

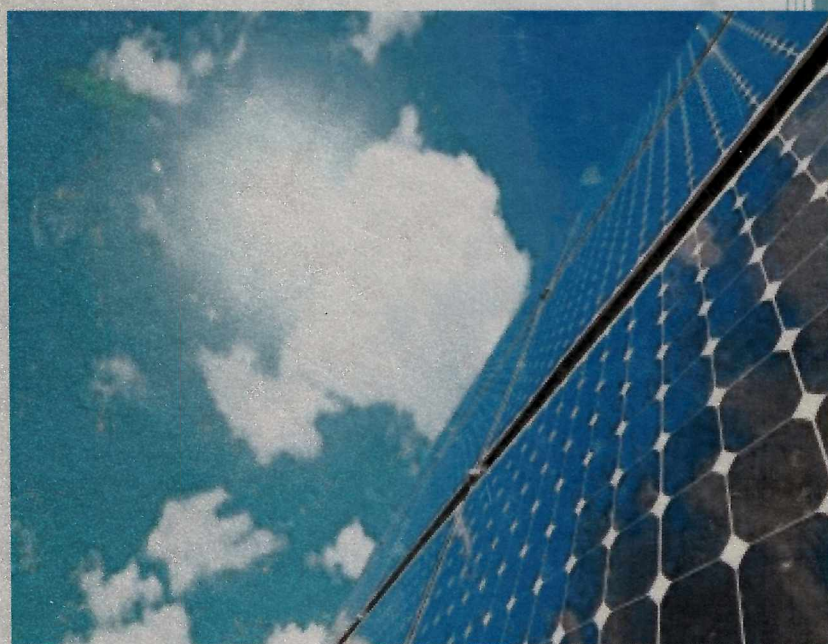
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

# ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ



**ΠΟΤΕΑΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2010





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ**  
**ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 9039/1  
Ημερ. Εισ.: 01-11-2010  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ  
2010  
ΠΟΤ



© 2010 Ποτέας Αναστάσης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).



## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ  
Διδάσκων (Π.Δ. 407/80) Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Ανδρίτσος Νικόλαος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Μποντόζογλου Βασίλης  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας



## **Ευχαριστίες**

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Διδάσκων (Π.Δ. 407/80) κ. Μιχαήλ Βλαχογιάννη, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και για την καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Νικόλαο Ανδρίτσο και Βασίλειο Μπουτόζογλου για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου. Ευχαριστώ την φίλη μου Κατερίνα Παπαλεβιζάκη και τους φίλους μου Δημήτρη Κουλίδη και Χρήστο Τάντο για την πολύτιμη βοήθεια τους. Επίσης, ευχαριστώ την θεία μου Αικατερίνα Ποτέα και τα αδέρφια μου Γεώργιο και Νικόλαο για την ηθική τους υποστήριξη κατά την διάρκεια της προσπάθειάς μου. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Διονύσιο και Σταυρούλα Ποτέα για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία στην μητέρα μου και στον πατέρα μου.

Αναστάσιος Ποτέας



# ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

ΠΟΤΕΑΣ ΑΝΑΣΤΑΣΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ,2010

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βλαχογιάννης Μιχαήλ, Διδάσκων (Π.Δ. 407/80)

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Περίληψη

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η ηλιακή, μπορούν να προσφέρουν εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας. Κάθε μορφή ΑΠΕ έχει τις δικές της ιδιομορφίες και μπορούν να εφαρμοστούν είτε σε μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας είτε σε μικρότερες μονάδες όπως στα κτίρια.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αρχικά εξετάζεται η ηλιακή ακτινοβολία καθώς αποτελεί την γενεσιουργό αιτία του ΦΒ φαινομένου στο οποίο στηρίζεται και η λειτουργία των ΦΒ συστημάτων. Εξετάζονται όλα τα χαρακτηριστικά ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας καθώς παρούσιάζεται και η λειτουργία των ηλεκτρικών συσσωρευτών δεδομένης της σημασίας αποθήκευσης της ενέργειας. Αναλύονται τα διάφορα ΦΒ συστήματα που υπάρχουν με σκοπό την κάλυψη διαφορετικών αναγκών παρουσιάζοντας την σπουδαιότητα τους.

Στη συνέχεια εξετάζεται ο συνδιασμός των ΦΒ συστημάτων με άλλες τεχνολογίες για την καλύτερη και αποδοτικότερη αξιοποίηση της ενέργειας. Παρουσιάζονται τα λεγόμενα συγκεντρωτικά/υβριδικά συστήματα και οι δυνατότες ψύξης με σκοπό την αύξηση της απόδοσης αλλά και την δυνατότητα εκμετάλλευσης του ζεστού νερού. Στη Συνέχεια δίνεται η περιβαλλοντική διάσταση των ΦΒ συστημάτων αναλύοντας όλες τις παραμέτρους. Τέλος γίνεται αναφορά στο νομοθετικό περιβάλλον που υπάρχει αυτή τη στιγμή στην Ελλάδα παρουσιάζοντας τις δυνατότητες επένδυσης.



# Πίνακας Περιεχομένων

## Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

I.	Ιστορική αναδρομή και η εξέλιξη της ενέργειας.....	22
II.	Η Ανάπτυξη των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	23
III.	Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	25
IV.	Συμβατικές Πηγές Ενέργειας.....	27
V.	Παρούσα Ενεργειακή Κατάσταση στην Ελλάδα .....	29
VI.	Προοπτικές Εξέλιξης των ΑΠΕ .....	30
VII.	Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου .....	33

## Κεφάλαιο 2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ..... 35

2.1	Η Ηλιακή ακτινοβολία και η επίδραση της γης.....	35
2.1.1	Ο Ήλιος.....	35
2.1.2	Η Ακτινοβολία του ήλιου .....	35
2.2	Το Φάσμα της Ηλιακής Ακτινοβολίας .....	40
2.3	Ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον ήλιο .....	41
2.4	Εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας.....	43
2.5	Προσανατολισμός του Συλλέκτη .....	45
2.5.1	Στοιχεία προσδιορισμού του προσανατολισμού ενός Συλλέκτη .....	45
2.5.2	Τρόποι στήριξης των συλλεκτών και προσανατολισμός τους.....	46
2.5.2.1	Στήριξη του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης .....	47
2.5.2.2	Στήριξη με δυνατότητα εποχικής ρύθμισης της κλίσης του συλλέκτη.....	50
2.5.2.3	Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη γύρω από έναν ή δύο άξονες.....	50
2.6	Ο Προσανατολισμός του Συλλέκτη ως προς τον αληθή Νότο .....	52

<b>Κεφάλαιο 3 Φωτοβολταϊκή Ηλεκτρική Ενέργεια .....</b>	<b>55</b>
3.1 Ιστορική Αναδρομή.....	56
3.2 Βασικές Εννοιες Στερεάς Κατάστασης.....	60
3.2.1 Ηλεκτρικές Ιδιότητες Των Υλικών .....	60
3.2.2 Δομή & Βασική Θεωρία Ημιαγωγών.....	61
3.2.3 Το Μοντέλο των Ενεργειακών Ζωνών.....	64
3.2.4 Ένωση p-n - Δίοδος Ημιαγωγών.....	65
3.2.5 Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση της Διόδου.....	68
3.3 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο .....	70
3.3.1 Παράγοντες Επίδρασης στην Απόδοση της Φ/Β Μετατροπής.....	72
3.4 Τεχνολογία Φωτοβολταϊκού Στοιχείου .....	74
3.4.1 Τεχνικές Δημιουργίας Επαφών p-n Στοιχείων .....	74
3.4.2 Φωτοβολταϊκα Στοιχεία Πυριτίου (Si).....	78
3.4.2.1 Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων πυριτίου «μεγάλου πάχους» .....	80
3.4.2.2 Φωτοβολταϊκα Υλικά Λεπτών Επιστρώσεων, (thin film) .....	81
3.4.2.3 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία .....	86
3.4.2.4 Άλλες τεχνολογίες .....	86
3.4.2.5 Οργανικά Φωτοβολταϊκά .....	88
3.5 Τα Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά ενός ΦΒ Στοιχείου .....	94
3.5.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού Στοιχείου.....	94
3.5.2 Τάση Ανοικτού Κυκλώματος – Ρεύμα Βραχυκύκλωσης .....	96
3.5.3 Η Καμπύλη I-V ενός ΦΒ Στοιχείου .....	99
3.5.4 Σημείο Λειτουργίας Μέγιστης Ισχύος ( ΣΜΙ ).....	100
3.5.5 Καμπύλη Φόρτου.....	101
3.5.6 Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου των Χαρακτηριστικών των ΦΒ Στοιχείων.....	102
3.5.7 Εξάρτηση των Ηλεκτρικών Χαρακτηριστικών του ΦΒ από την Πυκνότητα ισχύος της	
ΗΜ Ακτινοβολία.....	103
3.5.8 Συντελεστής Ποιότητας ή Παράγοντας Πληρότητας ή Πλήρωσης (fill factor) .....	105
3.5.9 Η Απόδοση του ΦΒ Στοιχείου .....	106

3.5.9 Επίδραση Θερμοκρασίας στα Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά του ΦΒ Στοιχείου .....	108
3.6 Τρόποι Σύνδεσης ΦΒ Στοιχείων .....	110
3.7 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο .....	115
3.8 Απόδοση ΦΒ πλαισίου και Παράγοντες που την Επηρεάζουν .....	116
3.9 Προβλήματα Σκίασης ή Βλάβης ενός ΦΒ Στοιχείου του Πλαισίου .....	119
3.10 Απόσταση μεταξύ Διαδοχικών Συστοιχιών ΦΒ Συγκροτήματος.....	119
3.11 Απόσταση μεταξύ Διαδοχικών Συστοιχιών ΦΒ Συγκροτήματος.....	121
3.12 Αξιολόγηση Τεχνολογιών .....	123
<b>Κεφάλαιο 4 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας ΦΒ Συστημάτων.....</b>	<b>127</b>
4.1 Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές .....	128
4.1.1 Αρχή Λειτουργίας & Είδη Συσσωρευτών .....	128
4.1.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη, όρια λειτουργίας και προστασία των συσσωρευτών. ....	133
4.1.2.1 Χωρητικότητα .....	133
4.1.2.2 Εκφόρτιση και επιτρεπόμενος βάθος εκφόρτισης.....	135
4.1.2.3 Αυτοεκφόρτιση .....	136
4.1.2.4 Φόρτιση.....	136
4.1.2.5 Συντελεστής φόρτισης και απόδοση ισχύος.....	137
4.1.2.6 Έκλυση ατμών, δημιουργία κρυστάλλων διάβρωση στους συσσωρευτές μολύβδου .....	137
4.1.3 Προσαρμογή της λειτουργίας του συσσωρευτή σε ΦΒ σύστημα .....	138
4.1.4 Τεχνικές φόρτισης μπαταρίας .....	142
4.1.5 Μεθόδοι φόρτισης.....	143
4.1.6 Τύποι φόρτιστών:.....	144
4.2 Ηλεκτρονικά Στοιχεία Φωτοβολταϊκών.....	145
4.2.1 Αντιστροφέας.....	145
4.2.1.1 Λειτουργία και τύποι αντιστροφέα .....	146
4.2.1.2 Απόδοση του αντιστροφέα.....	147
4.2.2 Σχεδίαση ρυθμιστή φόρτισης .....	147



<b>Κεφάλαιο 5 Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....</b>	<b>149</b>
5.1 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων .....	150
5.1.1 Απομονωμένα Φ/Β Συστήματα.....	151
5.1.1.1 Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα.....	151
5.1.1.2 Υβριδικά Φ/Β Συστήματα.....	152
5.1.1.3 Μηχανισμοί Ασφαλείας για τα Αυτόνομα Συστήματα .....	154
5.1.2 Φ/Β Συστήματα Συνδεδεμένα στο Δίκτυο .....	155
5.2 Φωτοβολταϊκά Πάρκα με Ηλιοστάτες (solar tracker).....	157
5.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Φ/Β Συστημάτων.....	157
5.4 Εφαρμογές Φωτοβολταϊκών .....	159
5.4.1 Φωτοβολταϊκά Ενσωματωμένα σε Κτίρια .....	161
<b>Κεφάλαιο 6 Συγκεντρωτικά ΦΒ/Θερμικά Συστήματα &amp; Μηχανισμοί Ψύξης.....</b>	<b>172</b>
6.1 Συγκεντρωτικά Συστήματα .....	173
6.1.1 Εισαγωγή .....	173
6.1.2 Βασικοί Τύποι Συγκεντρωτικών Μέσων .....	174
6.1.2.1 Τύποι Οπτικών Μέσων.....	174
6.1.2.2 Τύποι Συστημάτων Παρακολούθησης του Ήλιου (SOLAR TRACKERS).....	177
6.1.3 Τύποι Ηλιακών Συγκεντρωτικών Συστημάτων.....	180
6.1.3.1 Κυλινδροπαραβολικά Συστήματα.....	182
6.1.3.2 Συστήματα Ηλιακών Πύργων Ισχύος .....	185
6.1.3.3 Παραβολικά Συστήματα Σημειακής Εστίας (Συστήματα Δίσκου/Μηχανής) .....	188
6.1.3.4 Συστήματα FRESNEL .....	190
6.2 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CPV/T & ΤΡΟΠΟΙ ΨΥΞΗΣ.....	193
6.2.1 Ψύξη με εξάτμιση .....	195
6.2.2 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά συστήματα συγκέντρωσης (CPV) .....	196
6.2.2.1 Συγκεντρωτικό Υβριδικό Σύστημα POWER SPAR .....	198
6.2.2.2 Συγκεντρωτικό Υβριδικό Σύστημα ABSOLICON X10.....	200
6.2.2.3 Κατηγορίες/Έρευνα ΦΒ Συστημάτων Συγκέντρωσης .....	202
6.2.3 Σωλήνες Θερμότητας .....	203

6.2.3.1	Κατασκευαστικά Στοιχεία των Σωλήνων Θερμότητας.....	204
6.2.3.2	Υλικά Σωλήνων Θερμότητας.....	204
6.2.3.3	Ρευστά Λειτουργίας βάση των Υλικών του Σωλήνα Θερμότητας.....	205
6.2.4	Μέθοδος Υδροψύξης (Άμεση Ψύξη).....	206
6.2.4.1	Εισαγωγή στα Υβριδικά ΦΒ Συστήματα Νερού.....	206
6.2.4.2	Βασικές Διατάξεις ΦΒ/Θ Συλλεκτών Νερού.....	208
6.2.4.3	Περιορισμοί και Παραδοχές Υβριδικών ΦΒ/Θ Συστημάτων.....	210
6.2.4.4	Παράγοντες που Επηρεάζουν την Απόδοση των ΦΒ/Θ Συστημάτων .....	212
	ΦΒ/Θ Συλλέκτες με Χρήση Καλύμματος .....	213
	Επίδραση της Ροής Μάζας του Εργαζόμενου Ρευστούς .....	217
	Γεωμετρία και Διαστάσεις του Συλλέκτη Απορρόφησης .....	222
	Θερμική Αγωγιμότητα του Απορροφητή με το Ρευστό .....	222
	Επίδραση Ανάλογα με το Σχέδιο.....	222
	Επίδραση από τον Τύπο του Κελιού .....	223
	Επίδραση από τα Συστήματα Συγκέντρωσης της Ηλιακής Ακτινοβολίας .....	224
<b>Κεφάλαιο 7 Περιβαλλοντικά Θέματα .....</b>		<b>226</b>
7.1	Περιβαλλοντικά Θέματα & Επιπτώσεις ΑΠΕ.....	228
7.1.1	Ανάλυση Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων .....	228
7.1.2	Περιεχόμενο Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων.....	229
7.1.3	Κατηγορίες Επιπτώσεων.....	230
7.2	Περιβαλλοντικά Θέματα Φωταβολταϊκών Συστημάτων .....	232
7.2.1	Ανάλυση Κύκλου Ζωής (I.CA) - Σύγκριση με Θερμοηλεκτρικό Σταθμό .....	202
7.3	Θεσμικοί Φορείς της Αγοράς Ενέργειας.....	207
<b>Κεφάλαιο 8 Νομοθετικό &amp; Επενδυτικό Περιβάλλον .....</b>		<b>247</b>
8.1	Νομοθετικές Ρυθμίσεις .....	248
8.2	Επενδύσεις για Οικιακά Εμπορικά και Βιομηχανικά Συστήματα.....	252
8.2.1	Οικιακά Συστήματα .....	252
8.2.2	Μικρές Εφαρμογές έως 10 KMw σε Στέγες Επιχειρήσεων .....	253
8.2.3	Μικρές Εφαρμογές έως 10 kWp σε Στέγες Κτιρίων του Δημοσίου και μη .....	254

8.2.4 Εμπορικές-Βιομηχανικές Στέγες.....	255
8.2.5 Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί επί Εδάφους.....	255
8.2.6 Παλιές Αιτήσεις για Φωτοβολταϊκούς Σταθμούς .....	256
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	257
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>259</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1: Ενδεικτικές τιμές γωνιών κλίσης σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη .....	49
Πίνακας 2-2: Απόδοση φωτοβολταϊκών σε διάφορες κλίσεις και προσανατολισμούς.....	54
Πίνακας 3-1: Οι κυριότεροι σταθμοί στην εξέλιξη των φωτοβολταϊκών .....	59
Πίνακας 3-2: Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών .....	15
Πίνακας 6.1: Βασικά χαρακτηριστικά συστημάτων πύργου ισχύος .....	15
Πίνακας 6.2 Απαιτήσεις ψύξης των ΦΒ κυψελών συγκέντρωσης .....	15
Πίνακας 6.3 Συγκεντρωτικά στοιχεία μεθόδων ψύξης που εφαρμόστηκαν στις κατηγορίες των CPV .....	15
Πίνακας 6.4 : Τιμές θερμικώνηλεκτρικών αποδόσεων διαφόρων σχεδιαστικών τύπων ΦΒ/Θ συσκευών.....	15
Πίνακας 7.1: Περιβαλλοντικά Θέματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων .....	15
Πίνακας 7.2: βασικά χαρακτηριστικά του Κύκλου Ζωής ενός Λιγνιτικού Σταθμού .....	15
Πίνακας 7.3: εκπομπές ρύπων μανάδων ΔΕΗ .....	15
Πίνακας 7.4: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις λιγνίτη σε σχέση με τις ΑΠΕ .....	15
Πίνακας 7.5: Αποφυγή εκλυόμενων ρύπων (σε gr) ανά ηλιακή ακτινοβολία.....	15
Πίνακας 8.1: Τιμές Πώλησης Κιλοβατώρας .....	15



## Κατάλογος Σχημάτων

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

Σχήμα 1.1: Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	24
Σχήμα 1.2: Ημερήσιες Τιμές του Ηλιακού Δυναμικού στον Ελλαδικό Χώρο .....	24
Σχήμα 1.3: Παραγωγή Ηλεκτρισμού στην Ελλάδα ανά τύπο Μονάδων (2007) .....	29
Σχήμα 1.4: Ενεργειακό Ισοζύγιο .....	29
Σχήμα 1.5: Ετήσιο ποσό της Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	30
Σχήμα 1.6: Νέες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις ανά έτος και ανά χώρα .....	31
Σχήμα 1.6: Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου .....	33

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

Σχήμα 2.1: Η Περιφορά της Γης γύρω από τον Ηλιο .....	35
Σχήμα 2.2: Συνιστώσες της Ηλιακής Ακτινοβολίας .....	36
Σχήμα 2.3: Άμμεση και Διάχυτη Ακτινοβολία .....	36
Σχήμα 2.4: Προσπίπτουσα Ακτινοβολία σε ένα Συλλέκτη .....	37
Σχήμα 2.5: Ημερήσια Μεταβολή της Πυκνότητας Ισχύος των Συνιστωσών της Ηλιακής Ακτινοβολίας, κατά μια Αίθρια Ημέρα .....	37
Σχήμα 2.6: Χάρτης Ετήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας των Χωρών της Ευρώπης .....	38
Σχήμα 2.7: Ετήσια Ποσότητα Ενέργειας .....	39
Σχήμα 2.8: Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εκφρασμένη σε kWh .....	39
Σχήμα 2.9: Το σφαιρικό, το απευθείας και το AM0 φάσμα αναφοράς .....	40
Σχήμα 2.10: Το μήκος L που διανύουν οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα πάχους H και η ζενίθια γωνία z. ....	40
Σχήμα 2.11: Καταγραφή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας .....	42

<b>Σχήμα 2.12:</b> Παγκόσμιος χάρτης κατανομής των τιμών της μέσης ετησίως ημερήσιας πυκνότητας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντιο επίπεδο, σε kWh/m <sup>2</sup> d .....	42
<b>Σχήμα 2.13:</b> Συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας.....	44
<b>Σχήμα 2.14:</b> Παράδειγμα τόπου T, πάνω στην επιφάνεια της γης .....	46
<b>Σχήμα 2.15:</b> Η γωνία θ, μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και της κάθετης στο συλλέκτη .....	46
<b>Σχήμα 2.16 :</b> Συλλεκτικές επιφάνειες με διαφορετικούς τρόπους στήριξης .....	47
<b>Σχήμα 2.17:</b> Τρόποι ρύθμισης του Συλλέκτη .....	48
<b>Σχήμα 2.18:</b> Παραγόμενη ισχύς από μία συστοιχία με και χωρίς σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου.....	52
<b>Σχήμα 2.17:</b> Τρόποι ρύθμισης του Συλλέκτη .....	48
<b>Σχήμα 2.17:</b> Τρόποι ρύθμισης του Συλλέκτη .....	48

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

<b>Σχήμα 3.1:</b> δομή ημιαγωγών .....	15
<b>Σχήμα 3.2:</b> Επίπεδη απεικόνιση του πλέγματος του πυριτίου.....	15
<b>Σχήμα 3.3:</b> Μετακίνηση ηλεκτρονίων ανάμεσα στους δεσμούς .....	15
<b>Σχήμα 3.4:</b> Απεικόνιση των ιδανικών αποδόσεων των πιο σημαντικών φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	16
<b>Σχήμα 3.5:</b> Ηλεκτρονιακή απεικόνιση (As) & (B) .....	15
<b>Σχήμα 3.6:</b> Σχηματική απεικόνιση ένωσης p-n .....	21
<b>Σχήμα 3.7:</b> Παράδειγμα της μεταβολής της συγκέντρωσης των οπών (p) και των ελεύθερων ηλεκτρονίων (n) κατά μήκος μιάς επαφής p-n, σε κατάσταση ισορροπίας .....	22
<b>Σχήμα 3.8:</b> Σχηματική παράσταση συγκέντρωσης φορέων .....	15
<b>Σχήμα 3.9:</b> Συνδεσμολογία ορθής και ανάστροφης πόλωσης .....	15
<b>Σχήμα 3.10:</b> Διάγραμμα I-V της διόδου .....	15
<b>Σχήμα 3.11:</b> Συσκευή multijunction.....	15

