

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ**



**ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΜΠΑΚΑΛΑΡΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ 2016**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί τη Διπλωματική Εργασία που εκπονήθηκε στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας, με τίτλο: «Μελέτη και σχεδιασμός αυτόνομου συστήματος αποτελούμενο από φωτοβολταϊκή γεννήτρια και ανεμογεννήτρια».

Αρχικά, έχει γίνει μία θεωρητική αναφορά στα φωτοβολταϊκά συστήματα και στα μέρη που αποτελούνται και στον τρόπο λειτουργίας τους. Αναλύσαμε τον τρόπο λειτουργίας των συσσωρευτών Στην συνέχεια έγινε θεωρητική αναφορά στις ανεμογεννήτριες, στα μέρη που αποτελούνται και στον τρόπο λειτουργίας τους. Ύστερα διαστασιολογήθηκε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα για μία συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάσαμε. Τέλος, έγινε προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος με την βοήθεια του SIMULINK, για τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος κάτω από διάφορα σενάρια.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Νικόλαο Σχοινά, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., για την επίβλεψη, τη βοήθεια και τις χρήσιμες υποδείξεις που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εργασίας μου.

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο φοιτητής  
Μπακαλάρος Κωνσταντίνος

.....



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός ενεργειακά αυτόνομου υβριδικού συστήματος αποτελούμενο από φωτοβολταϊκή γεννήτρια και ανεμογεννήτρια με στόχο να μας καλύψει ένα φορτίο 10 kW για όλο τον χρόνο.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία θεωρητική αναφορά στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, στα φωτοβολταϊκά συστήματα και στα κύρια μέρη που αποτελούνται καθώς και στον τρόπο λειτουργίας τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία θεωρητική αναφορά στους συσσωρευτές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για αυτόνομα συστήματα και περιγράψαμε τον τρόπο λειτουργίας τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα είδη των ανεμογεννητριών καθώς και η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στη λειτουργία τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μία αναλυτική διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος που μελετήθηκε. Διαστασιολογήθηκε αρχικά το φωτοβολταϊκό σύστημα για φορτίο 10 kW το οποίο λειτουργεί 13 ώρες την ημέρα. Στην συνέχεια προσθέσαμε μια ανεμογεννήτρια 10kW και με την βοήθεια του SIMULINK προσομοιώσαμε το σύστημα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση του συστήματος στο SIMULINK. Βλέπουμε σε γραφικές αναπαραστάσεις την συμπεριφορά του συστήματός μας για δύο σενάρια που επιλέξαμε. Στο πρώτο σενάριο θεωρήσαμε μία απότομη αύξηση της ισχύος της ανεμογεννήτριας και στο δεύτερο σενάριο, μία απότομη μείωση του φορτίου μας.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	i
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	iii
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	v
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	1
<b>1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	3
1.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ .....	3
1.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	4
1.2.1 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	5
1.2.2 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	6
1.2.3 Κύρια μέρη φωτοβολταϊκού συστήματος .....	7
1.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ / ΠΑΝΕΛ.....	10
1.3.1 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	10
1.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΤΕΛΟΥΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	13
1.5 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ Φ/Β ΚΥΤΤΑΡΟΥ.....	14
1.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ I-V ΚΑΙ P-V.....	16
1.7 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	18
1.7.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. ....	18
1.8 ΤΡΟΠΟΙ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ .....	22
1.8.1 Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη.....	22
1.8.2. Στήριξη με εποχιακή ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη.....	24
<b>2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</b> .....	27
2.1 ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ (STAND ALONE).....	27
2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ( ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ) .....	28
2.2.1 Γενική περιγραφή .....	28
2.2.2 Φόρτιση – Εκφόρτιση.....	30
2.2.3 Χαρακτηριστικές ανοικτού κυκλώματος.....	31
2.2.4 Αυτό – εκφόρτιση .....	33
2.2.5 Χωρητικότητα συσσωρευτών .....	34

2.2.6 Διάρκεια ζωής συσσωρευτή .....	36
2.2.7 Χαρακτηριστικά μπαταριών για χρήση σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.....	38
<b>3. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....</b>	<b>39</b>
3.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	39
3.1.1 Ταχύτητα ανέμου.....	41
3.1.2 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος .....	41
3.1.3 Επίδραση εμποδίων στη ροή του ανέμου .....	42
3.1.4 Άντωση και αντίσταση .....	43
3.2 ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ .....	44
3.2.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα .....	47
3.2.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα .....	48
3.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	50
3.4 ΘΕΩΡΙΑ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ .....	51
3.5 ΓΩΝΙΑ ΒΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ .....	53
3.5.1 Γωνία βήματος πτερυγίου .....	53
3.5.2 Απώλεια στήριξης .....	54
3.6 ΙΣΧΥΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	55
3.7 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	56
3.7.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών .....	56
3.7.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών .....	57
<b>4. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ.....</b>	<b>63</b>
4.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	63
4.2 ΑΝΩΤΕΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	74
<b>5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>77</b>
<b>6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>85</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>87</b>



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

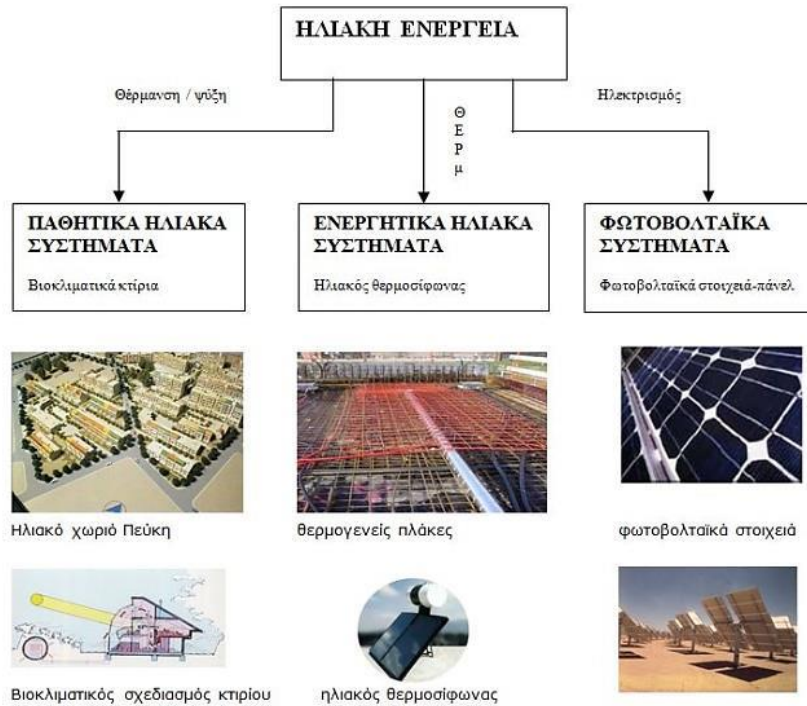
Στις μέρες μας όλο και μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη ταλανίζεται απο το πρόβλημα της «Ενεργειακής Κρίσης», το οποίο επηρεάζεται άμεσα από την Παγκόσμια Οικονομική Ύφεση. Η εξάντληση των διαθέσιμων ενεργειακών ορυκτών καυσίμων μέσα στις επόμενες δεκαετίες είναι σχεδόν βέβαιη, εξαιτίας της αλόγιστης κατανάλωσής τους, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την μόλυνση του περιβάλλοντος, η οποία με τη σειρά της οδηγεί στην διατάραξη της ισορροπίας του οικοσυστήματος.

Το πρόβλημα έχει επισημανθεί εδώ και καιρό από ερευνητές και επιστήμονες ανά τον κόσμο, οι οποίοι έχουν στραφεί στην αναζήτηση άλλων μορφών ενέργειας, διαφορετικών από το Πετρέλαιο, τους Γαιάνθρακες, το Φυσικό Αέριο και την Πυρηνική Ενέργεια. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), όπως είναι η Ηλιακή, η Αιολική, η Υδροηλεκτρική, η Γεωθερμία, η Βιομάζα, η Κυματική Ενέργεια κ.α. Η τεχνολογία των Α.Π.Ε. παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα πως είναι ευεργετική για το περιβάλλον και κατά συνέπεια και για τον άνθρωπο, και είναι επίσης οικονομικά εφικτή.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι θεωρητικά ανεξάντλητες και έχουν χαμηλή ή ακόμα και μηδενική οικονομική αξία. Το κόστος της εκμετάλλευσής τους περιλαμβάνει το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης της συσκευής που είναι απαραίτητη για τη συλλογή της εκάστοτε ενέργειας.

Η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας και ο καθοριστικός παράγοντας για την ύπαρξη ζωής στον Πλανήτη μας, είναι ο Ήλιος, που αποτελεί μία διαρκή πυρηνική αντίδραση, μεταφέροντας τεράστια ποσά ενέργειας (περίπου  $2,1 \cdot 10^{15}$  kWh ανά ημέρα) στη Γη με τη μορφή Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας. Το σύνολο αυτής της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας χαρακτηρίζεται ως «Ηλιακή Ενέργεια» ή «Ηλιακή Ακτινοβολία» και είναι ανεξάντλητη.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας είναι παντού σταθερή, όχι όμως και αυτή που φτάνει στο έδαφος, η ισχύς της οποίας σπάνια ξεπερνά τα 1000Watt ανά τετραγωνικό μέτρο. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος εξαρτάται από την εποχή του έτους, την ώρα της ημέρας, την παρουσία νεφών, ομίχλης και σκόνης, ενώ εξασθενεί τόσο περισσότερη είναι η γωνία πρόσπτωσης της στην επιφάνεια του εδάφους και, συνεπώς, μεγαλύτερη η διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα. Ο τελευταίος αυτός παράγοντας είναι και ο σημαντικότερος για τη διαμόρφωση της μέσης έντασης της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στο έδαφος. Γι' αυτό, άλλωστε, το γεωγραφικό πλάτος και το υψόμετρο μιας περιοχής παίζουν τόσο σπουδαίο ρόλο στη διαμόρφωση του καιρού σ' αυτήν, καθώς επίσης και των εποχών στα δύο ημισφαίρια της γης. Όσο πιο κοντά στον υστερινό βρίσκεται αυτή, τόσο μικραίνει η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας και αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης έως τις  $90^\circ$ , με αποτέλεσμα οι συνέπειες της να γίνονται πιο έντονες.



**Εικόνα 1 Οι κύριες κατηγορίες εφαρμογών της Ηλιακής Ενέργειας.**

Η εκμετάλλευση της Ηλιακής Ενέργειας, χωρίζεται σε τρεις κύριες κατηγορίες εφαρμογών. Αυτές είναι:

- I. τα Παθητικά Ηλιακά Συστήματα
- II. τα Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα
- III. τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα Παθητικά και τα Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα εκμεταλλεύονται τη Θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της Ηλιακής Ακτινοβολίας, ενώ τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα μετατρέπουν την Ηλιακή Ακτινοβολία σε Ηλεκτρικό Ρεύμα μέσω του Φωτοβολταϊκού Φαινομένου.

# 1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

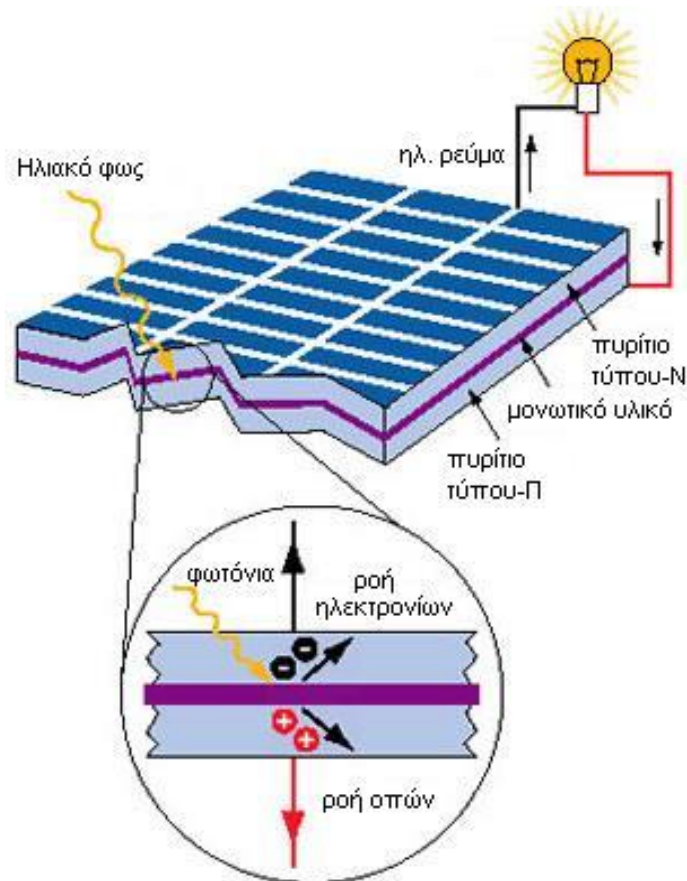
## 1.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Η φυσική διαδικασία κατά την οποία ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο/φωτοβολταϊκό στοιχείο/φωτοβολταϊκή κυψέλη (pn cell) μετατρέπει το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το ηλιακό φως αποτελείται από φωτόνια, τα οποία περιέχουν διάφορα ποσά ενέργειας που αντιστοιχούν στα διάφορα μήκη κύματος του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Με την πρόσπτωσή τους τα φωτόνια σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο, θα ανακλαστούν ή θα απορροφηθούν ή θα το διαπεράσουν. Όσα από τα φωτόνια απορροφώνται, αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού κυττάρου να μετακινηθούν και έτσι παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι οι ημιαγωγοί και στις περισσότερες περιπτώσεις το πυρίτιο. Οι ημιαγωγοί που υπάρχουν είναι δύο τύπων

- I. οι ημιαγωγοί τύπου-N (type-N), στους οποίους υπάρχουν πολλά ηλεκτρόνια τα οποία είναι σχεδόν ελεύθερα
- II. οι ημιαγωγοί τύπου-Π (type-P) στους οποίους υπάρχουν πολλές ελεύθερες οπές. Αυτό υπονοεί πως τα ηλεκτρόνια έχουν "εγκαταλείψει" τις θέσεις τους. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι ημιαγωγοί τύπου-Π έχουν θετικό φορτίο.

Τη στιγμή που ένα φωτόνιο προσπίπτει σε έναν ημιαγωγό τύπου-N, το ηλεκτρόνιο φεύγει από την αρχική του θέση και επειδή έχει αρνητικό φορτίο έλκεται από τον ημιαγωγό τύπου-Π, ο οποίος είναι φορτισμένος θετικά. Εξαιτίας του μονωτικού υλικού που υπάρχει μεταξύ των ημιαγωγών τύπου-N και τύπου-Π, ο μοναδικός τρόπος διέλευσης από τη μια μεριά στην άλλη είναι μέσω του εξωτερικού φορτίου, και έτσι παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.



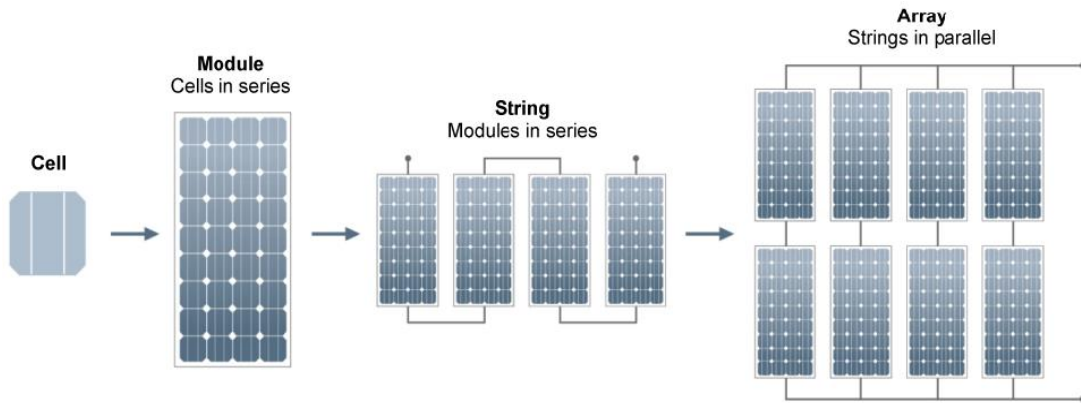
Εικόνα 2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

## 1.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Το 1839 ήταν η χρονιά που ανακαλύφθηκε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αρκετά χρόνια αργότερα, στα τέλη της δεκαετίας του '50, χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στην πράξη σε διαστημικές εφαρμογές.

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα τυπικό Φ/Β σύστημα είναι το Φ/Β πλαίσιο ή η ηλιακή γεννήτρια ρεύματος και τα ηλεκτρονικά συστήματα που είναι απαραίτητα για τη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη Φ/Β συστοιχία. Στα αυτόνομα Φ/Β συστήματα είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστήματος το οποίο θα αποθηκεύει την ενέργεια σε μπαταρίες.

Ένα ή περισσότερα Φ/Β πλαίσια ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους απαρτίζουν μία τυπική Φ/Β συστοιχία. Τα Φ/Β πλαίσια που βρίσκονται εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπουν περίπου το 14% της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι φιλική προς το περιβάλλον, αξιόπιστη και δεν παράγει θόρυβο.



Εικόνα 3 Φωτοβολταϊκές διατάξεις - από φ/β κελί σε φ/β συστοιχία

### 1.2.1 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα Φ/Β συστήματα κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες ανάλογα με την εφαρμογή τους:

- ◆ Καταναλωτικά προϊόντα (1mW–100 Wp ): Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας ισχύος όπως τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, εξωτερικός φωτισμός κήπων, ψύξη και προϊόντα όπως μικροί φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, φανοί κ.ά.
- ◆ Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100 Wp –200k Wp ): Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και μικρούς οικισμούς που δεν είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Ακόμη χρησιμοποιούνται για εφαρμογές όπως η ηλεκτροδότηση Ιερών Μονών, η αφαλάτωση, η άντληση και ο καθαρισμός νερού, ως συστήματα εξωτερικού φωτισμού δρόμων, πάρκων και αεροδρομίων, ως συστήματα τηλεπικοινωνιών, τηλεμετρήσεων, συναγερμού, σηματοδότησης οδικής κυκλοφορίας, ναυτιλίας, αεροναυτιλίας και για διάφορες αγροτικές εφαρμογές.
- ◆ Μεγάλα Φ/Β Συστήματα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο: Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται Φ/Β σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγέθους 50kWp έως μερικά MWp, στους οποίους η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο.
- ◆ Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα – Οικιακός Τομέας: Το τυπικό μέγεθος αυτών των Φ/Β συστημάτων είναι 1,5kWp έως 20kW. Αυτά τα συστήματα τοποθετούνται σε στέγες ή προσόψεις κατοικιών και τροφοδοτούν άμεσα τις καταναλώσεις του κτιρίου. Η περισσευούμενη ενέργεια διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς Φ/Β συστημάτων είναι τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα.

Τα Φ/Β συστήματα μπορούν να ενσωματωθούν σε κτίρια και αυτή η ενσωμάτωση παρουσιάζει πολλά οφέλη. Πρώτα από όλα, τα ψυκτικά φορτία των κτιρίων κατά τη θερινή περίοδο συγχρονίζονται με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ από τα Φ/Β. Επιπλέον, για την εγκατάστασή τους δεν απαιτείται επιπλέον γη και οι Φ/Β συστοιχίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και ως δομικά στοιχεία των κτιρίων, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένο κόστος των συμβατικών οικοδομικών υλικών. Τέλος, η παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται επιτόπου.



Εικόνα 4 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

### 1.2.2 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα Φ/Β συστήματα παρουσιάζουν κάποια χαρακτηριστικά τα οποία τα διαφοροποιούν από τις άλλες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι πως μπορούν να παράγουν απευθείας μορφές ΑΠΕ είναι ηλεκτρική ενέργεια, ακόμη και σε πολύ μικρή κλίμακα (μερικές δεκάδες W ή και mW). Επίσης, είναι εύχρηστα και μπορούν να εγκατασταθούν ακόμα από τους ίδιους τους χρήστες, μέσα στις πόλεις, ενσωματωμένα σε κτίρια και δεν προσβάλλουν αισθητικά το περιβάλλον. Ένα επιπλέον πλεονέκτημά τους είναι πως μπορούν να συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας και να αποτελέσουν τα λεγόμενα υβριδικά συστήματα. Ας σημειωθεί ακόμα πως έχουν τη δυνατότητα να επεκταθούν σε μεταγενέστερη φάση

για να αντιμετωπίσουν τις αυξημένες ανάγκες των χρηστών, χωρίς να είναι αναγκαία η μετατροπή του αρχικού συστήματος.

Εκτός από αυτό, πρέπει να ειπωθεί πως εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους, χωρίς επιπτώσεις στο περιβάλλον και δεν παράγουν θόρυβο κατά τη λειτουργία τους. Επίσης, δεν έχουν απαιτήσεις συντήρησης και παράλληλα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία κατά τη λειτουργία τους. Οι κατασκευαστές δίνουν εγγυήσεις καλής λειτουργίας για τις Φ/Β γεννήτριες για περισσότερο από 25 χρόνια. Το βασικότερο πλεονέκτημα των Φ/Β συστημάτων είναι η ενεργειακή ανεξαρτησία του χρήστη. Στις μέρες μας το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β συστήματα είναι συγκρίσιμο με το κόστος αιχμής ισχύος, που χρεώνει η εταιρεία ηλεκτρισμού τους πελάτες της.

Το νέο μοντέλο ανάπτυξης σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, η λεγόμενη «Διάσπαρτη Παραγωγή Ενέργειας» ( Distributed Power Generation), μπορεί να επωφεληθεί σημαντικά από τα Φ/Β συστήματα.

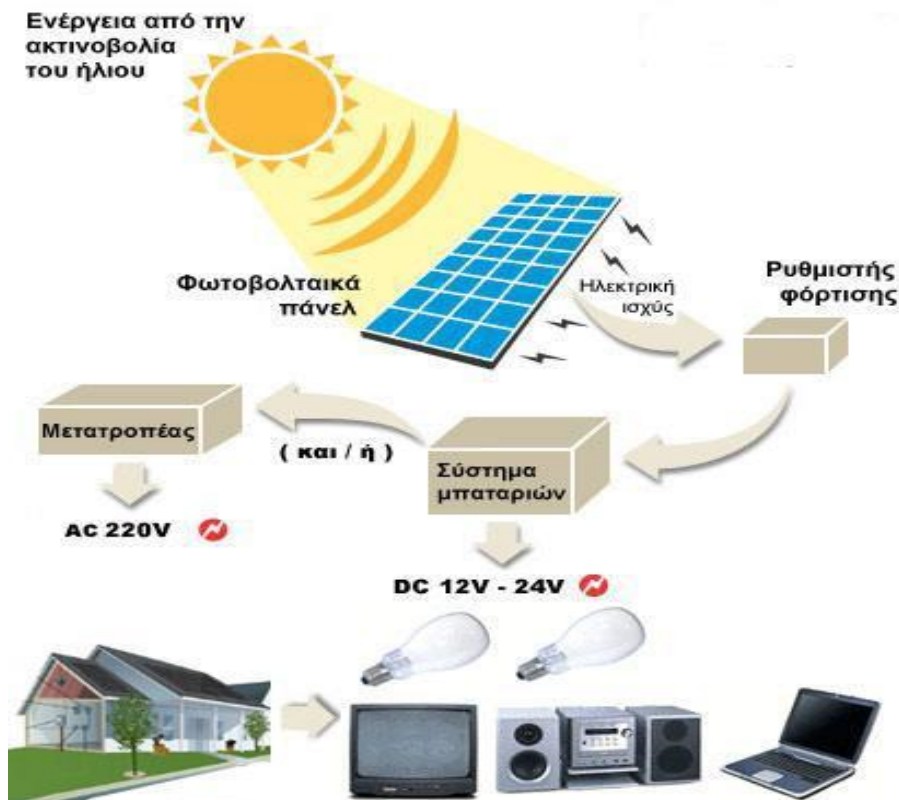
### **1.2.3 Κύρια μέρη φωτοβολταϊκού συστήματος**

Τα κύρια μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.

Το Φ/Β στοιχείο (solar cell), είναι το στοιχείο εκείνο το οποίο συλλέγει το ηλιακό φως. Είναι ένας λεπτός ημιαγωγός ο οποίος έχει επεξεργαστεί κατάλληλα και βρίσκεται πάνω σε επίπεδη επιφάνεια. Όταν προσπίπτει πάνω του ηλιακή ακτινοβολία δημιουργείται ηλεκτρική τάση. Στη συνέχεια παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα με την κατάλληλη σύνδεση σε φορτίο.

Το Φ/Β πλαίσιο (PV module) αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της Φ/Β γεννήτριας και αποτελείται από πολλά Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η τυπική ισχύς των πλαισίων είναι από 20W έως 300W. Τα Φ/Β πλαίσια συνδέονται ηλεκτρολογικά μεταξύ τους για να δημιουργήσουν τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες (strings).

Η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο Φ/Β στοιχείο πυριτίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι 0,5V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μόλις 0,4W περίπου, ( εξαρτάται από την επιφάνεια του φ/β). Για αυτό, τα Φ/Β στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση Φ/Β γεννητριών τοποθετούνται, ανά 10 ως 70 περίπου, σε ένα πλαίσιο, με κοινή ηλεκτρική έξοδο.



Εικόνα 5 Κύρια μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

Στο πλαίσιο, τα στοιχεία συνδέονται στη σειρά σε ομάδες κατάλληλου πλήθους για την απόκτηση μιας επιθυμητής τάσης. 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.

Η καλή λειτουργία και η αυξανόμενη απόδοση ενός Φ/Β συστήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων, οι οποίες φροντίζουν για την οικονομικότερη και αποδοτικότερη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για την προστασία των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Οι διατάξεις αυτές είναι ο ελεγκτής φόρτισης (charge controller) και ο μετατροπέας τάσεως.

Ρυθμιστής φόρτισης ονομάζεται εκείνη η ηλεκτρονική διάταξη που ελέγχει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης του συσσωρευτή και έχει τη δυνατότητα να απομονώσει τον συσσωρευτή από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση υπερφόρτισης ή υπερεκφόρτισης.

Οι μετατροπείς τάσεως είναι ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες προσαρμόζουν την τάση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην τάση του συστήματος αποθήκευσης, έτσι ώστε να γίνει πλήρης η εκμετάλλευση της παραγόμενης από το Φ/Β σύστημα ενέργειας. Οι διατάξεις αυτές διακρίνονται σε τρεις τύπους:

### I. Μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε συνεχή (DC-DC converter).

Η διάταξη αυτή μετατρέπει τη συνεχή τάση της εξόδου της Φ/Β γεννήτριας σε συνεχή τάση μικρότερης τιμής, κατάλληλης για τη φόρτιση των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Στο μετατροπέα DC-DC μπορεί να προστεθεί και μια ηλεκτρονική διάταξη, η οποία ονομάζεται ρυθμιστής ισχύος MPPT (Maximum Power Point



Tracker) και επιβάλλει την προσαρμογή του σημείου λειτουργίας του συστήματος στο σημείο μέγιστης ισχύος, ΣΜΙ. Ένας ρυθμιστής τύπου MPPT, μέσω κατάλληλου αλγορίθμου, ανιχνεύει ανά μικρό χρονικό διάστημα το ΣΜΙ, δηλαδή την τάση και το ρεύμα του Φ/Β όπου παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς και μεταφέρει όλη την παραγόμενη ενέργεια στην μπαταρία. Έτσι από έναν τέτοιου τύπου ρυθμιστή (MPPT) παίρνουμε περίπου το 95% της ενέργειας που παράγεται.

## **II. Μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη (DC-AC inverter)**

Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τη συνεχή τάση που παράγει η Φ/Β σε εναλλασσόμενη, κατάλληλης μορφής για την εξυπηρέτηση των καταναλώσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί πως κατά τη λειτουργία του inverter παράγονται μεγάλο πλήθος αρμονικών υψηλών συχνοτήτων, το οποίο περιορίζεται μια ειδικά ηλεκτρονικά φίλτρα.

