

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ □  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**Αριθμός 1394**

## **ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΠΑΡΚΟ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:**

**4136- ΓΕΡΟΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΗΛΙΑΣ**

**4363- ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**4058- ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ ΗΛΙΑΣ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:**  
**ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΠΑΤΡΑ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2014**

## Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>7</b>
<b>1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>8</b>
<b>1.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ</b>	<b>9</b>
1.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	12
1.2.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	12
1.2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	19
1.2.3.1 Σύγχρονη Γεννήτρια	20
1.2.3.2 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG)	21
1.2.3.3 Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG)	21
1.2.3.4 Ασύγχρονη Επαγωγική Γεννήτρια	21
1.2.3.5 Επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG)	22
1.2.3.6 Επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG)	22
1.2.3.7 Επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (OSIG)	23
1.2.3.8 Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG)	23
<b>1.3 ΥΔΡΟΥΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>24</b>
1.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	25
1.3.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	26
1.3.3 ΤΥΠΟΙ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ	29
1.3.3.1 Υδροστροβίλος Τυπου FRANCIS	30
1.3.3.2 Υδροστροβίλος Τυπου KAPLAN	31
1.3.3.3 Υδροστροβίλος Τυπου PELTON	33
1.3.3.4 Υδροστροβίλος Τυπου TURGO	35
1.3.4 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ</b>	<b>40</b>
<b>2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ</b>	<b>41</b>
<b>2.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ</b>	<b>42</b>
<b>2.3 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ</b>	<b>45</b>
<b>2.4 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ</b>	<b>49</b>
<b>2.5 Μοντέλο μιας διόδου</b>	<b>50</b>
<b>2.6 ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ</b>	<b>55</b>
<b>2.7 Θερμική εξάρτηση της απόδοσης ενεργειακής μετατροπής <math>n_c</math> του Φ/Β πλαισίου</b>	<b>58</b>
<b>2.8 Οπτικές απώλειες ενέργειας σε Φ/Β πλαίσια</b>	<b>59</b>
<b>2.9 Παράγοντας γήρανσης του Φ/Β πλαισίου (<math>n_\gamma</math>)</b>	<b>60</b>
<b>2.10 Απώλειες λόγω ανομοιογένειας στα χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων (<math>n_m</math>)</b>	<b>60</b>
<b>2.11 Επίδραση της σκίασης στη λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας, απώλειες και καθορισμός της οριζόντιας απόστασης μεταξύ συστοιχιών.</b>	<b>61</b>
<b>2.12 Επίδραση της σκίασης σε Φ/Β στοιχείο</b>	<b>61</b>

2.13 Επίδραση της σκίασης σε σχέση με τη συνδεσμολογία των Φ/Β πλαισίων και το σύστημα ανιχνευσης μέγιστης ισχύος του αντιστροφέα	62
2.14 Σύνδεση πλαισίων εν σειρά	63
2.15 Παράλληλη σύνδεση πλαισίων	64
2.16 Σύγκριση των παραπάνω τοπολογιών	64
2.17 Οριζόντια απόσταση μεταξύ συστοιχιών σε Φ/Β σταθμό	64
2.18 INVERTERS	67
2.18.1 Λόγος ισχύος αντιστροφέα – ΦΒ πάρκου (ΛΙ)	69
2.18.2 Βαθμός απόδοσης αντιστροφέα	70

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ** **71**

3.1 ΚΥΡΙΑ ΜΕΡΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ	72
3.1.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια	72
3.1.2 Συσκευή παραλληλισμού στοιχειοσειρών (combiner box)	75
3.1.3 Αντιστροφέας (inverter)	75
3.1.4 Βάση στήριξης συστοιχίας	77
3.2 Μεταβολή των ηλεκτρικών παραμέτρων Φ/Β πλαισίων με τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία	78
3.3 Διαδικασία σχεδίασης Φ/Β γεννήτριας	81
3.3.1 Φ/Β γεννήτρια με αντιστροφείς των 15kW και 11kW	82
3.3.2 Ανάπτυξη Φ/Β γεννήτριας σε συστοιχίες	85
3.3.3 Καλωδίωση συστοιχιών	89

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ Φ/Β ΣΤΑΘΜΟΥ** **90**

4.1 Γενική περιγραφή της τοπολογίας	91
4.2 Όδευση καλωδίων – απαιτούμενο μήκος καλωδίων DC	95
4.3 Τύπος καλωδίου	95
4.4 Πτώση τάσης και απώλειες ισχύος στο καλώδιο DC	96
4.5 Μέγιστη επιτρεπόμενη διαρκής φόρτιση καλωδίου DC	98
4.6 Προστασία στη DC πλευρά του αντιστροφέα	99
Θέματα ασφάλειας δικτύου και απόδοσης αντιστροφέα	100
4.7 Διασύνδεση αντιστροφέων σε πίνακα Χαμηλής Τάσης	101
4.8 Προστασίες στον πίνακα Χαμηλής Τάσης	105
4.9 Περιγραφή του Υ/Σ (υποσταθμού) ανύψωσης 0,4/20KV	107
4.9.1 Διαμέρισμα Χαμηλής Τάσης	110
4.9.2 Διαμέρισμα Μετασχηματιστή	112
4.9.3 Διαμέρισμα Μέσης Τάσης	115

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ** **118**

5.1 Προσδιορισμός ειδικής αντίστασης εδάφους	119
5.2 Βασικά πεδιακά μεγέθη	121

5.3	Είδη ηλεκτροδίων γείωσης και υλικά κατασκευής τους	123
5.4	Διάβρωση στους γειωτές	127
5.5	Σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης Φ/Β σταθμών	130
<b><u>Συμπεράσματα</u></b>		<b>132</b>
Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα		132
<b><u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u></b>		<b>134</b>
<b><u>ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ</u></b>		<b>135</b>
<b><u>ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ</u></b>		<b>136</b>

# Εισαγωγή

Η αύξηση του πληθυσμού, των αναγκών του ανθρώπου και η ραγδαία πρόοδος της τεχνολογίας έχει ως άμεση συνέπεια την απαίτηση ολοένα και μεγαλύτερων ποσών ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια οι αρνητικές επιπτώσεις που προκαλούν οι συμβατικές μορφές ενέργειας (πετρέλαιο, λιθάνθρακας, φυσικό αέριο) στο περιβάλλον όπως η μεγάλη συσσώρευση ρύπων και CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και η άυξηση της μέσης θερμοκρασίας στη γη, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τόσο των επιστημόνων όσο και των κυβερνήσεων στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Το συγκριτικό τους πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών πηγών είναι ότι οι ΑΠΕ είναι ανεξάντλητες, φιλικές προς το περιβάλλον και συμβάλλουν μακροπρόθεσμα στη μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια ήπια μορφή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο άμεσα όσο και έμμεσα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Άμεσα, με τη μετατροπή απευθείας της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα με τη χρήση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πλαισίων και έμμεσα, για την παραγωγή ατμού και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ατμοστρόβιλους. Η Ελλάδα είναι μια από τις ιδανικότερες χώρες για την εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων λόγω του πλούσιου ηλιακού δυναμικού της κατά τη διάρκεια όλου του έτους.

## Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Φ/Β διατάξεων

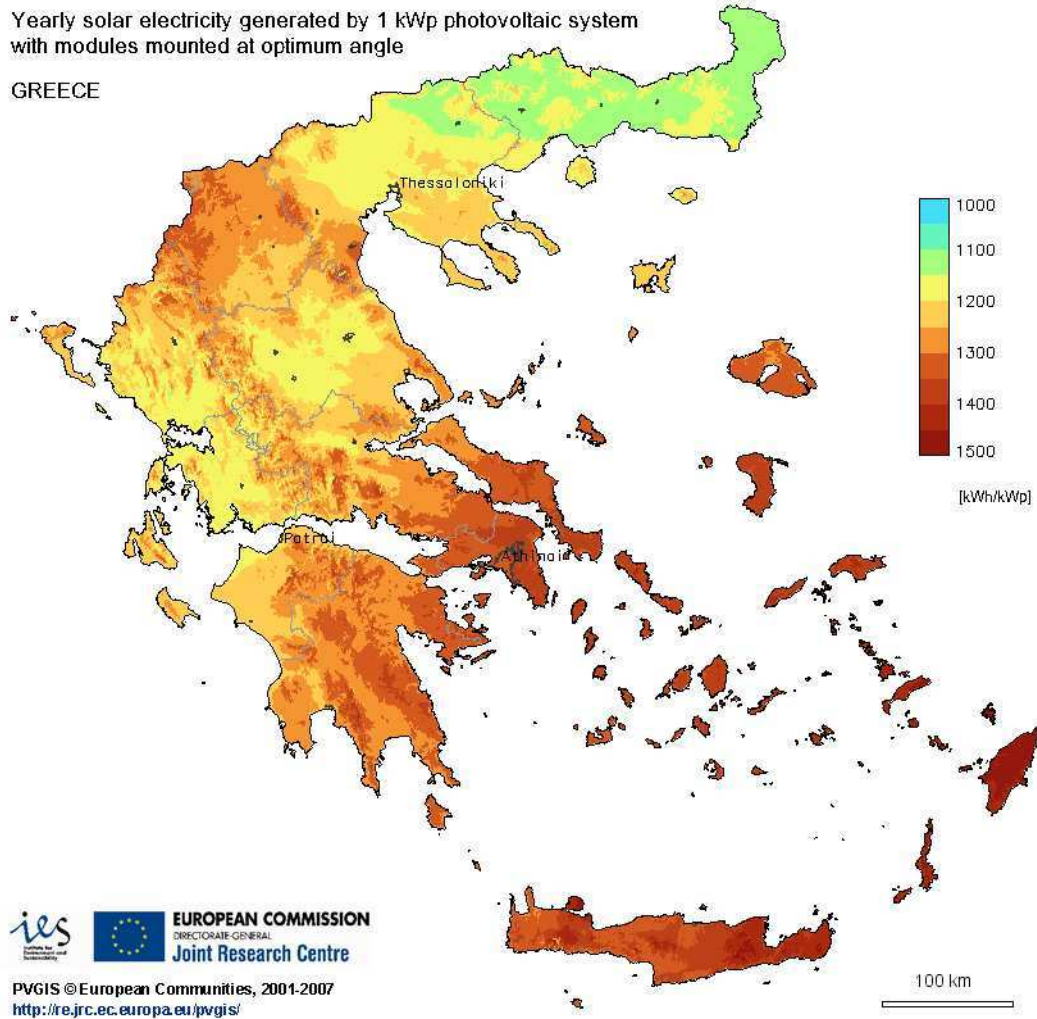
Σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Παρουσιάζει μηδενική ρύπανση και επιβάρυνση του περιβάλλοντος
- Δεν χρησιμοποιούνται διατάξεις με περιστρεφόμενα μέρη κάτι που συνεπάγεται την αθόρυβη λειτουργία, την αξιοπιστία και ελάχιστες ανάγκες συντήρησης
- Η διάρκεια ζωής των Φ/Β στοιχείων είναι μεγάλη (20 με 25 χρόνια)
- Υπάρχει δυνατότητα τόσο για αυτόνομη όσο και για διασυνδεδεμένη λειτουργία των Φ/Β σταθμών
- Τα Φ/Β στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες σε μεγάλο εύρος εφαρμογών, από μερικά Watt έως και δεκάδες MW

Παρόλα αυτά παρουσιάζουν και μειονεκτήματα όπως:

- Χαμηλή απόδοση μετατροπής για κοινά Φ/Β πλαίσια κάτι που σημαίνει ότι απαιτούνται μεγάλες εκτάσεις για την τοποθέτησή τους
- Ακριβός εξοπλισμός με αποτέλεσμα υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης

- Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με μεγάλους συντελεστές απωλειών κάνοντάς την μη αποδοτική. Επιπλέον, οι συσσωρευτές αποθήκευσης έχουν μεγάλο κόστος.
- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι άμεση συνδεδεμένη με τις παρούσες καιρικές συνθήκες, παράγοντας ο οποίος δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια.



Σχήμα 1: Ηλεκτικό Δυναμικό στην Ελλάδα

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν βασική τους προέλευση τον Ήλιο. Η ακτινοβολούμενη από τον ήλιο ενέργεια, που φτάνει στη Γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίνει ακατάπαυστα ενέργεια, που την αξιοποιούμε σε διάφορες μορφές. Άμεσα θερμαίνει (π.χ νερό-ηλιακοί συλλέκτες), εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις, Υ/Δ ενέργεια). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (Αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (Ενέργεια κυμάτων). Απορροφούμενη από συνδυασμένα υλικά παράγει ηλεκτρισμό (Φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα).

Οι ήπιες μορφές ενέργειας ή "Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας" (ΑΠΕ) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος "ήπιες" αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχήν, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά απλώς η εκμετάλλευσή της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερο, πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Τα τελευταία χρόνια η Ευρωπαϊκή Ένωση υιοθετεί πολιτικές προώθησης των ΑΠΕ, με άλλες χώρες ανά τον κόσμο όπως πχ η Αμερική να ακολουθούν το παράδειγμα της Ευρώπης.

Οι κύριες μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

### 1 Η Ηλιακή

Η Ηλιακή Ενέργεια αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται άμεσα την ηλιακή ακτινοβολία και διακρίνονται σε:

- **Θερμικά Ηλιακά Συστήματα**, στα οποία χρησιμοποιούνται κατάλληλοι συλλέκτες για τη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας και την αποθήκευσή της, με τη μορφή θερμότητας, σε κάποιο ρευστό.
- **Φ/Β Συστήματα**, με τα οποία μετατρέπεται η ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική, μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

### 2 Η Αιολική

Στηρίζεται στην εκμετάλλευσή της κινητικής ενέργειας των ανέμων. Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό δεσμεύουν την κινητική ενέργεια του ανέμου και την μετατρέπουν είτε σε κάποια άλλη μορφή μηχανικής ενέργειας είτε, συνηθέστερα, σε ηλεκτρική (ανεμογεννήτριες).



### **3 Η Γεωθερμική**

Αξιοποιούνται τα θερμά νερά ή/και οι ατμοί που υπάρχουν σε υπόγειους ταμιευτήρες σε πολλές περιοχές της Γης. Τα ρευστά αυτά, όταν είναι εφικτό να αντληθούν με οικονομικά συμφέρον κόστος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε θερμικές εφαρμογές, είτε για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

### **4 Βιομάζα**

Με τον όρο αυτό εννοούμε τη χημική ενέργεια που εμπεριέχεται σε κάθε υλικό που προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από το φυτικό κόσμο. Η καύση της βιομάζας, είτε απευθείας είτε μετατρεπόμενη σε κατάλληλο καύσιμο, αποδίδει θερμική ενέργεια, η οποία, στη συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποικιλία εφαρμογών.

### **5 Υδροηλεκτρική**

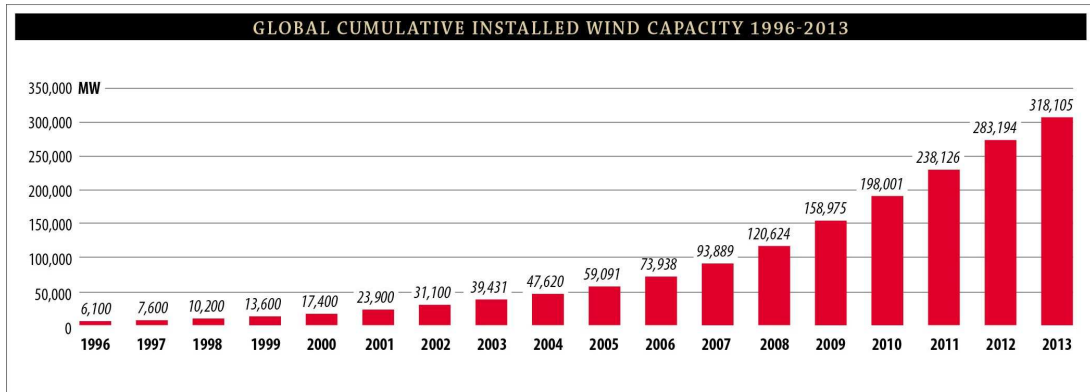
Στηρίζεται στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του νερού των ποταμών και την μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια στροβίλων και ηλεκτρογεννητριών.

Όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν κάποια κοινά πλεονεκτήματα, με κυριότερα από αυτά, τη δυναμική συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο και και στον περιορισμό της εξάρτησης από τα συμβατικά καύσιμα, την προστασία του περιβάλλοντος, το μηδενικό κόστος πρώτης ύλης, το οποίο, σε συνδυασμό με τις μικρές απαιτήσεις συντήρησης που εμφανίζουν, συνεπάγεται περιορισμένο κόστος λειτουργίας. Έτσι, αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό το μέχρι σήμερα μειονέκτημα του αυξημένου κόστους που απαιτείται για την εγκατάσταση των μονάδων εκμετάλλευσης τους. Τέλος, συμβάλλουν στην αποκέντρωση και την ανάπτυξη της τοπικής οικονομίας σε κάθε περιοχή όπου εγκαθίστανται τέτοιου είδους μονάδες.

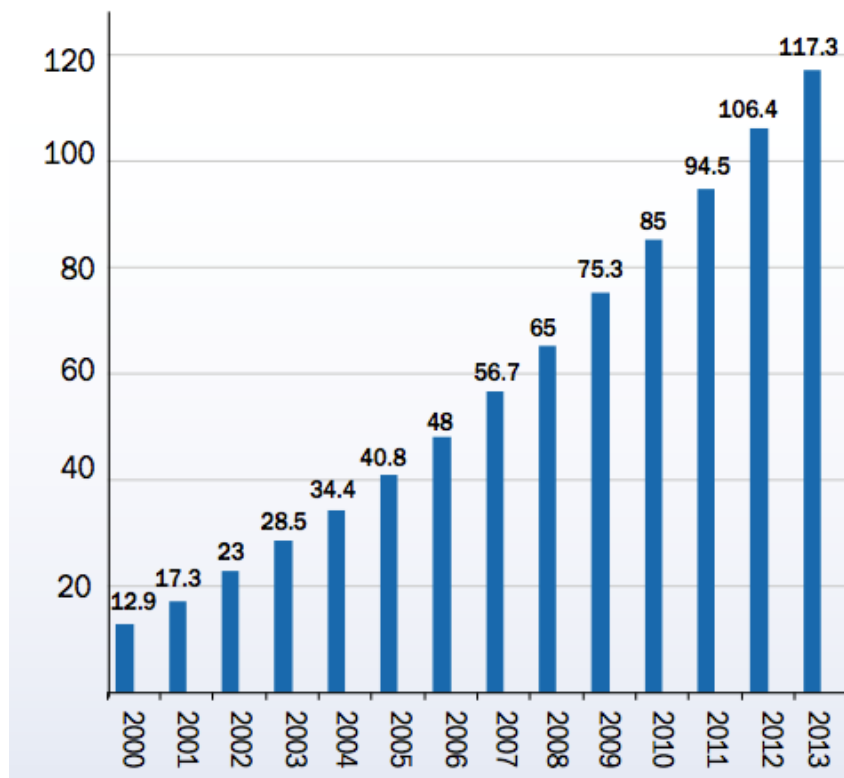
## **1.2 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Η αιολική ενέργεια είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο, με παγκόσμια συνολική εγκατεστημένη ισχύ 318,1 GW μέχρι το τέλος του 2013. Στην Ευρώπη η εγκατεστημένη ισχύς ήταν περίπου 117 GW μέχρι το τέλος του 2013 με συνεχώς αυξητική πορεία, ενώ στην Ελλάδα λίγο κάτω από 1,9 GW. Αν υπήρχε η τεχνολογική δυνατότητα να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες της ανθρωπότητας στο ίδιο χρονικό διάστημα. Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης και σε ύψος 10 m πάνω από το έδαφος επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας που ξεπερνά τα 5,1 m/sec. Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, όταν η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά αυτήν την τιμή το αιολικό δυναμικό ενός τόπου θεωρείται ενεργειακά εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες.

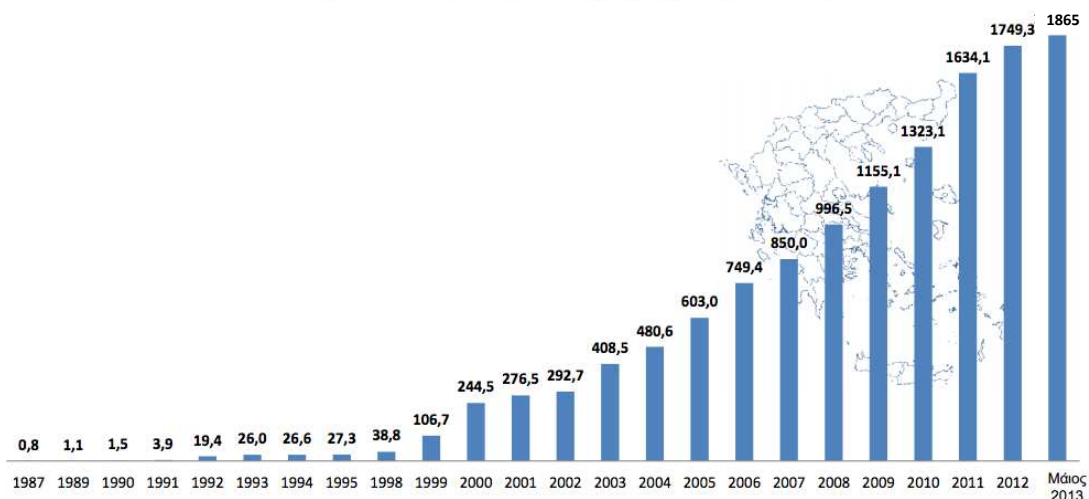
Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν τα στατιστικά δεδομένα για την αιολική ενέργεια σε Ελλάδα, Ευρώπη αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο [www.gwec.net](http://www.gwec.net) - [www.eletaen.gr](http://www.eletaen.gr) - [www.ewea.org](http://www.ewea.org).



**Σχήμα 2: Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς στην αιολική ενέργεια**



Σχήμα 3: Εγκατεστημένη ισχύς στην αιολική ενέργεια στην Ευρώπη



Σχήμα 4: Εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα

### 1.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η δύναμη του ανέμου εκτιμήθηκε και χρησιμοποιήθηκε από τους ανθρώπους από πολύ νωρίς. Υπάρχουν αναφορές για τη χρήση ανεμοκινητήρων στην Περσία ακόμα και από το 200 π.Χ. Ωστόσο οι πρώτοι ανεμοκινητήρες που είχαν πρακτικές εφαρμογές κατασκευάστηκαν στο Σίستان, μια περιοχή ανάμεσα στο σημερινό Αφγανιστάν και Ιράν, κατά τον 7ο αιώνα. Οι ανεμόμυλοι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για την άλεση του καλαμποκιού και για την άντληση νερού. Κατά τον 14ο αιώνα στην Ολλανδία, ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για την αποξήρανση περιοχών στον ποταμό Ρήνο. Ήδη το 1900 στη Δανία υπήρχαν περισσότεροι από 2500 ανεμοκινητήρες για μηχανικά φορτία, όπως αντλίες και μύλοι. Με την πάροδο των χρόνων όμως περάσαμε από την εποχή των απλών ανεμοκινητήρων στην εποχή των ανεμοκινητήρων ανεμογεννητριών και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές. Η πρώτη γνωστή ανεμογεννήτρια που λειτούργησε, ήταν μια μηχανή φόρτισης μπαταρίας, που εγκαταστάθηκε το 1887 από τον James Blyth στη Σκωτία. Η πρώτη ανεμογεννήτρια για την παραγωγή ενέργειας λειτούργησε το 1888 στο Κλήβελαντ του Οχάιο από τον Charles F. Brush. Ήδη το 1908 υπήρχαν εγκατεστημένες 72 ανεμογεννήτριες από 5 ως 25 KW. Οι μεγαλύτερες από αυτές τις μηχανές είχαν 24 μέτρα πύργο και είχαν 4 πτερύγια των οποίων η διάμετρος ήταν 23 μέτρα. Στη δεκαετία του 1930 οι ανεμογεννήτριες σε φάρμες ήταν μια πολύ συνηθισμένη εικόνα για τις Ηνωμένες Πολιτείες στις οποίες το ηλεκτρικό δίκτυο δεν ήταν ακόμα αρκετά εξαπλωμένο. Οι ανεμογεννήτριες αυτές είχαν κάθετο άξονα. Ένας από τους πρώτους πρόγονους των μοντέρνων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα που χρησιμοποιούνται σήμερα μπήκε σε λειτουργία στη Γιάλτα της πρώην Σοβιετικής Ένωσης το 1931. Η ανεμογεννήτρια αυτή ήταν 100 KW και συνδέθηκε με το τοπικό δίκτυο των 6.3 KV. Η πρώτη ανεμογεννήτρια της τάξης του μεγαβάτ εγκαταστάθηκε στο Βέρμοντ το 1941, αν και μπόρεσε να δουλέψει μόνο για 1100 ώρες.

Το 1978, μια διεθνής σχολή στη Δανία κατασκεύασε μία ανεμογεννήτρια ύψους 53 μέτρων με 3 φτερά των 27 μέτρων το καθένα. Η ανεμογεννήτρια αυτή θεωρείται ο πρόδρομος των τύπων που επικρατούν σήμερα, δηλαδή οριζόντιου άξονα με τρία φτερά. Το 1980, κατασκευάζεται στο New Hampshire, USA το πρώτο αιολικό πάρκο στον κόσμο και αποτελείται από 20 ανεμογεννήτριες των 30 kW. Το 1991, το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο εμπορικής αξιοποίησης εγκαθίσταται στη Δανία 2 km από την ακτή. Αποτελείται από 11 ανεμογεννήτριες των 450 kW, ύψους 35 m. Έτσι ξεκινάει η επανάσταση στα αιολικά φτάνοντας μέχρι σήμερα όπου μία μέση ανεμογεννήτρια έχει ισχύ 2 MW και φτερά 45 μέτρα με τις μεγαλύτερες να έχουν ισχύ 6 MW και φτερά 75 μέτρων.

### 1.2.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η αιολική ενέργεια προέρχεται από ανέμους που αναπτύσσονται εξαιτίας της ανομοιόμορφης θέρμανσης της ατμόσφαιρας από τον ήλιο, της πολυπλοκότητας στο ανάγλυφο της γης και της περιστροφή της. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο οφείλεται στην αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Η ροή του ανέμου βασίζεται ουσιαστικά στο ανάγλυφο της επιφάνειας της γης αλλά και της βλάστησης (τραχύτητα εδάφους). Σήμερα, για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μέσω της πτερωτής, έχουμε την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική ενέργεια με την μορφή περιστροφής του άξονα της

περωτής και στο δεύτερο στάδιο, μέσω της γεννήτριας, επιτυγχάνουμε την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Για την πλήρη περιγραφή του ανέμου πρέπει να γνωρίζουμε την ένταση, δηλαδή την ταχύτητα με την οποία κινείται, και την διεύθυνσή του. Η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου εξαρτώνται τόσο από ειδικούς παράγοντες (γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία, πεδίο πίεσης), όσο και από τους τοπικούς παράγοντες (ανάγλυφο της περιοχής, τραχύτητα εδάφους). Η γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία οφείλεται στη διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ ισημερινού και πόλων, στην περιστροφή της γης καθώς και στην ανομοιομορφία της θερμικής συμπεριφοράς ξηράς και θάλασσας.

Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης για την εγκατάσταση αιολικών συστημάτων, πρέπει να είναι γνωστά η ταχύτητα (μέση ταχύτητα 10λέπτου), η διεύθυνση του ανέμου, η επικρατούσα ανατάραξη (turbulence intensity) στην περιοχή, η ριπή του ανέμου στα 50 χρόνια (στατιστικά, Method of Independent Storms, ανάλυση Gumbel), καθώς και η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους από το έδαφος.

Επειδή ο άνεμος δεν είναι ένα σταθερό φαινόμενο αλλά χρονικά μεταβαλλόμενο και επειδή δεν μεταβάλλεται με προκαθορισμένο τρόπο, αλλά με τυχαίο, για την περιγραφή του χρησιμοποιείται μια γνωστή κατανομή. Η κατανομή που ταιριάζει καλύτερα στην περιγραφή της ταχύτητας του ανέμου είναι η κατανομή Weibull, η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-(v/c)^k}$$

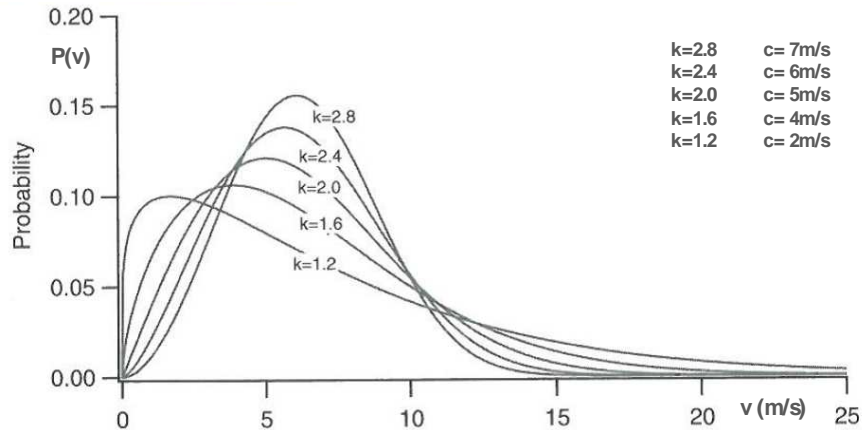
Εξίσωση 1

όπου:

- $v$ : η ταχύτητα του ανέμου
- $k$ : η παράμετρος μορφής, σχετίζεται με την διακύμανση του ανέμου και καθορίζει το εύρος της καμπύλης
- $c$ : η παράμετρος μεγέθους, σχετίζεται με τη μέση τιμή του ανέμου και καθορίζει τη θέση της καμπύλης σχετικά με τον οριζόντιο άξονα.

Αν στη σχέση (1) θέσουμε  $k=2$  τότε προκύπτει η κατανομή Rayleigh, η οποία αποτελεί υποσύνολο της κατανομής Weibull. Η κατανομή Rayleigh είναι πολύ εύχρηστη και τις περισσότερες φορές αντιπροσωπεύει την ανεμολογική εικόνα μιας συγκεκριμένης περιοχής, πορόλα αυτά για έργα μεγάλης κλίμακας απαιτείται η προσαρμογή της καμπύλης στις πραγματικές μετρήσεις ανέμου, διότι παίζει σημαντικό ρόλο στις αντοχές και στην κόπωση του μηχανολογικού εξοπλισμού.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή Weibull για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων  $k$  και  $c$ .



Σχήμα 5: Κατανομή Weibull για διαφορετικές τιμές  $c$  και  $k$

Σημαντικό ρόλο στη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης εικόνας για την ανεμολογική εικόνα μιας περιοχής έχει και το οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα (Boundary Layer). Στο κατώτατο ατμοσφαιρικό στρώμα (περίπου 1000 m από την επιφάνεια της θάλασσας) η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με το ύψος, λόγω της θερμικής διαστρωμάτωσης και της αλληλεπίδρασης του ανέμου με την επιφάνεια της γης. Τα χαρακτηριστικά του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος καθορίζονται κυρίως από το ανάγλυφο της γης, από τον άνεμο και την κατάσταση της ατμόσφαιρας (σταθερή, ασταθής και ουδέτερη).

Για τον υπολογισμό της διάτμησης του ανέμου μέσα στο επιφανειακό στρώμα χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

Ο λογαριθμικός νόμος:

$$v = v_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$

Εξίσωση 2

όπου:

- $v$ : η ταχύτητα σε ύψος  $z$
- $z$ : ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας στο οποίο θα υπολογιστεί η ταχύτητα  $v$

- $v_{\text{ref}}$ : γνωστή (μετρημένη) ταχύτητα σε ύψος  $z_{\text{ref}}$
- $z_{\text{ref}}$ : ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας όπου η ταχύτητα είναι η  $v_{\text{ref}}$
- $z_0$ : τραχύτητα εδάφους

και ο εκθετικός νόμος:

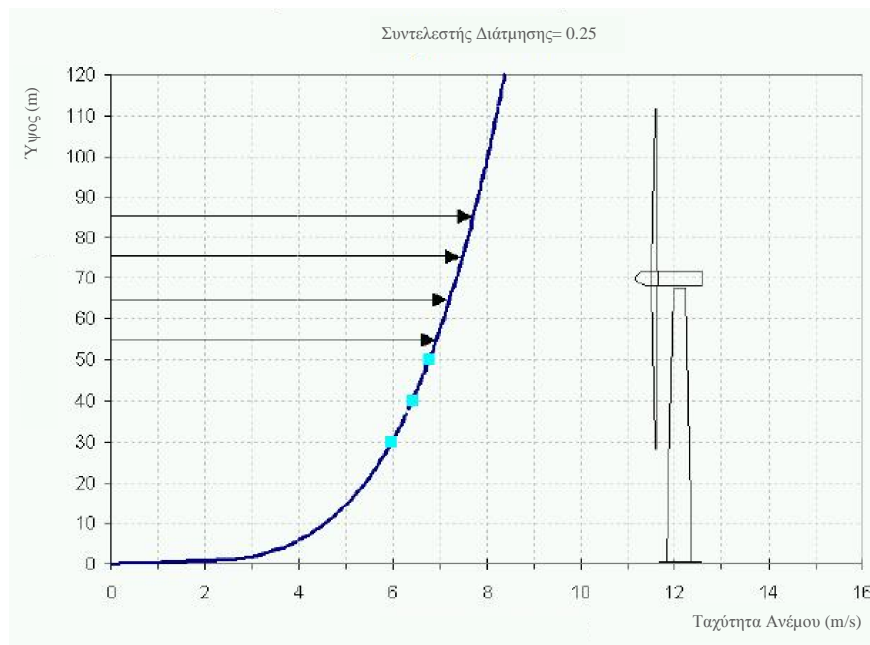
$$v_2 = v_1 \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^a$$

**Εξίσωση 3**

όπου:

- $v_2$ : η ταχύτητα σε ύψος  $z_2$
- $v_1$ : η ταχύτητα σε ύψος  $z_1$
- $z_2$ : ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας που αντιστοιχεί στην ταχύτητα  $v_2$  (μεγαλύτερο του  $z_1$ )
- $z_1$ : ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας που αντιστοιχεί στην ταχύτητα  $v_1$
- $a$ : συντελεστής διάτμησης του ανέμου (wind shear).

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει το προφίλ του ανέμου μιας περιοχής με συντελεστή διάτμησης 0.25 για τα πρώτα 120 m από την επιφάνεια της θάλασσας.

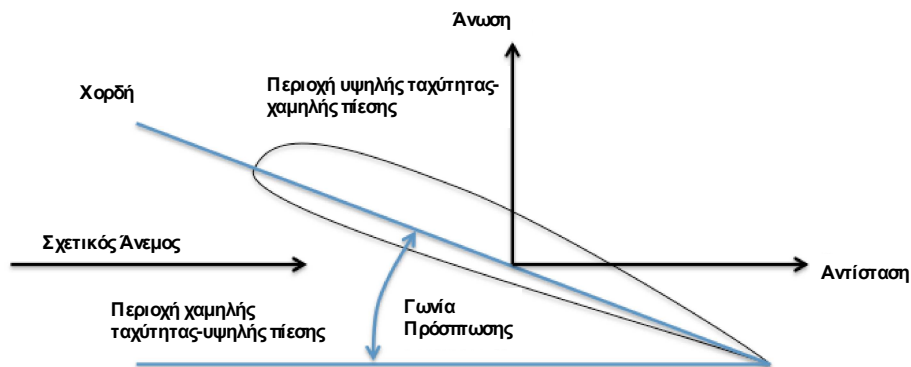


**Σχήμα 6: Διάτμηση ανέμου σχετικά με μία ανεμογεννήτρια**

Ο συντελεστής διάτμησης μπορεί να πάρει διάφορες τιμές. Η τιμή του 0.25 μπορεί να θεωρηθεί αρκετά υψηλή και συνήθως συναντάται σε περιοχές με ήπιο γεωγραφικό ανάγλυφο ή σχετικά επίπεδο. Στην Ελλάδα τα αιολικά πάρκα αναπτύσσονται σε περιοχές με αρκετά πολύπλοκο ανάγλυφο (βουνά) όπου ο συντελεστής διάτμησης είναι αρκετά χαμηλός. Ο συντελεστής διάτμησης μπορεί να είναι μηδενικός αλλά και αρνητικός. Στην πρώτη περίπτωση (μηδενικός) η ταχύτητα του αέρα δεν διαφοροποιείται με το ύψος. Στην δεύτερη περίπτωση (αρνητικός) το προφίλ είναι αντεστραμμένο και η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να μειώνεται καθώς αυξάνεται το ύψος, φαινόμενο που παρατηρείται συνήθως σε απότομες βουνοκορφές και συνήθως σε χαμηλά ύψη από την επιφάνεια της γης. Σε οποιαδήποτε περίπτωση, ο υπολογισμός του συντελεστή διάτμησης πρέπει να βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις μέσω μετρητικού εξοπλισμού (ιστός, LIDAR) καθώς είναι ένα πολύπλοκο μέγεθος που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (κατάσταση ατμόσφαιρας, γεωγραφικό ανάγλυφο, τραχύτητα εδάφους).

Πρώτο βήμα για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική αποτελεί η εκμετάλευση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα φτερά των ανεμογεννητριών. Οι δυνάμεις αυτές είναι η αντίσταση και η άνωση. Η αντίσταση είναι η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο από τον αέρα και έχει την κατεύθυνση της ροής του αέρα. Άνωση είναι μία δύναμη κάθετη στη ροή του αέρα και δημιουργείται λόγω της υποπίεσης στην πλευρά του σώματος στην οποία η ροή επιταχύνεται. Το φτερό είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να εκμεταλεύεται του νόμους της φυσικής και συγκεκριμένα την διατήρηση της μάζας σε κάθε σημείο του χώρου. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται περιοχές υψηλής πίεσης και χαμηλής ταχύτητας ανέμου και περιοχές χαμηλής πίεσης και υψηλής ταχύτητας ανέμου. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.





Σχήμα 7: Διατομή φτερού ανεμογεννήτριας

Η άνωση είναι μικρή για μηδενική γωνία πρόσπτωσης και μεγιστοποιείται για μικρές γωνίες. Για μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης παρατηρείται το φαινόμενο αποκόλλησης της ροής όπου το φτερό παύει να διατηρεί τις αεροδυναμικές του ικανότητες (φαινόμενο stall).

Η μηχανική ισχύς που απορροφάται από τον άνεμο σε μια ανεμογεννήτρια είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου (κυβικός νόμος) και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot v^3$$

Εξίσωση 4

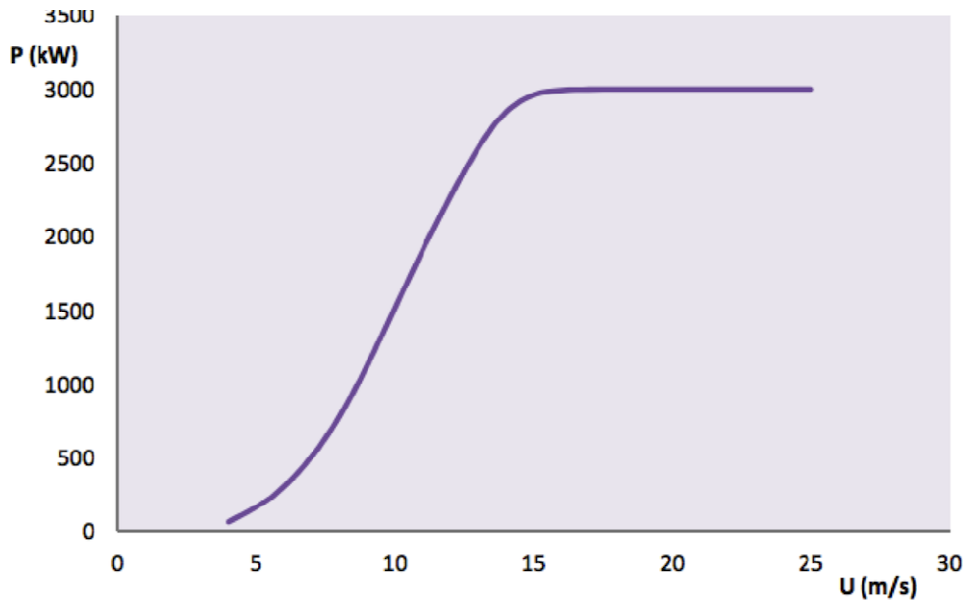
όπου:

- $\rho$ : η πυκνότητα του αέρα
- $A$ : η επιφάνεια σάρωσης της ανεμογεννήτριας
- $C_p$ : ο συντελεστής αεροδυναμικής ισχύος
- $v$ : η ταχύτητα του ανέμου

Η επιφάνεια σάρωσης είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται καθαρά από την γεωμετρία της ανεμογεννήτριας. Για ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα που είναι και οι πλέον συνηθισμένες η επιφάνεια σάρωσης εξαρτάται από την ακτίνα του πτερυγίου  $R$ . Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  είναι το ποσοστό της εκμεταλλεόμενης ισχύος του ανέμου από την ανεμογεννήτρια και εξαρτάται από μεγέθη όπως το σχήμα του φτερού, την γωνία πρόσπτωσης κλπ.

Η ισχύς μιας ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου. Κάθε μηχανή χαρακτηρίζεται από την καμπύλη ισχύος της η οποία εξαρτάται από τον σχεδιασμό και τα

γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ρότορα. Μία χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8: Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 3.0 MW

Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται από την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (3-4 m/s) όπου και ξεκινάει να παράγει ενέργεια, την ταχύτητα που ξεκινάει να παράγει την ονομαστική της ισχύ (11-14 m/s) και την ταχύτητα που τίθεται εκτός λειτουργίας για προστασία από δυνατούς ανέμους και ριπές (22-25 m/s). Η παραγόμενη ενέργεια μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την καμπύλη ισχύος της, από τον άνεμο στην περιοχή, τη διαθεσιμότητα της, τις απώλειες μεταφοράς και τον βαθμό απόδοσης του αιολικού πάρκου στο οποίο ανήκει μία ανεμογεννήτρια.

Υπάρχουν αρκετά διαφορετικά είδη μηχανών αλλά αυτό που έχει επικρατήσει εμπορικά είναι η ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, με τρία φτερά που υποδέχεται τον αέρα στο μπροστινό μέρος του ρότορα (ανάντι) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [www.cres.gr](http://www.cres.gr) - - [www.eletaen.gr](http://www.eletaen.gr) - [www.vestas.com](http://www.vestas.com).



Σχήμα 9: Ανεμογεννήτρια

### 1.2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Η γεννήτρια μιας μηχανής συνδέεται με τον ρότορα μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων και του κύριου άξονα (στην περίπτωση που υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων). Η επικρατέστερη τάση σήμερα είναι η παραγωγή ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας με έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων. Ο πιο κοινός τύπος γεννήτριας που απαντάται σήμερα είναι οι επαγωγικές γεννήτριες, ενώ σε πολύ μικρό ποσοστό χρησιμοποιούνται και οι σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμο μαγνήτη. Σήμερα, στη διεθνή αγορά των ανεμογεννητριών κυρίαρχος τύπος ανεμογεννήτριας (σε ποσοστό μεγαλύτερο του 70%), είναι αυτός με επαγωγική μηχανή διπλής τροφοδοσίας (DFIG), με μεταβλητή ταχύτητα και μεταβλητό έλεγχο γωνίας κλίσης των πτερυγίων. Γενικά, για ισχύ της τάξης των MW, μια ανεμογεννήτρια μπορεί να εξοπλιστεί με οποιαδήποτε τριφασική γεννήτρια. Όλοι οι γενικοί τύποι γεννητριών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ανεμογεννήτριες, δηλαδή:

- Σύγχρονες γεννήτριες
  - i) Σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (PMSG)
  - ii) Σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG)

- Ασύγχρονες (επαγωγικές) γεννήτριες
  - i) Επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG)
  - ii) Επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG)
  - iii) Επαγωγικές γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (OSIG)
  - iv) Επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (DFIG)

Παρακάτω φαίνεται η τοπολογία μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη ή επαγωγική γεννήτρια.



Σχήμα 10: Τοπολογία ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη ή επαγωγική γεννήτρια

### 1.2.3.1 Σύγχρονη Γεννήτρια

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι πολύ πιο ακριβή και μηχανολογικά πολύ πιο πολύπλοκη από μια επαγωγική γεννήτρια αναλόγου μεγέθους. Εμφανίζεται όμως πλεονεκτική σε σύγκριση με την επαγωγική γεννήτρια δεδομένου ότι το ρεύμα μαγνήτισης δεν δημιουργείται από το κύκλωμα του στάτη. Το μαγνητικό πεδίο στις σύγχρονες γεννήτριες μπορεί να δημιουργηθεί με τη χρήση μόνιμων μαγνητών, ή συμβατικών τυλιγμάτων στο δρομέα. Αν μάλιστα η σύγχρονη γεννήτρια έχει έναν κατάλληλο, μεγάλο αριθμό πόλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων. Η σύγχρονη μηχανή είναι πιθανότατα η πιο κατάλληλη για έλεγχο πλήρους ισχύος μιας και συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας έχει δύο στόχους. Αφενός να κάνει απόσβεση των διαταραχών ισχύος που οφείλονται στις ριπές του ανέμου και επίσης των μεταβατικών φαινομένων που έρχονται από το δίκτυο και αφετέρου να ελέγχει τη μαγνήτιση και να αποφεύγει προβλήματα παραμένοντας σύγχρονος με τη συχνότητα

του δικτύου. Μια τέτοια γεννήτρια επιτρέπει τη λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα στην ανεμογεννήτρια.