<b>Σχήμα 3.12:</b> Αντιστοιχία κυττάρων multijunction με το μήκος κύματος.....	15
<b>Σχήμα 3.13:</b> Μηχανισμός εκδήλωσης ΦΒ φαινομένου.....	15
<b>Σχήμα 3.14:</b> Φάσμα ακτινοβολίας ανάλογα με το υλικό του φωτοβολταϊκού κυττάρου .....	15
<b>Σχήμα 3.15:</b> Διάγραμμα ροής εργασιών παραγωγής ηλεκτρονικά καθαρού πυριτίου με την μορφή κυλίνδρου, με πρώτη ύλη από άμμο. ....	15
<b>Σχήμα 3.16:</b> Μέθοδοι παρασκευής ενός καθαρού ημιαγωγού .....	15
<b>Σχήμα 3.17:</b> Φέτες πυριτίου (wafers).....	15
<b>Σχήμα 3.18:</b> (α) Δοχείο σχηματισμού κρυστάλλου πυριτίου (β) Κύλινδρος πυριτίου.....	15
<b>Σχήμα 3.19:</b> Η σειρά της δημιουργίας του κρυστάλλου.....	15
<b>Σχήμα 3.20:</b> Μέθοδος της επιπλέουσας ζώνης .....	15
<b>Σχήμα 3.21:</b> Υλικά κατασκευής Φ/Β κυττάρων σε παγκόσμια κλίμακα.....	15
<b>Σχήμα 3.22:</b> Απεικόνιση επιφανειών CIS .....	15
<b>Σχήμα 3.23 :</b> Απεικόνιση Τελουριούχου Καδμίου (CdTe) .....	15
<b>Σχήμα 3.24:</b> Gratzel cells .....	15
<b>Σχήμα 3.25:</b> Ένα παραδοσιακό ηλιακό κύτταρο & βιομημητικό κύτταρο .....	15
<b>Σχήμα 3.26:</b> Σχηματική απεικόνιση ενός γενικού ηλιακού κυττάρου που είναι ευαισθητοποιημένο σε χρωστικές ουσίες .....	15
<b>Σχήμα 3.27:</b> οργανική διάταξη ΦΒ .....	15
<b>Σχήμα 3.21:</b> Υλικά κατασκευής Φ/Β κυττάρων σε παγκόσμια κλίμακα.....	15
<b>Σχήμα 3.22:</b> Απεικόνιση επιφανειών CIS .....	15
<b>Σχήμα 3.23 :</b> Απεικόνιση Τελουριούχου Καδμίου (CdTe) .....	15
<b>Σχήμα 3.24:</b> Gratzel cells .....	15
<b>Σχήμα 3.25:</b> Ένα παραδοσιακό ηλιακό κύτταρο & βιομημητικό κύτταρο .....	15
<b>Σχήμα 3.26:</b> Σχηματική απεικόνιση ενός γενικού ηλιακού κυττάρου που είναι ευαισθητοποιημένο σε χρωστικές ουσίες .....	15



Σχήμα 3.27: Μέθοδος της επιπλέουσας ζώνης $\epsilon$ .....	15
Σχήμα 3.28: οργανική διάταξη ΦΒ .....	15
Σχήμα 3.29: εύκαμπτα φβ στοιχεία .....	15
Σχήμα 3.30 : Επαφή p-n .....	15
Σχήμα 3.31: (α) Απλό και (β) πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου.....	15
Σχήμα 3.32: Επίδραση της σε σειρά αντίστασης $R_s$ και της παράλληλα εμφανιζόμενης $R_{sh}$ , σε ΦΒ .....	15
Σχήμα 3.33: Ανεστραμμένη I-V ΦΒ στοιχείου .....	15
Σχήμα 3.34: Ανεστραμμένη καμπύλη I-V στο τεταρτημόριο που το ΦΒ στοιχείο παρέχει ενέργεια. ....	15
Σχήμα 3.35: Χαρακτηριστική I-V συναρτήση ηλιακής ακτινοβολίας .....	15
Σχήμα 3.36: Μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκύκλωσης ενός ΦΒ .....	15
Σχήμα 3.37: Αλλαγή της χαρακτηριστικής I-V σε σχέση με αυξημένη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. ....	15
Σχήμα 3.38: Αλλαγή της χαρακτηριστικής I-V σε σχέση με αυξημένη θερμοκρασία στοιχείου.....	15
Σχήμα 3.39: γραφική απεικόνιση για τον προσδιορισμό του παράγοντα πλήρωσης .....	15
Σχήμα 3.40: Αλλαγή της χαρακτηριστικής I-V σε σχέση με αυξημένο συντελεστή ποιότητας.....	15
Σχήμα 3.41: Αποδόσεις ΦΒ στοιχείων .....	15
Σχήμα 3.42: Εξάρτηση της απόδοσης $\eta$ και της μέγιστης ισχύος, $P_m$ .....	15
Σχήμα 3.43: Διάγραμμα ροής ενέργειας κατά τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ΦΒ ενέργεια.....	15
Σχήμα 3.44: Μεταβολή της καμπύλης I-V με την αύξηση της θερμοκρασίας.....	15
Σχήμα 3.45: Σύνδεση σε σειρά.....	15
Σχήμα 3.46: Σύνδεση παράλληλα .....	15
Σχήμα 3.47: Τυπικές καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες εν σειρά .....	15
Σχήμα 3.48: Τέσσερις ηλιακές κυψέλες συνδεδεμένες εν σειρά.....	15
Σχήμα 3.49: Καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα .....	15

Σχήμα 3.50: Μία, δύο, και τρεις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα.....	15
Σχήμα 3.51: Μία, δύο, και τρεις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα.....	15
Σχήμα 3.52: Κάλυψη επιφάνειας πλαισίου από ΦΒ κυψέλες .....	15
Σχήμα 3.53: Διάγραμμα Sankey για τη ροή ενέργειας σε ΦΒ πλαίσιο .....	15
Σχήμα 3.54: Διάταξη φ/β στοιχείων σε σειρά με ένα σκιαζόμενο .....	15
Σχήμα 3.55: Μερική φυσική σκίαση φωτοβολταϊκού πλαισίου μονοκρυσταλλικού πυριτίου. ....	15
Σχήμα 3.56: Σύγκριση της απόδοσης φβ πλαισίων όταν αυτά σκιάζονται μερικώς ή καθόλου.....	15
Σχήμα 3.57: Σκίαση από γειτονικά φωτοβολταϊκά πλαίσια. ....	15
Σχήμα 3.58: Η καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης $a$ ανάμεσα στις γειτονικές σειρές των ηλιακών συλλεκτών μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας, προς την επικάλυψη του ύψους του $u$ , σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος του .....	15

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

Σχήμα 4.1: Κυψελίδα συσσωρευτή .....	15
Σχήμα 4.2: Λειτουργία συσσωρευτή μόλυβδου – οξέος .....	15
Σχήμα 4.3: Επί τις εκατό ποσοστιαία μεταβολή της χωρητικότητας για συσσωρευτές μολύβδου. ....	15
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα cell voltage - SOC και επίπεδα τάσης εκλύσεως αερίων για συσσωρευτή PbSb.....	15
Σχήμα 4.5: Ισοδύναμο κύκλωμα συσσωρευτή μολύβδου .....	15
Σχήμα 4.6: I-V χαρακτηριστική συσσωρευτή σε τρία διαφορετικά SOC. ....	15
Σχήμα 4.7: Κοινό διάγραμμα των χαρακτηριστικών I-V .....	15
Σχήμα 4.8: Τυπική διάταξη αντιστροφέα. ....	15
Σχήμα 4.9: Λειτουργία συσσωρευτή μόλυβδου – οξέος .....	15

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>**

Σχήμα 5.1: Κατηγορίες και λειτουργία ΦΒ συστημάτων.....	15
Σχήμα 5.2: Αυτόνομο ΦΒ σύστημα .....	15
Σχήμα 5.3: ΦΒ υβριδικό σύστημα.....	15

Σχήμα 5.4: ΦΒ σύστημα συνδεδεμένο στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο .....	15
Σχήμα 5.5: Τοποθέτηση Φ/Β σε στέγη παλαιού σπιτιού.....	15
Σχήμα 5.6: Φ/Β σε οροφή .....	15
Σχήμα 5.7: Τοποθέτηση ευλύγιστων Φ/Β .....	15
Σχήμα 5.8: Υγρομωτικές μεμβράνες με ενσωματωμένα Φ/Β.....	15
Σχήμα 5.9: Φ/Β με μορφή κεραμιδιού.....	15
Σχήμα 5.10: (α) Ηλιακά κεραμίδια (β)Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε πυροσβεστικό σταθμό.....	15
Σχήμα 5.11: Φ/Β σε προσόψεις κτιρίων.....	15
Σχήμα 5.12: Φ/Β υαλοπίνακες σε οροφές κτιρίων .....	15
Σχήμα 5.13: Φ/Β σκιάστρα σε αθλητικές εγκαταστάσεις .....	15
Σχήμα 5.14: Φ/Β σκιάστρα σε χώρο στάθμευσης .....	15
Σχήμα 5.15: τοποθετημένα σε τοιχοπετάσματα δρόμων σε ρόλο ηχοφράγματος.....	15
Σχήμα 5.16: Φ/Β υαλοπίνακες τοποθετημένοι σε οροφή κτιρίου .....	15
Σχήμα 5.17: Φ/Β υαλοπίνακες κατά την τοποθέτηση σε οροφή κτιρίου .....	15
Σχήμα 5.18: Ενσωμάτωση άμορφων ΦΒ Τεχνολογικό Μουσείο Θεσσαλονίκης .....	15
Σχήμα 5.19: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών .....	15
Σχήμα 5.20: Φ/Β πάρκο 9 MW της BP Solar.....	15

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

Σχήμα 6.1: Διαμορφώσεις φακών Fresnel.....	15
Σχήμα 6.2: Ανακλαστικοί τύποι συγκεντρωτικών μέσων .....	15
Σχήμα 6.3: Γεωμετρία του σύνθετου παραβολικού συγκεντρωτικού μέσου.....	15
Σχήμα 6.4: Τύποι ιχνηλάτισης του ήλιου σε διπλό άξονα.....	15
Σχήμα 6.5: Φ/Β υαλοπίνακες τοποθετημένοι σε οροφή κτιρίου .....	15
Σχήμα 6.6: Φ/Β πάρκο 9 MW της BP Solar.....	15



<b>Σχήμα 6.7:</b> Βασικές αρχές της τεχνολογίας Ηλεκτροπαραγωγής με Ηλιακή Συγκέντρωση .....	15
<b>Σχήμα 6.8:</b> Διαγράμματα λειτουργίας ενός σταθμού κυλινδροπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών κύκλου Rankine .....	15
<b>Σχήμα 6.9:</b> Εγκατεστημένες μονάδες ηλιακών κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών.....	15
<b>Σχήμα 6.10:</b> Πεδίο ηλιοστατών συγκεντρώνουν ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σύστημα ηλιακού πύργου. ....	15
<b>Σχήμα 6.11:</b> Εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας με ηλιακό πύργο ισχύος .....	15
<b>Σχήμα 6.12:</b> Εγκαταστάσεις Ηλιακών Πύργων Ισχύος.....	15
<b>Σχήμα 6.13:</b> Σχηματική παράσταση ενός συστήματος δίσκου/μηχανής με τον συνδυασμό τεσσάρων μονάδων των 25 kWe. ....	15
<b>Σχήμα 6.14:</b> Σχέδιο και μορφή ενός παραβολικού ηλιακού συστήματος σημειακής εστίας.....	15
<b>Σχήμα 6.15:</b> Αρχή λειτουργίας του συλλέκτη fresnel .....	15
<b>Σχήμα 6.16:</b> Η ροή στο πεδίο του συλλέκτη .....	15
<b>Σχήμα 6.17 :</b> Γραμμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με το σύστημα κατόπτρων Fresnel .....	15
<b>Σχήμα 6.18:</b> Εγκατάσταση γραμμικών συστημάτων ανακλαστήρων Fresnel.....	15
<b>Σχήμα 6.19:</b> Τυπικό φωτοβολταϊκό θερμικό (ΦΒ/Θ) σύστημα.....	15
<b>Σχήμα 6.20:</b> Μέρη από τα οποία αποτελείται ο σωλήνας θερμότητας.....	15
<b>Σχήμα 6.14:</b> Σχέδιο και μορφή ενός παραβολικού ηλιακού συστήματος σημειακής εστίας.....	15
<b>Σχήμα 6.15:</b> Αρχή λειτουργίας του συλλέκτη fresnel .....	15
<b>Σχήμα 6.16:</b> Η ροή στο πεδίο του συλλέκτη .....	15
<b>Σχήμα 6.17 :</b> Γραμμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με το σύστημα κατόπτρων Fresnel .....	15
<b>Σχήμα 6.18:</b> Εγκατάσταση γραμμικών συστημάτων ανακλαστήρων Fresnel.....	15
<b>Σχήμα 6.19:</b> Τυπικό φωτοβολταϊκό θερμικό (ΦΒ/Θ) σύστημα.....	15
<b>Σχήμα 6.20:</b> Μέρη από τα οποία αποτελείται ο σωλήνας θερμότητας.....	15
<b>Σχήμα 6.21:</b> Φωτοβολταϊκό σύστημα συγκέντρωσης με φακούς Fresnel.....	15

<b>Σχήμα 6.22:</b> Φωτοβολταϊκό σύστημα συγκέντρωσης της EMCORE .....	15
<b>Σχήμα 6.23:</b> Απεικόνιση λειτουργίας συγκεντρωτικού υβριδικού συστήματος Power-Spar .....	15
<b>Σχήμα 6.24:</b> Απεικόνιση της λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών Absolicon X10.....	15
<b>Σχήμα 6.25:</b> Εγκατεστημένες μονάδες του συγκεντρωτικού συστήματος Absolicon X10 .....	15
<b>Σχήμα 6.26:</b> Σωλήνας θερμότητας (Heat Pipe) .....	15
<b>Σχήμα 6.27:</b> Σωλήνας θερμότητας νερού χαλκού .....	15
<b>Σχήμα 6.28:</b> Υβριδικό σύστημα .....	15
<b>Σχήμα 6.29:</b> : Θερμική μονάδα απολαβής θερμότητας ενσωματωμένη σε φωτοβολταϊκό σύστημα.....	15
<b>Σχήμα 6.30:</b> Οι κυριότερες διαστάσεις της θερμικής μονάδας .....	15
<b>Σχήμα 6.31:</b> Διάταξη επίπεδου συλλέκτη.....	15
<b>Σχήμα 6.32:</b> Διάταξη ΦΒ/Θ συλλέκτη με κανάλια .....	15
<b>Σχήμα 6.33:</b> Διάταξη ελεύθερης ροής ΦΒ/Θ συλλέκτη. ....	15
<b>Σχήμα 6.34:</b> ΦΒ/Θ συλλέκτης διπλής απορρόφησης .....	15
<b>Σχήμα 6.35:</b> Συνδυασμός ΦΒ/Θ συστημάτων με επίπεδους διάχυτους ανακλαστήρες .....	15
<b>Σχήμα 6.36:</b> Βασικό μοντέλο υδρόψυκτου ΦΒ.....	15
<b>Σχήμα 6.37:</b> Καμπύλες θερμικής απόδοσης από πειραματικά αποτελέσματα .....	15
<b>Σχήμα 6.38:</b> Καμπύλη θερμοκρασίας κελιού σε σχέση με την ισχύ του ΦΒ και του χρόνου. ....	15
<b>Σχήμα 6.39</b> Καμπύλη εξέργειας. ....	15
<b>Σχήμα 6.40</b> Καμπύλη θερμικής παραγωγής. ....	15
<b>Σχήμα 6.41 :</b> Θερμική παραγωγή για τους διάφορους τύπους ΦΒ/Θ συλλεκτών .....	15
<b>Σχήμα 6.42:</b> Ηλεκτρική παραγωγή για τους διάφορους τύπους ΦΒ/Θ συλλεκτών .....	15
<b>Σχήμα 6.43 :</b> Θερμική παραγωγή σαν συνάρτηση του W/D. ....	15
<b>Σχήμα 6.44:</b> Ηλεκτρική παραγωγή σαν συνάρτηση του W/D.....	15
<b>Σχήμα 6.45:</b> Θερμική παραγωγή σαν συνάρτηση της ροής μάζας του εργαζόμενου μέσου.....	15

<b>Σχήμα 6.46:</b> Ηλεκτρική παραγωγή σαν συνάρτηση της ροής μάζας του εργαζόμενου μέσου.....	15
<b>Σχήμα 6.47:</b> Ηλεκτρική απόδοση σαν συνάρτηση της ροής μάζας του εργαζόμενου μέσου.....	15
<b>Σχήμα 6.48:</b> Εξομοίωση παραγωγής φωτοβολταϊκού με και χωρίς ψύξη.....	15
<b>Σχήμα 6.49</b> Συνδυασμός ΦΒ/Θ συσκευών με επίπεδους διάχυτους ανακλαστήρες σε διάταξη οριζόντιας οροφής κτιρίου. ....	15

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>Ο</sup>**

<b>Σχήμα 7.1:</b> Περιβαλλοντικά Οφέλη Φωτοβολταϊκών .....	15
<b>Σχήμα 7.2:</b> του Κύκλου Ζωής Λιγνιτικού Σταθμού .....	15
<b>Σχήμα 7.3 :</b> Στάδια κύκλου ζωής Φ/Β.....	15
<b>Σχήμα 7.4</b> Αναπτυξιακά οφέλη ΦΒ.....	15
<b>Σχήμα 6.46:</b> Ηλεκτρική παραγωγή σαν συνάρτηση της ροής μάζας του εργαζόμενου μέσου.....	15
<b>Σχήμα 6.47:</b> Ηλεκτρική απόδοση σαν συνάρτηση της ροής μάζας του εργαζόμενου μέσου.....	15
<b>Σχήμα 6.48:</b> Εξομοίωση παραγωγής φωτοβολταϊκού με και χωρίς ψύξη.....	15

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## I. Ιστορική Αναδρομή & Εξέλιξη της Ενέργειας

Η εξέλιξη της ανθρωπότητας είναι στενά συνδεδεμένη με τη χρήση ενέργειας. Δεν είναι τυχαίο ότι διάφορες ονομασίες των ιστορικών περιόδων της ανθρωπότητας, όπως η λίθινη εποχή, η εποχή του σιδήρου ή του χαλκού, προέκυψαν από τις διαφορετικές μορφές ενέργειας που οι άνθρωποι διαχειρίζονταν στις αντίστοιχες εποχές. Σ' όλη την ιστορική του πορεία, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε με εφευρετικότητα τις δυνατότητες που του παρείχε απλόχερα η φύση, τη δύναμη της φωτιάς, του νερού, του ανέμου και του ήλιου, με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών της διαβίωσής του.

Στους πιο πρόσφατους αιώνες, χρησιμοποίησε την ενέργεια από την καύση του κάρβουνου και του πετρελαίου και βρήκε τρόπο να τη μετατρέπει στην περισσότερη εξευγενισμένη των μορφών της, τον ηλεκτρισμό. Στα μέσα του 20ου αιώνα, ένας νέος τρόπος παραγωγής ενέργειας ήρθε να δημιουργήσει ελπίδες, για τη ριζική επίλυση του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος, η πυρηνική ενέργεια. Πολύ γρήγορα, όμως, δραματικά γεγονότα ήλθαν να επιβεβαιώσουν, χωρίς περιθώρια αμφισβήτησης, την αδυναμία μας να διασφαλίσουμε την ελεγχόμενη παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας και την αποφυγή ατυχημάτων.

Επιπλέον, άρχισαν να επιβεβαιώνονται, με επιστημονικά τεκμηριωμένο τρόπο, οι προβλέψεις για σημαντικές επιβαρυντικές συνέπειες της μέχρι σήμερα συμπεριφοράς του ανθρώπου στο οικοσύστημα, εξαιτίας κυρίως της αλόγιστης χρήσης των συμβατικών καυσίμων και πολλών, φαινομενικά αθώων, τεχνολογικών προϊόντων. Η παραγωγή και χρήση της ενέργειας που προέρχεται από τα συμβατικά καύσιμα δημιούργησαν μια σειρά από περιβαλλοντικά προβλήματα με αιχμή τους, το γνωστό σε όλους μας, φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η υπερθέρμανση του πλανήτη αλλά και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο δεν αφήνουν κανένα περιθώριο εφησυχασμού. Σύμφωνα με την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου έχουν ήδη ανεβάσει τη θερμοκρασία κατά 0.6 βαθμούς παγκοσμίως. Εάν δεν ληφθούν μέτρα, θα σημειωθεί αύξηση κατά 1.4 έως 5.8 βαθμούς έως τα τέλη του αιώνα. Όλες οι περιοχές του κόσμου (συμπεριλαμβανομένης της Ευρωπαϊκής Ένωσης) θα αντιμετωπίσουν σοβαρές συνέπειες, τόσο για τις οικονομίες τους όσο και για τα οικοσυστήματά τους. Για το λόγο αυτό η διεθνής ερευνητική κοινότητα και η ενεργειακή βιομηχανία έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους αφενός σε σύγχρονες “καθαρές” τεχνολογίες παραγωγής με βελτιωμένη ενεργειακά και περιβαλλοντικά απόδοση, όπως πχ. οι “καθαρές” τεχνολογίες άνθρακα, και αφετέρου στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ).



## II. Η Ανάπτυξη των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

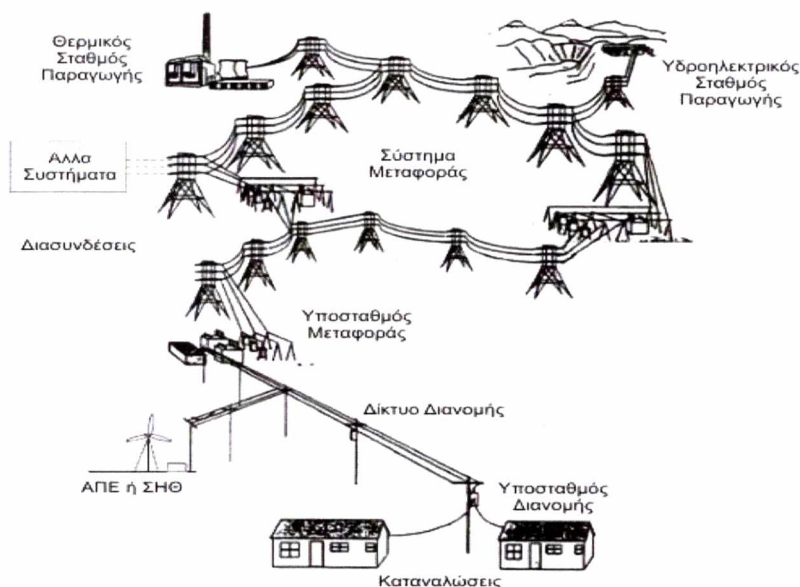
Από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα, όταν άρχισαν οι εφαρμογές του ηλεκτρισμού, μέχρι τις αρχές της 10ετίας του '70, παρατηρείται διεθνώς μία συνεχής συγκέντρωση της παραγωγής σε συνεχώς μεγαλύτερους «Σταθμούς Παραγωγής» και παράλληλα ανάπτυξη των δικτύων Μεταφοράς και Διανομής με συνεχώς μεγαλύτερες τάσεις, λόγω της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συνέβη και στην χώρα μας με την ανάπτυξη του Εθνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), η οποία κατά την περίοδο 1956-63 (περίπου) εξαγόρασε τις 300 περίπου ηλεκτρικές εταιρείες που προμήθευαν τότε την ηλεκτρική ενέργεια με μικρά τοπικά δίκτυα.

Όμως, με αφορμή τις «πετρελαϊκές κρίσεις» της 10ετίας του '70, άρχισε να γίνεται διεθνώς συνείδηση η ανάγκη καλύτερης αξιοποίησης της ενέργειας, αφενός μεν για να αξιοποιούνται καλύτερα οι διατιθέμενοι ενεργειακοί πόροι, αφετέρου δε για να περιορίζεται η ρύπανση του περιβάλλοντος. Άρχισε τότε σε διεθνές επίπεδο η αναζήτηση Εναλλακτικών Πηγών Ενέργειας, σε αντιστάθμισμα των Συμβατικών Πηγών, όπως είναι το κάρβουνο και το πετρέλαιο, καθώς και της πυρηνικής ενέργειας, η οποία βεβαίως παρουσιάζει τα γνωστά προβλήματα. Παράλληλα άρχισε μία προσπάθεια για την εξοικονόμηση και γενικότερα την καλύτερη και αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας.

Οι παραπάνω παράγοντες συνέβαλαν αποφασιστικά αφενός μεν στην ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), αφετέρου δε στην ανάπτυξη συστημάτων Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ).

Βασικό πλεονέκτημα των ΑΠΕ έναντι των συμβατικών πηγών είναι το ότι ανανεώνονται από τη φύση και δεν προκαλούν μόλυνση της ατμόσφαιρας. Όμως, ο ρυθμός με τον οποίο παρέχεται η ενέργεια από τις ΑΠΕ δεν είναι ελεγχόμενος, ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να παρέχεται όταν το απαιτούν οι ανθρώπινες ανάγκες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι η ηλεκτρική ενέργεια δύσκολα αποθηκεύεται σε μεγάλες ποσότητες, οδηγεί στην ανάγκη της σύνδεσης των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο και την παράλληλη λειτουργία τους με το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Δεδομένου δε ότι για τεχνολογικούς λόγους οι μονάδες των ΑΠΕ είναι μικρής ισχύος, συγκριτικά με τις μονάδες της συμβατικής παραγωγής, συνδέονται κατά γενικό κανόνα στο επίπεδο του δικτύου Διανομής, Σχήμα 1.

