Οι πύργοι δικτυωτού πλέγματος χρησιμοποιούν ένα δίκτυο σωλήνων σε μορφή πλέγματος σχηματίζοντας πύργο, ο οποίος στερεώνεται στο έδαφος με ειδική κατασκευή συρματοσχοίνα σε τρία σημεία διαφορετικών διευθύνσεων. Επίσης, σε

αυτού του είδους πύργους υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής του ύψους και αυτός είναι ένας από τους λόγους του υψηλού κόστους κατασκευής. Από την άλλη πλευρά, οι πύργοι μονού στύλου έχουν απλούστερο τρόπο κατασκευής ενώ διαθέτουν το πλεονέκτημά να είναι οπτικά πιο ευχάριστοι σε σχέση με τους πύργους του προηγούμενου είδους.

Οι πύργοι στήριξης των μικρών ανεμογεννητριών μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με την ιδιοσυχνότητά τους σε εύκαμπτους και άκαμπτους. Στους άκαμπτους πύργους η ιδιοσυχνότητά τους είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα περιστροφής της πτέρυγας ενώ στους εύκαμπτους πύργους η ιδιοσυχνότητα του πύργου είναι μικρότερη από τη συχνότητα περιστροφής του πτερυγίου.

## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

### **“ Αντιστροφέας ( Inverter ) ”**

#### **4.1 Εισαγωγή**

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή μία ανεμογεννήτρια 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 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 φωτοβολταϊκά πλαίσια ή ανεμογεννήτρια 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

## 4.2 Μονάδες Μετατροπής Ισχύος

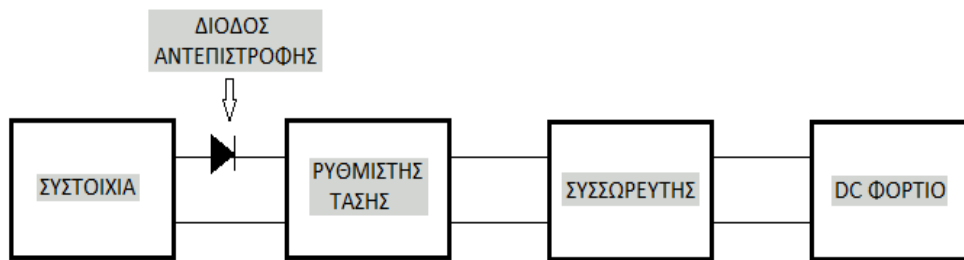
Μονάδες μετατροπής ισχύος είναι οι μονάδες εκείνες που αναλαμβάνουν την προσαρμογή μεταξύ συστοιχίας, συσσωρευτή, φορτίων και εφεδρικής πηγής ενέργειας (αν υπάρχει) μετατρέποντας την «ακατέργαστη» DC ισχύ εξόδου από τη φωτοβολταϊκή - αιολική συστοιχία σε ισχύ «κατάλληλης ποιότητας» και σύμφωνης με τις απαιτήσεις του φορτίου.

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 (σχήμα 5.1). Η δίοδος αντεπιστροφής τοποθετείται για αποφυγή της εκφόρτισης των συσσωρευτών. Ο συνδυασμός αυτός συνίσταται μόνο όταν το μέγιστο ρεύμα της συστοιχίας είναι μικρότερο από το 5% της χωρητικότητας των συσσωρευτών.



Σχήμα 4.1. Αυτορυθμιζόμενο αυτόνομο υβριδικό ενεργειακό σύστημα.

Σε πολλά DC συστήματα, οι μεταβολές της τάσης που οφείλονται σε μεταβολή των καιρικών συνθηκών, αντισταθμίζονται με έλεγχο της τάσης της υβριδικού ενεργειακού συστήματος με τη βοήθεια ρυθμιστών τάσης (σχήμα 5.2). 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.

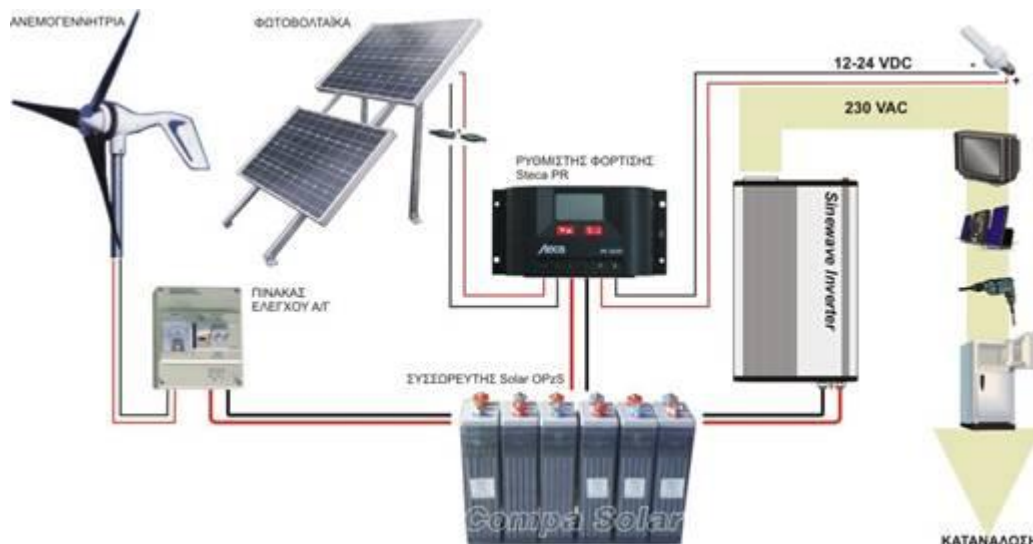


Σχήμα 4.2 Αυτόνομο υβριδικό ενεργειακό σύστημα με ρυθμιστή τάσης.

Σε ένα υβριδικό ενεργειακό σύστημα θέλουμε να εξάγουμε από τη εγκατάσταση 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 του συστήματος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση, δεν υπάρχει αυτή η προσαρμογή λόγω μεταβολής της ακτινοβολίας, της έντασης του ανέμου, 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 (σχήμα 5.3).





Σχήμα 4.3 Αυτόνομο υβριδικό ενεργειακό σύστημα με αντιστροφέα (inverter)

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.

## 4.3 Αντιστροφέας ( Inverter )

### 4.3.1 Γενικά Στοιχεία

Ο αντιστροφέας (inverter) είναι μία ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγει ένα αυτόνομο υβριδικό ενεργειακό σύστημα σε εναλλασσόμενο αντίστοιχο με αυτό του δικτύου. Οι αντιστροφείς μπορεί να είναι μικροί (string inverters) ή κεντρικοί, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Στην τεχνολογία στοιχειοσειρών (string), η φωτοβολταϊκή γεννήτρια χωρίζεται σε επιμέρους επιφάνειες μονάδας και σε κάθε μία από τις επιμέρους "στοιχειοσειρές" αντιστοιχίζεται ένας ξεχωριστός μετατροπέας. Χάρη σε αυτή την τεχνολογία μειώνονται τα έξοδα του συστήματος, η εγκατάσταση απλοποιείται σημαντικά και αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση καθώς και η διαθεσιμότητα της εγκατάστασης. Οι κεντρικοί μετατροπείς ενδείκνυνται ιδιαίτερα για τη δημιουργία φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων με ομοιογενή δομή (πλαίσια του ίδιου τύπου

με ταυτόσημο προσανατολισμό και κλίση). Χρησιμοποιούνται για εγκαταστάσεις άνω των 100 kWp και έχουν σχεδιαστεί για εξωτερική χρήση.

Οι αντιστροφείς μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα (DC), σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Κατ' αρχήν το πλάτος είναι παρόμοιο μεταξύ DC και AC. Μέσα στην ίδια συσκευασία μπορεί να περιέχεται και μετασχηματιστής ο οποίος στόχο έχει την προσαρμογή της τάσης στα επίπεδα του εναλλασσόμενου ρεύματος που επιθυμούμε, π.χ. 400V. Επίσης, στους αντιστροφείς για ΦΒ είναι δυνατόν να περιλαμβάνεται διάταξη ανίχνευσης της μέγιστης παραγωγής από την πηγή (Maximum Power Point Tracker (MPPT)). Αντιστροφείς στις ΑΠΕ χρησιμοποιούνται σε:

- Φωτοβολταϊκά συστήματα
- Κυψέλες Καυσίμου
- Μικρές ανεμογεννήτριες που παράγουν ισχύ απευθείας σε DC
- Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες σε κατάλληλους μετατροπείς για τη ρύθμιση της ισχύος μέσω μετατροπέων δικτύου για φιλικότερη λειτουργία.
- Σε διατάξεις μπαταριών για την παροχή της αποθηκευμένης ενέργειας προς το δίκτυο.

Βασικά χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή τους απόδοση (ακόμα και σε χαμηλή ισχύ εισόδου), το μεγάλο εύρος θερμοκρασιακής λειτουργίας (-25°C έως +60°C), και ο υψηλός βαθμός προστασίας τους από σκόνη και υγρασία (τυπική τιμή: IP65). Κατά την τοποθέτηση των αντιστροφέων είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ο επαρκής αερισμός τους. Συγκεκριμένα, γύρω από τη συσκευή πρέπει να υπάρχουν αποστάσεις 300mm – 500mm και, αν απαιτείται, χρήση τεχνητού εξαερισμού. Στην εικόνα 11 βλέπουμε τον τυπικό συμβολισμό των αντιστροφέων.

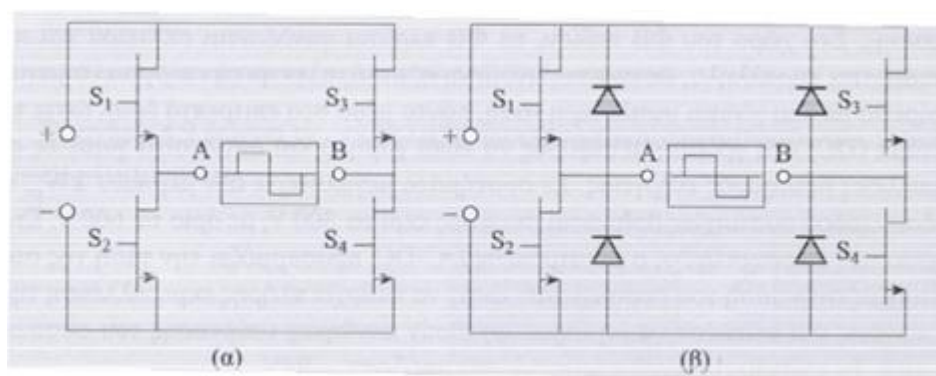
#### 4.3.2 Κατηγορίες Αντιστροφέων

Οι αντιστροφείς χωρίζονται ανάλογα με τον αριθμό φάσεων που εμπλέκουν αλλά και τον τύπο διαμόρφωσης της συνεχούς τάσης προς εναλλασσόμενη που δέχονται. Οι τετραγωνικού παλμού είναι οι πιο απλοί αλλά η έξοδός τους έχει πολλές αρμονικές επιβλαβείς επιπτώσεις για τις συσκευές μας. Έτσι χρησιμοποιούνται σε πολύ απλές κατασκευές για μικρή ισχύ και για «αναίσθητα» φορτία όπως οι λαμπτήρες πυράκτωσης

κάποιο μικρό θερμικό φορτίο κλπ. Οι αντιστροφείς διακρίνονται σε μόνο-φασικούς ή τρι-φασικούς, ανάλογα με τον αριθμό φάσεων.

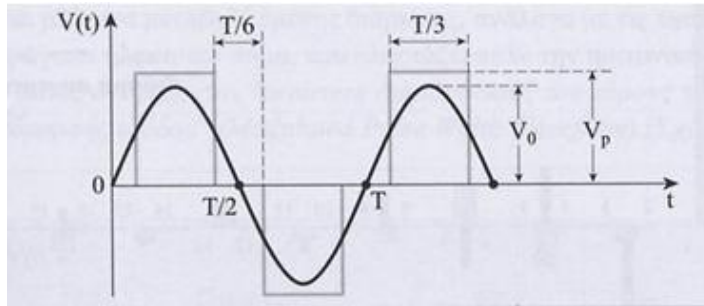
### 4.3.3 Αρχή λειτουργίας

Η βασική αρχή λειτουργίας του αντιστροφέα περιγράφεται στο σχήμα 5.4. Χρησιμοποιείται ευρύτατα σε περιπτώσεις που διαθέτουμε πηγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσεως και καταναλωτές εναλλασσόμενης, όπως συμβαίνει στα αυτόνομα υβριδικά ενεργειακά συστήματα 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).



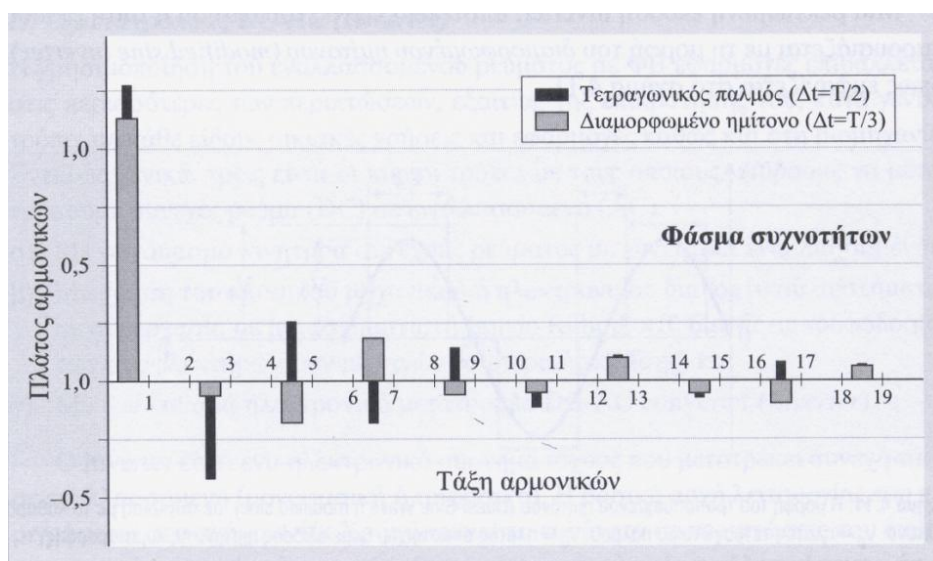
Σχήμα 4.4. (α) Βασική αρχή λειτουργίας του inverter. Τα S1, S2, S3, S4 είναι διακοπτικά στοιχεία. Η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC conversion) επιτυγχάνεται με κλείσιμο - άνοιγμα των διακοπτικών στοιχείων ανά δύο, χιαστί (1,4 και 2,3). Όσο τα S1, S4 είναι αγωγίμα και τα S2, S3 σε αποκοπή, τα σημεία A και B έχουν πρόσημα + και - αντίστοιχα. Όταν συμβαίνει το αντίστροφο, τα A και B έχουν πρόσημα - και + αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η εναλλασσόμενη τετραγωνική τάση (κέντρο του διαγράμματος). (β) Στο προηγούμενο κύκλωμα προστίθεται σε κάθε διακοπτικό στοιχείο από μία διόδος, έτσι ώστε να αποκόπτεται η επιστρεφόμενη ισχύς από μη ωμικά φορτία κατανάλωσης.

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 5.5.



Σχήμα 4.5. Η μορφή του τροποποιημένου ημιτόνου σε σύγκριση με το καθαρό ημίτονο.  $V_p$  = πλάτος τετραγωνικού παλμού,  $V_0$  = πλάτος αντίστοιχου θεμελιώδους ημιτονικής κυματομορφής.