#### ***1.2.3.2 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG)***

Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου είναι αυτοδιεγερόμενες και λειτουργούν με υψηλό συντελεστή ισχύος και υψηλή απόδοση. Στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη, η απόδοση είναι υψηλότερη από αυτή των επαγωγικών καθώς η διέγερση παρέχεται χωρίς να υπάρχει επιπλέον παροχή ενέργειας. Παρόλα αυτά, τα υλικά με τα οποία κατασκευάζονται οι μόνιμοι μαγνήτες είναι πολύ ακριβά και καθόλου εύκολα στην επεξεργασία. Επιπλέον, η χρήση διέγερσης με μόνιμο μαγνήτη απαιτεί τη χρήση ενός μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας προκειμένου να προσαρμόσει την τάση και τη συχνότητα της γεννήτριας στην τάση και τη συχνότητα της γραμμής αντίστοιχα, γεγονός που οδηγεί σε πρόσθετο κόστος. Το πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να παραχθεί ενέργεια σε κάθε ταχύτητα. Ο στάτης των σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη αποτελείται από συμβατικό τριφασικό τύλιγμα και ο δρομέας αποτελείται από ένα σύστημα πόλων μαγνήτη που μπορεί να είναι έκτυποι ή κυλινδρικοί. Οι έκτυποι πόλοι είναι πιο συνηθισμένοι σε μηχανές χαμηλής ταχύτητας και είναι πιο χρήσιμοι για εφαρμογές ανεμογεννητριών. Οι σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμο μαγνήτη μπορεί να εμφανίσουν προβλήματα κατά την εκκίνηση, το συγχρονισμό και τη ρύθμιση της τάσης. Η σύγχρονη λειτουργία προκαλεί επίσης δύσκαμπτη συμπεριφορά σε περίπτωση που η ταχύτητα του αέρα δεν είναι σταθερή. Ένα ακόμα μειονέκτημα αυτού του τύπου γεννητριών είναι ότι τα μαγνητικά υλικά είναι ευαίσθητα στις υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να απαιτείται κάποιο σύστημα ψύξης.

#### ***1.2.3.3 Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG)***

Η σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα είναι ο βασικότερος τύπος γεννήτριας στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα τυλίγματα του στάτη μιας τέτοιας γεννήτριας είναι απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο και η ταχύτητα περιστροφής της ρυθμίζεται από την συχνότητα του δικτύου. Επίσης, τα τυλίγματα του δρομέα διεγείρονται από συνεχές ρεύμα με τη χρήση δακτυλιδιών ολίσθησης και ψηκτρών ή μέσω ενός διεγέρτη χωρίς ψήκτρες με ένα στρεφόμενο ανορθωτή. Τα βασικά τους πλεονέκτημα έναντι των ασύγχρονων επαγωγικών γεννητριών είναι ότι δεν χρειάζονται επιπλέον μέτρα αντιστάθμισης για την άεργο ισχύ. Τα τυλίγματα του δρομέα, μέσα από τα οποία ρέει ρεύμα, παράγουν το πεδίο διέγερσης το οποίο περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα. Η ταχύτητα της σύγχρονης γεννήτριας καθορίζεται από τη συχνότητα του στρεφόμενου πεδίου και του αριθμού των πόλων της.

#### ***1.2.3.4 Ασύγχρονη Επαγωγική Γεννήτρια***

Ο τύπος της γεννήτριας που συνήθως χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες είναι η επαγωγική γεννήτρια. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν αυτού του τύπου οι γεννήτριες είναι η ευρωστία, η απλότητα στο μηχανικό κομμάτι και το χαμηλό κόστος, που οφείλεται στο μεγάλο αριθμό παραγωγής τους. Το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι καταναλώνουν άεργο ισχύ. Η

άεργος ισχύς μπορεί να προέρχεται από το δίκτυο ή από συστοιχίες πυκνωτών ή από ένα κατάλληλο σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος.

#### **1.2.3.5 Επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG)**

Οι επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού απαντώνται σε απλές εφαρμογές λόγω της μηχανικής τους απλότητας, της υψηλής τους απόδοσης και του ελάχιστου κόστους συντήρησης που απαιτούν. Με σύνδεση απευθείας στο δίκτυο, η ταχύτητα της επαγωγικής γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού μεταβάλλεται μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό, εξαιτίας της ολίσθησης της γεννήτριας, η οποία οφείλεται στις αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου. Για το λόγο αυτό οι γεννήτριες αυτές χρησιμοποιήθηκαν πολύ για σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτριες. Η γεννήτρια και ο άξονας της ανεμογεννήτριας συνδέονται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων καθώς η βέλτιστη προσδοκώμενη τιμή της ταχύτητας του άξονα είναι διαφορετική από αυτή της γεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες που έχουν επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού συνήθως έχουν και ένα μηχανισμό ηλεκτρονικά ελεγχόμενου εκκινήτη και αντιστάθμιση άεργου ισχύος με πυκνωτές.

Αυτού του τύπου οι γεννήτριες έχουν σαν χαρακτηριστικό τις απότομες αλλαγές στη ροπή με αποτέλεσμα οι διαταραχές του ανέμου να περνούν κατευθείαν στο δίκτυο. Αυτές οι διαταραχές είναι ιδιαίτερα σημαντικές κατά τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο, όπου η ένταση του μεταβατικού ρεύματος είναι 7-8 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική. Σε ένα αδύναμο δίκτυο, αυτό το υψηλό μεταβατικό ρεύμα μπορεί να προκαλέσει μεγάλες διαταραχές στην τάση, οπότε η σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο θα πρέπει να γίνεται σταδιακά προκειμένου να μειωθεί το μεταβατικό ρεύμα. Κατά τη διάρκεια της μόνιμης λειτουργίας και της άμεσης σύνδεσης με ένα στιβαρό AC δίκτυο, η ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι πολύ εύρωστη και ευσταθής. Η ολίσθηση ποικίλλει και αυξάνεται με αύξηση του φορτίου. Το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι ότι λόγω του ρεύματος μαγνήτισης που παρέχεται από το δίκτυο στα τυλίγματα του στάτη, ο συντελεστής ισχύος υπό πλήρες φορτίο είναι σχετικά μικρός. Το πρόβλημα ωστόσο διορθώνεται με τη σύνδεση πυκνωτών παράλληλα στη γεννήτρια. Σε περίπτωση σφάλματος, οι επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού που δεν έχουν κανένα σύστημα για αντιστάθμιση της άεργου ισχύος μπορεί να οδηγήσουν σε αστάθεια της τάσης στο δίκτυο. Όταν υπάρξει ένα σφάλμα ή μια πτώση τάσης ο δρομέας της ανεμογεννήτριας μπορεί να επιταχυνθεί στιγμιαία εξαιτίας της ανισοροπίας μεταξύ της ηλεκτρικής και της μηχανικής ροπής. Η συνεπαγόμενη αύξηση της ολίσθησης τότε θα απαιτήσει μια μεγαλύτερη ποσότητα άεργου ισχύος από το δίκτυο, το οποίο θα οδηγηθεί σε περαιτέρω μείωση της τάσης.

#### **1.2.3.6 Επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG)**

Στην περίπτωση των επαγωγικών γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δρομέα μπορούν να ελεγχθούν εξωτερικά από την τάση του δρομέα. Τα τυλίγματα του δρομέα συνδέονται εξωτερικά μέσω δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών. Με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος, η ισχύς μπορεί να εξαχθεί ή και να εισαχθεί στο κύκλωμα του δρομέα και η γεννήτρια μπορεί να μαγνητιστεί είτε από το κύκλωμα του στάτη είτε από το κύκλωμα του δρομέα.

Το μειονέκτημα της επαγωγικής γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα είναι το σχετικά υψηλότερο κόστος σε σχέση προς την αντίστοιχη βραχυκυκλωμένου δρομέα. Η βιομηχανία των ανεμογεννητριών συνήθως χρησιμοποιεί τους εξής δύο τύπους επαγωγικών γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα, την επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα και την επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας.

#### **1.2.3.7 Επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (OSIG)**

Η επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα εισήχθηκε στην αγορά προκειμένου να μειωθεί το φορτίο στην ανεμογεννήτρια εξαιτίας των ριπών ανέμου. Έχει την ικανότητα να μεταβάλλει την ολίσθηση (θετική) και να επιλέγει τη βέλτιστη τιμή για αυτή, με αποτέλεσμα μικρότερες διαταραχές στην ροπή και στην εξαγόμενη ενέργεια. Η μεταβλητή ολίσθηση είναι πολύ απλή, αξιόπιστη και πολύ αποτελεσματική στη μείωση των φορτίων σε σχέση με άλλες πιο πολύπλοκες λύσεις.

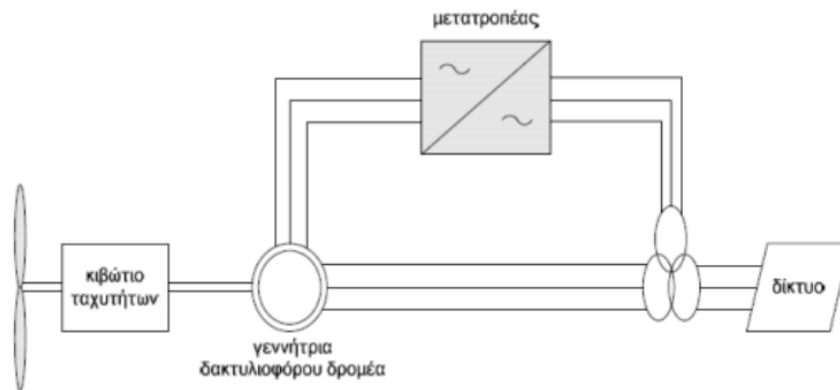
Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου γεννήτριας είναι ότι με μια σχετικά απλή τοπολογία του κυκλώματος του δρομέα, χωρίς απαραίτητα να υπάρχουν δακτύλιοι ολίσθησης, παρέχεται μεγαλύτερο εύρος ταχύτητας από την επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού, ενώ παράλληλα μειώνονται τα μηχανικά φορτία αλλά και οι διαταραχές στην ενέργεια που οφείλονται στις ριπές του ανέμου. Ωστόσο, επειδή πρόκειται για μία ασύγχρονη επαγωγική γεννήτρια, είναι απαραίτητο ένα κύκλωμα αντιστάθμισης αέργου ισχύος. Επιπλέον, το εύρος μεταβολής της ταχύτητας κυμαίνεται από 0-10%, ποσοστό που εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του δρομέα. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί και η έλλειψη αξιόλογου ελέγχου της ενεργού και αέργου ισχύος αλλά και οι απώλειες σημαντικού ποσού ενέργειας πάνω στην μεταβλητή αντίσταση ως θερμότητα.

#### **1.2.3.8 Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG)**

Η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας κερδίζει συνεχώς όλο και μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς. Αποτελεί την εξέλιξη της επαγωγικής γεννήτριας με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα, στην οποία η μεταβλητή αντίσταση του δρομέα έχει αντικατασταθεί από έναν back-to-back IGBT μετατροπέα πηγής τάσης συνδεδεμένο στο δίκτυο. Τα τυλίγματα του στάτη είναι απευθείας συνδεδεμένα στο τριφασικό δίκτυο. Το σύστημα αυτό επιτρέπει τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας με ένα αρκετά μεγάλο εύρος. Τόσο στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όσο και σε περίπτωση σφάλματος, η συμπεριφορά της γεννήτριας καθορίζεται πλήρως από το μετατροπέα και τους ελεγκτές του. Πιο συγκεκριμένα, ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύ της μηχανής μέσω ελέγχου του ρεύματος του δρομέα, ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση στην DC διασύνδεση και διασφαλίζει λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Ανάλογα με τη λειτουργία, η ισχύς του δρομέα μπορεί να μεταφερθεί και προς τις δύο κατευθύνσεις. Στην υπερσύγχρονη λειτουργία όπου η ολίσθηση είναι αρνητική, έχουμε ροή ισχύος από το δρομέα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ στην υποσύγχρονη λειτουργία (θετική ολίσθηση), η ροή ισχύος είναι αντίθετη. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, ο στάτης παρέχει ενέργεια στο δίκτυο. Έτσι, σε αντίθεση με την επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά

μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα, η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας οδηγεί στο δίκτυο την αυξημένη ισχύ του δρομέα χωρίς αυτή να χάνεται σε ωμικές αντιστάσεις. Η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας δεν είναι απαραίτητο να μαγνητίζεται από το δίκτυο αλλά αυτό μπορεί να γίνει και από το κύκλωμα του δρομέα. Επίσης, είναι ικανή να παράγει άεργο ισχύ η οποία μπορεί να μεταφερθεί στο στάτη μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Σε περίπτωση που υπάρχει ένα αδύναμο δίκτυο, η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας μπορεί να παράγει ή να απορροφήσει κάποιο ποσό άεργου ισχύος προς ή από το δίκτυο, προκειμένου να γίνει έλεγχος της τάσης. Το μέγεθος του μετατροπέα δε σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας αλλά με το επιλεγμένο εύρος ρύθμισης της ταχύτητας. Έτσι ό,τι κερδίζουμε σε κόστος το χάνουμε σε δυνατότητα εύρους της μεταβλητής ταχύτητας. Επιπλέον μειονέκτημα της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας είναι ότι οι δακτύλιοι ολίσθησης είναι απαραίτητοι.



Σχήμα 11: Τοπολογία ανεμογεννήτριας με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας

### 1.3 ΥΔΡΟΥΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η υδραυλική ενέργεια θεωρείται μία από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς βασίζεται στον υδρολογικό κύκλο ο οποίος προκαλείται από την ηλιακή ενέργεια. Ο υδρολογικός κύκλος, ή αλλιώς ο κύκλος του νερού, περιγράφει την παρουσία και την κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια της Γης, καθώς και κάτω και πάνω από αυτή. Το νερό της Γης είναι πάντα σε κίνηση και πάντα σε αλλαγή, από την υγρή μορφή στην αέρια ή σε πάγο ξανά και αντίστροφα.

Η Υ/Δ ενεργεια προέρχεται από τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε κινητική και στη συνέχεια σε ηλεκτρισμό. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εκμετάλλευση του νερού σε υδάτινο αγωγό με φυσική κλίση, με αποθήκευση του νερού σε τεχνητή λίμνη ώστε να αυξηθεί το υδραυλικό ύψος, ή με συνδυασμό των παραπάνω. Βασίζεται στην κίνηση του νερού λόγω μανομετρικού ύψους μεταξύ των σημείων εισόδου και εξόδου. Απαιτείται συνεπώς ένα



σημαντικό βαρυτικό δυναμικό και μία ικανή ποσότητα ροής, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα Υ/Δ (υδροηλεκτρικής) παραγωγής.

Τα Υ/Δ έργα κατηγοριοποιούνται σε μεγάλης και μικρής κλίμακας. Τα μικρής κλίμακας προτιμούνται τόσο λόγω του κόστους όσο και των μικρότερων επιπτώσεων στο περιβάλλον. Τα μεγάλης κλίμακας Υ/Η έργα απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών, κατασκευές που μπορεί να δράσουν επιβαρυντικά άμεσα, στην περιοχή που αναπτύσσεται το έργο αλλά και έμμεσα καθώς επηρεάζεται το παρακαείμενο οικοσύστημα καθότι μεταβάλλεται ριζικά η μορφολογία της περιοχής (πχ περιορισμός μετακίνησης ψαριών).

Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα τη Υ/Δ ενέργειας είναι:

- i. Ένας Υ/Δ σταθμός μπορεί να τεθεί άμεσα σε λειτουργία
- ii. Πρόκειται για ΑΠΕ
- iii. Με την κατασκευή ενός υδατοταμιευτήρα ικανοποιούνται ταυτόχρονα και άλλες ανάγκες, όπως η άρδευση, η ύδρευση, η ανάσχεση χειμάρρων και η δημιουργία υγρότοπων και περιοχών αναψυχής.

Η ενέργεια που παράγεται από Υ/Δ σταθμούς είναι μεγαλύτερη από αυτή που παράγουν οι φωτοβολταϊκοί, αιολικοί και γεωθερμικοί σταθμοί μαζί. Το 2012, η Υ/Δ ενέργεια αντιπροσώπευε το 16% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Ενώ οι εγκαταστάσεις των Φ/Β σταθμών αυξάνονται κατά μέσο όρο 60% ετησίως τα τελευταία 5 χρόνια, οι Υ/Δ σταθμοί αυξάνονται με ετήσιο ρυθμό 3,3%. Μεταξύ του 2002 και του 2012, το ποσό της Υ/Δ ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως αυξήθηκε κατά 1.000 περίπου τεραβατώρες (TWh). Κατά την ίδια χρονική περίοδο, το ποσό της αιολικής και ηλιακής ενέργειας που καταναλώνεται αυξήθηκε κατά 560 TWh, αν και ο ετήσιο ρυθμό αύξησης ήταν πολύ υψηλότερος. Στην πραγματικότητα, οι τέσσερις μεγαλύτερες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο είναι όλες Υ/Δ.

Παρά την υφιστάμενη δεσπόζουσα θέση της Υ/Δ ενέργειας, η αύξηση της κατανάλωσης υδροηλεκτρικής ενέργειας κατά πάσα πιθανότητα θα κινηθεί σε χαμηλά επίπεδα, λόγω του γεγονότος ότι πολλές από τις καλύτερες τοποθεσίες για κατασκευή υδροηλεκτρικών φραγμάτων έχουν ήδη αναπτυχθεί. Η εξαίρεση σε αυτό είναι η περιοχή της Ασίας και του Ειρηνικού, όπου η υδροηλεκτρική κατανάλωση υπερδιπλασιάστηκε κατά την τελευταία δεκαετία. Η περιοχή αυτή αντιπροσωπεύει σήμερα το 35% της παγκόσμιας κατανάλωσης υδροηλεκτρικής ενέργειας, και το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί, καθώς οι χώρες αυτές εξακολουθούν να κατασκευάζουν Υ/Δ σταθμούς.

### **1.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Η Υ/Δ ενέργεια χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στην Κίνα μεταξύ 202 π.Χ. και 9 μ.Χ. για την επεξεργασία σιτηρών, μεταλλευμάτων και στην πρώιμη κατασκευή χαρτιού. Το 1771 ο Richard Arkwright χρησιμοποιεί Υ/Δ ενέργεια σε ένα από τα πρώτα συστήματα εργοστάσιο επεξεργασίας βαμβακιού.

Μερικές από τις βασικές εξελίξεις στην τεχνολογία της Υ/Δ ενέργειας διαδραματίστηκαν κατά το πρώτο μισό του 19ου αιώνα όταν το 1827, ο Γάλλος μηχανικός Benoit Fourneyron αναπτύσει μια τουρμπίνα ικανή να παράγει περίπου 6 ίππους, που αποτελεί την παλαιότερη έκδοση στροβίλου ανάδρασης Fourneyron. Το 1849, ο μηχανικός James Francis ανέπτυξε το πρώτο σύγχρονο υδροστρόβιλο, την τουρμπίνα Francis, η οποία παραμένει η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τουρμπίνα νερού στον κόσμο. Στην δεκαετία του 1870, ο Αμερικανός εφευρέτης Lester Allan Pelton αναπτύσει τον τροχό Pelton, έναν υδροστρόβιλο δράσης. Το 1913, η αυστριακή καθηγητής Βίκτορ Kaplan ανέπτυξε το στρόβιλο Kaplan, ένα στρόβιλο προπέλας με ρυθμιζόμενα πτερύγια.

Το 1878, κατασκευάζεται το πρώτο Υ/Δ έργο στον κόσμο όπου τροφοδότησε μία μόνο λάμπα στο Northumberland της Αγγλίας. Τέσσερα χρόνια αργότερα, κατασκευάζεται στο Wisconsin Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, άνοιξε το πρώτο Υ/Δ εργοστάσιο το οποίο εξυπηρετεί ιδιωτικούς και εμπορικούς πελάτες. Μέσα σε μια δεκαετία, εκατοντάδες εργοστάσια Υ/Δ ενέργειας τίθενται σε λειτουργία. Το 1891, κι ενώ η τεχνολογία είναι ήδη παγκοσμίως γνωστή, παράγεται στη Γερμανία το πρώτο τριφασικό Υ/Δ σύστημα. Το 1895, δημιουργείται στο Νιαγάρα ο μεγαλύτερος Υ/Δ σταθμός στον κόσμο, ο Edward Dean Adams Power Plant. Από τότε μέχρι και σήμερα, τα Υ/Δ έχουν σημειώσει μεγάλη ανάπτυξη ενώ έχουν κατασκευαστεί έργα πολύ μεγάλης κλίμακας όπως 14 GW, μεταξύ Βραζιλίας και Παραγουάης και 22.5 GW στην Κίνα. Ο κλάδος της Υ/Δ ενέργειας βρίσκεται ακόμα σε μεγάλη άνθηση, με παράδειγμα τη Βραζιλία, η οποία έχει καταφέρει να εκμεταλλευτεί ένα μεγάλο μέρος των πλούσιων υδρολογικών πόρων της.

Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ήταν περίπου 990 GW, μέχρι το τέλος του 2013. Οι κορυφαίες χώρες υδροηλεκτρικής παραγωγικής ικανότητας είναι η Κίνα, η Βραζιλία, οι Ηνωμένες Πολιτείες, ο Καναδάς και η Ρωσία, οι οποίες μαζί αντιπροσωπεύουν το 52% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως.

### 1.3.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Οι Υ/Δ σταθμοί χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την υψομετρική διαφορά (υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης) και ανάλογα με τη διαδικασία παραγωγής. Διακρίνονται σε:

- Σταθμούς φυσικής ροής

Σε αυτούς τους σταθμούς χρησιμοποιείται η φυσική ροή του ποταμού για την παραγωγή της ενέργειας. Προτιμώνται ποτάμια με μεγάλη παροχή σε όλη τη διάρκεια του έτους και συνήθως απαιτείται μικρή ή και καμία αλλαγή του καναλιού του ποταμού. Η ρύθμιση ισχύος γίνεται πολύ γρήγορα σε σχέση με τους σταθμούς δεξαμενής.

- Σταθμούς Δεξαμενής

Οι σταθμοί δεξαμενής εγκαθίστανται σε ποτάμια που δεν έχουν εγγυημένη μεγάλη παροχή σε όλη τη διάρκεια του έτους. Με την κατασκευή ενός φράγματος, δημιουργείται μια τεχνητή λίμνη (ταμιευτήρας) και το νερό που συλλέγεται εκεί χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας. Σε αυτούς τους σταθμούς υπάρχει μια δεξαμενή απόσβεσης ή ηρέμησης για να αποσβαίνει τα κρουστικά κύματα που προκύπτουν από απότομες αλλαγές ισχύος. Σε ποτάμια που επιτρέπεται από τη μορφολογία του εδάφους μπορεί να κατασκευαστεί αλυσίδα από υδροηλεκτρικούς σταθμούς κατά τα μήκος του ίδιου ποταμού.

- Υδραντλητικοί σταθμοί

Στους υδραντλητικούς σταθμούς υπάρχουν δύο δεξαμενές, η δεξαμενή άνω στάθμης και η δεξαμενή κάτω στάθμης. Αυτοί οι σταθμοί αντλούν νερό στην πάνω δεξαμενή κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης (π.χ. τη νύχτα), όπου υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας. Τις περιόδους που υπάρχουν αιχμές στη ζήτηση του φορτίου, χρησιμοποιείται το αποθηκευμένο νερό για παραγωγή ενέργειας. Αποτελούν ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει το φράγμα στην τεχνητή λίμνη του ποταμού Λάδωνα. Από τη λίμνη του Λάδωνα ξεκινά ένας αγωγός από όπου διοχετεύεται νερό το οποίο κινεί το υδροηλεκτρικό εργοστάσιο. Ένα τμήμα του αγωγού περνά από σήραγγα μήκους 8620 μέτρων με διάμετρο 3,90 μέτρα, που επιτρέπει να περνούν 36 m<sup>3</sup> νερού ανά δευτερόλεπτο. Το τμήμα του αγωγού πτώσεως έχει μήκος 411,7 μέτρα, με μέγιστη εσωτερική διάμετρο 3,325 μέτρα. Ο χώρος του εργοστασίου, το κτίριο που φιλοξενεί τον σταθμό αποτελείται από έναν ισόγειο χώρο και τρεις ορόφους προς τα κάτω. Στον πρώτο όροφο φιλοξενούνται οι 2 γεννήτριες ισχύος 34,5 MW η κάθε μία, στον δεύτερο οι στρόβιλοι και στον τρίτο υπάρχουν οι αγωγοί φυγής και περιστροφικών δικλίδων.



Σχήμα 12: Υ/Δ σταθμός Λάδωνα

Ο σταθμός παραγωγής είναι ο χώρος όπου τερματίζει το σύστημα προσαγωγής και εγκαθίσταται ο ηλεκτρομηχανολογικός (Η/Μ) εξοπλισμός, δηλαδή οι στρόβιλοι, οι γεννήτριες, οι μετασχηματιστές και ο εξοπλισμός παρακολούθησης και ελέγχου του έργου. Ο τύπος και το πλήθος των στρόβιλων επιλέγεται ανάλογα με τα μεγέθη σχεδιασμού (παροχή, ύψος πτώσης) και το βέλτιστο σενάριο λειτουργίας του σταθμού. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι στρόβιλων είναι οι Francis, Kaplan, Pelton και Turgo. Από αυτούς οι δύο πρώτοι χρησιμοποιούνται κυρίως για μικρά και μεσαία ύψη πτώσης και μεγάλες παροχές, ενώ οι δύο τελευταίοι για μεγάλα ύψη πτώσης και έχουν μεγάλο εύρος παροχών λειτουργίας. Η διάταξη του σταθμού παραγωγής εξαρτάται από την υφιστάμενη τοπογραφία, τις συνθήκες ροής του φυσικού υδατορεύματος και τον τύπο του Η/Μ εξοπλισμού. Η χωροθέτηση του εξοπλισμού είναι διαφορετική για στρόβιλο οριζοντίου, κατακόρυφου και διαγώνιου άξονα. Ο σταθμός παραγωγής μπορεί να είναι υπόγειος ή επιφανειακός. Στη δεύτερη περίπτωση ο όγκος και η χωροθέτηση του σταθμού υπόκεινται στους όρους δόμησης της περιοχής και πρέπει να τηρούνται συγκεκριμένες αποστάσεις από τα όρια του οικοπέδου και την οριογραμμή του υδατορεύματος.

Μετά την έξοδο από το στρόβιλο το νερό αποδίδεται στη φυσική ροή του υδατορεύματος μέσω της διώρυγας φυγής (outlet channel). Η διώρυγα φυγής είναι σχεδιασμένη ώστε να διατηρούνται ομαλές συνθήκες ελεύθερης ροής και να αποφεύγεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης (cavitation), όταν πρόκειται για στρόβιλους αντίδρασης (Kaplan, Francis).

Οι υδροστρόβιλοι είναι οι μηχανές μέσω των οποίων μετατρέπεται η ενέργεια του υγρού σε μηχανική ενέργεια, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στη στρεφόμενη άτρακτο της περωτής. Γενικά, ένας υδροστρόβιλος αποτελείται από ένα πτερυγοφόρο τροχό τοποθετημένο καταλλήλως μέσα σε κέλυφος με αγωγό προσαγωγής και απαγωγής. Η εν λόγω διάταξη τοποθετείται σε κατάλληλη

θέση της υδατόπτωσης που είναι προς εκμετάλλευση. Το νερό που πέφτει εισαγόμενο με πίεση μέσα στον υδροστρόβιλο προσκρούει πάνω στα πτερύγια και προκαλεί την κίνησή του. Οι υδροστρόβιλοι αποτελούν την τελειότερη μορφή υδροκινητήρων και κατέχουν ιδιαίτερη θέση μεταξύ των άλλων στρόβιλων (ατμοστρόβιλων, κ.τ.λ.), αλλά μεταξύ και των ίδιων των κινητηρίων μηχανών. Χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας, την οποία μας δίνει η υψομετρική διαφορά μιας υδάτινης πτώσης, σε μηχανικό έργο το οποίο στη συνέχεια με τη βοήθεια δυναμοηλεκτρικών μηχανών μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Από άποψη απόδοσης των υδροστρόβιλων επιτυγχάνονται σήμερα πολύ καλά αποτελέσματα. Η απόδοσή τους είναι δυνατόν να φτάσει μέχρι και 90%. Η δε αποκτώμενη ισχύς είναι δυνατό να μεταδοθεί απευθείας είτε με ιμάντες στον άξονα εγκατεστημένων επί τόπου διαφόρων μηχανημάτων είτε ακόμη, μέσω γεννητριών, να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μεταφέρεται με τις γραμμές υψηλής τάσης σε μεγάλες αποστάσεις.

### 1.3.3 ΤΥΠΟΙ ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται καταρχήν με κριτήριο το βαθμό αντίδρασης. Ένας υδροστρόβιλος καλείται δράσεως όταν η εσωτερική στεφάνη κινείται λόγω πλήξεως, την οποία υφίσταται το νερό. Στην περίπτωση αυτή το νερό δρα επί της στεφάνης με την κινητική του ενέργεια. Στους υδροστρόβιλους του τύπου αυτού η θλιπτική ενέργεια του νερού μετατρέπεται εξολοκλήρου σε κινητική. Ο μόνος τύπος υδροστρόβιλου δράσης που έχει επικρατήσει είναι ο υδροστρόβιλος τύπου Pelton.

Αντίθετα, όταν το νερό δρα με πίεση λόγω του φορτίου του, τότε ο υδροκινητήρας καλείται αντιδράσεως. Σ' αυτούς η σταθερή διανέμουσα στεφάνη μετατρέπει μερικώς την πτώση σε ταχύτητα. Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης είναι ολικής προσβολής, δηλαδή ολόκληρη η πτερωτή λειτουργεί αξονοσυμμετρικά, ενώ οι υδροστρόβιλοι δράσης (βαθμός αντίδρασης ίσος με το μηδέν), είναι μερικής προσβολής και σε κάθε χρονική στιγμή μόνο τμήμα της πτερωτής συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή.

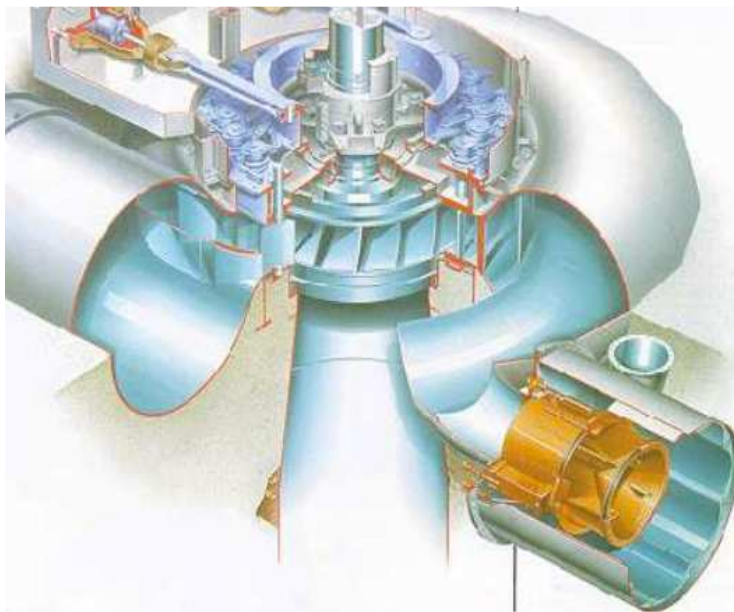
Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης που έχουν επικρατήσει είναι οι υδροστρόβιλοι τύπου Francis, για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H = 50$  έως  $500$  m περίπου,  $H = \text{Head} = \text{Υδροδυναμικό Ύψος}$ : Η υψομετρική διαφορά μεταξύ της περιοχής όπου βρίσκεται η λίμνης αποθήκευσης νερού και της περιοχής όπου εγκαθίστανται οι στρόβιλοι), οι υδροστρόβιλοι τύπου Deriaz διαγώνιας ροής, και διάφορες διαμορφώσεις υδροστρόβιλων αξονικής ροής, για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H < 50$  m περίπου), όπως Kaplan, βολβοειδής (bulb), σωληνωτός (tube), δακτυλίου κ.λ.π. Από την κατάσταση αυτή γίνεται εμφανής η διαφοροποίηση που σχετίζεται με τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση.

Οι υδροστρόβιλοι τύπου Francis είναι ακτινικής και μικτής ροής κατάλληλοι για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H = 50$  έως  $500$  m περίπου), ενώ οι υδροστρόβιλοι αξονικής ροής (Kaplan κ.α.) είναι κατάλληλοι για την αξιοποίηση μικρών υδραυλικών πτώσεων ( $H < 50$  m περίπου). Από κατασκευαστικής πλευράς, χωρίς να υπάρχει η παρά μικρή επίπτωση σε ορισμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά, μπορεί να γίνει διάκριση σε υδροστρόβιλους οριζώντιου άξονα και υδροστρόβιλους κατακόρυφου άξονα.

### 1.3.3.1 Υδροστροβίλος Τυπου FRANCIS

Οι υδροστρόβιλοι τύπου Francis είναι τύπου αντίδρασης οι πλέον διαδεδομένοι υδροστρόβιλοι και η εξέλιξή τους την τελευταία δεκαετία έχει διευρύνει σημαντικά το φάσμα των πιθανών εφαρμογών. Ο υδροστρόβιλος Francis είναι ένας μικτού τύπου ροής στρόβιλος με ακτινική εισαγωγή νερού και αξονική εκροή. Η ουσιώδης διαφορά σε σύγκριση με τον υδροστρόβιλο τύπου Pelton, έγκειται στο γεγονός ότι στους υδροστροβίλους τύπου Francis (αλλά και σε εκείνους του τύπου Kaplan), ο κινητήρας είναι εντελώς βυθισμένος στο νερό και ότι τόσο η πίεση όσο και η ταχύτητα του νερού μειώνονται από την είσοδο στην έξοδο.

Αρχικά, το νερό εισέρχεται στη σπείρα, η οποία είναι ένα δακτυλιοειδές κανάλι που περιβάλλει τον κινητήρα, και στη συνέχεια ρέει μεταξύ των σταθερών κατευθυντήριων βανών, οι οποίες προσδίδουν στο νερό τη βέλτιστη διεύθυνση ροής. Έπειτα, εισέρχεται στον κινητήρα, ο οποίος είναι πλήρως βυθισμένος και αλλάζει την ορμή του νερού, γεγονός το οποίο προκαλεί αντίδραση στο στρόβιλο. Το νερό ρέει ακτινικά προς το κέντρο. Ο κινητήρας εξασφαλίζεται με καμπύλα πτερύγια, χάρι στα οποία το νερό διεισδύει. Τα κατευθυντήρια πτερύγια είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε η ενέργεια του νερού να μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και να μην καταναλώνεται σε φαινόμενα στροβιλισμού και άλλα ανεπιθύμητα φαινόμενα ροής που προκαλούν απώλειες ενέργειας. Τα κατευθυντήρια πτερύγια είναι συνήθως προσαρτημένα έτσι ώστε να εξασφαλίζουν κάποιο βαθμό προσαρμοστικότητας στις μεταβολές της ροής του νερού και στο φορτίο του στροβίλου.



Σχήμα 13: Υδροστρόβιλος τύπου Francis

Τα κατευθυντήρια πτερύγια στον υδροστρόβιλο τύπου Francis είναι εκείνα τα οποία κατευθύνουν τη ροή του νερού, όπως ακριβώς και το ακροφύσιο του τροχού Pelton. Το νερό εκφορτίζεται διαμέσου μιας εξόδου από το κέντρο του στροβίλου. Στο σχεδιασμό και την

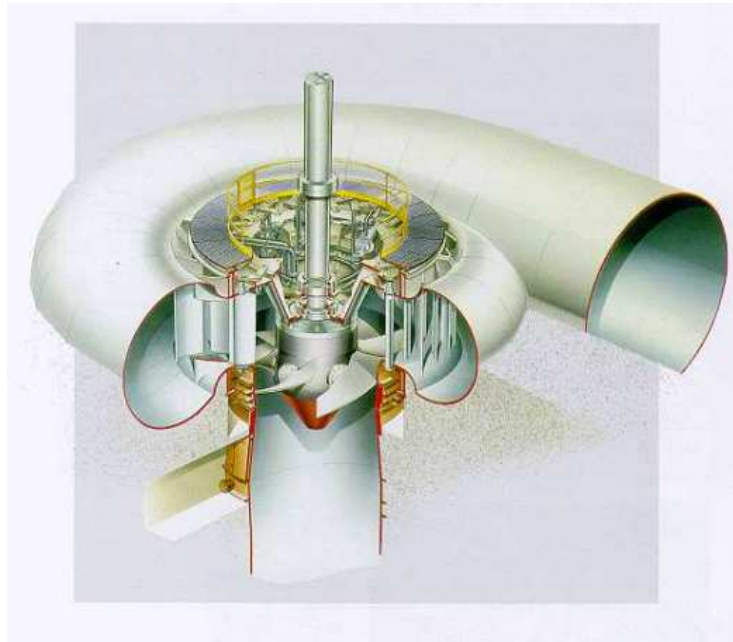
κατασκευή, οι στρόβιλοι Francis είναι περισσότερο πολύπλοκοι συγκριτικά με τους στρόβιλους τύπου Pelton, απαιτώντας συγκεκριμένο σχεδιασμό για κάθε περίπτωση πιεζομετρικού φορτίου και ροής.

Η μεγάλη ποικιλία σχεδιασμού στρόβιλων τύπου Francis επιτρέπει την κάλυψη ενός μεγάλου φάσματος πιεζομετρικών φορτίων (Head) που κυμαίνονται από 30 έως 700 m περίπου. Οι πιο ισχυροί υδροστρόβιλοι Francis αποδίδουν περισσότερα από 800 MW και εκμεταλλεύονται σημαντικά ποσά υδάτινων αποθεμάτων.

### ***1.3.3.2 Υδροστρόβιλος Τυπου KAPLAN***

Η αυξανόμενη ζήτηση για μεγαλύτερες τιμές της ισχύος κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών του 20ου αιώνα, οδήγησε στην επινόηση του στρόβιλου Kaplan (υδροστρόβιλος αντίδρασης), ο οποίος θεωρείται κατάλληλος στις περιπτώσεις χαμηλών πιεζομετρικών φορτίων (περίπου 3 – 9 m) και υψηλών τιμών ροής του νερού. Η ιδέα βασίστηκε σε μία προπέλα, η οποία λειτουργεί όπως μία προπέλα πλοίου, αλλά αντίστροφα. Στον υδροστρόβιλο Kaplan, το νερό ρέει διαμέσου της προπέλας και θέτει τον έλικα σε περιστροφή. Η περιοχή διαμέσου της οποίας κινείται το νερό επιδιώκεται να καταλαμβάνει τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια και για το λόγο αυτό οι υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan θεωρούνται κατάλληλοι για ροές μεγάλου όγκου και πιεζομετρικού φορτίου μόνο μερικών μέτρων.

Το νερό εισέρχεται πλευρικά στο στρόβιλο, εκτρέπεται από τα κατευθυντήρια πτερύγια και ρέει αξονικά μέσω της προπέλας. Για το λόγο αυτό, οι μηχανές αυτές αναφέρονται και ως στρόβιλοι αξονικής ροής. Έναντι των στρόβιλων ακτινικής ροής πλεονεκτούν σε ό,τι αφορά στην τεχνολογική προσαρμοστικότητα της γωνίας των πτερυγίων όταν η ζήτηση σε ισχύ αλλάζει, γεγονός το οποίο συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης της παραγόμενης ισχύος.



**Σχήμα 14: Υδροστρόβιλος τύπου Kaplan**

Το ποσό του νερού που ρέει διαμέσου του υδροστρόβιλου, μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ των κατευθυντήριων πτερυγίων. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να προσαρμοστεί κατάλληλα και ο αριθμός των πτερυγίων της προπέλας. Κάθε ρύθμιση των κατευθυντήριων βανών αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη ρύθμιση των πτερυγίων της προπέλας με σκοπό να επιτυγχάνεται κάθε φορά η μέγιστη απόδοση. Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι η ταχύτητα του πτερυγίου είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του νερού. Το στοιχείο αυτό επιτρέπει ταχύτερη περιστροφή ακόμη και για σχετικά χαμηλές ταχύτητες του νερού. Τα πτερύγια του υδροστρόβιλου Kaplan είναι ρυθμιζόμενα σε κλίση και μπορούν να χειριστούν αποτελεσματικά μεγάλες αποκλίσεις ροής. Παρουσιάζουν αποδοτικότητα μεγαλύτερη του 90% και χρησιμοποιούνται πλέον αντί των υδροστρόβιλου τύπου Francis. Είναι, όμως, σχετικά ακριβοί και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε μεγάλες εγκαταστάσεις.

Οι υδροστρόβιλοι Kaplan κατασκευάζονται σε διάφορα σχέδια. Οι εφαρμογές τους περιορίζονται, κατά κύριο λόγο, σε πιεζομετρικά φορτία από 1 m έως περίπου 30 m. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, απαιτείται μια σχετικά μεγάλη ροή σε σύγκριση με στρόβιλους υψηλών πιεζομετρικών φορτίων για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση. Για τους λόγους αυτούς, άλλωστε, οι στρόβιλοι τύπου Kaplan είναι συγκριτικά μεγαλύτεροι. Ο υδροστρόβιλος τύπου Kaplan είναι ο πλέον κατάλληλος για έργα με χαμηλό πιεζομετρικό φορτίο και σημαντική ποσότητα εκροής. Εξαιτίας των προσαρτημένων κινητών πτερυγίων, προσφέρει το σημαντικό πλεονέκτημα της υψηλής απόδοσης ακόμα και σε κλίμακα μερικού φορτίου. Ως αποτέλεσμα της σύγχρονης τεχνολογικής προόδου, το φάσμα των εφαρμογών του υδροστρόβιλου τύπου Kaplan έχει διευρυνθεί σε πολυάριθμες υδάτινες πηγές κυρίως λόγω οικονομικών και περιβαλλοντικών παραγόντων. Εξαιτίας των προσαρτημένων πτερυγίων, η κατασκευή του υδροστρόβιλου Kaplan κατέστη περισσότερο πολύπλοκη. Ο λειτουργικός μηχανισμός αποτελείται από μια κεφαλή πίεσης, ένα σερβοκινητήρα και το λειτουργικό μοχλό πτερυγίου στο εσωτερικό του άξονα.



Τα κινητά πτερύγια είναι κατασκευασμένα να προσαρμόζονται απαλά στις γωνίες των πτερυγίων με ένα μηχανισμό σύνδεσης. Ο μηχανισμός τους είναι τοποθετημένος στο εσωτερικό του κινητήριου διανομέα. Το εσωτερικό του μηχανισμού λιπαίνεται από ένα υψηλής ποιότητας λιπαντικό έλαιο. Η ειδική συσκευασία τοποθετείται μεταξύ του κινητήριου διανομέα και του στελέχους του πτερυγίου με σκοπό να αποτραπεί η διείσδυση νερού εξωτερικά του διανομέα και η διαρροή του λιπαντικού υγρού. Η πίεση της κεφαλής λαδιού τροφοδοτεί το σερβοκινητήρα και συνεισφέρει στην ανάδρασή του. Συνήθως, εγκαθίσταται στην κορυφή της γεννήτριας. Το κινητήριο πτερύγιο του σερβοκινητήρα εγκαθίσταται μεταξύ του κύριου άξονα του στροβίλου και του άξονα της γεννήτριας ή στο εσωτερικό του κινητήρα διανομής.