Για τα συστήματα ΣΗΘ, βασικό πλεονέκτημα αποτελεί το ότι επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση της πρωτογενούς πηγής ενέργειας, δεδομένου ότι αξιοποιείται και η θερμική ενέργεια, η οποία αναπόφευκτα παράγεται κατά την διαδικασία μετατροπής της πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Είναι επίσης προφανές ότι η ισχύς των σταθμών ΣΗΘ, δεδομένου ότι εξυπηρετούν τοπικές ανάγκες (π.χ. ένα νοσοκομείο), είναι σχετικά μικρή και για το λόγο αυτό η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αυτών συνδέεται κατά κανόνα, όπως και οι ΑΠΕ, στο δίκτυο Διανομής, Σχ.1. Η πρωτογενής ενέργεια στις εγκαταστάσεις Συμπαγωγής, είναι συχνά το Φυσικό Αέριο, το οποίο ως γνωστό διανέμεται με τρόπο αντίστοιχο της ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν όμως και άλλες πηγές όπως το Βιοαέριο ή η Βιομάζα, η χρησιμοποίηση των οποίων μπορεί να εξυπηρετεί και άλλους σκοπούς (π.χ. απαλλαγή από τα απορρίμματα).



**Σχήμα 1.1:** Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Με τη σύνδεση των ΑΠΕ και των συστημάτων ΣΗΘ, επιτυγχάνεται η «Διανεμημένη Παραγωγή» της ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή η παραγωγή της ενέργειας κοντά στην κατανάλωση της, με αποτέλεσμα να μειώνεται η φόρτιση και οι απώλειες των δικτύων Μεταφοράς και Διανομής. Οπωσδήποτε όμως η Διανεμημένη Παραγωγή, λόγω κυρίως των δυσχερειών ελέγχου και προσαρμογής της παραγωγής προς τη ζήτηση, δημιουργεί την ανάγκη κατάλληλων προσαρμογών των Συστημάτων Ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία συνδέεται, προκειμένου να εξασφαλίζεται η καλή λειτουργία τους και κατά συνέπεια και η καλή εξυπηρέτηση των καταναλωτών.



**Σχήμα 1.2:** Ημερήσιες τιμές του ηλιακού δυναμικού στον ελλαδικό χώρο

### III. . Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας



Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν εν αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος πριν στραφεί έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Οι ΑΠΕ πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνον από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα έχουν σαν σκοπό την δέσμευση του δυναμικού τους. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία δεκαετία. Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

#### ➤ Μορφές & Τεχνολογία ΑΠΕ

Οι μορφές των ΑΠΕ που είναι σήμερα τεχνικοοικονομικά εκμεταλλεύσιμες είναι οι ακόλουθες:

1. Αιολική Ενέργεια
2. Γεωθερμική Ενέργεια
3. Βιομάζα
4. Υδροηλεκτρική Ενέργεια
5. Ηλιακή Ενέργεια
6. Κυματική Ενέργεια
7. Παλιρροϊκή Ενέργεια

**Αιολική Ενέργεια:** Η αιολική ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας η οποία παρέχει δυναμικό για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ανεμογεννητριών χωρίς σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι ανεμογεννήτριες (οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα) χρησιμοποιούνται τόσο μαζί με μπαταρία σε μικρές εγκαταστάσεις όσο και συμπληρωματικά μαζί με φωτοβολταϊκά στοιχεία, και είναι τις περισσότερες φορές συνδεδεμένες με το δίκτυο. Η επερχόμενη απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας το 2001 έχει οδηγήσει στην κατασκευή πολλών αιολικών πάρκων ανά την Ελλάδα.

**Γεωθερμική Ενέργεια:** Η γεωθερμική ενέργεια παράγεται με τη μετατροπή ζεστού νερού ή υδρατμού που βρίσκεται σε αρκετό βάθος από την επιφάνεια της γης σε ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού ποικίλλει από περιοχή σε περιοχή και μπορεί να έχει τιμές από 25 °C μέχρι 350 °C. Όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη, η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται για τη θέρμανση κατοικιών και άλλων κτιρίων ή κτιριακών εγκαταστάσεων, θερμοκηπίων, κτηνοτροφικών



μονάδων, ιχθυοκαλλιέργειών κ.λ.π. Στις περιπτώσεις που τα γεωθερμικά ρευστά έχουν υψηλή θερμοκρασία (πάνω από 150 °C), η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η χώρα μας λόγω της διαμόρφωσης του υπεδάφους της, είναι πλούσια σε γεωθερμική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή αξιοποιείται σήμερα με αυξανόμενους ρυθμούς. Στην περιοχή του Νότιου Αιγαίου οι θερμοκρασίες των γεωθερμικών ρευστών είναι πολύ ψηλές, ενώ περιοχές πλούσιες σε γεωθερμία, με ρευστά χαμηλότερων θερμοκρασιών, είναι διάσπαρτες σε ολόκληρη τη χώρα.

**Βιομάζα:** Βιομάζα ονομάζονται τα κατάλοιπα διαφόρων διεργασιών που άμεσα ή έμμεσα προέρχονται από το φυτικό κόσμο τα οποία χρησιμοποιούνται για θέρμανση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και κίνηση. Τα κατάλοιπα αυτά μπορεί να είναι από αστικά σκουπίδια, από την αγροτική παραγωγή (υπολείμματα ξυλείας, σοδειάς, ζωικά απόβλητα) καθώς επίσης και υποπροϊόντα της βιομηχανίας (από επεξεργασία τροφίμων ή οργανικών υλών). Με κατάλληλη επεξεργασία, η βιομάζα μετατρέπεται σε καύσιμο αέριο (biofuel). Με την καύση του αερίου αυτού παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, με μεγάλη απόδοση αλλά και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις παράλληλα. Η τεχνολογία αυτή παρέχει το μέγιστο δυναμικό για παραγωγή ενέργειας σε Πανευρωπαϊκό επίπεδο. Η καύση όμως τελικά δεν μπορεί να την χαρακτηρίσει σαν καθαρή για το περιβάλλον.

**Υδροηλεκτρική Ενέργεια:** Στα υδροηλεκτρικά έργα η ενέργεια από την πτώση του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, με τη βοήθεια μιας τουρμπίνας. Παρόλο που στα υδροηλεκτρικά έργα δεν παράγονται επιβλαβή αέρια, στα μεγάλα φράγματα λαμβάνονται υπόψη και άλλες περιβαλλοντικές παράμετροι, όπως αντιπλημμυρικά έργα, η ποιότητα του ύδατος, καθώς επίσης και η επιρροή στην ζωή των ψαριών του ποταμού αλλά και των υπόλοιπων ζώων της περιοχής. Κατά συνέπεια, μόνο τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά (με δυναμικό λιγότερο των 30MW) θεωρούνται “πράσινα”, ενώ τα μεγάλης κλίμακας θεωρούνται απλώς “καθαρά”.

**Παλιρροϊκή ενέργεια:** Είναι η μορφή ενέργειας που προκύπτει από την βαρυτική έλξη της σελήνης και της γης και η οποία είναι εκμεταλλεύσιμη κατά την διαφορά του ύψους της επιφάνειας της στάθμης των νερών-άμπωτη και πλημμυρίδα.

**Κυματική Ενέργεια:** Είναι η μορφή ενέργειας που προκύπτει από την κινητική ενέργεια των κυμάτων. Το φαινόμενο των ανέμων έχει ως συνέπεια το σχηματισμό κυμάτων τα οποία είναι εκμεταλλεύσιμα σε περιοχές με υψηλό δείκτη ανέμων και σε ακτές ωκεανών.

**Ηλιακή Ενέργεια:** Η ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται τόσο για την θέρμανση των κτιρίων με άμεσο ή έμμεσο τρόπο και με τη χρήση ενεργητικών ή και παθητικών συστημάτων, όσο και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με δύο τρόπους:

1. Με τη χρησιμοποίηση Φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και
2. Τα ηλιακά θερμικά συστήματα που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για να θερμάνουν ένα υγρό το οποίο παράγει ατμό ο οποίος τροφοδοτεί μία τουρμπίνα και μία γεννήτρια.

#### IV. Συμβατικές Πηγές Ενέργειας



Μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται οι πηγές οι οποίες δεν αναπληρώνονται ή αναπληρώνονται εξαιρετικά αργά για τα ανθρώπινα μέτρα από φυσικές διαδικασίες. Στις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνονται κυρίως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, γνωστά και ως ορυκτά καύσιμα. Βέβαια, η φύση δεν σταματά να δημιουργεί ούτε άνθρακα ούτε πετρέλαιο. Αν αναλογισθούμε όμως ότι η ανθρωπότητα καταναλώνει ημερησίως τόση ποσότητα ορυκτών καυσίμων όση μπορεί η φύση να δημιουργήσει σε χίλια περίπου χρόνια, αντιλαμβανόμαστε πλέον την έννοια της ανανεωσιμότητας.

**Άνθρακας:** Ο άνθρακας παράγεται από την αποσύνθεση φυτών και έχει τη μορφή μαύρης ή καφέ πέτρας. Η συλλογή του άνθρακα γίνεται στα ανθρακωρυχεία τα οποία ευθύνονται για σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς τοξικές χημικές ουσίες ελευθερώνονται στο γύρω περιβάλλον και διηθούνται σε κοντινές πηγές. Το 65% των εκπομπών διοξειδίων του θείου, το 33% των εκπομπών διοξειδίων του άνθρακα, και το 25% των εκπομπών οξειδίων του αζώτου στις Ηνωμένες Πολιτείες παράγονται από την καύση του άνθρακα. Οι ποσότητες αυτές συνεισφέρουν σημαντικά στην αύξηση της θερμοκρασίας της γης, στην όξινη βροχή, καθώς επίσης και στη δημιουργία πολλών ασθενειών.

**Πετρέλαιο:** Η καύση του πετρελαίου προκαλεί λιγότερη μόλυνση σε σχέση με την καύση του άνθρακα, αλλά εν τούτοις αρκετά σημαντική. Ο λεγόμενος “Μαύρος χρυσός” χρησιμοποιείται σε ευρέως σε παγκόσμιο επίπεδο κυρίως για την κίνηση οχημάτων αλλά και για θέρμανση. Η επερχόμενη εξάντληση των αποθεμάτων του καθιστά ολοένα και πιο σημαντική την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, για την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος παγκοσμίως.

**Πυρηνική ενέργεια:** Η πυρηνική ενέργεια παράγεται από τη διάσπαση ατόμων ουρανίου και πλουτονίου. Παρόλο που στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχουν εκπομπές επιβλαβών αερίων, εγκυμονούν σοβαροί κίνδυνοι για την υγεία αλλά και για το περιβάλλον. Ένα ενδεχόμενο ατύχημα σε πυρηνικές εγκαταστάσεις θα ελευθερώσει ραδιενεργό υλικό στην ατμόσφαιρα με καταστροφικά αποτελέσματα, αντίστοιχα με αυτά του Τσερνομπίλ. Ένα επίσης σοβαρό πρόβλημα είναι η ασφαλής αποθήκευση πυρηνικών αποβλήτων. Η πυρηνική διάσπαση δημιουργεί προϊόντα τα οποία παραμένουν επικίνδυνα ραδιενεργά για χιλιάδες χρόνια ενώ καθίσταται αδύνατο να εγγυηθεί κανείς την ασφαλή αποθήκευση των αποβλήτων αυτών για μια τόσο μεγάλη χρονική περίοδο.

**Φυσικό Αέριο:** Πρόκειται για μια φτηνή και φιλική προς το περιβάλλον λύση, αλλά όχι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Παρόλο που υπάρχουν αρκετά αποθέματα φυσικού αερίου για δεκαετίες, δεν παύουν να είναι πεπερασμένα, οπότε η τιμή τους πρόκειται να ανέβει, δεδομένης μάλιστα της σπανιότητάς τους. Η χρησιμοποίησή του παράγει βέβαια επιβλαβή αέρια, αλλά πολύ λιγότερα σε σχέση με άλλα συμβατικά καύσιμα.



Τα κύρια **πλεονεκτήματα** των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή)
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών και σε μικρή κλίμακα εφαρμογών ή σε μεγάλη κλίμακα, αντίστοιχα, έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ είναι εντάσεως εργασίας, δημιουργώντας σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. θερμοκηπιακές καλλιέργειες με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας)
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

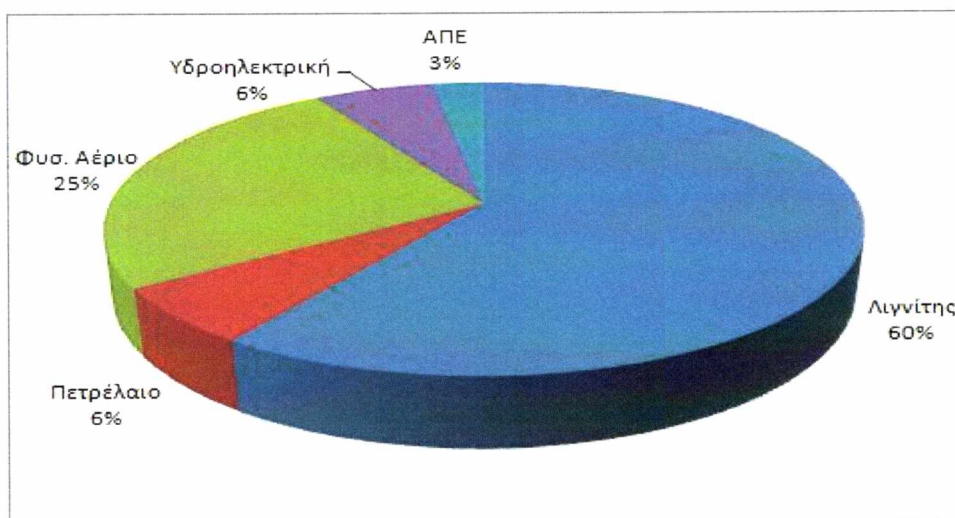
Εκτός από τα παραπάνω πλεονεκτήματα οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και ταχεία ανάπτυξή τους:

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

## V. Παρούσα Ενεργειακή Κατάσταση στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, αναλογικά με τον πληθυσμό της, κατέχει μια από τις πρώτες θέσεις στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο δείκτης “Τελική Κατανάλωση Ενέργειας (Τ.Κ.Ε.)” στην Ελλάδα ήταν  $20.2 \cdot 10^6$  Τ.Ι.Π. (τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) το έτος 2004 κατά 28% υψηλότερος του αντίστοιχου του έτους 1995 (ετήσια αύξηση 2.8%). Το μερίδιο κάθε καυσίμου για το 2007 στην εγχώρια ηπειρωτική ηλεκτροπαραγωγή διαμορφώθηκε ως εξής:

- Λιγνίτης 60,4%
- Φυσικό Αέριο 25,7%
- Πετρέλαιο 6,3%
- Υδροηλεκτρικά 6,1%
- ΑΠΕ 2,5%



Σχήμα 1.3: Παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα ανά τύπο μονάδων (2007)

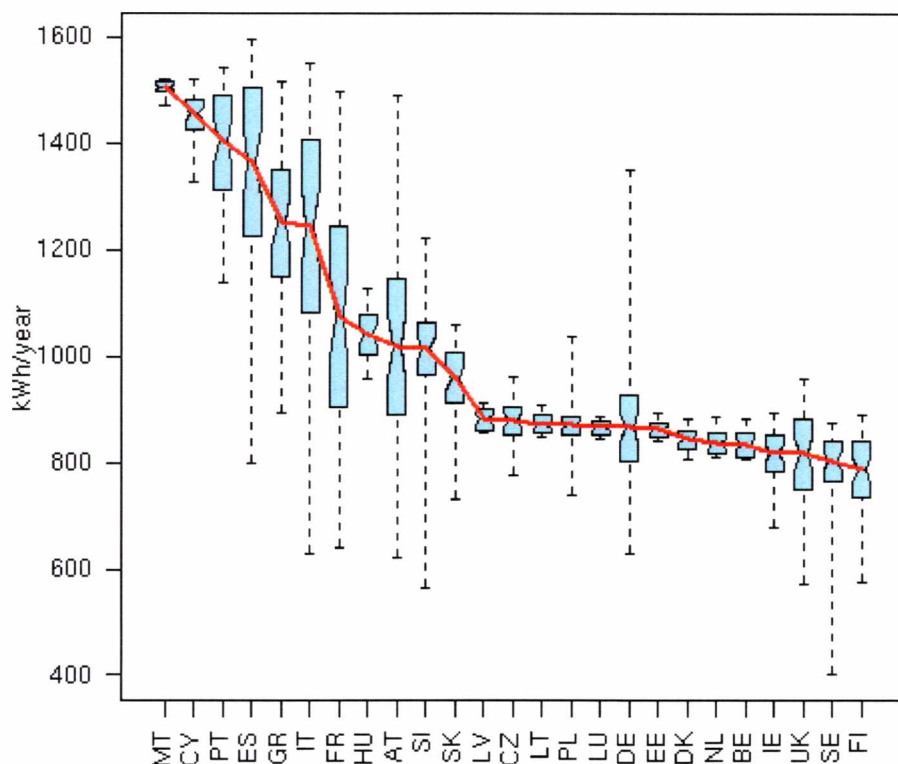
Η κατανομή του Τ.Κ.Ε. ανά Τομέα ήταν:



Σχήμα 1.4 : Ενεργειακό ισοζύγιο

## VI. Προοπτικές Εξέλιξης των ΑΠΕ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει αναλάβει έναν πρωτοποριακό ρόλο στην προσπάθεια άμβλυνσης της κλιματικής αλλαγής σε παγκόσμιο επίπεδο και έχει ασκήσει μεγάλη πίεση για την υιοθέτηση συγκεκριμένων και φιλόδοξων στόχων. Ήδη, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο έχει θέσει τη νέα Ευρωπαϊκή στρατηγική για τη βιώσιμη ανάπτυξη (το λεγόμενο “πακέτο 20-20-20” που σημαίνει παραγωγή του 20% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, 20% μείωση των ρύπων και 20% εξοικονόμηση ενέργειας) έως το έτος 2020 για την Ευρώπη.



**Σχήμα 1.5 :** Ετήσιο ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ένα χαρακτηριστικό σύστημα φωτοβολταϊκών 1 kW<sub>p</sub> στις οικιστικές περιοχές των 25 κρατών μελών της Ε.Ε.

Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζεται το ετήσιο ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ένα χαρακτηριστικό σύστημα φωτοβολταϊκών 1 kW<sub>p</sub> στις οικιστικές περιοχές των 25 κρατών μελών της Ε.Ε. Τα σημεία που ενώνονται με την κόκκινη γραμμή αντιστοιχούν στο μέσο όρο και τα ψηλότερα σημεία αντιστοιχούν στο μέγιστο, τα αμέσως επόμενα στο 80% του μεγίστου, τα επόμενα στο ελάχιστο και τα χαμηλότερα στο 80% του ελαχίστου για τη βέλτιστη γωνία.

kW (κιλοβάτ): μονάδα ισχύος [1 kW = 1.000 Watt, 1 MW = 1.000 kW]

kW<sub>p</sub> (κιλοβάτ πικ-peak): μονάδα ονομαστικής ισχύος του φωτοβολταϊκού (ίδιο με το kW)

kWh (κιλοβατώρα): μονάδα ενέργειας

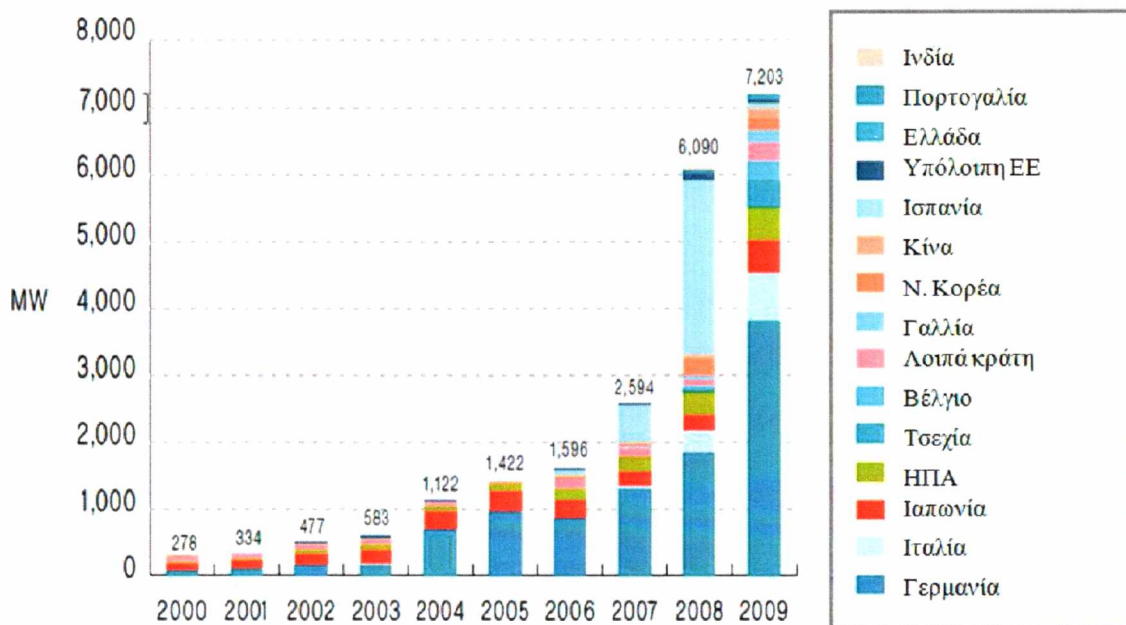


### ➤ Εξέλιξη αγοράς φωτοβολταϊκών

Η αγορά των φωτοβολταϊκών είναι ραγδαία αναπτυσσόμενη. Η παραγωγή των φωτοβολταϊκών διπλασιάζεται κάθε 2 χρόνια, ενώ η αύξηση είναι κατά μέσο όρο 43% κάθε χρόνο από το 2002, καθιστώντας τα φωτοβολταϊκά την ταχύτερα αναπτυσσόμενη ενεργειακή τεχνολογία στον κόσμο. Στα τέλη του 2008 οι συνολικές εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών παγκοσμίως έφθασαν τα 15.200 μεγαβάτ . Το 90% αυτής της ικανότητας παραγωγής αποτελείται από διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα. Οι μεγάλοι φωτοβολταϊκοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα κυμαίνονται στα 10 με 60 MW.

Παρά τα 15.200 MW φωτοβολταϊκών που έχουν εγκατασταθεί, επειδή τα ηλιακά φωτοβολταϊκά έχουν κατά κανόνα συντελεστή απόδοσης κάτω από 25%, το 2008 η εγκατεστημένη παραγωγή (15,2 GW) παρείχε ηλεκτρική ενέργεια ισοδύναμη με αυτή που θα παρείχαν θερμοηλεκτρικοί σταθμοί της τάξεως των 3,04 GW (υποθέτοντας συντελεστή απόδοσης 20% για τα φωτοβολταϊκά, κατά συνέπεια  $20\% * 15,2 \text{ MW} \cdot b = 3,04 \text{ GW}$ ). Αυτό αντιπροσώπευε μόλις το 0,15 τοις εκατό της παγκόσμιας ζήτησης ανά χρόνο.

Οι συνολικές νέες εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών σε ολόκληρο τον κόσμο ήταν 2,594 GW το 2007, και 6,09 GW το 2008, δηλαδή σημειώθηκε αύξηση 110%. Το 2009 μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) οι νέες εγκαταστάσεις ανήλθαν σε 6,3 GW, ενώ παγκοσμίως ανήλθαν σε 7,2 GW.



Εικόνα 1.6: Νέες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις ανά έτος και ανά χώρα.

### ➤ Μελλοντικές προοπτικές

Τα φωτοβολταϊκά μπορούν στο μέλλον να διαδραματίσουν πρωταγωνιστικό ρόλο στη διαμόρφωση του ενεργειακού μίγματος. Πρόκειται για μια ανανεώσιμη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.