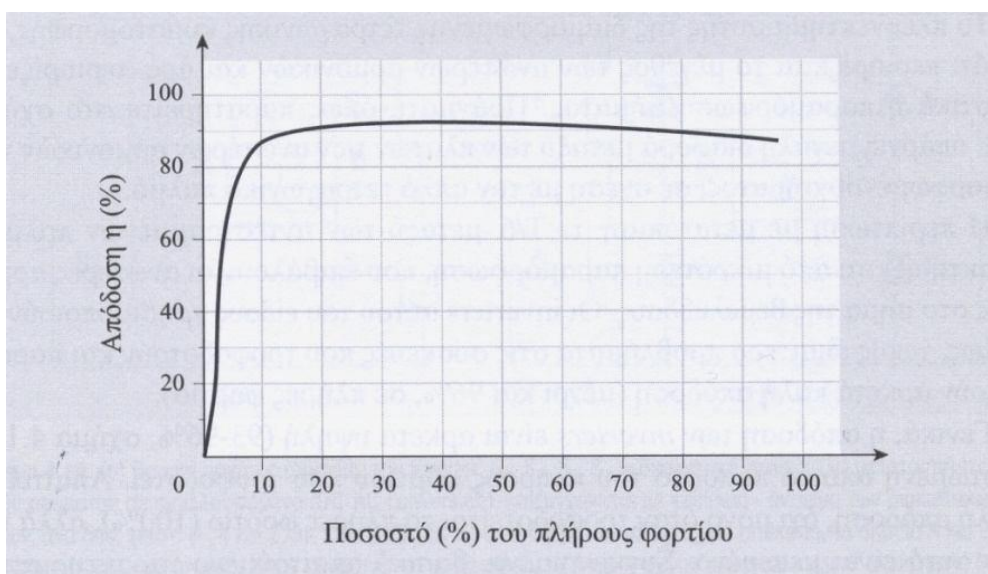
Με κατάλληλη ρύθμιση των χρόνων κλεισίματος – ανοίγματος των διακοπών, επιτυγχάνουμε μικρή τροποποίηση της κυματομορφής εξόδου του, η οποία χαρακτηρίζεται από το ότι ο αρνητικός τετραγωνικός παλμός είναι μετατοπισμένος χρονικά, σε σχέση με το θετικό, κατά  $T/6$  της περιόδου της συνολικής κυματομορφής. 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. Πράγματι, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6, υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των πλατών των ανωτέρων αρμονικών του διαμορφωμένου σήματος, σε σχέση με τον απλό τετραγωνικό παλμό.



Σχήμα 4.6. Φάσμα συχνοτήτων δύο περιοδικών σημάτων, του εναλλασσόμενου τετραγωνικού παλμού (μαύρα παραλληλόγραμμα) και του εναλλασσόμενου διαμορφωμένου τετραγωνικού παλμού. Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής (τάξη  $n=1$ ) είναι  $\sim 1,15$  του πλάτους του τετραγωνικού παλμού ( $V_0 = 1,15V_p$ ).

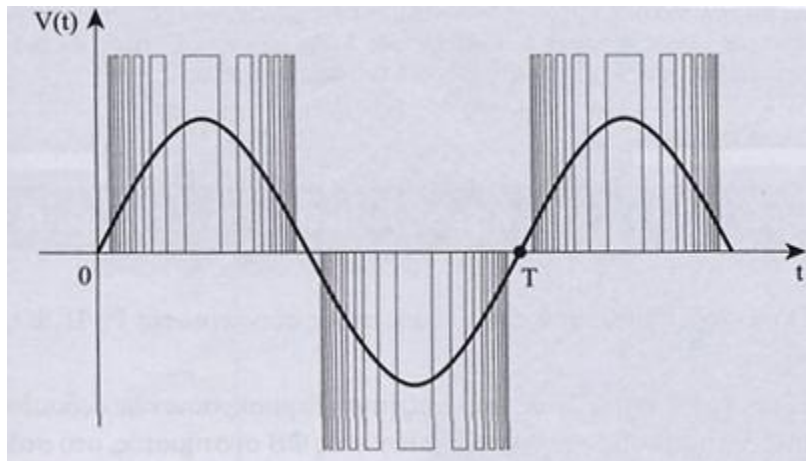
Η περίπτωση με μετατόπιση  $T/6$  μεταξύ των αντεστραμμένων παλμών χαρακτηρίζεται από μικρότερη παραμόρφωση, που επιβάλουν οι ανώτερες αρμονικές στο σήμα της θεμελιώδους. Οι inverters αυτού του είδους χρησιμοποιούνται, ευρέως, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στις συσκευές που τροφοδοτούν και παρουσιάζουν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

Γενικά, η απόδοση των inverters είναι αρκετά υψηλή (93-96%, σχήμα 5.7), 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.



Σχήμα 4.7. Μεταβολή της απόδοσης του inverter σε συνάρτηση με το ποσοστό του πλήρους φορτίου που τροφοδοτεί.

Επιβάλλοντας περισσότερα κλεισίματα των διακοπών 1,4 και 2,3 και μάλιστα μεταβαλλόμενης διάρκειας, ανάλογα με τις τιμές ενός ημιτόνου, παράγεται ηλεκτρικό σήμα που πλησιάζει πολύ την ημιτονική μορφή. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται inverters διαμόρφωσης του εύρους των παλμών της κυματομορφής εξόδου" (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 4.8. Η κυματομορφή εξόδου ενός inverter διαμόρφωσης εύρους παλμών.

## 4.4 Σχεδίαση ενός DC – AC μετατροπέα

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

Επί της ουσίας πρόκειται για την πλευρά του μετατροπέα που συνδέεται με την έξοδο του αυτόνομου υβριδικού ενεργειακού συστήματος, το οποίο 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.

#### 4.4.1.1 Κατάσταση λειτουργίας

Ο μετατροπέας έχει ενσωματωμένες στην είσοδο του ηλεκτρονικές διατάξεις που επεξεργάζονται κατάλληλα το ρεύμα και την τάση εξόδου του ενεργειακού

συστήματος, ώστε για κάθε χρονική στιγμή να απορροφάμε τη μέγιστη ισχύ από το σύστημα. 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, ανέμου 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 του συστήματος αυτή θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στο «παράθυρο τάσης» του μετατροπέα.

Το MPP όπως είδαμε καθορίζεται από το ρεύμα IMPP και την τάση VMPP. Τα μεγέθη αυτά παρέχονται από τους κατασκευαστές των πλαισίων αλλά αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC), όπου η θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων λαμβάνεται 25 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 C με 60 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  $-10\text{ C}$  για την Ευρώπη. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η  $V_{oc}$  ελαττώνεται.

Όσον αφορά την ανεμογεννήτρια, οι περισσότερες ανεμογεννήτριες διαθέτουν ενσωματωμένο ελεγκτή φόρτισης (controller) με σκοπό να ελέγχει την τάση εξόδου έτσι ώστε να μην ξεπεράσει εάν προκαθορισμένο όριο. Η δυνατότητα μεταβολής της τάσης εξόδου πραγματοποιείται μέσω μίας βίδας που βρίσκεται στο πίσω μέρος της ατράκτου της ανεμογεννήτριας αν στραφεί κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού από την μικρότερη προς τη μεγαλύτερη τιμή.

- Power Threshold ( Ελάχιστη τιμή ισχύος)

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.

- Μέγιστη Ένταση (  $I_{pv\ max}$ )

Είναι το απόλυτο μέγιστο αποδεκτό ρεύμα στην είσοδο του inverter.

#### 4.4.2 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 μετατροπέις. 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 Εναλλασσόμενη 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 Εναλλασσόμενη 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 ΧΤ η ονομαστική πολική τάση εξόδου της συσκευής είναι στα 0.4 kV.

- Ονομαστικό Εναλλασσόμενο 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.

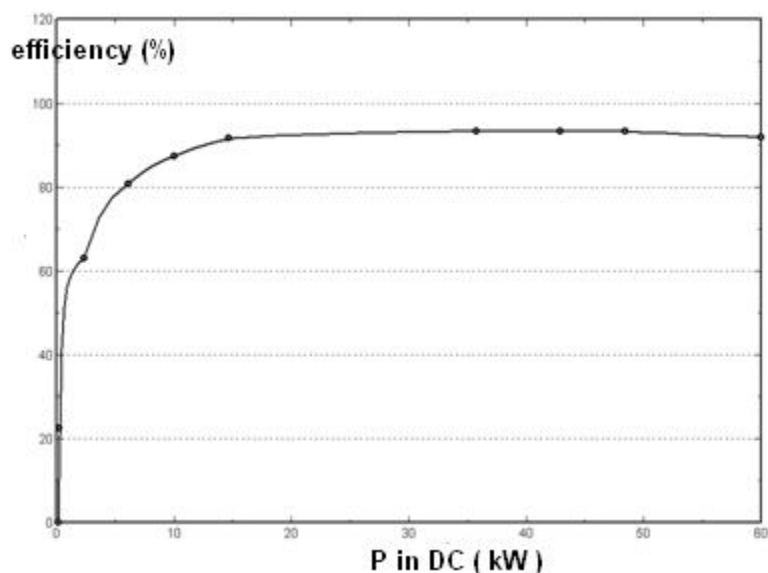
- Συχνότητα Δικτύου

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.



Σχήμα 4.9 Απόδοση μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος εισόδου της συσκευής.

Να σημειώσουμε 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.

#### 4.5 Ελεγκτής Φόρτισης

Η φόρτιση των συσσωρευτών μέσω αυτόνομου υβριδικού ενεργειακού συστήματος 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

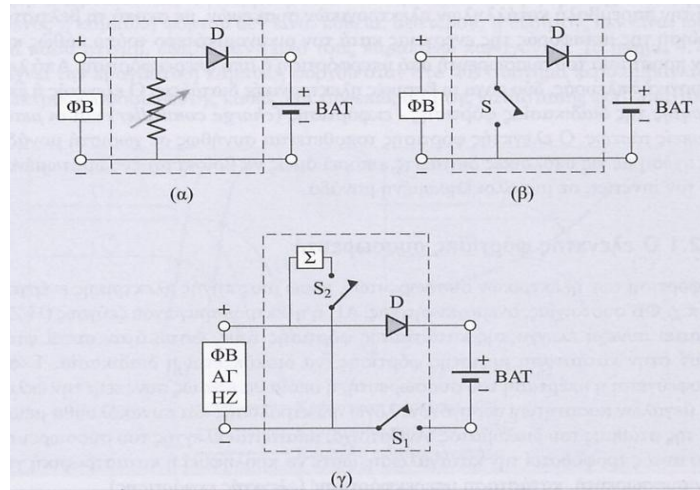
τροφοδοτεί την κατανάλωση, ώστε να προληφθεί η καταστροφική κατάσταση υπερεκφόρτισης.

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 δίοδος, για την προστασία του συστήματος αποθήκευσης από εκφόρτιση, μέσω της διάταξης ή του υπόλοιπου συστήματος.

#### *4.5.1 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 αποθήκευσής της.



Σχήμα 4.10 Τυπικά διαγράμματα παράλληλου ρυθμιστή φόρτισης (α) γραμμικό και (β) με διακοπτικό υλικό. Το διάγραμμα (γ) αφορά ρυθμιστή φόρτισης σε σειρά με στοιχείο απόρριψης ή απόδοσης της περίσσειας ενέργειας.

#### 4.5.2 Ρυθμιστής Φόρτισης σε Σειρά (Series Controller)

Η βασική αρχή λειτουργίας της δεύτερης διάταξης ελέγχου φόρτισης βασίζεται στη χρήση δύο διακοπών S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>. 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 S<sub>2</sub>, ο οποίος εισάγει στην έξοδο του συστήματος ενέργειας, ένα στοιχείο απόδοσης (Σ) της επί πλέον ενέργειας, την οποία δεν έχει τη 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 (S<sub>1</sub>) σε σειρά (Series controller) και μπορεί να ελέγξει τη φόρτιση συσσωρευτών από το αυτόνομο υβριδικό ενεργειακό 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 5<sup>ο</sup>

### “Μέσα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας”

#### 5.1 Εισαγωγή

Ένα μέρος της ενέργειας που παράγεται από ένα αυτόνομο ενεργειακό σύστημα 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, η ένταση του ανέμου ή είτε κατά τη διάρκεια συνεχών ημερών με νεφελώδη ουρανό είτε ημέρες με πλήρη άπνοια. ρεύματος. 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.

#### 5.2 Ηλεκτρικοί 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 αυτόνομο υβριδικό ενεργειακό σύστημα.

Τα πλεονεκτήματα ενός αυτόνομου υβριδικού ενεργειακού συστήματος με συσσωρευτές είναι η δυνατότητα να παρέχουν ενέργεια σε περιόδους που δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία ή αρκετή ένταση ανέμου, η δυνατότητα να καλύπτουν στιγμιαίες αιχμές ζήτησης φορτίου, η ύπαρξη σταθερής τάσης στο σύστημα, η ικανότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας από την ενεργειακή ζήτηση 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 μπορούν να καταγραφούν στα μειονεκτήματα ενός τέτοιου συστήματος.



Εικόνα 5.1 Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές.

### 5.3 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:

1. Την άνοδο : η οποία δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
2. Την κάθοδο : η οποία δέχεται τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
3. 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 το 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 αλληλοεπιδρά χημικά με τον ηλεκτρολύτη. Συνήθως, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την 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.

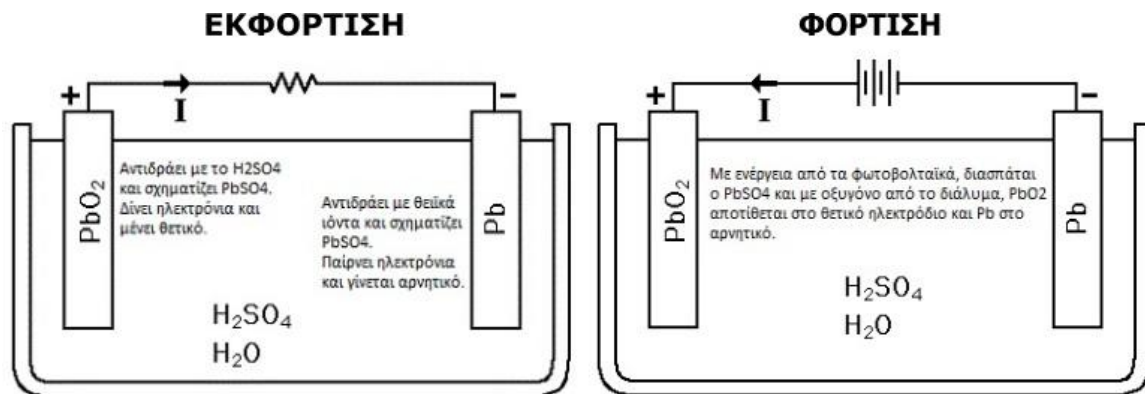
Το στοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί σε πολλά σχήματα: κυλινδρικό, επίπεδο ή πρισματικό. Τα στοιχεία σφραγίζονται με διάφορους τρόπους για να αποφευχθεί η διαρροή του ηλεκτρολύτη. Μερικά στοιχεία διαθέτουν βαλβίδες για να επιτρέπουν τη διαφυγή των αερίων που παράγονται κατά τη λειτουργία τους. Στο σχήμα 6.2 φαίνεται η δομή ενός συσσωρευτή όπου διακρίνονται τα δομικά χαρακτηριστικά που έχουν περιγραφεί παραπάνω.