### **1.3.3.3 Υδροστροβίλος Τυπου PELTON**

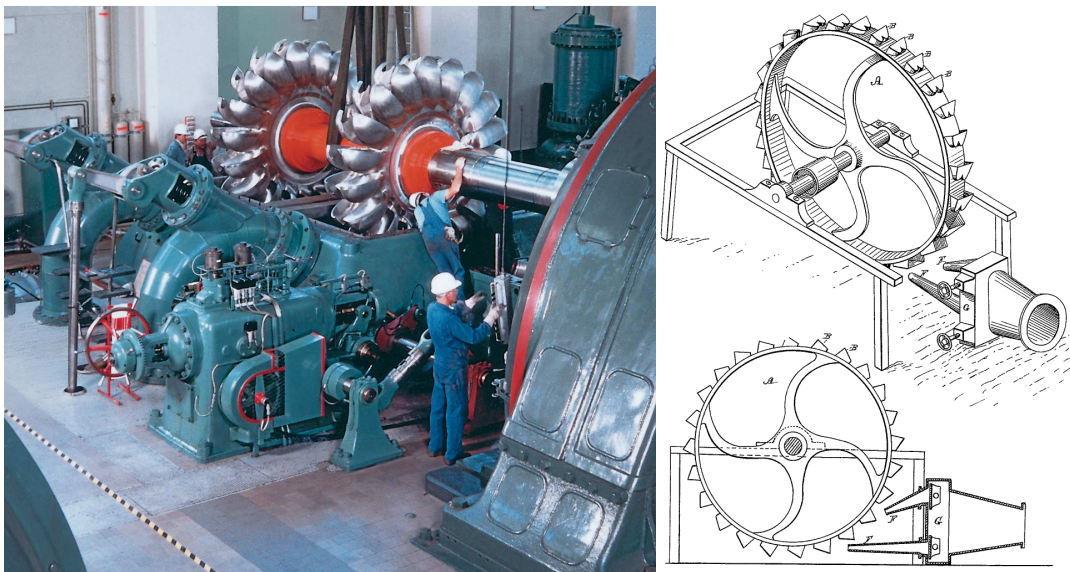
Ο υδροστρόβιλος Pelton είναι τύπου δράσης. Οι υδροστρόβιλοι δράσης χαρακτηρίζονται ως υδροστρόβιλοι μερικής προσβολής. Σε περιπτώσεις πολύ υψηλής ενέργειας ανά μονάδα μάζας του ρευστού και σε συνδυασμό με μικρές σχετικά παροχές είναι προτιμότερη για διάφορους οικονομικοτεχνικούς λόγους η διαμόρφωση τέτοιων στροβίλων. Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους είναι προτιμότερη η διαμόρφωση στροβίλων μερικής προσβολής στις μεγάλες τιμές ενέργειας του ρευστού ανά μονάδα μάζας είναι οι ακόλουθοι:

- Η ταχύτητα της ροής είναι πολύ υψηλή, στοιχείο το οποίο σε συνδυασμό με τις μικρές παροχές (μικρές διατομές) έχει ως αποτέλεσμα την υπερβολική αύξηση των απωλειών λόγω τριβής στο εσωτερικό της μηχανής, άρα και μείωση του βαθμού απόδοσης.
- Η τιμή της στατικής πίεσης είναι πολύ υψηλή, με αποτέλεσμα να γίνεται προβληματική η αντοχή του τμήματος εισόδου, εάν ήταν της μορφής σπειροειδούς κελύφους (περίπτωση υδροστροβίλου Francis), το οποίο αποτελεί και το ογκοδέστερο τμήμα της μηχανής. Στην περίπτωση υδροστροβίλου Pelton μόνο το τμήμα του ακροφυσίου τροφοδοσίας (που είναι μικρό σε μέγεθος) εκτίθεται σε μεγάλη στατική πίεση.
- Η σημαντική διαφορά της στατικής πίεσης στην πτερωτή θα είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των ογκομετρικών απωλειών στο εσωτερικό της μηχανής εάν αυτή ήταν ολικής προσβολής.

Οι υδροστρόβιλοι Pelton κατασκευάζονται τόσο για πολύ μικρές τιμές της ισχύος (της τάξης των KW) όσο και για πολύ μεγάλες (της τάξης των εκατοντάδων MW). Συνήθως, οι υδροστρόβιλοι Pelton χρησιμοποιούνται για μεγάλα πιεζομετρικά φορτία, ενώ δεν ενδείκνυται η χρήση τους σε χαμηλότερα πιεζομετρικά φορτία εξαιτίας των μικρών αναπτυσσόμενων περιστροφικών ταχυτήτων. Εάν το μέγεθος του κινητήρα και η χαμηλή ταχύτητα δεν αποτελούν τροχοπέδη για μια συγκεκριμένη εγκατάσταση, τότε ο υδροστρόβιλος Pelton μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποδοτικά και σε σχετικά χαμηλά πιεζομετρικά φορτία.

Το τμήμα εισόδου του υδροστροβίλου Pelton αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια τροφοδοσίας, σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε μηχανική, σχηματίζοντας το καθένα δέσμη κυκλικής διατομής. Κάθε δέσμη προσπίπτει στην πτερωτή, δίνοντας σε αυτή μια ώθηση κατά την περιφερειακή διεύθυνση, που δημιουργεί την κινητήρια

ροπή. Φυσικά, η περωτή είναι τοποθετημένη κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η δέσμη του νερού, μετά την πρόσπτωσής της στην περωτή, να πέφτει με τη βαρύτητα στην ελεύθερη επιφάνεια της διώρυγας φυγής. Ο άξονας της περωτής μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος. Στην κατακόρυφη διάταξη, το βάρος της γεννήτριας και του στροφέιου της γεννήτριας παραλαμβάνεται από ωστικό έδρανο. Στους υδροστροβίλους Pelton με περισσότερες δέσμες, είναι προτιμότερη η κατακόρυφη διάταξη του άξονα, ώστε όλα τα ακροφύσια να μην βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και να μην παρενοχλείται η λειτουργία τους από τα απόνερα των σκαφιδίων. Στα παρακάτω σχήματα δίνονται διατάξεις υδροστροβίλων Pelton.



Σχήμα 15: Υδροστροβίλοι τύπου Pelton

Η περωτή Pelton φέρει κατά την περιφέρεια σκαφίδια, των οποίων η διαμόρφωση δίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η περωτή κατασκευάζεται είτε ολόσωμη, είτε τα σκαφίδια είναι ανεξάρτητα και προσαρμίζονται στην περωτή μέσω κοχλίωσης και κωνικής ασφάλειας. Λόγω των πολύ ισχυρών δυνάμεων που δέχονται τα σκαφίδια και της διάβρωσης που υφίστανται από τη ροή κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα. Στην περίπτωση ολόσωμης κατασκευής, ολόκληρη η περωτή κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα. Η διάμετρος της περωτής είναι συνάρτηση του πλήθους και των διαστάσεων των σκαφιδίων, ενώ το πλήθος των σκαφιδίων κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 20 και 22.

Το τμήμα εξόδου οδηγεί το νερό που πέφτει από την περωτή στη διώρυγα απαγωγής και στη συνέχεια στον ταμιευτήρα. Με το τμήμα εξόδου συνδέεται και το τμήμα του υδροστροβίλου που συγκεντρώνει τα νερά που εκτοξεύονται από την περωτή προς διάφορες διευθύνσεις, ανάλογα με το σημείο λειτουργίας.

#### 1.3.3.4 Υδροστρόβιλος Τυπου TURGO

Ο υδροστρόβιλος Turgo είναι ένας υδροστρόβιλος δράσεως, ο οποίος δύναται να διαχειριστεί μεγαλύτερες τιμές παροχής νερού, σε σχέση με τον υδροστρόβιλο Pelton. Περισσότερα και μακρύτερα ακροφύσια τοποθετούνται γύρω από την περιφέρεια του δρομέα, προκειμένου να διευκολύνουν τη ροή του νερού. Ένα πλεονέκτημα του υδροστρόβιλου Turgo είναι ότι, για την ίδια υδραυλική ισχύ και για την ίδια διάμετρο δρομέα, η ταχύτητα είναι περίπου η διπλάσια σε σχέση με τον υδροστρόβιλο Pelton. Εδώ ο βαθμός απόδοσης μπορεί να αγγίζει τιμές όπως 92% και παραμένει υψηλός ακόμα και για παροχές ίσες με το 25% της παροχής σχεδίασης.



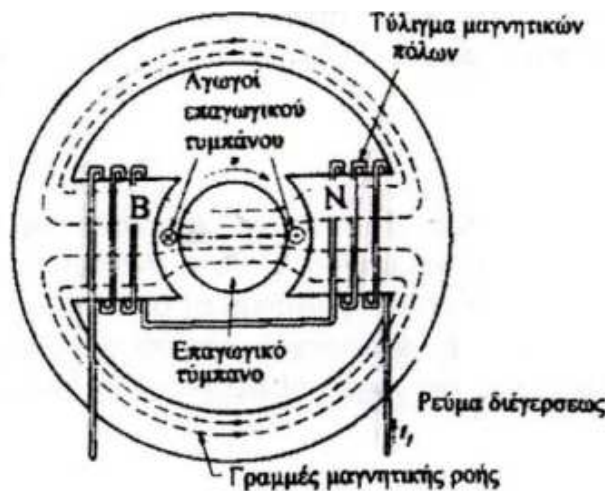
Σχήμα 16: Υδροστρόβιλος τύπου Turgo

#### 1.3.4 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Σε ένα υδροηλεκτρικό σύστημα, η ηλεκτρική γεννήτρια αναλαμβάνει τη μετατροπή της παραγόμενης από τον υδροστρόβιλο μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, η οποία μεταφέρεται και καταναλώνεται εύκολα. Μια ηλεκτρική γεννήτρια αποτελείται από ένα σταθερό μέρος, που ονομάζεται στάτης και ένα κινητό μέρος που ονομάζεται δρομέας. Σε γενικές γραμμές, η λειτουργία μίας γεννήτριας έχει ως εξής: η άτρακτός της κινείται με γωνιακή ταχύτητα ίδιας φοράς με την εξωτερικά επιβαλλόμενη ροπή και αντίθετης φοράς προς την ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσεται μέσω της αλληλεπίδρασης των πεδίων του δρομέα και του στάτη. Η αντιρροπή αυτή επιτρέπει στη μηχανή να απορροφά μηχανική ενέργεια και να τη μετατρέπει σε ηλεκτρική. Έτσι, στο τύλιγμα τυμπάνου (το κύριο τύλιγμα της γεννήτριας) αναπτύσσεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ), η οποία προκαλεί ένα ρεύμα που με τη σειρά του τροφοδοτεί ένα εξωτερικό φορτίο με συγκεκριμένη τάση ακροδεκτών.

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του δικτύου στο οποίο θα συνδεθεί, της θέσης που θα κατέχει σε αυτό και τα φορτία που θα κληθεί να τροφοδοτήσει, η γεννήτρια που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι σύγχρονη με τύλιγμα διέγερσης ή μονίμων μαγνητών, επαγωγής ή ακόμα σύγχρονη γεννήτρια με υβριδική διέγερση. Σε κάθε περίπτωση πάντως, πρέπει να είναι στιβαρή, να μπορεί να αντέχει υπερταχύνσεις της τάξης τουλάχιστον 60%, να μπορεί να συνδυαστεί με ένα σύστημα ελέγχου που να παρέχει τη δυνατότητα απλού και ταυτόχρονα αξιόπιστου ελέγχου της τάσης και της συχνότητας λειτουργίας της, να έχει καλή μόνωση και αερισμό και να έχει όσο γίνεται χαμηλότερο κόστος.

Όπως όλες οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές, οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν δύο μέρη: ένα σταθερό που ονομάζεται στάτης και ένα στρεφόμενο που ονομάζεται δρομέας. Οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή μονωμένων μεταξύ τους ελασμάτων με στόχο την ελάττωση των απωλειών δινορρευμάτων, και της μαγνητικής αντίστασης των δρόμων της μαγνητικής ροής. Εφόσον η γεννήτρια είναι ακτινικής ροής, ο δρομέας είναι ένας κύλινδρος και ο στάτης ένας κούφιος κύλινδρος που χωρίζονται μεταξύ τους από ένα μικρό διάκενο αέρα. Το τύλιγμα τυμπάνου μπορεί να βρίσκεται είτε στον στάτη είτε στον δρομέα. Το μαγνητικό κύκλωμα συμπληρώνεται μέσα από το σιδηρομαγνητικό υλικό του κυρίου μέρους της μηχανής, στο οποίο τοποθετείται το τύλιγμα διεγέρσεως ή πεδίου, που παράγει το μαγνητικό πεδίο, όταν δεν διεγείρεται το τύλιγμα τυμπάνου.

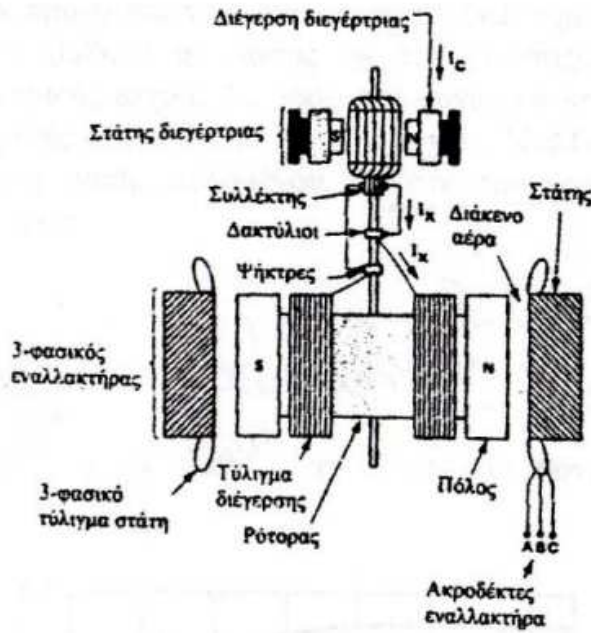


Σχήμα 17: Σύγχρονη γεννήτρια με το τύλιγμα τυμπάνου στον δρομέα

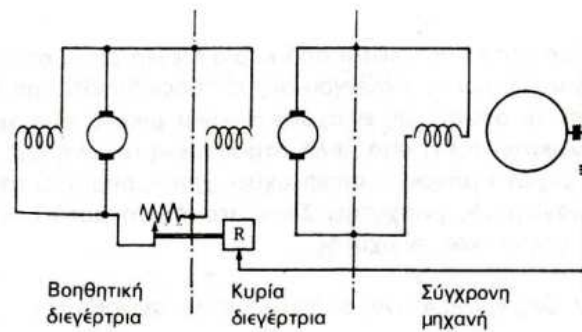
Συνήθως, το τύλιγμα τυμπάνου τοποθετείται στον στάτη και το τύλιγμα διέγερσης στον δρομέα. Το πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι η ηλεκτρική ενέργεια στα άκρα της σπείρας παράγεται σε ένα ακίνητο σύστημα και κατά συνέπεια για την μεταφορά της δεν είναι αναγκαία η παρεμβολή δακτυλιδιών και ψηκτρών. Η τοποθέτηση του τυλίματος τυμπάνου γίνεται σε ομοιόμορφα διανεμημένους αύλακες στον στάτη και για να σχηματιστεί ένα πλήρες τύλιγμα, τοποθετούνται όμοια πηνία σε απέναντι αύλακες όπου όλα τα πηνία συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Όταν το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται στον δρομέα, αυτός μπορεί να είναι είτε

κυλινδρικός (με τοποθέτηση τυλίγματος όμοια με αυτή που περιγράφηκε πριν) είτε να έχει έκτυπους πόλους γύρω από τους οποίους τυλίγονται συγκεντρωμένα πηνία.

Το σύστημα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας που θα τροφοδοτήσει το τύλιγμα πεδίου με συνεχές ρεύμα μπορεί να υλοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ο πιο παλιός από αυτούς είναι μέσω μίας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος η οποία είναι συνδεδεμένη απευθείας στον άξονα της μηχανής από τον οποίο παίρνει κίνηση. Στην περίπτωση αυτή για τη σύνδεση της διεγέρτριας με τα τυλίγματα των μαγνητικών πόλων χρησιμοποιούνται δακτυλίδια και ψήκτρες στερεωμένα στον άξονα του δρομέα. Η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος μπορεί να είναι αυτοδιεγειρόμενη και ο έλεγχος της διέγερσής της γίνεται μέσω ενός ηλεκτρομηχανικού ρυθμιστή. Αυτό το σύστημα διέγερσης όμως έχει πολύ βραδεία απόκριση. Το σύστημα διέγερσης με γεννήτρια συνεχούς ρεύματος μπορεί να έχει γρηγορότερες αποκρίσεις, αν χρησιμοποιηθεί και μία αυτοδιεγειρόμενη βοηθητική διεγέρτρια στον ίδιο άξονα με την κύρια, ενώ ένας ηλεκτρομηχανικός ρυθμιστής καθορίζει τη διέγερση της κύριας διεγέρτριας. Ένας τρόπος να αποφευχθούν τα δακτυλίδια και οι ψήκτρες είναι με τη χρήση μίας μικρής γεννήτριας εναλλασσομένου ρεύματος συνδεδεμένη στον ίδιο άξονα, η οποία να έχει το τύλιγμα του πεδίου στον στάτη και το τύλιγμα του τυμπάνου στον δρομέα. Τότε η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται μέσω ενός ανορθωτή ημιαγωγού που είναι και αυτός στερεωμένος στον ίδιο άξονα και περιστρέφεται με αυτόν. Η γεννήτρια είναι συνήθως μία αξονική πολυφασική σύγχρονη γεννήτρια. Αν οι ανορθωτές είναι ελεγχόμενοι, ο έλεγχος της σύγχρονης γεννήτριας γίνεται με παρέμβαση στους ανορθωτές, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ο έλεγχος της τάσης γίνεται μεταβάλλοντας τη διέγερση της μικρής μηχανής (της διεγέρτριας). Μία άλλη λύση είναι αντί της χρήσης ενός περιστρεφόμενου διεγέρτη να χρησιμοποιηθεί ένας στατικός ανορθωτής που τροφοδοτείται από το δίκτυο και να παρέχει το απαιτούμενο συνεχές ρεύμα στο τύλιγμα πεδίου της σύγχρονης γεννήτριας. Ο έλεγχος της τάσης και του συντελεστή ισχύος γίνεται όπως στην περίπτωση του περιστρεφόμενου διεγέρτη, με παρέμβαση στους ανορθωτές. Οι στατικοί διεγέρτες είναι ανθεκτικοί, εύκολοι στη συντήρηση, με υψηλή απόδοση και καλή απόκριση στις ταλαντώσεις της τάσης της γεννήτριας. Τέλος, μία εναλλακτική λύση είναι η αυτοδιέγερση της γεννήτριας με χρήση ενός μέρους του ρεύματος εξόδου της το οποίο ανορθώνεται. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι η ικανότητα μίας αυτοδιεγειρόμενης σύγχρονης γεννήτριας να εξασφαλίσει το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης κατά την εκκίνησή της εξαρτάται από την απομένουσα μαγνήτισή της. Το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης μίας σύγχρονης γεννήτριας είναι πολύ μικρό και αντιστοιχεί γύρω στο 0,5-1% της συνολικής παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 18: Σχηματική διάταξη σύγχρονης γεννήτριας με τη διεγέρτριά της



Σχήμα 19: Σύστημα διεγέρσεως με διεγέρτρια διεγυρόμενη από βοηθητική γεννήτρια και ηλεκτρομηχανικό ρυθμιστή

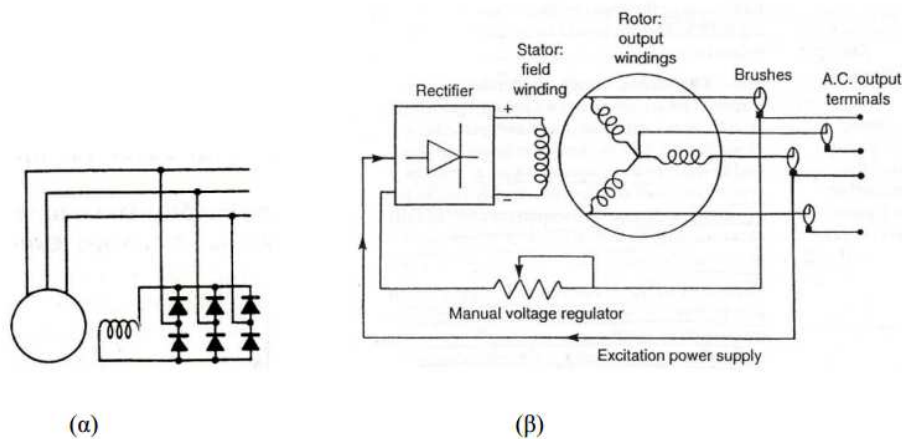
Όσο αφορά τους μαγνητικούς πόλους της γεννήτριας, είναι πάντοτε άρτιοι σε αριθμό, καθώς σχηματίζουν ζεύγη, και τα συγκεντρωμένα τυλίγματα των πηνίων διεγείρονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δίνουν σε διαδοχικούς πόλους βόρεια και νότια πολικότητα εναλλάξ. Το τύλιγμα διεγέρσεως τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα, η πεπλεγμένη μαγνητική ροή σε κάθε πηνίο μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Έτσι, επάγεται στο πηνίο του τυλίγματος τυμπάνου μία ηλεκτρεγερτική δύναμη, η οποία έχει την ίδια μορφή με την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής μέσα στο διάκενο αέρα. Στις σύγχρονες γεννήτριες, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το συνεχές ρεύμα που ρέει στο τύλιγμα του δρομέα, περιστρέφεται μαζί του με την ίδια ταχύτητα και η έντασή του είναι ανάλογη του αριθμού των σπειρών και της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που τις διαρρέει. Για να αναπτυχθεί σταθερή ηλεκτρομαγνητική ροπή, το μαγνητικό πεδίο του στάτη πρέπει να

περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα και για μία σύγχρονη γεννήτρια με  $p$  πόλους που συνδέεται σε δίκτυο σταθερής συχνότητας  $f$  δίνεται από τον τύπο:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} [rpm]$$

Εξίσωση 5

Η σύγχρονη γεννήτρια περιστρέφεται στη μόνιμη κατάσταση με τη σύγχρονη ταχύτητα ανεξάρτητα από το φορτίο μέχρι μία ορισμένη μέγιστη τιμή φορτίου, που αντιστοιχεί σε μία μέγιστη τιμή ροπής, τη ροπή αποσυγχρονισμού. Αν οι απαιτήσεις του φορτίου υπερβούν την τιμή αποσυγχρονισμού, η γεννήτρια δεν μπορεί να περιστραφεί με τη σύγχρονη ταχύτητα και η λειτουργία της διακόπτεται. Τέλος, η ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στο τύλιγμα κάθε φάσης είναι ανάλογη του πλήθους των ζευγών των πόλων, της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, του αριθμού των αγωγών τυλίγματος κάθε φάσεως και της μαγνητικής ροής κάθε πόλου. Άρα, για να μεταβληθεί η ΗΕΔ υπάρχουν δύο δυνατότητες: είτε με μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής, είτε με μεταβολή της μαγνητικής ροής κάθε πόλου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συχνότητα  $f$  είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και ότι πρέπει να διατηρείται σταθερή, προκύπτει ότι τελικά η μόνη δυνατότητα ρύθμισης της ΗΕΔ είναι μέσω της μεταβολής της μαγνητικής ροής των πόλων, δηλαδή μέσω της μεταβολής της έντασης του ρεύματος διέγερσης.



Σχήμα 20: Αυτοδιεγερόμενη σύγχρονη μηχανή

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**



## 2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΝΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο ονομάζεται η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική τάση. Το ηλιακό φως είναι ουσιαστικά μικρά πακέτα ενέργειας, φωτόνια, τα οποία περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Το γαλάζιο χρώμα ή το υπεριώδες π.χ. έχουν περισσότερη ενέργεια από το κόκκινο ή το υπέρυθρο. Όταν λοιπόν τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα Φ/Β στοιχείο (που είναι ένας ημιαγωγός), άλλα ανακλώνται, άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από το Φ/Β. Τα φωτόνια που απορροφώνται από το Φ/Β είναι που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτόνια αυτά αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του Φ/Β να μετακινηθούν σε άλλη θέση και ως γνωστόν ο ηλεκτρισμός δεν είναι τίποτε άλλο παρά κίνηση ηλεκτρονίων. Σ' αυτή την απλή αρχή της φυσικής λοιπόν βασίζεται μια από τις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού στις μέρες μας.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Γάλλο φυσικό Έντμουντ Μπεκερέλ το 1839, ο οποίος διαπίστωσε ότι ορισμένα υλικά, όταν εκτεθούν στο φως, παράγουν μικρές ποσότητες ηλεκτρικού ρεύματος. Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν οι Adams (1836 - 1915) και ο φοιτητής του Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός Czochralski (1885 - 1953) πρόσθεσε την μέθοδο ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) με την σχετική έρευνα του και η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα. Μια σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949 όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει.

Το 1905 ο Άλμπερτ Αϊνστάιν περιέγραψε τη φύση του φωτός και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο στο οποίο βασίζεται η Φ/Β τεχνολογία. Για αυτή του την μελέτη κέρδισε αργότερα το βραβείο Nobel στη φυσική.

Η πρώτη Φ/Β μονάδα κατασκευάστηκε από τα Bell Laboratories το 1954 με απόδοση 6% ενώ τέσσερα χρόνια αργότερα κατασκευάζεται Φ/Β στοιχείο με απόδοση 9%.

Στις 17 Μαρτίου του 1958 εκτοξεύεται το Vanguard I, ο πρώτος δορυφόρος τροφοδοτούμενος από Φ/Β, ο οποίος θα δουλέψει για οκτώ συναπτά έτη. Μέσα στα επόμενα δύο χρόνια (1958-1960) η απόδοση των Φ/Β φτάνει το 14%. Το 1960 η Ιαπωνική κυβέρνηση εγκαθιστά Φ/Β σε φάρους η οποία ήταν και η μεγαλύτερη Φ/Β διάταξη της εποχής. Η πρώτη εγκατάσταση PV που φτάνει στα επίπεδα του 1MW (μεγαβατ) γίνεται στην Καλιφόρνια το 1980 από την ARCO Solar χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου 2 αξόνων. Το 1999 η εταιρία Spectrolab σε συνεργασία με το NREL αναπτύσσουν ένα Φ/Β στοιχείο με απόδοση 32,3% με συνδυασμό τριών υλικών (στρώσεων). Την ίδια χρονιά το ρεκόρ στην απόδοση των Thin Films φτάνει στο 18.8%. Η παραγωγή όλων των τεχνολογιών των ΦΒ πάνελ φτάνει συνολικά τα 200 MW.

Από το 2004, η μαζική είσοδος μεγάλων εταιρειών στον χώρο των ΦΒ φέρνει την μαζική παραγωγή και Γερμανία και Ιαπωνία κυριαρχούν στην κατασκευή ΦΒ πάνελ και πλέον σε όλες τις αναπτυσσόμενες χώρες αρχίζουν, με τον έναν (παραγωγή εξοπλισμού) ή τον άλλον τρόπο (κατασκευή ΦΒ εγκαταστάσεων), να υιοθετούν τις τεχνολογίες των Φ/Β.

Η Ελλάδα έχει υιοθετήσει και αυτή με την σειρά της κίνητρα για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα οποία μάλιστα ήταν ιδιαίτερα ελκυστικά για τους υποψήφιους επενδυτές μέσω ευνοϊκής τιμολόγησης της ενέργειας που παράγεται από Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, γνωστή και ως feed – in- tariff. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εκτόξευση της συνολικής εγκαστημένης ισχύος στα 2579 MWp μέχρι το τέλος του 2013. Όπως είναι αναμενόμενο το ενδιαφέρον για νέες εγκαταστάσεις έχει πέσει κατακόρυφα και σε αυτό έχει συμβάλει σημαντικά η μείωση της εγγυημένης τιμής για την αγορά ενέργειας από Φ/Β πάρκα, οι έκτακτοι φόροι και εισφορές που έχει επιβάλλει η κυβέρνηση στους παραγωγούς και το πολύ ασταθές οικονομικό κλίμα που επικρατεί στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια.

## 2.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

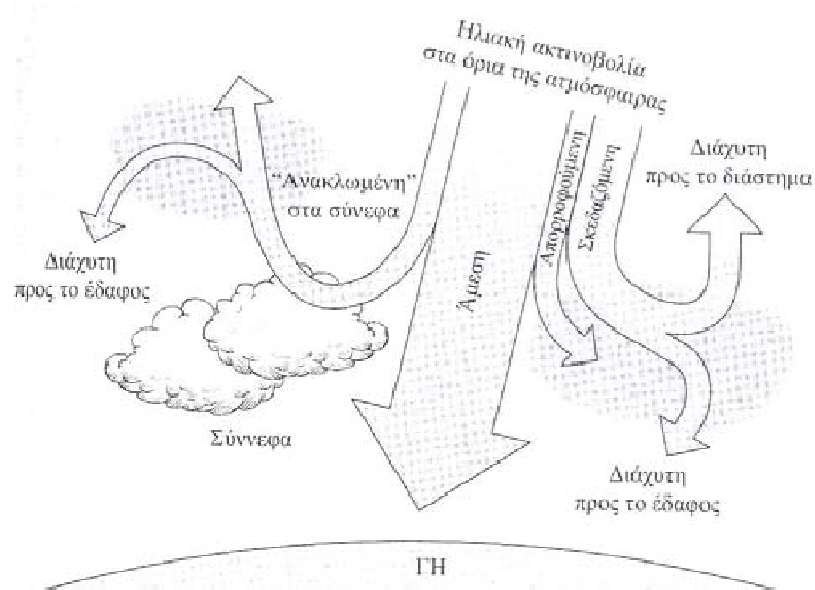
Ο ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι, με μάζα  $2 \times 10^{30}$  kg, ακτίνα 700.000 km, ηλικία  $5 \times 10^9$  χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Η επιφανειακή θερμοκρασία του είναι  $\sim 5.800$  K, ενώ η εσωτερική, περίπου, 15.000.000 K. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κατά τις οποίες μετατρέπεται το υδρογόνο σε ήλιο. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η πυρηνική αντίδραση:



δικαιολογεί, με το έλλειμμα μάζας, την εκλυόμενη ενέργεια με βάση τη γνωστή σχέση  $E = \Delta m \cdot c^2$ , από την ειδική θεωρία της σχετικότητας του Einstein. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου, που μετατρέπεται σε He, εκλύεται ενέργεια ίση με  $U = 1,67 \times 10^9$  kWh. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν, κυρίως με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλλά και με σωματιδιακή μορφή.

Η ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που αντιστοιχεί στη μέση απόσταση πλανήτη ήλιου, ενός ηλιακού συστήματος, ονομάζεται ηλιακή σταθερά του συγκεκριμένου πλανήτη. Στην περίπτωση του ηλιακού μας συστήματος, ηλιακή σταθερά για τη γη, ορίζεται σε απόσταση 1 AU από τον ήλιο. Η τιμή  $J_0 = 1367$  W/m<sup>2</sup>, χρησιμοποιείται πλέον παγκόσμια διεθνώς, ως πρότυπη τιμή της ηλιακής σταθεράς για τη γη.

Κατά τη διέλευση των ηλιακών ακτίνων, από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ένταση τους ελαττώνεται, καθώς τα φωτόνια σκεδάζονται στα μόρια της ατμόσφαιρα. Ένα άλλο μέρος της ακτινοβολίας, απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας. Ομοίως απορροφούν οι υδρατμοί, το CO<sub>2</sub>, τα οξείδια του αζώτου κ.α., σε άλλες περιοχές του φάσματος. Τέλος, μέρος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της γης. Συνεπώς, σε κάθε τόπο της επιφάνειας της γης, φτάνουν δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός: η απευθείας ή άμεση B (Beam) και η σκεδαζόμενη στα μόρια του αέρα, η οποία ονομάζεται διάχυτη, D (Diffuse).



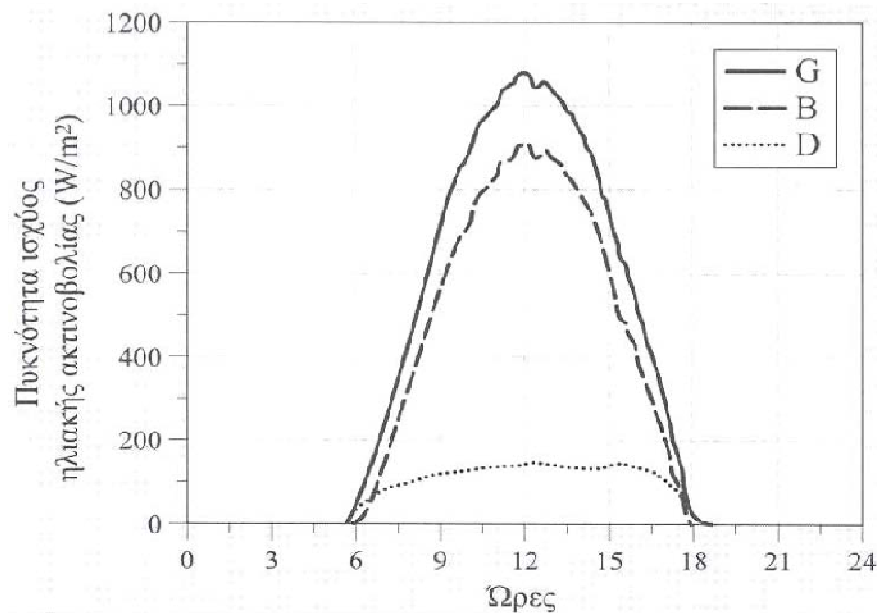
Σχήμα 21: Ηλιακή ακτινοβολία

Γενικά, λοιπόν, η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη ή ένα αισθητήρα, αποτελείται από την απευθείας, τη διάχυτη και τη διάχυτα «ανακλώμενη» από το έδαφος. Η συνολική αυτή ακτινοβολία αναφέρεται ως ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο ή οριζόντιο συλλέκτη και συμβολίζεται με  $G$  (Global Irradiation). Μεταξύ της ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας,  $G$ , που προσπίπτει σε συλλεκτική επιφάνεια ή που μετρείται με αισθητήρα (π.χ. πυρανόμετρο), της κάθετης απ' ευθείας ακτινοβολίας,  $B_n$ , και της διάχυτης  $D$ , ισχύει η επόμενη σχέση:

$$G = B + D = B_n \cos z + D$$

Εξίσωση 6

όπου  $z$ , η ζενίθ γωνία του ήλιου ( $z=90-EL$ ,  $EL$  το ύψος του ήλιου). Κατά την ανατολή του ήλιου, η ζενίθ γωνία είναι  $z=90^\circ$  και άρα η ολική οριζόντια πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας  $G$ , καθορίζεται, κυρίως, από τη διάχυτη συνιστώσα,  $D$ . Καθώς το ύψος του ήλιου αυξάνει, μέσα σε μια αίθρια ημέρα, η απευθείας κάθετη ακτινοβολία, αυξάνει μέχρι το ηλιακό μεσημέρι, μετά το οποίο ελαττώνεται, κατά συμμετρικό τρόπο.



Σχήμα 22: Ημερήσια κατανομή της πυκνότητας ισχύος της B, D και G ακτινοβολίας

Με βάση τις ωριαίες τιμές των συνιστωσών G, B και D, προκύπτουν οι ημερήσιες μέσες τιμές, οι μηνιαίες μέσες τιμές των μεγεθών αυτών καθώς και οι ετήσιες μέσες τιμές. Προκειμένου τα αποτελέσματα αυτά να αξιοποιηθούν σε ενεργειακούς υπολογισμούς, συλλέγονται επί σειρά πολλών ετών (π.χ. 30 ετών), η επεξεργασία των οποίων δίδει το Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος για τον αντίστοιχο τόπο.

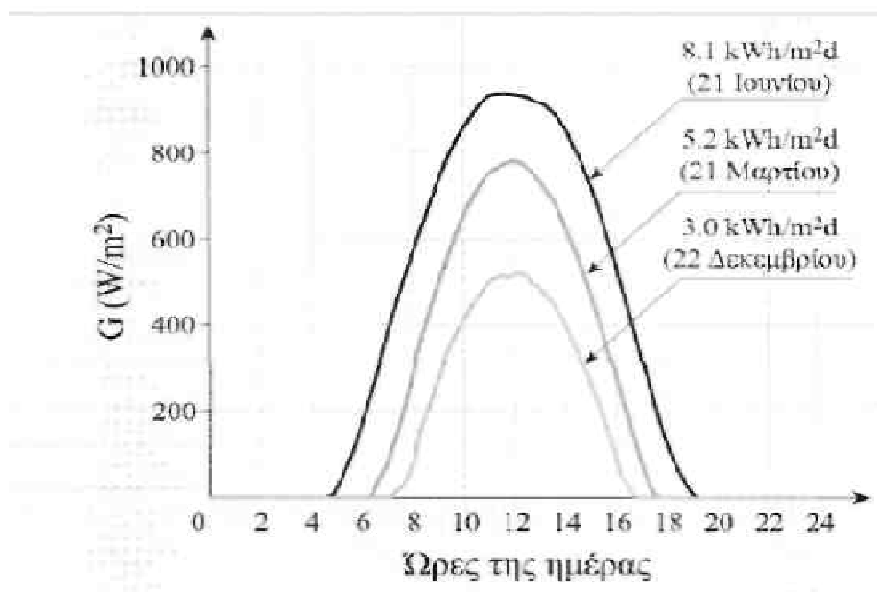
Λόγω αντανάκλασης, απορρόφησης και διάχυσης, η ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται καθώς διαπερνάει την ατμόσφαιρα της γης. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση που διανύει δια μέσω της γήινης ατμόσφαιρας, τόσο μεγαλύτερη είναι και η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο παράγοντας AM (Air Mass) υποδεικνύει πόσο μεγάλη είναι η απόσταση που διανύει η ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα και αναφέρεται σε σχέση με την πυκνότητα της ατμόσφαιρας.

Η ενέργεια ανά  $m^2$  που φτάνει στην επιφάνεια της Γης μέσα σε μια μέρα εξαρτάται από την κλίση της συλλεκτικής επίπεδης επιφάνειας, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, τη μέρα του χρόνου και από τις συγκεντρώσεις των διαφόρων αερίων, υγρών και στερεών συστατικών και αιωρημάτων της ατμόσφαιρας κατά την ημέρα εκείνη.

Προκειμένου, όμως, να υπάρχουν συγκρίσιμα στοιχεία σε διεθνή κλίμακα αναφερόμαστε σε μετρήσεις με αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται με τη συλλεκτική τους επιφάνεια οριζόντια. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέσες ημερήσιες τιμές της πυκνότητας ισχύος και της πυκνότητας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντια επιφάνεια, μέσα σε κάθε μήνα και μέσα στο έτος. Για να αξιοποιηθούν αυτά τα μετεωρολογικά στοιχεία σε πρακτικές εφαρμογές (π.χ. σε ενεργειακές μελέτες), απαιτούνται μετρήσεις που να καλύπτουν περίοδο πολλών ετών (π.χ. 10 έως 30 ετών). Σε περιπτώσεις που λείπουν στοιχεία μακράς περιόδου για κάποιο τόπο, μπορούν

να αξιοποιούνται στοιχεία που έχουν συλλεχθεί σε μικρότερες χρονικές περιόδους με την επιφύλαξη της μικρότερης αξιοπιστίας τους.

Τυπικές μορφές εξέλιξης μέσα στην ημέρα της πυκνότητας ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο ( $G$  σε  $W/m^2$ ), απεικονίζονται στην παρακάτω. Στο ίδιο σχήμα σημειώνονται και οι αντίστοιχες ενεργειακές πυκνότητες  $H$  (σε  $kWh/m^2d$ ), οι οποίες προκύπτουν ως το εμβαδόν κάτω απ' την αντίστοιχη καμπύλη (ολοκλήρωμα). Οι συγκεκριμένες γραφικές παραστάσεις προέρχονται από μετρήσεις που έγιναν στην Κρήτη, στο σημείο με γεωγραφικό πλάτος  $35,5^\circ$  και γεωγραφικό μήκος  $25^\circ$ .

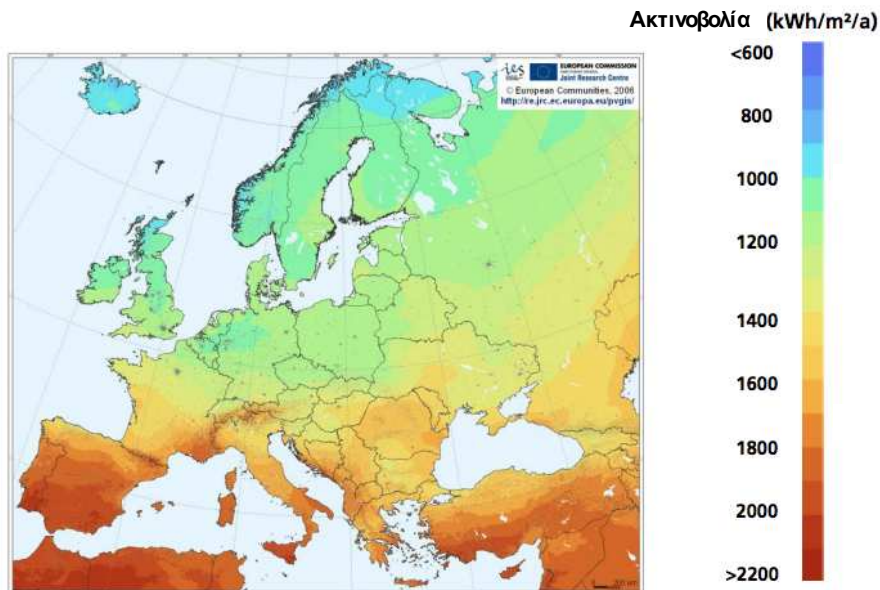


Σχήμα 23: Ημερήσια μεταβολή της πυκνότητας ισχύος της ολικής, της απευθείας και της οριζόντια διάχυτης ακτινοβολίας, κατά μία αίθρια μέρα.

## 2.3 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ

Εκτός από τη μέση ημερήσια ενέργεια από το ήλιο σε μηνιαία και ετήσια βάση, σε οριζόντιο επίπεδο, χαρακτηριστικό στοιχείο μιας περιοχής είναι η ηλιοφάνεια της. Αυτή εξαρτάται βεβαίως από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και από την θέση και την διαμόρφωση της περιοχής όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Πιο συγκεκριμένα, το παρακάτω σχήμα δείχνει πως μεταβάλλεται το δυναμικό ανά περιοχή στην Ελλάδα.

Τα χαρακτηριστικά αυτά πιθανόν να ευνοούν την ανάπτυξη νεφώσεων, με αποτέλεσμα την μείωση των ηλιόλουστων ημερών. Η ηλιοφάνεια εκφράζεται σε πλήθος ωρών ανά μήνα και ανά έτος, κατά τις οποίες ο ήλιος είναι ορατός στον ουρανό. Στην Ελλάδα, η περιοχή με τη μεγαλύτερη ηλιοφάνεια είναι η περιοχή της Ιεράπετρας στο νοτιοανατολικό μέρος της Κρήτης (3108 ώρες ετησίως) <sup>[Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών]</sup>.



**Σχήμα 24: Γεωγραφική απεικόνιση της ακτινοβολίας ανα περιοχή στην Ευρώπη [Fraunhofer Institute]**

Η Ελλάδα παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό, περίπου 1,400-1,800 (kWh/(m<sup>2</sup>.yr)) ετησίως σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος και το ανάγλυφο της περιοχής. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια μορφή ενέργειας με σχεδόν σταθερή και προβλέψιμη ένταση (W/m<sup>2</sup>) στην διάρκεια του χρόνου και της ημέρας. Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει την μέγιστη ένταση της κατά την διάρκεια του μεσημεριού (μέγιστο ηλιακό ύψος), τόσο κατά τη θερινή όσο και κατά τη χειμερινή περίοδο. Η ηλιακή ενέργεια είναι μεγαλύτερη κατά τη θερινή περίοδο, λόγω της θέσης του ήλιου, αλλά και λόγω της αύξησης των ωρών ηλιοφάνειας (μείωση των νεφώσεων). Για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε κεκλιμένη ή/και περιστρεφόμενη επιφάνεια, είναι απαραίτητη η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο.

Στην Ελλάδα η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) καταγράφει εδώ και πολλά χρόνια τις ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα (hr/day), αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις την ολική ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m<sup>2</sup>) για διάφορες περιοχές της χώρας μας. Οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών επιλέγονται ώστε οι μετρήσεις να είναι αξιόπιστες και να μην επηρεάζονται από φυσικά εμπόδια ή τοπικά φαινόμενα που να αλλοιώνουν το αποτέλεσμα. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται μέσες τιμές για την μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για διάφορες περιοχές της Ελλάδος.