Σύμφωνα με μελέτη της Ευρωπαϊκής Ομοσπονδίας Κατασκευαστών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων (EPIA- European Photovoltaic Industry Association), που δημοσιεύτηκε το 2008, προβλέπεται ετήσια αύξηση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων κατά 21% τη δεκαετία 2010-2020, και ετήσια αύξηση 13% για τη δεκαετία 2020-2030 σύμφωνα με το μετριοπαθές σενάριο. Το 2020 θα παράγονται ετησίως 283 TWh από φωτοβολταϊκά, και το 2030 1.291 TWh, από μόλις 21,6 TWh που προβλέπονται για τα τέλη του 2010. Το προωθημένο σενάριο προβλέπει ετήσια αύξηση 23% τη δεκαετία 2010-2020 και 15% ανά έτος τη δεκαετία 2020-2030. Σύμφωνα με το προωθημένο σενάριο, το 2020 θα παράγονται ετησίως 362 TWh ενέργειας από φωτοβολταϊκά, και το 2030 2.646 TWh, από μόλις 25,4 TWh που προβλέπονται για τα τέλη του 2010.

Το μετριοπαθές σενάριο προβλέπει ότι το 2030 το 4,3-6,7% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας θα παράγεται από φωτοβολταϊκά (η διακύμανση οφείλεται και σε αβεβαιότητα ως προς το πόση θα είναι η ζήτηση μέχρι τότε). Ταυτόχρονα, η απασχόληση στον τομέα των φωτοβολταϊκών θα αυξηθεί από 252.000 θέσεις εργασίας το 2010, σε 1.462.000 θέσεις το 2020, και τελικά σε 3.718.000 θέσεις απασχόλησης το 2030 κατανεμημένες σε ολόκληρο τον κόσμο.

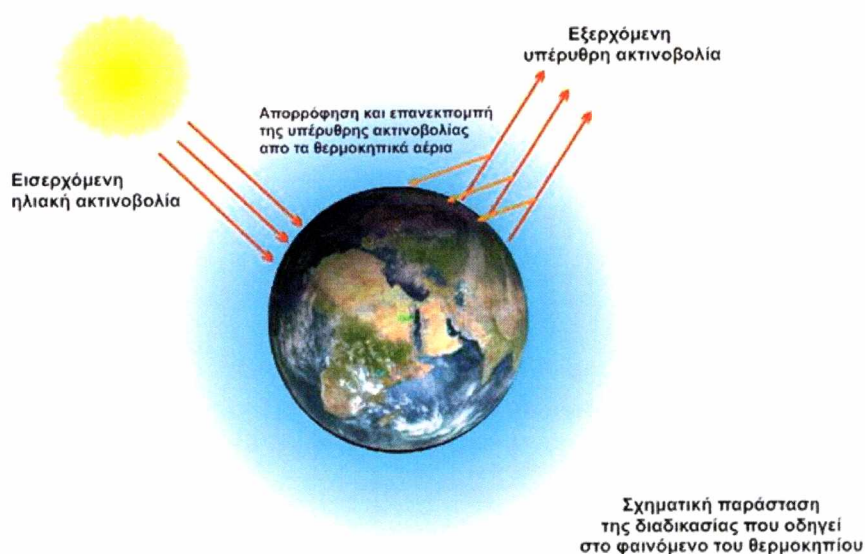
Σύμφωνα με το προωθημένο σενάριο, το 2030 το 8,9-13,8% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας θα παράγεται από φωτοβολταϊκά (η διακύμανση οφείλεται και σε αβεβαιότητα ως προς το πόση θα είναι η ζήτηση μέχρι τότε). Ταυτόχρονα, η απασχόληση στον τομέα των φωτοβολταϊκών θα αυξηθεί από 333.000 θέσεις εργασίας το 2010, σε 2.343.000 θέσεις το 2020, και τελικά σε 9.967.000 θέσεις απασχόλησης το 2030 κατανεμημένες σε ολόκληρο τον κόσμο.

Πιο πρόσφατη μελέτη της EPIA που δημοσιεύτηκε το Μάιο του 2010 και αφορά την περίοδο 2010 έως 2014, προβλέπει ετήσιες νέες εγκαταστάσεις 6 GW το 2010 που κλιμακωτά θα φτάσουν τα 8 GW το 2014 σύμφωνα με το μετριοπαθές σενάριο. Το προωθημένο σενάριο προβλέπει νέες εγκαταστάσεις 11,5 GW το 2010, που κλιμακωτά θα αυξηθούν σε 13,5 GW το 2014. Σύμφωνα με το προωθημένο σενάριο για όλο τον κόσμο, οι νέες εγκαταστάσεις ανά έτος θα αυξηθούν κλιμακωτά από 15,5 GW το 2010 σε 29,9 GW το 2014.

## VII. Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου πρόκειται για ένα φυσικό φαινόμενο. Αυτό που αποτελεί απειλή για το πλανήτη μας είναι η υπερβολική εμφάνιση του φαινομένου, η οποία οφείλεται στις ανθρωπογενείς εκπομπές ρύπων.

Έχει εξακριβωθεί ότι ορισμένα αέρια της ατμόσφαιρας (γνωστά και ως θερμοκηπικά αέρια), επιτρέπουν την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας προς τη Γη, ενώ αντίθετα απορροφούν και επανεκπέμπουν προς το έδαφος ένα μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια της. Αυτή η παγίδευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (η οποία διαφορετικά θα απελευθερωνόταν στο Διάστημα) από τα συγκεκριμένα αέρια ονομάζεται «φαινόμενο του θερμοκηπίου». Πρόκειται για ένα γεωφυσικό φαινόμενο ουσιώδες και απαραίτητο για την ύπαρξη, τη διατήρηση και της εξέλιξη της ζωής στον πλανήτη. Χωρίς αυτόν τον μηχανισμό η μέση θερμοκρασία της Γης θα ήταν περίπου κατά  $35^{\circ}\text{C}$  χαμηλότερη, δηλαδή περίπου  $-20^{\circ}\text{C}$  αντί για  $+15^{\circ}\text{C}$  που είναι σήμερα, και η ζωή θα ήταν αδύνατη, τουλάχιστον στη μορφή που τη γνωρίζουμε.



**Σχήμα 1.7:** Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Κατά συνέπεια, το εν λόγω φαινόμενο, στις φυσικές του διαστάσεις, δεν είναι επιβλαβές, αντίθετα έχει ζωτική σημασία για τη διατήρηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη στους  $15^{\circ}\text{C}$  περίπου. Το ανησυχητικό είναι η ενίσχυση του ως αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές θερμοκηπικών αερίων αυξάνουν τη δυνατότητα της ατμόσφαιρας να παγιδεύσει την υπέρυθρη ακτινοβολία της Γης. Η αύξηση αυτή οδηγεί στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου και συνεπώς στην άνοδο της θερμοκρασίας του πλανήτη. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις εκπομπές ρύπων που προκαλούνται από τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη χρήση της, άμεσα ή έμμεσα, δηλαδή από τον ενεργειακό τομέα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

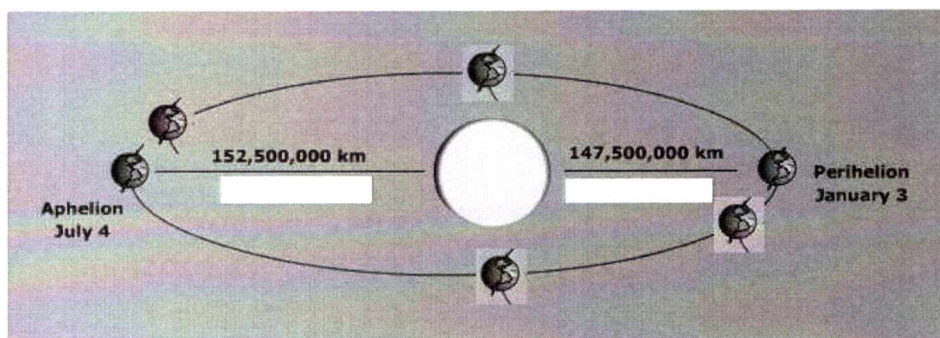
## 2.1 Η Ηλιακή ακτινοβολία και η επίδραση της γης

### 2.1.1 Ο Ήλιος

Ο ήλιος είναι το πιο σημαντικό αστέρι του ηλιακού μας συστήματος, με μάζα  $2 \cdot 10^{30}$  kg, ακτίνα 700.000 km, ηλικία  $5 \cdot 10^9$  χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Η επιφανειακή του θερμοκρασία 5.800K, ενώ η εσωτερική, περίπου, 15.000.000K. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κατά τις οποίες μετατρέπεται το υδρογόνο σε ήλιο. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου, που μετατρέπεται σε He, εκλύεται ενέργεια ίση με  $U = 1.67 \cdot 10^5$  kWh. Με μια καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μια τέλεια πηγή ακτινοβολίας. Η προσπίπτουσα (κατά μέσο όρο) ροή ενέργειας πάνω σε μια μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά:  $S = 1367 \text{ W/m}^2$ .

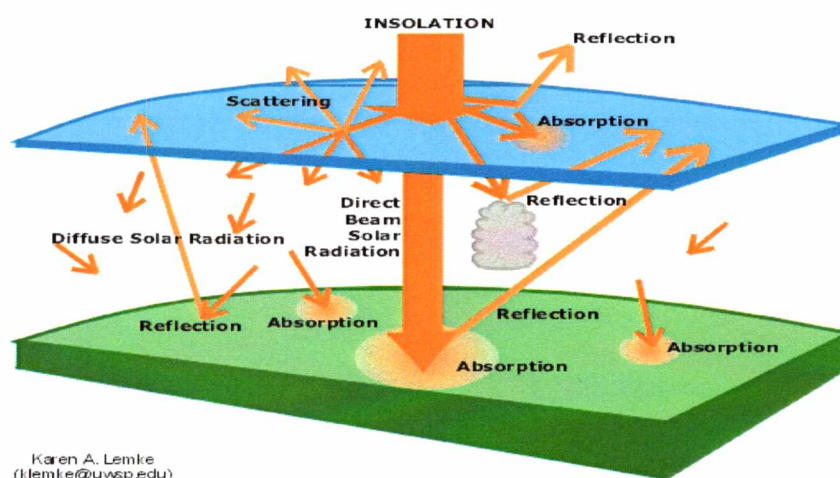
### 2.1.2 Η Ακτινοβολία του ήλιου

Η τροχιά της γης, κατά την κίνηση της γύρω από τον ήλιο, είναι έλλειψη, με τον ήλιο στη μια των εστιών της, με μήκος μεγάλου ημιάξονα,  $a = 149.6 \cdot 10^6$  km και εκκεντρότητα,  $e \approx 0.01673$ . Η απόσταση γης- ήλιου μεταβάλλεται περιοδικά, κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ της μέγιστης τιμής της (περί την 1η Ιουλίου), που ονομάζεται αφήλιο ( $\sim 152.5 \cdot 10^6$  km) και της ελάχιστης (περί την 1η Ιανουαρίου), που ονομάζεται περιήλιο ( $147.5 \cdot 10^6$  km). Η γη στις 3 Ιανουαρίου δέχεται 7% περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τις 4 Ιουλίου. Το μήκος του μεγάλου ημιάξονα,  $a$ , προσεγγιστικά 150.000.000 km, λαμβάνεται ως μονάδα μήκους σε διαστημικές αποστάσεις, ονομάζεται Αστρονομική Μονάδα και συμβολίζεται ως 1 AU (Astronomical Unit). Για να διανύσει την απόσταση αυτή το φως, με την ταχύτητα των 300.000 km/s, απαιτούνται  $\sim 8.5$  min.



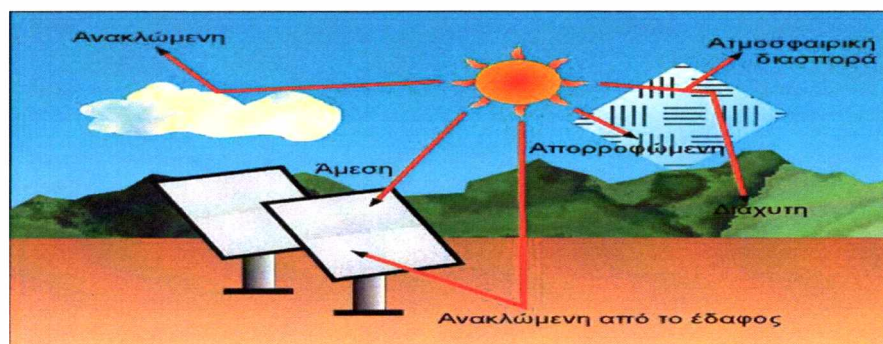
Σχήμα 2.1: Η περιφορά της γης γύρω από τον ήλιο

Κατά τη διέλευση των ηλιακών ακτίνων, από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ένταση τους ελαττώνεται, καθώς τα φωτόνια σκεδάζονται αφενός στα μόρια της ατμόσφαιρας και στα πολύ μικρής διαμέτρου  $d$ , σωματίδια, αφετέρου, στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματα της, δηλαδή, τους υδρατμούς, τη σκόνη και τον καπνό. Ένα άλλο μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας. Παραδείγματος χάριν, η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του όζοντος, στα ανώτερα στρώματα της κύριας μάζας της ατμόσφαιρας, έτσι ώστε η ένταση των ακτίνων αυτών, στην επιφάνεια της γης, να είναι εξαιρετικά μειωμένη και η καρκινογόνος δράση της αρκετά περιορισμένη. Ομοίως οι υδρατμοί απορροφούν, το  $\text{CO}_2$ , τα οξείδια του αζώτου κ.α , σε άλλες περιοχές του φάσματος. Τέλος, μέρος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της γης.



**Σχήμα 2.2:** Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

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). Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, προέρχεται από όλο τον ουράνιο θόλο (πάνω από το φυσικό ορίζοντα). Γενικά, λοιπόν, η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη ή έναν αισθητήρα, αποτελείται από την απευθείας, τη διάχυτη και την “ανακλώμενη” από το έδαφος. Η συνολική αυτή ακτινοβολία αναφέρεται ως ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο ή οριζόντιο συλλέκτη και συμβολίζεται με  $G$  (Global Irradiation).



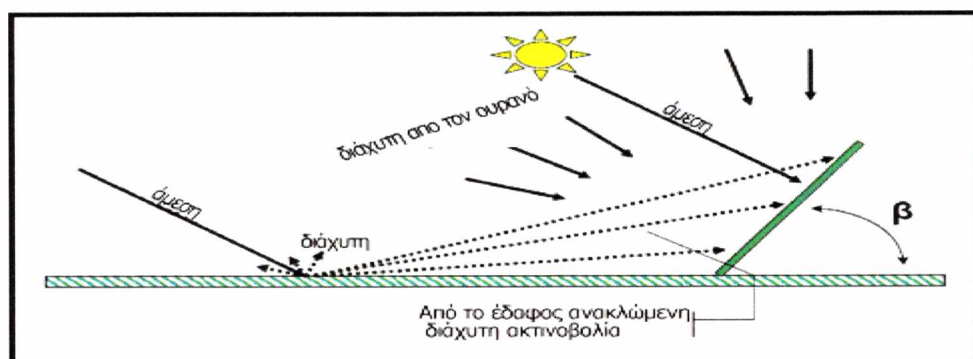
**Σχήμα 2.3:** Άμεση και Διάχυτη ακτινοβολία



Η ανακλώμενη εξαρτάται από τη μορφολογία και το χρώμα του εδάφους ή της επικάλυψης του (γρασίδι ή χιόνι) και την πυκνότητα των νεφών, ενώ η ολική, απευθείας και διάχυτη, εξαρτώνται, σε γενικές γραμμές από τους επόμενους παράγοντες:

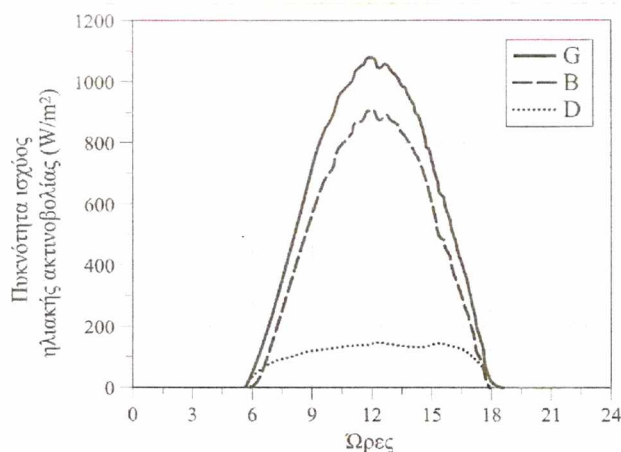
1. τη σύσταση- κατάσταση της ατμόσφαιρας, τη δεδομένη χρονική στιγμή (υγρασία και γενικά, τα αιωρήματα της ατμόσφαιρας)
2. την ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους
3. τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων στη συλλεκτική επιφάνεια (ύψος του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας).

Στην περίπτωση που αναφερόμαστε στην ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας (χωρίς την επίδραση της ατμόσφαιρας στη διέλευση του φωτός), χρησιμοποιούνται τα σύμβολα  $G_{ext}$  και  $B_{ext}$  ( $ext=extraterrestrial=$ πέραν της γης, εννοείται στα όρια της ατμόσφαιρας), για την ολική και απευθείας ακτινοβολία, αντίστοιχα.



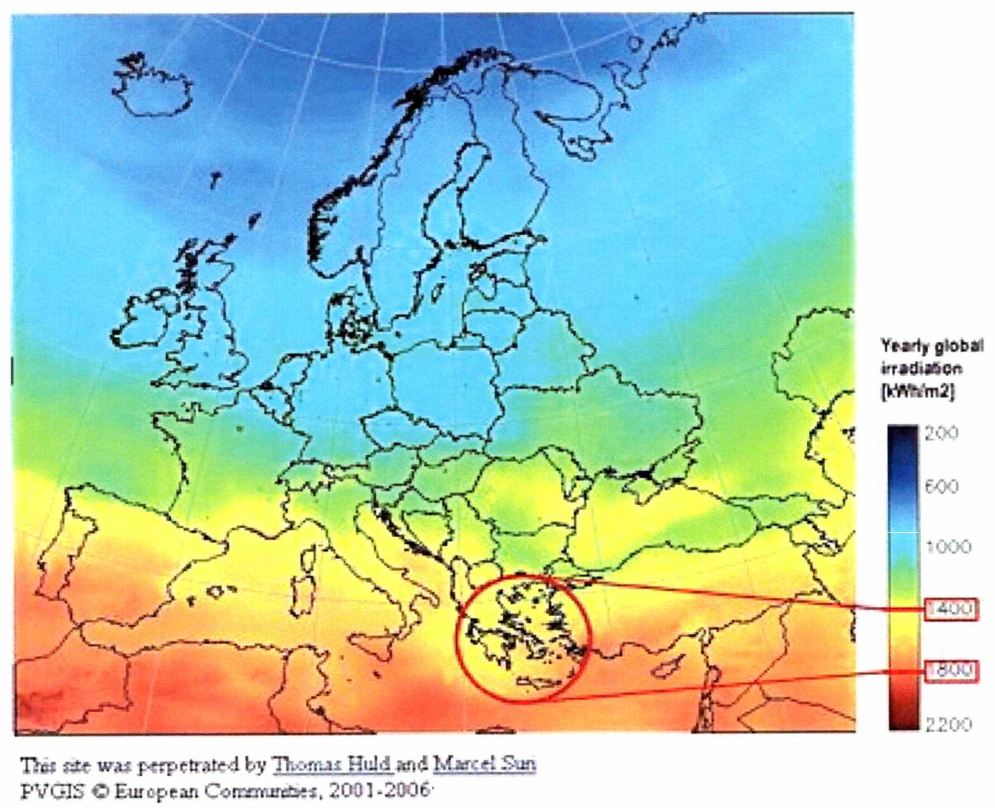
**Σχήμα 2.4:** Προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη

Κατά την ανατολή του ήλιου, η ζενίθια γωνία του ήλιου ( $z=90-EL$ ,  $EL$  (Elevation) το ύψος του ήλιου) είναι  $z=90^\circ$  (σχήμα 2.10) 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, περίπου κατά συμμετρικό τρόπο (σχήμα 2.5)



**Σχήμα 2.5:** ημερήσια μεταβολή της πυκνότητας ισχύος των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας, κατά μια αίθρια ημέρα

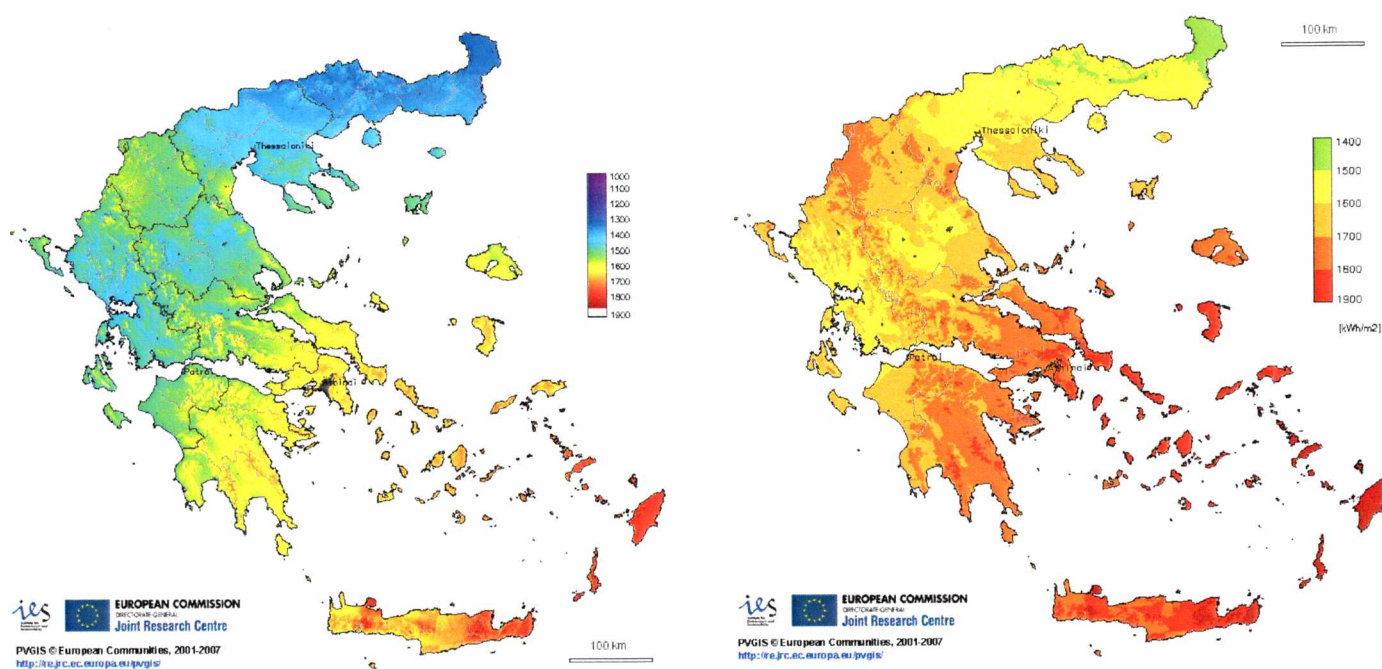
Με βάση τις ωριαίες τιμές των συνιστωσών G, B και D, προκύπτουν οι ημερήσιες μέσες τιμές, οι μηνιαίες μέσες τιμές, καθώς και οι ετήσιες μέσες τιμές των μεγεθών αυτών. Προκειμένου τα αποτελέσματα αυτά να αξιοποιηθούν σε ενεργειακούς υπολογισμούς, συλλέγονται επί σειρά πολλών ετών (πχ. 30 ετών), η επεξεργασία των οποίων δίδει το Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος για τον αντίστοιχο τόπο. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{kW/m}^2$ ) αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια (συνήθως σε  $\text{kWh/m}^2$ ). Η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6



**Σχήμα 2.6 :** Χάρτης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας των χωρών της Ευρώπης

Η χώρα μας συγκαταλέγεται μεταξύ των χωρών υψηλής ακτινοβολίας. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα στην εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από το Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν γίνει μελέτες για τη χώρα μας και απεικονίζονται στους χάρτες των σχημάτων 2.7 και 2.8. Οι χάρτες αντιπροσωπεύουν την ετήσια ποσότητα ενέργειας ( $\text{kWh/m}^2$ ) που προέρχεται από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε οριζόντια θέση (σχήμα 2.7α) καθώς και υπό τη βέλτιστη γωνία κλίσης (σχήμα 2.7β) και αφορούν διάστημα 10 ετών και συγκεκριμένα την περίοδο 1981-1990. Εναλλακτικά δίνεται χάρτης με την ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εκφρασμένη σε kWh από φωτοβολταϊκό σύστημα, με συλλέκτες πυριτίου (c-Si) ισχύος 1kWp υπό βέλτιστη γωνία κλίσης (σχήμα 2.8). Σημειώνεται ότι στις τιμές αυτές δεν περιλαμβάνονται απώλειες λόγω υψηλών θερμοκρασιών, αντανάκλασης καθώς και εκείνων που οφείλονται σε καλωδιώσεις και μετατροπείς.