## **III. Μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσεως σε συνεχή ή ανορθωτής (AC-DC converter)**

Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται στην περίπτωση των υβριδικών αυτόνομων συστημάτων με αποθήκευση και παρέχει τη δυνατότητα μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου μια ανεμογεννήτριας ή ηλεκτροπαραγωγικού ζεύγους σε συνεχή τάση, κατάλληλης μορφής και τιμής για τη φόρτιση των ηλεκτρικών συσσωρευτών.

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.

Στην περίπτωση υλοποίησης αυτόνομου συστήματος (υβριδικού ή αμιγώς Φ/Β) η ύπαρξη ηλεκτρικών συσσωρευτών θεωρείται ενδεδειγμένη. Ακριβώς επειδή δεν υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο και άρα κάλυψη της κατανάλωσης σε περίπτωση περιορισμένης παραγωγής, η ανάγκη αποθήκευσης της περίσσειας ηλεκτρικής παραγωγής, ώστε να μπορέσει να καλυφθεί η ζήτηση στην περίπτωση που η παραγωγή δεν μπορεί να ανταποκριθεί, υλοποιείται από τα συγκεκριμένα στοιχεία αποθήκευσης.

Είναι προφανές πως η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας εξαρτάται από το μέγιστο πλήθος των πιθανών συνεχών ημερών συννεφιάς και τις αιχμές της κατανάλωσης.

### 1.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ / ΠΑΝΕΛ

Όταν συνδυαστούν πολλές φωτοβολταϊκές κυψέλες προκύπτει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Αυτός ο συνδυασμός είναι απαραίτητος γιατί οι φωτοβολταϊκές κυψέλες από μόνες τους έχουν χαμηλές τιμές τάσης και ισχύος και επομένως δεν είναι ικανές να ανταποκριθούν στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων. Για την βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών του πλαισίου, επιλέγονται κυψέλες οι οποίες έχουν παρόμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Συνώνυμο του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι το φωτοβολταϊκό πάνελ, το οποίο μπορεί να αποτελείται από πολλά φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα μεταξύ τους. Οι εταιρείες που κατασκευάζουν φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν διαχωρίζουν τα πλαίσια από τα φωτοβολταϊκά πάνελ.

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ ταξινομούνται ανάλογα με την ισχύ που αποδίδουν στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου. Η ισχύς αυτή έχει μονάδες τα Watt peak (Wp) σε κανονικές συνθήκες (STC - Standard Test Conditions, και αντιστοιχεί στην ισχύ που αποδίδει μια επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου m<sup>2</sup> όταν πάνω της προσπίπτει ακτινοβολία έντασης 1000 W/m<sup>2</sup> στους 25 °C και ταυτόχρονα η Φασματική κατανομή είναι AM=1,5. Η ισχύς των βασικών μονάδων πυριτίου συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 40 και 60 W.

Ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ισχύος εξόδου του προς την ισχύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνειά του σε κανονικές συνθήκες. Γενικά η απόδοση ενός πλαισίου είναι χαμηλότερη από την απόδοση της κάθε κυψέλης, επειδή η επιφάνεια που καταλαμβάνει το πλαίσιο δεν καλύπτεται πλήρως από τις κυψέλες και επειδή οι κυψέλες μπορεί να έχουν μικρές διαφορές μεταξύ τους.

#### 1.3.1 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ανάλογα με το υλικό και την τεχνολογία κατασκευής τους ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

##### ♦ Μονοκρυσταλλικά (monocrystalline) πλαίσια (sc-Si)

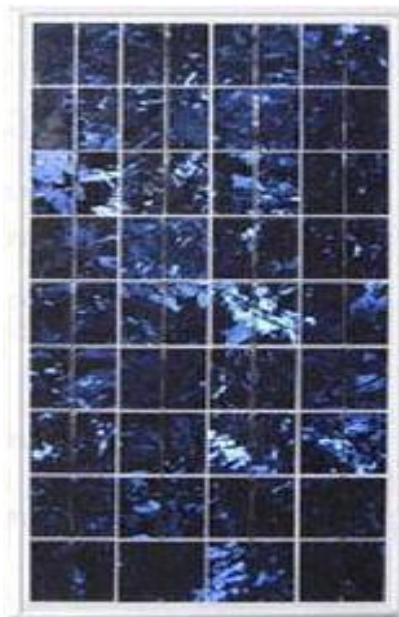
Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αυτού του τύπου έχουν το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Στα αρνητικά του συγκαταλέγονται το υψηλότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τα υπόλοιπα, επειδή φτιάχνονται από έναν μόνο κρύσταλλο και ο περιορισμός στην τοποθέτησή τους καθώς είναι ακατάλληλα για τόπους όπου υπάρχουν σκιάσεις.



Εικόνα 6 Μονοκρυσταλλικό πλαίσιο

#### ✦ Πολυκρυσταλλικά (polycrystalline) πλαίσια (mc-Si)

Τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης και χαμηλότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά και λειτουργούν ικανοποιητικά σε περιπτώσεις μερικής σκίασης.



Εικόνα 7 Πολυκρυσταλλικό πλαίσιο

#### ✦ Λεπτού υμενίου (thin film)

Οι τρεις βασικές κατηγορίες αυτής της τεχνολογίας είναι:

1. a-Si: thin film ή άμορφο πυρίτιο,
2. CdTe: cadmium telluride,
3. CIS: copper indium selenide

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμενίου έχουν τον πιο χαμηλό βαθμό απόδοσης και για αυτό το λόγο χρειάζονται μεγαλύτερη επιφάνεια για να εγκατασταθούν. Επίσης, έχουν το χαμηλότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με τα υπόλοιπα και μπορούν να αποδίδουν καλύτερα σε περιπτώσεις σκιάσεων και στη διάχυτη ακτινοβολία, δηλαδή όταν έχει συννεφιά.



**Εικόνα 8 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο λεπτού υμενίου**

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται διάφορα χαρακτηριστικά των διαφορετικών τεχνολογιών των πλαισίων:

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά των διαφορετικών τεχνολογιών των φωτοβολταϊκών πλαισίων

	Τεχνολογία				
	Μονοκρυσταλλικά (monocrystalline)	Πολυκρυσταλλικά (polycrystalline)	Λεπτού υμενίου (thin film)		
			a-Si	CdTe	CIS
Μέγιστη απόδοση σε STC	19%	15%	8,5%	11%	11%
Μέσος όρος αποδοσης σε STC	14%	13%	6%	8%	8%
Θερμοκρασιακός συντελεστής στην ονομαστική ισχύ	-0,3 / -0,5	-0,3 / -0,5	-0,2	-0,2	-0,2
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	7 – 8 m <sup>2</sup>	8 - 10 m <sup>2</sup>	10 - 20 m <sup>2</sup>		

#### 1.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΣΥΝΤΕΛΟΥΝ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η Ελλάδα είναι μία από τις πλέον ευνοημένες περιοχές του πλανήτη μας όσον αφορά την ηλιακή ενέργεια. Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας είναι ιδιαίτερα υψηλό και φτάνει περίπου τις 1400-1800 KWh/m<sup>2</sup>yr σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής και το ανάγλυφο του εδάφους. Στο μεγαλύτερο τμήμα της Ελλάδας, η ηλιοφάνεια διαρκεί περισσότερες από 2700 ώρες το χρόνο. Στη δυτική Μακεδονία και την Ήπειρο εμφανίζει τις μικρότερες τιμές της, κυμαινόμενη από 2200 ως 2300 ώρες, ενώ στη Ρόδο και τη νότια Κρήτη ξεπερνά τις 3100 ώρες ετησίως.

Η ηλιακή ενέργεια είναι σταθερή και η ένταση της είναι προβλέψιμη στη διάρκεια της μέρας και του χρόνου. Η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζεται κατά τη διάρκεια του μεσημεριού επειδή τότε το ηλιακό ύψος παίρνει τη μέγιστη τιμή του, τόσο κατά τη χειμερινή όσο και τη θερινή περίοδο. Κατά τη

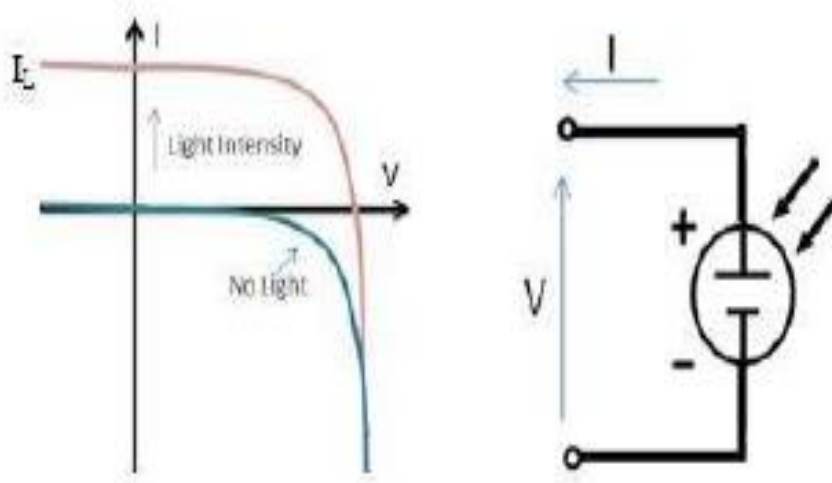
θερινή περίοδο η ηλιακή ενέργεια είναι μεγαλύτερη λόγω της θέσης του ήλιου και των μειωμένων νεφώσεων.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως η Ελλάδα πληρεί τις προϋποθέσεις για ανάπτυξη και εφαρμογή των Φ/Β συστημάτων. Η ηλιακή ενέργεια είναι σε αφθονία και μπορεί να αξιοποιηθεί και να συμβάλει στην ασφάλεια παροχής ενέργειας. Μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη του οικολογικού τουρισμού, ιδιαίτερα στα νησιά. Μέχρι τώρα τα νησιά εξαρτώνται ενεργειακά από την παραγωγή ενέργειας από το πετρέλαιο στους νησιωτικούς σταθμούς εξάρτηση και το κόστος μεταφοράς της είναι τεράστιο. Αυτό έχει άμεση αρνητική επίδραση στην ποιότητα ζωής των κατοίκων, στην τουριστική ανάπτυξη και στο κόστος παραγωγής ενέργειας, το οποίο τελικώς χρεώνεται η ΔΕΗ.

Τα Φ/Β συστήματα θα είναι ικανά να ενισχύουν το ηλεκτρικό δίκτυο τις μεσημβρινές ώρες αιχμής. Ιδιαίτερα σημαντική θα είναι αυτή η ενίσχυση κατά τους θερινούς μήνες, όπου είτε υπάρχει πιθανότητα έλλειψης ενέργειας είτε το κόστος της είναι ιδιαίτερα υψηλό. Με τη βοήθεια των Φ/Β συστημάτων θα μειωθούν οι απώλειες του δικτύου, επειδή η ενέργεια θα παράγεται στον τόπο της κατανάλωσης και ως εκ τούτου θα υπάρχει ελάφρυνση των γραμμών του δικτύου. Επίσης θα συμβάλλουν στη μείωση των διακοπών ηλεκτροδότησης που συμβαίνουν εξαιτίας της υπερφόρτωσης του δικτύου της ΔΕΗ. Ακόμα, θα περιορίσουν το ρυθμό ανάπτυξης νέων κεντρικών σταθμών ισχύος συμβατικής τεχνολογίας και θα βοηθήσουν στην σταδιακή απεξάρτηση από το πετρέλαιο και κάθε μορφής εισαγόμενη ενέργεια. Η ανάπτυξη της Ελληνικής Βιομηχανίας Φ/Β Συστημάτων με προοπτικές για την πλήρη κάλυψη της Ελληνικής αγοράς και για εξαγωγικές δραστηριότητες θα συντελέσει στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στην ανάπτυξη της Ελληνικής τεχνογνωσίας.

## **1.5 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ Φ/Β ΚΥΤΤΑΡΟΥ**

Το κύτταρο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μία δίοδο. Όταν υπάρχει έλλειψη φωτός το κύτταρο και δεν παράγει ρεύμα, το κύτταρο συμπεριφέρεται όπως μια δίοδος. Καθώς η ηλιακή ένταση που προσπίπτει στο κύτταρο αυξάνεται, το ρεύμα που παράγεται φαίνεται στην εικόνα 9.



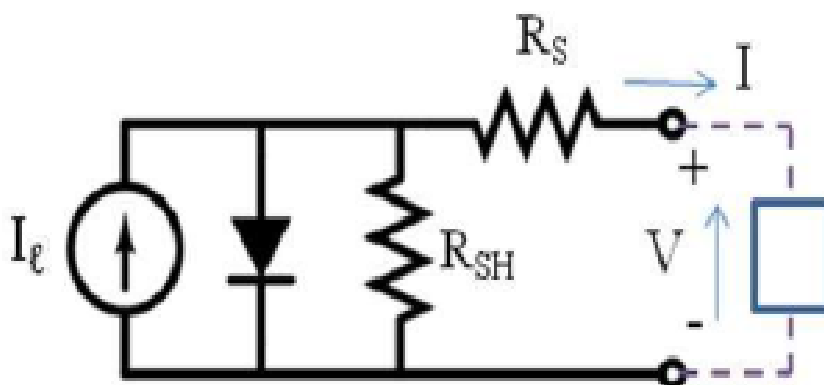
Εικόνα 9 καμπύλη ηλιακού στοιχείου

Σε ένα ιδανικό κύτταρο, το συνολικό ρεύμα  $I$  είναι ίσο με το ρεύμα  $I_L$  που παράγεται από το φωτοβολταϊκό φαινόμενο μείον το ρεύμα της διόδου  $I_D$ . σύμφωνα με την εξίσωση:

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (1.1)$$

Όπου  $I_0$  είναι το ρεύμα κόρου της διόδου  $I_L$  το φωτόρρευμα,  $q$  είναι το στοιχειώδες φορτίο  $1.6 \cdot 10^{-19}$  coulomb,  $K$  είναι η σταθερά Boltzmann  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K,  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία σε Κελβίν και  $V$  είναι η τάση που παράγεται στην έξοδο του κυττάρου.

Στην ουσία όμως δεν υπάρχει ιδανικό ηλιακό κύτταρο, έτσι προστίθενται στο μοντέλο δύο αντιστάσεις. Μία σε σειρά αντίσταση  $R_S$  και μία παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση  $R_{SH}$ . (Εικόνα )



Εικόνα 10 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα βλέπουμε ότι το ρεύμα που παράγεται από το ηλιακό κύτταρο είναι ίσο με αυτό που παράγεται από την πηγή ρεύματος μείον το ρεύμα της διόδου και μείον το ρεύμα που περνά από την αντίσταση  $R_{SH}$

$$I = I_L - I_0 \left( \exp \frac{q(V+I \cdot R_S)}{n \cdot K \cdot T} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}} \quad (1.2)$$

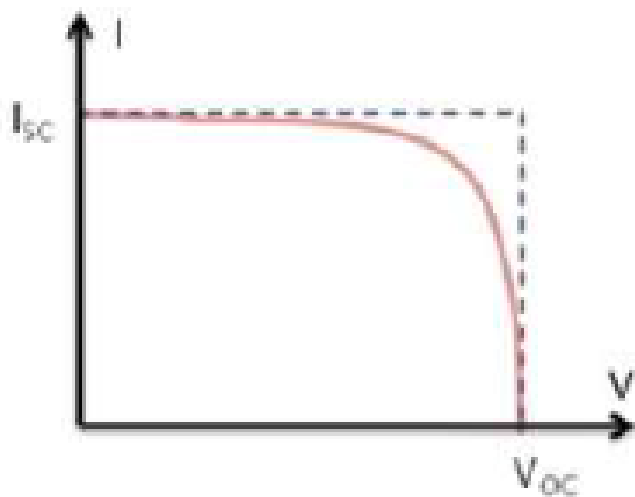
όπου  $n$  είναι συντελεστής διόρθωσης, που οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης και μη ιδανικής διάχυσης, τα οποία συμβαίνουν στην περιοχή της  $p-n$  επαφής και παίρνει τιμές μεταξύ 1 με 2.

$R_S$  είναι σε σειρά αντίσταση του κυττάρου που παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά την ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως και αποτελείται από πολύ λεπτό στρώμα, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού – ωμικής επαφής και την ωμική επαφή. Η αντίσταση  $R_S$  είναι συνήθως μικρότερη από 1  $\Omega$ .

$R_{SH}$  είναι παράλληλη αντίσταση στο φωτοβολταϊκό κύτταρο και οφείλεται σε διαρροές των φορέων που συμβαίνουν είτε στην επαφή  $p-n$ , είτε στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του κυττάρου, είτε σε άλλες ανωμαλίες του κρυστάλλου και δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλη την επιφάνεια του κυττάρου ούτε μεταξύ δύο όμοιων κυττάρων. Η αντίσταση είναι της τάξης των  $K\Omega$ .

## 1.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ I-V ΚΑΙ P-V

Στην εικόνα 11 βλέπουμε την καμπύλη I-V ενός ηλιακού κυττάρου το οποίο φωτίζεται. Το  $I_{SC}$  είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και  $V_{OC}$  η τάση ανοικτού κυκλώματος



Εικόνα 11 καμπύλη I-V ηλιακού κυττάρου



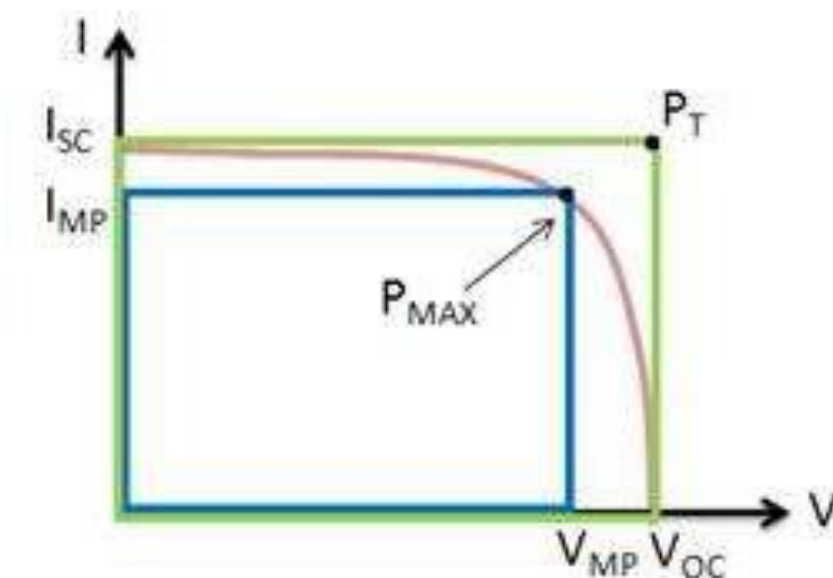
Το ρεύμα βραχυκύκλωσης, είναι το ρεύμα όταν η τάση  $V = 0$  και αν η  $R_S$  είναι πολύ μικρή τότε είναι ίσο και με το φωτόρευμα  $I_L$ .

Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$  είναι η τάση για μηδενικό ρεύμα  $I=0$ . Αν η αντίσταση  $R_{SH}$  είναι πολύ μεγάλη έχουμε

$$V_{OC} = \frac{n * K * T}{q} * \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (1.3)$$

όπου  $I_L$  το φωτόρευμα,  $I_0$  το ρεύμα κόρου της διόδου.

Η σχέση X δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοικτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρευμα.



Εικόνα 12 Καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Στην χαρακτηριστική καμπύλη I-V υπάρχει ένα σημείο  $P_{Max}$  ( $V_{MP}$ ,  $I_{MP}$ ) στο οποίο η ισχύς λαμβάνει την μέγιστη τιμή της εικόνα (12). Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύς (maximum power point MPP)

$$P_m(W) = I_m(A) * V_m(V) \quad (1.4)$$

Η μέγιστη ισχύς  $P_m$  δίνεται από τους κατασκευαστές μετρημένη υπό ειδικές σταθερές συνθήκες (STC)

Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ο συντελεστής πληρώσεως (Fill Factor, FF). Είναι ένα μέτρο του πόσο τετράγωνη είναι η καμπύλη I-V. Υπολογίζεται από το πηλίκο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_m$ , προς

το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και της τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ .

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{I_m * V_m}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (1.5)$$

Ο συντελεστής πληρώσεως περιγράφει την ποιότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων και οι τυπικές τιμές του κυμαίνονται από 0,7 έως 0,85 για φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου ενώ από 0,5 έως 0,7 για τα άμορφα φωτοβολταϊκά.

## 1.7 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Ο βαθμός απόδοσης ηλιακού στοιχείου εξαρτάται κυρίως από τις παραμέτρους  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  και  $FF$  που είδαμε παραπάνω και ισούται με το λόγο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος του φωτοβολταϊκού στοιχείου, προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας και δίνεται από τη σχέση 1.6

$$n = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m * I_m}{G * A} = \frac{V_{oc} * I_{sc} * FF}{G * A} \quad (1.6)$$

όπου  $G$  είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια  $A$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

### 1.7.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η επιτυχημένη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους απαιτεί διερεύνηση πολλών παραγόντων και εκτιμήσεις για την ισχύ των φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν δίνουν ενδείξεις με ακρίβεια για την απόδοσή τους. Από τις έρευνες προέκυψε πως οι μετεωρολογικές συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν μείωση στην πιθανή ισχύ τους έως 18%. Δύο από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος είναι η θερμοκρασία και η ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμοκρασία, κάτω από την οποία λειτουργούν τα φωτοβολταϊκά συστήματα και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία,

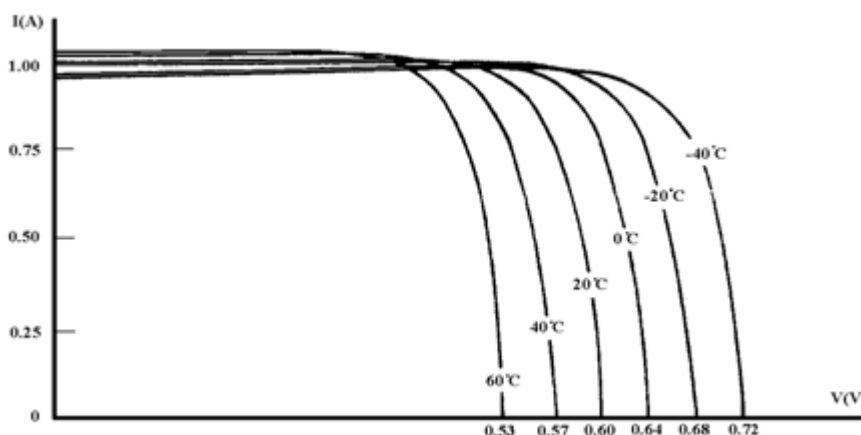
επηρεάζονται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως ο αέρας, η βροχή, η κάλυψη νεφών και η διανομή του ηλιακού φάσματος.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι:

### 1. Θερμοκρασία

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Η ιδανική θερμοκρασία περιβάλλοντος για την λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι 25°C. Πολλές φορές όμως, η θερμοκρασία του συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας διαφέρει σημαντικά κυρίως κατά την διάρκεια των θερινών μηνών. Οι υψηλές θερμοκρασίες της κυψέλης έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς δυναμικού της ηλιακής κυψέλης με αποτέλεσμα, όταν ένα φορτίο συνδεθεί στα άκρα του, η διαφορά δυναμικού να είναι αισθητά μειωμένη. Σε περίπτωση που τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν σε θερμοκρασίες πάνω από την ενδεικτική τιμή, τότε η δυναμική παραγωγική ενέργεια τους μπορεί να μειώνεται περισσότερο από το 14%.

Η αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά στην αποτελεσματικότητα των ηλιακών κυψελών και μάλιστα η σχέση των δυο αυτών μεγεθών είναι αντιστρόφως ανάλογη.



Εικόνα 13 Επίδραση της θερμοκρασίας στις ηλεκτρικές ιδιότητες του φωτοβολταϊκού

### 2. Ηλιακή ακτινοβολία

Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα σε ετήσια βάση εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση της εγκατάστασης του συστήματος, γιατί είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία. Με τον όρο ηλιακή ακτινοβολία εννοείται η σύσταση της ακτινοβολίας, δηλαδή, δυο δέσμες ακτινοβολίας ίδιας ισχύος αλλά διαφορετικού μήκους κύματος μπορούν να προκαλέσουν σε μια κυψέλη διαφορετική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και επομένως να διαμορφώσουν διαφορετικό βαθμό απόδοσης.

Η επιρροή της ηλιακής ακτινοβολίας διαφέρει για τις διάφορες παραμέτρους εξόδου. Η επίδραση της εξηγείται λαμβάνοντας υπ' όψιν την διαφορά του ρεύματος

και της ηλεκτρικής τάσης που δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Η άνοδος της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος που οφείλεται στην αυξανόμενη παραγωγή ηλεκτρονίων (λόγω της αυξανόμενης ροής των φωτονίων) και ως εκ τούτου, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ.

### 3. Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου

Σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να παίξει η ταχύτητα του ανέμου γιατί οι μεγάλες ταχύτητες έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες στη λειτουργία του. Όταν ο άνεμος είναι ψυχρός, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν εάν υπήρχε άπνοια, υπό τα ίδια ποσοστά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοσή τους.

### 4. Ρύπανση

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορεί να μειωθεί από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών στην επιφάνειά τους. Σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές η μείωση της ηλεκτροπαραγωγής είναι σημαντικότερη λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται στη γυάλινη ή στην πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να βοηθήσει σημαντικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αναγκαίο να γίνεται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό. Σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται συνήθως με κλίση  $90^\circ$  (κάθετα), για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον  $45^\circ$  για να μην συγκρατείται η σκόνη. Όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια βρίσκονται σε μία περιοχή που εκτιμάτε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

### 5. Σκίαση

Η σκίαση αποτελεί έναν άλλο παράγοντα επίδρασης της DC ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται σε περιπτώσεις όπου συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων, όπως παρακείμενα κτήρια, βλάστηση, και σε περιπτώσεις όπου η έκταση για την εγκατάσταση είναι περιορισμένη, όπως στις στέγες κτηρίων, γιατί προκαλείται σκίαση από τη μία σειρά στην επόμενη. Στη δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί είναι σημαντικές και για αυτό το λόγο, είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που προκαλούν.

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτελείται από ηλιακές κυψέλες όμοιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, η σκίαση ή η βλάβη μιας και μόνο ηλιακής κυψέλης, θα σήμαινε αχρήστευση του πλαισίου. Μια σκιασμένη κυψέλη, συμπεριφέρεται κατά βάση όπως η δίοδος, η οποία όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τις υπόλοιπες κυψέλες, οι οποίες δεν αντιμετωπίζουν αστοχίες, μία υψηλή ανάστροφη τάση. Αν οι υπόλοιπες ηλιακές

κυψέλες του πλαισίου είναι μεγάλου πλήθους, αυτή η τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας την καταστροφή της. Για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, η σκιασμένη κυψέλη λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα.

Παρατεταμένος σκιασμός μιας κυψέλης σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή της κυψέλης αυτής και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης μιας «κατεστραμμένης» κυψέλης. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως φαινόμενο hot spot (φαινόμενο θερμής κηλίδας). Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους (δίοδοι παράκαμψης), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των κυψελών που είναι συνδεδεμένες σε σειρά, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμα και αν κάποια ηλιακή κυψέλη του υστερεί ή καταστραφεί.

## 6. Γήρανση

Με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μια μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, λόγω της φθοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων (και των υπολοίπων στοιχείων ενός φωτοβολταϊκού συστήματος), που συνήθως υπολογίζεται από 1% ως 2% για κάθε έτος.

## 7. Απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος

Κατά τον σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς, που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις συστοιχίες, και στις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του συστήματος, όπως διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές, μετατροπείς κλπ. Για αυτό το λόγο, κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης του 30% ή και περισσότερο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

## 8. Οπτικές απώλειες

Οπτικές απώλειες είναι η διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανακλαστικό επίστρωμα, υλικό φωτοβολταϊκών κυττάρων) σε σχέση με την αντίστοιχη ανακλαστικότητα σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς (STC). Η ανακλαστικότητα του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς, αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνεια του, ιδιαίτερα σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των 60 °.