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Ετήσια	Μ.Ο.	
Κρήτη	Ρέθυμνο	62	81	119	164	211	218	223	204	160	106	81	58	1687	1735
	Σητεία	66.5	83	128.4	165.2	207.4	223.2	227.1	207.5	163.7	119.3	80.4	61.9	1733.6	
	Σούδα	65	81.7	130.7	166.5	208.5	221.9	228.5	209.3	163.6	116.3	76.8	60.3	1729.1	
	Τυμπάκιο	73.4	90.5	137.5	169	207.8	222.9	228.7	209.8	166.3	127.2	85.9	67.7	1786.7	
	Χανιά	62	80	124	167	212	220	225	205	161	111	78	59	1704	
	Ιεράπετρα	73	89	137	174	210	220	224	205	165	125	89	69	1780	
Ηράκλειο	65.6	81.6	125	166.5	207.3	222.4	227.1	207	163	117.3	78.6	61.2	1722.6		
Αιγαίο	Λήμνος	51.1	69.6	112.3	154.3	199.5	215.3	220.9	198.5	150.8	104.6	61.3	46	1584.2	1675
	Μήλος	56	67	120	175	213	223	226	205	164	112	77	52	1690	
	Μυτιλήνη	52	70	113	156	209	219	223	201	156	109	67	50	1625	
	Νάξος	60.3	77	122.6	161.2	204.7	220.4	224.5	204.8	159.1	115.9	73.7	55.6	1679.8	
	Πάρος	60	80	125	168	211	220	223	202	160	117	75	58	1699	
	Ρόδος	69.9	85.1	130.8	164	203	217.2	225.1	204.3	158.9	120.2	79.2	61.2	1718.9	
	Σάμος	64.9	82.1	126.7	162.5	206.8	224.9	230.6	209.6	163.7	120.5	78.6	58.5	1729.4	
	Σκύρος	51.2	69.1	109.9	153.3	197.2	214.2	219.7	198.8	151.7	102.5	62.9	47.7	1578.2	
	Σύρος	58	80	121	172	212	219	225	204	160	199	74	57	1781	
Χίος	55	72	119	161	210	220	225	203	159	116	71	53	1664		
Πελοπόννησος	Ανδραβίδα	68.4	83.4	128.4	159.5	200.2	220.6	228.4	205.5	156.1	115.6	75.2	60.1	1701.4	1671
	Αραξος	62.6	78.6	119.7	155.6	196.1	210.9	217.8	197.6	152.4	110.2	69.4	54.6	1625.5	
	Αργος	68.7	83.6	127.7	159.5	202.5	220.6	229	206.4	157.2	115.5	74.8	59.2	1704.7	
	Μεθώνη	62	78	125	155	207	215	220	199	157	116	77	57	1668	
	Πάτρα	55	72	124	147	200	215	218	197	153	107	66	53	1607	
	Πύργος	68.4	83.1	127.5	157.9	200.4	215.6	223.8	202.1	155	115.9	75.5	59.3	1684.5	
	Κόρινθος	65.4	82.8	123.4	157.9	201.7	218.3	223.2	201.9	154.2	111.9	72	55.2	1667.9	
	Κύθηρα	68	81	127	161	210	220	223	204	160	117	78	60	1709	
Καλαμάτα	68.2	82.3	126.1	156.2	198.7	216	222	200.9	154.9	114.5	75.2	59.3	1674.3		
Αιτωλοακαρνανία	Αργίλιο	63.5	78.3	119.4	148.4	189.9	214.1	224.2	200.3	151.3	109.8	69.8	55.1	1624.1	1624
Ιόνιο	Αργυστόλι	65	80	124.9	157.3	204.3	219.4	226.1	203.1	155.6	112.6	72.6	56.1	1677	1623
	Ζάκυνθος	64.2	77.6	110.1	158.8	190.8	200.1	218.5	203.8	154	104.3	65.4	52.8	1600.4	
	Κέρκυρα	57.7	73.5	116.7	149.9	195.4	213.6	221	197.8	148.2	103.1	64.4	50.7	1592	
Στερεά Ελλάδα	Αθήνα (Ελληνικό)	63	79	117.7	154.3	195.4	214	222.4	202.7	152.6	109	70.7	55.7	1636.5	1606
	Αθήνα (Κέντρο)	63.3	77.7	118.9	152.7	190.4	207.4	214.5	198.6	156	111.1	68.1	54.4	1613.1	
	Αλιάρτος	51	70	114	158	206	216	220	204	153	102	66	49	1609	
	Λαμία	59.4	73.1	113.9	150.5	188.8	210.3	214.1	193.4	145.5	100.3	65.3	52.1	1566.7	
Θεσσαλία	Τανάγρα	59.1	74.2	112.7	151.9	194	215.4	222	201.3	153.1	104.5	64.7	51.2	1604.1	1563
	Λάρισα	55.1	71.4	112.1	151.1	190.9	210.8	215.8	194.3	145.9	97.8	61.2	47.8	1554.2	
Ήπειρος	Αγχιάλος	61.3	74.3	112.5	149.2	189.7	212.7	217.4	195.1	146.8	98.8	63.1	51.5	1572.4	1538
	Άρτα	65.5	79.7	120.4	149.1	190.2	211.2	218.1	196.4	150.6	110	69.5	56.2	1616.9	
Θράκη	Ιωάννινα	51.8	66.4	105.2	134.9	178.3	202.1	212	190.3	136.5	96.1	57.6	45.1	1476.3	1512
	Κόνιτσα	53	65	112	138	190	200	216	194	141	99	63	50	1521	
	Αλεξανδρούπολη	50.7	68.9	107.3	141.8	182.8	205.8	211.6	192.3	144.2	99.4	57.8	43.7	1506.3	
Μακεδονία	Κομοτηνή	50	65	105	145	188	209	215	193	145	99	58	45	1517	1490
	Καστοριά	57.6	71.3	111.2	141.1	173.6	201.8	206.3	185.5	138.5	97	60	47.7	1491.6	
	Σέρρες	50.8	68	105.7	141	180.5	202.8	209.7	187.7	140.8	94.7	56.5	43.7	1481.9	
	Χρυσούπολη	57.5	78	111.3	137.6	189.9	204	208.8	187.6	141.8	97.7	62.1	43.3	1519.6	
Θεσσαλονίκη	52.6	67.5	103.2	140.7	179.1	198.6	209.5	184.7	136.7	91.4	56.6	45.5	1466.1		

Πίνακας 1: Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/(m<sup>2</sup>month)]

Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν από την επεξεργασία μετρήσεων της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας (hr/mo) με χρονική διάρκεια πάνω από 30 έτη για τις περισσότερες περιοχές, οι οποίες παραχωρήθηκαν από την ΕΜΥ. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικές σχέσεις όπως ισχύουν για τις ελληνικές περιοχές, καθώς και παλαιότερα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας τα οποία έχουν δημοσιευτεί σε επιστημονικές εργασίες και συνέδρια <sup>[www.helapco.gr]</sup>.

Κινούμενοι από Βορρά προς Νότο ανά γεωγραφικό διαμέρισμα, είναι φανερό ότι η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται έως και τις μέγιστες τιμές (λίγο κάτω από 1800 kWh/(m<sup>2</sup>annualy) στην περιοχή της Κρήτης και συγκεκριμένα στην Ιεράπετρα.

Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένες επιφάνειες με σταθερό ή τυχαίο προσανατολισμό υπολογίζεται με θεωρητικά και εμπειρικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί και βασίζονται κυρίως σε μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο της υπό μελέτη περιοχής. Στα μοντέλα αυτά συνυπολογίζονται και γεωμετρικοί παράγοντες που σχετίζονται με την τροχιά του ήλιου, την περιοχή και την εποχή του χρόνου. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια είναι συνάρτηση της κλίσης της επιφάνειας, του προσανατολισμού της και της περιοχής εγκατάστασης (γεωγραφικό πλάτος και μήκος). Σημαντική επίσης παράμετρος είναι η καθαρότητα του ορίζοντα και τα τυχόν φυσικά ή τεχνητά εμπόδια που υπάρχουν γύρω από την επιφάνεια πρόσπτωσης.

Η μέση ολική μηνιαία ΗΤ ηλιακή ακτινοβολία (kWh/(m<sup>2</sup>.mo)) σε κεκλιμένο επίπεδο με νότιο υπολογισμό, υπολογίζεται βάση του ισοτροπικού μοντέλου των Liu, Jordan & Klein, από την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{H}_T = (\bar{H} - \bar{H}_d) \cdot \bar{R}_b + 0,5 \cdot \bar{H}_d \cdot (1 + \cos \beta) + 0,5 \cdot \rho \cdot \bar{H} \cdot (1 - \cos \beta)$$

#### Εξίσωση 7

όπου,

$\rho$ : η ανακλαστικότητα του εδάφους και θεωρήθηκε ίση με 0,15

$\beta$ : η κλίσης της επιφάνειας

$\bar{H}_T$ : η μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για την υπό μελέτη περιοχή

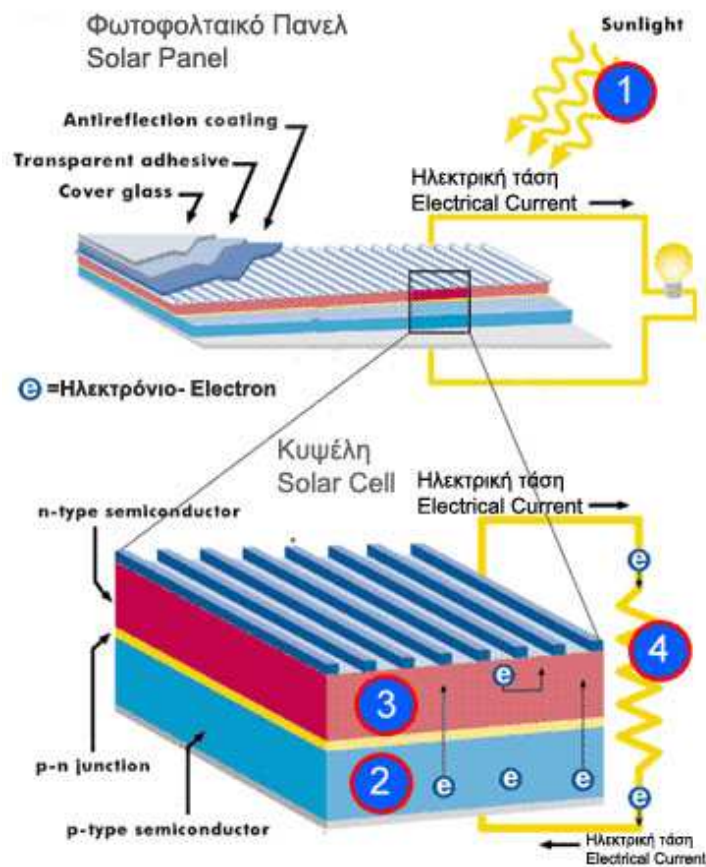
$\bar{H}_d$ : η μέση μηνιαία διάχυτη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για την υπό μελέτη περιοχή

$\bar{R}_b$ : ο μέσος μηνιαίος γεωμετρικός παράγοντας για νότιο προσανατολισμό (αζιμούθιο  $\gamma=0$ )



## 2.4 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, αποτελεί τη βασική φυσική διαδικασία μέσω της οποίας ένα Φ/Β στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο (Si), το αρσενιούχο γάλλιο (GaAs), το τελουριούχο κάδμιο (CdTe), κλπ, χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Το στοιχείο του κρυσταλλικού πυριτίου ωστόσο παραμένει το ευρύτερα διαδεδομένο Φ/Β στοιχείο.



Σχήμα 25: Λειτουργία Φ/Β κυττάρων

Όταν το φως προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υλικού, τότε ένα μέρος αυτού ανακλάται, ένα άλλο τη διαπερνά και το υπόλοιπο απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός, ουσιαστικά σημαίνει τη μετατροπή του σε άλλη μορφή ενέργειας η οποία συνήθως είναι θερμότητα. Παρ' όλα αυτά όμως, υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνειά τους, σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται η τεράστια τεχνολογική πρόοδος του τομέα της ηλεκτρονικής και του τομέα της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών.

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια “πακέτα” ηλιακής ενέργειας. Τα φωτόνια αυτά, περικλείουν διαφορετικά ποσά ενέργειας που αντιστοιχούν στα διάφορα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος. Η λειτουργία των ηλιακών Φ/Β συστημάτων στηρίζεται στο Φ/Β φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα Φ/Β κύτταρα αποτελούν διόδους ημιαγωγικών ενώσεων τύπου p-n με τη μορφή επίπεδης πλάκας. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο διαρκεί η ακτινοβολία, δημιουργείται περίσσεια φορέων, δηλαδή περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου, δέχονται την επίδραση ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου της ένωσης p-n.

Εξαιτίας αυτού, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Αν στους ακροδέκτες αυτούς συνδεθεί κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο, παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος και ισχύος από τη Φ/Β διάταξη προς το φορτίο. Συμπερασματικά η όλη διάταξη, αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β κυττάρου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες της παραπάνω διάταξης, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση διόδου, ονομάζεται Φ/Β φαινόμενο.

## 2.5 Μοντέλο μιας διόδου

Κάθε κρυσταλλικός ημιαγωγός, για να έχει ικανοποιητικές ιδιότητες για Φ/Β και γενικότερα για ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό τους πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής. Τα άτομα των ημιαγωγικών υλικών, συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς οι οποίοι είναι δυνατόν να σπάσουν υπό την επίδραση της ακτινοβολίας ή θερμότητας, οπότε απελευθερώνονται ηλεκτρόνια (αρνητικοί φορείς n) και αφήνουν κενές θέσεις, τις οπές (θετικοί φορείς p). Οι σημαντικότερες ιδιότητες και εφαρμογές των διατάξεων ημιαγωγών οφείλονται στη διάχυση των φορέων τους. Βασική διάταξη για την εκδήλωση των ιδιοτήτων αυτών, είναι η ένωση p-n (positive-negative junction) η οποία σχηματίζεται όταν έλθουν σε στενή επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p με ένα τεμάχιο τύπου n. Η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται διάδος.

Το παραμετρικό μοντέλο της μιας διόδου ενός Φ/Β κυττάρου περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση, η οποία περιγράφει το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου:

$$I_{cell} = I_{L,cell} - I_{0,cell} \cdot \left( e^{\frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_{s,cell}}{n_{cell} \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_{s,cell}}{R_{sh,cell}}$$

#### Εξίσωση 8

Όπου:

- $V_T$ : η θερμοκή τάση σε Volt που δίνεται από τη σχέση  $V_T = kTc/q$ . Για  $T$  θερμοκρασία δωματίου,  $Tc = 300^\circ\text{K}$ ,  $V_T \approx 25,85\text{mV}$ .
- $k$ :  $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ , η σταθερά Boltzmann
- $T_c$ : απόλυτη θερμοκρασία του κυττάρου σε βαθμούς Kelvin. ( $0^\circ\text{C} = 273^\circ\text{K}$ ).
- $q$ : φορτίο ηλεκτρονίου.
- $n_{cell}$ : συντελεστής διόρθωσης που οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης και μη ιδανικής διάχυσης τα οποία συμβαίνουν στην περιοχή της p-n επαφής. Παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2.
- $I_{cell}$ : το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου.
- $V_{cell}$ : η τάση στην έξοδο του κυττάρου.
- $I_{L, cell}$ : το φωτόρευμα, δηλαδή το ρεύμα που παράγεται λόγω του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός επί του κυττάρου.
- $I_{0, cell}$ : ρεύμα κόρου της διόδου
- $R_{s, cell}$ : σε σειρά αντίσταση του κυττάρου. Παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά τη ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού ωμικής επαφής και την ωμική επαφή. Είναι συνήθως μικρότερη του  $1\Omega$ .
- $R_{sh,cell}$ : παράλληλη αντίσταση του κυττάρου ( Shunt resistance). Οφείλεται σε διαρροές φορέων που συμβαίνουν: **i**) στην επαφή pn (επανασύνδεση), **ii**) στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του κυττάρου (επιφανειακή διαρροή), **iii**) σε άλλες ανωμαλίες του κρυστάλλου. Είναι της τάξης των  $k\Omega$ , γενικά πολύ μεγαλύτερη από την  $R_s$ .

Αν θεωρήσουμε ότι το πλαίσιο αποτελείται από  $N_s$  ίδια ηλιακά κύτταρα σε σειρά και  $N_p$  παράλληλες αλυσίδες κυττάρων τότε με βάση το μοντέλο της μιας διόδου για ένα ηλιακό κύτταρο προκύπτει το μοντέλο της μιας διόδου για ένα ολόκληρο πλαίσιο. Η ηλεκτρική συμπεριφορά του δίνεται από την εξίσωση:

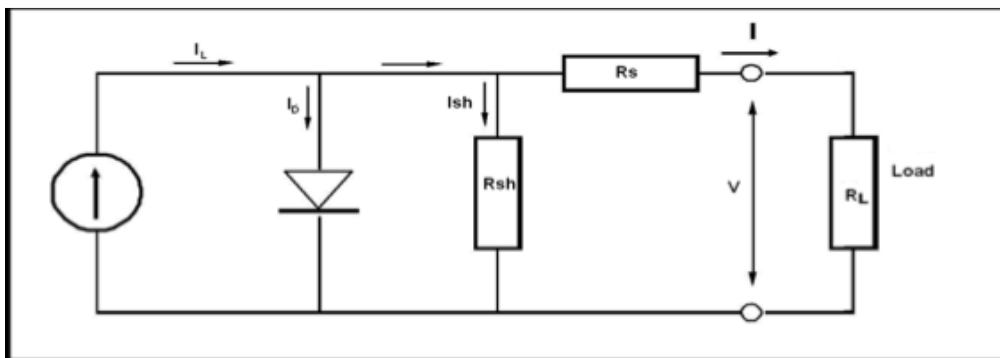
$$I = I_L - I_0 \cdot \left( e^{\frac{V+I \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$

### Εξίσωση 9

Όπου,

- $N_s$ : αριθμός κυττάρων σε σειρά. Θεωρούμε ότι τα κύτταρα είναι πανομοιότυπα.
- $N_p$ : αριθμός παράλληλων αλυσίδων.
- $n$ :  $N_s \times n_{cell}$ .
- $I = I_{cell} \times N_p$ , το ρεύμα στην έξοδο του πλαισίου.
- $V = V_{cell} \times N_s$ , η τάση στη έξοδο του πλαισίου.
- $I_L = I_{L, cell} \times N_p$  το συνολικό ισοδύναμο φωτόρευμα του πλαισίου.
- $I_0 = I_{0, cell} \times N_p$  το συνολικό ρεύμα κόρου της διόδου του πλαισίου.
- $R_s = (N_s / N_p) \times R_{s, cell}$  η ισοδύναμη σε σειρά αντίσταση του πλαισίου
- $R_{sh} = (N_s / N_p) \times R_{sh, cell}$  η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση του πλαισίου

Η εξίσωση αυτή είναι μια μη γραμμική πεπλεγμένη εξίσωση,  $I=f(I,V)$ . Αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός πλαισίου σε στατικές καταστάσεις. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 26: Το μοντέλο μιας διόδου για ένα πλαίσιο

Επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση (9) ως προς την τάση τότε παίρνουμε πάλι μια πεπλεγμένη εξίσωση τα μορφής  $V=f(I, V)$ . Επομένως έχουμε:

$$V = -I \cdot R_s + n \cdot V_T \cdot \ln \left( \frac{I_L - \beta_R \cdot I - \frac{V}{R_{SH}}}{I_0} + 1 \right), \quad \text{όπου } \beta_R = 1 + \frac{R_s}{R_{SH}}$$

Εξίσωση 10

Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοιχτού κυκλώματος.

- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  υπολογίζεται αν θέσουμε στην εξίσωση (9)  $V=0$  και  $I = I_{sc}$  (short circuit current) οπότε προκύπτει:

$$I_{sc} = \frac{1}{\beta_R} \cdot \left[ I_L - I_0 \cdot \left( e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1 \right) \right]$$

Εξίσωση 11

- Η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  (open circuit Voltage) υπολογίζεται αν θέσουμε στην εξίσωση (10) όπου  $I = 0$  και  $V = V_{oc}$  οπότε προκύπτει:

$$V_{oc} = n \cdot V_T \cdot \ln \left( \frac{I_L - \frac{V_{oc}}{R_{SH}}}{I_0} + 1 \right)$$

Εξίσωση 12

Επειδή όπως είδαμε η  $R_{sh}$  είναι πολύ μεγάλη (της τάξης των kΩ) και πολύ μεγαλύτερη της  $R_s$  μπορούμε προσεγγιστικά να καταλήξουμε στις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{V + I \cdot R_s}{R_{SH}} \approx 0 \quad \text{και} \quad \frac{V}{R_{SH}} \approx 0, \quad \text{οπότε} \quad \beta_R = 1 + \frac{R_s}{R_{SH}} \approx 1$$

Επειδή οι παραλειπόμενοι όροι είναι σχεδόν αμελητέοι και δεν έχουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της χαρακτηριστικής εξόδου V-I, τότε οι (9), (10), (11) και (12) απλοποιούνται στις:

$$I \approx I_L - I_0 \cdot \left( e^{\frac{V+I \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1 \right)$$

**Εξίσωση 13**

$$V \approx -I \cdot R_s + n \cdot V_T \cdot \ln \left( \frac{I_L - I}{I_0} + 1 \right)$$

**Εξίσωση 14**

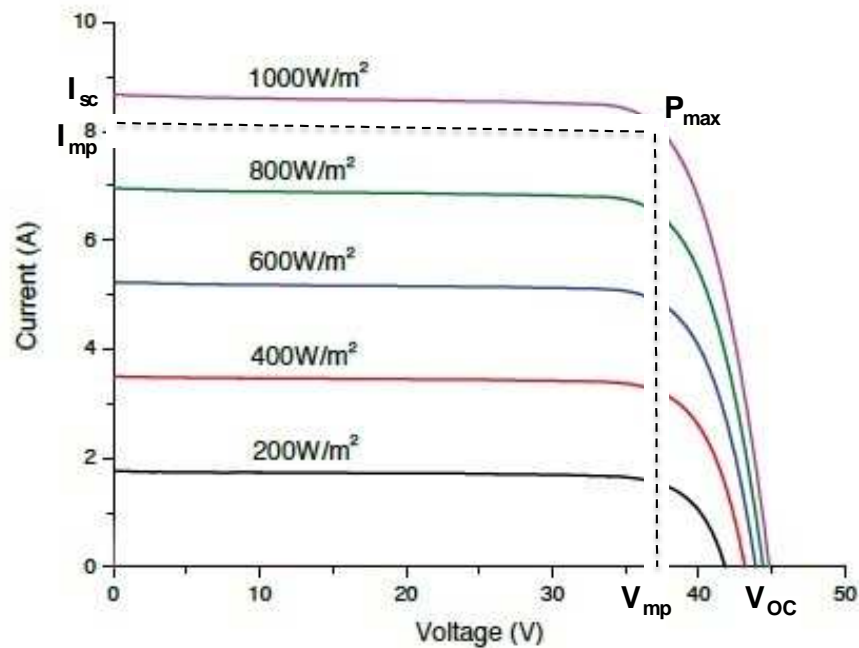
$$I_{sc} \approx \left[ I_L - I_0 \cdot \left( e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1 \right) \right]$$

**Εξίσωση 15**

$$V_{oc} \approx n \cdot V_T \cdot \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

**Εξίσωση 16**

Η γραφική παράσταση μεταξύ τάσης και ρεύματος στην έξοδο του πλαισίου καλείται χαρακτηριστική εξόδου I-V. Μια τέτοια καμπύλη για δοσμένη ένταση ακτινοβολίας και δοσμένη θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα για το πλαίσιο Renesola JC300M-24/Ab.



Σχήμα 27: Χαρακτηριστική I-V για το πλαίσιο Renesola JC300M-24/Ab.

Στην καμπύλη βλέπουμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά μεγέθη για το πλαίσιο:

- $I_{sc}$ : το ρεύμα βραχυκύκλωσης στην έξοδο του πλαισίου για τάση εξόδου  $V=0$ .
- $V_{oc}$ : την τάση ανοιχτού κυκλώματος, που είναι η τάση για ρεύμα  $I=0$ .
- $P_{max}$ : το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου που είναι το σημείο της I-V καμπύλης από όπου μπορούμε να κατασκευάσουμε το ορθογώνιο με την μέγιστη επιφάνεια μέσα στην καμπύλη I-V. Η ισχύς στο σημείο, αυτό για δοσμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει το πλαίσιο.
- $I_{MP}$ : το ρεύμα εξόδου που αντιστοιχεί στο MPP (Maximum Power Point).
- $V_{MP}$ : η τάση εξόδου που αντιστοιχεί στο MPP.

## 2.6 ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

Τα Φ/Β κύτταρα μπορούν να κατασκευαστούν με πολλούς τρόπους, αλλά και με διάφορα υλικά. Το πιο διαδεδομένο υλικό κατασκευής είναι το πυρίτιο (Silicon), κάτι λογικό, αφού η έρευνα στα ημιαγώγιμα υλικά που απαρτίζουν τα Φ/Β κύτταρα για πολλά χρόνια είχε επικεντρωθεί σε αυτό. Έτσι, κατασκευάζονται Φ/Β κύτταρα από μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, όπως και από άμορφο πυρίτιο. Φ/Β κύτταρα όμως κατασκευάζονται και από συνδυασμούς άλλων υλικών,

όπως γαλλίου-Αρσενίου (GaAs), καδμίου-τελλουρίου (CdTe) και χαλκού-ινδίου-δισεληνίου (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS). Έτσι, παρέχεται μια μεγάλη γκάμα Φ/Β που διαφέρουν τόσο σε κόστος, όσο και σε βαθμό απόδοσης. Στο παρακάτω διάγραμμα οι μέσες αποδόσεις των βασικότερων υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλιακών κυττάρων.

Υλικά	Απόδοση (%)
Άμορφο πυρίτιο	12-13
CdTe κάδμιο-τελλούριο	15-16
CuInSe <sub>2</sub> (CIS) Χαλκού-ινδίου- δισεληνίου	18-19
Si-Film	16-17

**Πίνακας 2:** Απόδοση Φ/Β λεπτής μεμβράνης (Thin Film) μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό κάτω από κανονικές συνθήκες (%)

Ανάλογα με την τεχνολογία κατασκευής τους, τα Φ/Β κύτταρα μπορούν να διακριθούν σε δύο διαφορετικές ομάδες. Η πρώτη ομάδα, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως σε οικιακές εφαρμογές, χρησιμοποιεί την τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου (Crystalline Silicon) και υλοποιεί τα Φ/Β από συνδυασμό διακριτών κυττάρων, ενώ η δεύτερη ομάδα χρησιμοποιεί την τεχνολογία των λεπτών μεμβρανών (thin film).

Η απόδοση των Φ/Β κρυσταλλικού πυριτίου μπορεί να πλησιάσει αυτές που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά κύτταρα που είναι εκατοντάδες ως πολλές εκατοντάδες μικρόμετρα σε πάχος. Αυτές οι προσεγγίσεις βασίζονται γενικά στην τεχνολογία του πυριτίου. Η απόδοση της λεπτής Φ/Β μεμβράνης συνήθως πλησιάζει αυτές που χρησιμοποιούν ενεργά ημιαγώγιμα υλικά σε πάχος περίπου 10μm ή και μικρότερα. Τα πιο κοινά υλικά για αυτά τα ηλιακά κύτταρα είναι το άμορφο πυρίτιο και τα μείγματα κάδμίου-τελλουρίου και χαλκού-ινδίου-γάλλιου-δισεληνίου. Υπάρχουν επίσης υβριδικές προσεγγίσεις όπως ο συνδυασμός κυττάρων με κρυσταλλικό και άμορφο πυρίτιο. Γίνονται επίσης προσπάθειες για την εξέλιξη των thin film ηλιακών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου. Υπό το φως αυτών των διαφορετικών Φ/Β τεχνολογιών, η διαφορά μεταξύ των δύο διαφορετικών τεχνολογιών μπορεί καμιά φορά να φαίνεται μηδαμινή. Ο πίνακας 3 παρουσιάζει μία σύγκριση μεταξύ των δύο τεχνολογιών.



<b>Κρυσταλλικού Πυριτίου</b>	<b>Λεπτής Μεμβράνης</b>
Μεγαλύτερη ισχύ ανα επιφάνεια	Μικρότερη εξάρτηση από τη θερμοκρασία
Λιγότερες βάσεις στήριξης	Λιγότερα υλικά κατά την κατασκευή
Χαμηλότερα έξοδα μεταφοράς	Χαμηλότερο κόστος ανά watt
Περισσότερες επιλογές εξοπλισμού	Καλύτερης αισθητικής, ειδικά για κτιριακές εφαρμογές
Πιο ευέλικτα σχετικά με τον αντιστροφή	Πιο ανεκτικά στη σκιά

**Πίνακας 3: Σύγκριση μεταξύ Φ/Β Κρυσταλλικού Πυριτίου και Λεπτής Μεμβράνης**

Κάθε Φ/Β γεννήτρια κρυσταλλικού πυριτίου αποτελείται συνήθως από 30 με 36 ηλιακά κύτταρα, τα οποία είναι εν σειρά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Τα ηλιακά κύτταρα εγκλείονται με θερμική διεργασία μέσα σε διαφανή ερμητικά σφραγισμένη πολυμερή μεμβράνη που στην εμπρός πλευρά προσαρμόζεται ανθεκτικό γυαλί ειδικών προδιαγραφών. Το πάχος της όλης κατασκευής μαζί με το γυαλί δεν ξεπερνά τα 5 χιλιοστά και συνήθως τοποθετείται σε πλαίσιο αλουμινίου για εύκολη τοποθέτηση και για μεγάλη μηχανική αντοχή. Η διαδικασία παραγωγής του κρυσταλλικού πυριτίου έχει πολλά και ενεργοβόρα βήματα. Η διαδικασία παραγωγής των Φ/Β γεννητριών λεπτών μεμβρανών χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη δυνατότητα αυτοματισμού της παραγωγής και οικονομίας πρώτων υλών, λόγω του μικρού πάχους των ενεργών υλικών. Ομοίως, τα ηλιακά κύτταρα λεπτών μεμβρανών εγκλείονται σε ερμητικά σφραγισμένη συσκευασία για προστασία από την υγρασία. Βασική διαφορά αποτελεί το γεγονός ότι η επίστρωση των υλικών γίνεται καταρχήν σε ολόκληρη την επιφάνεια της ηλιακής γεννήτριας (συνήθως σε κατάλληλα προετοιμασμένη γυάλινη επιφάνεια) και κατόπιν με ακτίνες λέιζερ, αφαιρούνται λεπτές λωρίδες υλικού και δημιουργούνται τα ηλιακά κύτταρα που ύστερα συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους και συνθέτουν την Φ/Β γεννήτρια.

Οι βασικότεροι τύποι ηλιακών κυττάρων, όπως αναφέραμε και παραπάνω είναι τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα πυριτίου, τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα πυριτίου (με λιγότερο καλή κρυσταλλογραφική ποιότητα και τελικώς με μικρότερη καθαρότητα από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο) και τα άμορφα ηλιακά κύτταρα πυριτίου. Τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου είναι τα παλαιότερα και τα πιο ακριβά, αλλά με την πιο αποδοτική τεχνολογία.

Τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου είναι κατασκευαστικά φτηνότερα και έχουν μικρότερη απόδοση μετατροπής σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 13-15%. Όσον αφορά την τεχνολογία του άμορφου πυριτίου έχει κερδίσει πολύ έδαφος από τα μέσα της δεκαετίας του 80. Η τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων είναι, θεωρητικά πολύ χαμηλού κόστους παραγωγής, εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού. Το λεπτό επίστρωμα σχηματίζεται πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους. Η απόδοση αυτών των ΦΒ στοιχείων είναι αρκετά μειωμένη, στα επίπεδα του 6%-8%. Σήμερα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων ΦΒ στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου

τιμήματος του ηλιακού φάσματος. Ένα παράδειγμα είναι η παρασκευή ΦΒ στοιχείων από κράμα Πυριτίου με Άνθρακα και Γερμάνιο, με σταθεροποιημένη απόδοση περίπου ίση με 13%. Το ιδιαίτερο κατασκευαστικό χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα δημιουργίας διαδοχικών ΦΒ στοιχείων σε μεγάλες επιφάνειες ΦΒ πλαισίων.

## 2.7 Θερμική εξάρτηση της απόδοσης ενεργειακής μετατροπής $n_c$ του Φ/Β πλαισίου

Η ικανότητα ενός πλαισίου να μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική διαφοροποιείται σημαντικά με τη διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Γνωρίζοντας τη μέση θερμοκρασία που επικρατεί στην περιοχή του Φ/Β σταθμού για κάθε μήνα θα είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια το ποσοστό της ενέργειας που τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Σε πρότυπες συνθήκες λειτουργίας ο βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης είναι  $n_{c,STC} = 0,1413$ . Σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές η τιμή του προσδιορίζεται από τη διαφορά  $\theta_c - \theta_{STC}$ , δηλαδή της θερμοκρασίας του πλαισίου σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς, καθώς και από την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Σε κάθε περίπτωση ο βαθμός απόδοσης θα προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$n_c = n_T \cdot n_{c,STC}$$

Εξίσωση 17

όπου  $n_T$  ονομάζεται παράγοντας θερμοκρασίας του Φ/Β στοιχείου και εκφράζει την επίδραση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας του πλαισίου σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς, στην απόδοσή του. Ο συντελεστής αυτός προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$n_T = 1 + \gamma_{Pm} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})$$

Εξίσωση 18

όπου  $\theta_c$  η θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου και  $\gamma_{Pm}$  μέγιστης ισχύος του Φ/Β στοιχείου που για το πυρίτιο είναι προσεγγιστικά ίσος με  $\gamma_{Pm} = -0,0045/^{\circ}C$ .

Θεωρώντας ότι όλα τα στοιχεία του πλαισίου βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία κατά τη λειτουργία τους, ο παράγοντας  $\theta_c$  προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\theta_c = \theta_{a,D} + 1,5 \cdot \kappa \cdot G_{t,D}$$

Εξίσωση 19

όπου  $\theta_{a,D}$  και  $G_{t,D}$  είναι οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ολικής πυκνότητας ισχύος ( $kW/m^2$ ) της ηλιακής ακτινοβολίας αντίστοιχα στο χρονικό διάστημα που αφορά στο ημερήσιο τόξο του ηλίου. Ο συντελεστής  $\kappa$  εξαρτάται από τις οριακές τιμές της θερμοκρασίας των κυψελίδων του πλαισίου σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες αέρα και έχει

τιμή  $0,025^{\circ}\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ . Η ποσότητα  $G_{t,D}$  κατά τη διάρκεια της ημέρας σχετίζεται με τη μέση πυκνότητα ισχύος μέσω της σχέσης:

$$G_{t,D} = T/t_{\text{αδ}} \cdot G_t \text{ (Watt)}$$

Εξίσωση 20

με  $T=24\text{hrs}$  και τον λόγο  $T/t_{\text{αδ}}$  να σχετίζεται με τη διάρκεια της ημέρας για κάθε μήνα του έτους και να έχει τιμές από 1,7 για το καλοκαίρι μέχρι 2,3 για τον χειμώνα. Τέλος, γνωρίζοντας την απολαβή ενέργειας για κάθε ημέρα του μήνα μπορούμε να προσδιορίσουμε την ποσότητα  $G_t$  μέσω της σχέσης:

$$G_t = 1/T \cdot \int G_T \cdot dt = H_t/T_t$$

Εξίσωση 21

## 2.8 Οπτικές απώλειες ενέργειας σε Φ/Β πλαίσια

Στην παράγραφο αυτή αναφέρονται οι οπτικοί παράγοντες που ελαττώνουν την απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου σε σχέση με τις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας. Εκτιμάται επίσης το ποσοστό της μείωσης που προκαλούν.

- **Συντελεστής απωλειών λόγω μη καθαρότητας του Φ/Β πλαίσιο ( $n_{\text{καθ}}$ ):** Στην κατηγορία αυτή υπεισέρχονται παράγοντες όπως η ελαφρά ομοιογενής επικάλυψη σκόνης, γύρης φυτών ή άλλων μικροσωματιδίων στην όψη του Φ/Β πλαισίου. Η επίδραση της επικάλυψης σκόνης σε μικρό βαθμό αυξάνει επιπλέον και το ποσοστό απωλειών λόγω ανάκλασης κατά έναν παράγοντα 1,3 έως 1,5. Σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει στην επικάλυψη χιονιού, γεγονός που είναι πολύ συχνό σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο και έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του ποσοστού απωλειών στο μισό. Γενικότερα, η μείωση αυτού του είδους των απωλειών γίνεται με προγραμματισμένο καθαρισμό των πλαισίων ή ακόμα και με το νερό της βροχής. Συνήθως γωνίες κλίσης  $12^{\circ}$  ή και περισσότερο είναι αρκετές να επιτευχθεί καθαρισμός. Οι απώλειες μη καθαρότητας ανέρχονται σε ποσοστό περίπου **2%** ετησίως ( $n_{\text{καθ}}=0,98$ ).
- **Διαφοροποίηση ανακλαστικότητας Φ/Β πλαισίου σε σχέση με αντίστοιχη σε STC ( $n_R$ ):** Σχετίζεται με την αυξημένη ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανάκλαστικό επίστρωμα και υλικό Φ/Β κυψελίδων) σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της σε πρότυπες συνθήκες, καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης, κυρίως πάνω από τις  $60^{\circ}$ . Για μικρές γωνίες πρόσπτωσης των ακτίνων οι απώλειες αυτές είναι ασήμαντες και ο συντελεστής  $n_R$  είναι ίσος με 1. Σε περιοχές με μέσα γεωγραφικά πλάτη, νότιο προσανατολισμό και κλίση πλαισίων περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος, η ετήσια τιμή των απωλειών αυτών είναι περίπου 2% ( $n_R=0,98$ ).
- **Επίδραση διαφοροποίησης φάσματος ακτινοβολίας σε σχέση με το AM1,5 ( $n_S$ ):** Σχετίζεται με την διαφοροποίηση του φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής

ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο παράγοντας αυτός έχει μεγάλη επίδραση σε Φ/Β πλαίσια στενής περιοχής φασματικής απορρόφησης όπως το a-Si και CdTe. Για το κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) οι ετήσιες απώλειες κυμαίνονται στο **1%** ( $n_s=0,99$ ).

- **Απώλειες διαφοροποίησης πόλωσης ( $n_p$ ):** Οφείλεται στη διαφοροποίηση της πόλωσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια τις ημέρας σε σχέση με την πόλωση της ακτινοβολίας σε πρότυπες συνθήκες. Η ετήσια επίδραση του παράγοντα αυτού είναι περίπου **1%** ( $n_p=0,99$ ).
- **Απώλειες χαμηλών τιμών ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας ( $n_G$ ):** Η απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου μειώνεται για χαμηλές τιμές ισχύος ανά  $m^2$ . Ένα γενικά αποδεκτό ποσοστό απωλειών κατά μέσο όρο στο έτος είναι περίπου **2%** ( $n_G=0,98$ ).

## 2.9 Παράγοντας γήρανσης του Φ/Β πλαισίου ( $n_\gamma$ )

Σχετίζεται με τη μείωση της απόδοσης του Φ/Β πλαισίου στο χρόνο ζωής του. Η αλλοίωση των Φ/Β κυψελίδων έχει άμεση συνέπεια στην ισχύ αιχμής και στην παραγωγή ενέργειας. Οφείλεται σε διάφορους παράγοντες αλλά κυρίως στο γεγονός ότι υπερθερμαίνονται εξαιτίας της σκίασής τους και κάτω από ισχυρό ηλιακό φωτισμό. Τυπική τιμή μείωσης της αποδοτικότητας είναι περίπου **1%** ανά έτος λειτουργίας. Για ενεργειακούς υπολογισμούς μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν τυπικό συντελεστή γήρανσης που λαμβάνει υπ' όψιν τη διαχρονική μείωση της αποδοτικότητας. Η τιμή του εκτιμάται στο **10%** ( $n_\gamma=0,90$ ).

## 2.10 Απώλειες λόγω ανομοιογένειας στα χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων ( $n_m$ )

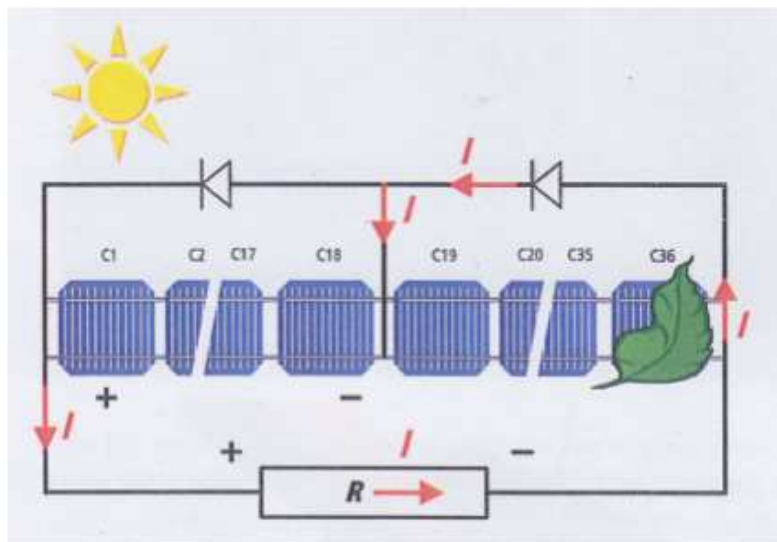
Οι απώλειες αυτές σχετίζονται με την ανομοιογένεια των I-V χαρακτηριστικών των Φ/Β πλαισίων. Οι διαφορές αυτές μπορεί να υπάρχουν εκ κατασκευής ή να προκύπτουν εξαιτίας διαφορετικών συνθηκών στις θέσεις που αυτά έχουν τοποθετηθεί. Σημαντικό παράγοντα παίζει η ανομοιογένεια λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας, κυρίως σε εγκαταστάσεις κτιρίων, όπου η ψύξη δεν είναι ομοιόμορφη και η πυκνότητα ακτινοβολίας δεν είναι η ίδια για όλα τα πλαίσια. Επιπλέον, διαφοροποιήσεις στην ανοχή τους σχετίζονται άμεσα με τις απώλειες ανομοιογένειας καθώς τα πλαίσια συνδέονται για να σχηματίσουν στοιχειοσειρές. Με μετρήσεις που έγιναν στο TÜV Rheinland PV Certification Laboratory της Γερμανίας εκτιμήθηκε η επίδραση της ανοχής τους στο συντελεστή  $n_m$ . Συνήθως η διαφοροποίηση κατά  $\pm 5\%$  στην παραγωγή, πλαισίων που έχουν συνδεθεί σε σειρά, έχει σαν συνέπεια απώλειες μικρότερες του 1%. Αν επιπρόσθετα αυτά έχουν ομαδοποιηθεί με βάση το ρεύμα  $I_{MPP}$  ή  $I_{SC}$  οι απώλειες βρίσκονται στην περιοχή του 0,2%. Για διαφοροποίηση στην παραγωγή μεγαλύτερη του 8% συνίσταται η ομαδοποίηση με βάση το ρεύμα. Τυπική τιμή του συντελεστή ανομοιογένειας για μια συστοιχία είναι 2% ( $n_m=0,98$ ).

## 2.11 Επίδραση της σκίασης στη λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας, απώλειες και καθορισμός της οριζόντιας απόστασης μεταξύ συστοιχιών.

Τόσο σε επίπεδο Φ/Β πλαισίου όσο και σε επίπεδο ολόκληρου του σταθμού, ο παράγοντας της σκίασης είναι σημαντικός και συνήθως αναπόφευκτος. Τα θερμικά φαινόμενα που δημιουργούνται είναι ικανά να προκαλέσουν μόνιμες βλάβες στους ημιαγωγούς και να αυξήσουν σημαντικά τις απώλειες σε ολόκληρη τη διάταξη. Επιπλέον, η σκίαση μιας συστοιχίας από την αμέσως νοτιότερή της είναι είναι βασικό κριτήριο καθορισμού της μεταξύ τους απόστασης.

## 2.12 Επίδραση της σκίασης σε Φ/Β στοιχείο

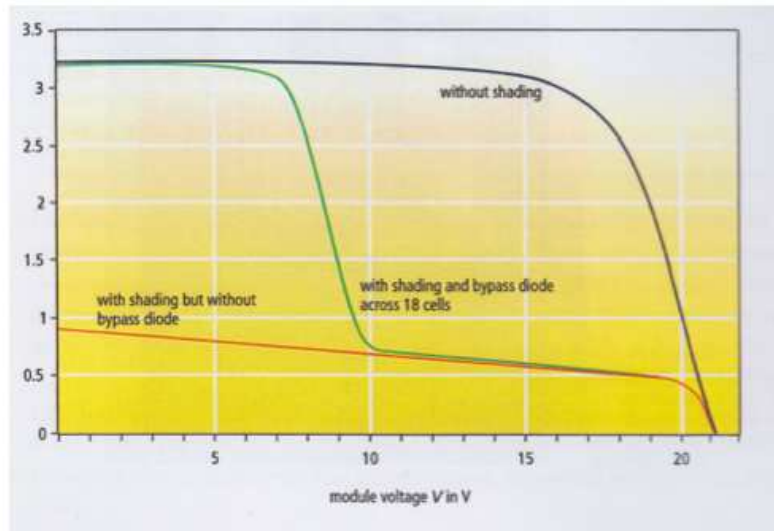
Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η σκίαση ενός Φ/Β στοιχείου είναι ικανή να προκαλέσει αύξηση της θερμότητας του σε τέτοιο βαθμό έτσι ώστε να προκληθούν μόνιμες βλάβες στον ίδιο τον ημιαγωγό. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως θερμή κηλίδα (**hot spot**). Η δημιουργία μιας θερμής κηλίδας μειώνει ελάχιστα την ισχύ αιχμής του Φ/Β στοιχείου, αυξάνει όμως την πιθανότητα καταστροφής του κάθε φορά που το στοιχείο σκιάζεται. Αν για κάποιο λόγο σκιαστεί ένα στοιχείο, αυτόματα αυτό συμπεριφέρεται σαν ηλεκτρικό φορτίο πολύ μεγάλης αντίστασης και σταματά να παράγει ενέργεια. Το ρεύμα που ρέει μέσα από αυτό έχει ως συνέπεια την αντιστροφή της πολικότητάς της τάσης στα άκρα του. Η ροή αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα και αν η ένταση του ρεύματος είναι αρκετά μεγάλη έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμής κηλίδας. Η παρεμπόδιση του φαινομένου αυτού γίνεται με τη χρήση διόδου παράκαμψης.



Σχήμα 28: Χρήση διόδου παράκαμψης για αποφυγή δημιουργίας θερμής κηλίδας

Το σκιασμένο στοιχείο παρακάμπτεται και το ρεύμα ρέει μέσω της διόδου όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Βλέπουμε ότι η διάδος αυτή συνδέεται παράλληλα με τα στοιχεία C19 έως C36, επομένως, αν για κάποιο λόγο υπάρξει σκίαση, για παράδειγμα στο C36, παράκαμψη όλων

αυτών των στοιχείων συνεπάγεται αυτόματα ότι η παραγωγή του πλαισίου θα μειωθεί στο μισό. Πιο κατανοητό γίνεται το φαινόμενο μέσω της μεταβολής της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V.



Σχήμα 29: Μεταβολή της καμπύλης I-V του πλαισίου σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι κατά τη διάρκεια της σκίασης και με τη χρήση διόδου, αλλάζει το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος του πλαισίου. Η  $V_{mpp}$  γίνεται σχεδόν μισή κάτι που μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στο σύστημα ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος του αντιστροφέα.