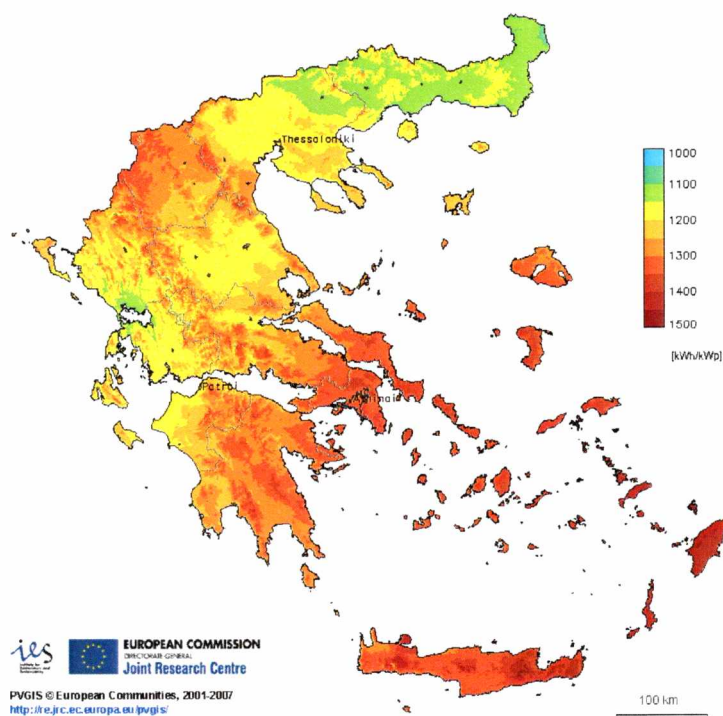




(α)

(β)

**Σχήμα 2.7 :** (α) ετήσια ποσότητα ενέργειας ( $\text{kWh/m}^2$ ) που προέρχεται από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε οριζόντια θέση (β) και υπό άριστη γωνία κλίσης.

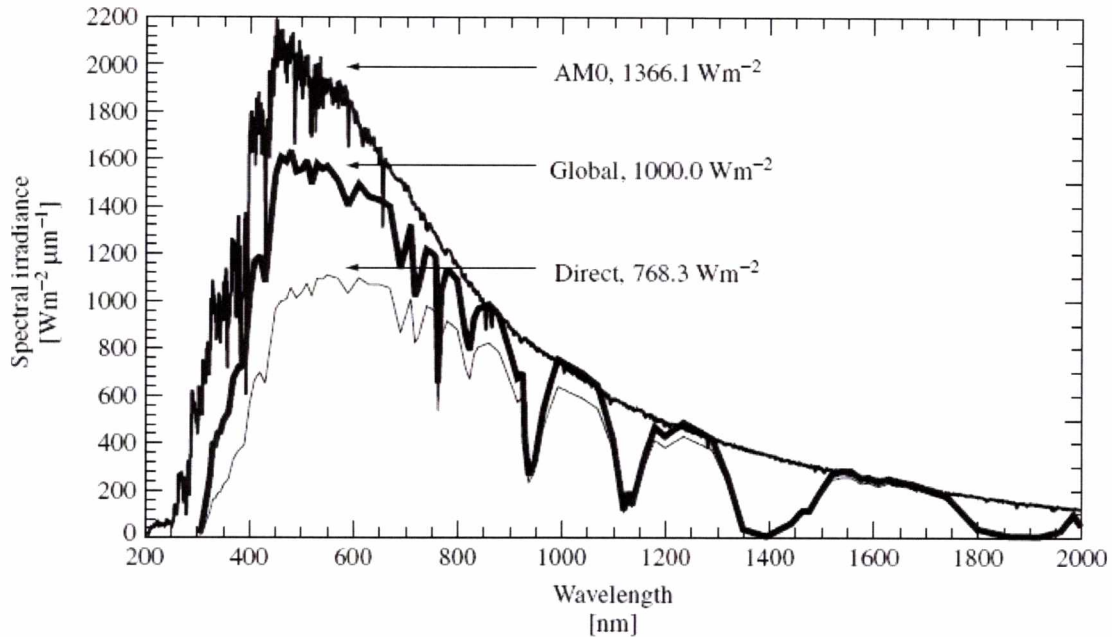


**Σχήμα 2.8 :** Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εκφρασμένη σε kWh από φωτοβολταϊκό σύστημα, με συλλέκτες πυριτίου (c-Si) ισχύος 1kWp υπό άριστη γωνία κλίσης.



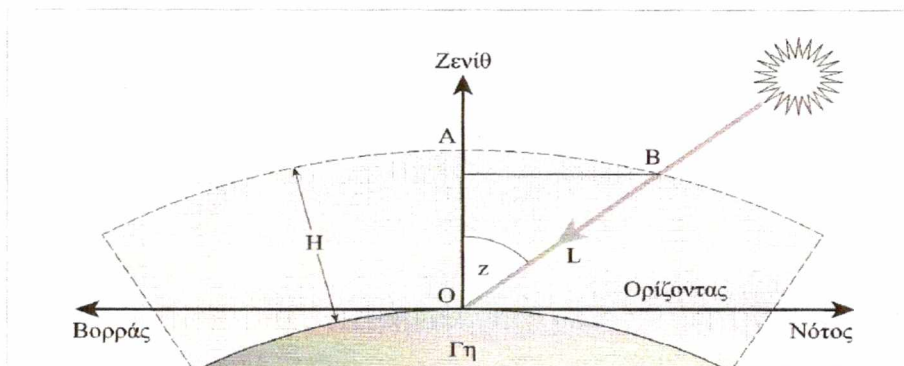
## 2.2 Το Φάσμα της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της καθαρής ατμόσφαιρας πάνω στο ηλιακό φως είναι η μάζα αέρος (Air Mass). Το φάσμα του ηλιακού φωτός στα όρια της ατμόσφαιρας χαρακτηρίζεται με τη συντετμημένη έκφραση AM0. Στο σχήμα 2.9 απεικονίζεται το φάσμα του ηλιακού φωτός που αντιστοιχεί στην επιφάνεια της γης και έξω από την ατμόσφαιρα.



**Σχήμα 2.9:** Το σφαιρικό, το απευθείας και το AM0 φάσμα αναφοράς

Εκτός από το φάσμα AM0 υπάρχουν και τα AM1, AM1.5, AM2, τα οποία αφορούν στο ηλιακό φως, όπως αυτό καταμετρείται στην επιφάνεια της γης και αφού το φως διαγράψει τροχιά μήκους μια φορά, μια και ήμισυ (περίπου) και δυο φορές αντίστοιχα, το πάχος της ατμόσφαιρας. Θεωρώντας ότι το ηλιακό φως διαγράφει ευθύγραμμη τροχιά μέσα στην ατμόσφαιρα στις τρεις προηγούμενες περιπτώσεις, οι ακτίνες σχηματίζουν γωνίες  $0^\circ$ ,  $48^\circ$ ,  $60^\circ$ , αντίστοιχα, με την κατακόρυφη του τόπου (σχήμα 2.10).



**Σχήμα 2.10 :** Το μήκος L που διανύουν οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα πάχους H και η ζενίθια γωνία z.

Η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, κάθετα στην επιφάνεια συλλογής, που αντιστοιχεί σε AM1 (Air Mass 1), έχει τυπική τιμή  $\sim 950 \text{ W/m}^2$ . Η AM1 μπορεί να μετρηθεί σε τόπους με γεωγραφικό πλάτος μεταξύ των τιμών  $-23.5^\circ$  και  $23.5^\circ$ , διότι μόνο σ' αυτούς, οι ηλιακές ακτίνες μπορούν να διαπεράσουν κάθετα την ατμόσφαιρα, δύο φορές μέσα στο έτος. Καθώς το ύψος (EL, Elevation) του ήλιου, δηλαδή, η γωνία των ακτίνων του, σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο του τόπου, αλλάζει, οι ακτίνες του διανύουν διαφορετικό μήκος μέσα στην ατμόσφαιρα.

Ο λόγος  $m=L/H$  του μήκους της διαδρομής των ηλιακών ακτίνων μέσα στην ατμόσφαιρα σε σχέση με το πάχος της ατμόσφαιρας, προσδιορίζει τον αριθμό, που τίθεται μετά τα ακρωνύμια AM (τύπος 2.1). Με καλή, σχετικά, προσέγγιση για μικρές ζενίθιες γωνίες ( $z < 60^\circ$ ), μπορούμε να υπολογίσουμε το λόγο  $m$  από τη σχέση :

$$m = \frac{L}{H} \approx \frac{1}{(\cos(z))} \quad (\text{τύπος 2.1})$$

Καθορίζει ουσιαστικά την ελάττωση της έντασης του φωτός, που προκαλείται από το μεγαλύτερο δρόμο που διανύουν σ' αυτήν την περίπτωση, οι ακτίνες του ήλιου μέσα στην ατμόσφαιρα. Όπως είναι φανερό, ο λόγος  $m$ , εξαρτάται από τη ζενίθια γωνία  $z$ , μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της διεύθυνσης του ζενίθ του τόπου.

## 2.3 Ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον ήλιο

Η ενέργεια ανά  $\text{m}^2$ , που φτάνει στην επιφάνεια της Γης μέσα σε μια μέρα, εξαρτάται από:

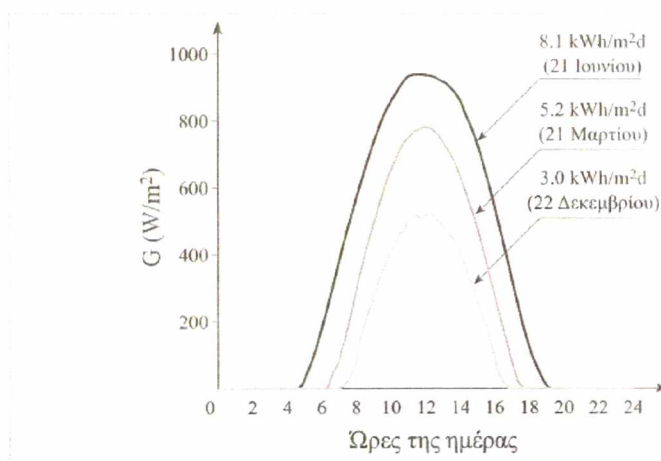
- την κλίση της συλλεκτικής επίπεδης επιφάνειας
- το γεωγραφικό πλάτος του τόπου
- τη μέρα του χρόνου και
- από τις συγκεντρώσεις των διαφόρων αερίων, υγρών και στερεών συστατικών και αιωρημάτων της ατμόσφαιρας, κατά την ημέρα εκείνη.

Οι συλλεκτικές επιφάνειες των μετρητικών οργάνων (αισθητήρων), μπορεί να προσανατολιστούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πειράματος και τις προδιαγραφές των οργάνων αυτών.

Προκειμένου, όμως, να υπάρχουν συγκρίσιμα στοιχεία, σε διεθνή κλίμακα, αναφερόμαστε σε μετρήσεις με αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται με τη συλλεκτική επιφάνεια, οριζόντια. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέσες ημερήσιες τιμές της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας ( $\text{W/m}^2$ ), σε οριζόντια επιφάνεια, μέσα σε κάθε μήνα και μέσα στο έτος. Για να αξιοποιηθούν αυτά τα μετεωρολογικά στοιχεία σε πρακτικές εφαρμογές (πχ. σε ενεργειακές μελέτες), απαιτούνται μετρήσεις που να καλύπτουν περίοδο πολλών ετών (πχ. 10 έως 30m ετών). Σε περιπτώσεις που λείπουν στοιχεία μακράς περιόδου για κάποιο τόπο, μπορούν να αξιοποιηθούν στοιχεία που έχουν συλλεχθεί σε μικρότερες χρονικές περιόδους, με την επιφύλαξη της μικρότερης αξιοπιστίας τους.

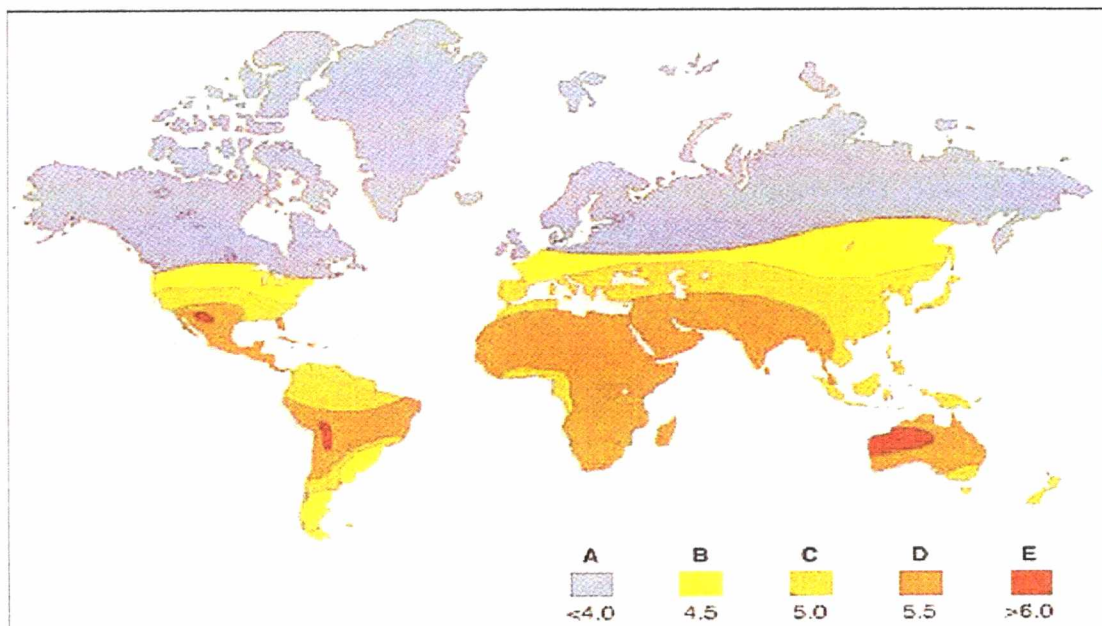
Η ημερήσια μεταβολή της πυκνότητας ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο ( $G \text{ (W/m}^2\text{)}$ ), απεικονίζονται στο σχήμα 2.11. Στο ίδιο σχήμα σημειώνονται και οι αντίστοιχες ενεργειακές πυκνότητες  $H \text{ (kWh/m}^2\text{*d)}$ , οι οποίες προκύπτουν ως ολοκλήρωμα ή “εμβαδόν” κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη. Σημειώνεται πάντως, ότι, κατά τη διάρκεια μερικής παρουσίας σύννεφων, γύρω απ' την

κατεύθυνση του ήλιου, μπορεί να παρατηρηθούν τιμές της πυκνότητας ισχύος μεγαλύτερες των τιμών που θα καταγράφονταν χωρίς την παρουσία τους. Το παράδοξο αυτό φαινόμενο οφείλεται στο ότι, με την παρουσία συστάδων από σύννεφα, που δεν καλύπτουν τον ήλιο, πέφτουν στον αισθητήρα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας, εκτός απ' τις απευθείας και διάχυτες ηλιακές ακτίνες, που αφορούν σε μια ηλιοφανή μέρα και οι σχετικά ισχυρά σκεδαζόμενες στα σύννεφα. Να σημειώσουμε ότι τα ολοκληρώματα κάτω από τις καμπύλες του σχήματος, ισούνται με την αντίστοιχη ημερήσια ενέργεια που προσφέρει ο ήλιος στο συλλέκτη ανά μονάδα επιφάνειας.



**Σχήμα 2.11 :** Καταγραφή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, με πυρανόμετρο σε οριζόντια επιφάνεια σε τρεις χαρακτηριστικές μέρες κατά τη διάρκεια του έτους.

Σε περιοχές κοντά στον Ισημερινό, η μέση ετήσια τιμή της είναι μεγαλύτερη (μέχρι και  $7 kWh/m^2 d$ ) και αντίστοιχα, σε περιοχές στα όρια των Εύκρατων ζωνών, είναι μικρότερη ( $<3 kWh/m^2 d$ ).



**Σχήμα 2.12 :** Παγκόσμιος χάρτης κατανομής των τιμών της μέσης ετησίως ημερήσιας πυκνότητας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντιο επίπεδο, σε  $kWh/m^2 d$ .



Ο χάρτης του σχήματος 2.12 δείχνει την κατανομή της μέσης, ετήσιας, ημερήσιας ενεργειακής απολαβής από τον ήλιο ανά τον κόσμο. Άξιο παρατήρησης είναι η ελαττωμένη τιμή σε περιοχές της Τροπικής Ζώνης (γύρω από τον Ισημερινό). Η υψηλή υγρασία των περιοχών αυτών, με την έντονη βλάστηση, έχει ως αποτέλεσμα την ισχυρή ελάττωση της άμεσης ακτινοβολίας.

### ➤ Μέτρηση της ηλικής ακτινοβολίας- Πυρανόμετρο

Ένα από τα όργανα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το πυρανόμετρο. Το πυρανόμετρο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ροής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ολόκληρο το ηλιακό φάσμα, η οποία προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια και προέρχεται τόσο απευθείας από τον ήλιο όσο και από την σκέδαση στα συστατικά της ατμόσφαιρας. Είναι σχεδιασμένο να δέχεται ακτινοβολία από ένα οπτικό πεδίο 180 μοιρών και δεν απαιτεί τροφοδοσία για να λειτουργήσει. Έτσι εφόσον το πυρανόμετρο είναι σχεδιασμένο να αντιδρά σε όλα τα μήκη κύματος του ηλιακού φωτός, είναι σε θέση να μας δώσει την ολική ενέργεια του προσπίπτοντος ηλιακού φάσματος.

Τοποθετείται πλήρως οριζοντιωμένο και μετρά συγχρόνως την άμεση και την διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες όμως γίνονται αισθητές σαν το γινόμενο της ροής της ακτινοβολίας και του συνημίτονου της γωνίας πρόσπτωσης, λόγω της κλίσης της αισθητήριας επιφάνειας σε σχέση με τις ακτίνες του φωτός. Για την μέτρηση της πυκνότητας ροής της ακτινοβολίας, απαιτείται εξ' ορισμού η απόκριση στην δέσμη του φωτός να μεταβάλλεται ανάλογα με το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης. Για παράδειγμα έχουμε την μέγιστη απόκριση για κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας και μηδενική απόκριση για γωνίες πρόσπτωσης 90 μοιρών. Συνεπώς το πυρανόμετρο πρέπει να έχει συνημιτονική απόκριση η οποία να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ιδανική χαρακτηριστική του συνημίτονου.

Για την καλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων το πυρανόμετρο πρέπει να τοποθετείται σε θέση με ελάχιστα εμπόδια ώστε να δέχεται ακτινοβολία από όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα του ουράνιου θόλου, να έχει δηλαδή ελεύθερο ορίζοντα. Τα πυρανόμετρα είναι τα όργανα που χρησιμοποιούνται κατεξοχήν για μετρήσεις σχετικές με την ηλιακή ενέργεια, λόγω του ότι ανταποκρίνονται σε ολόκληρο το ηλιακό φάσμα, η δε γεωμετρία τους προσομοιάζει τη γεωμετρία πολλών από τις διατάξεις συλλογής της ηλιακής ενέργειας.

Συχνά το πυρανόμετρο τοποθετείται στο ίδιο επίπεδο με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ώστε να είναι σε θέση να μετράει την επικείμενη ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτή την επιφάνεια.

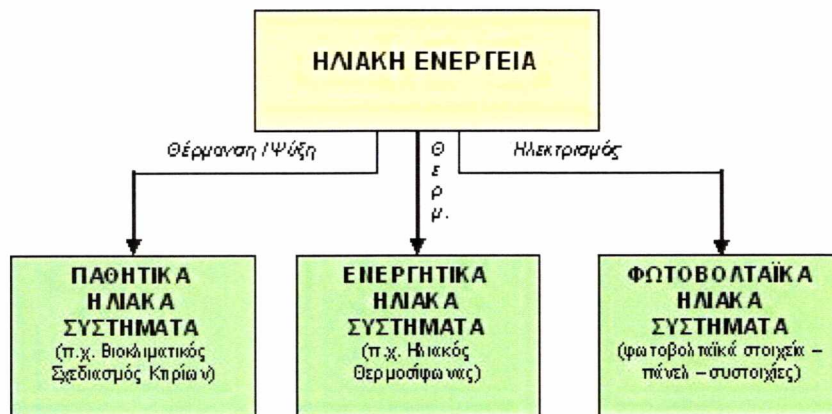


## 2.4 Εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας που είναι φιλική προς το περιβάλλον. Αντίθετα από τα απολιθωμένα καύσιμα, η ηλιακή ενέργεια είναι διαθέσιμη παντού στη γη. Είναι ελεύθερη και ανεπηρέαστη από τις αυξανόμενες τιμές ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους : για θέρμανση, φωτισμό και παραγωγή μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια εντάθηκε όταν χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών. Η φωτοβολταϊκή μέθοδος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια έχει κυρίως πλεονεκτήματα, αν εξαιρεθούν το σχετικά υψηλό κόστος για τις κάποιες εφαρμογές, η αδυναμία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια λόγω των διακυμάνσεων της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας γίνεται κατά διάφορους τρόπους, που διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα **παθητικά συστήματα** (βιοκλιματισμός, σχεδιασμός κτιρίων) που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε εσωτερική ενέργεια δομικών κατασκευών και στη δεύτερη, τα **ενεργά ηλιακά συστήματα**, που προκαλούν μετατροπή της, σε άλλη μορφής ενέργεια ή χρησιμοποιείται θερμικό ρευστό σε κίνηση . Στα ενεργά ηλιακά συστήματα συγκαταλέγονται αυτά που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε εσωτερική ενέργεια θερμικού ρευστού (**Θερμοσιφωνικά συστήματα**) και αυτά που μετατρέπουν το ηλιακό φως απ' ευθείας σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών (**Φωτοβολταϊκά συστήματα**). Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική με τη χρήση αυτών.



Σχήμα 2.13: Συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας



## 2.5 Προσανατολισμός του Συλλέκτη

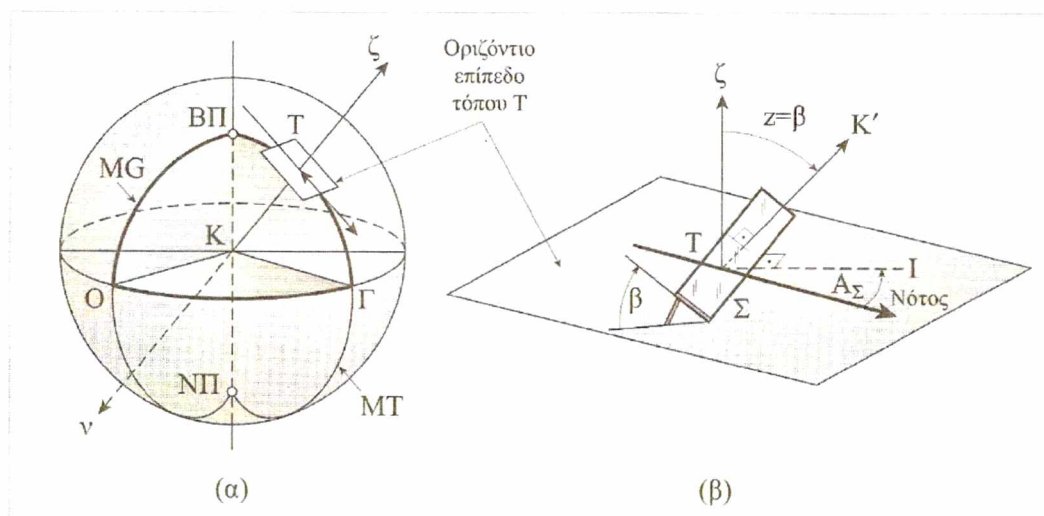
Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε, κατ' αρχήν, σε μια απλή μέθοδο προσδιορισμού του προσανατολισμού του συλλέκτη και στη συνέχεια θα εξετάσουμε σε συντομία τους διάφορους τρόπους τοποθέτησης των συλλεκτών, με βασική απαίτηση τη μεγιστοποίηση της ημερησίως συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας.