Οπτικές απώλειες παρατηρούνται ακόμα λόγω των χαμηλών τιμών της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση της ηλιακής κυψέλης μειώνεται στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα κάτω από την τιμή των 200 W/m<sup>2</sup>. Οι οπτικές απώλειες αποδεικνύονται μικρής σημασίας για εμπορικά πλαίσια

καλής ποιότητας. Σε άλλες όμως περιπτώσεις αυτές οι ενεργειακές απώλειες αποδεικνύονται σημαντικές και υπολογίζονται σε 3% κατά μέσο όρο στο έτος.

## **1.8 ΤΡΟΠΟΙ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ**

Για τη μέγιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων θα πρέπει να δέχονται συνεχώς την μέγιστη ακτινοβολία. Οι ηλιακές ακτίνες θα πρέπει να προσπίπτουν πάντα κάθετα στην επιφάνεια του γιατί τότε έχουν την μεγαλύτερη πυκνότητα στην μονάδα επιφανείας και δεν ανακλώνται στην γυάλινη επικάλυψη του πλαισίου. Ωστόσο, ο ήλιος κινείται κατά την διάρκεια της ημέρας και για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση του πλαισίου θα πρέπει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο να παρακολουθεί συνεχώς την κίνηση του ήλιου. Οι απαιτήσεις κάθε συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από φωτοβολταϊκά στοιχεία, καθορίζουν τον τρόπο τοποθέτησης και στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στοιχεία που προσδιορίζουν τον τρόπο τοποθέτησης των πλαισίων:

- Η ενέργεια που πρέπει να παραχθεί καθορίζει το πλήθος των φωτοβολταϊκών στοιχείων, το μηχανολογικό και ηλεκτρικό-ηλεκτρονικό εξοπλισμό που θα τοποθετηθεί στο σύστημα.

- Το περιβάλλον και οι τοπικές καιρικές συνθήκες καθορίζουν τη θέση και τον τρόπο στήριξης.

- Η οικονομική δυνατότητα που υπάρχει είναι η αυτή που περιορίζει ή επιτρέπει την εγκατάσταση ενός ακριβού συστήματος, το οποίο όμως θα έχει καλύτερη απόδοση από ένα οικονομικότερο.

Οπότε, η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από τη σωστή τοποθέτηση και διάταξη των πλαισίων.

Τρεις είναι οι κύριοι τρόποι στήριξης των πλαισίων και διακρίνονται ανάλογα με την ενεργειακή απολαβή:

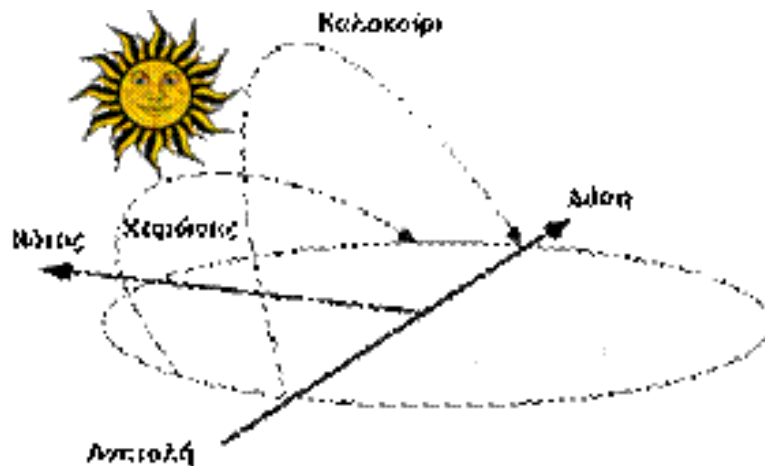
- Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη
- Εποχιακά ρυθμιζόμενη κλίση
- Συνεχούς ημερήσιας παρακολούθησης ηλιοτρόπιο – trackers

### **1.8.1 Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης του συλλέκτη**

Είναι ο απλούστερος και ο οικονομικότερος τρόπος στήριξης που μπορεί να εφαρμοστεί για την τοποθέτηση συλλεκτών. Ο σχεδιασμός του συστήματος είναι αρκετά απλός καθώς στο μόνο που πρέπει να δοθεί προσοχή είναι η γωνία κλίσης και ο προσανατολισμός των συλλεκτών. Είναι ένας αρκετά αξιόπιστος τρόπος καθώς δεν έχει κινητά μέρη και προτείνεται σε μέρη με ισχυρούς ανέμους, π.χ.

βουνά. Επίσης χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να ενσωματώσουμε τους συλλέκτες σε κτίρια πχ. προσόψεις, στέγες.

Για την τοποθέτηση των συλλεκτών πρέπει να επιλεγεί η καταλληλότερη γωνία κλίσης και ο προσανατολισμός. Όταν ο χώρος τοποθέτησης δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και του έτους, είναι η πιο απλή περίπτωση. Τότε η γωνία κλίσης του συλλέκτη είναι κοντά στο γεωγραφικό πλάτος του τόπου και κατά κανόνα ακολουθείται νότιος αζιμουθιακός προσανατολισμός για το βόρειο ημισφαίριο (στο νότιο ημισφαίριο επιλεγούμε βόρειο). Όταν η γωνία κλίσης είναι ίση με το  $\lambda$  του τόπου, οι ακτίνες πέφτουν κάθετα στους συλλέκτες δυο φορές το χρόνο, το μεσημέρι των ισημεριών, 21 Μαρτίου και 22 Σεπτεμβρίου. Κατά το ηλιακό μεσημέρι, ο ήλιος, έχει το μέγιστο ύψος, ELM (maximum elevation). Το ύψος αυτό μεταβάλλεται καθημερινά, από την ελάχιστη τιμή  $ELM_{\epsilon\lambda}=(90^\circ -\lambda)-23,5^\circ$ , στις 22 Δεκεμβρίου, μέχρι την μέγιστη  $ELM_{\mu\epsilon\gamma}=(90^\circ -\lambda)+23,5^\circ$  (21 Ιουνίου) και στην συνέχεια μειώνεται και παίρνει την τιμή της 22ας Δεκεμβρίου. Η γωνία των ακτινών κατά την μεσουράνηση του, ως προς την κάθετη στην επιφάνεια του συλλέκτη, μεταβάλλεται από  $-23,5^\circ$  ο έως  $+23,5^\circ$  ο. Όταν ο συλλέκτης έχει κλίση ίση με την γωνία  $\lambda$  του τόπου, η μέση ημερησία τιμή της ετησίας ενεργειακής απολαβής γίνεται μέγιστη.



Εικόνα 14 Οι θέσεις του ήλιου κατά την διάρκεια του χειμώνα και του καλοκαιριού

Για να προκύψει η βέλτιστη γωνία κλίσης του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι κατά τόπους μετεωρολογικές συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν την ολική διάχυτη και απευθείας ακτινοβολία καθώς και η ανακλαστικότητα του εδάφους (το albedo του εδάφους). Πρέπει να καταγραφούν όλα αυτά τα μετεωρολογικά στοιχεία για αρκετά χρόνια και σε διαφορετικές γωνίες. Συνήθως όμως δεν είναι διαθέσιμες λόγω του μεγάλου κόστους των μετρήσεων, για το λόγο αυτό οι μετρήσεις γίνονται με έναν αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. πυρανόμετρο) σε οριζόντια θέση για το μέγιστο χρονικό διάστημα. Μετά τη λήψη των μετρήσεων και κατάλληλη επεξεργασία προσδιορίζεται η βέλτιστη γωνία του συλλέκτη. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις για πλησιέστερη περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη την ανακλαστικότητα του εδάφους.

Παρατηρήσεις για την τοποθέτηση των συλλεκτών με σταθερή κλίση:

- Για τόπους με μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη ( $>200$ ) βρίσκεται στην περιοχή ( $10^\circ -15^\circ$ ).

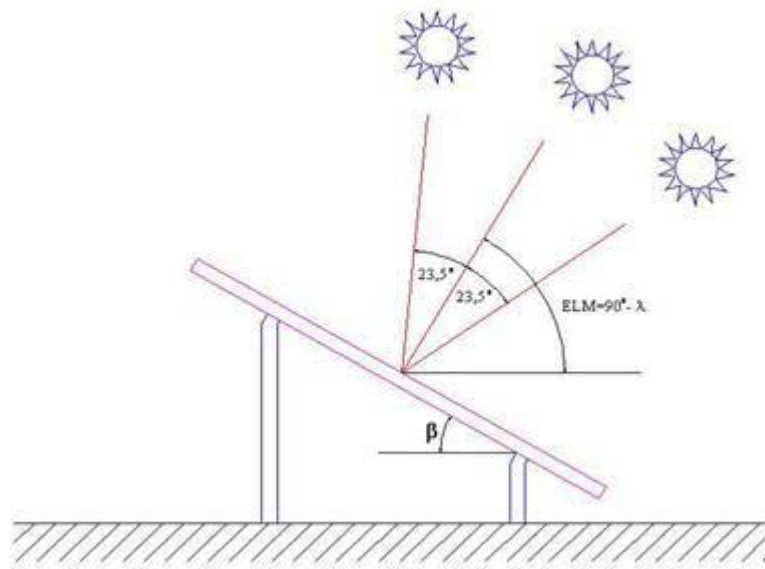
- Για τόπους με μικρά  $\lambda$ , γύρω από τον ισημερινό, η βέλτιστη γωνία είναι  $0^\circ$ . Στην πράξη όμως οι συλλέκτες τοποθετούνται με μια μικρή γωνία  $5^\circ$  -  $10^\circ$  ώστε, κατά την πλύση της επιφάνειας από το νερό της βροχής ή της πλύσης να απομακρύνονται τα διαφορά σώματα που επικάθονται (σκόνη, φύλλα, κ.α.).

- Για τόπους στους οποίους δεν υπάρχουν διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα ο συλλέκτης τοποθετείται σε γωνία  $\beta = \lambda - 10^\circ$ .

- Εάν πρέπει να καλυφθούν οι χειμερινές ανάγκες για ενέργεια, η καταλληλότερη

γωνία είναι  $\beta = \lambda + 15^\circ$ . Ενώ εάν πρέπει να καλυφθούν οι θερινές ανάγκες για ενέργεια, τότε οι συλλέκτες τοποθετούνται με κλίση  $\beta = \lambda - 15^\circ$ .

- Σε περιοχές με φυσικά εμπόδια ο συλλέκτης τοποθετείται έτσι ώστε να προκύπτει η μέγιστη ενεργειακή απολαβή.



Εικόνα 15 Στήριξη με σταθερή γωνία κλίσης

### 1.8.2. Στήριξη με εποχιακή ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη.

Για να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος κατασκευάζονται βάσεις στις οποίες τοποθετούνται οι συλλέκτες με δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης τους. Η μηχανολογική κατασκευή είναι σχετικά φθηνή και απλή ώστε όλοι οι χρήστες να μπορούν να κάνουν την εποχιακή ρύθμιση. Η ρύθμιση του συλλέκτη γίνεται δυο φορές τον χρόνο, μια κατά το χειμερινό εξάμηνο (22 Σεπτεμβρίου - 21 Μαρτίου) και μια κατά το θερινό εξάμηνο (21 Μαρτίου - 22 Σεπτεμβρίου). Η αλλαγή αυτή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η κλίση μεταξύ των ακτίνων του ηλίου και της επιφάνειας του συλλέκτη να πλησιάζει όσο το δυνατόν τις  $90^\circ$ .

Για τον προσδιορισμό της σωστής γωνιάς του συλλέκτη πρέπει να είναι γνωστά τα μετεωρολογικά δεδομένα του τόπου (ηλιοφάνειας, ανέμου, θερμοκρασίας, κ.λ.π.), καθώς και το albedo του εδάφους όπως και στην προηγούμενη παράγραφο.

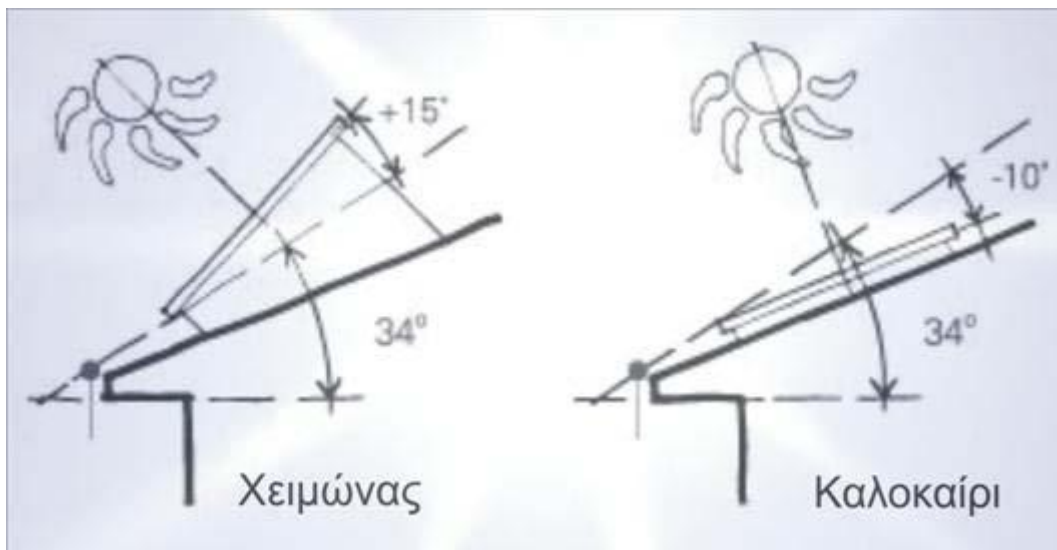


Συμπέρασμα:

- Κατά τη χειμερινή περίοδο η καταλληλότερη γωνία κλίσης είναι  $\beta = \lambda + (10^\circ - 15^\circ)$ .
- Κατά τη θερινή περίοδο η καταλληλότερη γωνία είναι  $\beta = \lambda - (10^\circ - 15^\circ)$ .

Παρατηρήσεις για την τοποθέτηση των συλλεκτών με ρυθμιζόμενη κλίση:

- Σε περιοχές με φυσικά εμπόδια ο συλλέκτης τοποθετείται έτσι ώστε να προκύπτει η μέγιστη ενεργειακή απολαβή κατά την διάρκεια όλου του έτους.
- Πρέπει να γίνεται σωστή μελέτη και σχεδιασμός της κατασκευής ώστε και στις δυο κλίσεις να επιτυγχάνεται η βέλτιστη γωνία για μέγιστη απόδοση.



Εικόνα 16 Στήριξη με δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας κλίσης





Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται συσσωρευτές, η χωρητικότητα των μπαταριών είναι δεδομένη και υπάρχει το ενδεχόμενο να μην καλύπτονται οι ανάγκες του φορτίου σε παρατεταμένες περιόδους συννεφιάς ή στην περίπτωση που το σύστημα θα πάθει κάποια βλάβη. Από την άλλη, η επιλογή συσσωρευτών πολύ μεγάλης χωρητικότητας είναι οικονομικά ασύμφορη. Για αυτό το λόγο υπάρχει μια βοηθητική γεννήτρια (συνήθως νηζελογεννήτρια), η οποία τίθεται σε λειτουργία όταν αυτό κριθεί αναγκαίο. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται υβριδικά Φ/Β συστήματα και μπορεί να περιέχουν και άλλες εναλλακτικές βοηθητικές πηγές ενέργειας (π.χ. ανεμογεννήτρια).

Τέλος, απαραίτητο μέρος ενός αυτόνομου συστήματος είναι οι διατάξεις για την μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β στοιχεία σε μορφή κατάλληλη για την τροφοδότηση των φορτίων, οι οποίες περιέχουν έναν DC/DC μετατροπέα σε συνδυασμό με έναν ανιχνευτή μέγιστης ισχύος (MPPT) και έναν DC/AC αντιστροφέα.

## **2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ( ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ)**

### **2.2.1 Γενική περιγραφή**

Το σημαντικότερο μέρος ενός αυτόνομου συστήματος ηλεκτροδότησης είναι η συστοιχία συσσωρευτών, επειδή αποτελεί το ακριβότερο αλλά και πιο φθαρτό μέρος του. Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να προνοείται να αποθηκεύεται, εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες και απαιτήσεις και κυρίως από το μέγιστο πλήθος των πιθανών συνεχόμενων ημερών συννεφιάς, τις αιχμές της κατανάλωσης και τον βαθμό αξιοπιστίας που θα πρέπει να παρουσιάζει το σύστημα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ή όχι βοηθητικών ενεργειακών πηγών.

Όλοι οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από την τάση, την χωρητικότητά τους και τους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης που μπορούν να προσφέρουν σε συγκεκριμένο ποσοστό εκφόρτισης. Το γινόμενο κύκλων ζωής με το βάθος εκφόρτισης παραμένει σταθερό συνεπώς όσο βαθύτερα εκφορτίζουμε μία μπαταρία τόσο μικρότερη θα είναι η διάρκεια ζωής της.

Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης με πολλούς κύκλους λειτουργίας. Συνήθεις τιμές είναι 1.500 κύκλοι λειτουργίας για εκφόρτιση ακόμη και 80% της ονομαστικής χωρητικότητας.

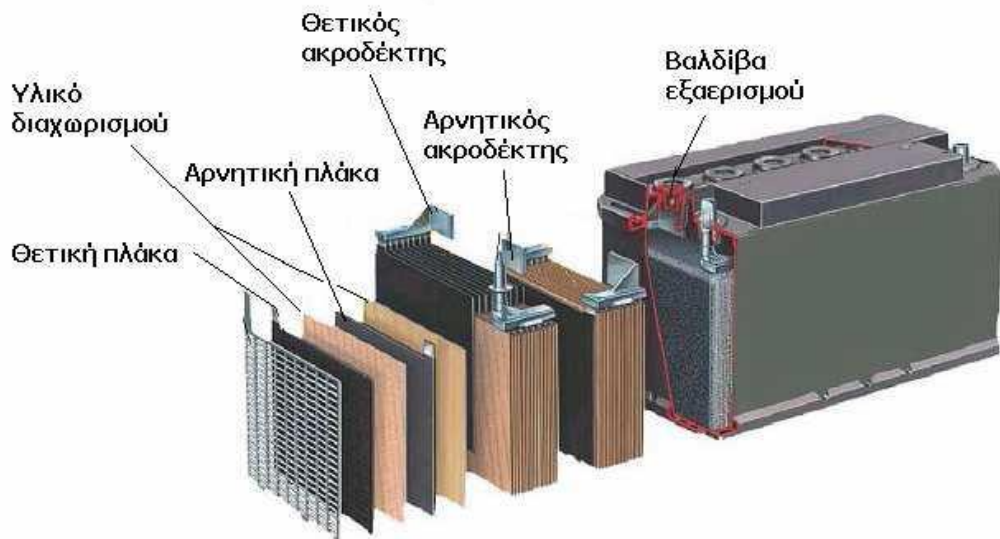
Οι μπαταρίες διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες, σε αυτές του ανοιχτού και αυτές του κλειστού τύπου. Βασικό πλεονέκτημα των μπαταριών ανοιχτού τύπου (flooded - συνήθης τύπος OpZs) είναι οι μεγάλες χωρητικότητες συνδυαζόμενες με πολλούς κύκλους ζωής και το χαμηλό σχετικά κόστος. Κύριο μειονέκτημα τους είναι ο καλός αερισμός που χρειάζονται καθώς και η τακτική συμπλήρωση υγρών. Αντίθετα οι μπαταρίες κλειστού τύπου (συνήθως VRLA-AGM) δεν απαιτούν συντήρηση αλλά είναι ακριβότερες για λιγότερους κύκλους ζωής (χρησιμοποιούνται κυρίως όταν απαιτούνται μεταβλητές κλίσεις πχ υποβρύχια).

Μια μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή/και παράλληλα. Ο τρόπος σύνδεσής τους εξαρτάται τόσο από την επιθυμητή τάση εξόδου όσο και τη χωρητικότητα της συστοιχίας. Τα τρία βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια μπαταρία είναι:

- Άνοδος: δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
- Κάθοδος: δέχεται τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και ανάγεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
- Ηλεκτρολύτης ή ιονικός αγωγός: αποτελεί το μέσο για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό του στοιχείου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Είναι συνήθως κάποιο διάλυμα που βοηθά στην ιονική αγωγιμότητα της διάταξης.

Η άνοδος πρέπει να έχει καλή αγωγιμότητα, σταθερότητα, ευκολία κατασκευής και μικρό κόστος. Συνήθως είναι κατασκευασμένη από κάποιο μέταλλο. Η κάθοδος με τη σειρά της πρέπει να είναι καλός οξειδωτικός παράγοντας και να μην αλληλεπιδρά χημικά με τον ηλεκτρολύτη. Η κάθοδος κατασκευάζεται συνήθως από οξείδια μετάλλων. Τέλος, ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει καλή ιονική αγωγιμότητα.

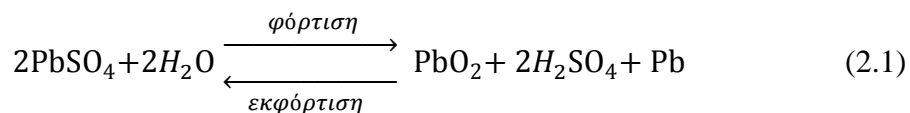
Τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου πρέπει να είναι διαχωρισμένα για την αποφυγή εσωτερικού βραχυκυκλώματος. Το υλικό διαχωρισμού πρέπει να είναι διαπερατό από τον ηλεκτρολύτη, για τη διατήρηση της ιονικής αγωγιμότητας του στοιχείου. Για τη μείωση της εσωτερικής αντίστασης των ηλεκτροδίων μπορεί να γίνει προσθήκη κατάλληλων υλικών. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται η δομή ενός συσσωρευτή.



Εικόνα 18 Η δομή ενός συσσωρευτή

## 2.2.2 Φόρτιση – Εκφόρτιση

Ανάλογα με το υλικό των ηλεκτροδίων τους, οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές χωρίζονται σε διάφορους τύπους. Οι οικονομικότεροι, με μεγαλύτερη απόδοση και αυτοί που μπορούν να χειριστούν μεγάλα και μικρά ρεύματα φόρτισης με υψηλή απόδοση για χρησιμοποίηση σε φωτοβολταϊκά συστήματα, είναι οι συσσωρευτές μολύβδου. Τα ηλεκτρόδιά τους είναι πλάκες από κράματα μολύβδου βυθισμένες σε διάλυμα θειικού οξέος. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε μια αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία, που περιγράφεται από την αμφίδρομη αντίδραση:



Συγκεκριμένα, οι συσσωρευτές αποτελούνται από κυψελίδες, δηλαδή από ζεύγη πλακών τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους και βυθισμένα στο ίδιο διάλυμα θειικού οξέος. Οι πλάκες του αφόρτιστου συσσωρευτή είναι καλυμμένες από θειικό μολύβδο ( $\text{PbSO}_4$ ).

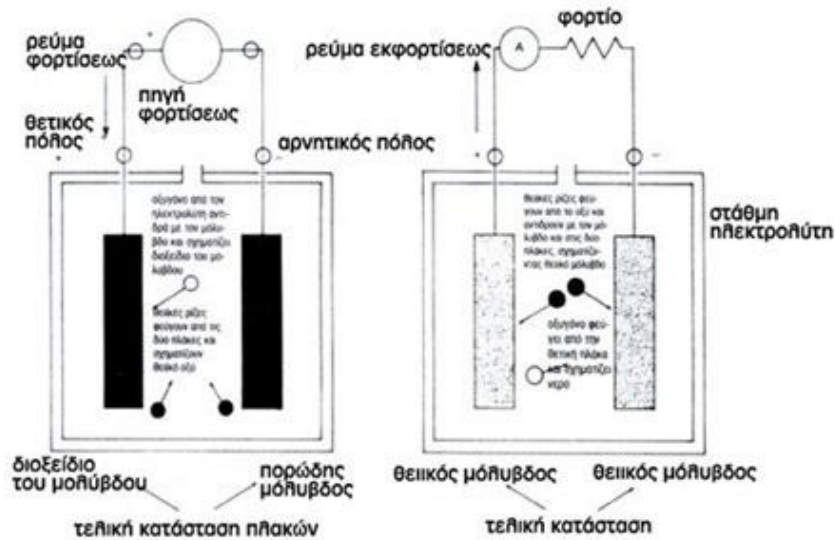
Κατά το στάδιο της φόρτισης, διασπάται ο θειικός μολύβδος και σχηματίζεται στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων οξειδίο του μολύβδου ( $\text{PbO}_2$ ) και στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων μεταλλικός ( $\text{Pb}$ ). Κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και την τροφοδότηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων, ο μολύβδος οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων προς ιόντα  $\text{Pb}^{2+}$  και δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα:



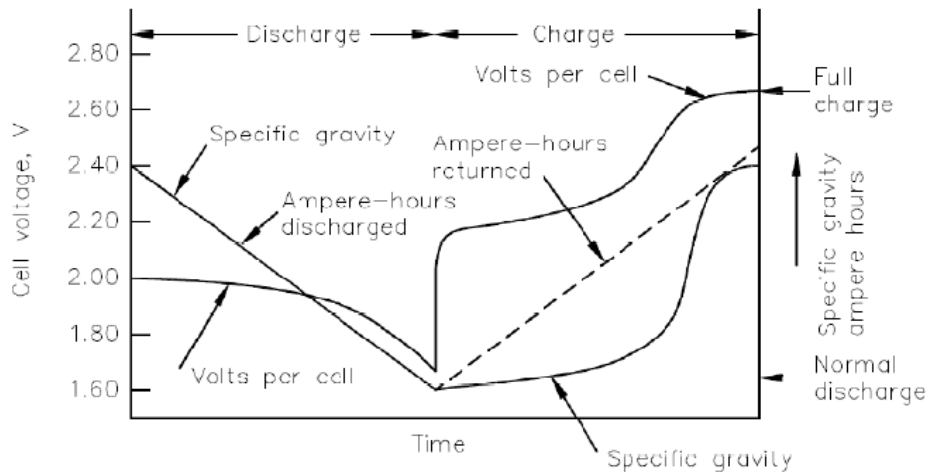
Ενώ στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων ο  $\text{Pb}^{4+}$  ανάγεται προς  $\text{Pb}^{2+}$ , παίρνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα:



Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλαδή τα ιόντα  $\text{Pb}^{2+}$ , ενώνονται με θειικά ιόντα ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) από το διάλυμα και ξανασχηματίζουν τον θειικό μολύβδο πάνω στις πλάκες των κυψελίδων. Έτσι, καταναλώνεται θειικό οξύ και αραιώνεται το διάλυμα στις κυψελίδες. Με την φόρτιση όμως που ακολουθεί, τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα, όπως δείχνει η αμφίδρομη αντίδραση και η περιεκτικότητά του αποκαθίσταται στην κανονική τιμή.