Εικόνα 5..2 Η δομή ενός συσσωρευτή.

## 5.4 Αρχή Λειτουργίας Συσσωρευτών

Ο μηχανισμός λειτουργίας των συσσωρευτών στηρίζεται σε μία αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 5.1 Ηλεκτροχημική διαδικασία ενός συσσωρευτή.

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  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , λεπτό επιφανειακό στρώμα των ηλεκτροδίων μετατρέπεται από  $\text{Pb}$  σε  $\text{PbSO}_4$ . 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 ( $\text{Pb}$ ), με σπογγώδη μορφή και το άλλο που είναι συνδεδεμένο με το θετικό πόλο της πηγής, οξειδώνεται προς  $\text{PbO}_2$ , 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.



## 5.5 Κατηγορίες Στοιχείων και Συσσωρευτών

### 5.5.1 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 πλεονεκτήματα 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.

### 5.5.2 Δευτερεύοντα Στοιχεία ή Συσσωρευτές

Τα δευτερεύοντα στοιχεία (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 απαιτούν μεγάλη ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- 1) 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.
- 2) 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 ενεργειακή 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 δίοδου. Τους βασικότερους εκπροσώπους αυτής της κατηγορίας, που είναι και πλέον κατάλληλοι για φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα, αποτελούν οι συσσωρευτές μόλυβδου (LEAD-ACID) και οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (NICKEL-CADMIUM).

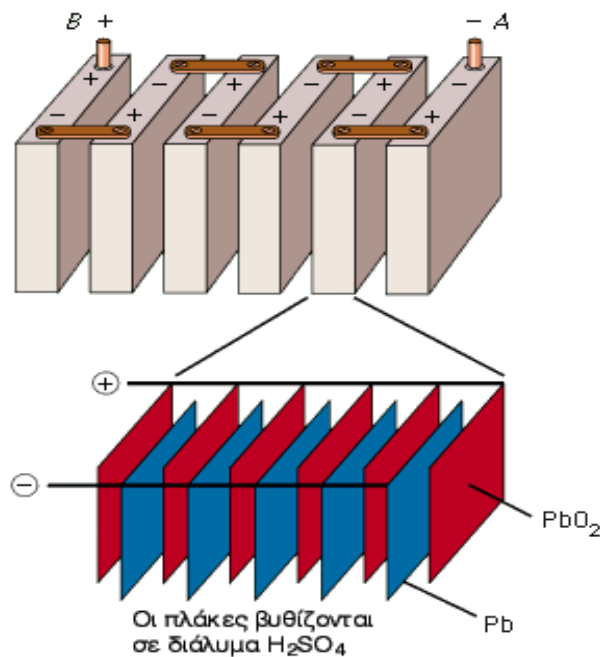
## 5.6 Τύποι Συσσωρευτών

Ακολουθεί μία συνοπτική ανάλυση των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε υβριδικά συστήματα ενέργειας.

- *Συσσωρευτές οξέος μόλυβδου (lead acid / Pub)* - Αυτού του τύπου συσσωρευτές αποτελούν την πιο διαδεδομένη εμπορικά λύση για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών συστημάτων. Από κατασκευή όχι μόνο μπορούν να αντέξουν τους βαθείς κύκλους εκφόρτισης αλλά και να ανταπεξέλθουν σε απότομα, μεγάλα ρεύματα και στις άμεσες απαιτήσεις ισχύος καθώς χρησιμοποιούν κυρίως τζέλ αντί για υγρό ηλεκτρολύτη. Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά τους δεν παρουσιάζουν αυξημένες επιδόσεις και η τιμή της ειδικής ενέργειάς τους είναι χαμηλή. Παρόλα αυτά αποτελούν τη φθηνότερη λύση σε σχέση με τα άλλα είδη επαναφορτιζόμενων ηλεκτροχημικών συσσωρευτών. Η διαδικασία της φόρτισης πρέπει να διεξάγεται σωστά, με σωστή συντήρηση (χωρίς απώλειες υγρών) και όχι σε υψηλές τιμές τάσης φόρτισης, διαφορετικά μειώνεται η διάρκεια ζωής των μπαταριών.

Specific energy	20–35 Wh.kg <sup>-1</sup> depending on usage
Energy density	54–95 Wh.L <sup>-1</sup>
Specific power	~250 W.kg <sup>-1</sup> before efficiency falls very greatly
Nominal cell voltage	2 V
Amphour efficiency	~80%, varies with rate of discharge & temp.
Internal resistance	Extremely low, ~0.022 Ω per cell for 1 Amphour cell
Commercially available	Readily available from several manufacturers
Operating temperature	Ambient, poor performance in extreme cold
Self-discharge	~2% per day, but see text below
Number of life cycles	Up to 800 to 80% capacity
Recharge time	8 h (but 90% recharge in 1 h possible)

Πίνακας 6.1.



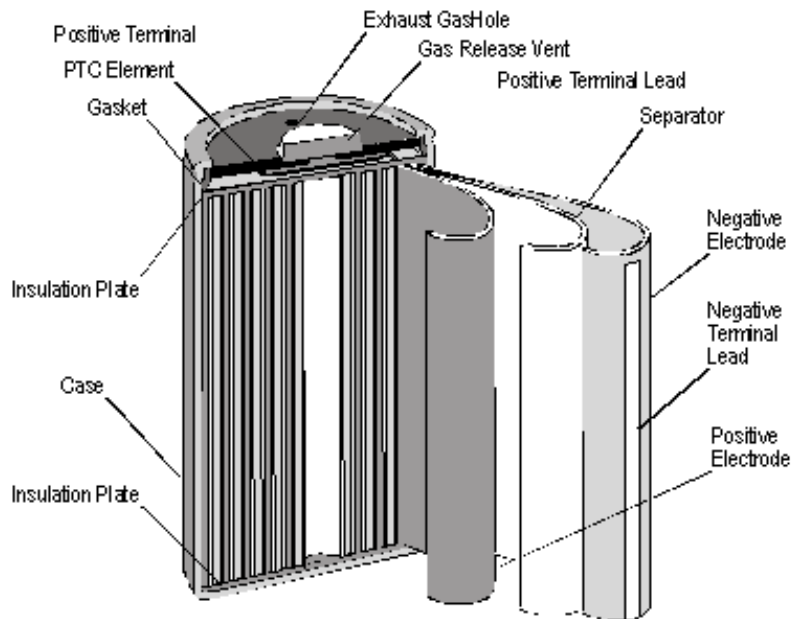
Εικόνα 5.3 Συσσωρευτές Οξέος Μόλυβδου

- Συσσωρευτές νικελίου - καδμίου (Ni-Cad) - Αυτός ο τύπος μπαταριών αποτέλεσε τον κύριο ανταγωνιστή των μπαταριών οξέος μόλυβδου, καθώς παρουσιάζει σχεδόν διπλάσια τιμή ειδικής ισχύος και μιάμιση φορά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Από την άλλη μεριά όμως το κόστος τους είναι μεγαλύτερο. Τα κελιά που απαρτίζουν την κάθε μπαταρία παρέχουν μικρότερη τάση εξόδου σε σχέση με τις μπαταρίες οξέος μόλυβδου και συνεπώς απαιτούνται περισσότερα σε πλήθος για την παροχή ίδιας

τάσης. Έχουν ανθεκτική κατασκευή και γρήγορο χρόνο φόρτισης. Η φόρτισή τους πρέπει να γίνεται επίσης υπό σωστές συνθήκες. Μειονέκτημα τους είναι η χρήση του καδμίου, το οποίο είναι τοξικό.

Specific energy	40–55 Wh.kg <sup>-1</sup> depending on current
Energy density	70–90 Wh.L <sup>-1</sup> depending on current
Specific power	~125 W.kg <sup>-1</sup> before becoming very inefficient
Nominal cell voltage	1.2 V
Amphour efficiency	Good
Internal resistance	Very low, ~0.06 Ω per cell for a 1 Amphour cell
Commercially available	Good in smaller sizes, difficult for larger batteries
Operating temperature	-40°C to +80°C
Self-discharge	0.5% per day, very low
Number of life cycles	1200 to 80% capacity
Recharge time	1 h, rapid charge to 60% capacity 20 mins

Πίνακας 6.2



Εικόνα 5.4 Συσσωρευτής νικελίου- καδμίου.

- Συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου υδριδίου (Ni-Mh) - Η διαφορά αυτού του τύπου μπαταρίας σε σχέση με τον προηγούμενο (NiCad) είναι ότι έχει αντικατασταθεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο και αντί για κάδμιο χρησιμοποιείται υδρίδιο μετάλλου, το οποίο δεν είναι τοξικό. Τα χαρακτηριστικά τους στοιχεία είναι γενικά καλύτερα σε σύγκριση με τις μπαταρίες νικελίου - καδμίου. Έχουν διπλάσια ενεργειακή

πυκνότητα και μικρότερο χρόνο φόρτισης. Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητο σύστημα ψύξης και παρουσιάζουν μεγάλο ρυθμό αυτοεκφόρτισης (έως 5% ανά ημέρα).

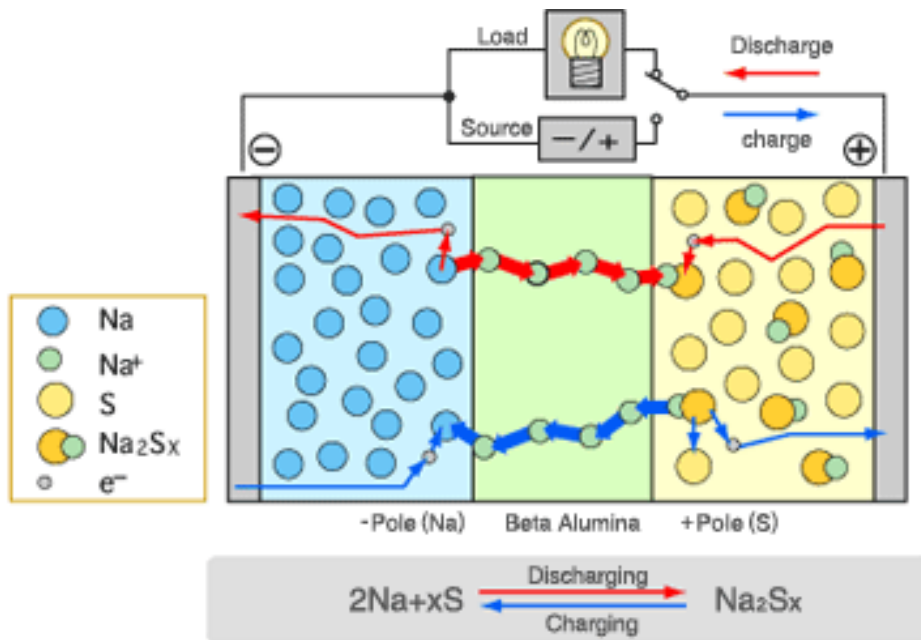
Specific energy	~65 Wh.kg <sup>-1</sup> depending on power
Energy density	~150 Wh.L <sup>-1</sup>
Specific power	200 W.kg <sup>-1</sup>
Nominal cell voltage	1.2 V
Amphour efficiency	Quite good
Internal resistance	Very low, ~0.06 Ω per cell for a 1 Amphour cell
Commercially available	A good range of small cells, traction batteries difficult to obtain
Operating temperature	Ambient
Self-discharge	Poor, up to 5% per day
Number of life cycles	~1000 to 80% discharge
Recharge time	1 h, rapid charge to 60% capacity 20 mins

Πίνακας 6.3

- Συσσωρευτές νατρίου - σουλφιδίου (Na-S) - Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες αυτής της τεχνολογίας παρουσιάζουν το πλεονέκτημα λειτουργίας σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες 300 - 350°C. Έχουν πολύ υψηλή τιμή ειδικής ενέργειας, έξι φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με τις μπαταρίες μόλυβδου, για τη σωστή λειτουργία απαιτείται προθέρμανση των συσσωρευτών, ενώ κατά τη διάρκεια μη λειτουργίας τους (για περισσότερο από μία ημέρα) πρέπει να διατηρούνται θερμές σε ορισμένη θερμοκρασία. Τέλος, η εμπορική τους προώθηση έχει ανασταλεί λόγω μη πλήρους κάλυψης των συνθηκών ασφαλείας, καθώς υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης.

Specific energy	100 Wh.kg <sup>-1</sup> (Potentially 200 Wh.kg <sup>-1</sup> )
Energy density	150 Wh.L <sup>-1</sup>
Specific power	200 W.kg <sup>-1</sup>
Nominal cell voltage	2 V
Amphour efficiency	Very good
Internal resistance	Broadly similar to NiCad
Commercially available	Not on the market at all
Operating temperature	300–350°C
Self-discharge	Quite low, but when not in use energy must be supplied to keep the battery warm
Number of life cycles	~1000 to 80% capacity
Recharge time	8 h

Πίνακας 6.4

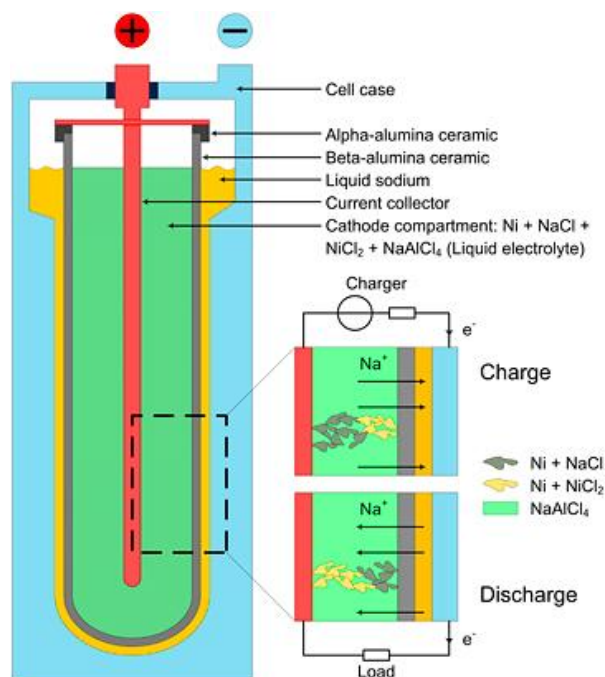


Σχήμα 5.2 Συσσωρευτής νατρίου – σουλφιδίου

- Συσσωρευτές νικελίου-χλωριούχου νατρίου (Ni-NaCl) - Αυτοί οι συσσωρευτές, γνωστοί και ως συσσωρευτές «ZEBRA» (Zero Emissions Battery Research Association), λειτουργούν επίσης σε υψηλές θερμοκρασίες 300 - 350°C, καλύπτοντας όμως τις συνθήκες ασφαλείας που απαιτούνται στην Ευρώπη. Η θερμική απομόνωση επιτυγχάνεται με χρήση διπλού στρώματος μεταλλικού κουτιού, το οποίο έχει διάκενο 2 - 3cm και είναι εκκενωμένο από αέρα. Οι μπαταρίες χρειάζεται να παραμένουν θερμές όταν δε χρησιμοποιούνται, εκτός αν είναι για ανενεργές για χρονικό διάστημα λίγων ωρών, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημά τους καθώς είναι ικανές να χάσουν περίπου 10 % της ενέργειάς τους μέσα σε μία ημέρα.