### 2.13 Επίδραση της σκίασης σε σχέση με τη συνδεσμολογία των Φ/B πλαισίων και το σύστημα ανίχνευσης μέγιστης ισχύος του αντιστροφέα

Όπως αναφέρθηκε πιο πριν, σκίαση ενός τμήματος του Φ/B πλαισίου έχει ως συνέπεια τη μεταβολή της καμπύλης I-V. Παρόμοιο φαινόμενο συμβαίνει όταν τα πλαίσια είναι συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα. Μεταβολή στην καμπύλη συνεπάγεται και μετατόπιση του σημείου μέγιστης λειτουργίας της συστοιχίας. Έτσι, το σημείο λειτουργίας του αντιστροφέα μετατοπίζεται συνεχώς ώστε να ανιχνευτεί το νέο σημείο μέγιστης ισχύος (της σκιασμένης συστοιχίας). Η διαδικασία αυτή σχετίζεται άμεσα με τις απώλειες ισχύος και ενέργειας μιας σκιασμένης συστοιχίας σε σχέση με μια ασκίαστη.

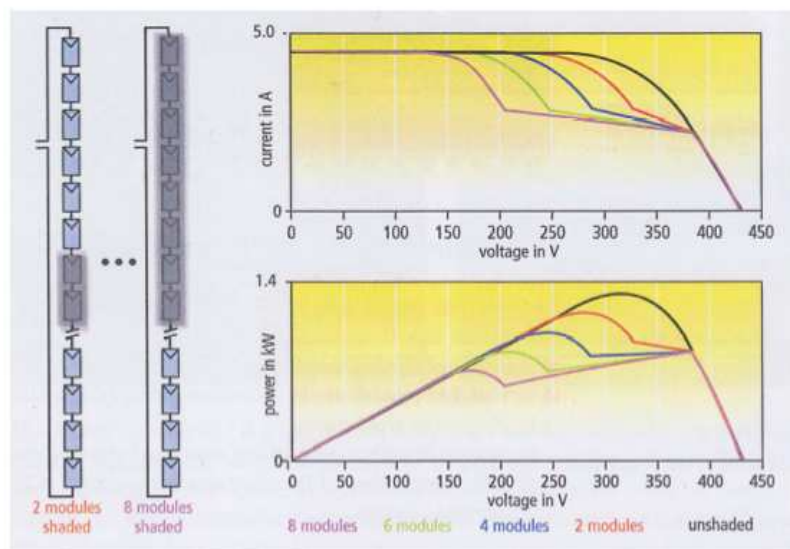
Μια επιστημονική προσέγγιση του προβλήματος της σκίασης έχει διεξαχθεί στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Βερολίνου για διάφορες τοπολογίες συστημάτων. Με προσομοίωση στο πρόγραμμα PSpice προσδιορίστηκαν οι καμπύλες I-V καθώς και οι απώλειες ενέργειας σε διαφορετικές περιπτώσεις σκίασης. Μια Φ/B συστοιχία 20 πλαισίων συνδεδεμένα σε σειρά συγκρίνεται με μια άλλη που αποτελείται από 4 στοιχειοσειρές των 5 πλαισίων. Με πυκνότητα ακτινοβολίας  $1000\text{W/m}^2$ , δύο, τέσσερα, έξι και οκτώ πλαίσια σκιάζονται μειώνοντας την

πυκνότητα ακτινοβολίας στα  $500 \text{ W/m}^2$ . Αν η συνδεσμολογία είναι σε σειρά, η μεταβολή της καμπύλης I-V δεν εξαρτάται από το ποιο πλαίσιο σκιάζεται σε αντίθεση με την παράλληλη συνδεσμολογία όπου διαφορετικές περιπτώσεις σκίασης επιδρούν και διαφορετικά στη μεταβολή της καμπύλης.

Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύονται με λεπτομέρεια οι δύο περιπτώσεις που περιγράψαμε. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε καμπύλες I-V με σκίαση εμφανίζονται δύο διαφορετικά μέγιστα. Ένα για μικρές και ένα για μεγάλες τάσεις. Το βασικό θέμα είναι κατά πόσο τα μέγιστα αυτά εμφανίζονται έντονα στις καμπύλες ή όχι αλλά και σε ποιο από τα δύο μέγιστα μετατοπίζεται το σημείο λειτουργίας του αντιστροφέα.

## 2.14 Σύνδεση πλαισίων εν σειρά

Η σκίαση και τα αποτελέσματά της στην καμπύλη I-V φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Στη συγκεκριμένη τοπολογία εμφανίζονται δύο μέγιστα τα οποία είναι πιθανά σημεία λειτουργίας του αντιστροφέα αν βρίσκονται μέσα στο παράθυρο ανίχνευσης MPP. Το ποιο από τα δύο τελικά θα επιλεγεί εξαρτάται από τη μεταβολή της σκιάς σε σχέση με τον χρόνο και από το ηλεκτρονικό σύστημα ανίχνευσης. Στην αρχή τα πλαίσια είναι ασκίαστα και ο αντιστροφέας λειτουργεί στο μοναδικό μέγιστο που παρουσιάζει η καμπύλη. Καθώς η σκιά εμφανίζεται και σταδιακά αυξάνει, το αριστερό μέγιστο, το οποίο αρχικά ήταν το σημείο λειτουργίας, ολισθαίνει προς χαμηλότερες τάσεις. Η λειτουργία του αντιστροφέα παραμένει στο αριστερό μέγιστο ακόμα και αν το σημείο μέγιστης ισχύος βρίσκεται στο δεξί.



Σχήμα 30: Σύνδεση πλαισίων εν σειρά και επίδραση της σκίασης στην καμπύλη I-V

Κατά τη διάρκεια των πρωινών ωρών υπάρχει ήδη σκίαση στα πλαίσια. Καθώς ενεργοποιείται ο αντιστροφέας, το σύστημα MPPT αρχίζει την ανίχνευση από την τάση ανοιχτού κυκλώματος προς το δεξί μέγιστο της καμπύλης. Το σημείο λειτουργίας του θα παραμείνει σε αυτό το μέγιστο

ανεξάρτητα αν αυτό είναι το σημείο MPP. Η τάση στο δεξί μέγιστο είναι ελαφρώς μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή σε ασκίαστα πλαίσια.

## 2.15 Παράλληλη σύνδεση πλαισίων

Για παράλληλη συνδεσμολογία, διαφορετικός τρόπος σκίασης προκαλεί τελείως διαφορετικά αποτελέσματα στις καμπύλες. Τα πιο ευνοϊκά αποτελέσματα επιτυγχάνονται όταν τα σκιασμένα πλαίσια βρίσκονται στην ίδια στοιχειοσειρά. Η τάση στην οποία βρίσκεται το αριστερό μέγιστο είναι συνήθως η μισή, ή και μικρότερη, της τάσης  $V_{OC}$  με αποτέλεσμα να βρίσκεται έξω από την περιοχή ανίχνευσης του αντιστροφέα. Επιπλέον είναι ελάχιστα διακριτό με αποτέλεσμα ο αντιστροφέας να λειτουργεί κατά κανόνα στο δεξί μέγιστο που συνήθως είναι και το MPP.

## 2.16 Σύγκριση των παραπάνω τοπολογιών

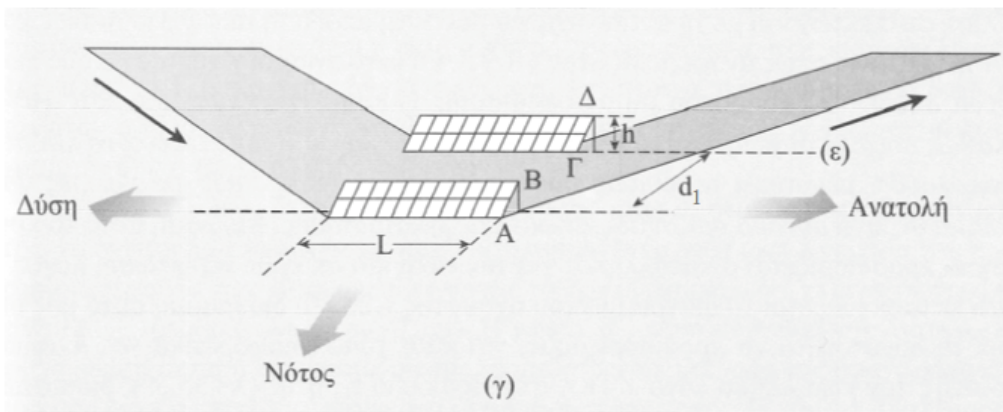
Με σύνδεση εν σειρά, και τα δύο μέγιστα εμφανίζονται έντονα στην καμπύλη I-V. Όσο πιο λίγα πλαίσια είναι σκιασμένα, τόσο οι τάσεις των δύο μεγίστων βρίσκονται στην περιοχή ανίχνευσης του αντιστροφέα. Έτσι, και τα δύο σημεία λειτουργίας πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν. Στην παράλληλη σύνδεση, ο αντιστροφέας μπορεί να ανιχνεύσει αποτελεσματικά μόνο το δεξί μέγιστο διότι το αριστερό εμφανίζεται αμυδρά και σε περιοχή χαμηλής τάσης. Για σκίαση δύο στοιχειοσειρών, ανεξάρτητα εάν έχουν σκιαστεί δύο, τέσσερα, έξι ή οκτώ πλαίσια, οι απώλειες ισχύος παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες και σε χαμηλότερα επίπεδα από τις εν σειρά απώλειες. Τέλος, αν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται στο αριστερό μέγιστο, οι απώλειες αυξάνουν έντονα με κάθε επιπλέον σκιασμένο πλαίσιο σε αντίθεση με το δεξί μέγιστο όπου οι απώλειες είναι σχεδόν σταθερές.

Με ελάχιστη ή και καθόλου σκίαση, η απολαβή είναι ανεξάρτητη από τη συνδεσμολογία των πλαισίων. Έτσι, πιο εύκολη και αποδοτική οικονομικά λύση αποτελούν οι αντιστροφείς τύπου string. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σχεδόν αδύνατον να μην υπάρχει σκίαση. Εκεί, η παράλληλη συνδεσμολογία είναι επιτακτική σε συνδυασμό με την προσεκτική σχεδίαση του Φ/B σταθμού ώστε να έχουμε σκίαση μόνο σε λίγες στοιχειοσειρές.

## 2.17 Οριζόντια απόσταση μεταξύ συστοιχιών σε Φ/B σταθμό

Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των συστοιχιών γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν, κατά κύριο λόγο, τη σκίαση που προκαλείται από τις αμέσως νοτιότερες συστοιχίες αλλά και λειτουργικούς παράγοντες όπως η διακίνηση οχημάτων για τη συντήρηση του σταθμού. Σε ό,τι αφορά στο θέμα της σκίασης, στην παράγραφο αυτή μελετάται η απόσταση που πρέπει να υπάρχει μεταξύ των συστοιχιών ώστε το ποσοστό μείωσης να μην ξεπερνά κάποια προκαθορισμένα αποδεκτά όρια.





Σχήμα 31: Κίνηση της σκιάς και σκιαζόμενα σημεία του εδάφους από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου

Στην παρούσα εργασία οι συστοιχίες τοποθετούνται σε οριζόντια επιφάνεια. Η αρχική σκέψη ώστε η απόσταση  $d_1$  μεταξύ των συστοιχιών να ισούται όσο και το μήκος της μακρύτερης μεσημεριανής σκιάς μέσα στο έτος (21 Δεκεμβρίου) δεν είναι η ενδεδειγμένη. Η εκμεταλλεύσιμη ενέργεια τη μέρα αυτή παίρνει την ελάχιστη τιμή της και σταδιακά αυξάνει. Η λύση αυτή είναι ενεργειακά ασύμφορη αφού για πολλές ημέρες πριν και μετά τις 21 Δεκεμβρίου η σκιά καλύπτει μέρος της επόμενης συστοιχίας μειώνοντας σημαντικά την απόδοσή της.

Για τον καθορισμό της απόστασης μεταξύ των συστοιχιών ορίζεται αρχικά ο συντελεστής χρησιμοποίησης επιφάνειας ( $f$ ) που περιγράφεται από τον λόγο του πλάτους της συστοιχίας  $b$  προς την απόσταση  $d$ .

$$f = b / d$$

Εξίσωση 22

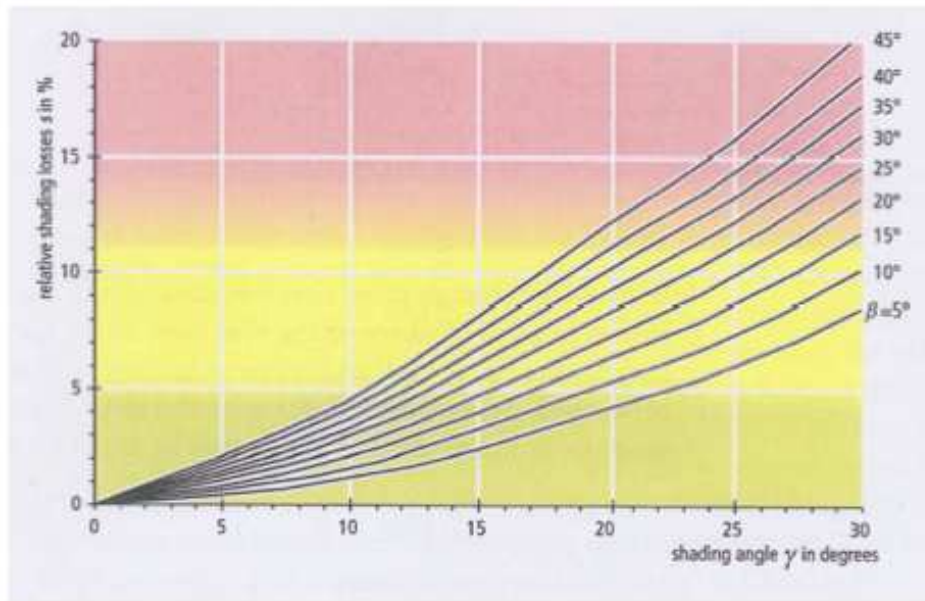
Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές από 0 έως 1. Για  $f=1$  (100%) η απόσταση μεταξύ των συστοιχιών γίνεται η ελάχιστη όμως η έντονη αμοιβαία σκίαση μειώνει δραστικά την παραγωγή. Τυπικές τιμές του  $f$  είναι από 0,3 έως 0,4. Η εκτίμηση του ποσοστού των απωλειών γίνεται με τη χρήση των διαγραμμάτων που ακολουθούν γνωρίζοντας τη γωνία κλίσης των πλαισίων  $\beta$ .

Αρχικά προσδιορίζουμε το ποσοστό των επιθυμητών απωλειών και στη συνέχεια από το σχήμα 32 βρίσκουμε τη γωνία σκίασης  $\gamma$ . Στη συνέχεια, από το σχήμα 33 προσδιορίζεται ο λόγος  $f$  και κατά συνέπεια η απόσταση  $d$ . Η απόσταση  $d_1$  μεταξύ των συστοιχιών δίνεται από τη σχέση:

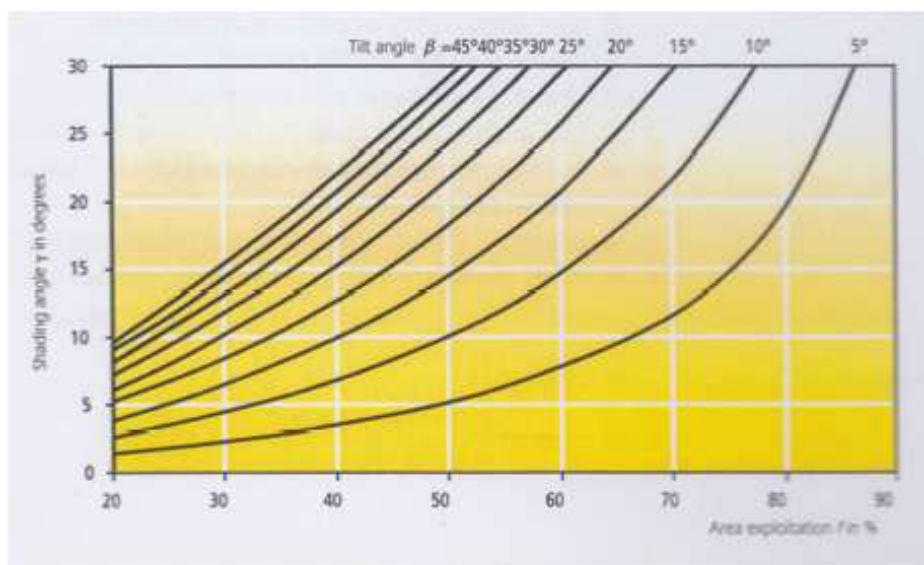
$$d_1 = d - b \cos(\beta)$$

Εξίσωση 23

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 45 (Γενική χωρεθότητα σταθμού) η μέση απόσταση των συστοιχειών με στην διεύθυνση Νότου-Βορρά, ΝΔ-ΒΑ και ΝΑ-ΒΔ είναι 14.9 m με τη μεγαλύτερη απόσταση να είναι 20m και τη μικρότερη 13m.



Σχήμα 32: Προσδιορισμός των απωλειών σαν συνάρτηση της γωνίας σκίασης  $\gamma$  και της γωνίας κλίσης  $\beta$



Σχήμα 33: Γωνία σκίασης σε συνάρτηση με τον συντελεστή  $f$  και τη γωνία κλίσης  $\beta$

## 2.18 INVERTERS

Ο αντιστροφέας (inverter) είναι μία ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγουν τα Φ/Β σε εναλλασσόμενο αντίστοιχο με αυτό του δικτύου. Οι αντιστροφείς μπορεί να είναι μικροί (string inverters) ή κεντρικοί, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Στην τεχνολογία στοιχειοσειρών (string), η Φ/Β γεννήτρια χωρίζεται σε επιμέρους επιφάνειες μονάδας και σε κάθε μία από τις επιμέρους "στοιχειοσειρές" αντιστοιχίζεται ένας ξεχωριστός μετατροπέας. Χάρη σε αυτή την τεχνολογία μειώνονται τα έξοδα του συστήματος, η εγκατάσταση απλοποιείται σημαντικά και αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση καθώς και η διαθεσιμότητα της εγκατάστασης. Οι κεντρικοί μετατροπέες ενδείκνυνται ιδιαίτερα για τη δημιουργία Φ/Β εγκαταστάσεων με ομοιογενή δομή (πλαίσια του ίδιου τύπου με ταυτόσημο προσανατολισμό και κλίση). Χρησιμοποιούνται για εγκαταστάσεις άνω των 100 kWp και έχουν σχεδιαστεί για εξωτερική χρήση.

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

- ΦΒ συστήματα
- Κυψέλες Καυσίμου

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

Βασικά χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή τους απόδοση (ακόμα και σε χαμηλή ισχύ εισόδου), το μεγάλο εύρος θερμοκρασιακής λειτουργίας ( $-25^{\circ}\text{C}$  έως  $+60^{\circ}\text{C}$ ), και ο υψηλός βαθμός προστασίας τους από σκόνη και υγρασία (τυπική τιμή: IP65). Κατά την τοποθέτηση των αντιστροφών είναι σημαντικό να εξασφαλίζεται ο επαρκής αερισμός τους. Συγκεκριμένα, γύρω από τη συσκευή πρέπει να υπάρχουν αποστάσεις 300mm – 500mm και, αν απαιτείται, χρήση τεχνητού εξαερισμού.

Οι αντιστροφείς χωρίζονται ανάλογα με τον αριθμό φάσεων που εμπλέκουν αλλά και τον τύπο διαμόρφωσης της συνεχούς τάσης προς εναλλασσόμενη που δέχονται. Οι τετραγωνικού παλμού είναι οι πιο απλοί αλλά η έξοδός τους έχει πολλές αρμονικές επιβλαβείς για τις συσκευές μας. Έτσι χρησιμοποιούνται σε πολύ απλές κατασκευές για μικρή ισχύ και για «αναίσητα» φορτία όπως οι λαμπτήρες πυράκτωσης κάποιο μικρό θερμικό φορτίο κλπ. Οι αντιστροφείς διακρίνονται σε μονοφασικούς ή τριφασικούς, ανάλογα με τον αριθμό φάσεων. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τους αντιστροφείς που χρησιμοποιούν την SPWM τεχνική διαμόρφωσης παλμών (τετραγωνικού παλμού με ημιτονοειδή έξοδο).

Κατά τη σύνδεση των αντιστροφών στην πλευρά του συνεχούς ρεύματος, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα ακόλουθα σημεία:

- Έλεγχος της τάσης (μικρότερη από τη μέγιστη τάση εισόδου) και της πολικότητας.
- Έλεγχος της τάσης μεταξύ της ΦΒ γεννήτριας και της γης.
- Γείωση της ΦΒ γεννήτριας και των βάσεων στήριξης.

Κατά την αποσύνδεση του μετατροπέα από τη ΦΒ γεννήτρια χρειάζεται να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς υπάρχει ο κίνδυνος δημιουργίας τόξου. Για την προστασία από αυτό το φαινόμενο, οι αντιστροφείς διαθέτουν έναν ηλεκτρονικό αποζεύκτη (electronic solar switch – ESS). Για την ασφαλή αποσύνδεση ενός αντιστροφέα, πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

- Αποσύνδεση δικτύου AC
- Αποσύνδεση ESS και διακοπή λειτουργίας αντιστροφέα
- Αποσύνδεση στοιχειοσειρών ΦΒ.

Με αυτό τον τρόπο δεν δημιουργείται τόξο κατά τη διαδικασία της αποσύνδεσης του αντιστροφέα.

Το εύρος λειτουργίας της ΦΒ γεννήτριας και του αντιστροφέα δεν είναι εναρμονισμένα. Για να εξασφαλιστεί η σωστή συνεργασία τους χρειάζεται να υπολογιστούν με σωστό τρόπο τα παρακάτω:

- Η τάση MPP των ΦΒ στις υψηλές θερμοκρασίες.
- Η τάση ανοιχτού κυκλώματος των ΦΒ στις χαμηλές θερμοκρασίες
- Η μέγιστη ισχύς του ΦΒ

Στη συνέχεια θα εξεταστούν τρία προβλήματα που μπορούν να προκύψουν κατά τη συνεργασία ΦΒ και αντιστροφέα.

- **Χαμηλή MPP τάση**

Στην περίπτωση αυτή, η τάση MPP του ΦΒ είναι μικρότερη από την ελάχιστη τάση εισόδου του Αντιστροφέα. Το αποτέλεσμα είναι μη κρίσιμο για τη λειτουργία του αντιστροφέα. Συγκεκριμένα, ο αντιστροφέας λειτουργεί παράγοντας και τροφοδοτώντας το δίκτυο με ενέργεια που παράγεται από το MPP του ΦΒ.

- **Υψηλότερη τάση ανοιχτοκύκλωσης**

Στην περίπτωση αυτή, η τάση ανοιχτοκύκλωσης του ΦΒ είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη επιτρεπτή τάση εισόδου του αντιστροφέα. Το αποτέλεσμα είναι κρίσιμο για τη λειτουργία του αντιστροφέα. Συγκεκριμένα, ο αντιστροφέας δεν λειτουργεί, ενώ ανάλογα με την τάση και τη θερμοκρασία μπορεί να οδηγηθούμε σε καταστροφή του αντιστροφέα.

- **Υψηλότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης**

Στην περίπτωση αυτή, τα ΦΒ μπορούν να παράγουν περισσότερη ισχύ και να δώσουν περισσότερο ρεύμα από τον αντιστροφέα. Το αποτέλεσμα είναι μη κρίσιμο για τη λειτουργία του αντιστροφέα. Συγκεκριμένα, ο αντιστροφέας θα συνεχίσει να τροφοδοτεί το δίκτυο με τη μέγιστη ισχύ του.

### **2.18.1 Λόγος ισχύος αντιστροφέα – ΦΒ πάρκου (ΛΙ)**

Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εισόδου του αντιστροφέα προς την ονομαστική ισχύ του ΦΒ. Για εγκαταστάσεις με βέλτιστη κλίση Φ/Β, το εύρος του ΛΙ είναι συνήθως 95%-115% (οι υψηλότερες τιμές αντιστοιχούν σε Φ/Β συστήματα με trackers). Χρειάζεται να τονιστεί ότι ο ΛΙ δεν αρκεί για τον χαρακτηρισμό μιας οποιασδήποτε Φ/Β εγκατάστασης. Για παράδειγμα, για Φ/Β πλαίσια που είναι τοποθετημένα σε κατακόρυφους τοίχους (μακριά δηλαδή από τη βέλτιστη κλίση), ο ΛΙ μπορεί να παίρνει χαμηλότερες τιμές, ακόμα και μικρότερες από 80%.

## 2.18.2 Βαθμός απόδοσης αντιστροφέα

Ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου (AC) προς την ισχύ εισόδου (DC) του αντιστροφέα. Εξαρτάται από την ισχύ και την τάση λειτουργίας του αντιστροφέα. Εκτός από το μέγιστο βαθμό απόδοσης, σε έναν αντιστροφέα ορίζεται και ο Ευρωπαϊκός διαβαθμισμένος βαθμός απόδοσης, που αξιολογεί τη συμπεριφορά ενός αντιστροφέα σε διάφορα συγκεκριμένα σημεία της καμπύλης απόδοσής του

$$\eta_{\text{euro}} = 0.03 \times n_{5\%P_n} + 0.06 \times n_{10\%P_n} + 0.13 \times n_{20\%P_n} + 0.10 \times n_{30\%P_n} + 0.48 \times n_{50\%P_n} + 0.20 \times n_{100\%P_n}$$

Εξίσωση 24

όπου οι συντελεστές  $n_i$  σχετίζονται με την απόδοση του αντιστροφέα όταν λειτουργεί σε ποσοστό  $i$  της ονομαστικής ισχύος του ενώ τα υπόλοιπα βάρη ( $t_i$ ) σχετίζονται με το ποσοστό του χρόνου λειτουργίας του αντιστροφέα μέσα σε ένα έτος στο οποίο αυτός λειτούργησε σε ποσοστό  $i$  της ονομαστικής του ισχύος.

Η τιμή του συντελεστή αυτού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση δύο αντιστροφέων. Οι συνηθισμένες τιμές πλέον υπερβαίνουν το 90% και σε κάποιες περιπτώσεις μεγαλύτερων μετατροπέων αγγίζουν το 97%-98%. Γενικά συνίσταται το μέγεθος του αντιστροφέα να είναι στο 95-110% της ονομαστικής ισχύος του ΦΒ. Η υπόλειτουργία του θα οδηγεί σε χαμηλό βαθμό απόδοσης ενώ η πολύ χαμηλή ισχύς σε σχέση με την εγκαταστημένη ισχύ του ΦΒ θα οδηγεί σε μη εκμετάλλευση της παραγωγής του ΦΒ.

Η σύνδεση πάντα πρέπει να γίνεται σύμφωνα με την πολικότητα του ΦΒ η οποία πρέπει να ελέγχεται διαρκώς. Ποτέ δεν γίνεται συνδεσμολογία φορτίου ανάμεσα στο μετατροπέα και την ασφάλειά του. Η διατομή του καλωδίου που χρησιμοποιούμε εξαρτάται από την ισχύ του μετατροπέα (κατ' επέκταση από το ρεύμα του) και την απόσταση μέχρι τον πίνακα. Υπάρχουν σχετικά βοηθητικά λογισμικά στο διαδίκτυο καθώς και πίνακες που μιλούν για τα όρια μεταφερόμενου ρεύματος από κάθε καλώδιο.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ**

### **3.1 ΚΥΡΙΑ ΜΕΡΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ**

Οι βασικές συσκευές από τις οποίες αποτελείται μια Φ/Β γεννήτρια είναι:

- Τα Φ/Β πλαίσια.
- Η συσκευή παραλληλισμού των στοιχειοσειρών.
- Ο αντιστροφέας.
- Η βάση στήριξης της συστοιχίας.

#### **3.1.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια**

Τα Φ/Β πλαίσια είναι τα δομικά στοιχεία που συλλέγουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και τη μετασχηματίζουν σε συνεχές ρεύμα. Σαν βασικό κατασκευαστικό τους στοιχείο έχουν το πυρίτιο και διακρίνονται σε πλαίσια μονοκρυσταλλικού, πολυκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου. Για έναν Φ/Β σταθμό των 100kW τα πλαίσια άμορφου πυριτίου δεν ενδείκνυνται διότι λόγω της χαμηλής τους απόδοσης απαιτείται μεγαλύτερος χώρος και άρα μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης. Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει αρκετά καλύτερη απόδοση (15% με 18%) όμως το κόστος του είναι υψηλό και απαγορευτικό για μεγάλου μεγέθους Φ/Β συστήματα. Η πιο συνηθισμένη επιλογή είναι πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Η απόδοσή τους είναι της τάξης του 13% με 15%. Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται σύγκριση του εμβαδού που απαιτείται για διάφορα πλαίσια κρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου:



Άμορφο πυρίτιο				Κρυσταλλικό πυρίτιο			
Ισχύς	Επιφάνεια (τ.μ.)	Επιφάνεια 1 kW (τ.μ.)	Απόδοση (%)	Ισχύς (Wp)	Επιφάνεια (τ.μ.)	Επιφάνεια 1 kW (τ.μ.)	Απόδοση (%)
<b>40</b>	0,42	10,6	9,4	<b>85</b>	0,66	7,7	12,9
<b>60</b>	0,95	15,8	6,3	<b>130</b>	0,97	7,5	13,3
<b>64</b>	1,01	15,8	6,3	<b>150</b>	1,17	7,8	12,8
<b>68</b>	0,72	10,7	9,4	<b>165</b>	1,23	7,4	13,5
<b>80</b>	0,86	10,8	9,3	<b>170</b>	1,23	7,2	13,9
<b>100</b>	1,57	15,7	6,4	<b>175</b>	1,28	7,3	13,7
<b>140</b>	1,95	13,9	7,2	<b>180</b>	1,32	7,3	13,7
-	-	-	-	<b>180</b>	1,15	6,4	15,6
-	-	-	-	<b>200</b>	1,25	6,3	16,0

Πίνακας 4: Σύγκριση διαφόρων πλαισίων άμορφου και κρυσταλλικού πυριτίου ως προς την επιφάνεια που απαιτούν.

Το εμβαδόν των πλαισίων και κατά συνέπεια η μέγιστη ισχύς τους παίζει αρκετά μεγάλο ρόλο στην κατασκευή ενός Φ/Β σταθμού. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζονται στην επιλογή μεγάλων πλαισίων έχουν να κάνουν με:

- Ευκολία εγκατάστασης λόγω του μικρότερου αριθμού πλαισίων.
- Ευκολία ανίχνευσης σφαλμάτων και αντικατάστασης ελαττωματικών πλαισίων.
- Ελάττωση του συνολικού μήκους καλωδίωσης των συστοιχιών με άμεση συνέπεια τη μείωση των απωλειών ενέργειας και της πτώσης τάσης.

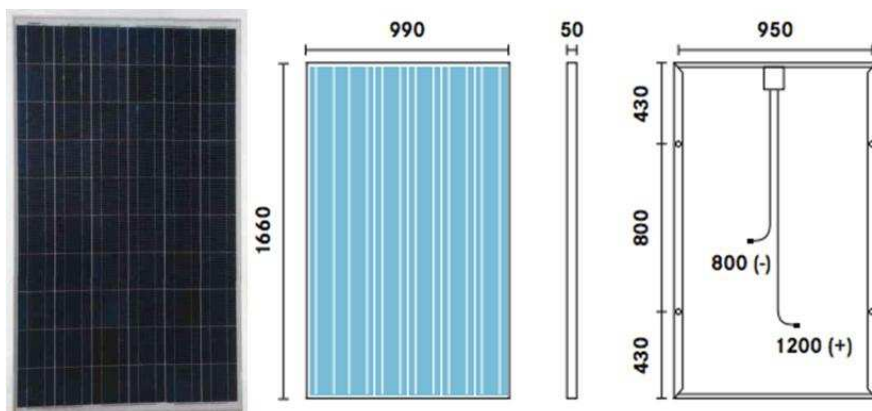


Figure 34: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο 235 Wp

Το Φ/Β πλαίσιο που θα χρησιμοποιηθεί αποτελείται από 60 κυψέλες πολυκρυσταλλικού Si (πυρίτιο), μεγέθους  $156 \times 156 \text{ mm}^2$ . Το μπροστινό γυαλί είναι ηλιακό (TSG) και το πίσω κάλυμμα είναι από πολυμερή μεμβράνη. Το υλικό του πλαισίου είναι κράμα αλουμινίου και το συνολικό του βάρος είναι 21 kg.

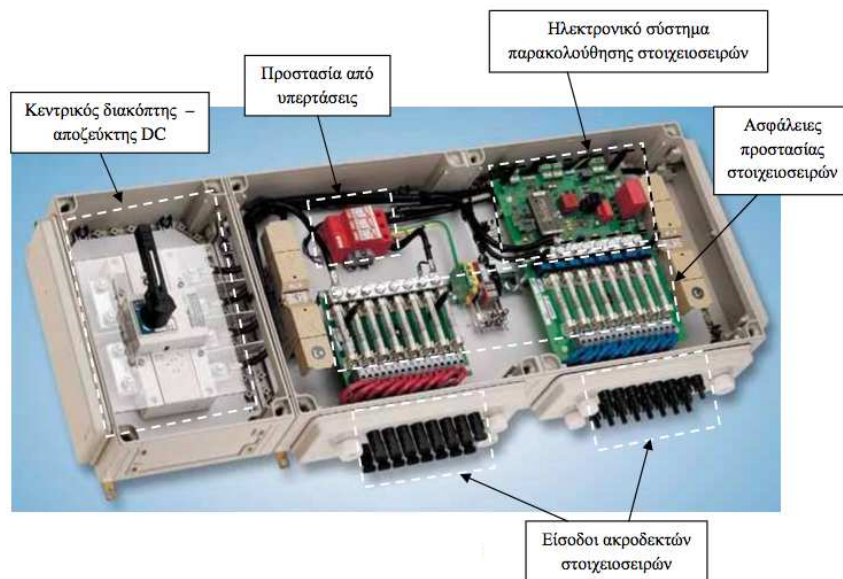
Στον παρακάτω πίνακα ακολουθούν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του παραπάνω πλαισίου σε κανονικές συνθήκες. Κανονικές Συνθήκες ή Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμών (STC) είναι οι εργαστηριακές συνθήκες κάτω από τις οποίες μετρήθηκαν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πλαισίου και είναι: Πυκνότητα ακτινοβολίας  $1000 \text{ W/m}^2$ , μάζα αέρα 1,5 AM και θερμοκρασία κυττάρου  $25^\circ\text{C}$ .

Απόδοση πλαισίου	14,3 %
Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος $V_{MPP}$	29,3 V
Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος $I_{MPP}$	8,01 A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος $V_{OC}$	36,8 V
Ρεύμα βραχυκυκλώσεως $I_{SC}$	8,54 A
Θερμοκρ. συντελεστής σημείου μέγιστης ισχύος	-0,46 %/ $^\circ\text{C}$
Θερμοκρ. συντελεστής τάσης ανοιχτού κυκλώματος	-0,125 V/ $^\circ\text{C}$
Θερμοκρ. συντελεστής τάσης ανοιχτού κυκλώματος	-0,34 %/ $^\circ\text{C}$
Θερμοκρ. συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης	3,4 mA/ $^\circ\text{C}$
Θερμοκρ. συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης	0,04 %/ $^\circ\text{C}$
Μέγιστη τάση συστήματος	1000 V

Πίνακας 5: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πλαισίου

### 3.1.2 Συσκευή παραλληλισμού στοιχειοσειρών (combiner box)

Οι στοιχειοσειρές μιας συστοιχίας είναι απαραίτητο να παραλληλιστούν πριν οδηγηθούν στην είσοδο του αντιστροφέα. Η συσκευή παραλληλισμού είναι στην ουσία ένας πίνακας DC ο οποίος φέρει όλες τις απαραίτητες διατάξεις προστασίας και παρακολούθησης των ηλεκτρικών παραμέτρων τους. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσής της σε τοπικό δίκτυο για παρακολούθηση των στοιχειοσειρών μέσω internet. Σε κάθε αντιστροφέα αντιστοιχούν 3 παράλληλες στοιχειοσειρές όπου οι οι δύο καταλήγουν στην είσοδο A και η μία στην είσοδο B.



Σχήμα 35: Συσκευή παραλληλισμού στοιχειοσειρών

### 3.1.3 Αντιστροφέας (inverter)

Η Φ/Β γεννήτρια παράγει συνεχές ρεύμα και τάση. Απαιτείται επομένως ένα ενδιάμεσο στάδιο μετατροπής της τάσης και του ρεύματος σε εναλλασσόμενα μεγέθη προκειμένου η ενέργεια που παράγεται να διοχετευτεί στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτρισμού. Η συσκευή που αναλαμβάνει τη μετατροπή αυτή ονομάζεται αντιστροφέας. Είναι μια διάταξη που αποτελείται από ημιαγωγούς ισχύος (IGBTs, MOSFETs) καθώς και ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου. Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε έναν τριφασικό αντιστροφέα των 15 kW.



**Σχήμα 36: Αντιστροφέας SMA STP 15000TL ισχύος 15 kW**

Στην παρούσα εργασία θα αναπτυχθούν τοπολογίες ΦΒ σταθμών με χρήση 6 τριφασικών αντιστροφέων SMA Sunny Tripower 15000TL ισχύος 15 kW κι ενός τριφασικού SMA Sunny Tripower 10000TL ισχύος 10kW (ονομαστική ισχύς εξόδου). Κάθε inverter θα έχει απαγωγούς υπέρτασης DC τύπου Π. Ακολουθεί πίνακας με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά όπως αυτά αναφέρονται στα εγχειρίδια του κατασκευαστή.

	<b>Τεχνικά χαρακτηριστικά</b>	<b>SMA STP 15000TL</b>	<b>SMA STP 10000TL</b>
Τιμές εισόδου (DC)	Μέγιστη ΦΒ ισχύς (PPV):	15340 W	10200 W
	Περιοχή ΦΒ τάσης για ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (UDC):	360V - 800V	320 V – 800 V
	Μέγιστη τάση DC (VDC,max):	1000 V	1000 V
	Μέγιστο ρεύμα εισόδου (IDC,max):	33 A	22A
	Παραμόρφωση τάσης DC (USS):	-	-
	Αριθμός ανεξάρτητων εισόδων MPP / Στοιχειοσειρές ανά είσοδο MPP	2 / A:5; B:1	2 / A:4; B:1
	Προστασία από υπέρταση DC:	Ναι	Ναι
	Προστασία από αντίστροφη πολικότητα:	Ναι	Ναι
Τιμές εξόδου (AC)	Ονομαστική ισχύς AC (PAC,nom):	15000kW	10000kW
	Μέγιστο ρεύμα εξόδου (IAC,max):	24A	16A
	Εύρος ονομαστικής τάσης AC:	160V-280V	160V-280V
	Συχνότητα δικτύου (FAC):	50Hz/60Hz +5Hz -6Hz	50Hz/60Hz +5Hz -6Hz
	Συντελεστής ισχύος (cosφ):	1	1
	Προστασία από βραχυκύκλωμα:	Ναι	Ναι
	Προστασία από υπέρταση AC:	-	-
Γενικά χαρακτηριστικά	Μέγιστος βαθμός απόδοσης (η/neuro):	98,0%	97,5%
	Κλάση προστασίας:	IP65	IP65
	Πλάτος/Ύψος/Βάθος (σε mm)	665 / 690 / 265 mm	665 / 690 / 265 mm
	Ίδια κατανάλωση κατά τη λειτουργία	1 W	1 W
	Θερμοκρασία λειτουργίας:	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C

**Πίνακας 6: Βασικά ηλεκτρικά και μηχανολογικά χαρακτηριστικά των αντιστροφέν SMA STP 15000TL ισχύος 15 kW και SMA STP 10000TL ισχύος 10kW**

### 3.1.4 Βάση στήριξης συστοιχίας □

Οι βάσεις στήριξης συγκαταλέγονται στα έργα υποδομής ενός ΦΒ σταθμού και περιλαμβάνουν εργασίες εκσκαφής, θεμελίωσης και σκυροδέτησης. Η κατασκευή τους πρέπει να είναι ανθεκτική τόσο στο βάρος των πλαισίων, των καλωδίων διασύνδεσης και πολλές φορές και μικρών αντιστροφέν, όσο και στις αντίξοες καιρικές συνθήκες που μπορεί να επικρατούν στην περιοχή.

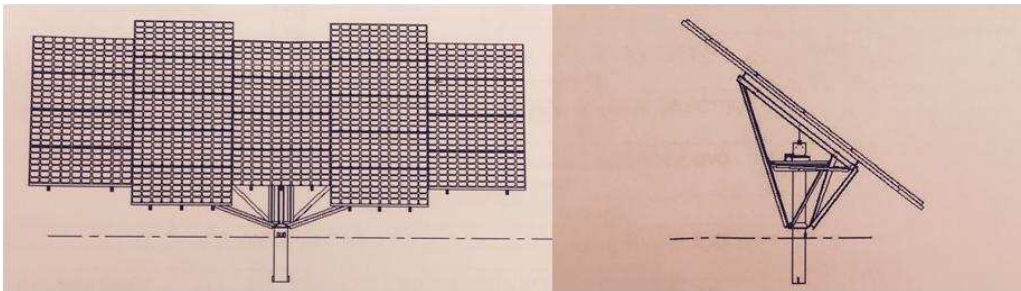
Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται είναι κυρίως γαλβανισμένο ατσάλι (για αποτροπή σκουριάς) ή αλουμίνιο. Το πλεονέκτημα του αλουμινίου, αν και πιο ακριβό, είναι ότι είναι πιο ελαφρύ και εύκολο στην επεξεργασία.

Στο συγκεκριμένο έργο έχουν κατασκευαστεί συστοιχίες οι οποίες παρακολουθούν την κίνηση του ήλιου όλη τη διάρκεια της ημέρας (trackers). Έχουν δυνατότητα περιστροφής γύρω από δύο άξονες (μπορούν να μεταβάλλουν τη γωνία αζιμουθίου και τη γωνία κλίσης ταυτόχρονα) με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να προσπίπτει πάντα κάθετα πάνω στα πλαίσια. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η χρήση ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και αισθητήρων (πυρανόμετρα). Η απόδοση μιας κινητής διάταξης εκτιμάται ότι είναι 20% με 25% μεγαλύτερη από ότι στις βάσεις σταθερής κλίσης και αζιμουθίου.

Οι ιχνηλάτες (trackers) θα είναι κατασκευασμένοι από εν θερμό γαλβανισμένο χάλυβα (ελάχιστο πάχος γαλβανίσματος 80μm), σύμφωνα με τα αντίστοιχα πρότυπα (ΕΛΟΤ 842, 756, 768, 12373 ή ισοδύναμα για ανοδιωμένο αλουμίνιο και ISO/EN 461, EN12944 ή ισοδύναμα για

γαλβανισμένο χάλυβα). Τα συνδετήρια στοιχεία θα είναι κατασκευασμένα από ανοδιωμένο αλουμίνιο ή ανοξειδωτο χάλυβα. Θα γίνει πρόβλεψη ώστε οι συστολές/διαστολές να μη δημιουργούν προβλήματα χαλάρωσης των συνδέσεων (πχ με χρήση ροδέλων γκρόβερ). Τα trackers θα εδράζονται σε βάσεις από οπλισμένο σκυρόδεμα όπου η κάθε μία θα έχει διαστάσεις 0,6m διάμετρο επί 2,5m βάθος.

Το ολοκληρωμένο σύστημα βάσεων και στοιχείων έδρασης αυτών στο έδαφος πρέπει να συνδυάζει στατική επάρκεια σε φορτία ανεμοπιέσεων (θεωρώντας βασική ταχύτητα ανέμου 35m/s προς όλες τις διευθύνσεις) σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, 3 και 9. Τα Φ/Β πλαίσια θα τοποθετηθούν σε ιχνηλάτες, σε οριζόντια διάταξη (landscape), υπό γωνία  $38^\circ$  ως προς το οριζόντιο επίπεδο όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί. Το χαμηλότερο σημείο των Φ/Β πλαισίων θα απέχει τουλάχιστον 0,4m από το έδαφος. Οι 19 ιχνηλάτες των 21 Φ/Β πλαισίων θα έχουν 5 κατακορυφες στήλες των 3/5/5/5/3 Φ/Β ανά στήλη. Ο ένας ιχνηλάτης των 22 Φ/Β πλαισίων θα έχουν 5 κατακορυφες στήλες των 4/5/4/5/4 Φ/Β ανά στήλη.