### 2.5.1 Στοιχεία προσδιορισμού του προσανατολισμού ενός Συλλέκτη

Κάθε τύπος πάνω στην επιφάνεια της γης, προσδιορίζεται από τις σφαιρικές συντεταγμένες του :

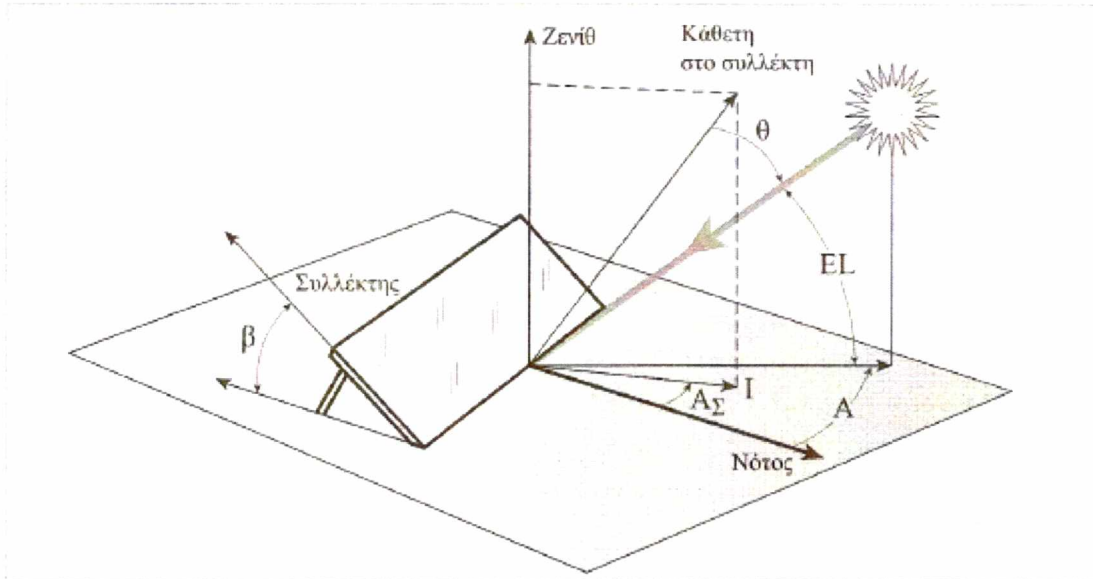
1. Το **γεωγραφικό μήκος**, ( $L$ ), που καθορίζεται από το τόξο  $ΟΓ$ , πάνω στον Ισημερινό ή σε άλλο παράλληλο, με αναφορά το μεσημβρινό του Greenwich ( $MG$ ), από  $0-180^\circ$  Ανατολικά και από  $0-180^\circ$  Δυτικά.
2. Το **γεωγραφικό πλάτος**, ( $\phi$ ), που καθορίζεται από το τόξο  $ΓΤ$ , πάνω στο μεσημβρινό του τόπου  $MT$ , με αναφορά τον Ισημερινό, από  $0-90^\circ$  Βόρεια και  $0-90^\circ$  Νότια.

Ας θεωρήσουμε έναν επίπεδο συλλέκτη,  $\Sigma$ , τοποθετημένο έτσι ώστε το επίπεδό του να σχηματίζει γωνία  $\beta$ , ως προς τον ορίζοντα. Η γωνία κλίσης του συλλέκτη,  $\beta$ , ισούται με τη ζενίθια γωνία,  $z$ , της καθέτου στο επίπεδο του συλλέκτη ( $TK'$ ), η οποία μπορεί να πάρει τιμές από  $0^\circ$  (Ζενίθ) έως  $180^\circ$  (Ναδίρ).



**Σχήμα 2.14 :** (α) Παράδειγμα τόπου  $T$ , πάνω στην επιφάνεια της γης, ο οποίος προσδιορίζεται από το γεωγραφικό μήκος του, ίσο με το τόξο  $ΟΓ$ , και από το πλάτος του, που καθορίζεται από το τόξο  $ΓΤ$ , πάνω στο μεσημβρινό του τόπου  $MT$ . (β)  $ΑΣ$  και  $\beta$ , αζιμούθιο και γωνία κλίσης του συλλέκτη  $\Sigma$ .

Η γωνία ΑΣ, μεταξύ της κατακόρυφης προβολής TI, της καθέτου στο συλλέκτη, TK' πάνω στο οριζόντιο επίπεδο, με τη διεύθυνση του νότου, ονομάζεται αζιμουθίο ή αζιμουθιακή γωνία του συλλέκτη και παίρνει τιμές από  $+180^\circ$  μέχρι  $-180^\circ$ . Χαρακτηριστικές θέσεις  $+180^\circ$  (Βορράς),  $+90^\circ$  (Ανατολή),  $0^\circ$  (Νότος),  $-90^\circ$  (Δύση) και  $-180^\circ$  (Βορράς). Όταν ο συλλέκτης στραφεί ώστε οι ακτίνες του ήλιου (απευθείας ακτινοβολία), να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του, τότε το ύψος του ήλιου EL και η γωνία κλίσης  $\beta$ , του συλλέκτη δίδουν άθροισμα  $90^\circ$  ( $EL + \beta = 90^\circ$ ).



**Σχήμα 2.15 :** Η γωνία  $\theta$ , μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και της καθέτης στο συλλέκτη, μια δεδομένη χρονική στιγμή, καθορίζεται από τον προσανατολισμό του συλλέκτη (Αζιμούθιο ΑΣ και γωνία κλίσης  $\beta$ ) και τις σφαιρικές συντεταγμένες της θέσης του ήλιου ως προς το σύστημα του παρατηρητή, στον τόπο T, δηλαδή αζιμούθιο A και το ύψος του (Elevation) EL.

Η στροφή του συλλέκτη, ώστε αυτός να παρακολουθεί ανά πάσα στιγμή τον ήλιο, γίνεται με μηχανισμούς, οι οποίοι οδηγούνται από κατάλληλες ηλεκτρονικές διατάξεις, με βάση τις εξισώσεις κίνησης του ήλιου στην ουράνια σφαίρα. Η γωνία  $\theta$ , που σχηματίζουν, μια δεδομένη χρονική στιγμή, οι ηλιακές ακτίνες (απευθείας ακτινοβολία), με την κάθετη σ' έναν επίπεδο συλλέκτη (σχήμα 2.15), γωνίας κλίσης  $\beta$  και αζιμουθιακής γωνίας ΑΣ, δίδεται από τη σχέση:

$$\cos(\theta) = \cos(EL) \sin(\beta) \cos(A - A\sigma) + \sin(EL) \cos(\beta)$$

όπου A, η αζιμούθια γωνία και EL το ύψος του ήλιου την ίδια χρονική στιγμή.

## 2.5.2 Τρόποι Στήριξης των Συλλεκτών και Προσανατολισμός τους

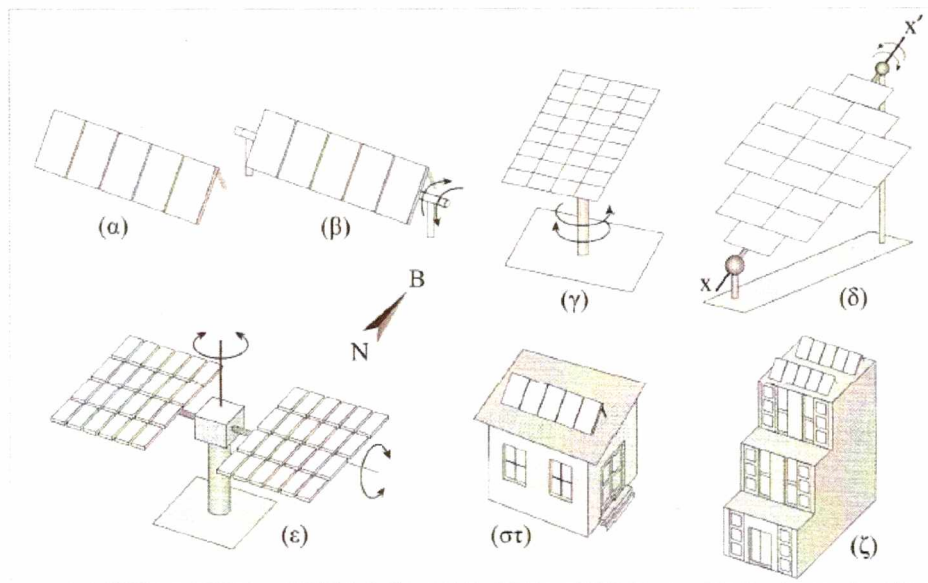
Διακρίνουμε τρεις διαφορετικούς τρόπους στήριξης συλλεκτών. Σταθερής στήριξης, εποχιακά ρυθμιζόμενης στήριξης και συνεχούς παρακολούθησης της θέσης του ήλιου, με διάταξη που ονομάζεται ηλιοτρόπιο (Solar Tracker). Το σχήμα 2.16 δείχνει μερικούς χαρακτηριστικούς τρόπους στήριξης ΦΒ συστοιχιών.



### 2.5.2.1 Στήριξη του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης.

Η απουσία κινητών μερών κατά την στήριξη της συστοιχίας με σταθερή κλίση, προσδίδει στη διάταξη επαρκή μηχανική αντοχή, ιδιαίτερα μάλιστα αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι. Στατικές συλλεκτικές επιφάνειες χρησιμοποιούνται επίσης ενσωματωμένες σε κτίρια (σχήμα 2.16), περιπτώσεις (α), (στ), (ζ)).

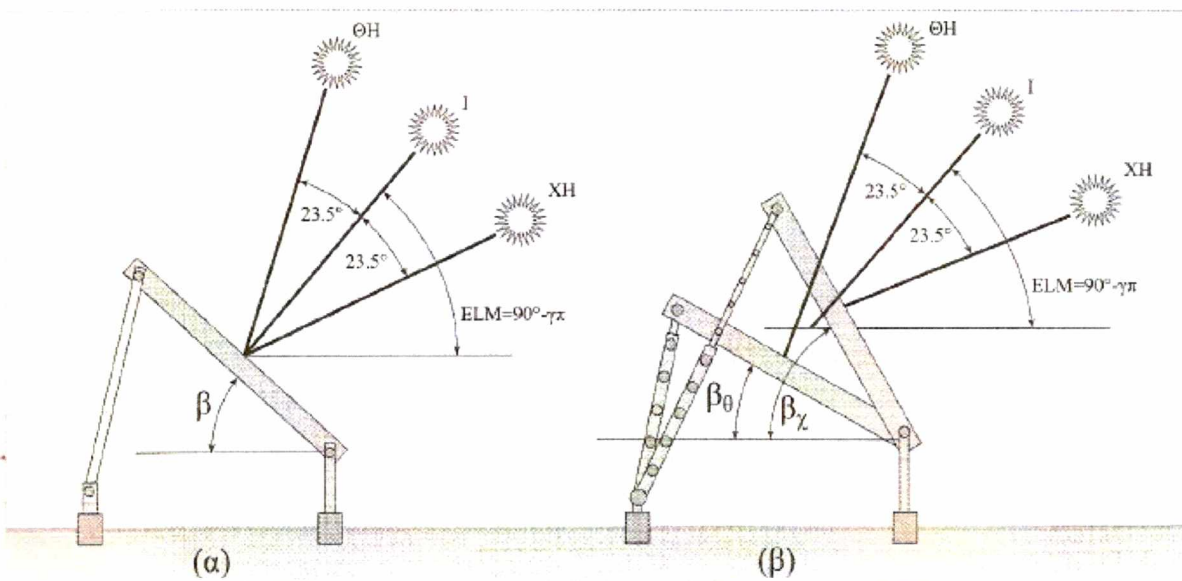
Η πιο αποδοτική περίπτωση είναι εκείνη κατά την οποία ο χώρος εγκατάστασης της συστοιχίας των συλλεκτών, δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, όλο το έτος. Κατά κανόνα επιλέγουμε νότιο αζιμουθιακό προσανατολισμό για τη συστοιχία και γωνία κλίσης κοντά στο γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης (σχήμα 2.17). Όταν η γωνία κλίσης ισούται ακριβώς με το γεωγραφικό πλάτος  $\phi$  του τόπου, οι ακτίνες του ήλιου πέφτουν κάθετα στο συλλέκτη δύο φορές το χρόνο (το μεσημέρι των ισημεριών).



**Σχήμα 2.16 :** Συλλεκτικές επιφάνειες με διαφορούς τρόπους στήριξης

(α) Τοποθέτηση ΦΒ συστοιχίας με σταθερή γωνία κλίσης (β) Συστοιχία με δυνατότητα στροφής γύρω από οριζόντιο άξονα (αλλαγή ζενίθιας γωνίας της συστοιχίας) (γ) Συστοιχία σε ηλιοτρόπιο αζιμουθιακής στροφής, με σταθερή γωνία κλίσης (δ) Συστοιχία με δυνατότητα στροφής ως προς τον άξονα (χχ'), ο οποίος διατηρείται κεκλιμένος συνήθως υπό γωνία ίση (ή μερικές φορές, λίγο μικρότερη) του γεωγραφικού πλάτους του τόπου, δηλαδή ως προς άξονα παράλληλο προς τον πολικό άξονα της γης. (ε) Τυπική διάταξη ηλιοτροπίου (Tracker) δύο αξόνων. (στ) ΦΒ συστοιχία στη στέγη κατοικίας (ζ) ΦΒ πλαίσια τοποθετημένα σε διάφορες θέσεις σε μεγάλη οικοδομή (τοποθέτηση υπό κλίση στη στέγη και σε προβόλους και κατακόρυφα (facade) σε όψεις νότιου προσανατολισμού.

Σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της βέλτιστης γωνίας συλλέκτη με σταθερή κλίση, παίζουν οι επικρατούσες, στην περιοχή, μετεωρολογικές συνθήκες, οι οποίες καθορίζουν τη σχέση μεταξύ των συνιστωσών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, απευθείας και διάχυτης, καθώς και το albedo του εδάφους (Η διάχυτη ανακλαστικότητα, δηλαδή το ποσοστό της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια της γης και ό,τι την καλύπτει, αναφέρεται, στη βιβλιογραφία, ως albedo). Για να προκύψει η βέλτιστη γωνία του συλλέκτη, επιβάλλεται να καταγραφούν στοιχεία σχετικά με τους παράγοντες αυτούς και ιδιαίτερα μετρήσεις της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, σε διάφορες γωνίες κλίσης συλλέκτη. Συνήθως επειδή τέτοιες μετρήσεις δεν είναι διαθέσιμες, αρκούμαστε σε μετρήσεις σε οριζόντια τοποθετημένο αισθητήρα (πυρανόμετρο), για μια σειρά ετών, γι' αυτή την περιοχή. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις που έχουν συλλεχθεί στην πλησιέστερη προς αυτή περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη πιθανή διαφοροποίηση του albedo του τόπου. Με βάση τις μετρήσεις αυτές προσδιορίζεται η ολική ακτινοβολία του συλλέκτη, απ' όπου προκύπτει, προσεγγιστικά, η βέλτιστη γωνία κλίσης του, για τη συγκεκριμένη περιοχή.



**Σχήμα 2.17 :** Τρόποι ρύθμισης του Συλλέκτη

- (α) Σταθερή στήριξη σε ετήσια βάση, με γωνία κλίσης  $\beta = \varphi - (10^\circ \text{ έως } 15^\circ)$   
 (β) Εποχική ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη δύο φορές μέσα στο έτος. ΘΗ: Θερινό Ηλιοστάσιο. ΧΗ: Χειμερινό Ηλιοστάσιο. Ι: Ισημερίες.

Στον **πίνακα 2.1** δίνονται ενδεικτικές τιμές γωνιών κλίσης συλλεκτών σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη.

Αν δε διατίθενται μετεωρολογικά δεδομένα για τον τόπο εγκατάστασης του ΦΒ συστήματος, ο οποίος δεν πρέπει να σκιάζεται από εμπόδια, κατά τη διάρκεια της ημέρας το καλύτερο που έχουμε να κάνουμε είναι να επιλέξουμε γωνία κλίσης συλλέκτη ίση με  $\beta = \varphi - (5^\circ \text{ έως } 10^\circ)$ . Κατά πάσα πιθανότητα, προσεγγίζει τη θέση της καλύτερης δυνατής εκμετάλλευσης της ημερήσιας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, ετησίως.

Τέλος, αν ο συλλέκτης πρέπει να εγκατασταθεί σε περιοχές με φυσικά εμπόδια, που τον σκιάζουν ορισμένη περίοδο της ημέρας, πχ. κτίρια ή δένδρα, τότε ο συλλέκτης προσανατολίζεται έτσι ώστε να προκύπτει η βέλτιστη απόδοση. Κατά τη σύνταξη της σχετικής μελέτης, λαμβάνεται υπόψη, αφενός το τμήμα του ουρανού που αποκόπτεται από τα εμπόδια, αφετέρου, το μικροκλίμα της περιοχής.

**Πίνακας 2.1:** Ενδεικτικές τιμές γωνιών κλίσης σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη

Περιοχή τιμών γεωγραφικού πλάτους ( $\varphi$ ) του τόπου	Ενδεικτικές τιμές γωνίας κλίσης συλλέκτη με νότιο προσανατολισμό για το βόρειο ημισφαίριο και αντιστοίχως βόρειο προσανατολισμό για το νότιο ημισφαίριο
Μικρά γεωγραφικά πλάτη, γύρω απ' τον Ισημερινό, $\varphi \leq 20^\circ$	Ουσιαστικά $0^\circ$ . Στην πράξη συνίσταται μια μικρή γωνία κλίσης, $5^\circ$ - $10^\circ$ , ώστε η ροή του νερού πλύσης ή της βροχής, να απομακρύνει τα σώματα που επικάθονται στην όψη του ΦΒ πλαισίου (σκόνη, φύλλα, περιττώματα πουλιών κ.ά. )
Μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, $\varphi > 20^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Σταθερή τοποθέτηση, απαίτηση για μέγιστη αποδοτικότητα ετησίως. <math>\rightarrow \varphi - (5^\circ \text{ έως } 10^\circ)</math></li> <li>➤ Σταθερή τοποθέτηση. Κύρια απαίτηση κατά τη χειμερινή περίοδο. <math>\rightarrow \varphi + 10^\circ</math></li> <li>➤ Ρυθμιζόμενη κλίση δυο θέσεων ετησίως. Θερινή <math>\rightarrow \varphi - 15^\circ</math> Χειμερινή <math>\rightarrow \varphi + 15^\circ</math></li> </ul>



### 2.5.2.2 Στήριξη με δυνατότητα εποχικής ρύθμισης της κλίσης του συλλέκτη

Στο σχήμα 2.17 παριστάνεται μια διάταξη συλλεκτών, με νότιο προσανατολισμό ( $A_s=0$ ), η οποία εκ κατασκευής έχει τη δυνατότητα εποχικής ρύθμισης της κλίσης. Προσδιορίζονται οι κατάλληλες κλίσεις και ο χρόνος των αλλαγών. Οι τυπικές θέσεις του συλλέκτη είναι δύο : μια για το θερινό εξάμηνο (21 Μαρτίου-21 Σεπτεμβρίου), με κλίση ίση με  $\beta_{\theta}=\{\varphi-(10^\circ \text{ έως } 15^\circ)\}$ , τιμή δηλαδή μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους του τόπου κατά  $10^\circ$  έως  $15^\circ$ , και μια για το χειμερινό (22 Σεπτεμβρίου – 21 Μαρτίου), με κλίση ίση με  $\beta_{\chi}=\{\varphi+ (10^\circ \text{ έως } 15^\circ)\}$ . Όπως και στην περίπτωση συλλέκτη σταθερής κλίσης όλο το έτος, έτσι και στην περίπτωση επιλογής χειμερινής και θερινής θέσης, η επιλογή της βέλτιστης γωνίας για το συλλέκτη σε κάθε περίοδο, απαιτεί γνώση των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών (θερμοκρασίας- υγρασίας- ηλιοφάνειας) και της μορφολογίας και κάλυψης του εδάφους, που καθορίζει τη διάχυτη ανακλαστικότητα του (albedo) .

### 2.5.2.3 Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη γύρω από έναν ή δύο άξονες

#### I. Στροφή γύρω από έναν άξονα

Η συστοιχία περιστρέφεται με κατάλληλο μηχανισμό, γύρω από έναν άξονα, και στο τέλος της ημέρας, ο συλλέκτης επιστρέφει σε θέση αναμονής, συνήθως στο νοτιά. Το πρωί με την ανατολή του ήλιου, στρέφεται, έτσι ώστε να δέχεται από τον ήλιο το μέγιστο της διαθέσιμης ενέργειας του. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

**α) Αξιμουθιακό ηλιοτρόπιο :** Η περιστροφή γίνεται ως προς κατακόρυφο άξονα (σχήμα 3.16γ), έτσι ώστε ο ήλιος να βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει την κάθετη στο συλλέκτη, του οποίου η γωνία κλίσης παραμένει σταθερή κατά την ημερήσια κίνησή του.

**β) Ηλιοτρόπιο πολικού άξονα :** Η συστοιχία έχει τη δυνατότητα στροφής γύρω από άξονα  $\chi\chi'$ , με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (σχήμα 2.16δ). Έτσι, κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο ήλιος βρίσκεται συνεχώς στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη και περιέχει τον άξονα  $\chi\chi'$ . Κατά τη διάρκεια του έτους, η γωνία μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και της κάθετης στο συλλέκτη, κυμαίνεται στο διάστημα  $-23.5^\circ$  έως  $+23.5^\circ$ .

#### II. Στροφή γύρω από δύο άξονες

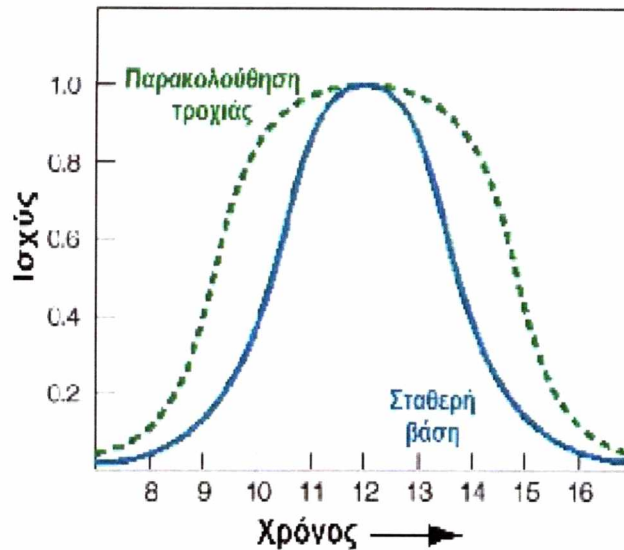
Η παρακολούθηση του ήλιου με περιστροφή γύρω από δύο (2) άξονες, επιτυγχάνεται μέσω δύο, συνήθως διαδοχικών, κινήσεων του συλλέκτη με ηλεκτρικούς κινητήρες, είτε βηματικούς είτε κινητήρες συνεχούς περιστροφής, με μειωτήρες και έλεγχο στροφών, για τον προσανατολισμό του επιπέδου, κάθετα στην απευθείας ηλιακή ακτινοβολία (σχήμα 2.16ε). Ο προσδιορισμός των κατάλληλων γωνιών στροφής γίνεται με ειδικές διατάξεις (Encoders). Όμοιο μηχανικό σύστημα, σε πολύ μικρότερες διαστάσεις, χρησιμοποιείται για τη στροφή του πυρηλιομέτρου, οπτικού οργάνου παρακολούθησης του ήλιου και καταγραφής της πυκνότητας ισχύος της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας.