Specific energy	100 Wh.kg <sup>-1</sup>
Energy density	150 Wh.L <sup>-1</sup>
Specific power	150 W.kg <sup>-1</sup>
Nominal cell voltage	~2 V average (2.5 V when fully charged)
Amphour efficiency	Very high
Internal resistance	Very low, but higher at low levels of charge
Commercially available	Available commercially, but very few suppliers
Operating temperature	300–350°C
Self-discharge	When not in use energy must be continually used to keep the battery up to temperature, corresponding to a self-discharge of about 10% per day
Number of life cycles	>1000
Recharge time	8 h

Πίνακας 6.5



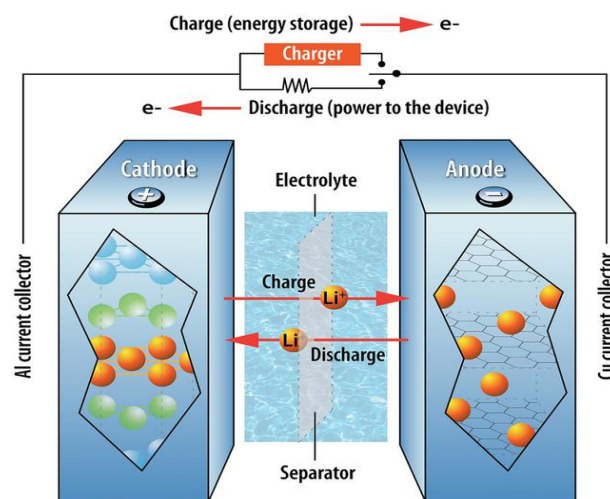
Σχήμα 5.3 Συσσωρευτές νικελίου – χλωριούχου νατρίου

- Συσσωρευτές ιόντων λιθίου (Li-ion) - Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου παρουσιάστηκαν την δεκαετία του 1990. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους έναντι των άλλων τύπων μπαταριών είναι η μεγάλη τιμή της ειδικής ενέργειας (τρεις φορές μεγαλύτερη από τις μπαταρίες μόλυβδου), γεγονός που τις καθιστά ελαφρύτερες για δεδομένη ισχύ. Η τάση εξόδου κάθε κελιού (3,5V) είναι σχεδόν διπλάσια συγκριτικά με τους συσσωρευτές μόλυβδου και τριπλάσια σε σχέση με τους συσσωρευτές νικελίου. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι σχετικά μικρός (10 % ανά μήνα), ενώ απαιτείται ακριβής έλεγχος της τάσης κατά τη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών, καθώς εάν η τάση υπερβεί κάποιο όριο μπορεί να προκαλέσει καταστροφή αυτών. Η έκθεση των συσσωρευτών σε υψηλές

θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσει παραγωγή αναθυμιάσεων και ανάφλεξη αυτών και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται κυκλώματα ασφαλείας για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας τους. Το κόστος αυτών των μπαταριών είναι αρκετά υψηλό.

Specific energy	90 Wh.kg <sup>-1</sup>
Energy density	153 Wh.L <sup>-1</sup>
Specific power	300 W.kg <sup>-1</sup>
Nominal cell voltage	3.5 V
Amphour efficiency	Very good
Internal resistance	Very low
Commercially available	Only in very small cells not suitable for electric vehicles
Operating temperature	Ambient
Self-discharge	Very low, ~10% per month
Number of life cycles	>1000
Recharge time	2–3 h

Πίνακας 6.6



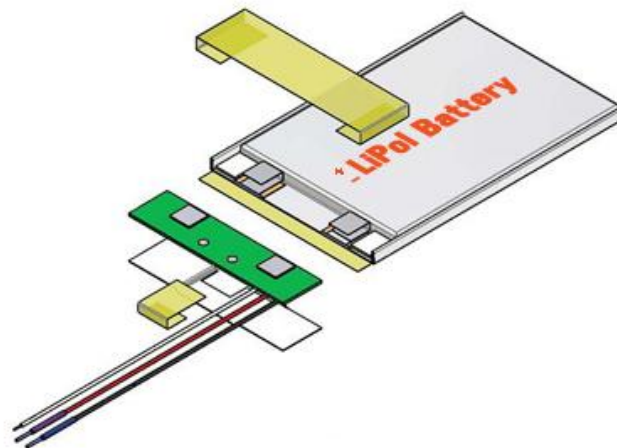
Σχήμα 5.4 Συσσωρευτής ιόντων λιθίου

- Συσσωρευτές πολυμερών λιθίου (Li-poly) - Αυτό το είδος συσσωρευτών παρουσιάστηκε το 1996, αποτελεί εξέλιξη των συσσωρευτών ιόντων λιθίου και πλεονεκτεί ως προς το σχεδιασμό. Παρουσιάζουν γενικά καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με τους συσσωρευτές Li-ion, έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ωστόσο εξετάζονται ακόμα κάποια θέματα ασφαλείας.



Specific energy	130-200 Wh/kg
Energy density	300 Wh/L
Specific power	up to 7.1 kW/kg
Nominal cell voltage	3.7 V
Self-discharge	Very low, 5% per month
Number of life cycles	>1000
Recharge time	~1h

Πίνακας 6.7

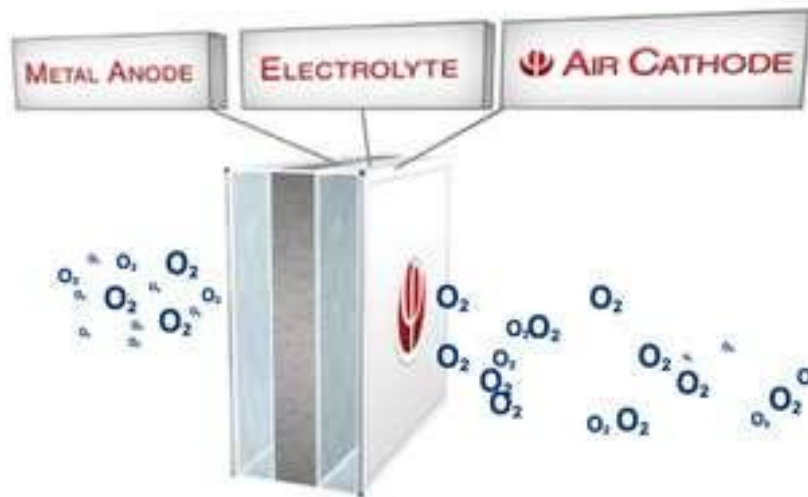


Σχήμα 5.5 Συσσωρευτής πολυμερών λιθίου

- Συσσωρευτές αέρος - αλουμινίου ( $Al(OH)_3$ ) - Οι συσσωρευτές αέρος μετάλλου αποτελούν μία διαφορετική κατηγορία συσσωρευτών, με την έννοια ότι η φόρτισή τους δεν επιτυγχάνεται απλά με την αντιστροφή του ρεύματος. Αντί αυτού, απαιτείται αντικατάσταση του μεταλλικού ηλεκτροδίου από καινούριο. Το παλιό ηλεκτρόδιο έπειτα αποστέλλεται προς επεξεργασία για επαναχρησιμοποίηση. Επίσης, ο ηλεκτρολύτης του συσσωρευτή χρειάζεται και αυτός αντικατάσταση. Το μειονέκτημα των μπαταριών αέρος αλουμινίου είναι η μικρή ειδική ισχύς, γεγονός που τις κάνει αρκετά βαρείς.

Specific energy	225 Wh.kg <sup>-1</sup>
Energy density	195 Wh.L <sup>-1</sup>
Specific power	10 W.kg <sup>-1</sup>
Nominal cell voltage	1.4 V
Amphour efficiency	N/A
Internal resistance	Rather high, hence low power
Commercially available	Stationary systems only available
Operating temperature	Ambient
Self-discharge	Very high (>10% per day) normally, but the electrolyte can be pumped out, which makes it very low
Number of life cycles	1000 or more
Recharge time	10 min, while the fuel is replaced

Πίνακας 6.7



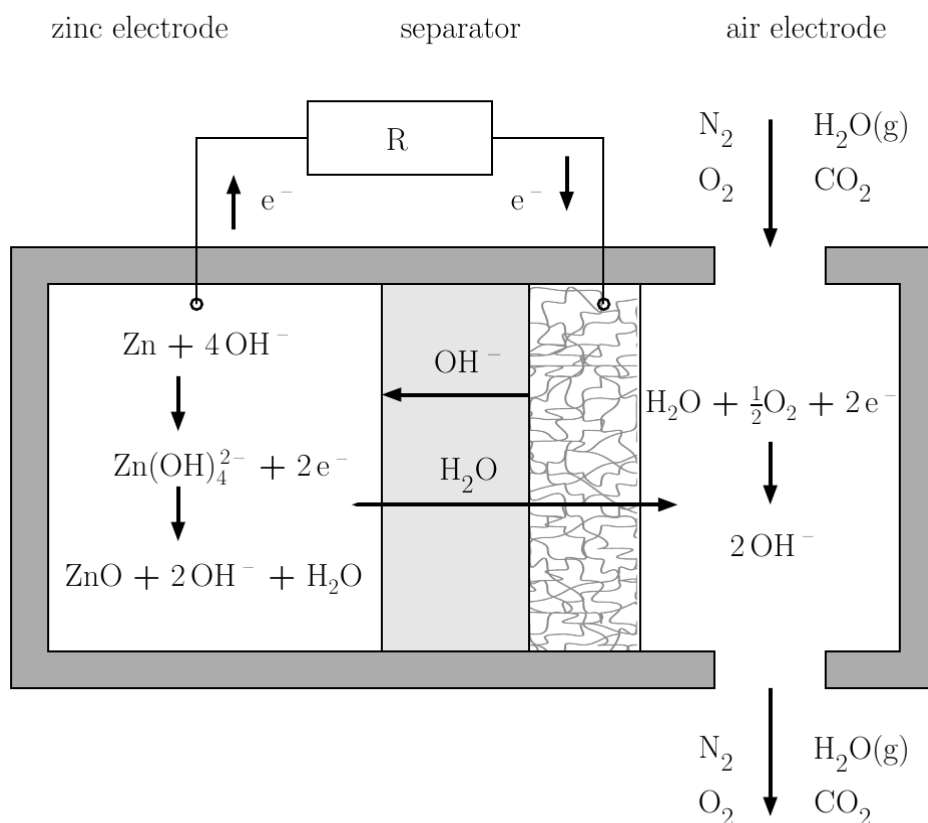
Εικόνα 5.5 Συσσωρευτής αέρος – αλουμινίου

- Συσσωρευτές αέρος - ψευδαργύρου (Zn(OH)) - Αυτός ο τύπος συσσωρευτών είναι ίδιας δομής με τον προηγούμενο, αλλά έχει αντικατασταθεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο από ψευδάργυρο. Η συνολική απόδοση είναι πολύ καλύτερη και αυτό οφείλεται κυρίως στην ειδική ισχύς η οποία είναι δέκα φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με τις μπαταρίες αέρος μετάλλου. Για αυτό το λόγο θεωρείται καλή λύση για τα οχήματα δρόμου. Από την άλλη μεριά, οι περισσότεροι κατασκευαστές αυτού του τύπου μπαταριών δίνουν μικρό κύκλο επαναφορτίσεων. Ο τρόπος επαναφόρτισης παραμένει ο ίδιος όπως πριν, με αντικατάσταση των αρνητικών ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη.

Χαρακτηρίζονται από υψηλή τιμή ενεργειακής πυκνότητας, αλλά θεωρείται δύσκολη ακόμα η κατασκευή μεγάλων μπαταριών τέτοιου τύπου.

Specific energy	230 Wh.kg <sup>-1</sup>
Energy density	270 Wh.L <sup>-1</sup>
Specific power	105 W.kg <sup>-1</sup>
Nominal cell voltage	1.2 V
Amphour efficiency	Not applicable
Internal resistance	medium
Commercially available	A very few suppliers
Operating temperature	Ambient
Self-discharge	High, as electrolyte is left in cell
Number of life cycles	>2000
Recharge time	10 min, while the fuel is replaced

Πίνακας 6.8



Σχήμα 5.6 Συσσωρευτής αέρος – ψευδαργύρου

Συμπερασματικά, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται συνεχής εξέλιξη στον τομέα των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών, ενώ καινοτόμες προτάσεις φαίνονται πολλά

υποσχόμενες για το μέλλον. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται μία σύγκριση των τεχνικών χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων ηλεκτροχημικών συσσωρευτών που είναι εμπορικά διαθέσιμοι.

Battery	Specific energy Wh.kg <sup>-1</sup>	Energy density Wh.L <sup>-1</sup>	Specific power W.kg <sup>-1</sup>	Current cost
Lead acid	30	75	250	0.5
NiCad	50	80	150	1.5
NiMH	65	150	200	2.0
Zebra	100	150	150	2.0
Li-ion <sup>5</sup>	90	150	300	10
Zinc-air	230	270	105	?

Πίνακας 6.9

## 5.7 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.

### 5.7.1 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).

### 5.7.2 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.

### 5.7.3 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  $2 C$  ανάλογα με την εφαρμογή. Έχουν διάρκεια ζωής 15-30 χρόνια

### 5.7.4 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.

### 5.7.5 Συσσωρευτές Μικρού Ρυθμού Εκφόρτισης

Χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένα αυτόνομα ενεργειακά 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.

### 5.7.6 Συσσωρευτές Μέσου Ρυθμού Εκφόρτισης

Χρησιμοποιούνται σε υβριδικά ενεργειακά 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.

## 5.8 Χαρακτηριστικά Μεγέθη ενός Συσσωρευτή

### 5.8.1 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 (ΗΕΔ) και η ονομαστική χωρητικότητά του. Η ΗΕΔ μετρείται σε Volt και ισούται με την πολική τάση του συσσωρευτή όταν δεν είναι συνδεδεμένος σε καταναλωτή.

Οι τιμές των ΗΕΔ 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 ΗΕΔ, όμοια ηλεκτρικά στοιχεία συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους. Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου συσσωρευτή μόλυβδου είναι 2,25 V. Έτσι, οι τυπικές ονομαστικές τάσεις με τις οποίες κυκλοφορούν, με την τυπική εμπορική τους μορφή οι συσσωρευτές μόλυβδου είναι 6V, 12V, 24V και 48 V.

### 5.8.2 Χωρητικότητα

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα συσσωρευτή ή 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 την 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 Amp/hour (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 Ampere. Η αποθηκευμένη ενέργεια του συσσωρευτή εκφράζεται σε Kilowatt/hour (KWh) και υπολογίζεται προσεγγιστικά πολλαπλασιάζοντας τη χωρητικότητα (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 .

### 5.8.3 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 την μπαταρία. Συνήθως καταδεικνύεται από την τάση αποκοπής ή τάση βάθους εκφόρτισης και από το ρυθμό εκφόρτισης. Στα τυπικά αυτόνομα ενεργειακά 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 και η χωρητικότητα του συσσωρευτή πρέπει να επιλέγεται, λαμβάνοντας υπόψη, τόσο η 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.

### 5.8.4 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 είτε εσωτερικοί χημικοί μηχανισμοί είτε 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 το 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.

#### 5.8.5 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 αυτόνομα ενεργειακά 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.

#### 5.8.6 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:

$$\beta_{\text{εκφ}} * N_{\text{κ}} = \text{σταθερό}$$

όπου  $N_{\text{κ}}$  το πλήθος των κύκλων λειτουργίας του συσσωρευτή.

#### 5.8.7 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 κατά 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  $n_{\gamma,\beta} = 0.8$ .

#### 5.8.8 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:

$$\text{Απόδοση ισχύος} = \frac{\text{εξερχόμενη ενέργεια (kW)}}{\text{εισερχόμενη ενέργεια (kW)}}$$

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  $n_q \approx 90\%$  .