Σχήμα 37: Πλήρως συναρμολογημένη και θεμελιωμένη συστοιχία με οριζόντια τοποθέτηση πλαισίων

### 3.2 Μεταβολή των ηλεκτρικών παραμέτρων Φ/Β πλαισίων με τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία

Τα τρία πιο σημαντικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός Φ/Β πλαισίου είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  και το σημείο μέγιστης ισχύος  $M_{pp}$ . Κυρίως μας ενδιαφέρει η μεταβολή των παραπάνω μεγεθών σε σχέση με τη θερμοκρασία και την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Η θερμοκρασία αποτελεί σημαντική παράμετρο στη λειτουργία ενός Φ/Β συστήματος. Για ένα ανεξάρτητο πολυκρυσταλλικό κύτταρο, ο θερμοκρασιακός συντελεστής της τάσης ανοιχτού κυκλώματος έχει τιμή περίπου ίση με  $-2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Έτσι, για σύνδεση  $n_c$  κυττάρων σε σειρά ο συνολικός θερμοκρασιακός συντελεστής είναι:

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = -2,3 \cdot n_c \cdot mV/^{\circ}C$$

Εξίσωση 25

Για τα Φ/Β πλαίσια της παρούσας εργασίας ο θερμοκρασιακός συντελεστής της  $V_{OC}$  δίνεται από τα φυλλάδια του κατασκευαστή και είναι **-0,125V/°C**. Είναι σημαντικό εδώ να αναφέρουμε ότι η τάση ενός πλαισίου καθορίζεται από τη θερμοκρασία των Φ/Β κυττάρων κατά τη λειτουργία τους η οποία διαφέρει από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την εύρεση της παραμέτρου αυτής πρέπει να γνωρίζουμε την τυπικά θερμοκρασία λειτουργίας (NOCT) του κυττάρου η οποία είτε δίνεται από τον κατασκευαστή είτε μετρείται στις ακόλουθες συνθήκες:

- Πυκνότητα ακτινοβολίας: 0,8kW/m<sup>2</sup>
- Μάζα αέρα: 1,5 AM
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος: 20°C
- Μέση ταχύτητα αέρα: > 1m/sec
- Η τιμή της είναι μεταξύ 42°C και 46°C.

Η θερμοκρασία λειτουργίας του Φ/Β κυττάρου (και κατά συνέπεια του πλαισίου) τότε δίνεται από τη σχέση:

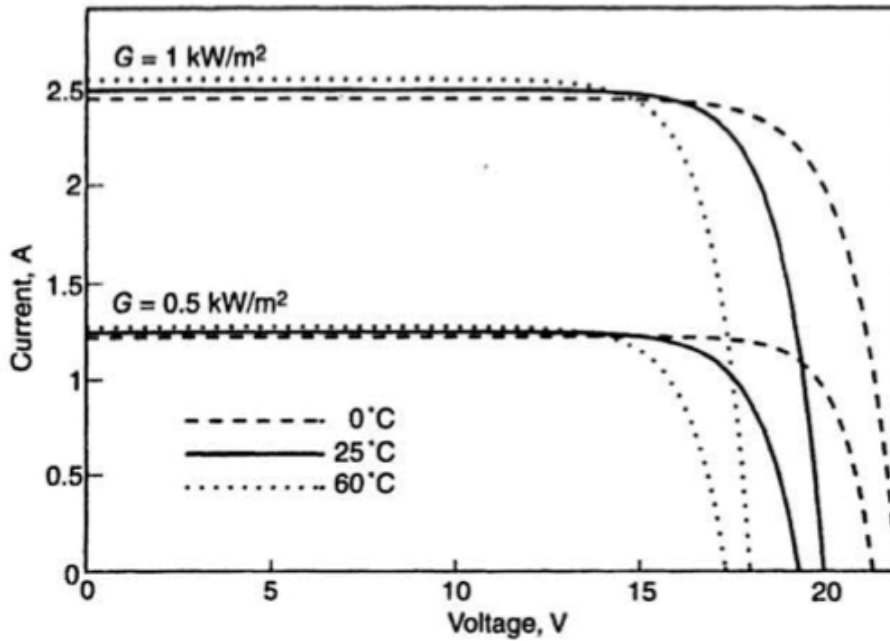
$$T_c - T_a = \frac{NOCT - 20}{0.8} \cdot G \left( \frac{kW}{m^2} \right)$$

Εξίσωση 26

όπου  $T_c$  και  $T_a$  η θερμοκρασία κυττάρου και περιβάλλοντος αντίστοιχα σε °C και  $G$  η πυκνότητα ακτινοβολίας σε kW/m<sup>2</sup>. Για το ρεύμα βραχυκύκλωσης ο θερμοκρασιακός συντελεστής έχει θετικό πρόσημο και είναι της τάξης των +6mA/°C ανά τετραγωνικό εκατοστό της επιφάνειας του πλαισίου. Το πλαίσιο της παρούσας εργασίας έχει θερμοκρασιακό συντελεστή  $I_{sc}$  περίπου +3,4mA/°C. Η πυκνότητα ακτινοβολίας έχει σημαντική επίδραση στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Συγκεκριμένα, το  $I_{sc}$  είναι ευθέως ανάλογο με της πυκνότητα της ακτινοβολίας και κατά τη διάρκεια της ημέρας μεταβάλλεται όπως και αυτή. Δίνεται από τη σχέση:

$$I_{sc}(G) = I_{sc} \left( 1 \frac{kW}{m^2} \right) \cdot G \left( \frac{kW}{m^2} \right)$$

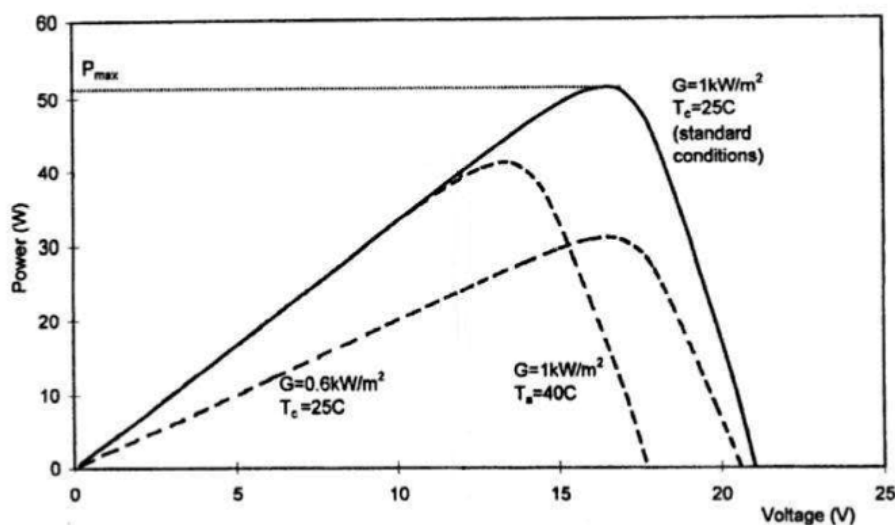
Εξίσωση 27



Σχήμα 38: Εξάρτηση της καμπύλης I-V ενός Φ/Β πλαισίου από την θερμοκρασία και την ακτινοβολία.

Η λειτουργία ενός Φ/Β πλαισίου πρέπει να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στο σημείο μέγιστης ισχύος. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, το σημείο αυτό μεταβάλλεται πολύ με τις διαφοροποιήσεις της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας.





Σχήμα 39: Εξάρτηση της παραγόμενης ισχύος ενός Φ/Β πλαισίου από την τάση σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ακτινοβολίας

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η τάση μέγιστης ισχύος είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την ακτινοβολία. Η μέση τιμή της κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι περίπου 80% της  $V_{OC}$ , μια ιδιότητα πολύ καθοριστική για τον αριθμό των πλαισίων που θα σχηματίζουν μια στοιχειοσειρά. Η ισχύς  $P_{MPP}$  μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και για τα πλαίσια που χρησιμοποιούμε στην εργασία ο θερμοκρασιακός συντελεστής είναι  $-0,46\%/^{\circ}C$  ή  $-1,081W/^{\circ}C$ .

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας επηρεάζουν κυρίως της τάση  $V_{OC}$  και  $V_{MPP}$  ενώ μεταβολές στην ακτινοβολία το  $I_{SC}$ . Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στο σχήμα 32 όπου βλέπουμε πως αλλάζουν οι παραπάνω παράμετροι. Σε πρακτικές εφαρμογές λαμβάνουμε υπόψιν μας μόνο τις παραπάνω εξαρτήσεις (αμελούμε δηλαδή την εξάρτηση της τάσης από την ακτινοβολία και του ρεύματος από τη θερμοκρασία). Κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, η ακτινοβολία μεταβάλλεται πολύ πιο έντονα από την θερμοκρασία, συνεπώς περιμένουμε το ρεύμα να μεταβάλλεται πολύ πιο έντονα από την τάση. Τέλος, στο σχήμα παρατηρούμε ότι για την ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος ( $T_a=25^{\circ}C$ ) οι διαφοροποιήσεις στην ακτινοβολία αλλάζουν τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ του πλαισίου. Όμως, η μέγιστη αυτή ισχύς αποδίδεται για την ίδια περίπου τάση  $V_{MPP}$  (17,5V περίπου). Επομένως είναι αναγκαία η ύπαρξη μιας ηλεκτρονικής διάταξης που να ελέγχει την τάση του πλαισίου ή της στοιχειοσειράς ώστε να έχουμε πάντα μέγιστη απόδοση.

### 3.3 Διαδικασία σχεδίασης Φ/Β γεννήτριας

Ο σχεδιασμός ενός Φ/Β σταθμού απαιτεί την ομαδοποίηση των Φ/Β πλαισίων. Από ηλεκτρολογικής άποψης, αυτό είναι απαραίτητο για την προσαρμογή της γεννήτριας με τα DC

χαρακτηριστικά εισόδου του αντιστροφέα.

Η ομαδοποίηση των πλαισίων ακολουθεί την παρακάτω ιεραρχία:

- Καθορισμός αριθμού πλαισίων ανά στοιχειοσειρά
- Καθορισμός του πλήθους των στοιχειοσειρών ανά κύκλωμα του αντιστροφέα
- Καθορισμός του αριθμού των στοιχειοσειρών που θα φέρει κάθε συστοιχία
- Καθορισμός του αριθμού των συστοιχιών που θα αντιστοιχούν σε κάθε αντιστροφέα

Ταυτόχρονα θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας λειτουργικές παραμέτρους όπως η εύκολη εποπτεία του Φ/Β σταθμού, η ηλεκτρολογική και γεωμετρική συμμετρία των στοιχειοσειρών και τέλος η ευκολία διασύνδεσης και αποφυγής λαθών.

### 3.3.1 Φ/Β γεννήτρια με αντιστροφείς των 15kW και 11kW

Σαν πρώτο βήμα κρίνεται η εκτίμηση του αριθμού των Φ/Β πλαισίων που θα χρειαστούμε και δίνεται από τη σχέση:

**Αριθμός πλαισίων = Ισχύς Φ/Β σταθμού (Wp)/Ισχύς Φ/Β πλαισίου (Wp)=98935/235=421 πλαίσια**

Τα **421** Φ/Β πλαίσια που εκτιμάται ότι αρχικά θα χρησιμοποιηθούν θα ομαδοποιηθούν σε 6 τριφασικούς αντιστροφείς SMA STP 15000TL ισχύος 15 kW με τον κάθε ένα να φέρει **1 κύκλωμα εισόδου DC** κι ενός τριφασικού SMA STP 10000TL ισχύος 10kW, ο οποίος φέρει **1 κύκλωμα εισόδου DC**. Έτσι, τα πλαίσια που αντιστοιχούν σε 6 τριφασικούς αντιστροφείς SMA STP 15000TL ισχύος 15 kW είναι:

**Πλάισια ανά αντιστροφέα = αριθμός πλαισίων/ Αριθμός αντιστροφέων = 379/6 = 63 πλαίσια,**

ενώ τα πλαίσια που αντιστοιχούν στους στον 1 τριφασικό αντιστροφέα SMA STP 10000TL ισχύος 10 kW είναι 42.

Ανά κύκλωμα θα έχουμε 63 πλαίσια για τους αντιστροφείς ισχύος 15 kW και 42 πλαίσια για τους 10kW.

Στην πραγματικότητα, ο πλήρης σχεδιασμός του Φ/Β πάρκου είναι:

Σε καθέναν από τους 5 (5 από τους 6 συνολικά) αντιστροφείς SMA STP 15000TL ισχύος 15 kW, στο πρώτο MPPT συνδέονται 21 Φ/Β πλαίσια σε σειρά σχηματίζοντας ένα string (στοιχειοσειρά) και στη συνέχεια συνδέονται στην Α είσοδο του αντιστροφέα ανά δύο strings. Στο δεύτερο

MPPT, 21 Φ/Β πλαίσια συνδέονται σε σειρά σχηματίζοντας ένα string και στη συνέχεια συνδέονται στην Β είσοδο του αντιστροφέα ανά ένα string.

Στον εναπομείνοντα από τους 6 συνολικά αντιστροφέις SMA STP 15000TL ισχύος 15 kW, στο πρώτο MPPT 21 Φ/Β συνδέονται πλαίσια σε σειρά σχηματίζοντας ένα string και στη συνέχεια συνδέονται στην Α είσοδο του αντιστροφέα ανά δύο strings. Στο δεύτερο MPPT, 22 Φ/Β πλαίσια συνδέονται σε σειρά σχηματίζοντας ένα string και στη συνέχεια συνδέονται στην Β είσοδο του αντιστροφέα ανά ένα string.

Τέλος, στον αντιστροφέα SMA STP 10000TL ισχύος 10 kW, στο πρώτο MPPT 21 Φ/Β συνδέονται πλαίσια σε σειρά σχηματίζοντας ένα string και στη συνέχεια συνδέονται στην Α είσοδο του αντιστροφέα ανά ένα string. Στο δεύτερο MPPT, 22 Φ/Β πλαίσια συνδέονται σε σειρά σχηματίζοντας ένα string και στη συνέχεια συνδέονται στην Β είσοδο του αντιστροφέα ανά ένα string.

Συνοπτικά, το Φ/Β Πάρκο αποτελείται από:

**{5 (αντιστροφέις, 15kW) x [2 (strings) x 21 (Φ/Β πλαίσια) + 1 (string) x 21 (Φ/Β πλαίσια)] + 1 (αντιστροφέα, 15kW) x [2 (strings) x 21 (Φ/Β πλαίσια) + 1 (string) x 22 (Φ/Β πλαίσια)] + 1 (αντιστροφέα, 10kW) x [1 (string) x 21 (Φ/Β πλαίσια) + 1 (string) x 21 (Φ/Β πλαίσια)]} x 235W= 98.935W**

Τα 63 πλαίσια ανά κύκλωμα πρέπει να ομαδοποιηθούν σε στοιχειοσειρές και στη συνέχεια οι στοιχειοσειρές να παραλληλιστούν μέσω διάταξης παραλληλισμού. Ο προσδιορισμός του αριθμού των πλαισίων ανά στοιχειοσειρά είναι μια πολυπαραμετρική διαδικασία για την οποία πρέπει να λάβουμε υπόψιν:

- **Τη μέγιστη DC τάση συστήματος:** Για τα πλαίσια καθορίζεται από τον κατασκευαστή και στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι **1000V**. Για τον αντιστροφέα, από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εισόδου βλέπουμε ότι είναι **800V**. Επομένως, η μέγιστη DC τάση συστήματος στη συγκεκριμένη τοπολογία είναι τα **800V**.
- **Παράθυρο MPPT τάσης αντιστροφέα:** Είναι τα όρια της τάσης μέσα στα οποία ο αντιστροφέας κάνει ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος της στοιχειοσειράς. Στην παρούσα περίπτωση είναι **360V – 800V** για τον αντιστροφέα SMA STP 15000TL ισχύος 15 kW και **320V – 800V** για τον αντιστροφέα SMA STP 10000TL ισχύος 10 kW.
- **Θερμοκρασιακή εξάρτηση της  $V_{OC}$  και  $V_{MPP}$  της στοιχειοσειράς:** Είναι η τάση στα άκρα της στοιχειοσειράς καθώς η θερμοκρασία μεταβάλλεται. Για τις διάφορες περιοχές της Ελλάδας ένα εύρος θερμοκρασιών από  $-20^{\circ}\text{C}$  έως  $+70^{\circ}\text{C}$  (θερμοκρασία πλαισίου) είναι ικανοποιητικό για τη μελέτη μας. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι  $-20^{\circ}\text{C}$  είναι ένα κάπως υπερβολικό σενάριο μιας και η θερμοκρασία πλαισίου είναι περίπου  $25^{\circ}\text{C}$  υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Γνωρίζουμε τις τάσεις  $V_{OC}$  και  $V_{MPP}$  στους  $25^{\circ}C$  και τον αντίστοιχο θερμοκρασιακό συντελεστή. Με τη βοήθεια των σχέσεων που ακολουθούν υπολογίζουμε τις τάσεις για όλο το εύρος θερμοκρασιών που μας ενδιαφέρει.

$$V_{OC}(T_{mod}) = V_{OC}(25^{\circ}C) + (T_{mod} - 25^{\circ}C) \times V_{OC,Tcoeff}$$

Εξίσωση 28

$$V_{MPP}(T_{mod}) = V_{MPP}(25^{\circ}C) + (T_{mod} - 25^{\circ}C) \times V_{MPP,Tcoeff}$$

Εξίσωση 29

Με τη βοήθεια του υπολογιστικού φύλλου, βρίσκουμε ότι ο κατάλληλος αριθμός πλαισίων ανά στοιχειοσειρά είναι 21 ή 22 πλαίσια. Συγκεκριμένα έχουμε:

	21 πλαίσια ανά στοιχείο		22 πλαίσια ανά στοιχείο	
	-20°C	+70°C	-20°C	+70°C
$V_{oc}$	827.9	591.7	867.4	619.9
$V_{MPP}$	704.0	467.8	737.6	490.1

Πίνακας 7: Μεταβολή της  $V_{OC}$  και  $V_{MPP}$  σε ακραίες τιμές θερμοκρασίας

Παρατηρούμε ότι τιμές είναι εντός ορίων και για τα 21 πλαίσια αλλά και για τα 22 ανά στοιχειοσειρά και για τις δύο θερμοκρασίες. Ακόμα και στην περίπτωση που κάποια από τις τιμές υπολογίζοταν ελάχιστα εκτός ορίων αυτό δεν θα αποτελούσε ιδιαίτερο πρόβλημα αφού οι θερμοκρασίες αυτές είναι ακραίες και ελάχιστες φορές θα μπορούσαν να παρατηρηθούν.

Στη συνέχεια πρέπει να προσδιορίσουμε τον αριθμό των στοιχειοσειρών που θα λειτουργούν παράλληλα σε ένα κύκλωμα οι οποίες είναι 3 για κάθε αντιστροφέα SMA STP 15000TL ισχύος 15 kW και 2 για τον αντιστροφέα SMA STP 10000TL ισχύος 10 kW. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι απαιτούνται συνολικά **20** συνολικά στοιχειοσειρές. Το συνολικό DC ρεύμα εισόδου θα είναι:

$$IDC = I_{MPP, string} \cdot \text{Αριθμό στοιχειοσειρών} = 8,01 \cdot 20 = 160,2A$$

το οποίο είναι εντός των ηλεκτρικών προδιαγραφών.

Για **21** πλαίσια ανά στοιχειοσειρά η τελική ισχύς του Φ/Β σταθμού είναι **98.935 kWp**. Τέλος, αφού έχουν προηγηθεί οι παραπάνω υπολογισμοί, μπορούμε να προσδιορίσουμε τον ακριβή αριθμό πλαισίων που χρειάζονται που είναι **421** πλαίσια. Συγκεντρωτικά έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

Ισχύς Φ/Β σταθμού:	98,935 kWp
Αριθμός αντιστροφών:	7
Κυκλώματα ανά αντιστροφή:	3 (2)
Στοιχειοσειρές ανά κύκλωμα:	1
Πλαίσια ανά στοιχειοσειρά:	21 (22)
Τελικός αριθμός Φ/Β πλαισίων:	421
Λόγος ισχύος αντιστροφεία:	96,76 %

**Πίνακας 8: Τελική διαστασιολόγηση Φ/Β σταθμού**

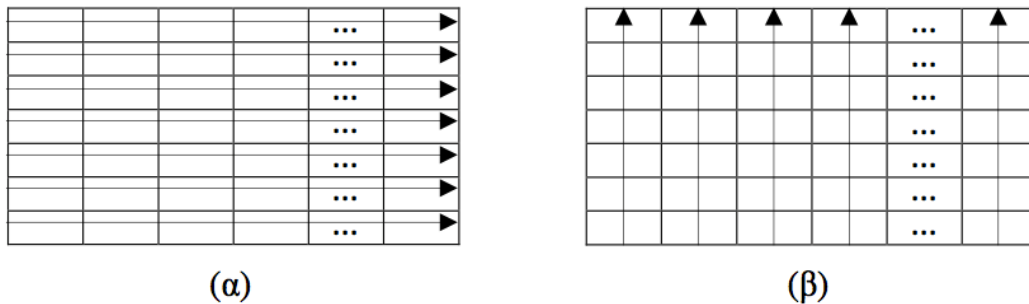
Ο λόγος ισχύος αντιστροφεία είναι ο λόγος της μέγιστης ισχύος των Φ/Β πλαισίων στην είσοδο του αντιστροφεία προς την ισχύ που ο αντιστροφείας μπορεί να δεχτεί.

### 3.3.2 Ανάπτυξη Φ/Β γεννήτριας σε συστοιχίες

Γνωρίζοντας τις πληροφορίες του πιο πάνω πίνακα το επόμενο βήμα είναι η διαστασιολόγηση της Φ/Β συστοιχίας. Πάνω σε αυτήν, εκτός από τα Φ/Β πλαίσια θα στηρίζονται τόσο τα καλώδια των πλαισίων όσο και η συσκευή παραλληλισμού των στοιχειοσειρών. Για την σχεδιάσή της πρέπει να λάβουμε υπόψιν παράγοντες όπως:

- Μήκος και μέγιστο ύψος συστοιχίας
- Προσανατολισμός πλαισίων σε οριζόντια και κατακόρυφη γεωμετρία
- Οριζόντια ή κατακόρυφη τοποθέτηση της στοιχειοσειράς
- Συνολικό μήκος καλωδίωσης
- Ευκολία κατασκευής, ελέγχου και επιδιόρθωσης της διάταξης □

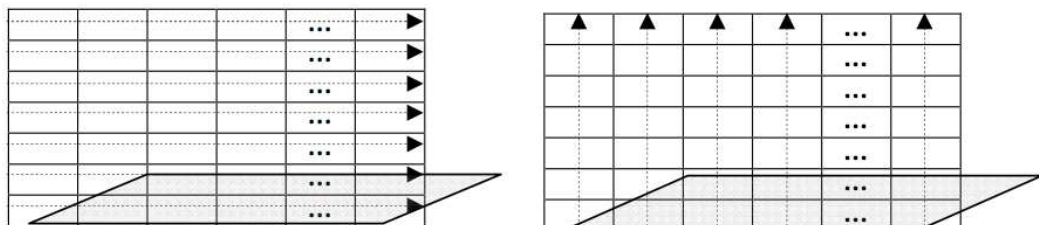
Ο προσανατολισμός της στοιχειοσειράς μπορεί να γίνει είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 40: Οριζόντιος και κατακόρυφος προσανατολισμός στοιχειοσειρών

Η επιλογή όμως του προσανατολισμού ουσιαστικά περιορίζεται λόγω των φαινομένων σκίασης της συστοιχίας.

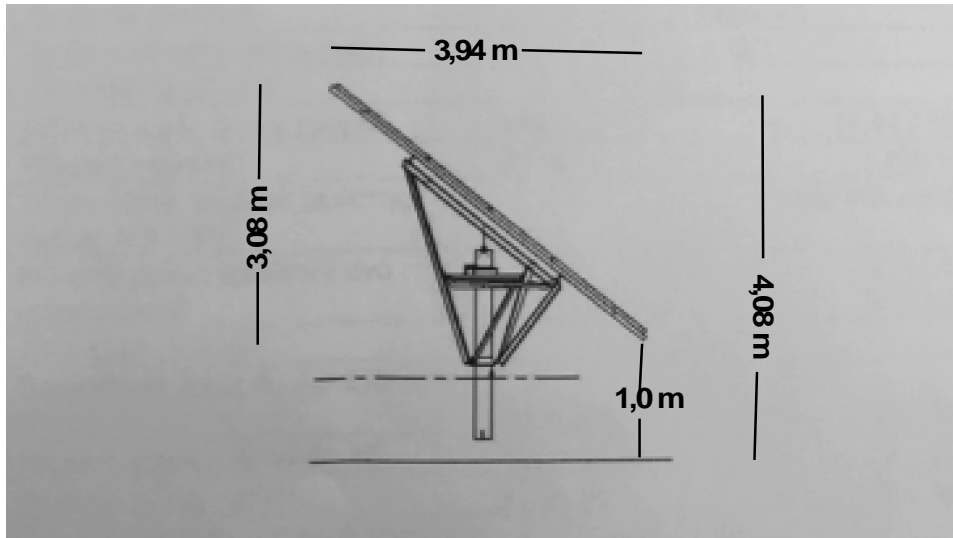
Κάθε συστοιχία σκιάζεται από την αμέσως νοτιότερή της. Η σκιά κινείται από την κορυφή της συστοιχίας προς το έδαφος τις πρωινές ώρες ενώ διαγράφει την αντίθετη πορεία τις απογευματινές. Στο παρακάτω σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε τις συστοιχίες υπό μερική σκίαση κάποια στιγμή της ημέρας. Όταν κάποιο πλαίσιο μιας στοιχειοσειράς σκιαστεί, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης ολόκληρης της στοιχειοσειράς.



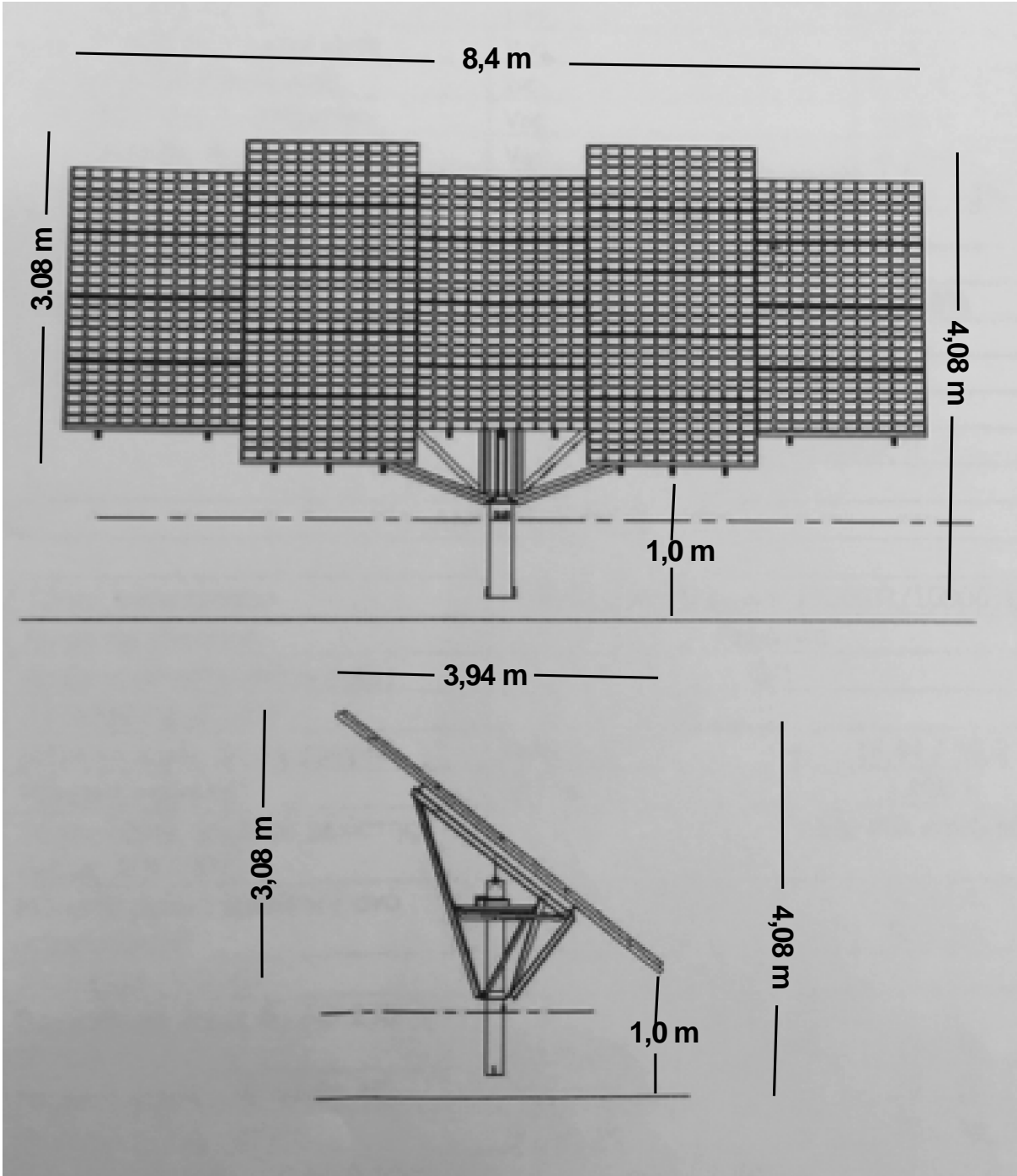
Σχήμα 41: Μερική σκίαση στοιχειοσειρών

Στα σχήματα, η σκιά έχει καλύψει τις δύο πρώτες σειρές των συστοιχιών. Όταν ο προσανατολισμός είναι οριζόντιος, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να σκιάζονται τα πλαίσια μόνο 2 στοιχειοσειρών. Αντίστοιχα, έχουμε μείωση της απόδοσης μόνο στις στοιχειοσειρές αυτές. Όταν όμως προσανατολισμός είναι κατακόρυφος, σκιάζονται πλαίσια όλων των στοιχειοσειρών και μειώνεται η απόδοση όλης της συστοιχίας. Για τον λόγο αυτό στη σχεδίαση της παρούσας εργασίας θα ακολουθήσουμε οριζόντιο προσανατολισμό της συστοιχίας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σχέδια από μία διάταξη συστοιχίας:



Σχήμα 42: Πλάγια όψη



Σχήμα 43: Πλάγια όψη και εμβαδό



Η γωνία των συστοιχιών είναι κοινή και ίση με  $38^{\circ}$ . Η κλίση αυτή δεν ανταποκρίνεται στη γωνία μέγιστης απόδοσης της συστοιχίας. Είναι μια μέση τιμή που ανταποκρίνεται στο γεωγραφικό πλάτος περιοχών της Βόρειας Ελλάδας και την χρησιμοποιούμε για μια πρώτη εκτίμηση των διαφόρων μεγεθών της συστοιχίας. Η τοποθέτηση των Φ/Β πλαισίων έχει γίνει κατά με τους παρακάτω δύο τρόπους:

- Κατά τον κατακόρυφο άξονα σε κατακόρυφη διάταξη (landscape) και 4 σειρές πλαισίων στο ελάχιστο έως 5 στο μέγιστο
- Κατά τον οριζόντιο άξονα σε οριζόντια διάταξη (landscape) και 5 στήλες πλαισίων.

Η βασική ιδέα είναι η διαστασιολόγηση της συστοιχίας ώστε να αποτελεί κύκλωμα για κάθε μία είσοδο του αντιστροφέα. Στην παρούσα εργασία κάθε αντιστροφέας θα λειτουργεί με 7 συστοιχίες. Κάθε συστοιχία είναι ανεξάρτητη από την άλλη τόσο ηλεκτρολογικά όσο και σχεδιαστικά ώστε να είναι εύκολη η κατασκευή, η επίβλεψη και η απομόνωσή τους σε περίπτωση βλάβης.

Ως προς τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, αρχικά παρατηρούμε ότι τόσο το εμβαδόν της απαιτούμενης έκτασης όσο και το εμβαδόν της συστοιχίας είναι ουσιαστικά το ίδιο σε όλες τις διατάξεις, κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού χρησιμοποιείται ο ίδιος αριθμός πλαισίων. Σημαντικό κριτήριο αποτελεί το ύψος της συστοιχίας από το έδαφος. Είναι προφανές ότι μικρότερο ύψος συνεπάγεται ευκολία στην κατασκευή των βάσεων και στη συναρμολόγηση ενώ ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα άμεσης επέμβασης σε περίπτωση βλάβης. Επιπλέον, η εργασία σε μικρότερο ύψος σημαίνει μεγαλύτερη ασφάλεια για το προσωπικό που εργάζεται στο σταθμό καθώς και ευκολία στη συντήρηση. Γενικά ως προς το οριζόντιο μήκος, βασικός παράγοντας επιλογής είναι η διάταξη του διαθέσιμου χώρου στον οποίο θα εγκατασταθεί ο Φ/Β σταθμός. Τέλος, σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι συστοιχίες με μεγάλο ύψος απαιτούν ισχυρότερες βάσεις θεμελίωσης και γενικά πιο ανθεκτικά υλικά κατασκευής για να αντέχουν στις ανεμοπιέσεις.

### 3.3.3 Καλωδίωση συστοιχιών

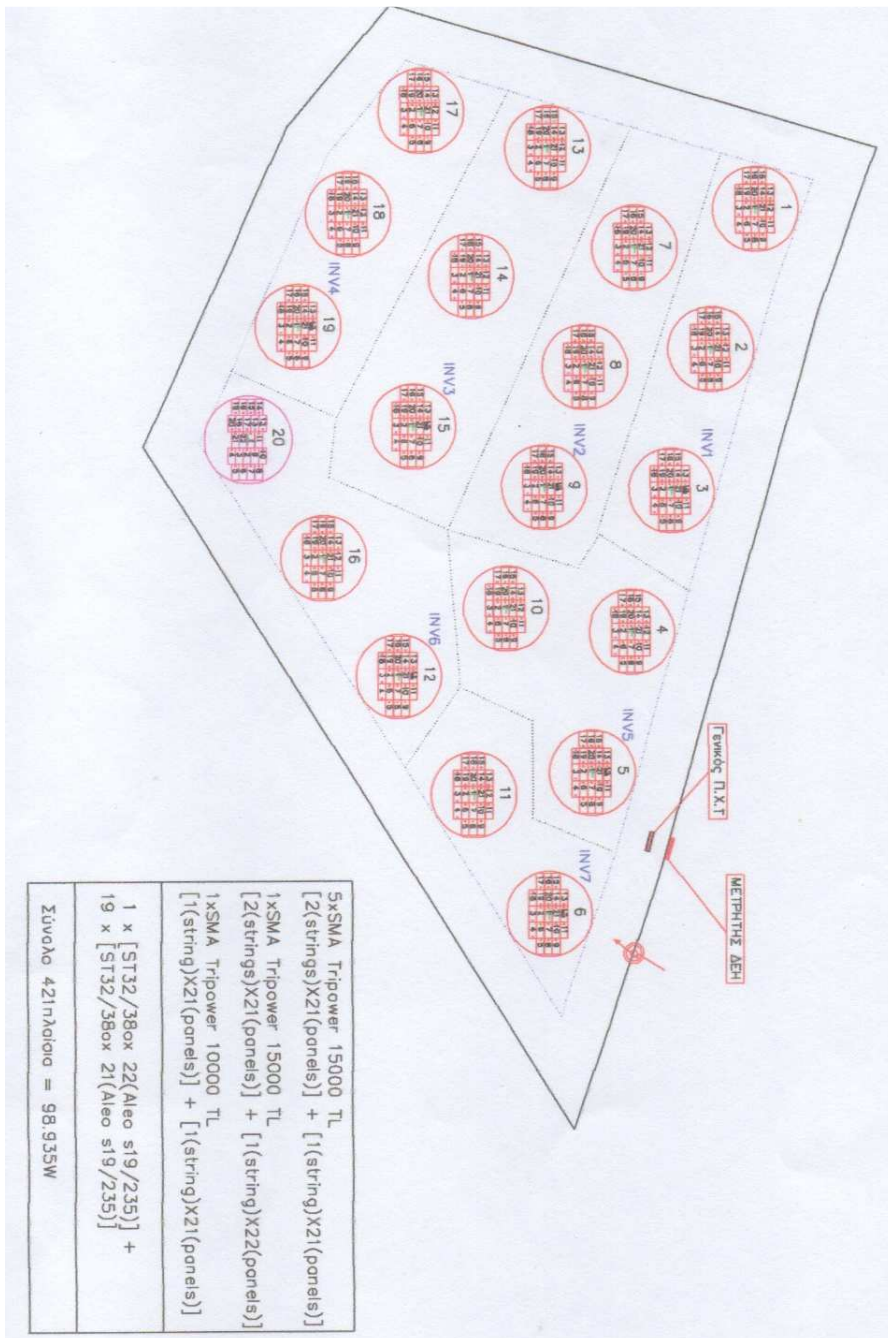
Το συνολικό μήκος του καλωδίου που απαιτείται για την παραπάνω σχεδίαση αποτελεί σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης συστοιχίας. Συγκεκριμένα έχει επίδραση:

- Στο κόστος καλωδίωσης της συστοιχίας και στο συνολικό κόστος του σταθμού
- Στην πτώση τάσης που δημιουργείται στο καλώδιο και κατά συνέπεια στην επιλογή της διατομής του
- Στις απώλειες ενέργειας που θα έχουμε κατά τη λειτουργία της συστοιχίας

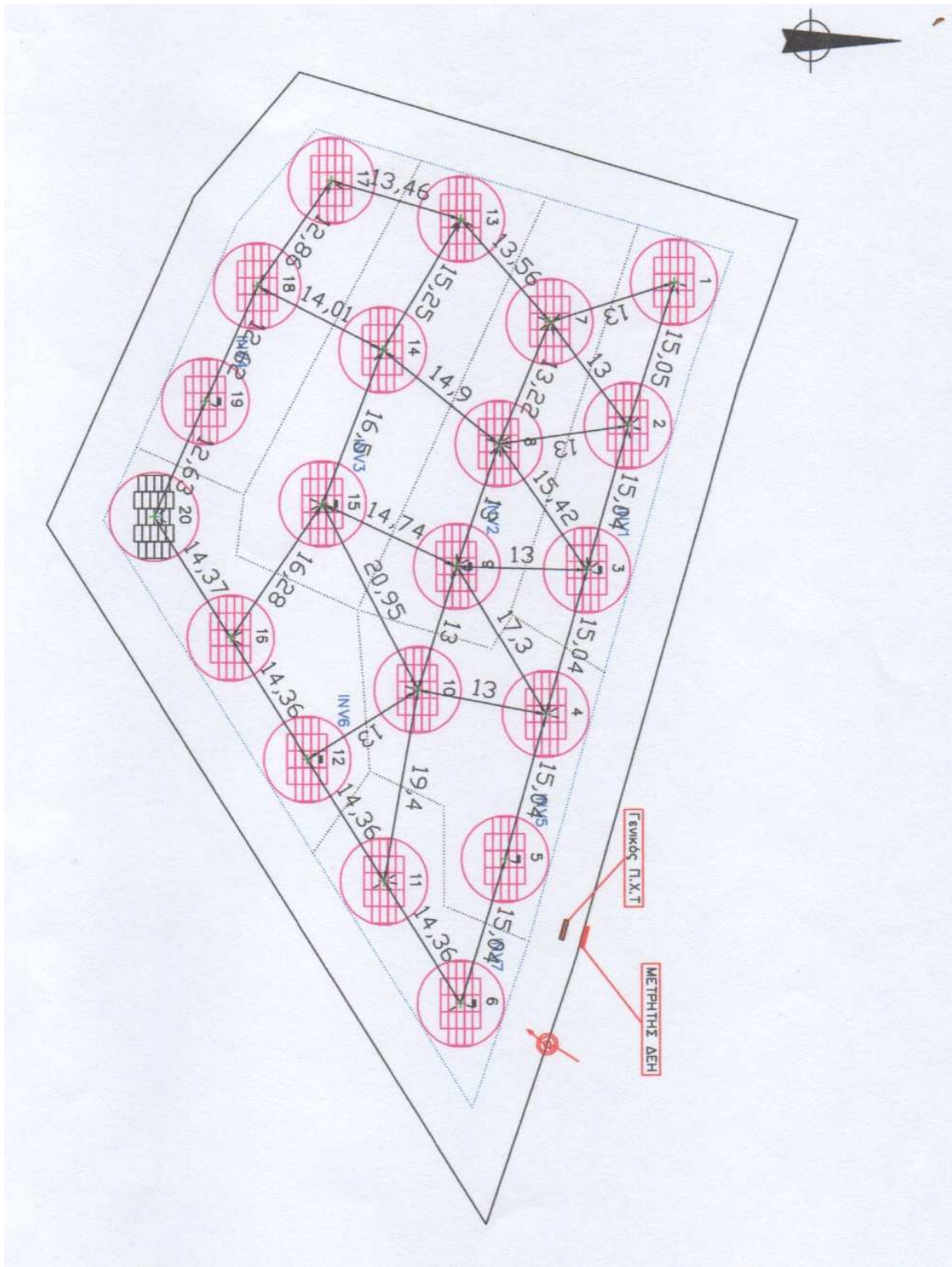
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ Φ/Β ΣΤΑΘΜΟΥ**

#### 4.1 Γενική περιγραφή της τοπολογίας

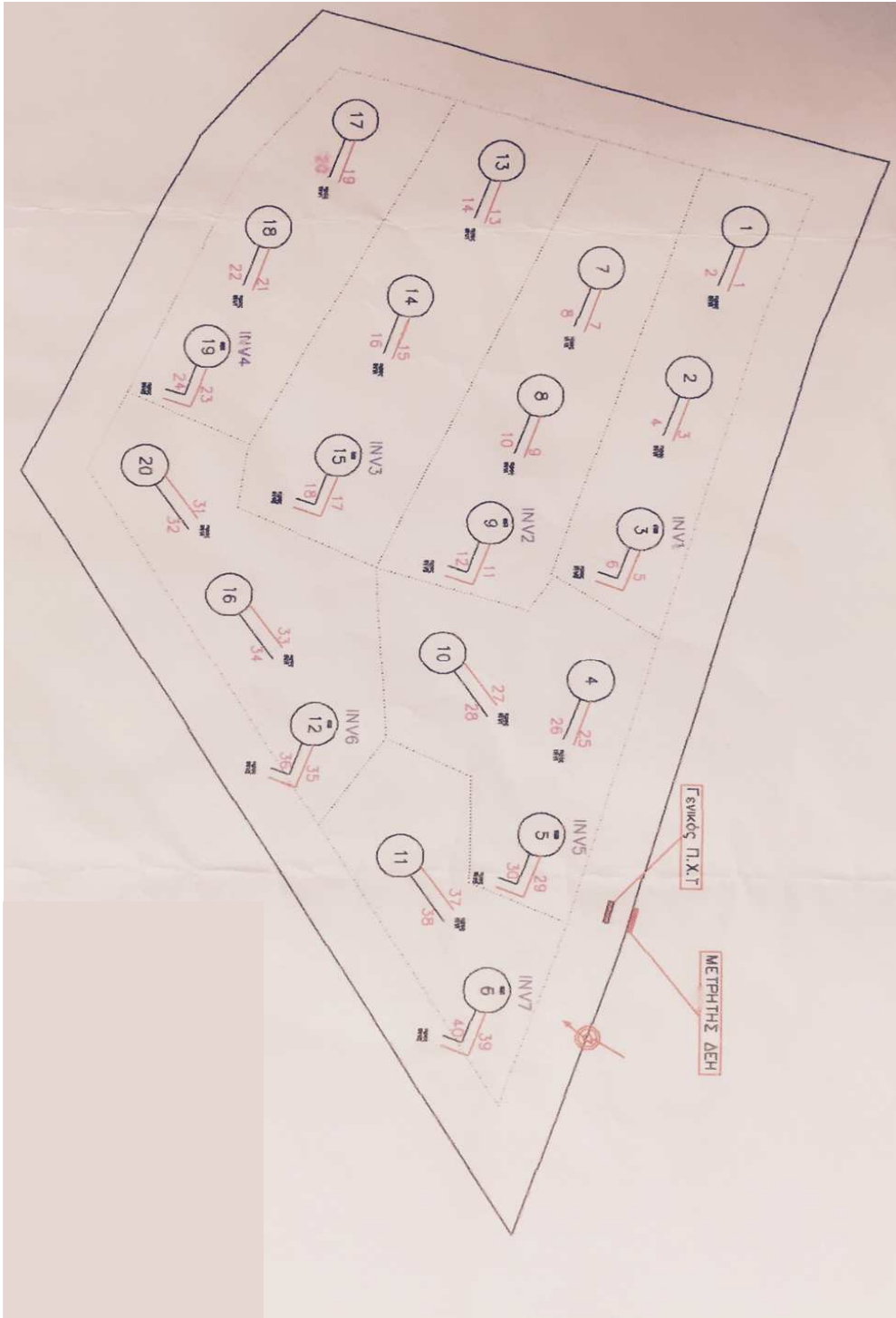
Στην τοπολογία αυτή ο σταθμός αποτελείται από συνολικά 421 πλαίσια της εταιρείας Aleo τύπου S18 235P ονομαστικής ισχύος  $235W_p$ . Τα πλαίσια αυτά ομαδοποιούνται σε 7 συστοιχίες. Κάθε συστοιχία τροφοδοτεί από έναν αντιστροφέα των 15kW τύπου Sunny Tripower 15000TL (6 συνολικά) και έναν αντιστροφέα των 10kW τύπου Sunny Tripower 10000TL της εταιρείας SMA. Οι αντιστροφέι συνδέονται ηλεκτρικά σε πίνακα Χαμηλής Τάσης ώστε να δημιουργηθεί ένα τριφασικό σύστημα. Η χωροταξική τους τοποθέτηση, φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, αποτελείται από 6 x 3 συστοιχίες ανά αντιστροφέα (STP 15kW) και 1 x 2 συστοιχίες (STP 10kW). Στη βόρεια πλευρά του σταθμού φαίνεται ο αντίστοιχος πίνακας Χαμηλής Τάσης. Η όδευση των καλωδίων DC γίνεται τόσο πάνω στα ικριώματα των συστοιχιών όσο και εντός χαντακιού τύπου A μέχρι το σημείο των αντιστροφέων όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Τα καλώδια διέρχονται από το έδαφος μέσω φρεατίων. Στο βόρειο μέρος του σταθμού, για λόγους αποφυγής της σκίασης, έχει τοποθετηθεί ο οικίσκος ζεύξης και ελέγχου.