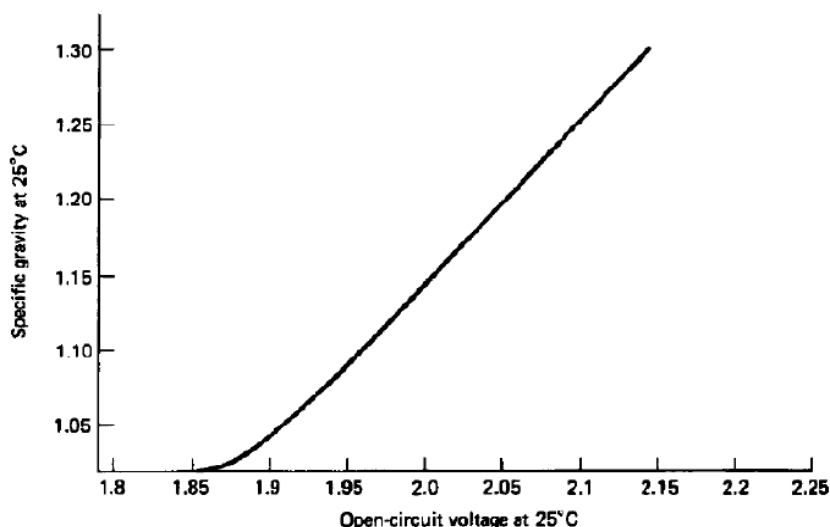
Εικόνα 19 Φόρτιση – εκφόρτιση μπαταρίας μολύβδου – οξέως



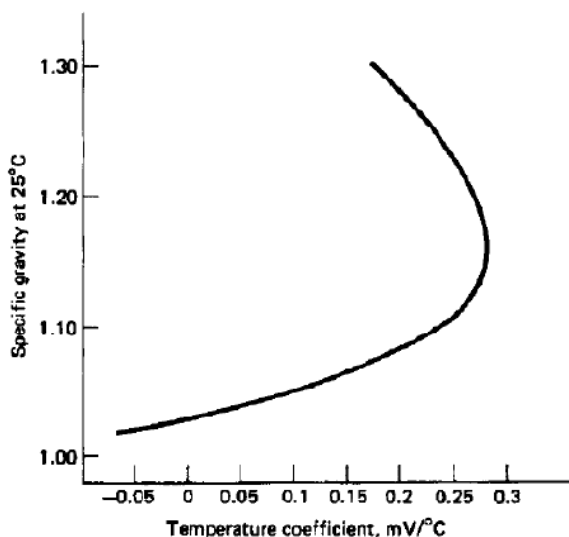
Εικόνα 20 Τυπικές χαρακτηριστικές τάσης και ειδικού βάρους στη συνεχόμενη φόρτιση και εκφόρτιση.

### 2.2.3 Χαρακτηριστικές ανοικτού κυκλώματος

Η μέγιστη τάση ανοικτού κυκλώματος που μπορεί να αναπτυχθεί σε μια κυψέλη μολύβδου είναι 2,041V, όπως προκύπτει από τις παραπάνω αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στον συσσωρευτή.



Εικόνα 21 Ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη ενός συσσωρευτή μολύβδου σε συνάρτηση με τη τάση ανοιχτοκύκλωσης.



Εικόνα 22 Ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη ενός συσσωρευτή μολύβδου σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος, σε σχέση με το θερμοκρασιακό συντελεστή.

Μια πολύ σημαντική παράμετρος για την λειτουργία μιας μπαταρίας είναι το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη, καθώς είναι ένας δείκτης της κατάστασης φόρτισης, στην οποία βρίσκεται μια κυψελίδα ή μια μπαταρία. Η τάση ανοιχτοκυκλώματος για ένα συσσωρευτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη, σύμφωνα με τη Σχέση:

$$V_{oc} = 2.047 + \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{a_{H_2SO_4}}{a_{H_2O}} \right) \quad (2.4)$$

όπου R η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή, T η θερμοκρασία και F η σταθερά του Faraday (96,487 Coulomb). Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται το διάγραμμα της τάσης ανοιχτοκύκλωσης σε σχέση με την συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη σε θερμοκρασία 25°C, το οποίο εμφανίζει γραμμική συμπεριφορά για τιμές του ειδικού

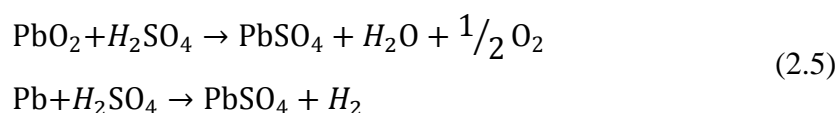


βάρους μεγαλύτερες από 1,10, ενώ για μικρότερες τιμές εμφανίζει έντονη απόκλιση από τη γραμμικότητα. Στο σχήμα 13 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη.

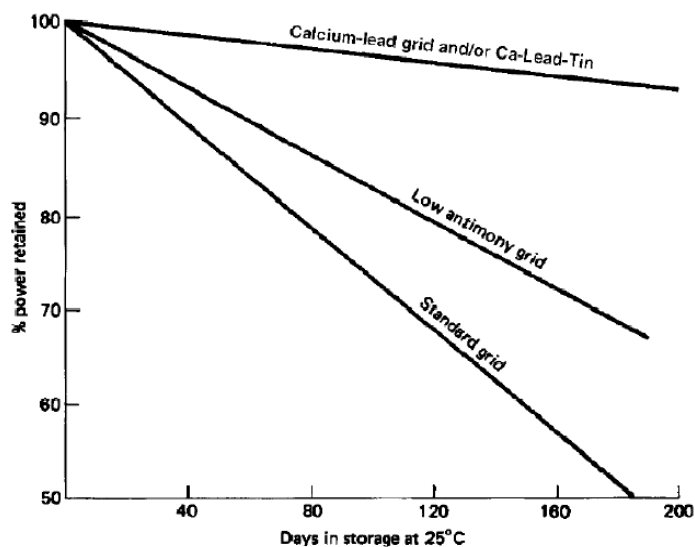
#### 2.2.4 Αυτό – εκφόρτιση

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

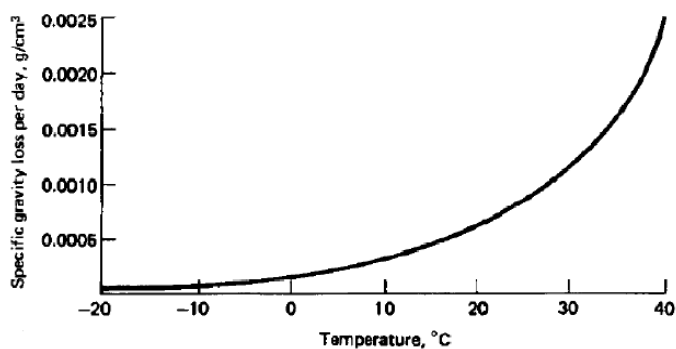
Ο μολύβδος και το διοξείδιο του μολύβδου είναι θερμοδυναμικά ασταθή και ως αποτέλεσμα αντιδρούν με τον ηλεκτρολύτη. Στο θετικό ηλεκτρόδιο παράγεται οξυγόνο και στο αρνητικό υδρογόνο, με ρυθμό που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση, σύμφωνα με τα παρακάτω:



Η πρώτη αντίδραση συμβαίνει στο θετικό ηλεκτρόδιο και ο μηχανισμός αυτό-εκφόρτισης είναι εν γένει μικρός (μικρότερος από 0,5% την ημέρα στους 25°C). Αντίθετα, η δεύτερη αντίδραση στο αρνητικό ηλεκτρόδιο έχει ταχύτερο ρυθμό, ειδικά σε κυψελίδες με καταλυτικά μεταλλικά ιόντα. Για έναν καινούργιο συσσωρευτή με μείγμα μολύβδου-αντιμόνιου οι απώλειες φόρτισης ανέρχονται περίπου στο 1% την ημέρα, αλλά οι απώλειες αυξάνονται κατά δύο έως πέντε φορές καθώς ο συσσωρευτής παλιώνει. Συσσωρευτές χωρίς αντιμόνιο εμφανίζουν μικρότερες απώλειες 0,5% την ημέρα, χωρίς να αυξάνεται ο ρυθμός αυτός με την πάροδο του χρόνου (Σχήμα 15α). Επειδή όμως το αντιμόνιο εμφανίζει και θετικά αποτελέσματα, η πλήρης απουσία του δεν είναι επιθυμητή και για αυτό χρησιμοποιούνται μείγματα με χαμηλή περιεκτικότητα αντιμόνιου.



(a)



(b)

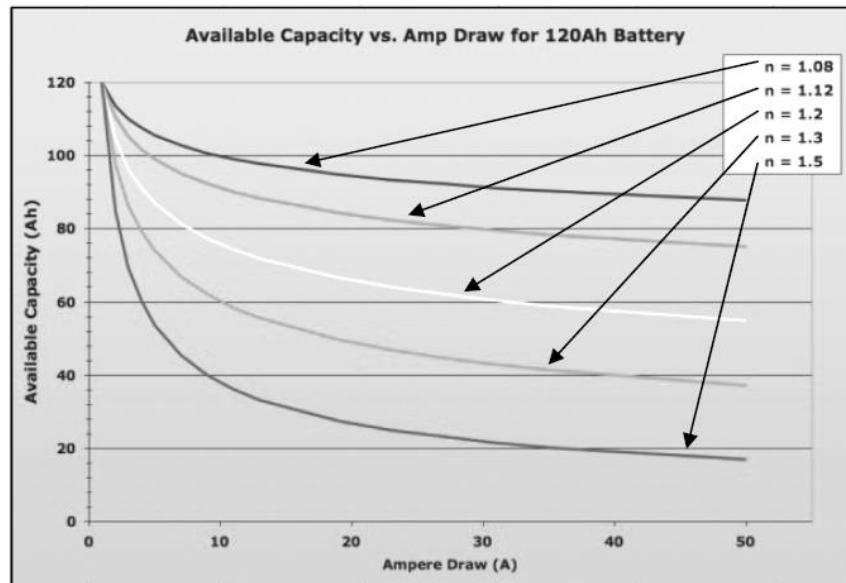
Εικόνα 23 Φαινόμενο αυτό-εκφόρτισης (a) Εναπομένουσα ενέργεια σε συνάρτηση με τον χρόνο σε θερμοκρασία 25°C και για 3 διαφορετικά μείγματα συσσωρευτών μολύβδου, (b) Απώλειες ειδικού βάρους ανά μέρα σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Ο ρυθμός αυτό-εκφόρτισης εξαρτάται και από την θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 15β. Παρατηρείται απότομη αύξηση των απωλειών για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 30°C και για αυτό το λόγο οι συσσωρευτές διατηρούνται σε μέρη με θερμοκρασία μικρότερη από αυτή, όχι όμως μικρότερη των 5°C, καθώς μετά δημιουργούνται προβλήματα κατά την κανονική λειτουργία τους.

## 2.2.5 Χωρητικότητα συσσωρευτών

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

ηλεκτρικής ενέργειας που έχει την ικανότητα να αποθηκεύσει ένας συσσωρευτής, εξαρτάται από την τάση του.



Εικόνα 24 Φαινόμενο Peukert. Χωρητικότητα ενός συσσωρευτή συναρτήση του ρεύματος εκφόρτισης, για διαφορετικές τιμές της σταθεράς n.

Η χωρητικότητα μιας μπαταρίας εξαρτάται άμεσα από τον ρυθμό με τον οποίο εκφορτίζεται. Το φαινόμενο Peukert εξηγεί αυτή τη σχέση χωρητικότητας – ρυθμού εκφόρτισης και σύμφωνα με αυτό, ο χρόνος για την εκφόρτιση ενός συσσωρευτή μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το ρεύμα με το οποίο γίνεται αυτή η εκφόρτιση. Η Σχέση (3.6) είναι μια εμπειρική σχέση για το φαινόμενο Peukert:

$$I^n \cdot t = K \quad (2.6)$$

όπου το ρεύμα εκφόρτισης σε Ampere, t ο χρόνος εκφόρτισης σε sec, και K, n σταθερές οι οποίες εξαρτώνται από το είδος του συσσωρευτή. Η σταθερά K κάθε συσσωρευτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη και εισάγοντας μια διόρθωση για τη θερμοκρασία παίρνουμε

$$K = K_o(1 + \alpha \cdot T) \quad (2.7)$$

όπου  $K_o$ ,  $\alpha$  σταθερές και T η θερμοκρασία.

Στην εξίσωση Peukert είναι δυνατό να εισαχθεί και ένας παράγοντας για να ληφθεί υπόψη και το πάχος των ηλεκτροδίων, οπότε η Σχέση (3.6) γίνεται:

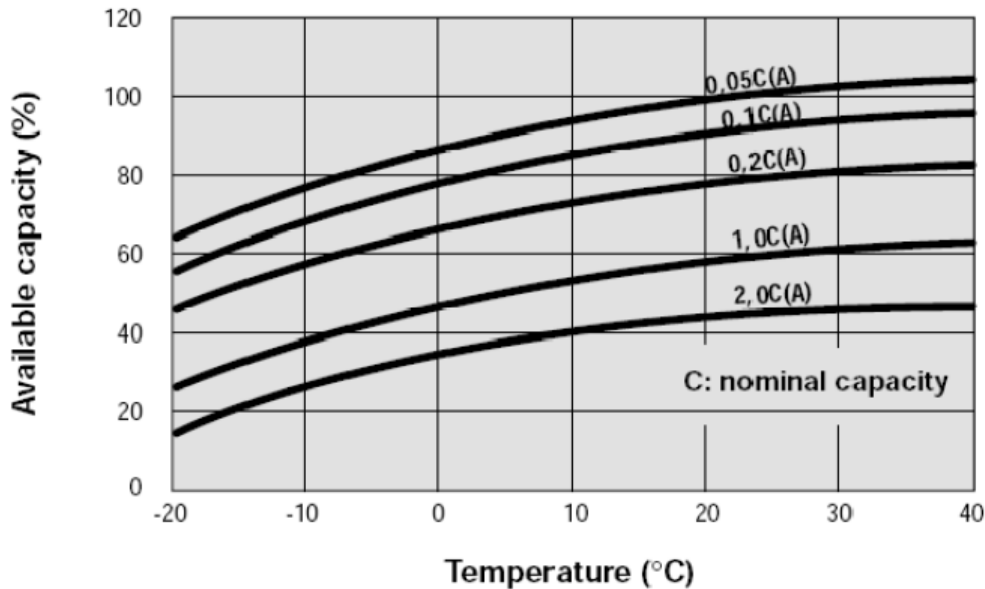
$$I^n \left( \frac{t}{d^{2-n}} \right) = K_o(1 + \alpha \cdot T) \quad (2.8)$$

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

Η αποθηκευμένη ενέργεια στον συσσωρευτή είναι το γινόμενο της χωρητικότητάς του σε Ah επί την ονομαστική τάση του. Η ονομαστική αυτή χωρητικότητα δεν είναι ποτέ και η πραγματική, λόγω της εσωτερικής αντίστασης των

συσσωρευτών. Συνήθως από ένα συσσωρευτή μπορεί να εξαχθεί ένα 80% αυτής της ενέργειας, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη κατά τη σχεδίαση ενός αυτόνομου συστήματος.

Ακόμα από την εξίσωση Peukert φαίνεται ότι χωρητικότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του συσσωρευτή. Συγχρόνως όμως επιταχύνονται οι μηχανισμοί διάβρωσης και μειώνεται η διάρκεια ζωής του (Σχήμα 16).



Εικόνα 25 Διαθέσιμη χωρητικότητα σε σχέση με τη θερμοκρασία για διάφορες τιμές ρεύματος.

## 2.2.6 Διάρκεια ζωής συσσωρευτή

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

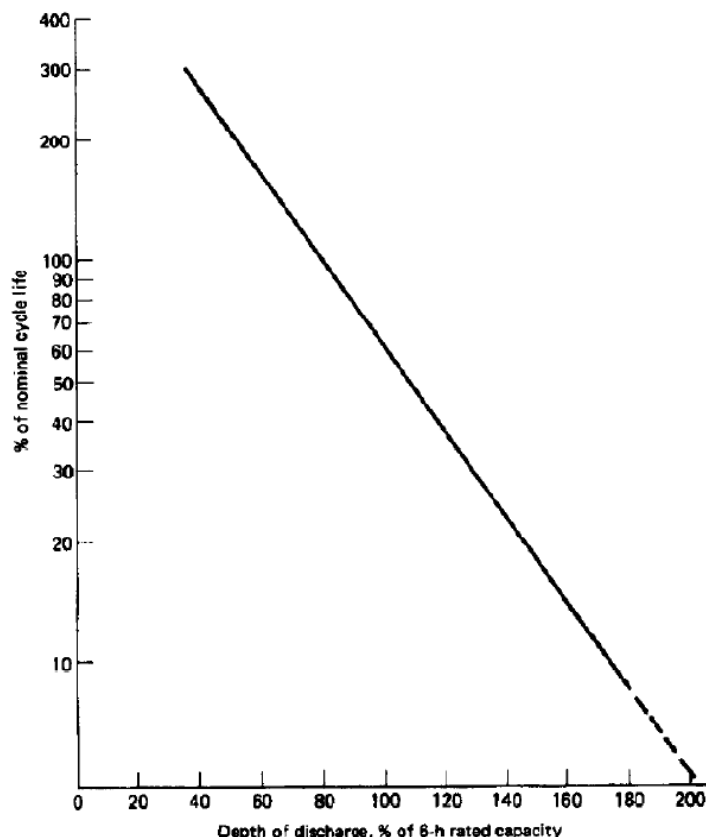
- ♦ Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή.
- ♦ Το βάθος εκφόρτισης. Η εκφόρτιση των συσσωρευτών πέρα από την επιτρεπόμενη από τον κατασκευαστή τιμή του, μειώνει δραστικά τόσο τη διάρκεια ζωής όσο και τη χωρητικότητα. Αν το βάθος εκφόρτισης υπερβεί το 80% τότε ο συσσωρευτής αποκλίνει από την ονομαστική διάρκεια ζωής του.
- ♦ Το ποσοστό υπερφόρτισης. Αντίστοιχα αποτελέσματα έχει η φόρτιση του συσσωρευτή πάνω από τα επιτρεπτά όρια.
- ♦ Η τάση και το ρεύμα φόρτισης. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης ένα αρχικό ρεύμα μεγάλης τιμής μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες. Το ίδιο συμβαίνει και με μια πιθανή υπέρταση.

Όταν οι μπαταρίες δεν είναι σε χρήση αποφορτίζονται σε κάποιο μικρό βαθμό, σε ποσοστό που μπορεί να φτάσει το 4% ανά εβδομάδα. Οι μπαταρίες που δεν χρησιμοποιούνται για κάποιο διάστημα καλό είναι να παραμένουν φορτισμένες. Αυτό μπορεί να γίνει με τη βοήθεια κάποιων πολύ μικρών φωτοβολταϊκών πάνελ φόρτισης (5 – 15 W), τα οποία δεν μπορούν να φορτίσουν από την αρχή τις μπαταρίες, απλώς διατηρούν φορτισμένες τις γεμάτες μπαταρίες.

Όταν οι μπαταρίες δεν χρησιμοποιούνται για μεγάλα διαστήματα μειώνεται η χωρητικότητά τους και γενικώς η διάρκεια ζωής τους. Αυτό οφείλεται στο περιεχόμενο των μπαταριών, δηλαδή το νερό και το οξύ. Το οξύ είναι βαρύτερο από το νερό και επομένως κάθεται στο κάτω μέρος. Αν λοιπόν η μπαταρία δεν είναι σε χρήση αυτό το φαινόμενο γίνεται όλο και πιο έντονο και τελικά «σταθεροποιείται» στην βάση της μπαταρίας. Αυτός είναι ένας ακόμα λόγος για να διατηρούνται φορτισμένες οι μπαταρίες.

Σε μια μπαταρία μπορεί να προκληθεί ανεπανόρθωτη ζημιά όταν αποφορτιστεί σε επίπεδα κάτω του 80%. Γενικότερα μια μπαταρία μπορεί να δώσει μεγαλύτερη τάση όταν είναι πιο φορτισμένη. Καλό είναι η αποφόρτισή της να μην υπερβαίνει το 50% των δυνατοτήτων της, παρόλο που μπορεί να αντέξει μέχρι και στο 20%. Αυτός ο περιορισμός πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό απαιτήσεων, καθώς δεν είναι διαθέσιμη για χρήση όλη η ονομαστική χωρητικότητα.

Η απόδοση των μπαταριών έχει μεγάλη εξάρτηση από το περιβάλλον. Το κρύο μειώνει την απόδοση της μπαταρίας, ποσοστό που μπορεί να φτάσει μέχρι και στο 20% όταν υπάρχει παγετός. Αντίθετα, με την άνοδο της θερμοκρασίας αυξάνεται και η χωρητικότητα της μπαταρίας. Επίσης, όταν πρέπει να αυξηθεί η χωρητικότητα και επομένως συνδέουμε μπαταρίες μεταξύ τους, αυτές θα πρέπει να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά γιατί στην αντίθετη περίπτωση θα έχουμε απώλειες.



Εικόνα 26 Διάρκεια ζωής ως ποσοστό της ονομαστικής, σε συνάρτηση με το βάθος εκφόρτισης.

### **2.2.7 Χαρακτηριστικά μπαταριών για χρήση σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα**

Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία μπαταρία σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, θα πρέπει να έχει όσο το δυνατόν περισσότερα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Καλή αναλογία τιμής – απόδοσης
2. Μικρές απαιτήσεις για συντήρηση
3. Αρκετά μεγάλη διάρκεια ζωής
4. Χαμηλή αυτοεκφόρτιση και υψηλή ενεργειακή απόδοση
5. Ικανότητα φόρτισης με μικρά ρεύματα φόρτισης
6. Δυνατότητα ανακύκλωσης
7. Ανθεκτικότητα σε δονήσεις

## 3. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου που δημιουργείται από τη διαφορά της θερμοκρασίας του αέρος που με τη σειρά της δημιουργεί υπό ορισμένες προϋποθέσεις, διαφορές βαρομετρικής πίεσης μεταξύ κοντινών τόπων. Δηλαδή, εξαρτάται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία.

Αν δύο κοντινές περιοχές συμβεί να μην έχουν την ίδια θερμοκρασία, τότε η ατμοσφαιρική πίεση της πιο ψυχρής περιοχής θα είναι μεγαλύτερη της θερμότερης περιοχής, με αποτέλεσμα να κινηθεί αέρια μάζα από τη ψυχρότερη περιοχή προς τη θερμότερη.

Από την ηλιακή ενέργεια που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γής, ένα μόνο μικρό ποσοστό μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια μαζών στην ατμόσφαιρα (περίπου 1,5 % - 2%). Η κινητική αυτή, με βάση την σημερινή τεχνολογία εκμετάλλευσής της, θα μπορούσε να καλύψει τις υπερδιπλάσιες ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας.

Η αιολική ενέργεια θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και είναι φιλική προς το περιβάλλον. Αποτελεί πλέον μία πολύ αξιόπιστη αλλά και οικονομικά βιώσιμη λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αφού το κόστος κατασκευής των ανεμοκινητήρων έχει μειωθεί αρκετά.

Υπολογίζεται ότι στο 25 % της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1 m/s, σε ύψος 10 m πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πλέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτήν την τιμή, τότε μπορούμε να εκμεταλλευτούμε το αιολικό δυναμικό του τόπου, με την σημερινή τεχνολογία ανεμογεννητριών.

Η Ελλάδα διαθέτει πλούσιο αιολικό δυναμικό και η εκμετάλλευση του μπορεί να την βοηθήσει στην ανάπτυξη της.

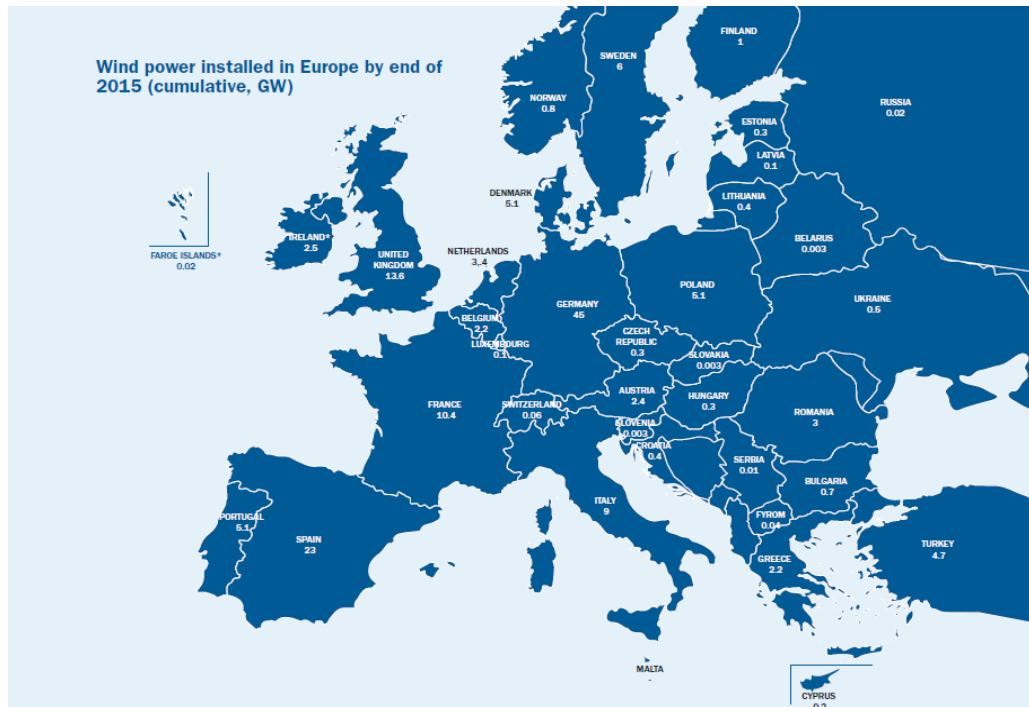
Η συνολική καθαρή αιολικής ισχύς που εγκαταστάθηκε κατά το 2015 ήταν 171,8 MW. Ενώ ήταν υπό κατασκευή νέα αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 210,7 MW.

Σύμφωνα με την ΕΛΕΤΑΕΝ, το σύνολο της αιολικής ισχύος που κατά τα τέλη 2015 βρισκόταν σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία είναι: 2150,8 MW αυξημένη κατά 8,7% σε σχέση με πέρυσι.

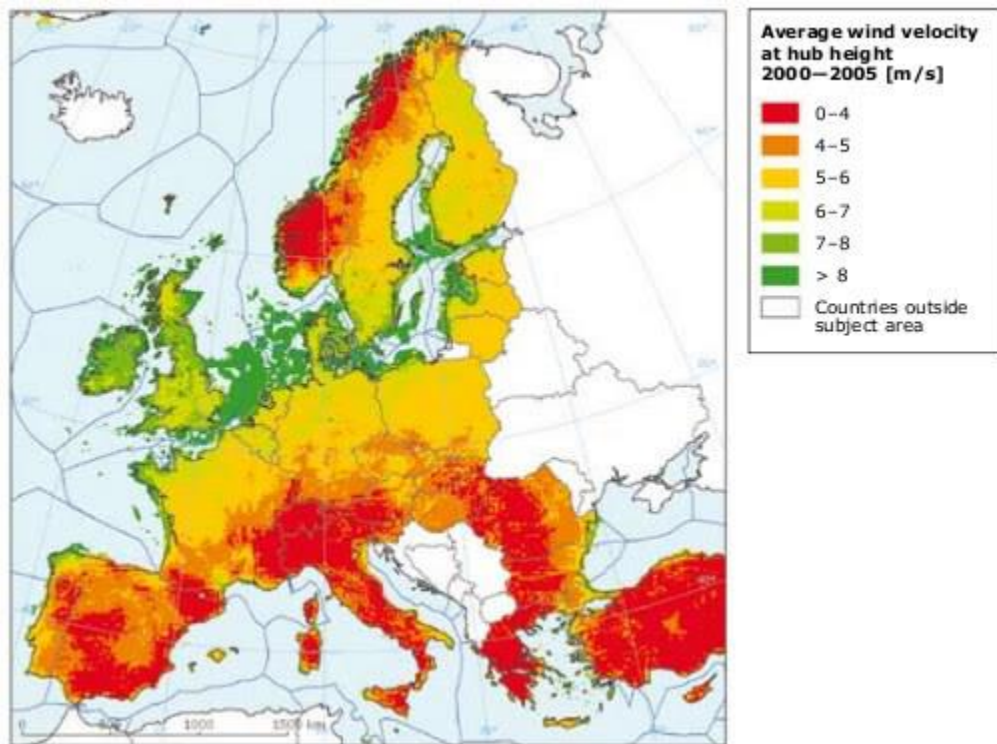
Η ισχύς αυτή κατανέμεται ως εξής:

Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά : 322,6 MW

Στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα: 1828,2 MW



Εικόνα 27 Κατανομή της παραγωγής αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη.



Εικόνα 28 Μέση ταχύτητα του ανέμου στην ηπειρωτική Ευρώπη



### 3.1.1 Ταχύτητα ανέμου

Η κίνηση του ανέμου ακολουθεί τους νόμους της μηχανικής των ρευστών, οι οποίοι διέπουν τη τυρβώδη ροή ενός ρευστού. Η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα ιδιαίτερο μεταβλητό μέγεθος, το οποίο εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις ακόμα και σε μικρά χρονικά διαστήματα.