Η διάταξη που περιγράψαμε, ονομάζεται ηλιοτρόπιο (Tracker) δυο αξόνων και χαρακτηρίζεται από το ότι ο συλλέκτης προσανατολίζεται συνεχώς προς τον ήλιο, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν κάθετα (ή σχεδόν κάθετα) στην επιφάνεια του. Η διάταξη, με τη δύση του ήλιου, επιστρέφει σε θέση αναφοράς, που χαρακτηρίζεται από νότιο προσανατολισμό και μικρή γωνία κλίσης, προκειμένου να προφυλαχθεί από πιθανό ισχυρό άνεμο, μέχρι την ανατολή. Λίγο πριν την ανατολή του ήλιου, ο μηχανισμός στρέφει το συλλέκτη, έτσι ώστε οι ηλιακές ακτίνες τότε, να προσπίπτουν κάθετα σ' αυτόν. Από τη χρονική στιγμή αυτή, αρχίζει η παρακολούθηση του ήλιου. Όσο μικρότερη η περίοδος ενεργοποίησης του μηχανισμού στροφής, τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η κατάσταση συνεχούς κάθετης πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων, χωρίς αυτό να είναι εξαιρετικά κρίσιμο. Μια γωνία  $10^\circ$ , μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και της καθέτου στο επίπεδο του συλλέκτη, προκαλεί μείωση  $\sim 1.5\%$ , στην πυκνότητα ισχύος της απευθείας συνιστώσας στο επίπεδο του συλλέκτη, ακτινοβολίας. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια κίνησης της διάταξης προέρχεται από την παραγόμενη από τη συστοιχία, ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια.

**Μειονέκτημα** μιας τέτοιας διάταξης παρακολούθησης του ήλιου, δύο αξόνων, είναι η οικονομική επιβάρυνση για την κατασκευή των μηχανολογικών και ηλεκτρικών τμημάτων της καθώς και η έκθεση της συστοιχίας στον κίνδυνο καταστροφής, εξαιτίας ισχυρού ανέμου. Για το λόγο αυτό, σε συστήματα με μηχανική κίνηση για τον προσανατολισμό των συλλεκτών προς τον ήλιο, ελέγχεται η ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε, στην περίπτωση ισχυρών ανέμων, οι συλλεκτικές επιφάνειες να διατάσσονται οριζόντια. Σ' αυτή τη θέση παρουσιάζουν μικρή μετωπική επιφάνεια προς τον άνεμο.

Οι διατάξεις πλήρους παρακολούθησης του ήλιου, με επίπεδα ΦΒ πλαίσια, έχουν εν γένει περιορισμένη χρήση και χρησιμοποιούνται κυρίως σε συγκεντρωτικά συστήματα, τα οποία λειτουργούν, ουσιαστικά, με την απ' ευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε πολλές περιπτώσεις επιλέγεται η μερική παρακολούθηση, με αξιμουθιακούς συλλέκτες σταθερής γωνίας κλίσης, επειδή είναι απλούστερη, φθηνότερη και πιο αξιόπιστη κατασκευή, σε σχέση με το ηλιοτρόπιο δύο αξόνων ή αυτό του πολικού άξονα. Η στατική κατασκευή, παρότι σχετίζεται με χαμηλότερη ετήσια ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας από τους συλλέκτες που τοποθετούνται σ' αυτή, αποτελεί απλούστερη και πιο αξιόπιστη κατασκευή. Το κόστος των ειδικών μηχανολογικών κατασκευών και ηλεκτρονικών οδήγησης του ηλιοτροπικού συστήματος παραμένει σημαντικό σε σύγκριση με το κόστος των ΦΒ πλαισίων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, σε κάθε περίπτωση προέχει η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία του συστήματος συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας, το στατικό σύστημα αποτελεί, στις περισσότερες των περιπτώσεων, την πιο ενδεδειγμένη λύση, ιδιαίτερα στην περίπτωση εφαρμογών μικρής ισχύος, με χρήση επίπεδων ΦΒ πλαισίων.





**Σχήμα 2.18:** Παραγόμενη ισχύς από μία συστοιχία με και χωρίς σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου

Ο άνεμος είναι ίσως ο μοναδικός εχθρός των ηλιοτροπίων. Λόγω των κινουμένων μερών παρουσιάζεται ο κίνδυνος καταστροφής τους από δυνατό άνεμο. Για το λόγο αυτό πρέπει κατά τη τοποθέτησή τους να προβλέπεται κατάλληλη στερέωση. Σε αρκετές περιπτώσεις γίνεται χρήση ανεμομέτρου έτσι ώστε σε περίπτωση ισχυρών ανέμων το ηλιοτρόπιο να βρίσκεται σε οριζόντια θέση (για ηλιοτρόπια δυο αξόνων) ή σε θέση όπου παρουσιάζεται η μικρότερη μετώπη με τον αέρα. Η θέση αυτή, κατά κανόνα, είναι η νότια θέση αναφοράς. Σε αυτή τη θέση βρίσκεται και κατά τη διάρκεια της νύχτας, από τη δύση έως την ανατολή.

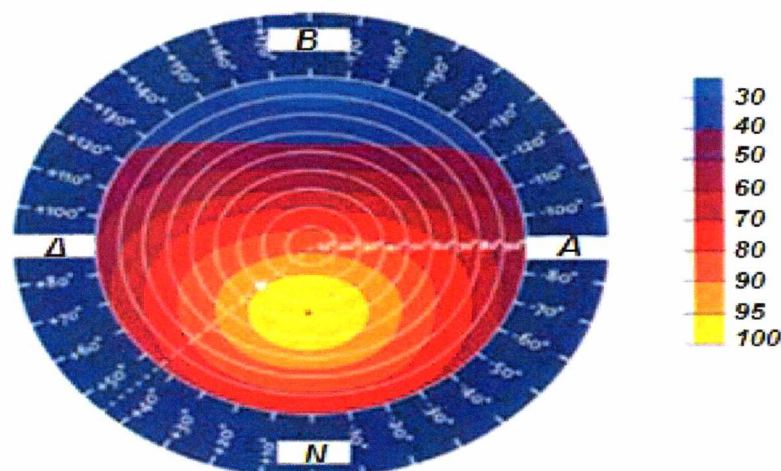
## 2.6 Ο Προσανατολισμός του Συλλέκτη ως προς τον αληθή Νότο

Η θέση αναφοράς για τα ηλιοτρόπια είναι ο αληθής νότος (για τα ηλιοτρόπια δυο αξόνων εκτός από τον αληθή νότο, ορίζουμε και μια γωνία αναφοράς π.χ  $20^\circ$ ). Έτσι κατά την τοποθέτηση πρέπει να προσδιοριστεί σωστά ο νότος για να την αποφυγή σφαλμάτων κατά την λειτουργία της συσκευής. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε ηλιοτρόπια που ελέγχονται μέσω υπολογιστή. Σε περίπτωση λανθασμένου προσανατολισμού θα υπάρχει μειωμένη απόδοση κατά την λειτουργία, καθώς ο προσανατολισμός αποτελεί το σημείο αναφοράς για τον υπολογισμό της κατάλληλης γωνίας.

Από τη θέση αναφοράς γίνεται ο υπολογισμός της θέσης στην οποία πρέπει να βρίσκεται το ηλιοτρόπιο κατά την ανατολή για να ξεκινήσει η παρακολούθηση του ήλιου. Για να αντιληφθεί το σύστημα την θέση αναφοράς χρησιμοποιείται διακόπτης ο οποίος ενεργοποιείται με την κίνηση του ηλιοτροπίου. Διακόπτες τοποθετούνται επίσης, στις οριακές θέσεις που παίρνει το σύστημα, για προστασία του, καθώς κατά την λειτουργία του μπορεί να παρουσιαστεί βλάβη και να κινηθεί πέρα από τα όρια του. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται συχνά στην περίπτωση του ελέγχου μέσω αισθητήρων φωτός, λόγω των ανακλώμενων ακτίνων.


Για τον προσδιορισμό του αληθιού Νότου, υπάρχουν διάφορα σχετικά όργανα, όπως η μαγνητική και η γυροσκοπική πυξίδα, όπως επίσης ο υπολογισμός και προσδιορισμός της χρονικής στιγμής του ηλιακού μεσημεριού. Για την εύρεση του αληθιού Νότου με τον προσδιορισμό του ηλιακού μεσημεριού σε ένα τόπο, προσδιορίζεται η διεύθυνση της σκιάς που δημιουργεί μια κατακόρυφη λεπτή ράβδος, που βρίσκεται σε οριζόντιο επίπεδο, κατά τη στιγμή που ο Ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο της φαινόμενης ημερησίας τροχιάς του. Για να γίνει αυτό εφικτό, απαιτείται η γνώση της αντίστοιχης χρονικής στιγμής, με βάση τον τοπικό χρόνο, τον οποίο δείχνει ένα ρολόι που είναι προγραμματισμένο να λειτουργεί με τον Επίσημο ή Πολιτικό χρόνο. Η εύρεση του ηλιακού μεσημεριού με βάση τον επίσημο χρόνο, απαιτεί τη γνώση δύο στοιχείων, τη ζώνη του πολιτικού χρόνου όπως και το γεωγραφικό μήκος του τόπου και η χρονική διόρθωση με βάση την εξίσωση του χρόνου, για την συγκεκριμένη ημέρα του έτους.

Ο προσδιορισμός της σωστής γωνίας του συλλέκτη γίνεται με αισθητήρες θέσης ή περιστροφής (encoders). Υπάρχουν αρκετά είδη αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες μας. Κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα την αρχή λειτουργίας τους: οπτικοί, μαγνητικοί και ηλεκτρικής τάσης (ποτενσιόμετρα). Τελευταία έχουν εμφανιστεί αισθητήρες οι οποίοι αντιλαμβάνονται την αλλαγή του μαγνητικού πεδίου της γης όταν αλλάζουν θέση. Μεγάλο πλεονέκτημα είναι η υψηλή ευαισθησία και ακρίβεια ενώ μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος αγοράς και η επίδραση τους με χαλύβδινα αντικείμενα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται στην κατασκευή υλικά από ανοξείδωτο χάλυβα και αλουμίνιο.



**Σχήμα 2.19:** Απόδοση (%) σε σχέση με την ιδανική τοποθέτηση/ Βέλτιστος προσανατολισμός φ/β πλαισίων

**Πίνακας 2-2:** Απόδοση φωτοβολταϊκών σε διάφορες κλίσεις και προσανατολισμούς

Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	0° 	30° 	90° 
Ανατολικός - Δυτικός	90	85	50
Νοτιοανατολικός- Νοτιοδυτικός	90	95	60
Νότιος	90	100	60
Βορειοανατολικός- Βορειοδυτικός	90	67	30
Βόρειος	90	60	20



- Τα φωτοβολταϊκά έχουν τη μέγιστη απόδοση όταν έχουν νότιο προσανατολισμό. Αποκλίσεις από το Νότο έως και 45° είναι επιτρεπτές, μειώνουν όμως την απόδοση.
- Η σωστή κλίση του φωτοβολταϊκού σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Συνήθως επιλέγεται μια κλίση που να δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στην Ελλάδα, η βέλτιστη κλίση είναι γύρω στις 30°.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



### 3.1 Ιστορική Αναδρομή

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία , γνωστά ως “φωτοβολταϊκά” ή “Φ/Β”, αποτελούν μια προσέγγιση υψηλής τεχνολογίας για την άμεση μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο όρος “φωτό” προέρχεται από το φως, το δε “βόλτ” οφείλεται στον Ιταλό φυσικό κόμη Alessandro Volta (1745-1827), ένα πρωτοπόρο στη μελέτη του ηλεκτρισμού, ο οποίος εφεύρε τη μπαταρία.



Η πρώτη γνωριμία του ανθρώπου με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε το 1839 όταν ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel (1820 - 1891) ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά την διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. 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 σελήνιο είναι ένα μη-μεταλλικό στοιχείο, παρόμοιο με το θείο.

**Δεκαετία του 1880.** Κατασκευάστηκαν οι πρώτες φωτοβολταϊκές κυψέλες από σελήνιο, οι οποίες μετέτρεπαν το ορατό φάσμα του φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα με απόδοση που κυμαινόταν μεταξύ 1% και 2%. Οι φωτοευαίσθητοι αισθητήρες των φωτογραφικών μηχανών κατασκευάζονται ακόμα και σήμερα από σελήνιο. Το **1904** Ο Albert Einstein γράφει την πληρέστερη θεωρία γύρω από το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Για την θεωρητική του εξήγηση τιμήθηκε με βραβείο Nobel το 1921.



Το **1918** Ο Πολωνός φυσικός Jan Czochralski ανέπτυξε αξιόπιστη μέθοδο παραγωγής μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Οι πλέον αποδοτικές και εμπορικά αξιοποιήσιμες σήμερα φωτοβολταϊκές κυψέλες βασίζονται στο μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. 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.

**Στις Αρχές 1950** Αναπτύχθηκε ο μετρητής Czochralski για την μαζική παραγωγή κρυσταλλικού πυριτίου υψηλής καθαρότητας, απαραίτητου για την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών υψηλής απόδοσης. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell Telephone Laboratories το 1954 από τους **Chapin, Fuller και Pearson**. Η απόδοση του ήταν 6% εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Αργότερα η απόδοση ανέβηκε στο 11%.

Το **1958** Κατασκευάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 9% .η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσαρτάται στον χώρο των διαστημικών εφαρμογών όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο **Vanguard** Το σύστημα αυτό λειτούργησε επιτυχώς για 8 ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα Δύο ακόμη δορυφόροι

ο Explorer III & ο Vanguard II εκτοξεύονται από τους Αμερικάνους και ο Sputnik III από τους Σοβιετικούς.

Στην Georgia κατασκευάζεται ο πρώτος τροφοδοτούμενος από φωτοβολταϊκά στοιχεία τηλεφωνικός αναμεταδότης. Από το χρονικό αυτό σημείο και μετά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να ενσωματώνονται σταδιακά σε διάφορες εφαρμογές και η τεχνολογία να βελτιώνεται συνεχώς.

Το **1959** Παράγονται φωτοβολταϊκά με 10% απόδοση. Η Αμερική εκτοξεύει τους δορυφόρους Explorer VI & VII με 9.600 φωτοβολταϊκά στοιχεία και **1960** παράγονται φωτοβολταϊκά με 14% απόδοση.

Το **1962** η μεγαλύτερη ΦΒ εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε έναν φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242Wp. **1963**. Μαζική παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου. Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν λοιπόν να κάνουν την εμφάνισή τους αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοση των ΦΒ συνεχώς βελτιωνόταν. Κυριότερος πελάτης των φωτοβολταϊκών τις δεκαετίες που ακολούθησαν είναι η NASA. Την ίδια χρονιά τίθεται σε τροχιά από την εταιρεία Bell Telephone Laboratories ο πρώτος τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος (Telstar) με φωτοβολταϊκά στοιχεία ισχύος 14 W

Οι υψηλές τιμές στα φωτοβολταϊκά ήταν ο σημαντικότερος λόγος που δεν υπήρχε περισσότερο ενθουσιώδης αποδοχή από την αγορά. Ενδεικτικά η τιμή των φωτοβολταϊκών ξεκινάει από τα **500\$** ανά εγκατεστημένο Watt το 1956, ενώ μετά από 14 χρόνια, το 1970 αγγίζει τα **100\$/Watt**. Το 1973 οι βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής φέρνουν το κόστος των φωτοβολταϊκών στα **50\$/Watt**.

Το **1972** Γάλλοι επιστήμονες εγκαθιστούν σε χωριό του Νίγηρα φωτοβολταϊκό σύστημα Θειούχου Καδμίου (CdS) για την τροφοδοσία εκπαιδευτικής τηλεόρασης ενός σχολείου. Στο μέλλον, οι κυψέλες CdS υπόσχονται πολλά στη μείωση του κόστους παραγωγής και στην αύξηση των αποδόσεων. Το **1973-74**. Η πρώτη ενεργειακή κρίση ώθησε το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. στην ίδρυση του Ομοσπονδιακού Προγράμματος για την Εκμετάλλευση του Φωτοβολταϊκού φαινομένου (Federal Photovoltaic Utilization Program). Πολλά από τα 3.100 συστήματα, το οποία εγκαταστάθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος αυτού, εξακολουθούν ακόμα και σήμερα να λειτουργούν.

Το **1976**. Οι πρώτες φωτοβολταϊκές κυψέλες άμορφου πυριτίου κατασκευάζονται από τον David Carlson και τον Christopher Wronski των RCA Laboratories. Οι κυψέλες άμορφου πυριτίου επέτρεψαν την ανάπτυξη των τεχνολογιών λεπτής μεμβράνης. Ένα χρόνο μετά (**1977**) Η συνολική παραγωγή φωτοβολταϊκών ξεπερνά τα 500 kW. Στην Αυστραλία στο Pentax World Solar Challenge νικά ένα κινούμενο από φωτοβολταϊκά αυτοκίνητο της General Motors με μέση ταχύτητα 71 km/h.

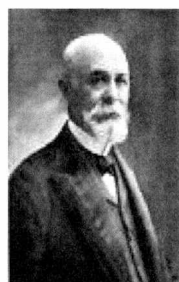
Η πρώτη εγκατάσταση PV που φτάνει στα επίπεδα του 1MW (μεγαβατ) γίνεται στην Καλιφόρνια το **1980** από την ARCO Solar χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου 2 αξόνων (dual-axis trackers). Η εξέλιξη αρχίζει πλέον να γίνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Το **1983** η παγκόσμια παραγωγή ΦΒ φτάνει τα 22MW και ο συνολικός τζίρος τα 250.000.000\$ και το **1984** Κυκλοφορούν τα άμορφα φωτοβολταϊκά

Το **1999** η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ σε φωτοβολταϊκά φτάνει τα 1000 MW. την ίδια χρονιά η εταιρία Spectrolab σε συνεργασία με το NREL αναπτύσσουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο με απόδοση 32,3%! Το στοιχείο αυτό είναι συνδυασμός τριών υλικών (στρώσεων) και ειδικό για εφαρμογές σε συγκεντρωτικά συστήματα CPV. 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 MegaWatt.

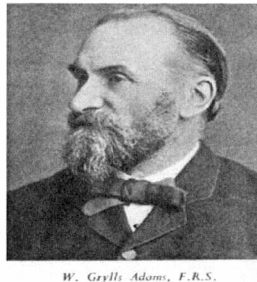
Πλέον του 2004: Η πορεία πια είναι ασταμάτητη. Η μαζική είσοδος μεγάλων εταιρειών στον χώρο των ΦΒ φέρνει την μαζική παραγωγή και αυτή με την σειρά της την τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων στα 6,5 ευρώ/Wp. Γερμανία και Ιαπωνία κυριαρχούν στην κατασκευή ΦΒ πάνελ και πλέον σε όλες τις αναπτυσσόμενες χώρες αρχίζουν, με τον έναν (παραγωγή εξοπλισμού) ή τον άλλον τρόπο (κατασκευή ΦΒ εγκαταστάσεων), να υιοθετούν τις τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών και να τις παγιώνουν στην συνείδηση των επενδυτών αλλά και των καταναλωτών ενέργειας. Η συνολική παραγωγή το 2004 έφτασε τα 1.200 MegaWatt ΦΒ στοιχείων ενώ ο τζίρος της ίδιας χρονιάς άγγιξε τα 6.500.000.000\$. Σήμερα με οικονομίες μεγάλης κλίμακας έχουν επιτευχθεί μεγάλες αποδόσεις στα κρυσταλλικά κυρίως υλικά και αρκετές χώρες με πρωτοπόρες την Γερμανία και την Ιαπωνία έχουν ήδη επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

1839	Παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε μεταλλικά ηλεκτρόδια (Pt, Ag) βυθισμένα σε ηλεκτρολύτες (Becquerel)
1871	Περιγραφή των μεταβολών των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του σεληνίου όταν αυτό εκτίθεται στο φως (Adams και Day).
1883	Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από σελήνιο (Charles Edgar Fritts).
1937	Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από PbS (Fischer και Godden).
1941	Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Si (Ohl).
1952	Ανακάλυψη της μεθόδου της τηγμένης ζώνης για την κατασκευή στερεών πολύ μεγάλης καθαρότητας (Pfann).
1953	Ανακάλυψη της μεθόδου σχηματισμού ενώσεων p-n με διάχυση προσμίξεων (Fuller).
1954	Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Si με σχηματισμό ένωσης p-n με διάχυση προσμίξεων και με απόδοση ( D. Chapin , C.Fuller και G. Pearson).
1956	Εμπορική εισαγωγή ηλιακών στοιχείων (Εταιρεία Hoffmann).
1958	Εκτόξευση του αμερικάνικου τεχνητού δορυφόρου Vanguard 1, εξοπλισμένου με έξι μικρά στοιχεία Si, ισχύος 5 MW, βοηθητική ενεργειακή πηγή.
1958	Εκτόξευση σοβιετικού τεχνητού δορυφόρου με αποκλειστική τροφοδότηση από ηλιακά στοιχεία.
1959	Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Cd S, με απόδοση 5% (Hammond).
1972	Κατασκευή του «ιώδους» ηλιακού στοιχείου Si, με απόδοση 14% (Lindmayer και Allison).
1976	Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από άμορφο Si, με απόδοση 0,01% (Carlson και Wronski).
1977	Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από GaAs, με απόδοση 16% (Kameth).
1981	Πτήση πάνω από τη Μαγχη του αεροπλάνου Solar Challenger, εξοπλισμένου με 16128 ηλιακά στοιχεία Si, ισχύς 2,7 KW.
1983	Εναρξη εμπορικής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού σταθμού της Βικτροβίλ, ισχύος 1 MW.
1984	Εναρξη βιομηχανικής παραγωγής ηλιακών στοιχείων στην ιαπωνία από άμορφο πυρίτι με απόδοση 5%.

**Σχήμα 3.1:** Οι κυριότεροι σταθμοί στην εξέλιξη των φωτοβολταϊκών.



Edmond Becquere



Adams



Czochralski



## 3.2 Βασικές Εννοιες Στερεάς Κατάστασης

### 3.2.1 Ηλεκτρικές Ιδιότητες Των Υλικών

Τα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα, που ισοδύναμα, μιλώντας με κβαντομηχανικούς όρους, μεταφράζεται σε σχετική θέση και συγκρότηση των λεγομένων ζωνών αγωγιμότητας και σθένους και την τιμή του εύρους της απαγορευμένης ζώνης.

Τα υλικά με βάση τα παραπάνω χωρίζονται σε:

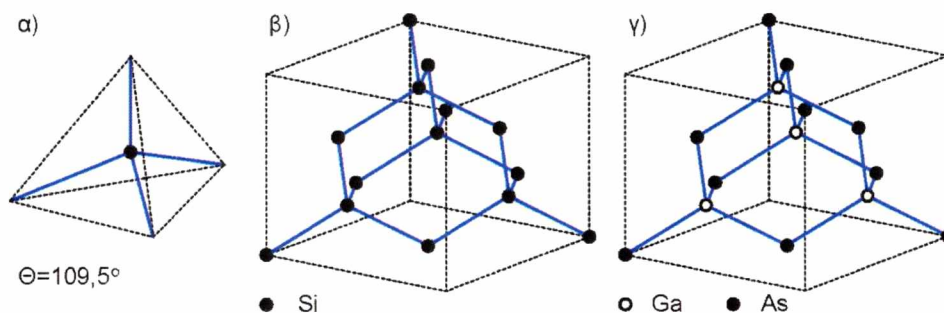
**α) Αγωγούς**, που είναι κυρίως τα Μέταλλα αλλά και τα κράματά τους. Στους αγωγούς, φορείς του ρεύματος είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που κινούνται στο κρυσταλλικό πλέγμα και για τον λόγο αυτό τα μέταλλα παρουσιάζουν ηλεκτρική αγωγιμότητα όταν εφαρμοστεί σε αυτά ένα ηλεκτρικό πεδίο. Στα ελεύθερα ηλεκτρόνια οφείλεται και η μεταλλική λάμψη των μετάλλων.

**β) Ημιαγωγούς**, όπως το πυρίτιο, που άγουν το ρεύμα κάτω από ορισμένες συνθήκες (λ.χ. σχετικά αυξημένη θερμοκρασία, πρόσπτωση φωτός κ.λ.π.) και για τον λόγο αυτό καλούνται ημι-αγωγοί δηλαδή “μισοί” αγωγοί”.