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

## 5.9 Οι συσσωρευτές στα αυτόνομα υβριδικά ενεργειακά 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.

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

$$C = C_N * \beta$$

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 :

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

Ο συντελεστής απόδοσης των συσσωρευτών μολυβδου  $\alpha$  , 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  $E_\phi$ , ίση με :

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

και τότε η ονομαστική χωρητικότητα του είναι :

$$C_N = \frac{E_\phi}{\beta * V} = \frac{E}{\alpha * \beta * V}$$

Ως προς την παρεχόμενη ισχύ, βρίσκουμε εύκολα ότι αν ένας συσσωρευτής απαιτείται να τροφοδοτεί την κατανάλωση με μέση ισχύ  $P$  επί  $\mu$  συνεχείς μέρες, τότε η ενεργός χωρητικότητα θα πρέπει να είναι :

$$C = \frac{24 \mu * P}{\alpha * V}$$

## “Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>”

### Οικιακό Αυτόνομο υβριδικό σύστημα ενέργειας

#### 6.1 Επιμέρους τμήματα της εγκατάστασης

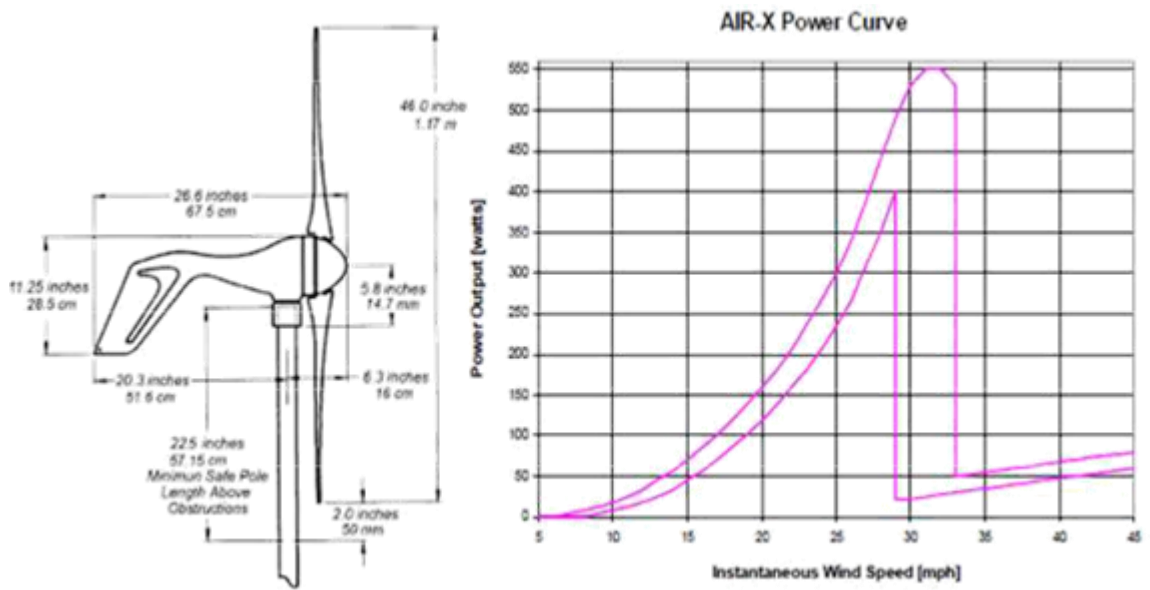
##### 6.1.1 Ανεμογεννήτρια

Για παραγωγή ενέργειας από τον άνεμο χρησιμοποιήθηκε μία ανεμογεννήτρια της εταιρίας Southwest Windpower και συγκεκριμένα το μοντέλο AIR-X Land ονομαστικής ισχύος 300 Watts.



Εικόνα 6.1 Ανεμογεννήτρια Southwest Windpower

Το μοντέλο αυτό, έχει τρία πτερύγια με διάμετρο 1.17 m, βάρος 6 kg ενώ το μήκος της ατράκτου της ανεμογεννήτριας είναι 0.675 m. Οι παραπάνω διαστάσεις ορίζουν μία σφαίρα λειτουργίας με διάμετρο 1.24 m. Η ανεμογεννήτρια είναι τοποθετημένη σε ύψος 3 m πάνω σε ένα πύργο στήριξης εξωτερικής διαμέτρου 4.5 cm. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει ταχύτητα εκκίνησης τα 3 m/s και ονομαστική ταχύτητα 12 m/s με μέγιστη έξοδο 400 Watts.



Σχήμα 6.1 Γεωμετρικές διαστάσεις και ενεργειακή καμπύλη AIR – X Land.

Η ανεμογεννήτρια διαθέτει γεννήτρια τριών φάσεων με στάτορα μόνιμου μαγνήτη συνδεδεμένο με κύκλωμα μετατροπής του παραγόμενου ρεύματος σε συνεχές. Ο ρότορας της ανεμογεννήτριας είναι κατασκευασμένος από δώδεκα τοξοειδούς μορφής μαγνήτες από Σίδηρο (Fe) με προσμίξεις Βορίου (B) και Νεοδυμίου (Nd). Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας είναι κατασκευασμένα από ελαστικό θερμοπλαστικό υλικό με προσμίξεις άνθρακα για μεγαλύτερη αντοχή σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας.

Η ανεμογεννήτρια διαθέτει σύστημα παθητικού αεροδυναμικού φρένου στην περίπτωση που πνέουν άνεμοι μεγάλης έντασης. Ειδικότερα, όταν η ταχύτητα του ανέμου πλησιάσει την τιμή 15 m/s τα πτερύγια λόγω ελαστικότητας λυγίζουν προς τα πίσω με αποτέλεσμα να αλλάζει η γωνία προσβολής μεταξύ των πτερυγίων και του διανύσματος της ταχύτητας του ανέμου μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Για μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας του ανέμου η επίδραση του παθητικού αεροδυναμικού φρένου είναι ανεπαρκής γεγονός που οδηγεί στη παύση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας με ηλεκτρονικό τρόπο βραχυκυκλώνοντας τα άκρα της με τη βοήθεια ενός διακόπτη.

Το μοντέλο AIR-X Land διαθέτει ενσωματωμένο ελεγκτή φόρτισης (controller) με σκοπό να ελέγχει την τάση εξόδου έτσι ώστε να μην ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο. Το όριο αυτό, εργοστασιακά έχει την τιμή 14.1 V και είναι δυνατόν να μεταβληθεί από 13.8 V έως 17.8 V. Η δυνατότητα μεταβολής της τάσης εξόδου πραγματοποιείται μέσω μίας βίδας που

βρίσκεται στο πίσω μέρος της ατράκτου της Α/Γ αν στραφεί κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη τιμή.

Η ανεμογεννήτρια δε διαθέτει ηλεκτρονικό σύστημα με το οποίο να στρέφεται προς την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτό το καταφέρνει με τη βοήθεια της αεροδυναμικά σχεδιασμένης “ ουρά” της. Επίσης, το μοντέλο AIR-X Land διαθέτει ένα παθητικό σύστημα ελέγχου της ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας με σκοπό την προστασία του συστήματος από υψηλής εντάσεως ανέμους. Το παθητικό σύστημα αυτό στηρίζεται στην καμπύλωση πτερυγίων και ταυτόχρονα στην εκτροπής τους από την διεύθυνση του ανέμου λόγω αεροδυναμικής σχεδίασης όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή.

#### 6.1.2 Φωτοβολταϊκά πάνελ

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για παραγωγή ενέργειας από τον ήλιο αποτελείται από τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) με κλίση  $45^{\circ}$  σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο και με κατεύθυνση προς το Νότο. Τα φωτοβολταϊκά είναι της εταιρίας Kyocera με την εμπορική ονομασία KC 50T, ονομαστικής ισχύος 54 Watts το καθένα. Το κάθε πλαίσιο αποτελείται από 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά, με εμβαδό  $0.01 \text{ m}^2$  και τάση εξόδου 0.6 V.

Τα τέσσερα πλαίσια συνολικού εμβαδού  $1.6 \text{ m}^2$  είναι συνδεδεμένα σε παράλληλη διάταξη ώστε να λειτουργούν με κοινή τάση προσφέροντας μέγιστο ρεύμα. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του καθενός πλαισίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 6.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια.

### **Ηλεκτρική απόδοση σε πρότυπες καταστάσεις δοκιμής (STC)**

Ονομαστική μέγιστη ισχύς εξόδου ( $P_{max}$ )	54.1 W (+10% / -5%)
Ονομαστική μέγιστη τάση ( $V_{mpp}$ )	17.4 V
Ονομαστικό μέγιστο ρεύμα ( $I_{mpp}$ )	3.11 A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ )	21.7 V
Ρεύμα βραχυκυκλώσεως ( $I_{sc}$ )	3.31 A
Μέγιστη τάση συστήματος	600 V
Απόκλιση τάσεως ανοιχτού κυκλώματος	$8.21 \times 10^{-2} \text{ V} / ^{\circ}\text{C}$
<b>Απόκλιση ρεύματος βραχυκυκλώσεως</b>	$1.33 \times 10^{-3} \text{ A} / ^{\circ}\text{C}$

Πίνακας 6.1 Χαρακτηριστικά στοιχεία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων.

#### 6.1.3 Μπαταρία

Για την αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν μπαταρίες υγρού ηλεκτρολύτη για κάθε ηλεκτρικό κύκλωμα ξεχωριστά.

Στο κύκλωμα που περιλαμβάνει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια χρησιμοποιήθηκε μπαταρία μολυβδου, κλειστού τύπου της εταιρίας Banner και συγκεκριμένα το μοντέλο 968 01. Το συγκεκριμένο μοντέλο επιλέχθηκε γιατί διαθέτει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά για εφαρμογή σε συστήματα παραγωγής ενέργειας με μέγεθος παρόμοιο με το προς εξέταση σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, η μπαταρία 968 01 έχει ονομαστική τάση 12 V και η χωρητικότητά της είναι 180 Ah για 5 ώρες λειτουργίας και 230 Ah για 20 ώρες λειτουργίας.

Στο κύκλωμα που περιλαμβάνει την ανεμογεννήτρια χρησιμοποιήθηκε μπαταρία μολυβδου κλειστού τύπου της εταιρίας Mura με εμπορική ονομασία Mura Clean 12MC 220. Η μπαταρία αυτή έχει ονομαστική τάση 12 V και η χωρητικότητά της αναφέρεται στα 195 Ah για 10 ώρες λειτουργίας και 220 Ah για 20 ώρες λειτουργίας στους  $25^{\circ}\text{C}$ .

#### 6.1.4 Ρυθμιστής Φόρτισης

Για την σύνδεση των φωτοβολταϊκών με την μπαταρία χρησιμοποιήθηκε ένας ελεγκτής φόρτισης (controller) με σκοπό τον καθορισμό της τάσης εξόδου στα 12 V αλλά και τον έλεγχο φόρτισης της μπαταρίας. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε (εικόνα 11) είναι της εταιρίας Conergy με την κωδική ονομασία SCC 20 eco.

Η συσκευή αυτή επιτρέπει την διέλευση μέγιστου ρεύματος 20 A για ένα σύστημα 12 V/ 24 V ανάλογα την προκαθορισμένη τάση του στοιχείου αποθήκευσης και έχοντας ελάχιστη κατανάλωση που δεν ξεπερνά τα 4 mA. Παράλληλα διαθέτει ηλεκτρονικό σύστημα προστασίας που διακόπτει τη φόρτιση της μπαταρίας όταν η τάση ξεπεράσει τα 13.5 V.



Εικόνα 6.2 Controller SCC 20 eco.

#### 6.1.5 Μετατροπέας

Ο μετατροπέας (inverter) είναι μία ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει την τάση της μπαταρίας από 12 V DC σε 220 V AC, με σκοπό την εφαρμογή σε κοινές ηλεκτρικές συσκευές. Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο μετατροπείς για κάθε ένα σύστημα ξεχωριστά.

Τόσο για το κύκλωμα που περιλαμβάνει την ανεμογεννήτρια όσο και για εκείνο που περιλαμβάνει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια χρησιμοποιήθηκαν δύο ημιτονοειδούς κύματος μετατροπείς της εταιρίας STUDER με την κωδική ονομασία AJ 257-400 ονομαστικής ισχύος 275 Watts. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει σχεδιαστεί για ηλεκτρικές συσκευές που λειτουργούν στο δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο των 230 V / 50Hz με απόδοση που ξεπερνά το 93%. Επίσης ο μετατροπέας διαθέτει οπτικό και ακουστικό βομβητή σε περίπτωση μη



ομαλής λειτουργίας της μπαταρίας όπως η χαμηλή τάση της μπαταρίας, η υπερθέρμανσή της κτλ.



Εικόνα 6.3 Inverter AJ275-12

#### 6.1.6 Ανεμόμετρο

Για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιήθηκαν δύο ανεμόμετρα τύπου κυπέλλου της εταιρίας North Wales με την κωδική ονομασία A100. Το ανεμόμετρο ήταν βαθμολογημένο και η καταγραφή της ταχύτητας του ανέμου γινόταν με απευθείας μετατροπή της συχνότητας ηλεκτρικών παλμών σε ταχύτητα ανέμου μέσω κατάλληλου συντελεστή μετατροπής ( $\lambda_{av}=0.79$ ). Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι και συνθετικό πλαστικό ικανό να λειτουργήσει σε διάφορες καιρικές συνθήκες. Το A100R είναι δυνατόν να μετρήσει ταχύτητα ανέμου μέχρι 75 m/sec σε θερμοκρασιακό εύρος από -30 °C έως +70 °C και με ακρίβεια 1% για ταχύτητες ανέμου μεταξύ 10 m/sec – 55 m/sec και 2% για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από 55 m/sec



Εικόνα 6.4 Ανεμόμετρο A100R

### 6.1.7 Πυρανόμετρο

Το πυρανόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ολικής ακτινοβολίας είναι της εταιρίας Kipp & Zonen με την κωδική ονομασία CM 3 (εικόνα 14). Η καταγραφή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας γινόταν με μετατροπή της τιμής της τάσης εξόδου του πυρανομέτρου σε μονάδες έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας ( $\text{Wm}^{-2}$ ) μέσω κατάλληλου συντελεστή ( $\lambda_{\text{πυρ}}=94.37$ ). Ο θερμικός ανιχνευτής του μοντέλου CM 3 έχει την δυνατότητα να μετρήσει τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας μέχρι τα  $4000 \text{ W/m}^2$  με σφάλμα της τάξης του  $\pm 15 \text{ W/m}^2$  με χρόνο απόκρισης μικρότερο από 18 sec. Επίσης είναι ικανό να λειτουργήσει άρτια σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  έως  $+80 \text{ }^\circ\text{C}$  ) και με σταθερότητα καλύτερη από 1% ανά έτος.



Εικόνα 6.5 Πυρανόμετρο CM3

### 6.1.8 Θερμοζεύγη

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη χαλκού-κωνσταντάνης (CuNi-τύπου T) τα οποία συνδέθηκαν με το σύστημα καταγραφής. Τα θερμοζεύγη τύπου T έχουν τη δυνατότητα να μετρήσουν θερμοκρασίες από  $-185 \text{ }^\circ\text{C}$  έως  $+300 \text{ }^\circ\text{C}$  με ακρίβεια  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  μεταξύ  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $125 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $\pm 0.004 \text{ }^\circ\text{C} \times T$  μεταξύ  $+125 \text{ }^\circ\text{C}$  -  $+300 \text{ }^\circ\text{C}$  όπου T η τιμή της ένδειξης της θερμοκρασίας του οργάνου.