Σχήμα 44: Γενική διαμόρφωση



Σχήμα 45: Γενική χωροθέτηση σταθμού (ο Βορράς βρίσκεται στο πάνω μέρος του διαγράμματος)



Σχήμα 46: Διάγραμμα δόδεσης DC καλωδίων

## 4.2 Όδευση καλωδίων – απαιτούμενο μήκος καλωδίων DC

Τα καλώδια που συνδέουν τα Φ/Β πλαίσια με τους αντιστροφείς οδεύουν εν μέρει πάνω στις συστοιχίες και στη συνέχεια σε σωλήνες μέσα στα χαντάκια τύπου A μέχρι τους αντιστροφείς. Όσον αφορά τους 6 αντιστροφείς STP 15kW, ο καθένας αντιστοιχεί σε 3 συστοιχίες. Το συνολικό μήκος καλωδίων DC για αυτό το μέρος του Φ/Β πάρκου θα είναι 390 m. Για τον μονάδικο αντιστροφέα STP 10kW απαιτούνται καλώδια μήκους 40 m. Το συνολικό μήκος καλωδίων DC ανέρχεται στα 440 m για όλο το πάρκο. Οι επιμετρήσεις γίνονται για μία στοιχειοσειρά. Λόγω της συμμετρίας του σταθμού, για της υπόλοιπες ομάδες τα μήκη θα είναι τα ίδια.

## 4.3 Τύπος καλωδίου

Για την διασύνδεση των πλαισίων χρησιμοποιούνται ειδικά καλώδια εξωτερικού χώρου τα οποία πρέπει να είναι ανθεκτικά τόσο σε μηχανικές καταπονήσεις όσο και στην ηλιακή ακτινοβολία. Ο τύπος που επιλέγεται είναι συνήθως **H07RN-F** και έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές [www.cablel.gr](http://www.cablel.gr):

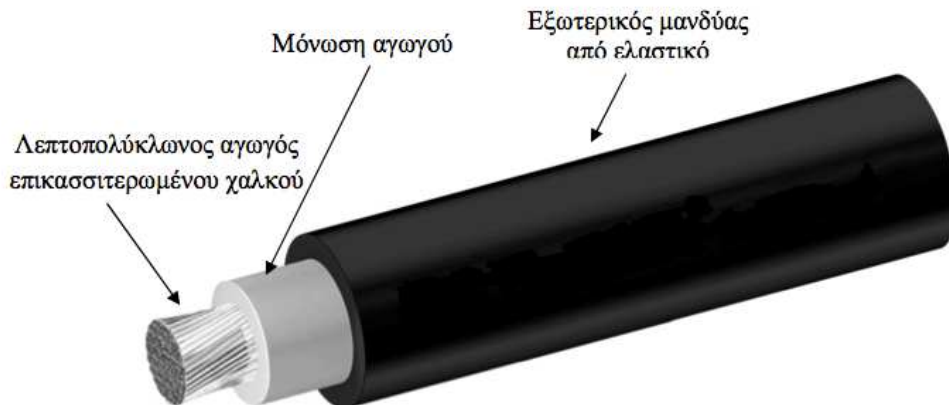
**H:** το καλώδιο ακολουθεί εναρμονισμένο πρότυπο

**07:** για τάσεις 450/750 φασική/πολική. Για συνεχές ρεύμα το καλώδιο μπορεί να εγκατασταθεί σε σύστημα ονομαστικής τάσης **1,5•750=1125V** (κατά HD 516)

**R:** η μόνωση του αγωγού είναι από φυσικό λάστιχο

**N:** ο εξωτερικός μανδύας είναι από ελαστικό πολυχλωροπρένιο, υλικό ανθεκτικό στην ηλιακή ακτινοβολία που δεν αποικοδομείται.

**F:** ο αγωγός είναι λεπτοπολύκλωνος και σε πολλές περιπτώσεις επικασιτερωμένος.



Σχήμα 47: Τυπική τομή καλωδίου H07RN-F

#### 4.4 Πτώση τάσης και απώλειες ισχύος στο καλώδιο DC

Η επιλογή της διατομής του αγωγού σχετίζεται με την ανάγκη όσο το δυνατόν μικρότερων απωλειών αλλά και πτώσης τάσης κατά μήκος του. Σύμφωνα με το γερμανικό προσχέδιο **VDE 0100 Part 1** προτείνεται η πτώση τάσης να μην είναι μεγαλύτερη του **1%** της ονομαστικής DC τάσης συστήματος σε πρότυπες συνθήκες. Αυτό έχει ως συνέπεια οι απώλειες ισχύος να διατηρούνται και αυτές στο **1%** σε πρότυπες συνθήκες. Πρακτικά, η καλωδίωση των πλαισίων γίνεται με καλώδια διατομών  $4\text{mm}^2$  ή  $6\text{mm}^2$ . Στη συνέχεια, θα δούμε το ποσοστό της πτώσης τάσης που επιφέρει κάθε μία από τις παραπάνω διατομές.

Το ρεύμα που ρέει σε κάθε στοιχειοσειρά εξαρτάται κυρίως από την ακτινοβολία και είναι σχεδόν πάντα μικρότερο του ρεύματος  $I_{MPP,STC}$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το ρεύμα  $I_{MPP,STC}$  είναι **8,01A** και βάση αυτού θα γίνουν οι παραπάνω έλεγχοι.

- Πτώση τάσης: Μας ενδιαφέρει η πτώση τάσης που έχουμε πάνω στον μακρύτερο αγωγό ο οποίος είναι **30m**. Η ωμική αντίσταση του καλωδίου σε θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$  δίνεται από το φυλλάδιο του κατασκευαστή και είναι **5,09 Ω/km** και **3,39 Ω/km** για αγωγούς  $4\text{mm}^2$  και  $6\text{mm}^2$  αντίστοιχα. Επειδή τα καλώδια εγκαθίστανται εν μέρει και στο εξωτερικό περιβάλλον, τους θερινούς μήνες η θερμοκρασία λειτουργίας τους  **$70^{\circ}\text{C}$** . Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να γίνει διόρθωση στις τιμές των ωμικών αντιστάσεων για τη θερμοκρασία λειτουργίας βάση του τύπου:

$$R_{70^{\circ}\text{C}} = R_{20^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + \alpha_{20^{\circ}\text{C}} \cdot (\theta_{\text{λειτουργία}} - 20))$$

Εξίσωση 30

όπου  $\alpha_{20} = \mathbf{0,00393}$  για αγωγούς χαλκού και  $\mathbf{0,00403}$  για αγωγούς αλουμινίου. Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση έχουμε:



Αντίσταση καλωδίου R στους 70°C (Ω/km)	
4mm <sup>2</sup>	6,090
6mm <sup>2</sup>	4,056

Πίνακας 9:

Η πτώση τάσης κατά μήκος του καλωδίου δίνεται από τη παρακάτω σχέση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Η τάση συστήματος είναι 467,8V.

$$V_{Drop} = I_{MPP, STC} \cdot R_{70^{\circ}C} (\Omega / km) \cdot L (km)$$

Εξίσωση 31

Διατομή	Πτώση τάσης (V)	Πτώση τάσης (%)
4mm <sup>2</sup>	1.95	0.42
6mm <sup>2</sup>	1.30	0.278

Πίνακας 10

Από τα πιο πάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι τις συνθήκες ικανοποιεί το καλώδιο διατομής 6mm<sup>2</sup>.

- Οι απώλειες ισχύος δίνονται από την παρακάτω σχέση και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Η ισχύς μιας στοιχειοσειράς είναι 4935W<sub>p</sub> σε πρότυπες συνθήκες.

$$P_{LOSS} = I_{MPP, STC}^2 \cdot R_{70^{\circ}C} (\Omega / km) \cdot L (km)$$

Εξίσωση 32

$$P_{LOSS, \%} = P_{LOSS} / P_{nom} \times 100\%$$

Εξίσωση 33

Διατομή	Απώλειες (W)	Απώλειες (%)
<b>4mm<sup>2</sup></b>	1.95	1.97%
<b>6mm<sup>2</sup></b>	1.30	0,74

Πίνακας 11

#### 4.5 Μέγιστη επιτρεπόμενη διαρκής φόρτιση καλωδίου DC

Ο προσδιορισμός του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος σε εγκαταστάσεις καλωδίων Χαμηλής Τάσης γίνεται με τη βοήθεια του προτύπου HD 384.5.523. Στη συγκεκριμένη εγκατάσταση τα καλώδια DC οδεύουν στο μεγαλύτερο μήκος τους εκτός εδάφους και στηρίζονται στο δομικό υλικό (αλουμίνιο) των συστοιχιών. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_o \cdot f_{\theta} \cdot f_n$$

Εξίσωση 34

όπου  $I_o$  η επιτρεπόμενη συνεχής φόρτιση του καλωδίου στους 30°C,  $f_{\theta}$  ο συντελεστής θερμοκρασίας περιβάλλοντος για θερμοκρασίες διάφορες των 30°C και  $f_n$  ο συντελεστής πλήθους κυκλωμάτων ή αγωγών.

Από τα στοιχεία του κατασκευαστή και για θερμοκρασία 30°C, η επιτρεπόμενη συνεχής φόρτιση του καλωδίου για διατομή 6mm<sup>2</sup> είναι **53A**. Επιπλέον, στο σημείο όπου αυτά συγκεντρώνονται για να οδεύσουν στο έδαφος έχουμε συνολικά 3 καλώδια με αντίστοιχο συντελεστή διόρθωσης που δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι **0,70**. Τέλος, η θερμοκρασία που επικρατεί στο χώρο της Φ/Β εγκατάστασης τους θερινούς μήνες (δυσμενέστερη περίπτωση) είναι περίπου 40°C με αντίστοιχο συντελεστή μείωσης **0,91** για καλώδια με μόνωση από ελαστικό. Συγκεντρωτικά, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα του καλωδίου είναι:

$$I = I_o \cdot f_{\theta} \cdot f_n = 53 \cdot 0,91 \cdot 0,70 = 33,8A$$

Το ρεύμα αυτό είναι μικρότερο του  $I_{mpp}$  (8,01A) και η διατομή αυτή είναι κατάλληλη.

Είναι σκόπιμο να γίνει ο αντίστοιχος έλεγχος και για την όδυσή τους στο έδαφος αφού τα καλώδια οδεύουν μέσα σε χαντάκι μέχρι το σημείο όπου βρίσκεται ο αντιστροφάς. Ο τύπος που δίνει το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα είναι:

$$I = I_o \cdot f_{\theta} \cdot f_c \cdot f_i$$

Εξίσωση 35

όπου  $f_c$  συντελεστής που εξαρτάται από την ειδική αγωγιμότητα του εδάφους,  $f_{\theta}$  συντελεστής που εξαρτάται από τη θερμοκρασία του εδάφους και  $f_i$  συντελεστής που εξαρτάται από το πλήθος των καλωδίων. Υποθέτοντας ότι έχουμε κανονική βροχόπτωση στην περιοχή κατασκευής του έργου, το έδαφος θεωρείται υγρό (IEC 60287) και η ειδική θερμική του αντίσταση είναι ίση με  $1 \text{ K}^*\text{m}/\text{W}$ . Από τους πίνακες του προτύπου HD384 ο συντελεστής διόρθωσης  $f_c$  ισούται με **1,18**. Επιπρόσθετα, υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία εδάφους στο βάθος των καλωδίων είναι  $25^{\circ}\text{C}$  ο συντελεστής  $f_{\theta}$  παίρνει τιμή **0,96** για καλώδια με μόνωση από ελαστικό. Τέλος, για όδευση 3 καλωδίων μέσα σε σωλήνα στο έδαφος ο συντελεστής  $f_i$  θεωρείται ίσος με πριν, δηλαδή **0,70**. Επομένως, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα είναι:

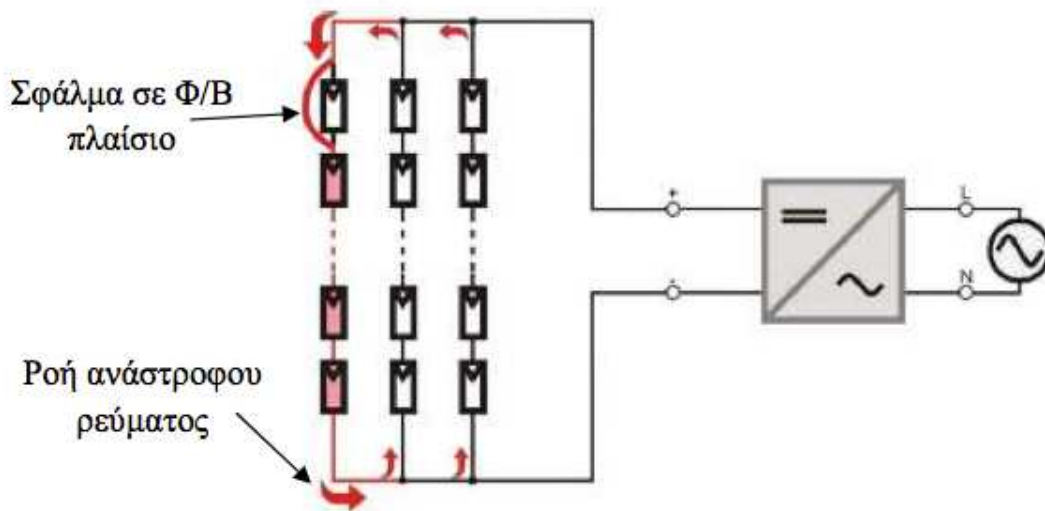
$$I = I_o \cdot f_{\theta} \cdot f_c \cdot f_i = 53 \cdot 0,96 \cdot 1,18 \cdot 0,70 \cong 42,0 \text{ A}$$

Επομένως, το καλώδιο δεν διατρέχει κανένα κίνδυνο λόγω θερμικών περιορισμών.

#### 4.6 Προστασία στη DC πλευρά του αντιστροφά

Μέριμνα πρέπει να ληφθεί στη DC πλευρά του αντιστροφά για την προστασία τόσο του καλωδίου από βραχυκύκλωμα όσο και των Φ/Β πλαισίων από δημιουργία ανάστροφων ρευμάτων. Το μέγιστο ανάστροφο ρεύμα που μπορεί να δεχτεί ένα πλαίσιο δίνεται από στοιχεία του κατασκευαστή και για το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι περίπου **2** φορές το ρεύμα  $I_{sc}$ .

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, ανάστροφο ρεύμα μπορεί να δημιουργηθεί λόγω βραχυκυκλώματος σε ένα ή περισσότερα πλαίσια ενός string της συστοιχίας. Είναι πιθανό, το σύνολο των ρευμάτων βραχυκύκλωσης όλων των strings που λειτουργούν κανονικά να ρέει στη στοιχειοσειρά που παρουσιάζει βλάβη αντί να ρέει προς τον αντιστροφά.



Σχήμα 48: Δημιουργία ανάστροφου ρεύματος στα Φ/Β πλαίσια

Η τιμή του ανάστροφου ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$I_{max} = (n-1) \cdot I_{SC, string}$$

Εξίσωση 36

όπου  $n$  ο αριθμός των παράλληλων στοιχειοσειρών, και είναι και το ρεύμα του διαρρέει και τα καλώδια DC.

Στην παρούσα περίπτωση έχουμε:

$$I_{max} = (3-1) \cdot 8,54 = 17,08A$$

και μέγιστο επιτρεπτό ανάστροφο ρεύμα πλαισίων **2x8,54=17,09A**. Σε συνδυασμό με το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα διαρκούς φόρτισης του καλωδίου που υπολογίσαμε στην προηγούμενη παράγραφο καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν ασφάλειες τήξης σχεδιασμένες για DC ρεύμα που να διακόπτουν το κύκλωμα όταν το ρεύμα ξεπερνά τα **14A**.

Τέλος, για την απομόνωση των συστοιχιών προβλέπεται αποζεύκτης φορτίου ο οποίος είναι ενσωματωμένος στον αντιστροφέα. Έτσι, δεν χρειάζεται μέριμνα για επιπλέον εξοπλισμό.

### Θέματα ασφάλειας δικτύου και απόδοσης αντιστροφέα

Για διασυνδεδεμένα συστήματα είναι αναγκαίο να υπάρχει δυνατότητα αυτόματης απομόνωσης των αντιστροφέων από το δίκτυο διανομής. Η απομόνωση αυτή γίνεται με χρήση αυτόματης διεπαφής απομόνωσης δικτύου όπως περιγράφεται από το πρότυπο DIN VDE 0126 (ENS) του

1999. Έτσι παρέχεται ασφάλεια ανάμεσα στην εγκατάσταση παραγωγής και στο δίκτυο διανομής. Επιπλέον, παρέχεται προστασία τόσο για το προσωπικό κατά τη διεξαγωγή εργασιών συντήρησης όσο και για τους καταναλωτές από απαγορευτικά επίπεδα τάσης και συχνότητας.

Η αυτόματη διεπαφή απομόνωσης αποτελείται από δύο ανεξάρτητα μεταξύ τους συστήματα συνδεδεμένα σε σειρά, κάθε ένα από τα οποία επιτηρεί σε συνεχή βάση την ποιότητα του συνδεδεμένου δικτύου, ελέγχοντας την τάση, τη συχνότητα και τη σύνθετη αντίστασή του. Το παραπάνω πρότυπο έχει αναθεωρηθεί και σήμερα ισχύει το VDE 0126- 1-1 το οποίο προβλέπει διεύρυνση των ορίων ενεργοποίησης της διεπαφής (δηλαδή διεύρυνση των ορίων σύνθετης αντίστασης, τάσης και συχνότητας δικτύου). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη διαθεσιμότητα των αντιστροφών και συνεπώς την αυξημένη απόδοση της συνολικής εγκατάστασης.

#### 4.7 Διασύνδεση αντιστροφών σε πίνακα Χαμηλής Τάσης

Η κάθε ομάδα των αντιστροφών συνδέεται ηλεκτρικά σε πίνακα Χαμηλής Τάσης δημιουργώντας ένα τριφασικό σύστημα. Το μονογραμμικό διάγραμμα των συνδέσεων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Μέσα στον πίνακα προβλέπονται 3 ζυγοί για τη δημιουργία των φάσεων R, S και T αντίστοιχα, ένας ζυγός σύνδεσης όλων των ουδέτερων αγωγών και ένας ισοδυναμικός ζυγός σύνδεσης των γειώσεων. Ο τελευταίος θα συνδέεται με το κεντρικό σύστημα γείωσης του Φ/Β σταθμού.

Η σύνδεση του κάθε αντιστροφέα στον πίνακα γίνεται με καλώδιο Χαμηλής Τάσης τύπου **J1VV-R** και διατομής που θα προσδιοριστεί στη συνέχεια. Το καλώδιο αυτό έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές:

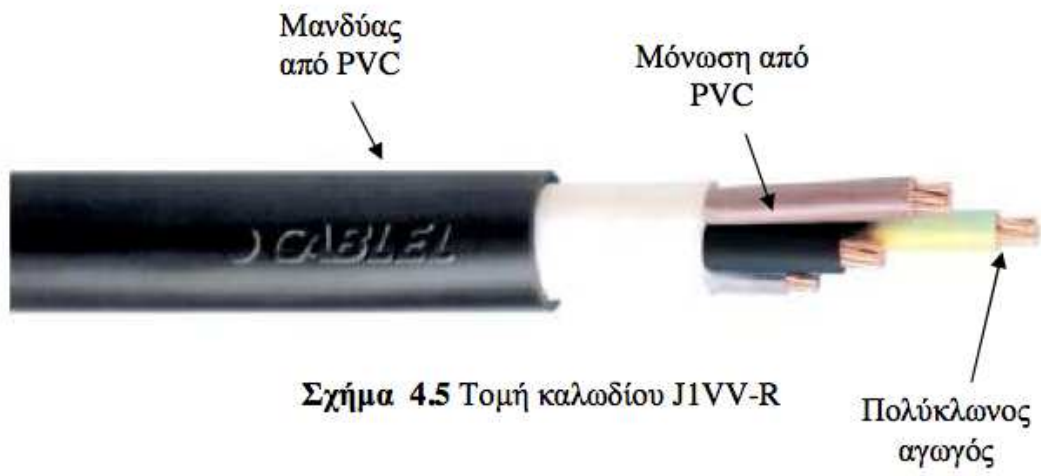
**J:** το καλώδιο χαρακτηρίζεται κατά IEC (IEC 502)

**1:** το καλώδιο είναι κατασκευασμένο για τάσεις λειτουργίας 600/1000V

**V:** η μόνωση του αγωγού είναι από PVC

**V:** ο εξωτερικός μανδύας είναι από PVC

**F:** ο αγωγός είναι πολύκλωνος



Σχήμα 49: Τομή καλωδίου J1VV-R



- $f_{\theta}$  ίσο με **0,87** για θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C και μόνωση από PVC
- $f_n$  ίσο με **0,78** διότι βρίσκονται πάνω σε σχάρες καλωδίων

Επιπλέον γνωρίζουμε το αναμενόμενο ρεύμα που θα διαρρέει το καλώδιο:

$$P_{AC(10kW)} = V_{\pi} \cdot I \cdot \cos(\varphi) \Rightarrow I = 10000 / (230 \times 1) \cong 43,47A$$

$$P_{AC(15kW)} = V_{\pi} \cdot I \cdot \cos(\varphi) \Rightarrow I = 15000 / (230 \times 1) \cong 65,21A$$

Επομένως χρειαζόμαστε καλώδιο που να αντέχει σε διαρκή φόρτιση ίση με:

$$43,47A / (0,87 \cdot 0,78) \cong 64,07A \text{ για τον αντιστροφέα ισχύος } 10kW$$

$$65,21A / (0,87 \cdot 0,78) \cong 96,11A \text{ για τον αντιστροφέα ισχύος } 15kW$$

Το καλώδιο που είναι κατάλληλο για αυτή την εφαρμογή θα έχει 3 αγωγούς (φάση, ουδέτερο και γείωση). Σύμφωνα με τους πίνακες του προτύπου HD 384 η κατάλληλη διατομή καλωδίου είναι **16 mm<sup>2</sup>** με όριο φόρτισης στους 30°C τα **115A** και **10 mm<sup>2</sup>** με όριο φόρτισης στους 30°C τα **86A**.

Λόγω της απόστασης των αντιστροφέων από τον πίνακα το καλώδιο αυτό έχει συνολικό μήκος:

Ομάδα αντιστροφέων		
<b>Inv 1</b>	5x10mm <sup>2</sup>	175 m
<b>Inv 2</b>	5x10mm <sup>2</sup>	200 m
<b>Inv 3</b>	5x10mm <sup>2</sup>	250 m
<b>Inv 4</b>	5x10mm <sup>2</sup>	65 m
<b>Inv 5</b>	5x10mm <sup>2</sup>	100 m
<b>Inv 6</b>	5x10mm <sup>2</sup>	175 m
<b>Inv 7</b>	5x10mm <sup>2</sup>	100 m
Σύνολο (m)		<b>1065</b>

Πίνακας 12: Συνολικό μήκος καλωδίων AC



Για την πτώση τάσης πάνω στο καλώδιο εξετάζουμε το μεγαλύτερο απαιτούμενο μήκος που είναι 20m. Η συνολική διαδρομή του ρεύματος σε μονοφασικό κύκλωμα είναι η διπλάσια της απόστασης του καλωδίου και έτσι έχουμε:

**Για τον αντιστροφέα ισχύος 15kW:**

$$V_{Drop} = I_{nom} \cdot R_{70^{\circ}C} (\Omega/km) \cdot L(km) = 65,21 \cdot 1,38 \cdot 0,01 = 0,58V$$

$$\Delta V_{(\%)} = [1 - (V_{nom} - V_{Drop}) / V_{nom}] \cdot 100\% = [1 - (230 - 0,74) / 230] \cdot 100\% \cdot 0,25\%$$

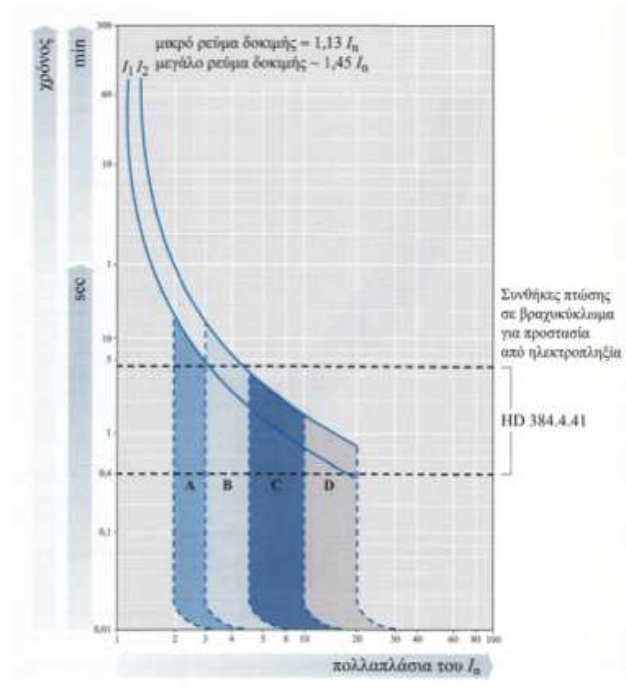
Όμοια για τις απώλειες ισχύος έχουμε:

$$P = I^2 \cdot R (\Omega/km) \cdot L(km) = 65,21^2 \cdot 1,38 \cdot 0,010 = 58,68W$$

$$P (\%) = 58,69 / 15000 \cdot 100\% \cdot 0,39\%$$

#### 4.8 Προστασίες στον πίνακα Χαμηλής Τάσης

Η AC πλευρά κάθε αντιστροφέα μπορεί να απομονωθεί από το υπόλοιπο σύστημα με τη χρήση μικροαυτόματου διακόπτη ισχύος με απόξευξη. Ο διακόπτης αυτός θα είναι διπολικός (απόξευξη φάσης και ουδετέρου) με ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας  $I_n$  μεγαλύτερο του ρεύματος του αντιστροφέα, δηλαδή **50 A**. Ο διακόπτης αυτός τηρεί τις προδιαγραφές IEC/EN 60898. Επίσης, η θερμική επαφή που φέρει προστατεύει το καλώδιο από υπερφόρτιση ή βραχυκύκλωμα και μπορούμε να επιλέξουμε έτσι ώστε να ανταποκρίνεται βάσει της καμπύλης τύπου B, τυπική καμπύλη για εγκαταστάσεις τροφοδοσίας που δεν τροφοδοτούνται κινητήρες.



Σχήμα 51: Σχηματική απεικόνιση και καμπύλες μικροαυτόματου

Τέλος, με τη χρήση διακόπτη φορτίου απομονώνουμε τον πίνακα Χαμηλής Τάσης από το υπόλοιπο κύκλωμα. Το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του πρέπει να είναι μεγαλύτερο των **136,0A** (3·ονομαστικό ρεύμα AC του κάθε αντιστροφέα).



Σχήμα 52: Διακόπτης φορτίου

#### 4.9 Περιγραφή του Υ/Σ (υποσταθμού) ανύψωσης 0,4/20KV

Στον Φ/Β σταθμό δεν θα εγκατασταθούν Υ/Σ (υποσταθμοί) ανύψωσης διότι ο Φ/Β σταθμός που περιγράφεται στην εργασία είναι οριακά κάτω από 100kW. Παρόλα αυτά επειδή είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ενός Υ.Σ ανύψωσης για Φ/Β σταθμούς ανώ των 100kW θα ακολουθήσει μία συνοπτική περιγραφή ενός τυπικού Υ/Σ ανύψωσης 0,4/20kV.

Ο Υ/Σ είναι τύπου LR-73 και κατασκευάζεται από την εταιρεία Schneider-Electric. Αποτελείται από:

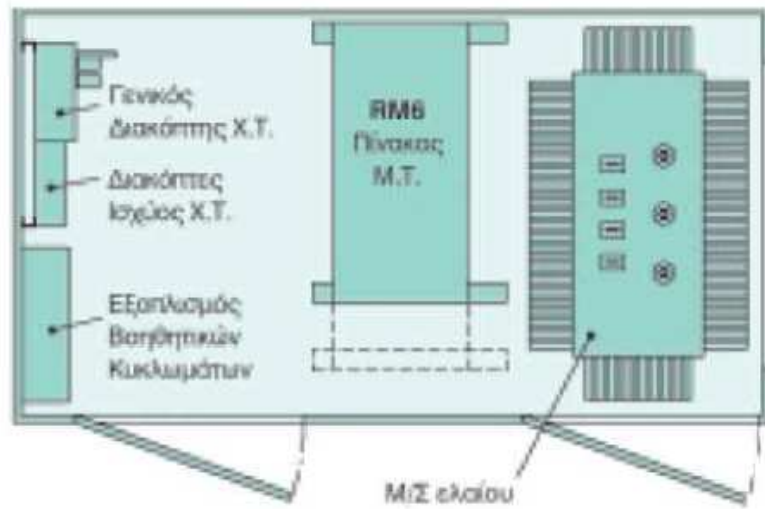
- Περίβλημα κατασκευασμένο από γαλβανισμένη λαμαρίνα
- Το διαμέρισμα Μέσης Τάσης καθώς και τον πίνακα Μέσης Τάσης
- Το διαμέρισμα του Μ/Σ διανομής
- Το διαμέρισμα Χαμηλής Τάσης καθώς και τον πίνακα Χαμηλής Τάσης
- Τις απαραίτητες εσωτερικές συνδέσεις μεταξύ των διαμερισμάτων και των πεδίων

Τα πρότυπα και οι προδιαγραφές βάση των οποίων έχει σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και δοκιμαστεί ο Υ/Σ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πρότυπα κατασκευής, σχεδιασμού και δοκιμών Υ/Σ LR-73	
Κοινές προδιαγραφές για πίνακες Μέσης Τάσης	IEC 60694
Πίνακες Μέσης Τάσης με μεταλλικό περίβλημα (1 έως 52kV)	IEC 60298
Αποζεύκτης και γειωτής	IEC 60129
Διακόπτης φορτίου Μέσης Τάσης AC	IEC 60265
Συνδυασμένοι διακόπτες με ασφάλειες	IEC 60420
Ασφάλειες Μέσης Τάσης	IEC 60282-1
Διαδικασίες δοκιμών Υψηλής Τάσης	IEC 60060
Μετασχηματιστές ισχύος	IEC 60076
Πίνακες Χαμηλής Τάσης	IEC 60439-1
Προκατασκευασμένοι Υ/Σ Μ.Τ./Χ.Τ.	IEC 1330
Δείκτης προστασίας περιβλημάτων	IEC 5329

**Πίνακας 13:**

Στη συνέχεια ακολουθεί φωτογραφία του Υ/Σ καθώς και κάτοψη αυτού.



Σχήμα 53: Χωροθέτηση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του σταθμού



Σχήμα 54: Συνεπτυγμένος Υ/Σ LR 73 της εταιρείας Schneider-Electric

#### 4.9.1 Διαμέρισμα Χαμηλής Τάσης

Εδώ βρίσκεται ο πίνακας Χαμηλής Τάσης πάνω στον οποίο παραλληλίζονται τα κυκλώματα των πινάκων των συστοιχιών. Για την προστασία από βραχυκυκλώματα ή υπερφόρτιση χρησιμοποιούνται διακόπτες ισχύος. Οι διακόπτες ισχύος χρησιμοποιούνται σαν μέσο ζεύξης και έχουν την ικανότητα να διακόψουν ή να ζεύξουν ένα φορτίο τόσο σε συνθήκες ομαλής λειτουργίας όσο και σε συνθήκες βραχυκυκλώματος. Δεν χρησιμοποιούνται όμως για ζεύξεις και αποζεύξεις φορτίου αφού κατασκευάζονται για λίγους κύκλους λειτουργίας.

Ο διακόπτης που θα επιλέξουμε πρέπει να είναι ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας πάνω από 136A, δηλαδή το ονομαστικό ρεύμα των αντιστροφών που σχηματίζουν μια φάση. Επίσης, η τάση λειτουργίας πρέπει να είναι πάνω από 400V. Ενδεικτικά επιλέγεται ο διακόπτης Compact NS 160N της εταιρείας Merlin Gerin με βασικά χαρακτηριστικά:

Χαρακτηριστικά διακόπτη MG Compact NS 160N	
Πρότυπα κατασκευής	IEC 60947-2, EN 60947-2
Αριθμός πόλων	4P
Ονομαστικό ρεύμα $I_n$	160A
Τάση λειτουργίας $U_e$	690AC/500DC
Συστήματα ενεργοποίησης	Θερμικό & Ηλεκτρομαγνητικό
Ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{cu}$	36kA/1sec

Πίνακας 14

Για την παρακολούθηση ηλεκτρικών μεγεθών παρεμβάλλεται πολυόργανο. Το πολυόργανο συνοδεύεται από τους αντίστοιχους μετασχηματιστές τάσης και έντασης με τη βοήθεια των οποίων καταγράφονται οι μετρήσεις. Ενδεικτικά αναφέρεται το πολυόργανο Powerlogic PM710 της Merlin Gerin.

Χαρακτηριστικά πολυόργανου MG Powerlogic PM710
Μέτρηση ρεύματος (I1, I2, I3, In)
Μέτρηση ρεύματος μεγίστου
Μέτρηση πολικής τάσης
Μέτρηση συχνότητας
Μέτρηση συνημιτόνου cosφ
Μέτρηση ενεργού, αέργου και φαινομένης ισχύος και ενέργειας
Μέτρηση αρμονικών ρεύματος
Μέτρηση αρμονικών τάσης

**Πίνακας 15**

Τέλος, όλο το κύκλωμα ασφαρίζεται με έναν αυτόματο διακόπτη ισχύος και οδηγείται στο διαμέρισμα του μετασχηματιστή στη χαμηλή τάση. Ο διακόπτης αυτός είναι επίσης της σειράς Compact της εταιρείας Merlin Gerin και τύπου NS 1000N και έχει χαρακτηριστικά:

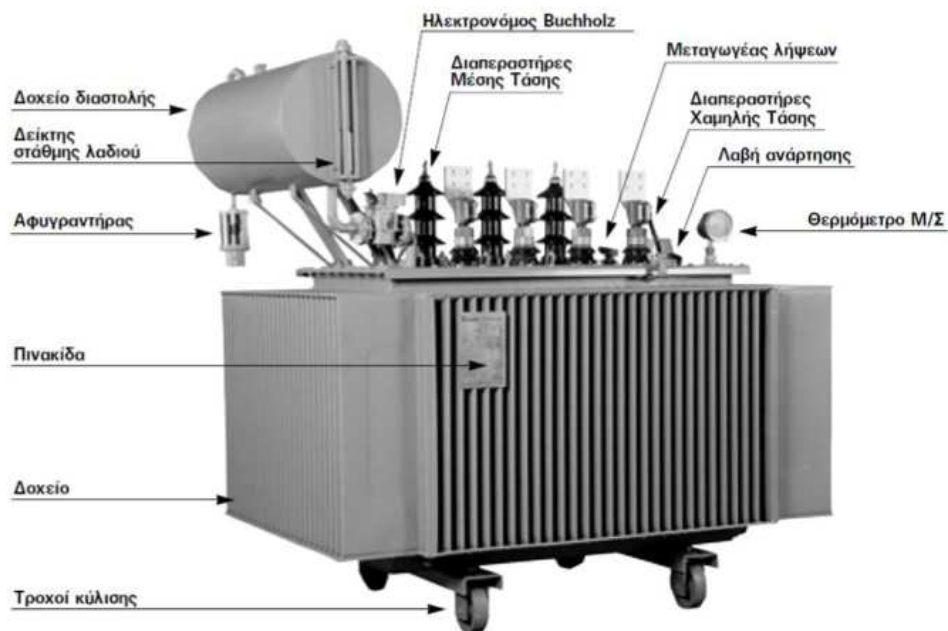
Χαρακτηριστικά διακόπτη MG Compact NS 1000N	
Πρότυπα κατασκευής	IEC 60947-2, EN 60947-2
Αριθμός πόλων	4P
Ονομαστικό ρεύμα In	1000A
Τάση λειτουργίας Ue	690AC
Ρεύμα βραχυκύκλωσης Icu	50kA/1sec
Μονάδα ελέγχου	Micrologic 5.0 από όπου ρυθμίζονται όλες οι παράμετροι προστασίας

**Πίνακας 16**

#### 4.9.2 Διαμέρισμα Μετασηματιστή

Για την ανύψωση της τάσης χρησιμοποιείται ως παράδειγμα μετασηματιστής ανύψωσης 0,4/20kV. Συνήθως οι μετασηματιστές επιλέγονται ελαιόψυκτοι εκτός αν υπάρχουν ειδικές συνθήκες περιβάλλοντος όπως για παράδειγμα απαιτήσεις για αποφυγή μόλυνσης περιβάλλοντος ή εύφλεκτα υλικά και κίνδυνο πυρκαγιάς. Για το ελληνικό σύστημα η συνδεσμολογία τους συνίσταται να είναι Dyn11 ή Dyn5, συνδεσμολογίες αποδεκτές και από τη ΔΕΗ.

Η τάση του επιλέγεται ώστε μελλοντικά να είναι συμβατή με όλα τα δίκτυα Μέσης Τάσης, δηλαδή στα 20kV. Συνίσταται επίσης μεταβλητός λόγος τάσεων ο οποίος επιτυγχάνεται με ειδικό μεταγωγό που αλλάζει τον αριθμό των σπειρών από την πλευρά της Μέσης Τάσης όπου το ρεύμα είναι και μικρότερο. Ο λόγος μετασηματισμού είναι συνήθως  $\pm 2,5$  και  $\pm 5\%$ .



Σχήμα 55: Μετασηματιστής διανομής λαδιού

Τα πρότυπα από τα οποία περιγράφεται ένας μετασηματιστής συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα:



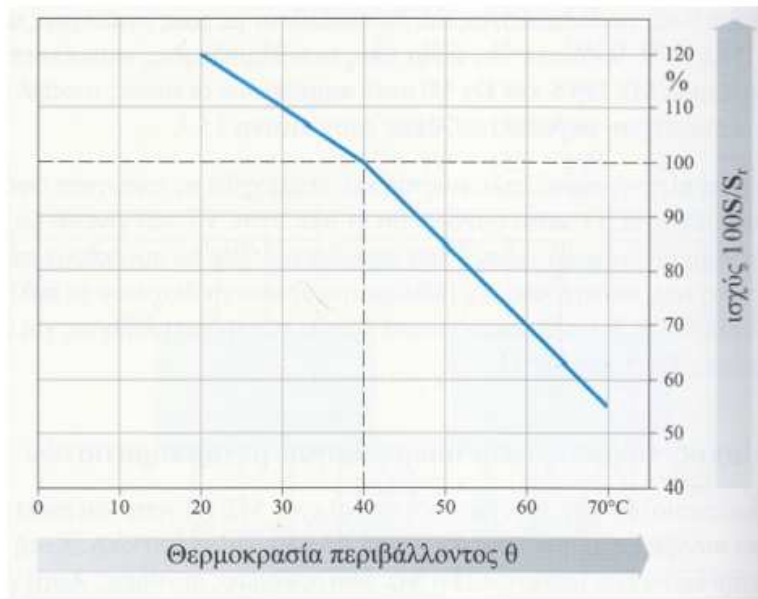
Προδιαγραφές κατασκευής Μετασχηματιστών	
Προδιαγραφή	Περιγραφή
IEC 76-1	M/Σ ισχύος: γενικά
IEC 76-2	M/Σ ισχύος: ανύψωση θερμοκρασίας
IEC 76-3	M/Σ ισχύος: επίπεδα μόνωσης και διηλεκτρικές δοκιμές
IEC 76-5	M/Σ ισχύος: δυνατότητα αντοχής σε βραχυκυκλώματα
IEC 137	Διαπεραστήρες για εναλλασσόμενες τάσεις πάνω από 1000V
IEC 354	Οδηγός φόρτισης M/Σ λαδιού
IEC 726	M/Σ ισχύος ξηρού τύπου
IEC 905	Οδηγός φόρτισης M/Σ ξηρού τύπου

Πίνακας 17

Για τη διαστασιολόγηση της ισχύος του M/Σ λαμβάνουμε υπ' όψιν τόσο το φορτίο που αυτός πρέπει να διαχειριστεί όσο και τις συνθήκες λειτουργίας του. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή υποθέτουμε ότι δε θα γίνει επέκταση της ισχύος του σταθμού. Η ονομαστική ισχύς του M/Σ είναι και η ισχύς μέγιστης επιτρεπόμενης διαρκούς φόρτισής του (VDE0532) για τις ακόλουθες συνθήκες:

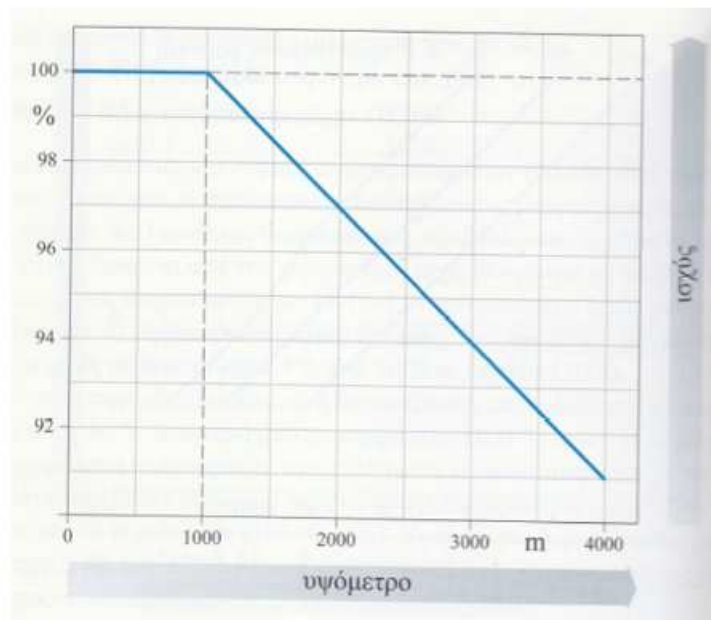
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος μικρότερη των 40°C
- Μέση ημερήσια θερμοκρασία μικρότερη των 30°C
- Μέση ετήσια θερμοκρασία μικρότερη των 20°C
- Υψόμετρο εγκατάστασης μέχρι 1000m.

Οι μέσες ημερήσιες και ετήσιες θερμοκρασίες στην Ελλάδα συνήθως βρίσκονται μέσα στα πιο πάνω όρια. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος όμως μπορεί να διαφέρει από αυτή των 40°C. Τότε η μέγιστη επιτρεπόμενη φόρτιση του M/Σ προσεγγίζεται από το διάγραμμα:



Σχήμα 56: Επί τοις εκατό φόρτιση του Μ/Σ σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η επιτρεπόμενη ισχύς μειώνεται επίσης καθώς αυξάνεται και το υψόμετρο της εγκατάστασης:



Σχήμα 57: Φόρτιση Μ/Σ σε σχέση με το υψόμετρο εγκατάστασης

### **4.9.3 Διαμέρισμα Μέσης Τάσης**

Στον κάθε Υ/Σ ανύψωσης, στο διαμέρισμα Μέσης Τάσης υπάρχουν 3 πεδία: Πεδίο εισόδου ή άφιξης από άλλον Υ/Σ, πεδίο διασύνδεσης και προστασίας του Μ/Σ και πεδίο αναχώρησης προς άλλον Υ/Σ ή τον οικίσκο ελέγχου. Για τις ανάγκες της εργασίας επιλέγεται να γίνει αναφορά στον τύπο πεδίων RM6 της εταιρείας Schneider-Electric. Τα πεδία αυτά είναι εναρμονισμένα με τα ακόλουθα πρότυπα:

Προδιαγραφές κατασκευής πεδίων RM6	
Προδιαγραφή	Περιγραφή
IEC 60694	Κοινές προδιαγραφές για πίνακες Μέσης Τάσης
IEC 62271-200	Μεταλλοεπενδυμένοι πίνακες Μέσης Τάσης
IEC 60265-1	Διακόπτες φορτίου Μέσης Τάσης
IEC 62271-102	Αποζεύκτες και γειωτές AC
IEC 62271-100	Αυτόματοι διακόπτες Μέσης Τάσης
IEC 60529	Βαθμοί προστασίας μεταλλικού περιβλήματος (Κώδικας IP)

Πίνακας 18

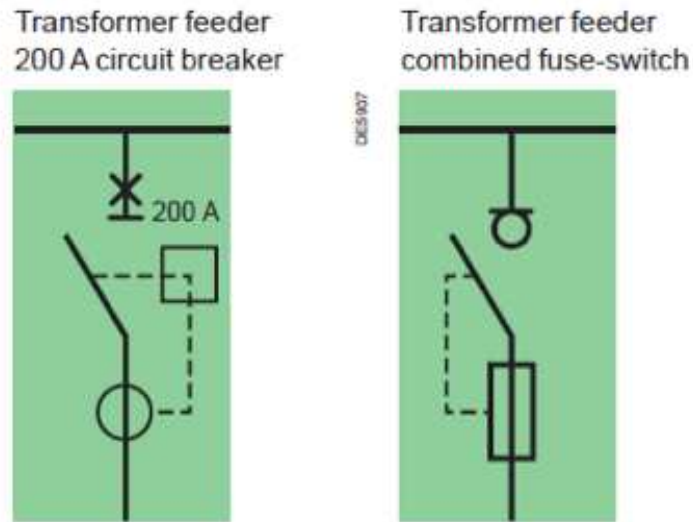


Σχήμα 58: Πεδία διασύνδεσης RM6

**Πεδίο εισόδου (I):** Στο πεδίο αυτό γίνεται άφιξη της γραμμής Μέσης Τάσης από άλλον Υ/Σ ανύψωσης. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή έχουμε άφιξη του καλωδίου Μ.Τ. από τον Υ/Σ Β στον Α και από τον Υ/Σ Δ στον Γ. Αποτελείται από ένα διακόπτη φορτίου γραμμής με δυνατότητα απόζευξης (αποζεύκτης φορτίου) καθώς και από έναν γειωτή. Η διακοπή του κυκλώματος γίνεται μέσα σε θάλαμο σβέσης ο οποίος περιέχει αέριο SF6. Μετά το άνοιγμα του διακόπτη φορτίου, το καλώδιο γειώνεται μέσω της διάταξης του γειωτή. Ο χειρισμός της γείωσης του

καλωδίου μπορεί να γίνει μόνο εφόσον έχει ανοίξει ο διακόπτης. Η τάση λειτουργίας του είναι 24kV και η αντοχή του σε βραχυκύκλωμα είναι 16kA για 1sec.