Σύμφωνα με τη 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  $V'(t)$ :

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) \quad (3.1)$$

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

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V(t') \cdot dt \quad (3.2)$$

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.

### 3.1.2 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος

Η 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 οριακό στρώμα. Εκτείνεται από μερικά μέτρα έως και 2km.

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. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

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

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \frac{\ln \left[ \frac{z}{z_0} \right]}{\ln \left[ \frac{z_1}{z_0} \right]} \quad (3.3)$$

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

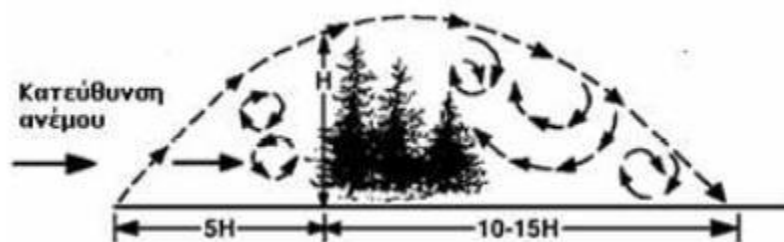
2. Η εκθετική σχέση (power law) η οποία εκφράζεται σαν:

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \left( \frac{z}{z_1} \right)^\alpha \quad (3.4)$$

και δίνει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 'z' από το έδαφος συναρτήσει της παραμέτρου 'α', της οποίας η τιμή εξαρτάται από την ταχύτητα 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.

### 3.1.3 Επίδραση εμποδίων στη ροή του ανέμου

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



Εικόνα 29 Χώρος ισχυρών αναταράξεων γύρω από την περιοχή μεμονωμένου εμποδίου

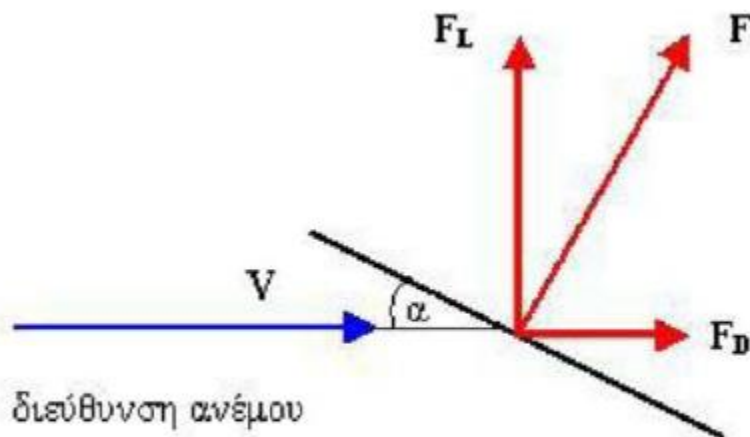
### 3.1.4 Άντωση και αντίσταση

Άνεμος με ταχύτητα  $v$  προσπίπτει σε κάποια επίπεδη επιφάνεια  $S$ , η οποία σχηματίζει με την διεύθυνση του ανέμου γωνία  $\alpha$  (γωνία προσβολής). Ο άνεμος ασκεί μια δύναμη  $F$  στην επιφάνεια  $S$  που αναλύεται σε δύο συνιστώσες. Η μια συνιστώσα  $F_D$  είναι παράλληλη με την ταχύτητα  $v$  και καλείται αντίσταση (Drag), ενώ η άλλη συνιστώσα  $F_L$  είναι κάθετη προς την διεύθυνση της ταχύτητας και καλείται άντωση (Lift). Η αντίσταση σε αντίθεση με την άντωση έχει να κάνει με φαινόμενα κατανάλωσης ενέργειας. Τα μέτρα των δύο συνιστωσών είναι:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho S v^2 C_D(\alpha) \quad (3.5)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho S v^2 C_L(\alpha) \quad (3.6)$$

Όπου  $C_D(\alpha)$  και  $C_L(\alpha)$  είναι συντελεστές που προσδιορίζονται πειραματικά και είναι συνάρτηση της γωνίας προσβολής  $\alpha$ . Στο Σχήμα (2.3) βλέπουμε την εμφάνιση των δυο δυνάμεων κατά την προσβολή μιας επιφάνειας από τον άνεμο



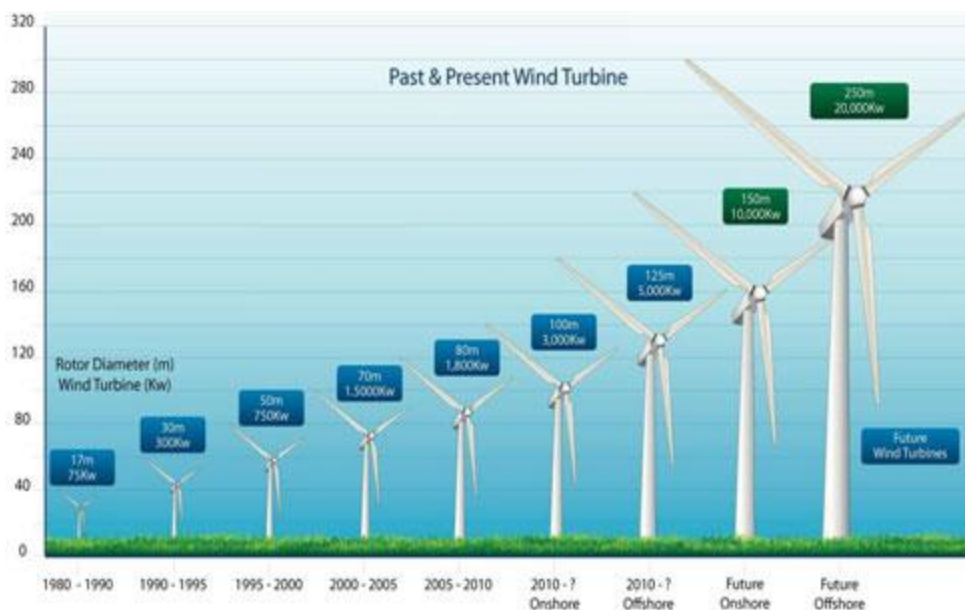
$$\text{όπου } F = \sqrt{F_L^2 + F_D^2}$$

Εικόνα 30 :Συνιστώσα  $F_D$  και συνιστώσα  $F_L$

Στην περίπτωση μιας ανεμογεννήτριας η επιφάνεια αντικαθίσταται από τα πτερύγια και οι συντελεστές  $C_D$  και  $C_L$  χαρακτηρίζουν το σχήμα των πτερυγίων. Η ανάλυση των δυνάμεων παραμένει η ίδια. Ανάλογα τώρα με τον τύπο της ανεμογεννήτριας και την σχεδίαση των πτερυγίων της έχουμε διαφορετική περίπτωση κινητήριας δύναμης, κάποιες αξιοποιούν την δύναμη  $F_D$  μειώνοντας την  $F_L$  ενώ κάποιες άλλες το αντίστροφο. Στην πράξη στις ανεμογεννήτριες δρουν πάντα και οι δύο συνιστώσες.

### 3.2 ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Στόχος των ανεμογεννητριών είναι η αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου στο βέλτιστο δυνατό βαθμό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία τους εξελίσσεται συνεχώς τόσο σε ισχύ όσο και σε μέγεθος. (Εικόνα 23)



Εικόνα 31 Το μέγεθος και η ισχύς των Α/Γ στο παρελθόν και στο μέλλον

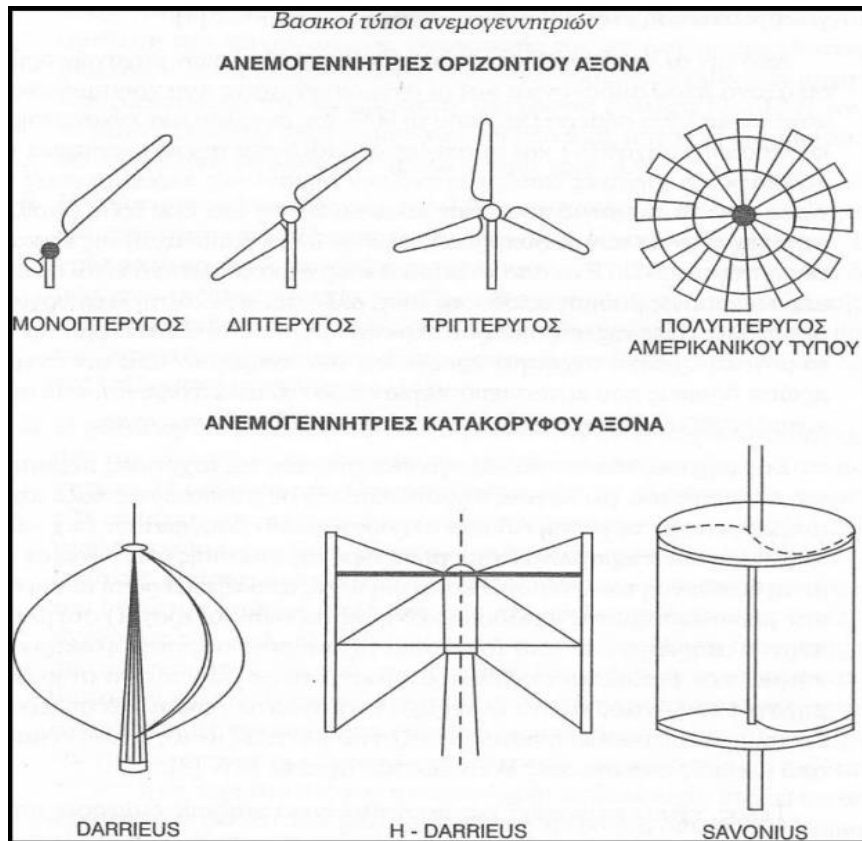
Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία παραγωγής ανεμογεννητριών παρουσιάζει μεγάλη οικονομική άνθηση. Τις ανεμογεννήτριες μπορούμε να τις χωρίσουμε ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων (πίνακας X) αλλά κατά κύριο λόγο με την θέση του άξονα περιστροφής ως προς την Γη. Ανάλογα με την θέση του άξονα υπάρχουν οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT-horizontal axis wind turbine) και οι καθέτου άξονα (VAWT-vertical axis wind turbine) (σχήμα X). Επίσης, χωρίζονται ανάλογα με την ονομαστική ταχύτητα του δρομέα σε αργόστροφους και σε ταχύστροφους ανεμοκινητήρες, καθώς και ανάλογα με το μέγεθος τους σε μικρές, μεσαίες και μεγάλες ανεμογεννήτριες (πίνακας 2).

Πίνακας 2 Κατάταξη ανεμογεννητριών σε σχέση με το μέγεθος τους

ΜΕΓΕΘΟΣ Α/Γ	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ	ΚΟΣΤΟΣ ΑΝΑ kW	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
ΜΙΚΡΟΙ	50kW ~ 30kW	>€2000	~4,5 m/s	Σε απομονωμένες περιοχές, μη συνδεδεμένες με το δίκτυο
ΜΕΣΑΙΕΣ	30kW ~ 350kW	>€1000	~5,1 m/s	Σε μικρές κοινότητες, για υβριδικά συστήματα και για διεσπαρμένη παραγωγή
ΜΕΓΑΛΟΙ	350kW ~5MW	<€1000	~5,8 m/s	Στα αιολικά πάρκα

Πίνακας 3 Κατάταξη ανεμογεννητριών σε σχέση με το πλήθος πτερυγίων

ΠΛΗΘΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΣΥΓΚΡΙΣΗ
ΟΛΙΓΟΠΤΕΡΥΓΟΙ (1~3)	Μεγάλος συντελεστής ισχύος και βέλτιστη λειτουργία σε μεγάλο συντελεστή ταχυστροφίας λ.	Ο τριπτέρυγος δρομέας είναι κατά 5% αποδοτικότερος από το διπτέρυγο και τα φορτία που ενεργούν σε κάθε πτερύγιο είναι μικρότερα, είναι όμως ακριβότερος. Ο μονοπτέρυγος δρομέας είναι φθηνότερος, έχει 10% μικρότερη ενεργειακή απόδοση από το διπτέρυγο, αλλά έχει θορυβώδη λειτουργία και η ζυγοστάθμισή του παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα.
ΠΟΛΥΠΤΕΡΥΓΟΙ (>3)	Μικρή διάμετρος, μικρή περιφερειακή ταχύτητα και μεγάλη ροπή.	Είναι λίγο ακριβότεροι από τους ταχύστροφους ολιγοπτέρυγους.



**Εικόνα 32 Βασικοί τύποι ανεμογεννητριών**

Η τιμή του συντελεστή ταχυστροφίας  $\lambda$  αποτελεί βασικό κριτήριο για την κατάταξη μιας ανεμογεννήτριας σε αργόστροφη ή ταχύστροφη και ορίζεται ως:

$$\lambda = \frac{\omega_0 * R}{V_W} \quad (3.7)$$

Όπου  $R$  είναι η ακτίνα της πτερωτής σε (m),  $\omega_0$  η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της εγκατάστασης σε (rad/s) και  $V_W$  η ταχύτητα ροής του ανέμου στην από πάνω πλευρά του δρομέα σε (m/s). Ο συντελεστής ταχυστροφίας  $\lambda$  για τους τριπτέρυγους δρομείς είναι μεταξύ 6 με 8, για τους διπτέρυγους δρομείς μεταξύ 10 με 12 και για τους μονοπτέρυγους δρομείς παίρνει ακόμα μεγαλύτερες τιμές.

Ακόμα μια παράμετρος που χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό και την ταξινόμηση των ανεμογεννητριών είναι η παράμετρος στιβαρότητας (solidity) της κατασκευής  $\sigma$ . Η στιβαρότητα συνήθως ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού όλων των πτερυγίων, προς το εμβαδό της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή. Για αιολικές μηχανές οριζοντίου άξονα η παράμετρος αυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{z * c * R^2}{\pi * R} \quad (3.8)$$

ενώ για αιολικές κατακόρυφου άξονα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \frac{(z * c)}{R} \quad (3.9)$$

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

### 3.2.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονά τους παράλληλο προς την επιφάνεια της Γης και συνήθως παράλληλα και με την διεύθυνση του ανέμου. Αυτού του τύπου οι ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως 2 ή 3 πτερύγια, σε αντίθεση με τους ανεμόμυλους που έχουν πολλά. Ένα χαρακτηριστικό των πτερυγίων αυτών είναι ότι έχουν μεγάλο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης. Τα κύρια μηχανικά μέρη, όπως φαίνονται και στην εικόνα, είναι ο δρομέας ή φτερωτή, το σύστημα μετάδοσης κίνησης (κύριος άξονας και κιβώτιο ταχυτήτων), η γεννήτρια, ο πύργος στήριξης στον οποίο είναι τοποθετημένος ο δρομέας, το σύστημα πέδησης (η ανεμογεννήτρια πρέπει να μειώνει ταχύτητα όταν υπερβαίνει ένα όριο ταχύτητας, για να μην υποστεί κάποια βλάβη) και το σύστημα ελέγχου, σύνδεσης και αποθήκευσης (συσσωρευτές) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος υπάρχει και σύστημα προσανατολισμού ανάλογα με την διεύθυνση του ανέμου, το οποίο γίνεται είτε με αισθητήρες είτε με καθοδηγητικό πτερύγιο (κάτι σαν ανεμοδείκτη).



Εικόνα 33 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα είναι τα εξής:

#### Πλεονεκτήματα

- Λόγω του ύψους της ανεμογεννήτριας, εκμεταλλεύεται και άνεμο μεγαλύτερης ταχύτητας.
- Εύκολη συναρμολόγηση.
- Υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή.
- Υψηλότερη αποδοτικότητα και καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα.

#### Μειονεκτήματα

- Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θορύβου.
- Λόγω του μεγέθους κοστίζει πολύ η κατασκευή και η μεταφορά της.
- Για να εκμεταλλεύεται η ανεμογεννήτρια συνέχεια τον άνεμο, χρειάζεται έναν μηχανισμό περιστροφής για τον προσανατολισμό των πτερυγίων στην διεύθυνση του ανέμου.

### **3.2.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα**

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα μπορούν να εκμεταλλευτούν το άνεμο ανεξάρτητα από τη κατεύθυνση του ανέμου και δεν υπάρχει η ανάγκη ρύθμισης του δρομέα με αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες αυτές περιστρέφονται γύρω από έναν κάθετο άξονα προς την κατεύθυνση του ανέμου. Το παραγόμενο μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα στο έδαφος όπου εγκαθίσταται η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.





Εικόνα 34 ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα που αναπτύχθηκαν είναι του τύπου Savonius και Darrieus. Η διαφορά αυτών των δυο εκτός από τον σχεδιασμό τους είναι ότι η Savonius ξεκινάει πιο εύκολα και είναι δεν τόσο αποδοτική ενώ η Darrieus δεν ξεκινάει τόσο εύκολα αλλά είναι πολύ αποδοτική. Για αυτό έχουν κατασκευαστεί ανεμογεννήτριες που είναι συνδυασμός και των δυο τύπων, έτσι ώστε με την Savonius να έχουμε εύκολη εκκίνηση και με την Darrieus τα υπόλοιπα που αναφέραμε παραπάνω. Υπάρχουν επίσης πολλές ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, αλλά όλες βασίζονται στην λογική των Savonius και Darrieus απλά γίνονται μετατροπές στον σχεδιασμό τους. Γενικά πάντως τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα είναι τα έξης:

#### Πλεονεκτήματα

- Εκμεταλλεύεται τον άνεμο από όλες τις διευθύνσεις.
- Η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων είναι τοποθετημένο στην βάση και έτσι είναι πιο εύκολη η τοποθέτηση και η συντήρηση αυτών των μηχανικών μερών.
- Παράγει λιγότερο θόρυβο.
- Μπορεί να τοποθετηθεί σε περισσότερα μέρη λόγω του μεγέθους( όπως μέσα στην πόλη, στις ταράτσες, σε αυτοκινητόδρομους).
- Η κατασκευή της είναι πιο απλή και χαμηλότερου κόστους.

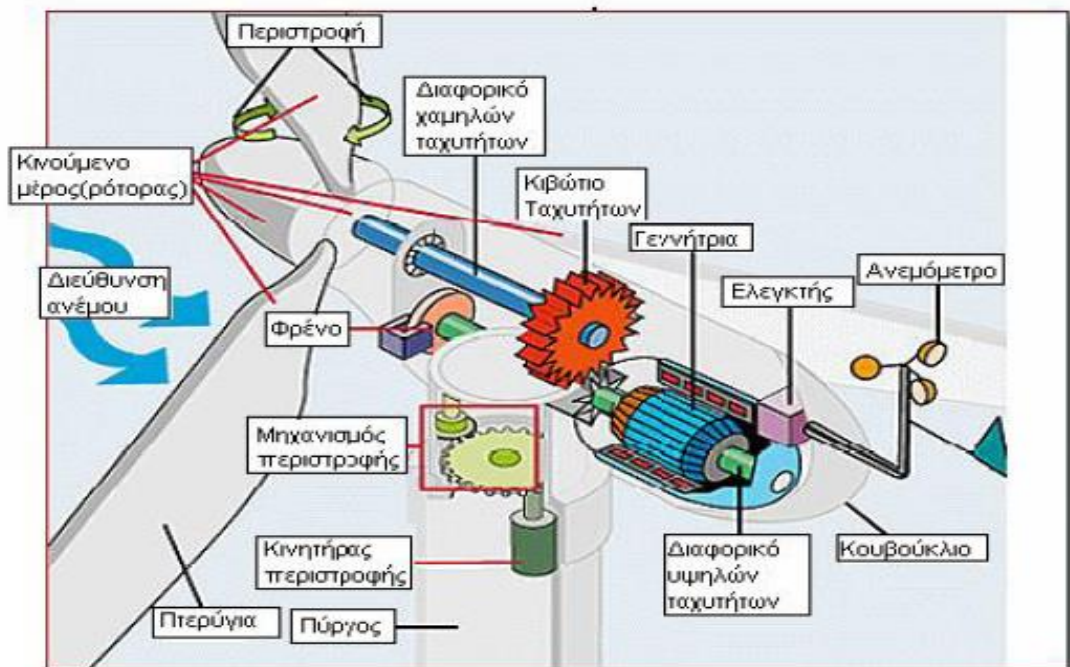
#### Μειονεκτήματα

- Χαμηλή απόδοση.

- ♦ Ροπή εκκίνησης υψηλή που σημαίνει χαμηλή ταχύτητα περιστροφής.
- ♦ Λόγω του μικρού μεγέθους δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί άνεμο υψηλών ταχυτήτων.
- ♦ Υπάρχει δυσκολία συντήρησης σε κάποια μηχανικά μέρη, για παράδειγμα η αλλαγή των εδράνων κύλισης.

### 3.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Μια Α/Γ αποτελείται από τα παρακάτω μέρη (Εικόνα 36 ):



Εικόνα 35 Δομή ανεμογεννήτριας

**Ανεμόμετρο:** Μετράει την ταχύτητα του ανέμου και μεταδίδει τα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου στον ελεγκτή.

**Πτερύγια:** Τα πτερύγια είναι το τμήμα της Α/Γ 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 Α/Γ έχουν δύο ή τρία πτερύγια.

**Φρένο:** Σταματάει το ρότορα μηχανικά, ηλεκτρικά ή υδραυλικά, σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

**Ελεγκτής:** Ξεκινάει την γεννήτρια με ταχύτητες ανέμου περίπου 8 έως 16 μίλια ανά ώρα (m/h) και σβήνει τη γεννήτρια στα περίπου 55 m/h. Οι ανεμογεννήτριες δεν λειτουργούν σε ταχύτητες ανέμου πάνω από περίπου 55 μίλια/ώρα, διότι μπορεί να καταστραφούν από τους ισχυρούς ανέμους.

Κιβώτιο ταχυτήτων: Συνδέει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής από περίπου 30-60 περιστροφές ανά λεπτό (rpm), σε περίπου 1,000-1,800 rpm, αυτή είναι η ταχύτητα περιστροφής που απαιτείται από τις περισσότερες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα δαπανηρό (και βαρύ) μέρος της ανεμογεννήτριας και οι μηχανικοί πειραματίζονται με άμεσης μετάδοσης ανεμογεννήτριες που λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δεν χρειάζονται κιβώτια ταχυτήτων.

Γεννήτρια: Είναι ένας σύγχρονος εναλλακτήρας, δηλαδή μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος με συνήθως 4 ή 6 πόλους. Συνδέεται με την έξοδο του κιβωτίου πολλαπλασιασμού των στροφών (κιβώτιο ταχυτήτων) μέσω ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου. Η ηλεκτρογεννήτρια μπορεί να είναι και μηχανή συνεχούς ρεύματος (DC). Μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες παράγουν συνεχή τάση τροφοδοσίας και χρησιμοποιούνται για ηλεκτροδότηση σκαφών και μικρών κατοικιών. Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, που η παραγόμενη από αυτές τάση πρόκειται να παραλληλιστεί με το δίκτυο, η ηλεκτρογεννήτρια είναι μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Οι γεννήτριες χωρίζονται σε μεγάλες κατηγορίες : (α) τις σύγχρονες και (β) τις ασύγχρονες μηχανές.

Κουβούκλιο: Το κουβούκλιο 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.

Μηχανισμός περιστροφής: Προσανατολίζει την ανεμογεννήτρια ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου. Ελέγχεται από τον κινητήρα περιστροφής ο οποίος δέχεται εντολές από ένα ηλεκτρονικό σύστημα παρακολούθησης της διεύθυνσης του ανέμου.

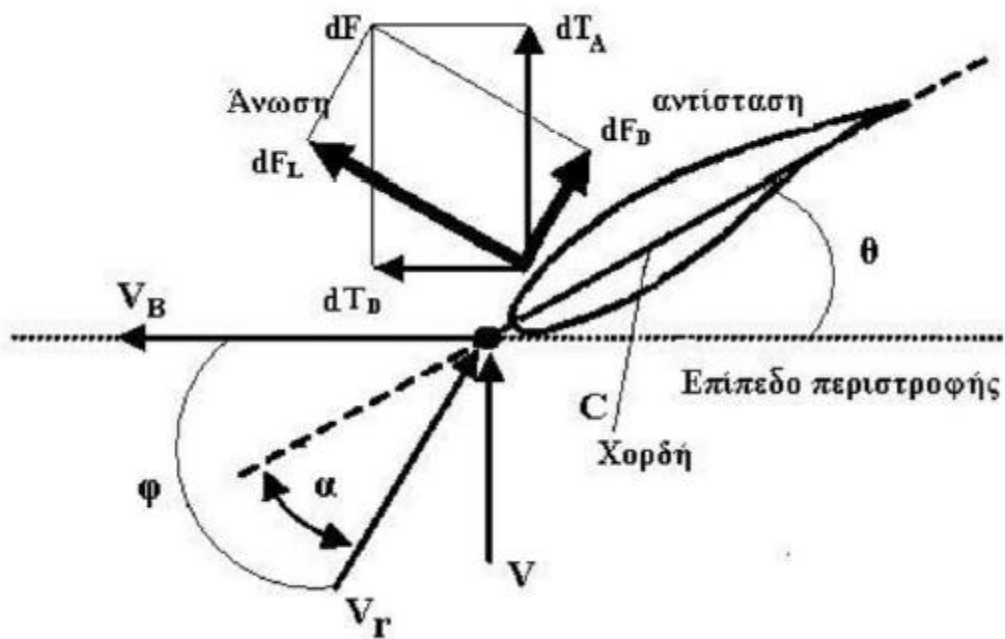
Ρότορας (δρομέας): Οι πτέρυγες του δρομέα έχουν σχεδιαστεί ώστε να γυρίζουν με τον άνεμο, περιστρέφοντας την γεννήτρια. Σε μεγάλες κυρίως Α/Γ, με σκοπό την αύξηση των στροφών της γεννήτριας συνδέεται κατάλληλα κιβώτιο ταχυτήτων.

Πύργος στήριξης: Μέσα στον πύργο στερεώνεται η ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως μεταλλικός, σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα (μπετόν), ενώ το ύψος του είναι τέτοιο, ώστε ο αέρας που προσπίπτει στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να έχει ομαλή ροή και όχι τυρβώδη. Έτσι, μειώνεται ο θόρυβος στο ελάχιστο.

### 3.4 ΘΕΩΡΙΑ ΠΤΕΡΥΓΩΣΗΣ

Η θεωρία της πτερύγωσης χρησιμοποιείται για υπολογισμούς της αεροδυναμικής στα πτερύγια και στον υπολογισμό του συντελεστή ισχύος  $C_p$ .

Βασίζεται στον διαχωρισμό του πτερυγίου σε επιμέρους τμήματα για τον υπολογισμό των στοιχειωδών μεγεθών στα τμήματα αυτά, που μας χρησιμεύουν για την ολοκλήρωση όλου του μήκους του πτερυγίου για να μας δώσει την αναλυτική σχέση του συντελεστή ισχύος  $C_p$ .



Εικόνα 36 Αεροτομή ενός πτερυγίου

Στην εικόνα 23 βλέπουμε ένα τμήμα του πτερυγίου  $dr$  στο οποίο ασκούνται μία δύναμη  $dF_L$  (άνωση) και μία δύναμη  $dF_D$  (αντίσταση). Η συνισταμένη αυτών των δυνάμεων  $dF$  αναλύεται σε δύο νέες συνιστώσες τις  $dT_D$  και  $dT_A$ .

Τα άλλα μεγέθη που βλέπουμε στο σχήμα είναι:  $v$  η ταχύτητα του ανέμου,  $V_B = \omega_r * R$  η γραμμική ταχύτητα του πτερυγίου λόγω περιστροφής,  $\omega_r$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής,  $R$  το μήκος του πτερυγίου,  $V_r = V - V_B$  το διανυσματικό άθροισμα των  $V$  και  $V_B$  είναι η σχετική ταχύτητα του ανέμου την οποία βλέπει το πτερύγιο,  $\theta$  η γωνία του πτερυγίου με το επίπεδο περιστροφής,  $\alpha$  η γωνία προσβολής,  $C$  το πλάτος (χορδή) του πτερυγίου και  $\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{V}{V_b}\right)$ .