## “Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>”

### Μελέτη Αυτόνομου Υβριδικού Φωτοβολταϊκού

#### Συστήματος για την Τροφοδότηση Οικίας 120 τ.μ.

##### 7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί μελετάται το πρόβλημα ηλεκτρικής τροφοδότησης μιας οικίας, η οποία είναι απομακρυσμένη από το δίκτυο της ΔΕΗ. Η συγκεκριμένη κατοικία έχει εμβαδόν 120 τ.μ., στεγάζει μια μέση ελληνική οικογένεια και βρίσκεται στο νομό Τρικάλων και συγκεκριμένα λίγο έξω από την πόλη των Τρικάλων.

Η οικογένεια αποφάσισε να εγκαταστήσει φωτοβολταϊκά για την τροφοδότηση της κατοικίας με ηλεκτρικό ρεύμα. Δεδομένης της κατάστασης, όλα τα μέλη της οικογένειας συμφώνησαν να περιορίσουν στο μέγιστο δυνατό βαθμό τις ανάγκες τους σε ηλεκτρικό ρεύμα, τουλάχιστον κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών όπου η ηλιοφάνεια στην περιοχή είναι περιορισμένη έως και ανύπαρκτη.

Μαζί με τα φωτοβολταϊκά και τους συσσωρευτές που θα τροφοδοτήσουν την οικία θα χρησιμοποιηθεί και ως εναλλακτική πηγή ενέργειας μία ανεμογεννήτρια. Η ανεμογεννήτρια θα χρησιμοποιείται προκειμένου να καλυφθούν φορτία αιχμής όταν τα φωτοβολταϊκά και οι συσσωρευτές δεν επαρκούν. Η ανεμογεννήτρια θα αναλάβει επίσης τη φόρτιση των συσσωρευτών όταν αυτό δε θα γίνεται από τα φωτοβολταϊκά.

Το πρόβλημα λοιπόν που πρόκειται να μελετήσουμε είναι η τροφοδότηση οικίας 120 τ.μ. με υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα.

## 7.2 Ηλεκτρική Ενέργεια Κατανάλωσης Κατοικίας

Ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ενέργειας κατανάλωσης κατοικίας γίνεται με τα παρακάτω βήματα:

- Βήμα 1: Καταγραφή όλων των ηλεκτρικών συσκευών, της ισχύς τους και του πιθανού χρόνου λειτουργίας τους σε ένα εικοσιτετράωρο.
- Βήμα 2: Υπολογισμός ημερήσιας ενέργειας κατανάλωσης.

Πολλαπλασιάζοντας την ηλεκτρική ισχύ επί το χρόνο λειτουργίας κάθε συσκευής, έχουμε την ηλεκτρική της κατανάλωση ( $E_K = P_K * T$ ). Από το άθροισμα των καταναλώσεων προκύπτει η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης της εγκατάστασης  $E_K$ .

- Βήμα 3: Εκτίμηση της μέγιστης ισχύς στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή καταγράφεται η πιθανότητα της ταυτόχρονης λειτουργίας περισσότερων συσκευών και υπολογίζεται η μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς.

Το αυτόνομο υβριδικό σύστημα που θα χρησιμοποιήσουμε όπως είδαμε έχει σαν στόχο την κάλυψη των αναγκών μίας κατοικίας 120 τ.μ. Επειδή είναι λογικό οι απαιτήσεις να είναι πολύ υψηλές σε ένα τόσο μεγάλο οίκημα, θα ακολουθήσουμε κάποιους βασικούς κανόνες, ώστε να είναι το σύστημα οικονομικότερο:

- 1) Είναι αντιοικονομικό να επιδιώκεται η χρήση υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος για τροφοδότηση ηλεκτρικών συσκευών με μεγάλη θερμική κατανάλωση (ηλεκτρικές κουζίνες, ηλεκτρικά καλοριφέρ, ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες). Οι ανάγκες αυτές πρέπει να καλύπτονται από εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως υγραέριο, πετρέλαιο, ήλιος κλπ. Στο συγκεκριμένο οίκημα χρησιμοποιήσαμε καυστήρα πετρελαίου για θέρμανση, ηλιακό θερμοσίφωνα και boiler για τη θέρμανση νερού το χειμώνα και φούρνο υγραερίου.
- 2) Χρησιμοποιήσαμε ανεμογεννήτρια για την αντιμετώπιση αιχμών ζήτησης με αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μεγάλο βάρος και κόστος.

- 3) Χρησιμοποιούμε συσκευές υψηλής ενεργειακής απόδοσης, δηλαδή χαμηλότερης ενεργειακής κατανάλωσης (για παράδειγμα χρησιμοποιήσαμε ανεμιστήρες οροφής αντί για κλιματιστικά (A/C)).

Για να επιλέξουμε τους χαρακτηριστικούς μήνες του χρόνου που μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε ώστε το σύστημά μας να είναι επαρκές, χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα PV GIS [[re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/)]. Μετά από διαδοχικές δοκιμές στο πρόγραμμα καταλήξαμε στην επιλογή της κλίσης των 30° για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, διότι τους χειμερινούς μήνες (κατά τους οποίους έχουμε την ελάχιστη παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια), η κλίση αυτή δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Επιλέξαμε Νότιο προσανατολισμό (αζιμούθια γωνία 0 ), επειδή η Ελλάδα βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ηλιακή ακτινοβολία σε αυτές τις συνθήκες (Wh /m<sup>2</sup>/day) και η μέση θερμοκρασία της περιοχής καθ' όλο το εικοσιτετράωρο ( °C).

Month	$H_h$	$H_{opt}$	$H(90)$	$I_{opt}$	$T_D$	$T_{24h}$	$N_{DD}$
Jan	1980	3170	3200	62	8.8	6.9	356
Feb	2630	3680	3260	53	10.0	8.2	281
Mar	4300	5300	3880	42	13.0	11.0	224
Apr	5400	5860	3290	27	17.6	15.4	68
May	6560	6460	2750	15	22.9	20.6	1
Jun	7530	7050	2470	7	27.3	25.3	0
Jul	7760	7430	2660	11	30.8	28.7	0
Aug	7000	7370	3510	22	30.9	28.7	0
Sep	5020	6010	4000	37	26.0	23.8	8
Oct	3390	4590	3830	50	19.3	17.4	105
Nov	2160	3330	3240	60	15.2	13.2	242
Dec	1620	2650	2750	63	10.0	8.1	345
<b>Year</b>	4620	5250	3240	32	19.3	17.3	1630

$H_h$ : Irradiation on horizontal plane (Wh/m<sup>2</sup>/day)

$H_{opt}$ : Irradiation on optimally inclined plane (Wh/m<sup>2</sup>/day)

$H(90)$ : Irradiation on plane at angle: 90deg. (Wh/m<sup>2</sup>/day)

$I_{opt}$ : Optimal inclination (deg.)

$T_D$ : Average daytime temperature (°C)

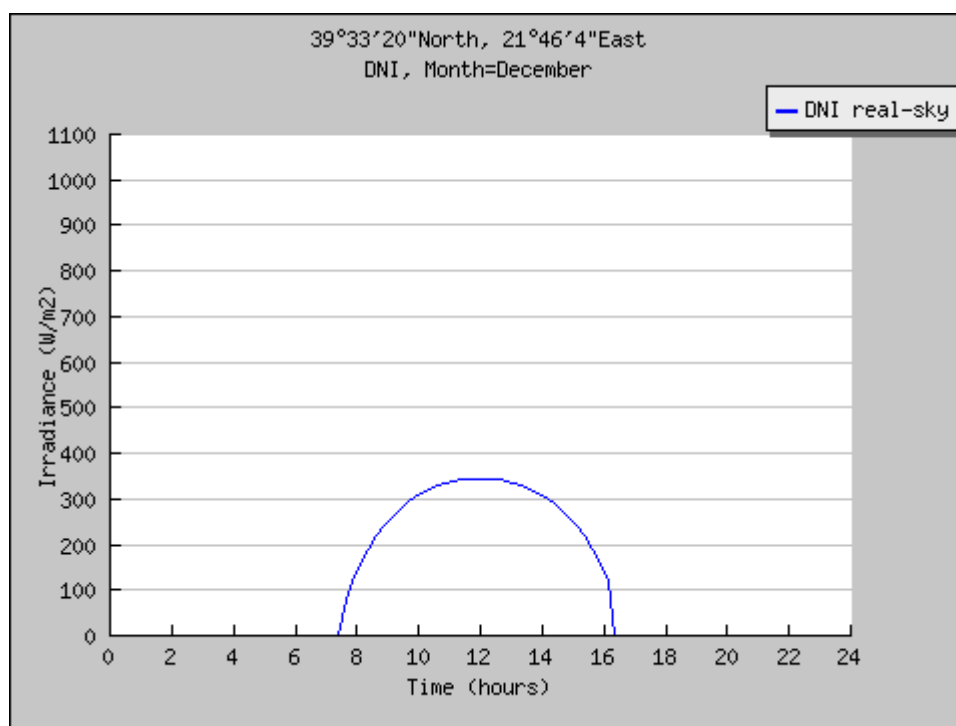
$T_{24h}$ : 24 hour average of temperature (°C)

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

### 7.3 Καταμερισμός της ισχύος ζήτησης

Είναι απολύτως λογικό η ισχύς ζήτησης μίας αυτόνομης κατοικίας να διαφέρει κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, αλλά και ανάμεσα σε μία τυπική καλοκαιρινή και χειμερινή ημέρα. Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια προσπάθεια να υπολογίσουμε τη κατανομή της ισχύος ζήτησης στο διάστημα μιας καλοκαιρινής και μιας χειμερινής ημέρας, με τελικό σκοπό να εντοπίσουμε πότε εμφανίζεται η αιχμή της ισχύος ζήτησης.

Αρχικά, μελετήσαμε μια χειμερινή ημέρα. Με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος PVGIS δημιουργήσαμε (με τη βοήθεια του Excel) την καμπύλη μέγιστης παραγόμενης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για μια τυχαία ημέρα του Δεκεμβρίου.

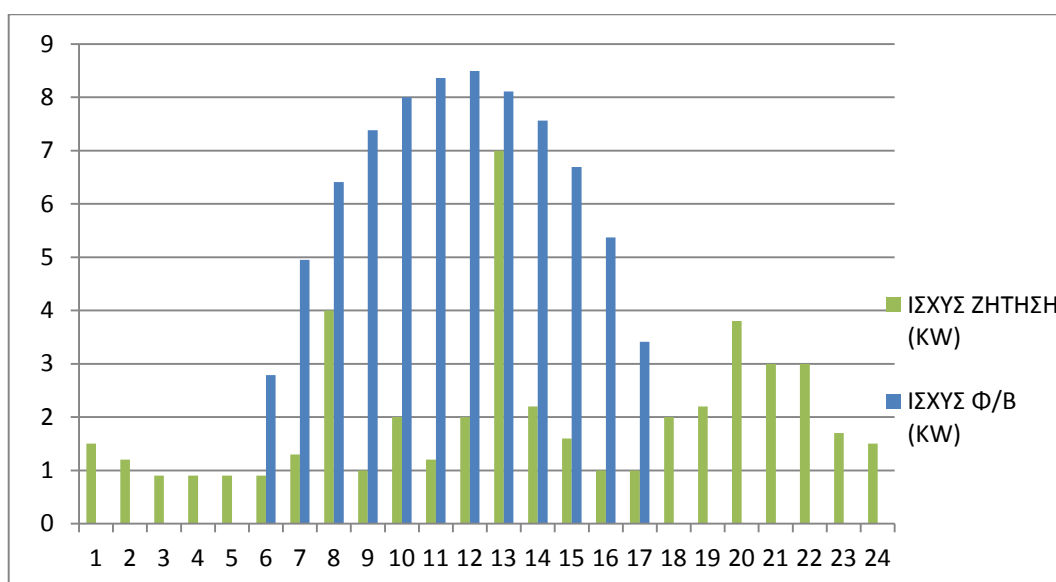


Ύστερα, ορίσαμε με βάση τη δικιά μας αξιολόγηση τις καταναλώσεις της οικίας για κάθε ώρα του εικοσιτετραώρου. Για παράδειγμα, τις νυχτερινές ώρες που η οικογένεια κοιμάται, η μόνη κατανάλωση προέρχεται από τη λειτουργία του ψυγείου,

ενώ το μεσημέρι και το απόγευμα που ενδεχομένως όλα τα μέλη της οικογένειας βρίσκονται στο σπίτι έχουμε αυξημένη ισχύ ζήτησης. Συνολικά, η εκτιμώμενη κατανάλωση κάθε ώρα της ημέρας φαίνεται στον Πίνακα 7.2.

Έτσι, προκύπτει ένα συγκριτικό ιστόγραμμα (Σχήμα 7.1), που παρουσιάζει την κατανάλωση κάθε ώρα της ημέρα, καθώς και την παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύ.

Με τη γαλάζια ράβδο παρουσιάζεται η ισχύς ζήτησης για κάθε ώρα, ενώ με την κόκκινη παρουσιάζεται η παραγόμενη από τα πλαίσια ισχύς κάθε ώρα. Τις νυκτερινές ώρες η ζήτηση καλύπτεται πλήρως από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές και από την ανεμογεννήτρια.



Σχήμα 7.1. Συγκριτικό ιστόγραμμα παραγόμενης ισχύος πλαισίων και καταναλισκομένης ισχύος από οικιακές συσκευές για κάθε ώρα ημέρας Δεκεμβρίου.

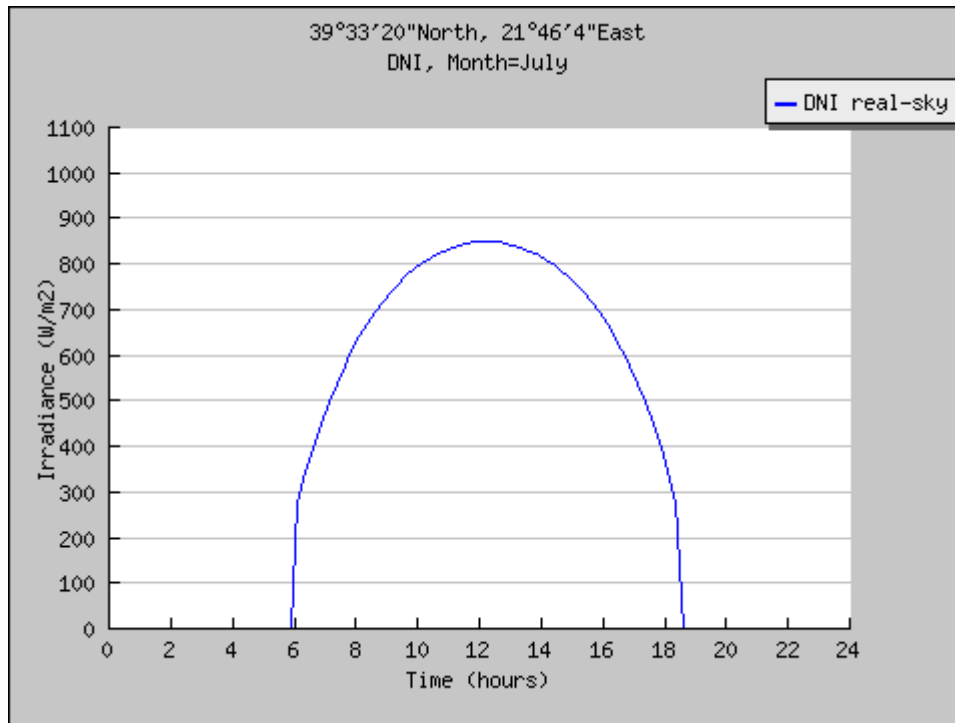
<b>ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ</b>	<b>ΙΣΧΥΣ – ΖΗΤΗΣΗΣ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ (KW)</b>	<b>ΙΣΧΥΣ – ΖΗΤΗΣΗΣ ΙΟΥΛΙΟΥ (KW)</b>
---------------------------	--	---

1	0,4	1,5
2	0,4	1,2
3	0,4	0,9
4	0,4	0,9
5	0,4	0,9
6	0,4	0,9
7	0,65	1,3
8	2,3	4
9	1,4	1
10	2	2
11	1,3	1,2
12	2,2	2
13	6	7
14	3	2,2
15	1	1,6
16	0,9	1
17	0,7	1
18	1,2	2
19	2,8	2,2
20	4	3,8
21	3	3
22	3,2	3
23	1,4	1,7
24	1	1,5

Πίνακα 7.2. Ισχύς ζήτησης για κάθε ώρα της ημέρας, για μια τυχαία μέρα του Δεκεμβρίου και μία του Ιουλίου.