**Πεδίο διασύνδεσης Μ/Σ (Q):** Στο πεδίο αυτό γίνεται η ζεύξη του Μ/Σ ισχύος καθώς και η προστασία του από τη μεριά της Μέσης Τάσης. Η προστασία του μετασχηματιστή μπορεί να γίνει με δύο τυποποιημένους τρόπους, με ασφάλειες Μέσης Τάσης ή με διακόπτες ισχύος.



Σχήμα 59: Τρόποι προστασίας Μ/Σ στη Μ.Τ.

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ**

## 5.1 Προσδιορισμός ειδικής αντίστασης εδάφους

Οι περιοχές στις οποίες εγκαθίσταται ένα Φ/Β σύστημα το καθιστά ευπαθές σε κεραυνικά πλήγματα με σοβαρό ενδεχόμενο ζημιών στην εγκατάσταση αλλά και κινδύνου της υγείας και της ζωής του προσωπικού. Στο κεφάλαιο αυτό, και λόγω έλλειψης πειραματικών μετρήσεων και προγραμμάτων προσομοίωσης, γίνεται μια γενική αναφορά στη δομή του συστήματος γείωσης και αντικεραυνική προστασίας ενός Φ/Β σταθμού. Τονίζονται ιδιαίτερα τα υλικά που χρησιμοποιούνται ώστε να αποφεύγονται διαβρώσεις και κακές συνδέσεις εντός του χώματος και του σκυροδέματος. Το κεφάλαιο αυτό βασίστηκε στη βιβλιογραφία.

Αποτελεί αρχικό στάδιο μιας μελέτης γείωσης μιας και η γείωση εξαρτάται άμεσα από την ειδική αντίσταση του εδάφους. Επηρεάζεται από τα εξής:

- 1. Είδος του εδάφους:** Για παράδειγμα ελώδες έδαφος έχει πολύ μικρότερη αντίσταση σε σχέση με τον ξηρό βράχο. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές των αντιστάσεων για διάφορα είδη εδαφών.

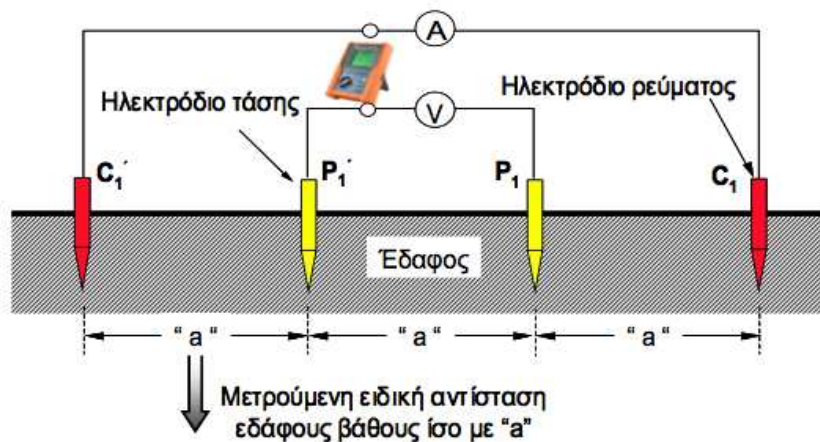
Έδαφος	Αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
Ελώδες υγρό	5-40
Άργιλος πηλός	20-200
Υγρή άμμος	-300
Υγρά χαλίκια	300-600
Ξηρή άμμος, χαλίκια	2000-
Βράχος	2000-

Πίνακας 19: Ενδεικτικές τιμές ειδικής αντίστασης διαφόρων εδαφών

- 2. Υγρασία:** Η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της υγρασίας του εδάφους. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το έδαφος παραμένει υγρό σε όλες τις εποχές του έτους και για βάθος μεγαλύτερο των 0,5m. Για τον λόγο αυτό οι αγωγοί γείωσης εντός των χαντακιών τοποθετούνται σε βάθος μεγαλύτερο ή ίσο με αυτό.
- 3. Θερμοκρασία:** Η μεταβολή της αντίστασης του εδάφους με τη θερμοκρασία φτάνει το 30% κατά τη διάρκεια του έτους. Η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αξίζει να αναφερθεί ότι από Ιανουάριο έως Φεβρουάριο έχουμε την υψηλότερη μεταβολή ενώ από Ιούλιο έως Αύγουστο τη χαμηλότερη.

4. Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10m, έχει παρατηρηθεί άνοδος της αντίστασης κατά έναν παράγοντα 7. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις 0,3/30μsec η αντίσταση θεμελιακού γειωτή ανέρχεται από 3Ω στα 26Ω. Η άνοδος της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο της τάσης. Η αντίσταση σε κρουστικές τάσεις ονομάζεται και κρουστική αντίσταση.
5. Παρουσιάζεται μεγαλύτερη σταθερότητα στην αντίσταση κατά τη διάρκεια του έτους λόγω της μικρής επίδρασης της υγρασίας και της θερμοκρασίας σε μεγάλα βάθη (0,5m~1,0m).

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους χρησιμοποιείται γέφυρα ηλεκτροδίων όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 60: Διάταξη μέτρησης ειδικής αντίστασης εδάφους

Η πιο ακριβής μέθοδος μέτρησης είναι η μέθοδος Wenner (μέθοδος τεσσάρων σημείων). Η διαδικασία απαιτεί την εμφύτευση μικρών ηλεκτροδίων σε βάθος  $b$  σε τέσσερα σημεία του εδάφους που ανήκουν στην ίδια ευθεία. Τα ηλεκτρόδια απέχουν απόσταση  $a$  μεταξύ τους. Στα ακριανά ηλεκτρόδια γίνεται έγχυση ρεύματος προς τη γη ενώ το δυναμικό μετριέται στα δύο εσωτερικά. Το πηλίκο  $V/I$  δίνει τη μέση αντίσταση  $R$  σε  $\Omega$ . Το βάθος έμπηξης δεν πρέπει να είναι μικρότερο του  $1/20$  της απόστασης  $a$  και παράλληλα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 30cm. Η ειδική αντίσταση του εδάφους δίνεται από τη γενική σχέση:

$$\rho = \frac{4\pi \cdot \alpha \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot \alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + b^2}}}$$

Εξίσωση 37



μπορούμε να θεωρήσουμε  $b=0$  από τη στιγμή που  $b \ll a$  οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\rho = 2\pi \cdot \alpha \cdot R$$

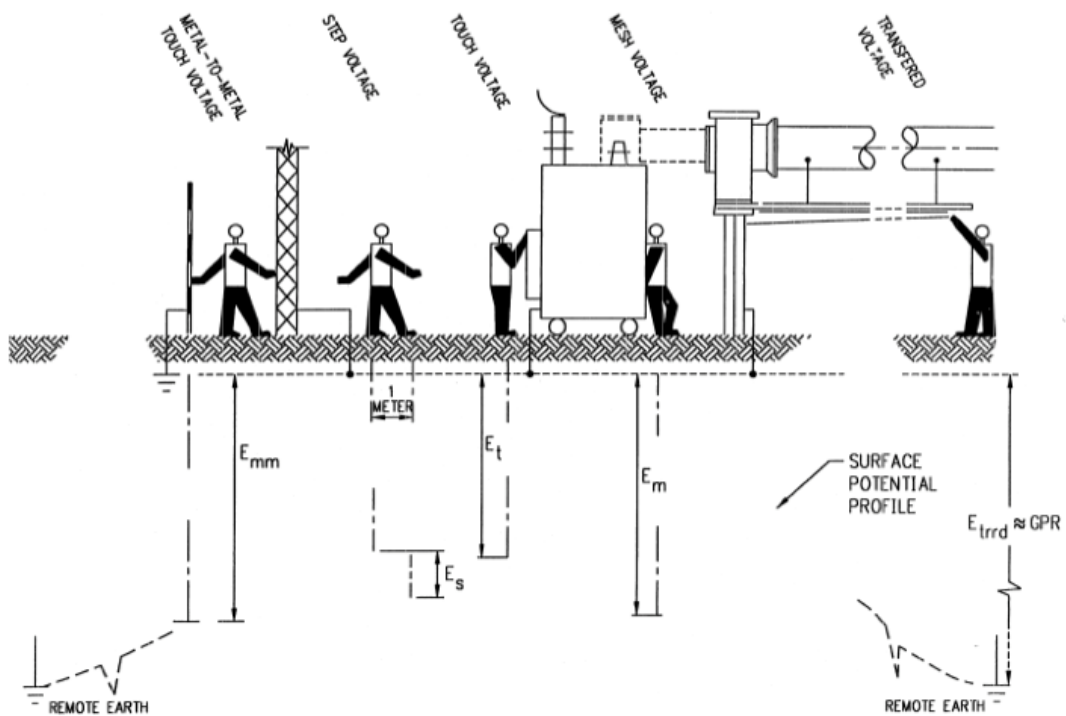
Εξίσωση 38

Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε ισχύουν μόνο για ομοιογενές υπέδαφος και για βάθος ίσο περίπου με  $a$  από το κέντρο της διάταξης των ηλεκτροδίων. Οι μετρήσεις συχνά επαναλαμβάνονται για αποστάσεις πολλαπλάσιες του  $a$  καθώς και για διαφορετικές διευθύνσεις στον χώρο του έργου έτσι ώστε να μπορέσει να κατασκευαστεί στη συνέχεια το μοντέλο της δομής του εδάφους πάνω στο οποίο θα τοποθετηθεί το ηλεκτρόδιο γείωσης.

## 5.2 Βασικά πεδιακά μεγέθη

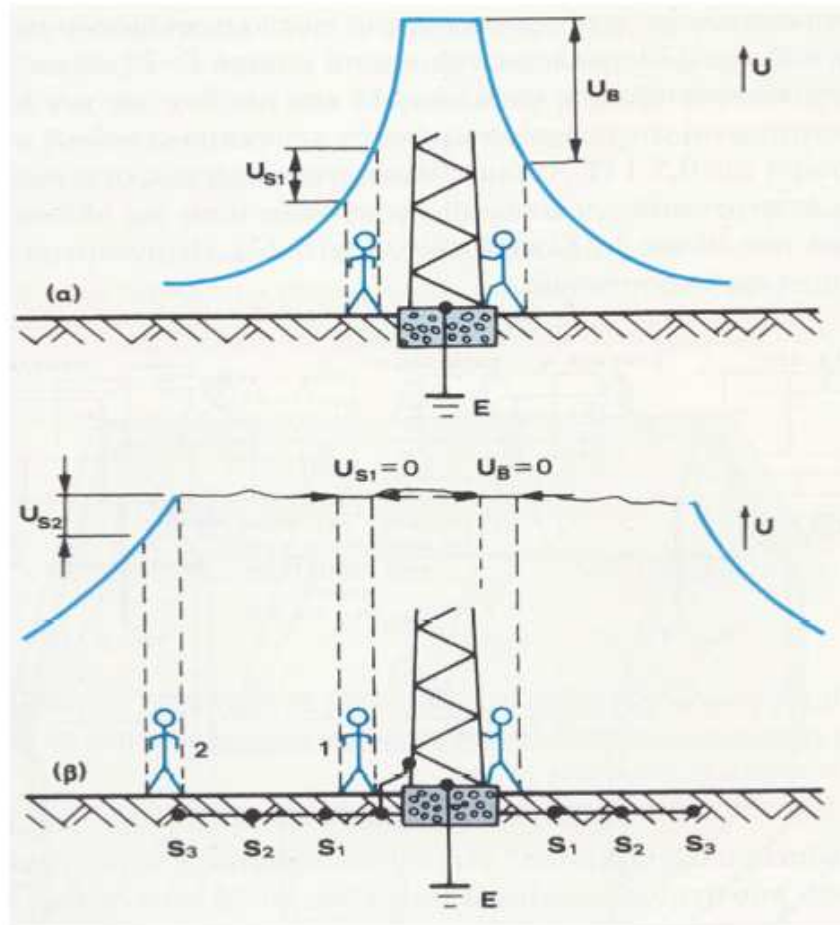
Σε ένα σύστημα γείωσης, η ροή ρεύματος ως προς γη κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος δημιουργεί στην επιφάνεια του εδάφους, μέσα και γύρω από αυτόν, κατανομές δυναμικού οι οποίες μπορεί να είναι επικίνδυνες για προσωπικό και εξοπλισμό αν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα. Στο παρακάτω σχήμα που ακολουθεί ορίζονται τα παρακάτω πεδιακά μεγέθη:

- **Ανύψωση δυναμικού γης GPR (Ground Potential Rise):** είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να φτάσει το δίκτυο γείωσης του υποσταθμού σε σχέση με απομακρυσμένο σημείο γείωσης που μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει το δυναμικό της μακρινής γης (δυναμικό ίσο με μηδέν)
- **Βηματική τάση  $E_s$  (Step Voltage):** είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του εδάφους σε απόσταση 1m και δηλώνει την καταπόνηση ατόμου, χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με μεταλλικά αντικείμενα, λόγω ανοιχτού βηματισμού.
- **Τάση επαφής  $E_t$  (Touch Voltage):** είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ μεταλλικής γειωμένης κατασκευής και σημείου σε απόσταση 1,0m, όπου στέκεται ο άνθρωπος και ακουμπά με τα χέρια του τη γειωμένη κατασκευή.
- **Τάση επαφής βρόχου  $E_m$  (Mesh Voltage):** είναι η δυσμενέστερη τάση επαφής που παρουσιάζεται σε βρόχο του δικτύου γείωσης και συνήθως μεταξύ ενός σημείου της επιφάνειας του εδάφους στο μέσο μεταξύ δύο τελευταίων αγωγών γείωσης και του ίδιου του δικτύου.
- **Μεταφερόμενη τάση  $E_{trrd}$  (Transferred Voltage):** είναι η ειδική περίπτωση της τάσης επαφής όπου μια τάση μεταφέρεται μέσα στον ή έξω από τον υποσταθμό.



Σχήμα 61: Αναπαράσταση βασικών πεδιακών μεγεθών

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω μεγέθη εμφανίζονται σε περίπτωση σφάλματος στο σταθμό, δηλαδή σε περίπτωση κεραυνόπτωσης ή βραχυκυκλώματος. Ο ρόλος του ηλεκτροδίου γείωσης είναι η εξίσωση του δυναμικού της γης κατά τη διάρκεια του σφάλματος ώστε οι τάσεις που θα αναπτυχθούν στην επιφάνεια του εδάφους να μην υπερβαίνουν κάποια προκαθορισμένα όρια (Τα όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής για το ανθρώπινο σώμα καθορίζονται από το πρότυπο IEEE Std 80-2000). Αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό στο σχήμα που ακολουθεί:

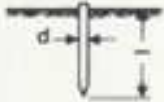

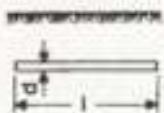

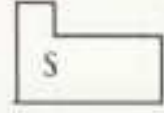
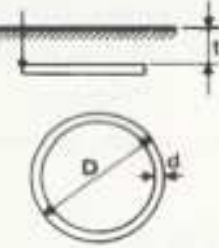


Σχήμα 62: Εξίσωση δυναμικού γης με τη χρήση ηλεκτροδίων

Έστω ότι στον στύλο γίνεται κάποιο σφάλμα (για παράδειγμα κεραυνός) και ρέει ρεύμα προς τη γη. Χωρίς την εξίσωση δυναμικού η τάση επαφής για έναν άνθρωπο που στέκεται 0,7m μακριά από τη βάση του στύλου και ακουμπάει το στύλο, είναι  $U_B$ . Με την τοποθέτηση πλέγματος γείωσης γύρω από το στύλο και σε βάθος 0,5 με 1m η τάση αυτή μπορεί να γίνει αμελητέα.

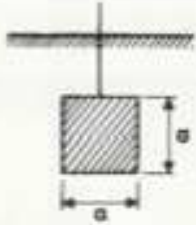
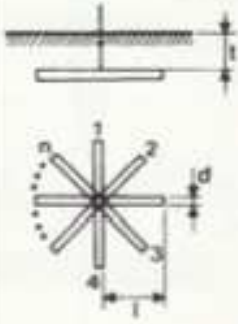
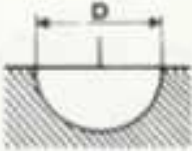

### 5.3 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης και υλικά κατασκευής τους

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι βασικότεροι τύποι ηλεκτροδίων γείωσης:

α/α		Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
1		Πάσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2\pi l_{eff}} \cdot \ln \frac{4l_{eff}}{d}$ $l_{eff} = 1-0,5 \text{ m}$	$R_A \equiv \frac{\rho}{l_{eff}}$
2		Πολύγωνο πασάλων $a \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A = k \frac{1}{n} R_{A1}$ $a/l=3: n=5: k \approx 1,2$ $R_{A1} =$ αντίσταση ενός πασάλου	μπορεί να τεθεί $k=(1 \dots 1,5)$ , ειδικά για $n=10: k=1,25$
3		Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h = 0,5 \dots 1,0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}$	$R_A = \frac{2\rho}{l}$
4		Πλέγμα σε βάθος $0,5-1,0 \text{ m}$ $D = \sqrt{\frac{4b \cdot l}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{lg}$ $lg =$ συνολικό μήκος αγωγού	$R_A = \frac{\rho}{2D}$
5		Θεμελιακή γείωση, $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} S}$	—	$R_A = \frac{2}{\pi} \frac{\rho}{D}$
6		κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \cdot \ln \frac{8D}{d} \cdot \left( 1 + \frac{\ln(2D)/t}{\ln(8D/d)} \right)$	$R_A = \frac{2\rho}{\pi D}$ <sup>1)</sup>

1) Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος  $D=0,33 \cdot U$ , όπου  $U =$  μήκος αγωγού.

Σχήμα 63: Ηλεκτρόδια γείωσης – τύποι αντιστάσεων γειωτών

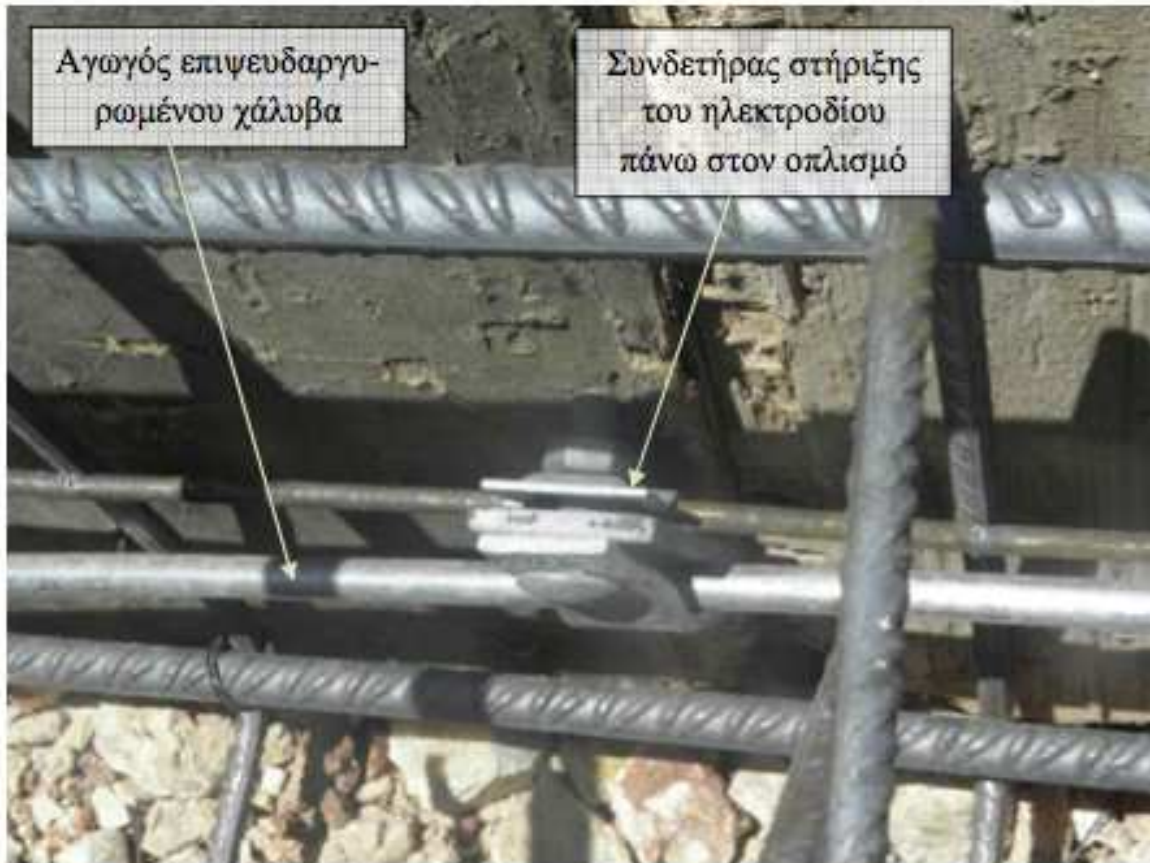
α/α		Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
7		γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m <sup>2</sup> ]	—	$R = \frac{\rho}{4,5a}$ <sup>2)</sup>
8		n = 5	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,27td}$	—
		n = 4	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,25td}$	—
		n = 3	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,22td}$	—
		n = 2	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,09td}$	—
9		ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D}$ <sup>3)</sup>	—
10		σφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{2\pi D}$	—

2) Για πλάκες που δεν είναι τετράγυρες θέτουμε:  $a = \sqrt{S}$ , όπου S = επιφάνεια.  
3) Για ένα γειωτή όγκου V, ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με  $D=1,57 \sqrt[3]{V}$ .

Σχήμα 64: Ηλεκτρόδια γείωσης – τύποι αντιστάσεων γειωτών

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή ολόκληρο το γήπεδο του Φ/Β σταθμού αποτελεί το ηλεκτρόδιο γείωσης της διάταξης, μορφής πλέγματος. Να σημειωθεί εδώ ότι η γείωση προστασίας και η γείωση αντικεραυνικής προστασίας είναι ενιαία. Προβλέπονται επιπλέον χαντάκια τύπου GND που αποτυπώνονται στα σχέδια γείωσης και αντικεραυνικής προστασίας. Επιπλέον, στον στόλο

στήριξης των πλαισίων τοποθετείται θεμελιακή γείωση εντός του οπλισμού του σκυροδέματος. Σε σημεία όπου η τιμή της τάσης επαφής μπορεί να ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια (περίφραξη σταθμού), επιπρόσθετα μέτρα μπορούν να ληφθούν μη τη χρήση γειωτών ράβδου οι οποίες θα συνδέονται και με το πλέγμα.



Σχήμα 65: Τοποθέτηση ηλεκτροδίου γείωσης εντός σκυροδέματος

- **Γειωτής ράβδου:** Μπορεί να είναι σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μιας ίντσας ή μια στρογγυλή ράβδος συμπαγής από γαλβανισμένο χάλυβα ή χαλκό. Η ράβδος καρφώνεται κατακόρυφα ή λοξά και σε βάθος μέσα στο έδαφος. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα για να οδηγείται καλύτερα μέσα στο έδαφος. Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους έμπηξης. Η αντίσταση δεν εξαρτάται σημαντικά από τη πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου. Τέλος, ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από χαλκό ή γαλβανισμένο χάλυβα παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στη διάβρωση.
- **Γειωτής πλέγματος:** Πλέγμα από ηλεκτρόδια ταινίας ή αγωγούς κυκλικής ή άλλης διατομής που τοποθετείται οριζόντια στο έδαφος σε βάθος 0,5m με 1,0m. Το πλεονέκτημα των γειωτών πλέγματος είναι πως οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, πάνω

από το πλέγμα, είναι αμελητέες. Προφανώς όσο πιο αραιό είναι το πλέγμα τόσο οι βηματικές τάσεις αποκτούν σημαντική τιμή.

#### 5.4 Διάβρωση στους γειωτές

Όταν ένα ηλεκτρόδιο τοποθετείται στη γη μπορεί να υποστεί δύο ειδών διαβρώσεις: ιδιοδιάβρωση και διάβρωση επαφής ή ηλεκτροχημική διάβρωση.

- **Ιδιοδιάβρωση:** Παρατηρείται όταν ένα μέταλλο βρίσκεται μόνο του στο έδαφος. Το μέταλλο αντιδρά με το περιβάλλον και βαθμιαία προκαλείται χημική διάβρωση, για παράδειγμα οξείδωση, που εξαρτάται από τον αερισμό του χώματος, την υγρασία του και το βαθμό pH.
- **Διάβρωση επαφής:** Παρατηρείται όταν δύο μέταλλα είναι ενωμένα μεταξύ τους και ενταφιασμένα σε αγώγιμο περιβάλλον. Κάθε μέταλλο αναπτύσσει ηλεκτροχημικό δυναμικό ως προς την άπειρη γη το οποίο εξαρτάται από το μέταλλο και από το περιβάλλον του εδάφους. Από τη στιγμή που τα μέταλλα είναι σε επαφή υπάρχει ροή ρεύματος ιόντων από το αρνητικό προς το θετικό ηλεκτρόδιο. Με τον τρόπο αυτό αφαιρείται μέταλλο από τον ηλεκτραρνητικό γειωτή.

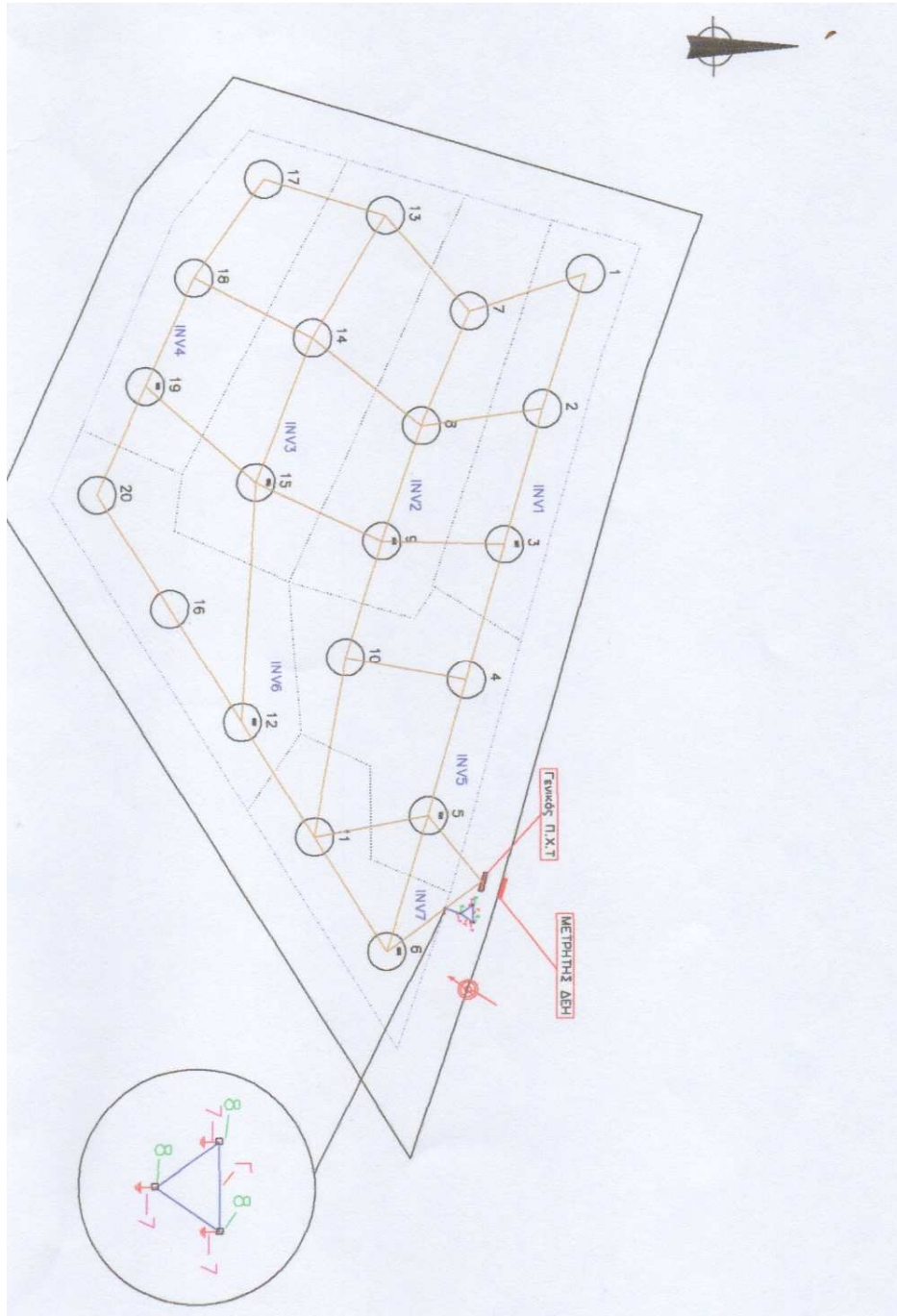
Στην παρούσα εφαρμογή, για τη θεμελιακή γείωση στον στύλο στήριξης των συστοιχιών χρησιμοποιείται γαλβανισμένος (επιψευδαργυρωμένος) χάλυβας διαμέτρου 10mm (Ø10) οποίος είναι ανθεκτικός στη διάβρωση μέσα στο μπετόν. Εντός των χαντακιών οδεύει γαλβανισμένος (επιψευδαργυρωμένος) χαλκός διαμέτρου 8mm (Ø8). Στα σημεία όπου υπάρχει συμβολή χάλυβα και χαλκού, αυτοί συνδέονται εντός του μπετόν με ειδικό σύνδεσμο όπως στο σχήμα.



Σχήμα 66: Συμβολή χάλυβα και χαλκού εντός του σκυροδέματος

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κάτωψη θεμελειακής γείωσης για το Φ/Β πάρκο της εργασίας.





Σχήμα 67

Κατά μήκος των tracker και εγκάρσια θα εγκατασταθεί χάλκινη ή χαλύβδινη ηλεκτρολυτική ταινία 30 x 22 mm στην οποία θα συνδεθούν τα μεταλλικά μέρη των trackers και οι σπλισμοί βάσης των trackers, των αντιστροφών και των πινάκων. Στο σημείο που θα εγκατασταθεί η μετρητική διάταξη της ΔΕΗ θα εγκατασταθεί τριγωνική γείωση με αγωγό 50 mm<sup>2</sup> και

ηλεκτρόδια γειώσεως Cu, Φ14 x 1500 mm, στην οποία θα συνδεθούν τα κιβώτια μέτρησης της ΔΕΗ.

## 5.5 Σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης Φ/Β σταθμών

Λόγω των ελάχιστων απαιτήσεων σε τεχνικό προσωπικό, οι Φ/Β σταθμοί συνήθως έχουν τη δυνατότητα διαχείρισης και παρακολούθησης από απόσταση. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα σύνολο αισθητήρων που τοποθετούνται στα επιμέρους συστήματα του σταθμού. Τα σήματα των αισθητήριων οδεύουν μέσω καλωδίων και οπτικών ινών, συλλέγονται σε ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης σημάτων και στη συνέχεια αποστέλλονται μέσω διαδικτύου ή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας στον χρήστη. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να προσφέρει:

- Αυτονομία στη λειτουργία του σταθμού
- Ελάχιστη παρέμβαση από τον χρήστη
- Αναγνώριση των καταστάσεων συναγερμού και των πιθανών προβλημάτων λειτουργίας
- Περιοδική εκτέλεση διαδικασιών ελέγχου του εξοπλισμού της Φ/Β εγκατάστασης
- Παρακολούθηση, αποθήκευση και διαχείριση τεχνικών παραμέτρων και αυτόματη δημιουργία αναφορών για την εγκατάσταση
- Σύστημα ασφαλείας

Το σύστημα αποτελείται από δύο κύρια μέρη:

- **Υποσύστημα ελέγχου Φ/Β εγκατάστασης:** Περιλαμβάνει τους ελεγκτές και τους αισθητήρες για τη λήψη και τη διαχείριση σημάτων των εποπτευόμενων συσκευών.
- **Κέντρο ελέγχου:** Αποτελείται από κατάλληλο εξοπλισμό και λογισμικό για τη διαχείριση των ληφθέντων σημάτων.

Τέλος, η απεικόνιση των παραμέτρων γίνεται μέσω λογισμικού portal. Οι υπεύθυνοι του σταθμού έχουν πρόσβαση σε αυτό μέσω του διαδικτύου.

Στη συνέχεια περιγράφονται με λεπτομέρεια οι δυνατότητες και οι προσφερόμενες υπηρεσίες του συστήματος:

- **Παρακολούθηση των αντιστροφών:** Ελέγχονται οι ηλεκτρικές παράμετροι τόσο στην DC όσο και στην AC μεριά. Επιπλέον είναι δυνατός ο έλεγχος όλων των καταστάσεων λειτουργίας και σφάλματος που δίνει ο αντιστροφέας.

- **Παρακολούθηση διαμερίσματος Μ/Σ (εάν υπάρχει):** Η παρακολούθηση γίνεται με ειδικούς αισθητήρες πυρανίχνευσης, καπνού και εσωτερικής θερμοκρασίας. Για τον έλεγχο εισόδου νερών απαιτείται η τοποθέτηση αισθητήρα πλημμύρας στο χαμηλότερο σημείο του πατώματος. Τέλος, παρακολουθούνται και οι παράμετροι του ίδιου του μετασχηματιστή, δηλαδή θερμοκρασία, στάθμη και πίεση λαδιού.
- **Παρακολούθηση των διαμερισμάτων Μ/Τ και Χ/Τ (εάν υπάρχει):** Απαιτούνται παρόμοιοι αισθητήρες όπως για την παρακολούθηση του διαμερίσματος των Μ/Σ. Επιπλέον, είναι δυνατή η διασύνδεση των οργάνων μέτρησης καθώς και του ηλεκτρονόμου
- **SEPAM** για απομακρυσμένη διαχείριση των λειτουργιών τους.
- **Παρακολούθηση ηλεκτρικών παραμέτρων στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο:** Γίνεται μέτρηση τάσης, ρεύματος, συχνότητας, ενεργού και άεργου ισχύος και ενέργειας καθώς και του συντελεστή ισχύος. Είναι δυνατή η αποσύνδεση του έργου αν κάποια από τις παραμέτρους λάβει μη επιτρεπτή τιμή. Τέλος, οι τιμές των παραμέτρων αποθηκεύονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (περίοδος 10λέπτου ή μιας ώρας) για μελλοντική δημιουργία αναφορών.
- **Εγκατάσταση μετεωρολογικού σταθμού:** Είναι δυνατή η μέτρηση παραμέτρων όπως εξωτερική θερμοκρασία, θερμοκρασία πλαισίων, ταχύτητα ανέμου και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.
- **Παρακολούθηση και έλεγχος οικίσκων:** Είναι δυνατός ο έλεγχος πρόσβασης στα διαμερίσματα του οικίσκου μέσω μαγνητικών επαφών και συσκευών ανάγνωσης καρτών.
- **Έλεγχος πρόσβασης στο Φ/Β σταθμό:** Μέσω συστήματος ανάγνωσης καρτών και μαγνητικών επαφών.
- **Αναγνώριση καταστάσεων συναγερμού:** Όταν οι τιμές κάποιων παραμέτρων είναι εκτός των κανονικών ορίων. Επιπλέον διατηρείται αρχείο συναγερμών καθώς και αρχείο ενεργειών που έγιναν για την επίλυσή τους.
- **Περιοδικοί έλεγχοι του εξοπλισμού:** Ρουτίνες που τρέχουν ανά τακτά χρονικά διαστήματα και δίνουν πληροφορίες για την γήρανση και την απόδοση του εξοπλισμού.
- **Περιοδικές αναφορές και γραφικές παραστάσεις:** Στατιστικά στοιχεία και γραφήματα επιλεγμένων παραμέτρων που παράγονται ανά τακτικά χρονικά διαστήματα.

## Συμπεράσματα

Η σχεδίαση και κατασκευή ενός Φ/Β σταθμού είναι ένα σύνθετο πρόβλημα με πολλές παραμέτρους που σίγουρα δεν έχει μία μόνο λύση. Η αγορά παρέχει πληθώρα υλικών που επιτρέπει την ανάπτυξη σταθμών με πολλές παραλλαγές. Για τις τοπολογίες που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία μπορούμε να αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αναδείχτηκαν.

- Κάθε συστοιχία αποτελεί και μια αυτόνομη διάταξη που μπορεί να απομονωθεί από τις υπόλοιπες σε περίπτωση σφάλματος. Συνήθως έχουμε τόσες συστοιχίες όσοι και οι αντιστροφείς. Αυξάνεται η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα του σταθμού με άμεση συνέπεια την αύξηση της τελικής παραγωγής
- Άμεση αντικατάσταση του αντιστροφέα σε περίπτωση βλάβης. Δεν χρειάζεται να τεθεί εκτός λειτουργίας μεγάλο τμήμα του σταθμού. Επιπλέον δεν είναι απαραίτητη η πληρωμή ετήσιων συμβολαίων συντήρησης με την εταιρεία κατασκευής των αντιστροφέων
- Ευκολότερος εντοπισμός και επίλυση βλαβών στα πλαίσια χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ειδικών συσκευών κατάδειξης των σφαλμάτων
- Απαιτείται πιο πολύπλοκος ηλεκτρολογικός εξοπλισμός στο τμήμα Χαμηλής Τάσης των Υ/Σ ελέγχου. Χρησιμοποιούνται πίνακες με πολλές αναμονές εισόδου και καθώς και ο απαραίτητος διακοπτικός εξοπλισμός σε κάθε αναμονή.
- Σχετικά απλό δίκτυο χαντακιών όδευσης των καλωδίων

Για τις ανάγκες ενεργειακής εκτίμησης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PVsyst. Η μελέτη βασίστηκε σε δεδομένα (περιορισμένα) που αφορούν την περιοχή της Φλώρινας. Η μελέτη δε μπορεί να θεωρηθεί εκτενής και πραγματοποιήθηκε για να δώσει ενδεικτικά μία εκτίμηση για την ετήσια ενεργειακή παραγωγή του Φ/Β πάρκου. Η εκτιμώμενη παραγωγή είναι **185 MWhr** το χρόνο, περίπου **20%** περισσότερο από την εκτιμώμενη παραγωγή ενός Φ/Β πάρκου με σταθερές βάσεις στήριξης των πλαισίων.

### Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην εργασία αυτή γίνεται μια συνολική προσπάθεια παρουσίασης των βασικών βημάτων σχεδιασμού ενός Φ/Β σταθμού. Αν και ρεαλιστική, δεν είναι δυνατόν να περιγραφούν με μεγάλη λεπτομέρεια όλα τα στάδια σε μία μόνο εργασία. Κατά την άποψή μου, περαιτέρω μελέτη θα μπορούσε να γίνει στους εξής τομείς:

- Μελέτη ρευμάτων βραχυκύκλωσης με ειδικό λογισμικό για την κατάλληλη επιλογή του διακοπτικού εξοπλισμού σε σχέση με την αντοχή τους στο βραχυκύκλωμα

- Μελέτη διαθεσιμότητας του Φ/Β σταθμού και του εξοπλισμού ειδικότερα βάση του προτύπου
- Εκτενής ενεργειακή μελέτη
- Σύγκριση ενεργειακής παραγωγής με σταθερές βάσεις και με βάσεις τύπου tracker.

# **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

[1] **Solar Electricity: A Practical Guide to Designing and Installing Small Photovoltaic Systems**, Simon Roberts, New York: Prentice Hall

[2] **Solar Energy – Fundamentals, Design, Modelling and Applications**, G.N. Tiwari

[3] **Planning and Installing Photovoltaic Systems – A Guide for Installers, Architects and Engineers**, Second Edition, International Solar Energy Society, German Section.

[4] **Βέλτιστος Σχεδιασμός Αυτόνομων Φωτοβολταϊκών Συστημάτων**, Κωνσταντίνος Σώρος, Διδακτορική Διατριβή.

[5] **Φωτοβολταϊκά Συστήματα**, Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, Εκδόσεις ΖΗΤΗ

[6] **Photovoltaic Engineering Handbook**, F. Lasnier and T.G. Ang, Εκδόσεις Adam Hilger

[7] **Solar Electricity, Edited by Tomas Markvart**, Second Edition, Unesco Energy Engineering Series

[8] **Solar Energy Handbook**, Dr. Jan F. Kreider & Dr. Frank Kreider, Mc Graw-Hill

[9] **Συμβολή στο Βέλτιστο Σχεδιασμό και στον Υπολογισμό της Αξιοπιστίας Συστημάτων με Αιολικές, Φωτοβολταϊκές και Θερμικές Πηγές**, Αναστάσιος Μπακουλτσής, Διδακτορική διατριβή

[10] **Practical Handbook of Photovoltaics – Fundamentals and Applications**, Tom Markvart & Luis Castañer.

[11] **Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία**, Κ. Καγκαράκη, Καθηγητή Ε.Μ. Πολυτεχνείου

[12] **Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών**, Πέτρος Ντοκόπουλος, Εκδόσεις ΖΗΤΗ

[13] **Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές**, Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π. , Αθήνα 1997

[14] **Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα Υλικά και Φωτοβολταϊκές Διατάξεις**, Κ.Θ. Δέρβος, Καθηγητής Ε.Μ.Π. , Αθήνα 2007

[15] **Επίδραση Σκίασης και Ρύπανσης στην Ενεργειακή Απόδοση Φωτοβολταϊκού Σταθμού**, Ιάσων Α. Ρουτσολιάς, Διπλωματική Εργασία

[16] **Μοντέλο Ενεργειακής Απόδοσης Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας**, Αλεξάνδρα Δ. Πέππα, Διπλωματική Εργασία 172

[17] **Σεμινάριο “Γειώσεις Δικτύων και Εγκαταστάσεων”**, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδα, 6-10 Οκτωβρίου 1997

[18] **Utility Aspects of Grid Connected Photovoltaic Power Systems**, International Energy Agency, Task V Report IEA PVPS T5-01:1998 December 1998

[19] **Photovoltaics in Buildings: Guide to the Installations of PV Systems**, DTI/Pub URN 02/788

[20] **A Guide to Photovoltaic System Design and Installation**, California Energy Commission, Consultant Report

[21] **Κανονισμός Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων - Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384**

[22] **National Electrical Code 2008**

[23] **Electric Power Substation Engineering**, Edited by John D. McDonald, CRC Press

[24] **Πρότυπο IEC 60364-7-712** Electrical Installations of buildings-Part 7-712: Requirements for Special Installations or Locations-Solar Photovoltaic (PV) Power Supply Systems

## ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

[25] **Optimal PV System Dimensioning with Obscured Solar Radiation**, K. Kalaitzakis, Renewable Energy Vol. 7 No1 pp. 51-56 1996

[26] **A Simple Monitoring Method for Estimation of Shading Loss of Photovoltaic Systems**, Kenji Otani, Koichi Sakuta and Kosuke Kurokawa, EuroSun98 The Second ISES-Europe Solar Congress, Slovenia September 14-17 1998

[27] **Calculating the Position of the Sun**, Robert Walraven, Solar Energy Vol. 20 pp. 393-397 Pergamon Press 1978

[28] **Energy Loss in Photovoltaic Systems**, Wagdy R. Anis and M. Abdulsadek Nour, Journal of Power Sources, 51 (1994) pp. 367-374

[29] **Euro Realo Inverter Efficiency: DC-Voltage Dependency**, F.P. Baumgartner, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain

[30] **Realistic Values of Various Parameters for PV System Design**, Kosuke Kurokawa, Renewable Energy 15 (1998) pp.157-164 Pergamon 173

[31] **Optimal Sizing of Array and Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems**, Jayanta Deb Monto, Yigzaw G. Yohanis, Brian Norton , Solar Energy 80 (2006) pages 1517 – 1539

[32] **Lightning and Surge Protection in Photovoltaic Installations**, Jesús C. Hernández, Pedro G. Vidal and Francisco Jurado, IEEE Transactions on power delivery, Vol 23, No4, October 2008

## ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

[33] <http://www.solar.com.gr> (Εγχειρίδιο Εγκατάστασης Φ/Β Γεννήτριας)

[34] <http://www.leutron.de> (Lightning/Surge Protection for Photovoltaic Systems)

[35] <http://www.schneider-electric.gr>(Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός Χαμηλής και Μέσης Τάσης)

[36] <http://www.electrical-installation.schneider-electric.com> (Οδηγός Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων)

[37] <http://www.abb.com>

[38] [www.fulgor.gr](http://www.fulgor.gr)

[39] <http://www.cablel.gr>

[40] [www.photon.info](http://www.photon.info) (Φ/Β πλαίσια και αντιστροφείς)

[41] <http://elektrotechnica.gr>

[42] [www.positiveenergysolar.com](http://www.positiveenergysolar.com)

[43] [www.solar.com.gr](http://www.solar.com.gr)

[44] <http://www.cres.gr>