Μετά από ολοκληρώματα και υπολογισμούς καταλήγουμε στην αναλυτική σχέση  $C_p$ .

$$C_p = \frac{3}{\pi R^2} \int_0^R [C * \cot\varphi * (1 + \cot\varphi) * (C_L(a) * \sin\varphi - C_D(a) * \cos\varphi)] dr \quad (3.10)$$

$$\text{όπου } \cot\varphi = \frac{\omega_r R}{V}$$

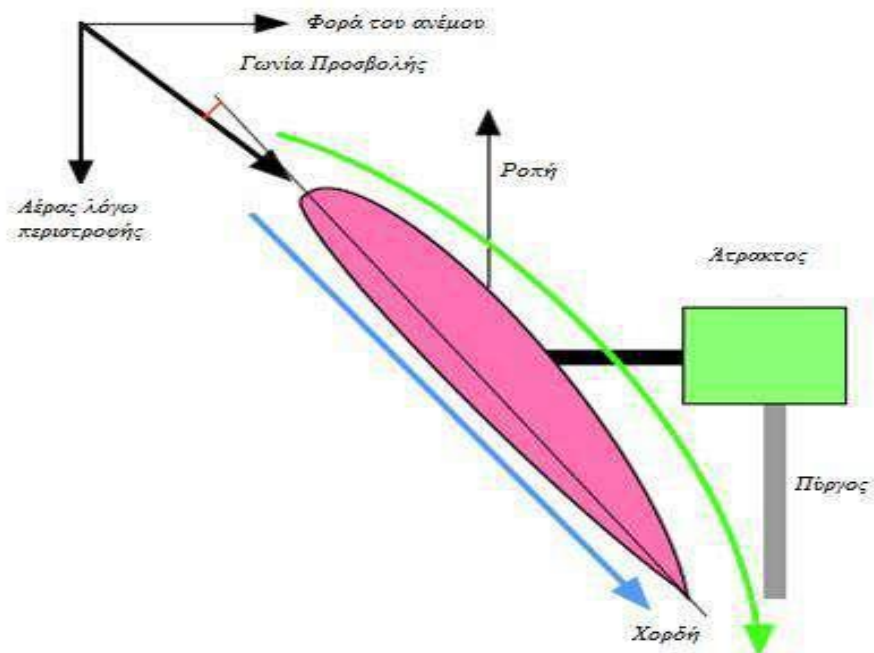
Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  εκτός από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων εξαρτάται και από τη συνεφαπτόμενη της γωνίας  $\varphi$ .

### 3.5 ΓΩΝΙΑ ΒΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΑΣ

Οι ανεμογεννήτριες έχουν κατασκευαστεί να παράγουν ενέργεια με το ελάχιστο κόστος και είναι σχεδιασμένες να αποδίδουν το μέγιστο της ενέργειας σε ταχύτητες ανάμεσα στα 12 - 15 m/s. Δεν χρειάζεται να σχεδιάσει κάποιος ανεμογεννήτριες που αποδίδουν τη μέγιστη τους ενέργεια σε ταχύτητες μεγαλύτερες από τις παραπάνω γιατί τόσο δυνατοί άνεμοι είναι πολύ σπάνιοι. Σε περίπτωση που υπάρχουν τόσο δυνατοί άνεμοι υπάρχει τακτική να παραλείπεται η παραπάνω ενέργεια για να μην πάθει ζημιά και καταστραφεί η ανεμογεννήτρια. Για αυτό το λόγο, όλες οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται για να λειτουργούν με ασφάλεια στις μεγάλες ταχύτητες του άνεμου που ίσως εμφανιστούν

#### 3.5.1 Γωνία βήματος πτερυγίου

Οι ανεμογεννήτριες που έχουν τον έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων (pitch control), τα πτερύγια πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται, περιστρέφοντας όλο ή μέρος κάθε πτερυγίου γύρω από τον άξονά τους, στην κατεύθυνση η οποία μειώνει τη γωνία πρόσπτωσης και άρα τον συντελεστή άντωσης, μια διαδικασία γνωστή σαν βήμα πτέρωσης (pitch feathering).

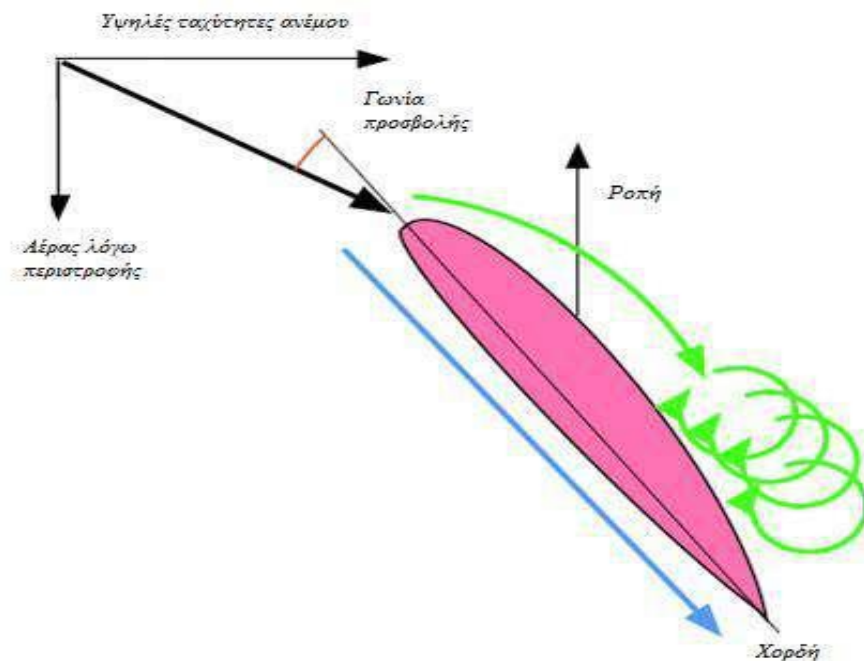


Εικόνα 37 Διαδικασία βήματος πτέρωσης

Όταν αυξάνεται η παραγωγή ενέργειας, ο μηχανισμός ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων αρχίζει να στρίβει τα πτερύγια έτσι ώστε να μειώνεται ο άνεμος που προσπίπτει πάνω τους. Τα πτερύγια ξαναστρίβουν όταν πέσει η ένταση του ανέμου για να υπάρχει πάντα η μέγιστη πρόσπτωση του αέρα δηλαδή να υπάρχει η μέγιστη παραγωγή ενέργειας. Ο μηχανισμός του ελέγχου βήματος πτερυγίου γίνεται με τη χρήση υδραυλικών ή ηλεκτρικών ελεγκτών.

### 3.5.2 Απώλεια στήριξης

Στις ανεμογεννήτριες με παθητική απώλεια στήριξης τα πτερύγια είναι τοποθετημένα στον άξονα σε μια σταθερή γωνία. Η γεωμετρία των πτερυγίων εξασφαλίζει ότι σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου θα εμφανιστούν στα πλάγια των πτερυγίων δίνες και στροβιλισμοί, από την αντίθετη πλευρά πρόσπτωσης του ανέμου, όπως στην εικόνα που ακολουθεί



Οι διαταραχές αυτές αντισταθμίζουν τις δυνάμεις άντωσης στα πτερύγια και τις περιορίζουν σε σχέση με το ρότορα. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται απώλεια στήριξης (stall control). Οι αεροδυναμικές διαταραχές που προκαλούν το φαινόμενο της απώλειας στήριξης οδηγούν σε συνεχείς αρνητικές ολισθήσεις στην ταχύτητα περιστροφής όπου λέγονται στολάρισμα (stall)

Το πτερύγιο, κατά την απώλεια στήριξης, στρέφεται αργά κατά μήκος του άξονά του και αυτό συμβαίνει για να διασφαλιστεί πως τα πτερύγια χάνουν την απώλεια στήριξης σταδιακά και όχι απότομα όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει στην καθορισμένη. Το κύριο πλεονέκτημα του ελέγχου της απώλειας στήριξης είναι η απουσία κινούμενων μερών πάνω στο ρότορα. Ο σχεδιασμός, όμως, με βάση τον

έλεγχο της απώλειας στήριξης είναι περίπλοκος αεροδυναμικά και επηρεάζει τον σχεδιασμό όλης της ανεμογεννήτριας. Η μεταβολή της γωνίας στην απώλεια στήριξης γίνεται αντίθετα προς αυτή της γωνίας βήματος του πτερυγίου.

Ο μηχανισμός στρέψης των πτερυγίων είναι είτε υδραυλικός είτε γίνεται με ηλεκτρικούς μηχανισμούς.

### 3.6 ΙΣΧΥΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Το ποσοστό της μηχανικής ισχύος του ανέμου που είναι διαθέσιμο προς εκμετάλλευση, εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, από τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της έλικας, την ακτίνα του δρομέα και τη σχεδίαση της πτερωτής. Η ενέργεια που αποσπάται από τον άνεμο (ισχύς εξόδου της Α/Γ) δίνεται από τη σχέση:

$$P_W = \frac{1}{2} * \rho * C_P * A * V_W^3 \quad (3.7)$$

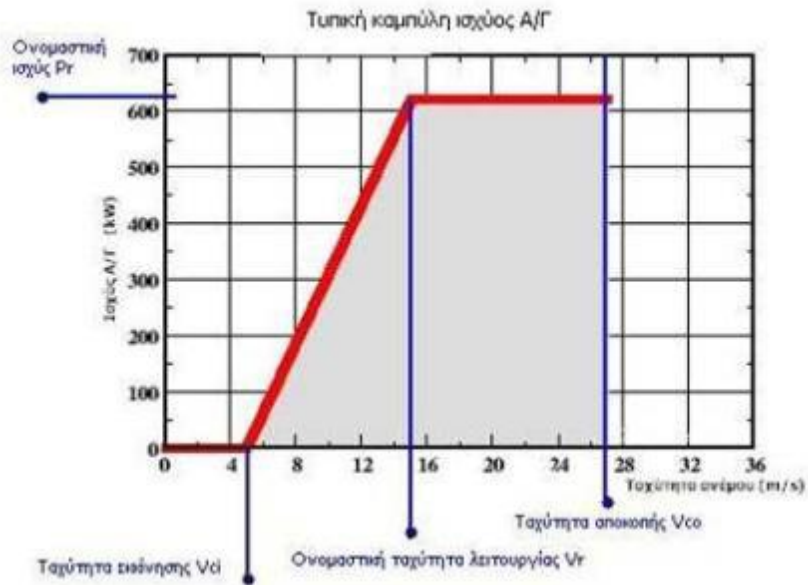
όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A = \pi R^2$  το εμβαδό της επιφάνειας που διαγράφουν τα πτερύγια ( $\text{m}^2$ ),  $V_M$  η ταχύτητα του ανέμου ( $\text{m/s}$ ) και  $C_P$  ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος.

Η χαρακτηριστική παράμετρος για την αποδοτικότητα της Α/Γ είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_P$  εξαρτάται από την παράμετρο περιστροφής  $\lambda$ , την ταχύτητα του ανέμου  $V_M$ , τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της έλικας  $\omega$ , τον τύπο της γεννήτριας, το σχήμα και τη γωνία  $\beta$  των πτερυγίων. Η ανώτατη τιμή του συντελεστή ισχύος είναι γνωστή και ως όριο Benz και αντιστοιχεί στην τιμή  $C_{p,\max} = 0.593$ .

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 Α/Γ:

$$C_P = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_1}} + C_6 \lambda \quad (3.8)$$

όπου  $\lambda_1 = \left( \frac{1}{\lambda - C_1 \beta} \frac{C_8}{\beta^3 + 1} \right)$  και  $C_1$  έως  $C_9$  συντελεστές που προκύπτουν από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της Α/Γ.



Εικόνα 38 Καμπύλη ισχύος Α/Γ

Η ισχύς εξόδου μιας Α/Γ όπως αναφέρθηκε και παραπάνω 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 (Εικόνα 29) και χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα εκκίνησης  $V_{ci}$  της Α/Γ, την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας  $V_r$  και την ταχύτητα αποκοπής  $V_{co}$  της Α/Γ. Η ταχύτητα εκκίνησης είναι η ταχύτητα εκείνη στην οποία η ανεμογεννήτρια αρχίζει να παράγει ισχύ ενώ η ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας είναι η ταχύτητα του δρομέα 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.

### 3.7 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

#### 3.7.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

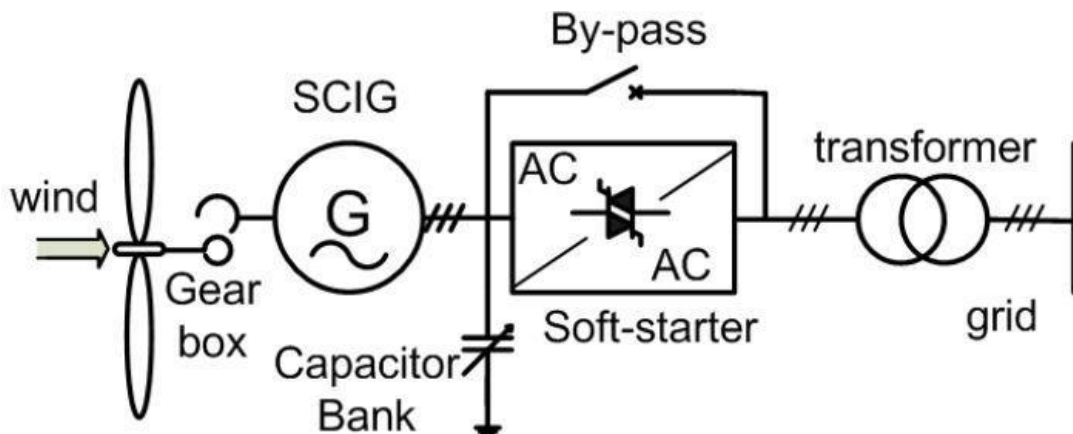
Για την βέλτιστη λειτουργία της γεννήτριας γίνεται χρήση ηλεκτρονικών ισχύος στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών, όπου χρησιμοποιούνται για την ομαλή εκκίνηση της γεννήτριας και σύνδεσής της στο δίκτυο όπως και για τη μείωση της τάσης της και των μαγνητικών απωλειών κυρίως σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Σε αυτά τα συστήματα γίνεται χρήση συνήθως ασύγχρονων γεννητριών βραχυκυκλωμένου δρομέα ή σύγχρονων γεννητριών.

Τα υψηλά ρεύματα εκκίνησης των ανεμογεννητριών αυτών προκαλούν σοβαρά προβλήματα στο δίκτυο και στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό του



συστήματος εξαιτίας των ταλαντώσεων. Με τη βοήθεια ενός μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης (soft-starter) που αποτελείται από τρία αντιπαράλληλα θυρίστορ ρυθμίζεται η τάση του στάτη της γεννήτριας και συνδέεται ομαλά στο δίκτυο.

Επιπλέον είναι απαραίτητη μία συστοιχία πυκνωτών για την παροχή άεργου ισχύος που απορροφάται από την επαγωγική γεννήτρια για αντιστάθμιση ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με την συνεχή εναλλαγή των πυκνωτών μετά από μεταβολές στην τάση. Λόγω των διακυμάνσεων της τάσης, η χρήση αυτών των πυκνωτών γίνεται πιο απαραίτητη γιατί χωρίς αυτούς, οι ανεμογεννήτριες αντλούν διάφορα ποσά άεργου ισχύος από το δίκτυο και προκαλούν διακυμάνσεις στην τάση του δικτύου και αύξηση των απωλειών της γραμμής.



Εικόνα 39 Σύνδεση στο δίκτυο ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών.

### 3.7.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών δεν μπορούν να συνδεθούν απευθείας με το δίκτυο καθώς η ταχύτητα του ρότορα θα καθοριζόταν από την σταθερή συχνότητα του δικτύου και έτσι θα ήταν αδύνατο να ακολουθήσει την ταχύτητα του ανέμου. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και μεταβάλλοντας τις γωνίες έναυσης των ηλεκτρονικών στοιχείων των διατάξεων αυτών ελέγχεται η μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου της γεννήτριας και συνεπώς η μέγιστη παραγωγή.

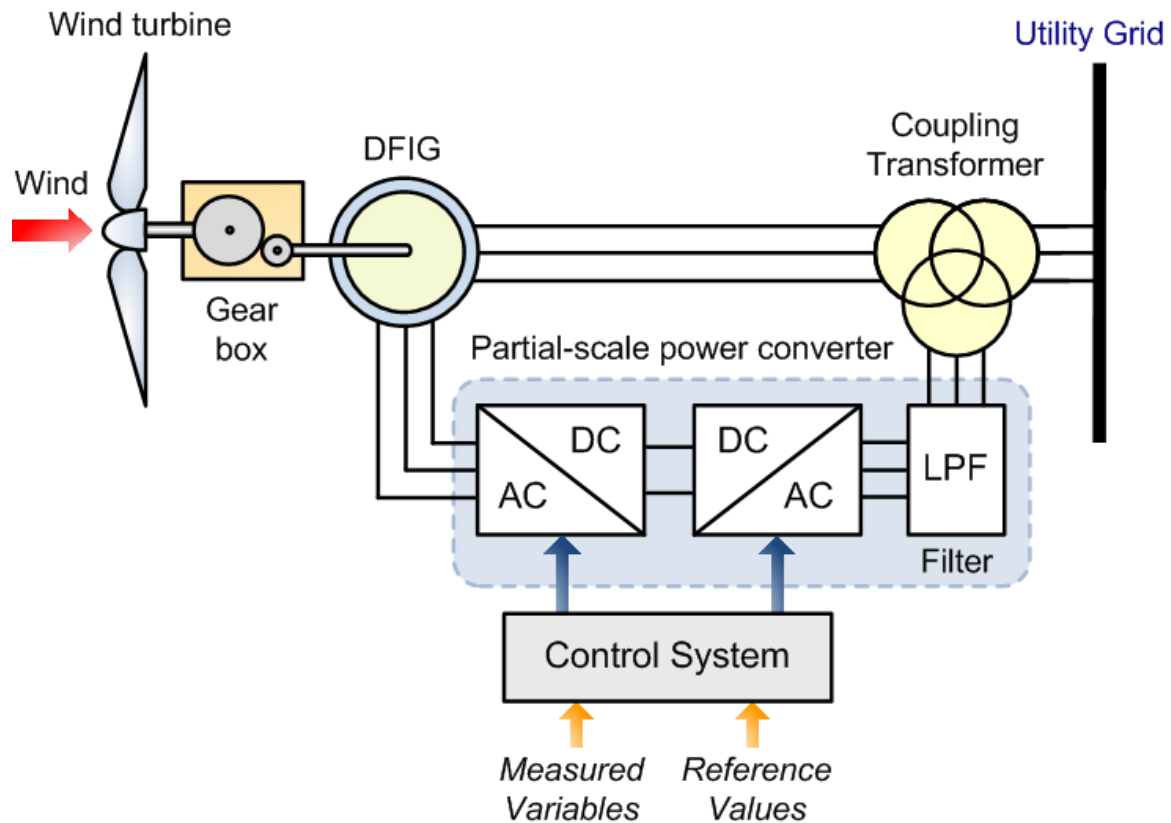


Αποτελεί μία απλή, αξιόπιστη και φτηνή κατασκευή που δίνει τη δυνατότητα αντιστροφής της ροής ισχύος χωρίς όμως να αντιμετωπίζεται το πρόβλημα των αρμονικών και των αιχμών των τάσεων της μηχανής. Αντίστοιχα προβλήματα παρουσιάζει και ο μετατροπέας εξόδου καθώς απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος, καθιστώντας την τοπολογία αυτή ακατάλληλη για ασθενή δίκτυα με μεγάλη διείσδυση ισχύος. Μία καλή βελτίωση αυτής της τοπολογίας είναι η χρήση δύο μετατροπέων πηγής ρεύματος με έλεγχο PWM όπου μειώνει τις αρμονικές των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής και προσφέρει έλεγχο της άεργου ισχύος

### *3.7.2.2 Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα*

Στις ανεμογεννήτριες με ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα το σύστημα μετατροπέων αποτελείται από ένα μη ελεγχόμενο ανορθωτή διόδων στον δρομέα και έναν αντιστροφέα στην έξοδο. Η χρησιμοποίηση αυτού του συστήματος χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος, δίνει όμως λύση στο πρόβλημα των αρμονικών στο δίκτυο και στην υψηλή κατανάλωση άεργου ισχύος, φαινόμενα που είναι μειωμένα σε σχέση με την χρήση ενός ανάλογου μετατροπέα στο στάτη. Όπως και στις προηγούμενες διατάξεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελεγχόμενοι μετατροπείς με θυρίστορ, μετατροπείς ρεύματος ή διπλοί μετατροπείς με έλεγχο PWM για καλύτερο έλεγχο, μείωση των αρμονικών και βελτίωση του συντελεστή ισχύος του φορτίου.

Μία απλή, αξιόπιστη αλλά ακριβή λύση για μεγάλες κυρίως ανεμογεννήτριες είναι η χρήση κυκλομετατροπέα για την σύνδεση του δρομέα της γεννήτριας και του δικτύου. Δίνει τη δυνατότητα αμφίδρομης μεταφοράς ισχύος ενώ η λειτουργία μπορεί να λειτουργήσει και κάτω από την σύγχρονη ταχύτητα καθιστώντας δυνατό τον έλεγχο της άεργου ισχύος.



Εικόνα 41 Σύνδεση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με δακτυλιοφόρο δρομέα με το δίκτυο.

Τέλος, υπάρχουν εφαρμογές όπου, μέσω των εξωτερικών κυκλωμάτων, επιτυγχάνεται περιορισμένη μεταβολή στροφών της τάξης του 10%. Έτσι περιορίζονται τα δυναμικά προβλήματα λόγω του μηχανικού ελέγχου της γωνίας κλίσης των πτερυγίων και εξομαλύνεται η ροπή και η ισχύς εξόδου. Όμως με αυτόν τον τρόπο δεν είναι δυνατή η πλήρης ανάκτηση της ισχύος του δρομέα.

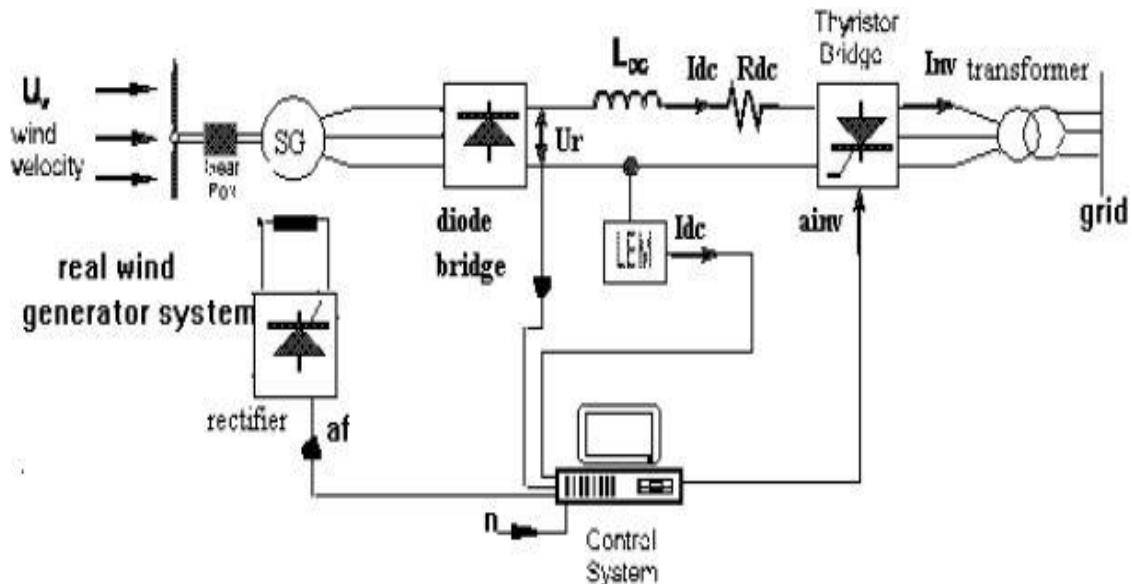
### 3.7.2.3 Σύγχρονη γεννήτρια

Η δυνατότητα της σύγχρονης γεννήτριας να ελέγχει τον συντελεστή ισχύος και να λειτουργεί με μοναδιαίο ή και χωρητικό συντελεστή ισχύος μειώνει την απαίτηση παραγωγής άεργου ισχύος με αποτέλεσμα να μην είναι αναγκαία η συστοιχία πυκνωτών. Λόγω της απαίτησης για συγχρονισμό με το δίκτυο, της άμεσης διασύνδεσης με αυτό και τις μεγάλες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις που προκαλεί ο αέρας, οι σύγχρονες γεννήτριες δεν είχαν μεγάλη εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες. Η χρήση όμως των ηλεκτρονικών ισχύος βοήθησε στο να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα.

Μία απλή διάταξη είναι η χρήση μη ελεγχόμενου ανορθωτή και συμβατικού αντιστροφέα με θυρίστορ. Για την αντιμετώπιση του χαμηλού συντελεστή ισχύος καθώς και των αρμονικών χρησιμοποιείται μία βελτιωμένη τοπολογία, με μετατροπέα πηγής τάσης με IGBTs στην έξοδο, ένα μετατροπέα DC/DC στην πλευρά συνεχούς

και την είσοδο να παραμένει ίδια. Με τη διάταξη αυτή όμως δεν λύνεται το πρόβλημα της μονόδρομης ροής ισχύος.

Με τις σύγχρονες γεννήτριες μεγάλου αριθμού πόλων και με τις τεχνικές που περιγράφηκαν ξεπεράστηκε η αναγκαιότητα χρήσης κιβωτίου ταχυτήτων με αποτέλεσμα την εξάλειψη των μηχανικών θορύβων, βελτίωση της αξιοπιστίας και μείωση του βάρους των ανεμογεννητριών. Επιπλέον, η σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο χωρίς την ύπαρξη μηχανικών μερών σημαίνει εξάλειψη των αρμονικών του μηχανικού συστήματος και αύξηση του χρόνου ζωής της ανεμογεννήτριας, ενώ μπορεί να γίνει άμεσος έλεγχος της τάσης εξόδου και μείωση των αρμονικών στο δίκτυο καθώς και της άεργου ισχύος.



Εικόνα 42 Σύνδεση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με δυνατότητα ελέγχου της τάσης του αντιστροφέα και της διέγερσης της Σ.Γ.



## 4. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Η μελέτη μας αφορά ένα αυτόνομο σύστημα στην περιοχή της Πάτρας που θα τροφοδοτείται από φωτοβολταϊκή γεννήτρια και μία ανεμογεννήτρια σαν εφεδρεία. Το σύστημα θα λειτουργεί όλο τον χρόνο για 13 ώρες την ημέρα. Το φορτίο του συστήματος μας είναι 10 kW και λειτουργεί με τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα (AC).

Το φορτίο μας λειτουργεί στο 100% για 1 ώρα την ημέρα, στο 50% για 2 ώρες την ημέρα και στο 30% για 10 ώρες την ημέρα.

Για το σύστημα αυτό επιλέξαμε τάση συστήματος  $V = 48 \text{ V}$  και θα το διαστασιολογήσουμε για 2 ημέρες αυτονομίας.

Στην αρχή διαστασιολογήσαμε το φωτοβολταϊκό σύστημα και ύστερα προσθέσαμε μια τριφασική ανεμογεννήτρια 10 kW και συστήματα ελέγχου. Με την βοήθεια του SIMULINK του MATLAB προσομοιώσαμε το σύστημα και δοκιμάσαμε την συμπεριφορά του συστήματος σε διάφορα σενάρια.

### 4.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

#### Ημερήσιο φορτίο

$$1 \text{ h} * 10 \text{ kW} = 10 \text{ kWh/day}$$

$$2 \text{ h} * 5 \text{ kW} = 10 \text{ kWh/day}$$

$$10 \text{ h} * 3 \text{ kW} = 30 \text{ kWh/day}$$

Συνολικό ημερήσιο φορτίο **50 kWh/day**

#### Ανάλυση τοποθεσίας

Η τοποθεσία του συστήματός μας βρίσκεται στην πόλη της Πάτρας (38.247, 21.735).