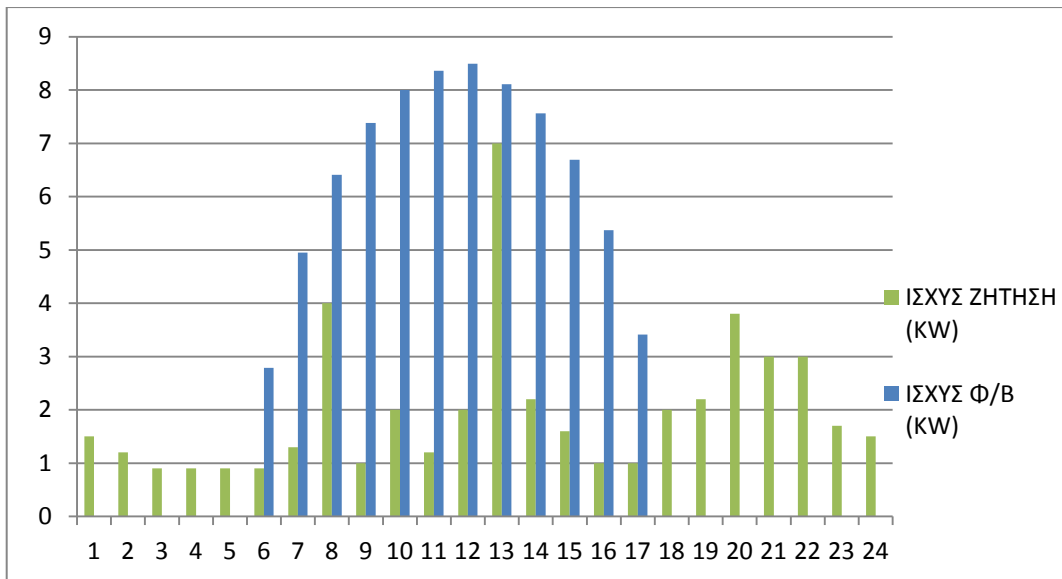


Μετέπειτα, μελετήσαμε μια καλοκαιρινή ημέρα. Με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος PVGIS δημιουργήσαμε την καμπύλη μέγιστης παραγόμενης ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για μια τυχαία ημέρα του Ιουλίου.



Ορίσαμε με βάση τη δικιά μας αξιολόγηση τις καταναλώσεις της οικίας για κάθε ώρα του εικοσιτετραώρου. Για παράδειγμα, τις νυχτερινές ώρες που η οικογένεια κοιμάται, η κατανάλωση προέρχεται από τη λειτουργία του ψυγείου και κάποιων ανεμιστήρων οροφής, ενώ το μεσημέρι και το απόγευμα που ενδεχομένως όλα τα μέλη της οικογένειας βρίσκονται στο σπίτι έχουμε αυξημένη ισχύ ζήτησης. Συνολικά, η εκτιμώμενη κατανάλωση κάθε ώρα της ημέρας φαίνεται στον Πίνακα 7.2.

Έτσι, προκύπτει ένα συγκριτικό ιστόγραμμα (Σχήμα 7.3), που παρουσιάζει την κατανάλωση κάθε ώρα της ημέρας, καθώς και την παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύ



Σχήμα 7.3. Συγκριτικό ιστόγραμμα παραγόμενης ισχύος πλαισίων και καταναλισκομένης ισχύος από οικιακές συσκευές για κάθε ώρα ημέρας Ιουλίου.

Από το σχήμα 7.3 παρατηρούμε ότι η παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ισχύς είναι σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας πολύ μεγάλη σε σχέση με την ισχύ κατανάλωσης.

Στους παρακάτω Πίνακες γίνεται μια καταγραφή των ηλεκτρικών συσκευών, της ισχύς τους και του πιθανού χρόνου λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου, για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιούλιο. Τέλος υπολογίζεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των συσκευών που λειτουργούν, η εκτιμώμενη ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση κάθε συσκευής καθώς και της όλης οικίας

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ	ΙΣΧΥΣ (kW)	ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)
Καυστήρας Πετρελαίου	0,25	5	1,25
Πλυντήριο Πιάτων	1	0,8	0,8
Πλυντήριο Ρούχων	2	0,8	1,6
Απορροφητήρας Κουζίνας	0,25	0,5	0,125
6 χ Ανεμιστήρας Οροφής	0	0	0

DVD player	0,03	2	0,06
Ραδιόφωνο	0,08	1	0,08
Σίδερο Σιδερώματος	1	0,6	0,6
Ηλεκτρική Σκούπα	0,8	0,6	0,48
Στεγνωτήρας Μαλλιών	0,4	0,3	0,12
Στερεοφωνικό Συγκρότημα	0,15	1,5	0,225
2 χ Τηλεόραση	0,2	6	1,2
Υπολογιστής	0,1	1,5	0,15
Εκτυπωτής	0,05	0,1	0,005
Φούρνος Μικροκυμάτων	1,5	0,15	0,225
Τοστιέρα	1	0,3	0,3
Αναμκτήρας Τροφών	0,2	0,15	0,03
Ψυγείο με Αυτόματη Απόψυξη	0,4	24	9,6
Καφετιέρα	0,7	0,3	0,21
Εσωτερικός Φωτισμός 1	0,3	6	1,8
Εσωτερικός Φωτισμός 2	0,2	3	0,6
Εξωτερικός Φωτισμός	0,3	1	0,3
Φορτιστής Κινητού	0,012	1	0,012
<b>Σύνολο</b>	<b>10,922</b>		<b>19,772</b>

Πίνακας 7.4. Για το μήνα Δεκέμβριο, χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές συσκευές, ισχύς και χρόνος λειτουργίας τους, ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωσή τους, συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους και ολική κατανάλωση οικίας.

Το Δεκέμβριο δε χρησιμοποιούνται οι 6 ανεμιστήρες οροφής, συνολικής ισχύος 0,5 kW. Όμως χρησιμοποιείται καυστήρας πετρελαίου ισχύος 0,25 kW και επιπλέον ο φωτισμός εκτιμάται ότι λειτουργεί για περισσότερες ώρες. Αντίθετα, τον Ιούλιο, χρησιμοποιούνται οι 6 ανεμιστήρες ισχύος 0,5 kW, αλλά δε χρησιμοποιείται ο καυστήρας πετρελαίου, ενώ ο φωτισμός λειτουργεί λιγότερες ώρες.

<b>ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΣΚΕΥΗ</b>	<b>ΙΣΧΥΣ (kW)</b>	<b>ΩΡΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ</b>	<b>ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)</b>
Καυστήρας Πετρελαίου	0	0	0
Πλυντήριο Πιάτων	1	0,8	0,8
Πλυντήριο Ρούχων	2	0,8	1,6
Απορροφητήρας Κουζίνας	0,25	0,5	0,125
6 χ Ανεμιστήρας Οροφής	0,5	18	9
DVD player	0,03	2	0,06
Ραδιόφωνο	0,08	1	0,08
Σίδερο Σιδερώματος	1	0,6	0,6
Ηλεκτρική Σκούπα	0,8	0,6	0,48
Στεγνωτήρας Μαλλιών	0,4	0,3	0,12
Στερεοφωνικό Συγκρότημα	0,15	1,5	0,225
2 χ Τηλεόραση	0,2	6	1,2
Υπολογιστής	0,1	1,5	0,15
Εκτυπωτής	0,05	0,1	0,005
Φούρνος Μικροκυμάτων	1,5	0,15	0,225
Τοστιέρα	1	0,3	0,3
Αναμικτήρας Τροφών	0,2	0,15	0,03
Ψυγείο με Αυτόματη Απόψυξη	0,4	24	9,6
Καφετιέρα	0,7	0,3	0,21
Εσωτερικός Φωτισμός 1	0,3	3	0,9
Εσωτερικός Φωτισμός 2	0,2	2	0,4
Εξωτερικός Φωτισμός	0,3	2	0,6

Φορτιστής Κινητού	0,012	1	0,012
<b>Σύνολο</b>	<b>11,172</b>		<b>26,722</b>

Πίνακας 7.5. Για το μήνα Ιούλιο, χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές συσκευές, ισχύς και χρόνος λειτουργίας τους, ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωσή τους, συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους και ολική κατανάλωση οικίας.

Διαπιστώνουμε ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι λίγο μεγαλύτερη το Καλοκαίρι, λόγω της υψηλής κατανάλωσης των ανεμιστήρων. Παρ' όλα αυτά, η διαφορά είναι τόσο μικρή (περίπου 0,25 kW) ώστε να μην επηρεάζει τις αιχμές ζήτησης. Αυτό πετυχαίνεται με την αποφυγή χρήσης κλιματιστικών συσκευών.

Η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια από τις συσκευές τους χειμερινούς μήνες είναι 19,772 kWh, ενώ τους καλοκαιρινούς 26,722 kWh. Η διαφορά αυτή δεν είναι αμελητέα και οφείλεται στις ανάγκες ψύξης του κτιρίου για αρκετές ώρες. Κοιτώντας τον Πίνακα 7.1 κατανοούμε ότι η απόκλιση καλύπτεται πλήρως από τη μεγάλη ηλιακή ακτινοβολία (καλύτερη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος). Συνεπώς η μελέτη της λειτουργίας της υβριδικής εγκατάστασης αποφασίσαμε να γίνει για το μήνα Δεκέμβριο (που επικρατούν οι χειρότερες συνθήκες).

### **7.3 Υπολογισμός Υβριδικού Φωτοβολταϊκού Συστήματος**

Στην προηγούμενη ενότητα (7.2) επιλέξαμε με τη χρήση του προγράμματος PVGIS κλίση 30° για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και Νότιο προσανατολισμό. Επιπλέον, δείξαμε ότι η μικρότερη μέση ημερήσια ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας για την περιοχή των Τρικάλων σ' αυτή την κλίση είναι:

$$E_{HA} = 2,65 \text{ kWh/m}^2/\text{day} \text{ (για το μήνα Δεκέμβριο)}$$

Η ισχύς αιχμής  $P_{p\Sigma}$  της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μίας ημέρας αυτονομίας είναι:

$$P_{p\Sigma} = \frac{E_k * P_{STC} * N}{E_{HA} * \sigma_{ΑΣΧ} * (N - n)} \quad (\text{σχ 7.1})$$

όπου,

$P_{STC} = 1 \text{ kW/m}^2$ , ισχύς προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις πρότυπες συνθήκες STC.

$E_k = 19,772 \text{ kWh}$ , η ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια κατανάλωσης το Χειμώνα.

$E_{HA} = 2,6 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$  (για το μήνα Δεκέμβριο), ημερήσια ενέργεια προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

$\sigma_{AS} = 0,8 * \sigma_{\theta}$  συντελεστής απωλειών συστοιχίας για πλαίσια ελαφρώς σκονισμένα.

Συντελεστής θερμοκρασίας:  $\sigma_{\theta} = 1 - [(t_a + 30) - 25] * 0,004 = 10,3 \text{ C}$ ,

$t_a = 10^{\circ} \text{ C}$ , μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα το Δεκέμβριο (Πίνακας 7.1).

$\sigma_{\mu} = 0,9$ , συντελεστής μεταφοράς απωλειών ενέργειας της εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει ηλεκτρικό συσσωρευτή, ελεγκτή φόρτισης και inverter.

$N = 31$  ημέρες (χρονική περίοδος αναφοράς).

$n = 1$  ημέρα (αριθμός ημερών αυτονομίας).

Μετά τους απαραίτητους υπολογισμούς, προκύπτει από τη σχέση (7.1):

$$P_p = 14,944 \text{ kW}_p$$

Άρα, η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων πρέπει να είναι κοντά σε αυτή την τιμή για την κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών για τους χειμερινούς μήνες.

Για τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούλιος από Πίνακα 7.1) ισχύει:

$\sigma\theta = 0,88$  (αφού  $t_a = 30,8$  C).

$E_k = 26,788$  kWh.

$E_{HA} = 7,43$  kWh/ m<sup>2</sup>/day.

Άρα, η απαιτούμενη ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για το Καλοκαίρι είναι:

$$P_p = 8,25 \text{ kW}_p$$

Συνεπώς, αρκεί η κάλυψη των αναγκών μας το μήνα Δεκέμβριο για να καλύψουμε όλο το έτος.

Στη συνέχεια, για να υπολογίσουμε τον ακριβή τύπο, αριθμό και συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πλαισίων έπρεπε να ορίσουμε τη μέγιστη τάση  $V_m$  της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ισχύει:

$$V_{ms} > 1,2 V_B$$

Όπου  $V_B$  η ονομαστική τάση του ηλεκτρικού συσσωρευτή και με τιμή 48 V

Άρα,

$$V_{ms} > 57,6V$$

Επιλέγουμε τη χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων Γερμανικής προέλευσης Luxor Eco

Line 60 / 225W<sub>p</sub>



ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	LX 225 - P
Ονομαστική Ισχύς (W <sub>p</sub> )	225
Ονομαστικό Ρεύμα ( <i>mpp</i> I )	7,62
Ονομαστική Τάση ( <i>mpp</i> V )	29,6
Ρεύμα Βραχυκυκλώσεως (A)	8,14
Τάση Ανοικτοκυκλώσεως (V)	37
Βαθμός Απόδοσης (STC)	13,83 %

Ο αριθμός των πλαισίων που απαιτούνται είναι:

$$N = \frac{P_{p\Sigma}}{P_{p\Pi}}$$

Όπου  $P_{p\Pi} = 225 \text{ W}$  και  $P_{p\Sigma} = 14,9 \text{ kW}_p$ .

Άρα  $N = 66$  περίπου φωτοβολταϊκά πλαίσια

Για να καλύπτουμε τον περιορισμό της τάσης που θέσαμε νωρίτερα, επιλέξαμε τη δημιουργία 22 παράλληλων κλάδων , ο καθένας εκ των οποίων θα έχει 3 πλαίσια συνδεδεμένα εν σειρά. Με τη χρήση 66 πλαισίων 225 W<sub>p</sub> το καθένα, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι τελικά 14,85 kW<sub>p</sub>.



Με τη χρήση του προγράμματος PVGIS, προκύπτει ο παρακάτω Πίνακας στον οποίον φαίνεται η μέση ημερήσια ενεργειακή απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (σε κλίση 30°).

<b>Fixed system: inclination=30°, orientation=0°</b>				
<b>Month</b>	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	25.10	777	3.11	96.5
Feb	28.80	806	3.64	102
Mar	40.50	1260	5.27	163
Apr	44.20	1320	5.87	176
May	47.60	1480	6.51	202
Jun	51.10	1530	7.13	214
Jul	53.10	1640	7.51	233
Aug	52.30	1620	7.40	230
Sep	43.50	1310	5.99	180
Oct	34.40	1070	4.55	141
Nov	25.50	766	3.28	98.3
Dec	20.90	648	2.60	80.7
<b>Yearly average</b>	<b>39.0</b>	<b>1190</b>	<b>5.25</b>	<b>160</b>
<b>Total for year</b>		<b>14200</b>		<b>1920</b>

$E_d$ : Average daily electricity production from the given system (kWh)

$E_m$ : Average monthly electricity production from the given system (kWh)

$H_d$ : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>)

$H_m$ : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m<sup>2</sup>)

Από τον Πίνακα 7.5, φαίνεται ότι η εγκατάσταση καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές μας ανάγκες, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, άρα το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (που θα επιλεγεί στη συνέχεια) θα έχει στόχο να καλύψει τις αιχμές ζήτησης μέσα στη μέρα και τις ημέρες αυτονομίας.

Κατόπιν, υπολογίζεται η χωρητικότητα  $C$  του ηλεκτρικού συσσωρευτή. Ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$C = \frac{n \cdot E_k}{\sigma_{γB} \cdot \sigma_{εκ} \cdot \beta_{εκ} \cdot V_B} \quad (\sigma\chi \ 7.2)$$

Όπου  $E = 19,772 \text{ kWh/ day}$ , η ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση οικίας (για τους χειμερινούς μήνες).

$\sigma_{\gamma B} = 0,8$ , συντελεστής γήρανσης συσσωρευτή.

$\sigma_{εκ} = 0,91$ , συντελεστής μεταφοράς ενέργειας στο κύκλωμα εκφόρτισης. =  
 $\beta_{εκ} = 0,4$ , βάθος εκφόρτισης συσσωρευτών για 1-3 ημέρες αυτονομίας

$V_B$  &  $n$  γνωστά.

Από τη σχέση (7.2), υπολογίζουμε τη χωρητικότητα  $C = 353,5 \text{ Ah}$ .

Θα χρησιμοποιηθούν για ακόμα μεγαλύτερη ασφάλεια μπαταρίες PVX – 2120L της εταιρείας SUN – XTENDER με τάση 12 V και χωρητικότητα 253 Ah.

Η συστοιχία των συσσωρευτών θα περιλαμβάνει 2 παράλληλους κλάδους με 4 συσσωρευτές σε σειρά ανά κλάδο, δηλαδή συνολικά απαιτούνται 8 συσσωρευτές. Η σύνδεση σε σειρά καθορίζει την ονομαστική τάση ( $V_B = 4 \times 12 = 48 \text{ V}$ ) και η παράλληλη σύνδεση καθορίζει την ονομαστική χωρητικότητα ( $C = 2 \times 253 = 506 \text{ Ah}$ ).

Το επόμενο βήμα μας είναι η επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή φόρτισης. Η τάση του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τάση του συσσωρευτή, δηλαδή 48 V.

Το μέγιστο ρεύμα εισόδου του ελεγκτή είναι  $1,5 I_m$ , όπου  $I_m$  είναι η μέγιστη ένταση ρεύματος φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Ισχύει  $I_{m\Sigma} = I_{m\Pi} * N_{\Pi} = 167,68 \text{ A}$

Όπου  $I_m = 7,62 \text{ A}$ , μέγιστη ένταση ρεύματος φωτοβολταϊκού πλαισίου.

$N = 22$ , ο αριθμός των παράλληλων κλάδων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Άρα, το μέγιστο ρεύμα εισόδου του ρυθμιστή φόρτισης είναι  $1,5 I_m = 251,46 \text{ A}$ .

Το ρεύμα εξόδου του ελεγκτή φόρτισης πρέπει να μπορεί να δώσει το μέγιστο ρεύμα στα φορτία κατανάλωσης που λειτουργούν ταυτόχρονα.

Θεωρούμε ότι η μέγιστη απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για την ταυτόχρονη λειτουργία συσκευών είναι  $P = 8 \text{ kW}$ . Η τάση κατανάλωσης είναι  $V = 230 \text{ V}$ . Άρα το ρεύμα εξόδου θα είναι  $P / V = 34,7 \text{ A}$  περίπου.

Συνεπώς, θα πρέπει να επιλέξουμε ελεγκτή φόρτισης 48V / 252 A / 35A.

Στη συνέχεια, προχωρούμε στην επιλογή του κατάλληλου μετατροπέα τάσεως DC/AC (inverter). Ο μετατροπέας αυτός θα πρέπει να καλύπτει τις παρακάτω απαιτήσεις:

Τάση εισόδου ίση με την ονομαστική τάση των συσσωρευτών (δηλαδή 48 V).

Η ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ  $P$  των φορτίων που λειτουργούν ταυτόχρονα (δηλαδή 8 kW, όπως θεωρήσαμε νωρίτερα).

Η ισχύς αιχμής του μετατροπέα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ κατανάλωσης (περίπου 12 kW, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.5).

Η τάση εξόδου του μετατροπέα πρέπει να είναι ίση με την τάση των φορτίων κατανάλωσης, δηλαδή 230 V.

Επειδή τα φορτία της οικίας είναι πολυάριθμα, επιλέξαμε σ' αυτό το σημείο να χρησιμοποιήσουμε 2 τριφασικούς μετατροπείς στους οποίους θα ισομοιράζονται τα συνολικά φορτία και που καθένας από αυτούς θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ισχύ εξόδου 4 kW και ισχύ αιχμής 6 kW

Έτσι, επιλέγουμε 2 μετατροπείς Sunny Island 5048 της εταιρείας SMA. Οι μετατροπείς αυτοί προσφέρουν ολοκληρωμένη διαχείριση του αυτόνομου συστήματος, υψηλό βαθμό απόδοσης, έξυπνη διαχείριση του συσσωρευτή για μέγιστη διάρκεια ζωής, καθώς και υπολογισμό φόρτισης του συσσωρευτή.

Τέλος, απομένει να επιλέξουμε την ανεμογεννήτρια. Στο σημείο αυτό οφείλουμε να υπενθυμίσουμε, ότι στην περίπτωση ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος, σχεδιάζουμε το σύστημα με λίγες μέρες αυτονομίας (εμείς επιλέξαμε μία). Χρόνος φόρτισης  $t$  του συσσωρευτή από την ανεμογεννήτρια καθορίζεται από τον παρακάτω

$$t_{\phi} = \frac{\beta_{εκ} * C}{n_q * I_{\phi}} h \quad (\sigma\chi \ 7.3)$$

όπου,

$\beta_{εκ} = 0,4$ , το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή για 1-3 ημέρες αυτονομίας.

$C = 506 \text{ Ah}$ , η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή.

$n_q$ , ο βαθμός απόδοσης φορτίου, δηλαδή ο λόγος του φορτίου κατά την εκφόρτιση προς το φορτίο κατά τη φόρτιση (τυπική τιμή 0,9).

$I_{\phi}$ , το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή (επιλέγεται συνήθως  $< C / 10$ ). Εμείς επιλέξαμε  $I C / 12$ .

Έτσι, από τη σχέση (7.3) προκύπτει  $t = 5,33 \text{ h}$ . Άρα η ανεμογεννήτρια θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί για τουλάχιστον 6 h ημερησίως.

Η ηλεκτρική ισχύς  $P$  της ανεμογεννήτριας για τη φόρτιση του συσσωρευτή δίνεται

από τη σχέση:  $P_{\phi} = I_{\phi} * V_{AN}$  (σχ 7.4)

Όπου  $V_{AN} = 1,25 V_B$ , η τάση εξόδου της ανεμογεννήτριας προς τον συσσωρευτή και  $V_B$  η τάση του συσσωρευτή (48 V).

Άρα, από τη σχέση (7.4), η ηλεκτρική ισχύς της ανεμογεννήτριας προκύπτει  $P = 3,8 \text{ kW}$ .

Η συνολική απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς  $P_{AN}$  δίνεται από τη σχέση:

$$P_{AN} \geq P_K + P_{\phi} \quad (\sigma\chi \ 7.5)$$

Όπου  $P_K = 11,172 \text{ kW}$ , η συνολική ηλεκτρική ισχύς κατανάλωσης,  $P_{\phi} = 3,8 \text{ kW}$ , η ηλεκτρική ισχύς για τη φόρτιση του συσσωρευτή.

Άρα, από τη σχέση (7.5) προκύπτει  $P_{AN} > 14,9 \text{ kW}$ . Δηλαδή χρειαζόμαστε μια γεννήτρια ισχύος τουλάχιστον 15 kW.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της μελέτης τροφοδότησης οικίας 120 τ.μ. με φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριας προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Αρχικά ύστερα από διαδοχικές δοκιμές στο πρόγραμμα PVGIS προέκυψε ότι η βέλτιστη κλίση τοποθέτησης της φ/β συστοιχίας είναι  $30^\circ$ . Η μελέτη της λειτουργίας της υβριδικής εγκατάστασης αποφασίσαμε να γίνει για το μήνα Δεκέμβριο (που επικρατούν οι χειρότερες συνθήκες).

Η συνολική ισχύς των ηλεκτρικών συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν είναι αντίστοιχα **10,922 kW** για το μήνα Δεκέμβριο (χειμώνας) και **11,172 kW** για το μήνα Ιούλιο (καλοκαίρι). Οι αντίστοιχες ολικές καταναλώσεις της οικίας είναι **19,772 kWh** και **26,722 kWh**.

Η ισχύς αιχμής  $P_p$  της φ/β συστοιχίας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων μιας ημέρας αυτονομίας υπολογίστηκε ότι είναι **14,944 kW<sub>p</sub>** για τους χειμερινούς μήνες και **8,25 kW<sub>p</sub>** για τους καλοκαιρινούς.

Ο αριθμός των πλαισίων που βρέθηκε ότι θα χρησιμοποιηθεί είναι περίπου **66**, των **225 W<sub>p</sub>** το καθένα. Άρα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς θα είναι τελικά **14,85 kW<sub>p</sub>**. Με βάση αυτή την τιμή και κάνοντας χρήση του προγράμματος PVGIS προέκυψε ο πίνακας που δίνει την ημερήσια ενεργειακή απόδοση της φ/β συστοιχίας ( $30^\circ$ ).

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η χωρητικότητα των συσσωρευτών όπου και βρέθηκε **353 Ah**. Με χρήση συσσωρευτών χωρητικότητας **253 Ah** βρέθηκε ότι τελικά η εγκατάσταση θα περιλαμβάνει 2 παράλληλους κλάδους με 4 συσσωρευτές σε σειρά ο καθένας, δηλαδή συνολικά **8** συσσωρευτές.

Στη συνέχεια επιλέχτηκε ο κατάλληλος ελεγκτής φόρτισης με χαρακτηριστικά **48 V/ 252 A/ 35 A**.

Με δεδομένο το γεγονός ότι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς  $P$  των φορτίων που λειτουργούν ταυτόχρονα υποτέθηκε ότι είναι **8 kW**, ενώ η συνολική εγκατεστημένη

ισχύς περίπου **12 kW**, χρησιμοποιήθηκαν **2** τριφασικοί μετατροπείς με ισχύ εξόδου **4 kW** και ισχύ αιχμής **6 kW** ο καθένας.

Όσον αφορά την ανεμογεννήτρια, ο χρόνος φόρτισης  $t$  του συσσωρευτή από την ανεμογεννήτρια βρέθηκε ότι είναι **5,33 h**, ενώ η ηλεκτρική ισχύς  $P$  της ανεμογεννήτριας που απαιτείται για τη φόρτιση του συσσωρευτή **3,8 kW**. Η συνολική απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς της ανεμογεννήτριας  $P_{AN}$  υπολογίστηκε ότι πρέπει να είναι **> 14,9 kW**. Γι' αυτό τελικά έγινε χρήση ανεμογεννήτριας **18 kW** και χρόνου φόρτισης **6 h**.

Η μελέτη τελειώνει με τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη διακύμανση της μέγιστης παραγόμενης ισχύς της φ/β συστοιχίας για μια τυχαία ημέρα του Δεκεμβρίου και του Ιουλίου αντίστοιχα, για κάθε ώρα της ημέρας και με τα συγκριτικά ιστογράμματα παραγόμενης ισχύς πλαισίων και καταναλισκόμενης ισχύς από οικιακές συσκευές, για κάθε ώρα ημέρας Δεκεμβρίου και Ιουλίου αντίστοιχα.

Η μελέτη λοιπόν ενός τέτοιου συστήματος δεν είναι ιδιαίτερα απλή. Ο μηχανικός πρέπει να λάβει υπόψη του ένα πλήθος παραγόντων πριν προχωρήσει στην επιλογή των μονάδων και το μέγεθος της εγκατάστασης. Βασικό κριτήριο στις επιλογές του αποτελεί η επιθυμητή αξιοπιστία του υπό μελέτη συστήματος που όμως αντικρούεται με το αυξημένο κόστος των απαραίτητων μονάδων για την συγκρότηση του.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Καραγκούνης Κ.(1992). *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*. Εκδόσεις Συμμετρία.
- [2] Καρδέλης Κ.(1999). *Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας*. Εκδόσεις Αθανάσιος Σταμούλης.
- [3] Ζέρβος Α.(2005). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. Πολυτεχνικές Εκδόσεις.
- [4] Φραγκιαδικής Ι. (2007). *Φωτοβολταϊκά Συστήματα*. Εκδόσεις Ζήτη.
- [5] Ζαχαρίας Θωμάς (2006). *Ήπιες Μορφές Ενέργειας Ι*. Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [6] Ζαχαρίας Θωμάς (2006). *Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙ*. Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [7] Περράκη Βασιλική (2008). *Φυσική των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων*. Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [8] Περράκη Βασιλική (2008). *Νέες Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών*. Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [9] Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών. *Ένας Πρακτικός Οδηγός για τα Φωτοβολταϊκά*.
- [10] Νεοκλέους, Κωνσταντινίδη (1991). *Μετατροπή της Ηλιακής Ενέργειας σε Ηλεκτρική με Φωτοβολταϊκά Συστήματα*. Εκδόσεις Ιων.
- [11] Περδιός Σ. (2011). *Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις*. Τεχνική Εκδοτική.
- [12] Ζαχαρίου Α. (2010). *Επενδύσεις Φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα*. ΤΕΕ.
- [13] Acherman Th.(2005). *Wind Power in Power System*. John Wiley & Sons Ltd.
- [14] Geotzberger A., Hoffmann V. (2005). *Photovoltaic Solar Energy Generation*. Springer Berlin Heidelberg.
- [15] Manwell J.F.(2002). *Wind Energy Explained: theory desing and application*. Rogers Wiley.
- [16] Peter Wurfel.(2005). *Physics of Solar Cells*. John Wiley & Sons Ltd
- [17] Jamas P. Dunlop. (1997). *Batteries and Charge Control in Stand Alone Photovoltaic System*. Florida Energy Center.
- [18] <http://www.solar-systems.gr>
- [19] <http://helapco.gr/>
- [20] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>