Για την τοποθεσία αυτή επιλέγουμε γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πάνελ  $\beta = 30^\circ$ . Κανονικά θα έπρεπε να έχουμε μεγαλύτερη κλίση στα φ/β πλαίσια για καλύψουμε τις ανάγκες όλου του έτους, αλλά επειδή στο σύστημα μας υπάρχει και η ανεμογεννήτρια επιλέξαμε τις  $30^\circ$  για να έχουμε καλύτερη απόδοση το καλοκαίρι, μιας και το χειμώνα ο άνεμος είναι ισχυρότερος. Ο προσανατολισμός των φ/β πλαισίων είναι νότιος.

Για τα δεδομένα ηλιακής ενέργειας για την περιοχή της Πάτρας στις  $30^\circ$  χρησιμοποιήσαμε την βάση δεδομένων του Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) και με αναγωγή στο “μοντέλο Καπλάνη” για τις ηλιακές παραμέτρους υπολογίσαμε το PSH και R που θα μας χρειαστούν για να υπολογίσουμε την μέγιστη ισχύ των φωτοβολταϊκών.

όπου R είναι ο συντελεστής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο και το PSH (Peak Solar Hour) είναι η ηλιακή ενέργεια που είναι διαθέσιμη για την περιοχή κατά την διάρκεια της ημέρας. Είναι ένας αριθμός σε hours/day και ισούται με το γινόμενο της ηλιακής ακτινοβολίας επί του R. (πίνακας 4)

**Πίνακας 4 Μέσες μηνιαίες τιμές για το PSH και το R**

<b>R mean</b>	<b>PSH</b>
1,29338	2,01819
1,318095	3,848995
1,196601	5,346908
1,060071	6,361086
0,952037	6,853699
0,886728	6,932512
0,913691	7,143314
1,032328	7,330306
1,187703	6,900802
1,361091	5,788525
1,481676	3,949342
1,355011	2,004766
<b>Μέση ετήσια τιμή</b>	
<b>1,163868</b>	<b>5,323204</b>

Από τον πίνακα βλέπουμε την μέση ετήσια τιμή του PSH ισούται με 5,3 h/day.



## Διόρθωση φορτίου – Απώλειες συστήματος

Από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες μέχρι το φορτίο μας, η ισχύς που περνάει από όλα τα επιμέρους συστήματα έχει απώλειες (πίνακας 5).

**Πίνακας 5 Απώλειες συστήματος**

Απώλειες πριν το πάνελ	Ανοχή της ονομαστικής ισχύος	Σφάλμα στην ονομαστική τιμή του πάνελ που δίνει ο κατασκευαστής. Οι κατασκευαστές παρέχουν μια ανοχή, συχνά μέχρι και 5%.
	Σκίαση	Η σκίαση μπορεί να προκληθεί από τα δέντρα, τις καμινάδες κτλ. Ανάλογα με την συνδεσμολογία των φ/β κυττάρων, ακόμα και λίγη σκίαση μπορεί να έχει πολύ σημαντική επίδραση στην απόδοση.
	Σκόνη	Απώλειες λόγω σκόνης πάνω από 4% σε περιοχές με συχνές βροχοπτώσεις και πάνω από 25% σε ξηρές περιοχές
	Χιόνι	Ανάλογα με την τοποθεσία και τη συντήρηση των πλαισίων.
	Αντανάκλαση	Οι απώλειες αντανάκλασης αυξάνονται με την γωνία πρόσπτωσης. Επίσης, αυτό το φαινόμενο είναι λιγότερο έντονο σε περιοχές με μεγάλο ποσοστό διάχυτου φωτός.
Απώλειες πάνελ	Μετατροπή	Η ονομαστική απόδοση δίνεται από τον κατασκευαστή για πρότυπες συνθήκες.
	Θερμικές απώλειες	Με την αύξηση της θερμοκρασίας οι απώλειες μετατροπής θα αυξηθούν. Αυτές οι απώλειες εξαρτώνται από την ακτινοβολία (της περιοχής), τον τρόπο εγκατάστασης και η ταχύτητα ανέμου.
Απώλειες μετά το πάνελ	Καλωδίωση	Όλα τα καλώδια έχουν κάποια αντίσταση και συνεπώς και κάποια απώλεια
	MPPT	Απώλεια από την αναζήτηση του MPPT να βρεί συνέχεια το μέγιστο σημείο ισχύος
	Inverter	Η απόδοση του inverter
	Συσσωρευτές	Απώλειες λόγω θερμοκρασίας και λόγω φόρτισης-εκφόρτισης

Για την μελέτη υποθέσαμε ότι ο συνολικός συντελεστής απόδοσης του συστήματος  $n = 0.77$

Άρα το διορθωμένο φορτίο μας γίνεται  $Q_L = \frac{50\text{kWh/day}}{0,77} = 64,93 \text{ kWh/day} \approx 65 \text{ kWh/day}$ .

## Μέγιστη ισχύς φωτοβολταϊκών

Για να υπολογίσουμε την μέγιστη ισχύ των φωτοβολταϊκών θα χρησιμοποιήσουμε την τιμή του PSH που είδαμε παραπάνω.

Ο τύπος που μας δείχνει την μέγιστη ισχύ των φωτοβολταϊκών είναι:

$$P_m = \frac{\text{Φορτίο(διορθωμένο)}}{PSH} = \frac{65000Wh/day}{5.3h/day} = 12265 W$$

## Επιλογή φωτοβολταϊκών πλαισίων

Για την επιλογή των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξετάζουμε αρκετούς και διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την κάθε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, άλλοι λιγότερο και άλλοι περισσότερο (π.χ. ύψος ηλιοφάνειας, χωροταξικές ιδιαιτερότητες, μετεωρολογικές συνθήκες, κόστος, προσανατολισμός, σκιάσεις)

Για την περίπτωση μας έγινε επιλογή φωτοβολταϊκού πλαισίου ισχύος 240 W με τα κατασκευαστικά μεγέθη που βλέπουμε στις εικόνες

### > TECHNICAL CHARACTERISTICS (STC\*)

Typical power	W	255	250	245	240
Power tolerance	W	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5
Voltage at typical power	V	30.5	30.1	30.0	29.9
Current at typical power	A	8.40	8.30	8.17	8.03
Open circuit voltage	V	37.7	37.2	37.1	37.0
Short circuit current	A	8.90	8.87	8.74	8.59
Module conversion efficiency	%	16.	15.7	15.4	15.1

\*Under Standard Test Conditions : STC  
(1000 W/m<sup>2</sup> ; spectrum AM 1,5 ; cell temperature 25°C)

## > MECHANICAL CHARACTERISTICS

Cell type	Multicrystalline
Module size	1638 x 982 x 40 mm
Cell size	156 x 156 mm ( $\pm 1\%$ )
Cells number	60 (6x10)
Module weight	20 kg
Front cover	3.2 mm anti-reflected tempered glass
Back cover	Tedlar® white
Frame material	Anodized aluminum alloy
J-BOX	IP 65
Solar cables	UV resistant, 4.0 mm <sup>2</sup> , 1100mm
Connector type	MC4 or MC4 compatible

## > TEMPERATURE COEFFICIENT \*

Typical cells temperature NOCT	°C	47,3 ( $\pm 2$ )
Temperature coefficient Pmax	$\gamma$	-0,42 %/°C
Temperature coefficient Voc	$\beta$	-0,34 %/°C
Temperature coefficient Isc	$\alpha$	+0,06 %/°C

\*1000 W/m<sup>2</sup> ; temperature 25°C ; spectrum AM 1,5

### Διόρθωση ισχύος φωτοβολταϊκού πλαισίου λόγω θερμοκρασίας.

Για να βρούμε την θερμοκρασία  $T_c$  του φωτοβολταϊκού πάνελ θα χρησιμοποιήσουμε το τύπο

$$\frac{T_c - T_a}{I_T} = \frac{NOCT - 20^\circ C}{0.8kW/m^2}$$

όπου  $T_c$  (°C) η θερμοκρασία του πάνελ,  $T_a$  (°C) η θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $I_T$  η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε STC και NOCT (°C) η τυπική θερμοκρασία των  $\phi/\beta$  στοιχείων που λειτουργεί κάτω από τις παρακάτω συνθήκες

Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία: 0.8 kW/m<sup>2</sup>

Φάσμα ακτινοβολίας: 1.5  
θερμοκρασία περιβάλλοντος: 20 °C  
ταχύτητα ανέμου > 1 m/sec

Με αντικατάσταση της σχέσης ( χ ) έχουμε

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20^\circ C}{0.8kW/m^2} * I_T$$

όπου για  $T_a$  στην μελέτη μας θα χρησιμοποιήσουμε την μέση μηνιαία θερμοκρασία του Αυγούστου για την Πάτρα. που είναι 26,7 °C. Επιλέξαμε την συγκεκριμένη θερμοκρασία γιατί είναι η μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία όλου το έτους.

η σχέση μας γίνεται

$$T_c = 26,7 + \frac{47,3 - 20^\circ C}{0.8kW/m^2} * 1kW/m^2$$

όπου μετά τις πράξεις έχουμε

$$T_c = 60,8^\circ C$$

Με την αύξηση της θερμοκρασίας του πάνελ η μεταβολή της ένταση του ρεύματος είναι αμελητέα, δεν ισχύει όμως το ίδιο για την τάση του πάνελ. Η τάση του φ/β πάνελ μεταβάλλεται σύμφωνα με την σχέση

$$V_{OC} = V_{SC} - N_{cells} * \beta (T_c - T_{STC})$$

όπου  $N_{cells}$  είναι ο αριθμός των κελίων που αποτελούν το πλαίσιο,  $\beta$  ο συντελεστής θερμοκρασίας για  $V_{oc}$ . Τα μεγέθη αυτά δίνονται από τον κατασκευαστή.

Με αντικατάσταση της σχέσης έχουμε

$$V_{OC}' = 37 V - 60 * 0.0034^\circ C (60.8^\circ C - 25^\circ C)$$

$$V_{OC}' = 29.7 V \text{ (για } T_c = 60,8^\circ C \text{).}$$

ο συντελεστής Fill Factor υπολογίζεται από την σχέση

$$FF = \frac{P_m}{V_{OC} * I_{SC}} = \frac{I_m * V_m}{V_{OC} * I_{SC}} = \frac{8.03 A * 29.9 V}{8.59 A * 37 V} = \mathbf{0.75}$$

Με βάση τα παραπάνω μεγέθη που υπολογίσαμε η διορθωμένη ισχύς γίνεται

$$P_m' = I_{sc} * V_{SC}' * FF = 8.59 A * 29.7 V * 0.75 = 191.34 \approx 192 W$$

Βλέπουμε ότι στην χειρότερη περίπτωση θερμοκρασίας πάνελ η ισχύς των φ/β πλαισίων θα υποστεί μεγάλη μείωση.

## Αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ

Ο αριθμός των πάνελ που θα χρησιμοποιήσουμε στο σύστημα μας δίνεται από την σχέση

$$N_{pv} = \frac{P_{m,generator}}{P_{m,panel}} = \frac{12265 W}{192 W} = 63.8 \approx 64 \text{ πάνελ}$$

$$N_{p,s} = \frac{V}{V_m} = \frac{48V}{29.9V} = 1.6 \approx 2 \text{ πάνελ σε σειρά}$$

**Άρα έχουμε**

$$N_{p,p} = \frac{N_{pv}}{N_{p,s}} = \frac{64}{2} = 32 \text{ πάνελ παράλληλα}$$

**επιβεβαίωση**  $N_{pv} * P'_m = 64 * 192W = 12288 W > 12265 W$

**Ο συντελεστής ασφαλείας**  $SF = \frac{12288 - 12265}{12265 \%} = 0.18 \%$

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι πολύ μικρός και αν το σύστημα μας βασιζόταν μόνο στα φωτοβολταϊκά για την τροφοδοσία του, θα αυξάναμε των αριθμό των πάνελ ώστε να ανέβει και ο συντελεστής ασφαλείας. Στην περίπτωση μας όμως που έχουμε την εφεδρεία της ανεμογεννήτριας θα το αφήσουμε ως έχει για να μην ανέβει και το κόστος της εγκατάστασης.

Από αυτά τα στοιχεία βλέπουμε ότι φωτοβολταϊκά πλαίσια τελικά θα έχουν  $V = 29,9 V * 2$  (πάνελ σε σειρά)  $= 59,8 V$  που ο ελεγκτής φόρτισης θα τα ελαττώσει μετά σε 48, ώστε να τροφοδοτήσει της μπαταρίες. Όμως η ένταση που θα βγάλουν τα φ/β πλαίσια θα είναι  $I = 8.03 * 32$  (πάνελ παράλληλα)  $\approx 257 A$ , το οποίο είναι πολύ μεγάλο και θα δυσκολευτούμε να βρούμε ελεγκτή φόρτισης με τέτοια χαρακτηριστικά (48 V, 300 A) και όσοι υπάρχουν είναι οικονομικά ασύμφοροι. Στην περίπτωση αυτή θα μπορούσαμε να διαστασιολογήσουμε ξανά το σύστημα με μεγαλύτερη τάση και να μειωθεί πολύ το ρεύμα και να χρησιμοποιήσουμε ρυθμιστή φόρτισης MPPT (ώστε να ρίξει την τάση και να αυξήσει το ρεύμα του συστήματος). Βέβαια και στις 2 αυτές υπάρχει ο κίνδυνος το σύστημα μας να μείνει εκτός λειτουργίας για μεγάλο διάστημα χωρίς καθόλου απόδοση, σε περίπτωση κάποιου προβλήματος στα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή στον ρυθμιστή φόρτισης. Για τον λόγο αυτό, αλλά και λόγω του μεγάλου ρεύματος που είδαμε, αποφασίσαμε να χωρίσουμε

την φωτοβολταϊκή συστοιχία σε τέσσερις μικρές συστοιχίες και η κάθε μία στην έξοδο της θα συνδεθεί με έναν ελεγκτή φόρτισης (άρα θα χρησιμοποιήσουμε τέσσερις ελεγκτές φόρτισης). Με τον τρόπο αυτό, θα κρατήσουμε την τάση μας ίδια και θα μειωθεί και το ρεύμα εξόδου των φ/β πάνελ. Επίσης σε περίπτωση βλάβης σε κάποια από τις τέσσερις φ/β συστοιχίες ή κάποιου ελεγκτή φόρτισης, το σύστημα θα συνεχίσει να λειτουργεί με λιγότερη ισχύ όμως.

Αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε τα 64 πάνελ που χρειαζόμαστε σε 4 διαφορετικές συστοιχίες που η κάθε μία θα αποτελείται από 2 πάνελ σε σειρά, ώστε να έχουμε την τάση που θέλουμε, και σε 8 πάνελ παράλληλα.

Από τα νέα μας στοιχεία έχουμε

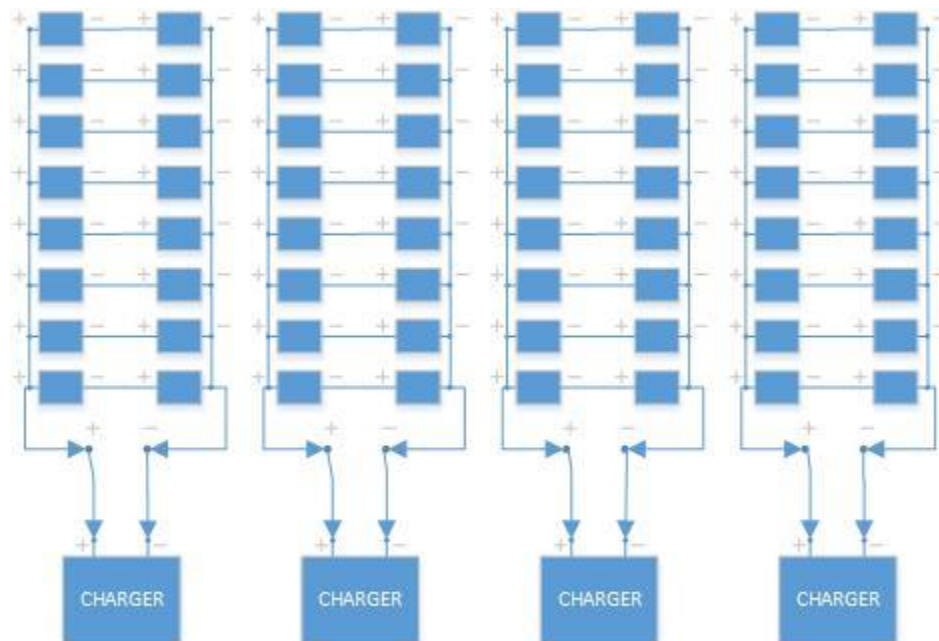
$V = 29,9 V * 2$  (πάνελ σε σειρά) =  $59,8 V$  (τα οποία όπως είπαμε θα τα μειώσει ο ελεγκτής φόρτισης σε  $48 V$  που θέλουμε) και

$I = 8.03 * 8$  (πάνελ παράλληλα) =  $64 A$  (το οποίο είναι μία φυσιολογική τιμή του ρεύματος για να συνεχίσουμε την διαστασιολόγηση μας.

Βέβαια και με αυτόν τον τρόπο θα έχουμε 'χαμένη ενέργεια' που δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε, αφού  $P_{\text{συστοιχίας}} = 59,8 V * 64 A = 3827,2 W$

Άρα  $P_{\text{Συνολικής συστοιχίας}} = 3827,2 W * 4 = 15309 W$

$$\text{Χαμένη ενέργεια} = 15309 W - 12265 W = 3044 W$$



Εικόνα 43 Συνδεσμολογία Φ/Β πλαισίων και σύνδεση τους με τους ελεγκτές φόρτισης

## Ελεγκτής φόρτισης

Όπως είδαμε παραπάνω η τάση που θέλουμε να έχουν οι μπαταρίες μας είναι 48 V και το ρεύμα εξόδου της κάθε μίας φ/β συστοιχίας είναι 64 A. Θα χρησιμοποιήσουμε 4 ελεγκτές φόρτισης που πρέπει να έχουν τάση 48 V και ρεύμα >64 A ώστε να φορτίζουν επαρκώς τις μπαταρίες και να μην δουλεύουν συνέχεια στο 100 % της απόδοσής τους, για να έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Επιλέξαμε φορτιστές φόρτισης με τα εξής χαρακτηριστικά: MPPT 48V 70A.

## Διαστασιολόγηση συσσωρευτών

Στο σύστημα μας επιλέξαμε τάση λειτουργίας συστήματος 48 V και μέρες αυτονομίας  $d=2$  ( κανονικά έπρεπε να επιλέξουμε 3-4 μέρες αυτονομίας για την πόλη της Πάτρας αλλά υποθέτουμε ότι μέσα σε αυτές τις 2 ημέρες που δεν θα υπάρχει λειτουργία των φ/β πάνελ, θα έχει τεθεί σε λειτουργία η ανεμογεννήτρια για να καλύψει το σύστημα μας και να φορτίσει τους συσσωρευτές).

Για να βρούμε την χωρητικότητα των συσσωρευτών (C) θα χρησιμοποιήσουμε το διορθωμένο φορτίο ( $Q_L$ ) που βρήκαμε νωρίτερα, τις μέρες αυτονομίας (d) που ορίσαμε, καθώς και την τάση συστήματος (V). Επίσης επιλέξαμε το βάθος εκφόρτισης (DOD) των μπαταριών σε 0,6. Επιλέξαμε μια μέση τιμή για το DOD γιατί γνωρίζουμε ότι όσο μεγαλώνει το DOD μειώνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Ακόμα για την μελέτη μας υποθέσαμε ότι οι απώλειες τις μπαταρίες από την φόρτιση και εκφόρτιση αλλά και από την γήρανση είναι  $n = 0,85$

$$C_L = \frac{Q_L * d}{V * DOD * n} = \frac{65000Wh/day * 2}{48 V * 0,6 * 0.85} = 5310 Ah$$

Κανονικά πρέπει να γίνει διόρθωση της χωρητικότητας της μπαταρίας λόγω θερμοκρασίας αλλά υποθέτουμε ότι η μπαταρίες θα είναι σε κλιματιζόμενο δωμάτιο με σταθερή θερμοκρασία 25-27 °C.

Για την χωρητικότητα που βρήκαμε επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε μπαταρίες 12V 1000Ah και DOD 0,6.

Για να βρούμε πόσους συσσωρευτές θα χρησιμοποιήσουμε παράλληλα έχουμε,

$N_{b,p} = \frac{5310 Ah}{1000 Ah} = 5.31$  άρα θα χρησιμοποιήσουμε 6 μπαταρίες σε παράλληλη σύνδεση.

Για να βρούμε τους συσσωρευτές που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε σε σειρά έχουμε,

$$N_{b,s} = \frac{48V}{12V} = 4 \text{ μπαταρίες σε σειρά}$$

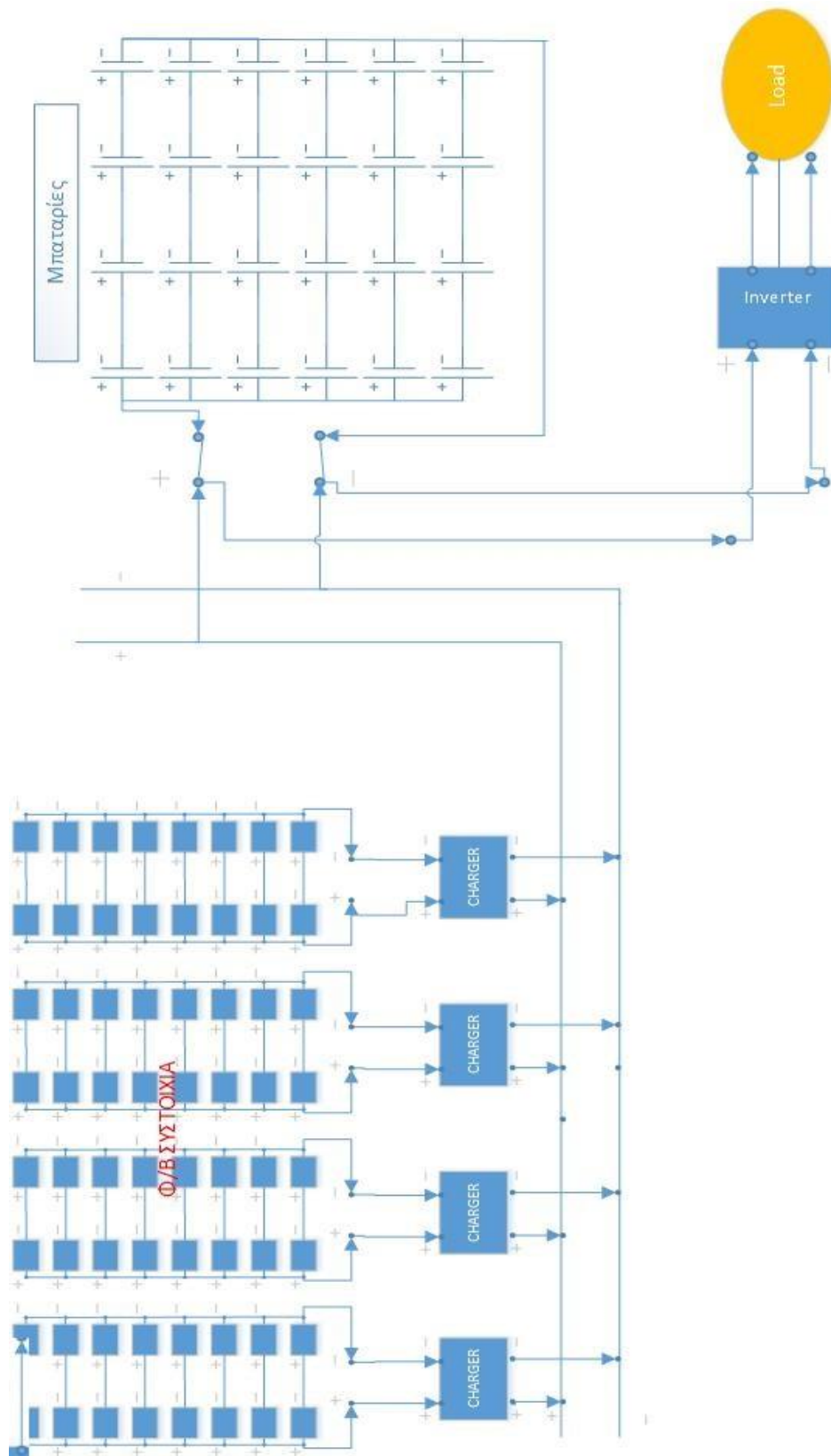
Άρα θα η συστοιχία των συσσωρευτών θα περιλαμβάνει 6 παράλληλους κλάδους με 4 συσσωρευτές σε σειρά ανά κλάδο. Σύνολο 24 συσσωρευτές. Μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε συσσωρευτές μεγαλύτερης χωρητικότητας και τάσης, που σημαίνει ότι θα χρειαζόμασταν λιγότερους συσσωρευτές, αλλά επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε περισσότερους γιατί στην περίπτωση που υπάρξει μία δυσλειτουργία ή εμφάνιση κάποιου προβλήματος, θα επηρεάσει όλη την εγκατάσταση σε λιγότερο βαθμό απ' ότι εάν βάλουμε λιγότερους συσσωρευτές.

### Inverter

Ο inverter πρέπει να καλύπτει το μέγιστο φορτίο του συστήματος το οποίο είναι 10 kW και δέχεται σαν τάση εισόδου, την τάση του συστήματος. Επίσης, όπως και ο ελεγκτής φόρτισης δεν πρέπει να δουλεύουν στο 100% της απόδοσης τους οπότε επιλέγουμε λίγο μεγαλύτερο. Με βάση τα προηγούμενα επιλέξαμε inverter με ισχύ 12 kW, τάση εισόδου 48 V DC και τάση εξόδου 400V /230V τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα AC.

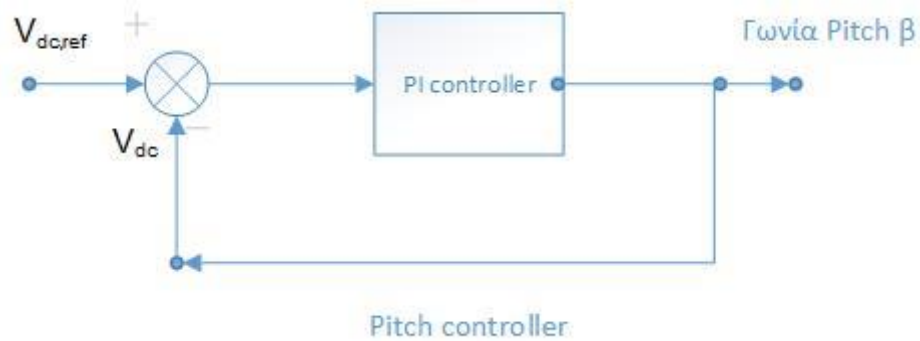
Στην εικόνα 44 βλέπουμε το σχέδιο του φωτοβολταϊκού συστήματος που διαστασιολογήσαμε.



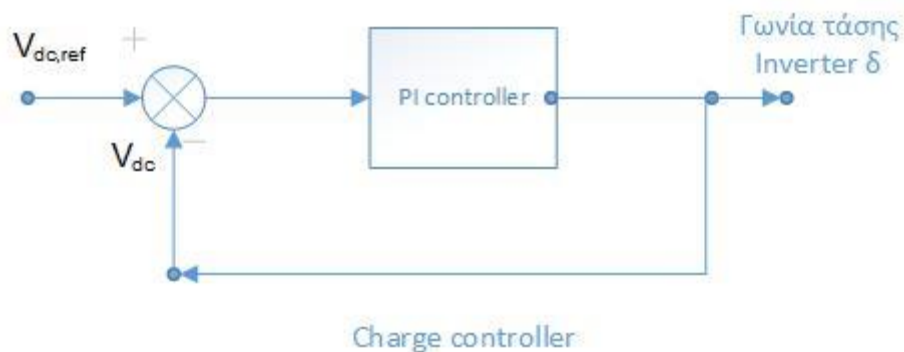


Εικόνα 44 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

## 4.2 ΑΝΩΤΕΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ



Εικόνα 45 Pi ελεγκτής ανεμογεννήτριας



Εικόνα 46 Pi ελεγκτής φ/β

Στην πρώτη εικόνα 45 βλέπουμε το απλοποιημένο σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας και στην εικόνα 46 του φωτοβολταϊκού συστήματος, και τα δύο συστήματα παίρνουν την  $V_{dc}$  σαν ανατροφοδότηση και την συγκρίνει με την  $V_{dc,ref}$ .

Σε περίπτωση που έχουμε λιγότερο φορτίο η  $V_{dc}$  αυξάνεται με αποτέλεσμα το σύστημα ελέγχου αυξάνει την γωνία  $\beta$  των πτερυγίων και μειώνει την γωνία  $\delta$  του inverter.

Στην περίπτωση που έχουμε περισσότερο φορτίο θα μειωθεί η  $V_{dc}$  τότε θα πρέπει να μειωθεί η γωνία  $\beta$  των πτερυγίων και να αυξηθεί η γωνία  $\delta$  του inverter.

Οι παράμετροι των PI βρέθηκαν πειραματικά.

Για τα φωτοβολταϊκά συστήματα οι σημερινοί ελεγκτές φόρτισης κατασκευάζονται με ενσωματωμένο το σύστημα ελέγχου τους.

Το κύκλωμα ελέγχου του ελεγκτή φόρτισης περιλαμβάνει:

- ♦ έναν ελεγκτή ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT ελεγκτής)

♦ όλους τους PI ελεγκτές που απαιτούνται για:

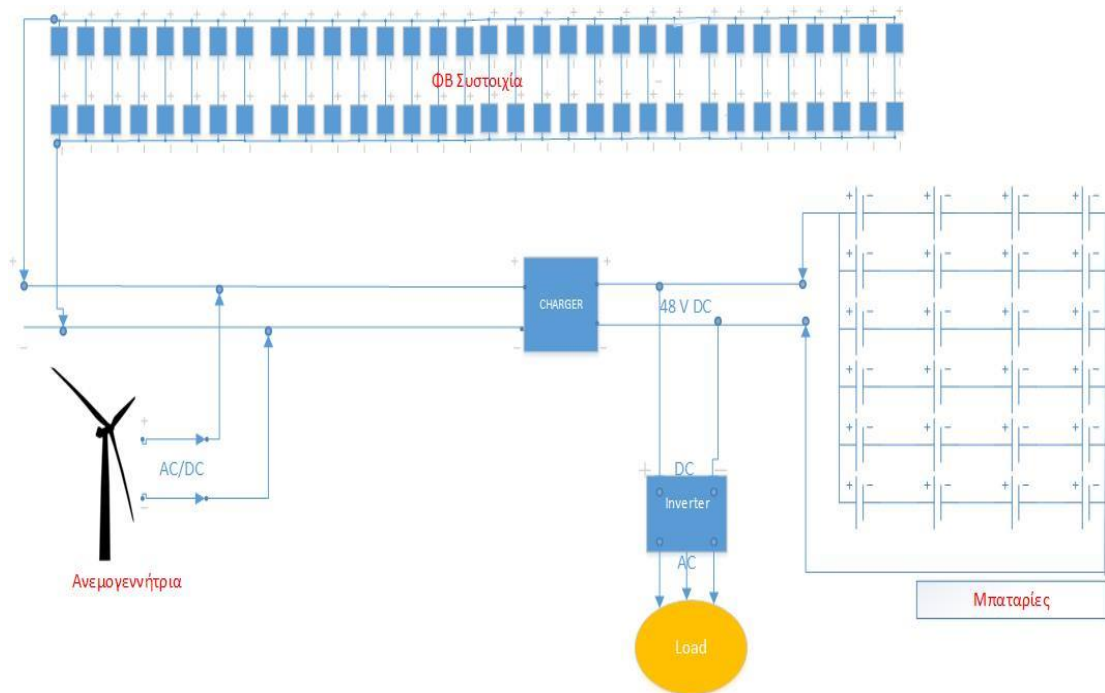
1. τον έλεγχο της dc τάσης
2. τον έλεγχο της αέργου ισχύος

Το σύστημα ελέγχου επιβάλλει στον ελεγκτή φόρτισης να λειτουργεί έτσι ώστε να ρυθμίζονται τα μεγέθη που επιθυμούμε. Η υλοποίηση του συστήματος ελέγχου γίνεται σε έναν μικροεπεξεργαστή και χρησιμοποιώντας τις εξόδους της πλακέτας στην οποία βρίσκεται αυτός, παράγονται οι κατάλληλοι παλμοί για τον έλεγχο των διακοπτικών στοιχείων του ελεγκτή. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία πρέπει να λειτουργεί σε μια τάση που της καθορίζει ο MPPT, ώστε αυτή να παρέχει την μέγιστη ισχύ της.

Για τις ανεμογεννήτριες, ο μηχανισμός ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων στρίβει τα πτερύγια έτσι ώστε να μειωθούν οι στροφές της ανεμογεννήτριας όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας. Ενώ όταν υπάρχει έλλειψη ενέργειας, τα ξαναστρίβει ώστε να πιάσει την ισχύ που χρειάζεται.



## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Εικόνα 47 Αυτόνομο υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών και ανεμογεννήτριας

Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήσαμε το απλοποιημένο υβριδικό σύστημα με τον έναν κεντρικό ελεγκτή φόρτισης και με τα πάνελ όλα συνδεδεμένα μεταξύ τους για να αποφύγουμε την πολυπλοκότητα των ρυθμίσεων στους πολλούς φορτιστές φόρτισης. Σε αυτόν τον κεντρικό ρυθμιστή φόρτισης συνδέσαμε μία τριφασική ανεμογεννήτρια 10kW, η οποία έχει τον μετατροπέα AC/DC ενσωματωμένο.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του SIMULINK, ένα λογισμικό πακέτο που επιτρέπει τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση δυναμικών συστημάτων. Υποστηρίζει γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα, μοντελοποιημένα σε συνεχή ή διακριτό χρόνο, ή ακόμη και υβριδικά συστήματα (μοντελοποιημένα σε συνεχή και σε διακριτό χρόνο). Υποστηρίζονται ακόμη συστήματα με τμηματικά διαφορετικούς χρόνους δειγματοληψίας.

Η μοντελοποίηση στο SIMULINK γίνεται σε ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI) που επιτρέπει την κατασκευή μοντέλων ως δομικών διαγραμμάτων. Το SIMULINK περιλαμβάνει ένα πλήθος βιβλιοθηκών δομικών στοιχείων (blocks), τα βασικότερα από τα οποία είναι οι πηγές (sources), τα στοιχεία απορρόφησης (sinks), τα συνεχή γραμμικά στοιχεία, τα μη γραμμικά στοιχεία και τα στοιχεία σημάτων και συστημάτων.

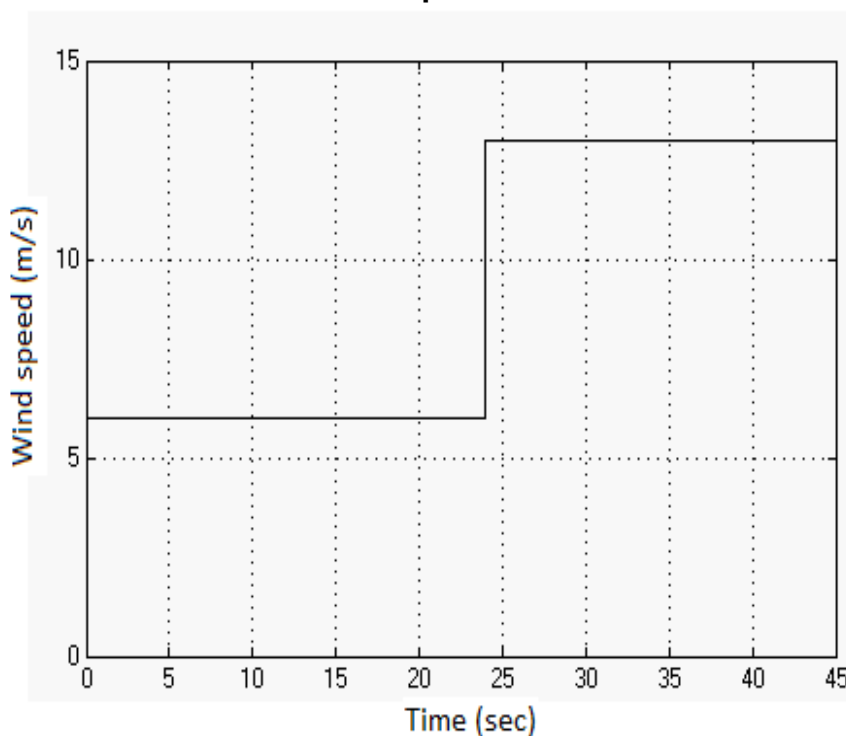


Στην μελέτη μας προσομοιώσαμε δύο σενάρια στο υβριδικό σύστημα που είδαμε παραπάνω. Στο πρώτο σενάριο έχουμε μια απότομη μεταβολή του καιρού. Αυξήθηκε απότομα η ταχύτητα του ανέμου την στιγμή  $t = 24 \text{ sec}$  και έχει συνεφιά, αύξηση δηλαδή της ισχύος της ανεμογεννήτριας και μείωση της ισχύος των φωτοβολταϊκών. Υποθέσαμε ότι το φορτίο μας ήταν σταθερό εκείνη την χρονική στιγμή και οι μπαταρίες μας φορτισμένες.

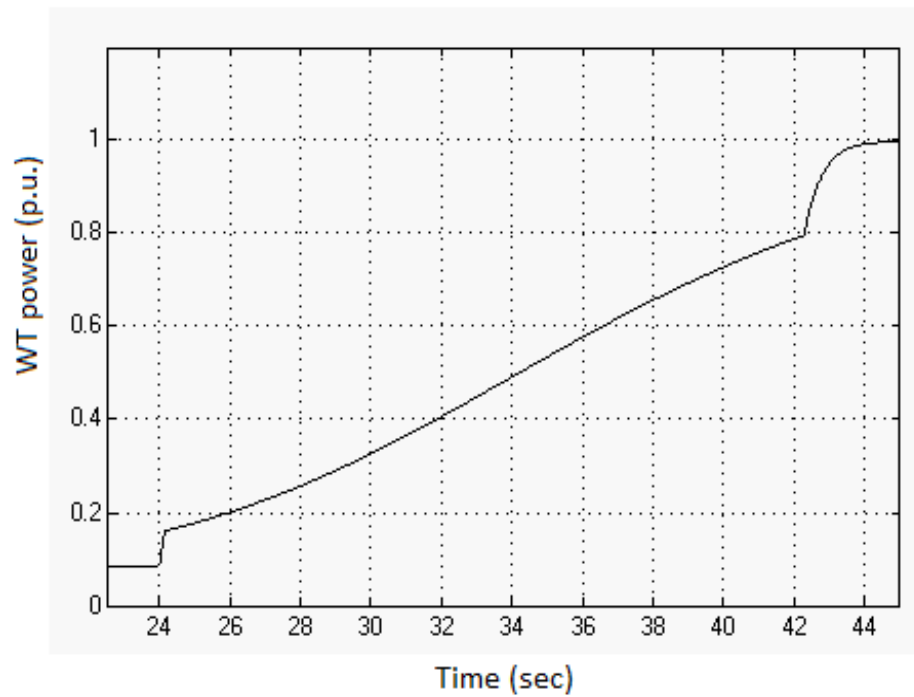
Στο δεύτερο σενάριο, μειώθηκε απότομα το φορτίο την στιγμή  $t = 15 \text{ sec}$ , με τις μπαταρίες μας φορτισμένες.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

### Σενάριο A

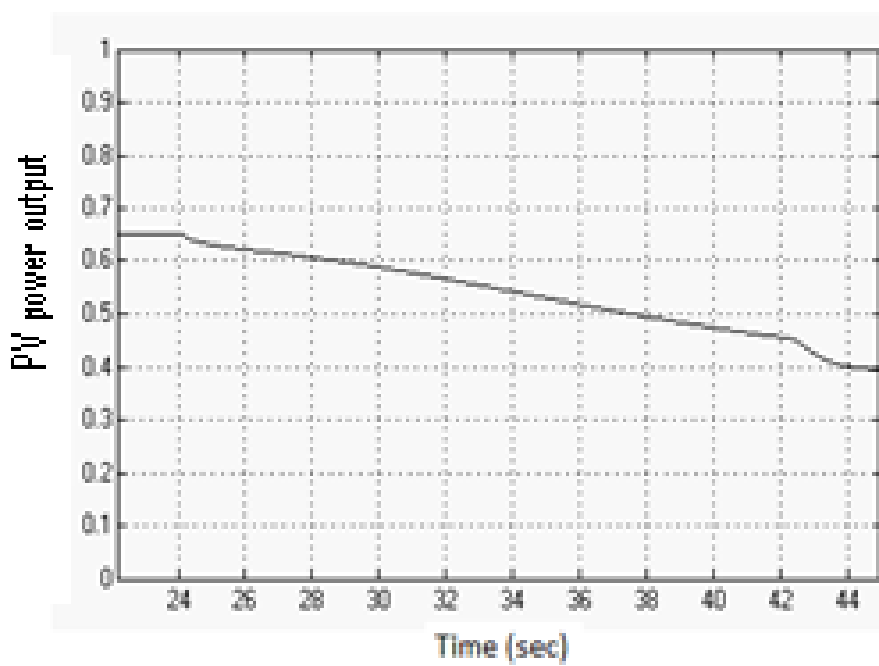


Εικόνα 49 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του χρόνου



(a)

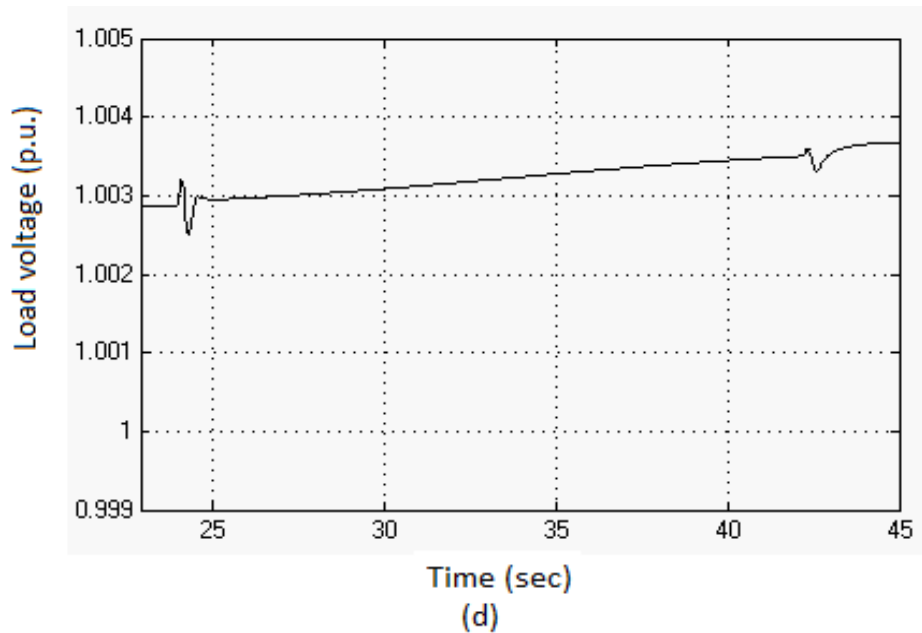
Εικόνα 50 Μεταβολή της ισχύος της ανεμογεννήτριας συναρτήσει του χρόνου



(b)

Εικόνα 51 Μεταβολή της ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος συναρτήσει του χρόνου

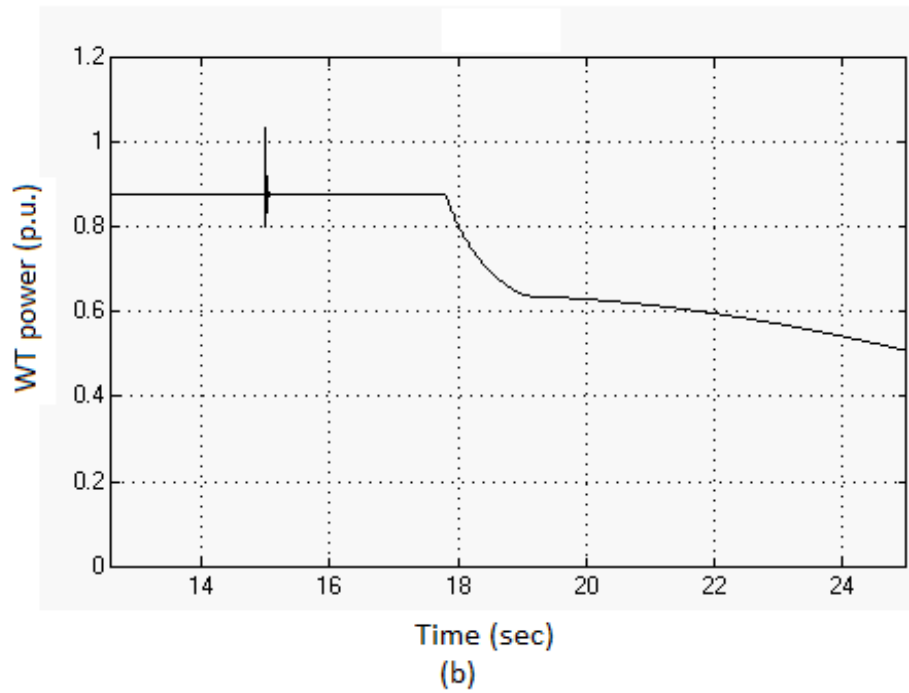




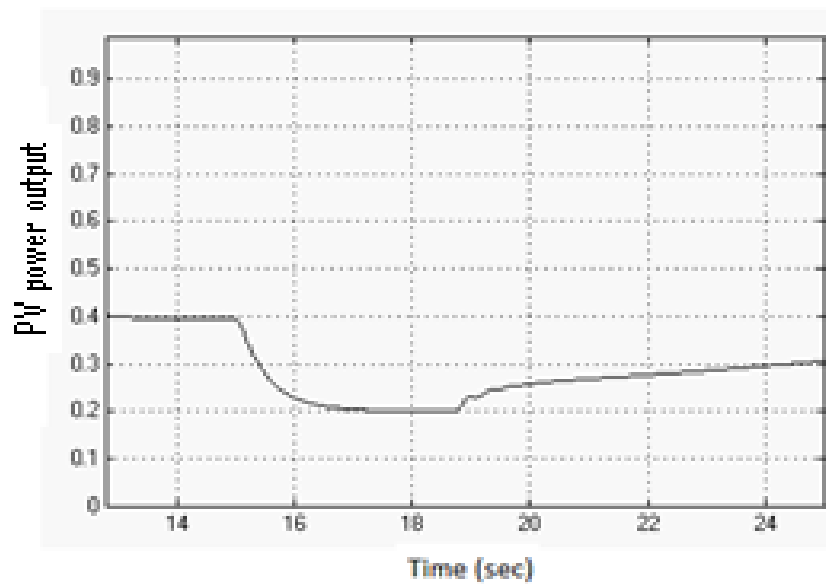
Εικόνα 52 Μεταβολή της τάσης του φορτίου συναρτήσει του χρόνου

Στην εικόνα 49 βλέπουμε την απότομη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου την στιγμή  $t = 24$  sec και μετά σταθεροποιείτε. Για την ίδια στιγμή, βλέπουμε στην εικόνες 50 την ισχύ της ανεμογεννήτριας να αυξάνεται γραμμικά αφού τα πτερύγια της περιστρέφονται πιο γρήγορα με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και ταυτόχρονα βλέπουμε στην εικόνα 51 την γραμμική μείωση της ισχύος της ανεμογεννήτριας από την συννεφιά. Παράλληλα την ίδια χρονική στιγμή βλέπουμε στην εικόνα 52 μια μικρή αυξομείωση της τάσης του φορτίου και μετά σταθεροποιείτε και αυξάνεται γραμμικά.

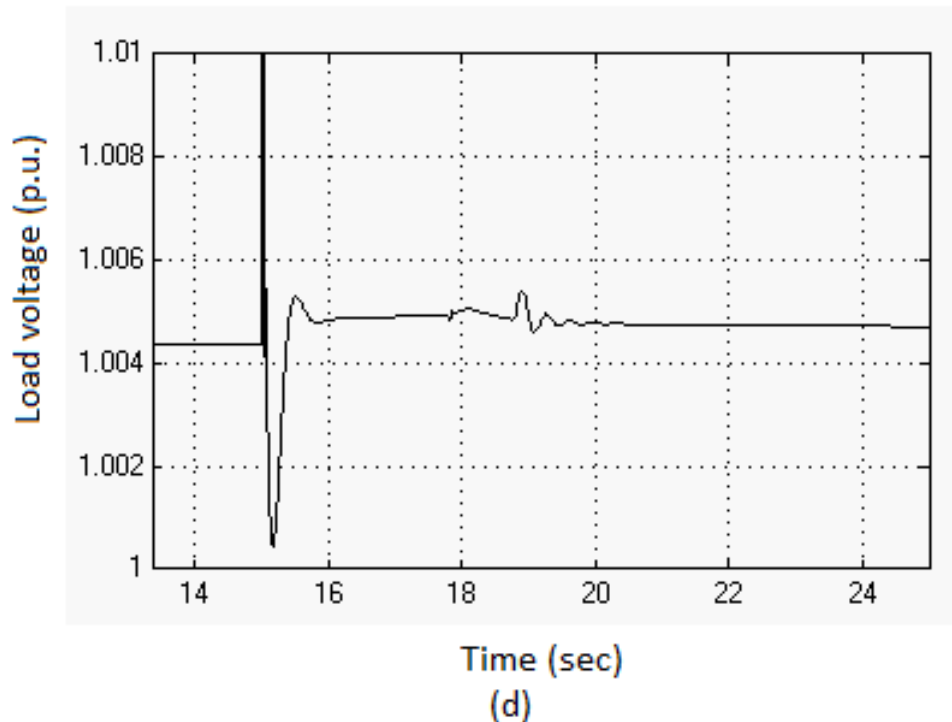
## Σενάριο Β



Εικόνα 53 Μεταβολή της ισχύος της ανεμογεννήτριας συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 54 Μεταβολή της ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 55 Μεταβολή της τάσης του φορτίου συναρτήσει του χρόνου

Στο δεύτερο σενάριο που πραγματοποιήσαμε με την βοήθεια του SIMULINK, μετά από την απότομη μείωση του φορτίου μας την χρονική στιγμή  $t=15$  sec, βλέπουμε στην εικόνα 53 την απότομη μείωση της ισχύος της ανεμογεννήτριας 2,8 sec μετά την μείωση του φορτίου λόγω του χρόνου απόκρισης της ανεμογεννήτριας και μετά βλέπουμε να μειώνεται γραμμικά. Αντίστοιχα, στην εικόνα 54 για την ίδια χρονική στιγμή, η ισχύς των φωτοβολταϊκών μειώνεται κατευθείαν και στην συνέχεια σταθεροποιείται σε χαμηλότερη τιμή. Ενώ η τάση του φορτίου που φαίνεται στην εικόνα 55 έχει μία μεγάλη αυξομείωση για μισό περίπου δευτερόλεπτο και μετά σταθεροποιείται.



## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας έγινε διαστασιολόγηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, στην συνέχεια προσθέσαμε στο σύστημα μας μία ανεμογεννήτρια και προσομοιώσαμε το υβριδικό σύστημα στο SIMULINK. Από την προσομοίωση είδαμε το σύστημα μας να έχει πολύ καλή συμπεριφορά σε απότομες εναλλαγές του καιρού αλλά και σε απότομες μεταβολές του φορτίου. Είδαμε, την τάση του φορτίου να είναι σταθερή παρά την μεγάλη αύξηση της ισχύος της ανεμογεννήτριας και πάρα την απότομη μείωση του φορτίου. Και στις δύο προσομοιώσεις έχουμε τα απολύτως επιθυμητά αποτελέσματα εκμεταλλευόμενοι κατάλληλα τα κέρδη των PI ελεγκτών μας.

Η ημερήσια παραγωγή είναι πιο σταθερή, καθώς και οι δύο πηγές ενέργειας μπορεί να αντισταθμίσουν τις διακυμάνσεις στην απόδοση. Το συνολικό σύστημα θα είναι αποδοτικό κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά την διάρκεια της νύχτας, δεδομένου ότι η αιολική ενέργεια δεν περιορίζεται από το φως του ήλιου. Φυσικά, η παραγωγή θα είναι υψηλότερη κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά δεν πέφτει στο μηδέν τη νύχτα.

Λόγο του ότι το σύστημα μας μπορεί να δουλέψει και την ημέρα αλλά και την νύκτα, χρειάζεται λιγότερους συσσωρευτές ενέργειας.

Αντισταθμίζονται οι εποχιακές διακυμάνσεις. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι πιο αποδοτικά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και οι ανεμογεννήτριες είναι πιο παραγωγικές κατά τη διάρκεια του χειμώνα, αφού ο καιρός τείνει να είναι πιο ανεμώδης.

Με την προσθήκη της ανεμογεννήτριας στο φωτοβολταϊκό σύστημα πετύχαμε πλήρη ενεργειακή αυτονομία του συστήματος ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών, όμως έχουμε και πολύ μεγάλη περίσσεια ενέργειας, που αν δεν έχουμε τρόπο να την αξιοποιήσουμε θα πάει χαμένη. Μέρος της ενέργειας αυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον κλιματισμό των συσσωρευτών ώστε να μην έχουμε μείωση της απόδοσής τους από την θερμοκρασία.

Γενικά το σύστημα αυτό, είναι ένα σύστημα φιλικό προς το περιβάλλον που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μη διασυνδεδεμένα με το δίκτυο νησιά και σε απομακρυσμένες περιοχές και εξασφαλίζει ενεργειακή αυτονομία για όλο τον χρόνο.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bourdoulis, Michael, και Antonio Alexandridis. «Rotor-side Cascaded PI Controller Design and Gain Tuning for DFIG Wind Turbines.» *4th of International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2013)*. Istanbul, Turkey, May 13-17, 2013.
- Diaf, S, D DiaF, M Belhamel, M Haddadi, και A Louche. *methodology for optimal sizing of autonomous hybrid*. Energy Policy, 2007.
- European Wind Energy Association*,. n.d. <http://www.ewea.org>.
- Hongxing Yang, Lin Lu, και Wei Zhou. *A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind*. Solar Energy, 2006.
- Kaplani, Eleni, και Socrates Kaplanis. «Temperature Distribution Effects in PV Modules Operating in Field Conditions.» *5th Int. Conf. on Sustainable Energy & Environmental Protection (SEEP 2012)*. 5-8 June, 2012. 256-261.
- Kaplani, Eleni, και Socrates Kaplanis . «Thermal modelling and experimental assessment of the dependence of PV module temperature on wind velocity and direction, module orientation and inclination.» *Solar Energy*, 2014.
- Kaplanis, S, E Kaplani, και P Wolf. «On the Effect of PV Array Inclination to its Performance and Efficiency.» *World Conf WREC X Glasgow, UK*. 19-25 July, 2008.
- Kaplanis, Socrates, και Eleni Kaplani. *Renewable Energy Systems*. Nova Science Publishers, 2013.
- Rajendra Prasad, και E. Natarajan. *Optimization of integrated photovoltaic–wind*. Solar Energy, 2005.
- Vincent , C.A, και B Scrosati. *Modern Batteries*. 1997.
- Αλεξανδρίδης, Αντώνης. *ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ*. 2009.
- Ελληνική επιστημονική ένωση αιολικής ενέργειας*. n.d. <http://www.eletaen.gr>.
- Καπλάνης, Σωκράτης. *Μηχανική των φωτοβολταϊκών συστημάτων*. ΙΩΝ, 2004.
- Κέντρο ανανεώσιμων πηγών και εξοικονόμησης ενέργειας*. n.d. <http://www.cres.gr>.

Μακρής, Θεόδωρος. «Συνδυασμένη Χρήση Ηλιακής και Αιολικής Ενέργειας για την Κάλυψη Ενεργειακών Αναγκών Κτιρίων.» Διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης, 2009.

Πέρδιος, Σταμάτης. *Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις*. ΣΕΛΚΑ - 4Μ ΕΠΕ, 2011.

Φραγκιαδάκης, Ιωάννης. *Φωτοβολταϊκά Συστήματα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 2011.