**γ) Μονωτές ή διηλεκτρικά**, στους οποίους όλοι οι φορείς (ηλεκτρόνια) είναι πλήρως και σταθερά δεσμευμένα στα άτομα του κρυσταλλικού πλέγματος και μια συνηθισμένη προσφορά ενέργειας δεν μπορεί να δημιουργήσει ελεύθερα ηλεκτρόνια, άρα δεν παρουσιάζουν ηλεκτρική αγωγιμότητα.

### 3.2.2 Δομή & Βασική Θεωρία Ημιαγωγών

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες κατασκευάζονται από ημιαγωγούς που αποτελούν σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεταξύ αγωγών (μέταλλα) και μονωτών (πολυμερή, κεραμικά υλικά). Οι κυριότεροι ημιαγωγοί είναι τετρασθενή στοιχεία, όπως το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge) ή ακόμα και χημικές ενώσεις με τετραεδρική δομή (Σχήμα 1), όπως το αρσενιούχο γάλλιο και το θειούχο κάδμιο.

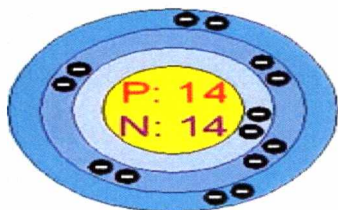


Σχήμα 3.2: δομή ημιαγωγών

α) Η κρυσταλλική δομή των κυριότερων ημιαγωγών είναι τετραεδρική, δηλαδή τα γειτονικά άτομα βρίσκονται σε θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος που αντιστοιχούν στο κέντρο και στις κορυφές ενός κανονικού τετραέδρου.

β) Στους στοιχειακούς αγωγούς (π.χ. Si) όλα τα άτομα του πλέγματος είναι ίδια.

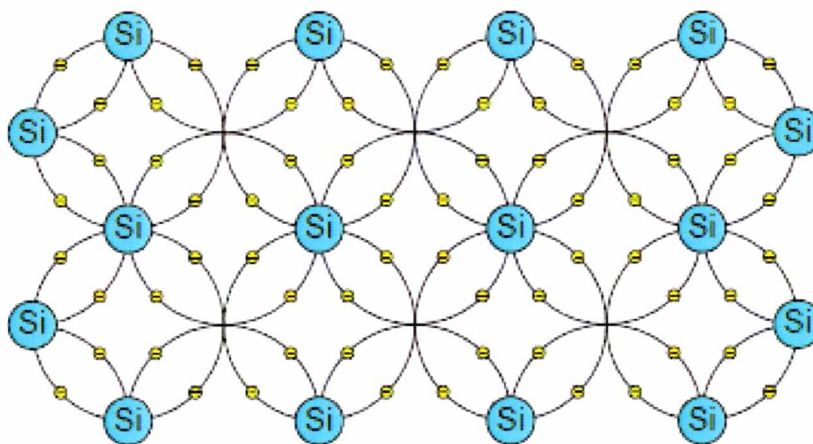
γ) Στις ημιαγώγιμες χημικές ενώσεις (π.χ. Si) τα άτομα που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις είναι διαφορετικά.



Συγκεκριμένα το πυρίτιο αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο ημιαγώγιμου στοιχείου, καθώς η χρήση του έχει επικρατήσει σχεδόν στο σύνολο των ηλεκτρονικών εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων και των φωτοβολταϊκών. Το πυρίτιο συναντάται σε δύο αλλοτροπικές μορφές, μια άμορφη και μια κρυσταλλική. Το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει μεταλλική λάμψη, είναι

σκληρό και έχει σκούρο γκρι χρώμα. Είναι στερεό σε θερμοκρασία δωματίου και δεν είναι ούτε ελατό ούτε όλκιμο. Το πυρίτιο έχει ατομικό αριθμό 14 και έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 4 ηλεκτρόνια. Όλα τα άτομα που έχουν λιγότερα ή περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (είναι "γενικά" συμπληρωμένη με 8 e) ψάχνουν άλλα άτομα με τα οποία μπορούν να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια ή να μοιραστούν κάποια με σκοπό τελικά να αποκτήσουν συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα σθένους.

Σε αυτήν την τάση οφείλεται και η κρυσταλλική δομή του πυριτίου αφού όταν συνυπάρχουν πολλά άτομα μαζί διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνεισφέρουν ηλεκτρόνια με όλα τα γειτονικά τους άτομα και τελικά με αυτόν τον τρόπο να αποκτούν μια συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα και κρυσταλλική δομή. Αυτή είναι και η καθοριστική ιδιότητα που έχουν τα κρυσταλλικά υλικά. Όπως φαίνεται από την επίπεδη απεικόνιση του πλέγματος του πυριτίου (Σχήμα 2), κάθε άτομο πυριτίου είναι ενωμένο με 4 γειτονικά άτομα με ομοιοπολικούς δεσμούς. (Στο πλέγμα τα ηλεκτρόνια σθένους αλλάζουν συνεχώς θέσεις μεταξύ τους κινούμενα από και προς τους γειτονικούς δεσμούς του Si.).



**Σχήμα 3.3:** Επίπεδη απεικόνιση του πλέγματος του πυριτίου

Επομένως όλα τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων πυριτίου είναι δεσμευμένα στους ομοιοπολικούς δεσμούς, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθεροι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος και το σώμα να μη διαθέτει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτό συμβαίνει όμως μόνο στην περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή στην κατάσταση εκείνη όπου το ενεργειακό του περιεχόμενο είναι πολύ χαμηλό (θερμοκρασιακή περιοχή απολύτου μηδενός). Στην κατάσταση αυτή οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται σαν μονωτές.

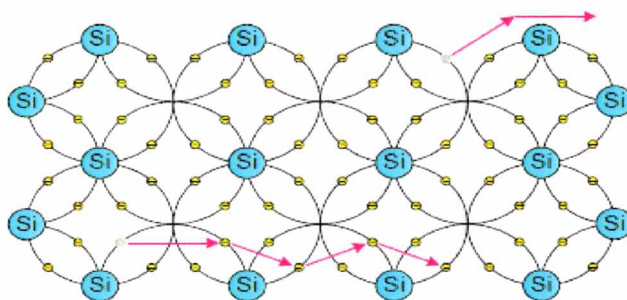
Όταν όμως οι ημιαγωγοί απορροφήσουν κάποιο ποσό ενέργειας, μέσω θερμότητας ή ακτινοβολίας, τότε διαταράσσονται οι ομοιοπολικοί δεσμοί μεταξύ ατόμων πυριτίου. Έτσι σε συνηθισμένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η θερμική ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομά του προκαλεί την απελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους ομοιοπολικούς δεσμούς. Αναλυτικότερα, η συνεχής ανακατανομή της θερμικής ενέργειας από το ένα άτομο στο άλλο, είναι δυνατό να προκαλέσει, στιγμιαία και σε τυχαίες θέσεις, τη διέγερση δεσμευμένων ηλεκτρονίων (στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου), με αποτέλεσμα αυτά να απελευθερωθούν και να αρχίσουν να κινούνται ελεύθερα. Τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους, χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από τη θερμότητα. Κατά συνέπεια ο ημιαγωγός διαθέτει πλέον ευκίνητους φορείς ηλεκτρισμού, οι οποίοι και του προσδίδουν αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσό της ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας για την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου σθένους από το δεσμό στον οποίο ανήκει είναι συγκεκριμένο και ισούται με το ενεργειακό διάκενο  $E_g$  του ημιαγωγού. Ως ενεργειακό διάκενο ορίζεται η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των εξής δυο ζωνών:

- της ζώνης αγωγιμότητας η οποία περικλείει τις ενέργειες των ελεύθερων ηλεκτρονίων που είναι υπεύθυνες για την ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος στον ημιαγωγό, και
- της ζώνης σθένους, η οποία και περικλείει τις διάφορες ενεργειακές στάθμες των ατόμων των ημιαγωγικών στοιχείων.



Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από κάποιο δεσμό δεν συνεπάγεται την καταστροφή του κρυσταλλικού πλέγματος (όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4), καθώς τα άτομα των οποίων έσπασε ο δεσμός εξακολουθούν να συνδέονται με τα γειτονικά τους άτομα με τρεις άθικτους δεσμούς καθώς και μεταξύ τους με έναν ατελή δεσμό ενός ηλεκτρονίου. Οι τρεις και ο ήμισυ δεσμός είναι ικανοί να συγκρατήσουν σε συνοχή τον κρύσταλλο και μετά την ελευθέρωση του ηλεκτρονίου. Άλλωστε έχει αποδειχθεί ότι το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων, δηλαδή το πλήθος των διασπασμένων δεσμών των σωμάτων που μας ενδιαφέρουν, είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνόλου των δεσμών των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος.



**Σχήμα 3.4:** Μετακίνηση ηλεκτρονίων ανάμεσα στους δεσμούς

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ( $e$ ) περιφέρονται άτακτα στο κρυσταλλικό σώμα, ανάμεσα στα άτομα και τους δεσμούς τους. Αυτό συμβαίνει για όσο χρονικό διάστημα διατηρούν την αυξημένη τους ενέργεια. Όταν η ενέργεια τους μειωθεί σημαντικά, δεσμεύονται στην κενή θέση κάποιου ατελούς δεσμού, που μπορεί να συναντήσουν στον δρόμο τους και παύουν να είναι ελεύθερα. Ο ατελής δεσμός στον οποίο θα επιστρέψουν τα ηλεκτρόνια δεν είναι απαραίτητο να αντιστοιχεί σε εκείνον από τον οποίο έφυγαν. Όσο χρονικό διάστημα τα ηλεκτρόνια αυτά είναι ελεύθερα, συμβάλλουν στην αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σώματος, για αυτό και ονομάζονται ηλεκτρόνια αγωγιμότητας.

Οι κενές ηλεκτρονικές θέσεις των χημικών δεσμών, που ονομάζονται **οπές (h)**, λειτουργούν σαν παγίδες δέσμευσης για όσα ηλεκτρόνια έχουν χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Αλλά ακόμη και αν δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στην περιοχή γύρω από την οπή, δεν σημαίνει ότι η κενή θέση μένει αμετακίνητη, καθώς μπορεί να προσελκύσει κάποιο ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικού δεσμού. Τότε το ηλεκτρόνιο αυτό αποδεσμεύεται από τον δεσμό που άνηκε, δημιουργώντας ταυτόχρονα μια κενή θέση, και συμπληρώνει την κενή θέση της γειτονικής οπής (σχήμα 3.4). Η μετατόπιση της οπής μπορεί να εξακολουθεί να πραγματοποιείται, εκτός εάν κάποια στιγμή δεσμευθεί από αυτή ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Τότε η οπή εξαφανίζεται, και ο ομοιοπολικός δεσμός γίνεται πλήρης

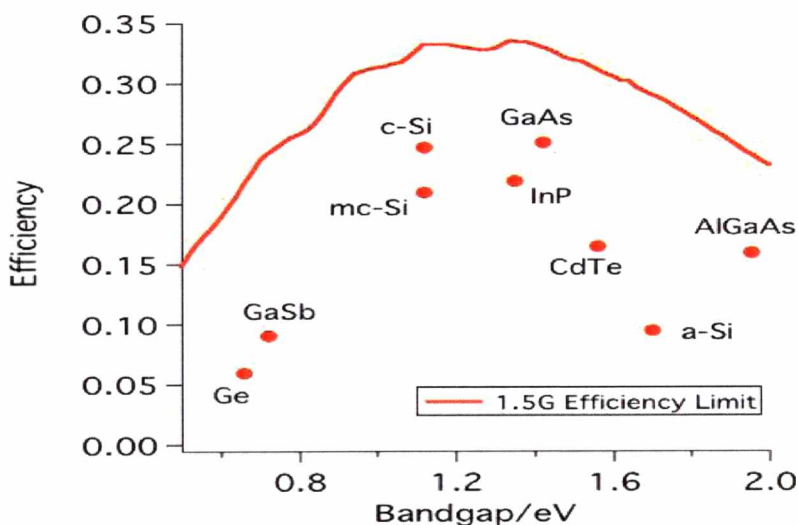
Οι οπές διαγράφουν και αυτές μια άτακτη κίνηση στο σώμα, από ένα δεσμό στον άλλο, αφού είναι τυχαία η κατεύθυνση από την οποία θα έρθει το γειτονικό ηλεκτρόνιο που θα συμπληρώνει τον ατελή δεσμό. Όταν όμως επιβάλλεται εξωτερικό πεδίο, το ηλεκτρόνιο θα προσέλθει από την κατεύθυνση που ευνοείται ενεργειακά. Τότε η κίνηση των οπών είναι προσανατολισμένη και αντίθετη αυτής των ηλεκτρονίων που κατευθύνονται προς υψηλότερα δυναμικά.



Παρατηρούμε δηλαδή ότι στους ημιαγωγούς εκδηλώνονται δύο μηχανισμοί: η απελευθέρωση των ηλεκτρονίων από τους δεσμούς, με ταυτόχρονη δέσμευση ελεύθερων ηλεκτρονίων στις οπές. Η συγκέντρωση (πλήθος φορέων ανά μονάδα όγκου) των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή των οπών ενός ημιαγωγού παραμένει αμετάβλητη και εξαρτάται μόνο από το υλικό και την θερμοκρασία του. Όσο ασθενέστεροι είναι οι δεσμοί μέσα στο υλικό και όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η συγκέντρωση των φορέων του, δηλαδή των ηλεκτρονίων και των οπών του.

### 3.2.3 Το Μοντέλο των Ενεργειακών Ζωνών

Όταν τα ηλεκτρόνια ενός κρυστάλλου υφίστανται την επίδραση ενός περιοδικού δυναμικού, χρησιμοποιούμε το μοντέλο των ενεργειακών ζωνών. Οι ενεργειακές ζώνες είναι περιοχές πιθανών ενεργειών των ηλεκτρονίων του στερεού. Τα ηλεκτρόνια μπορούμε να τα χωρίσουμε σε τρεις κατηγορίες : τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων, τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων και τα ελεύθερα. Τα πρώτα είναι τα λιγότερο ενεργά και δε συμμετέχουν σε μηχανισμούς αγωγιμότητας. Η ζώνη η οποία περιέχει τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στοιβάδων των ατόμων (ηλεκτρόνια σθένους) καλείται ζώνη σθένους, και η αμέσως ανώτερη από τη ζώνη σθένους, είναι η ζώνη αγωγιμότητας (ή ζώνη αγωγής) στην οποία ανήκουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η απόσταση μεταξύ των δύο ενεργειακών ζωνών ονομάζεται ενεργειακό διάκενο ή χάσμα (gap) και εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής.



**Σχήμα 3.5 :** Απεικόνιση των ιδανικών αποδόσεων των πιο σημαντικών φωτοβολταϊκών στοιχείων, ως συνάρτηση του ενεργειακού χάσματος των αντίστοιχων ημιαγωγών στους 300 ο Κ.

Η τιμή του ενεργειακού διακένου  $E_g$  χαρακτηρίζει το υλικό και σχετίζεται με την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων όπως φαίνεται και από τον τύπο (σχήμα 3.4). Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, 300o K, η τιμή του ενεργειακού χάσματος για το πυρίτιο είναι 1.12 eV.

$$n_T = \frac{(E_g \int_0^{\lambda_c} J_0(\lambda) d\lambda)}{(\int_0^{\lambda_c} J_0(\lambda) h\nu d\lambda)} \quad (\text{τύπος 3.1})$$

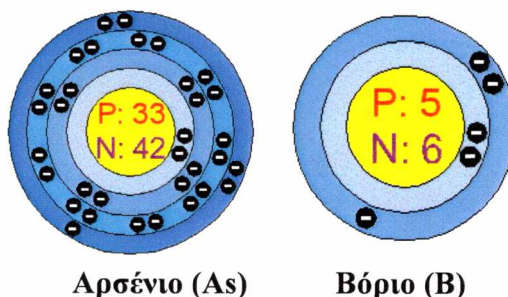
όπου  $J_0(\lambda)$  η επιφανειακή πυκνότητα φωτονίων ανά μονάδα χρόνου και ανά μοναδιαίο διάστημα μήκους κύματος,  $h$  η σταθερά του Planck και  $\nu$  η συχνότητα των φωτονίων.

### 3.2.4 Ένωση p-n - Δίοδος Ημιαγωγών

Όπως προαναφέρθηκε, χαρακτηριστική ιδιότητα των ημιαγωγών ενός στοιχείου είναι η εξίσωση της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων (e) και της συγκέντρωσης των οπών (h). Όμως σε ημιαγωγούς προσμίξεων η συγκέντρωση του ενός είδους φορέων (φορείς πλειονότητας) είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του άλλου είδους (φορείς μειονότητας), με αποτέλεσμα η συμβολή των φορέων μειονότητας στην αγωγιμότητα, συνήθως, να θεωρείται αμελητέα. Όταν οι φορείς πλειονότητας είναι ηλεκτρόνια τότε ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται ως τύπου “n”. Αντίθετα, όταν οι φορείς πλειονότητας είναι οπές τότε ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται ως τύπου “p”.

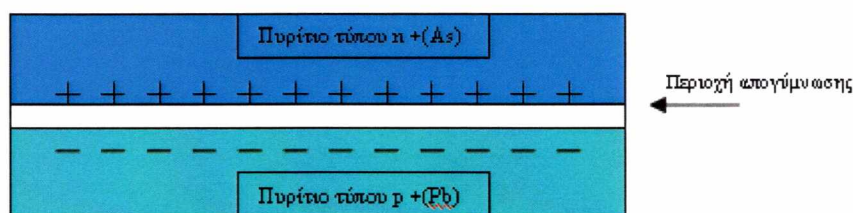
Τις **ημιαγωγές ιδιότητες** του το πυρίτιο τις αποκτά με τεχνικό τρόπο. Αυτό πρακτικά γίνεται με την **πρόσμειξη** με άλλα στοιχεία τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο στην στοιβάδα σθένους των. Αυτή η πρόσμειξη τελικά κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό είτε σε θετικά φορτία (υλικό **τύπου p**) είτε σε αρνητικά φορτία (υλικό **τύπου n**)

Για να φτιαχτεί λοιπόν ένας ημιαγωγός **τύπου n** ή αλλιώς ένας αρνητικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου θα πρέπει να γίνει πρόσμειξη ενός υλικού με 5e στην εξωτερική του στοιβάδα όπως για παράδειγμα το **Αρσένιο (As)**. Αντίστοιχα για να δημιουργήσουμε έναν ημιαγωγό **τύπου p** η αλλιώς θετικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου χρειάζεται να γίνει πρόσμειξη στον κρύσταλλο κάποιου υλικού όπως το **βόριο (B)** που έχει 3e στην εξωτερική του στοιβάδα.

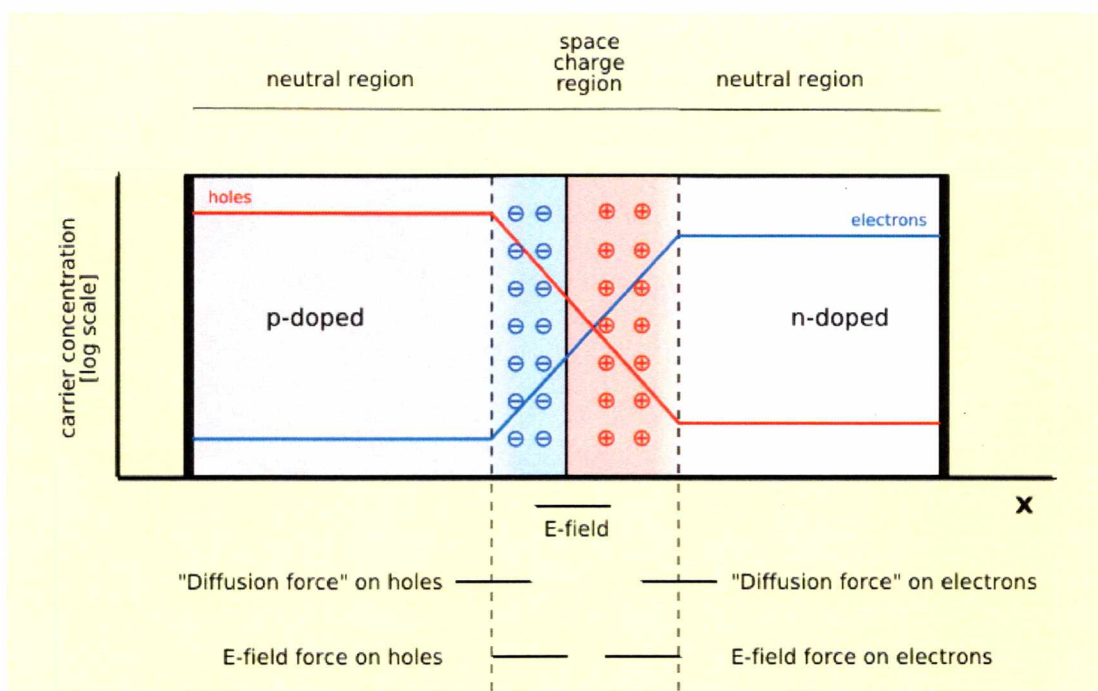


Σχήμα 3.6: Ηλεκτρονιακή απεικόνιση (As) & (B)

Οι σημαντικότερες ιδιότητες και εφαρμογές των διατάξεων ημιαγωγών δεν προέρχονται κυρίως από τη δημιουργία φορέων, αλλά οφείλονται περισσότερο στη διάχυση των φορέων τους. Ο θεμέλιος λίθος όλων των ημιαγωγών διατάξεων είναι η ένωση p-n. Αυτή η ένωση σχηματίζεται όταν έρθουν σε επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγικού τύπου p με ένα τεμάχιο ημιαγωγικού τύπου n. Εκείνη τη χρονική στιγμή, ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n, όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την αρχική κατάσταση. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν το νόμο δράσης των μαζών.



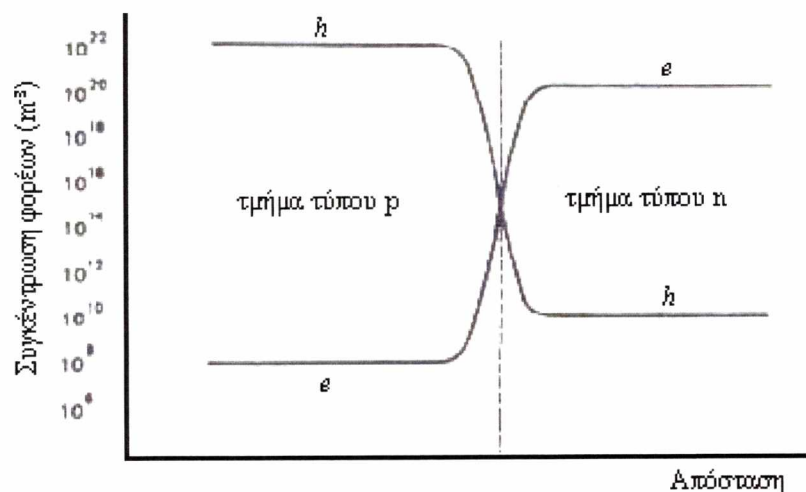
**Σχήμα 3.7:** Σχηματική απεικόνιση ένωσης p-n



**Σχήμα 3.8 :** Παράδειγμα της μεταβολής της συγκέντρωσης των οπών (p) και των ελεύθερων ηλεκτρονίων (n) κατά μήκος μιάς επαφής p-n, σε κατάσταση ισορροπίας.



Η περιοχή μεταξύ του ημιαγωγού τύπου p και του ημιαγωγού τύπου n, καλείται ζώνη εξάντλησης. Η ζώνη αυτή αποτελεί την δίοδο διέλευσης των οπών και των ηλεκτρονίων από τον ένα ημιαγωγό στον άλλο. Μετά από ένα χρονικό διάστημα και αφού έχουν ολοκληρωθεί οι αντίστοιχες μετατοπίσεις (ροές) φορέων, επέρχεται μια κατάσταση ισορροπίας όπου οι συγκεντρώσεις των οπών και των ηλεκτρονίων έχουν σταθεροποιηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9.



**Σχήμα 3.9:** Σχηματική παράσταση συγκέντρωσης φορέων

Σε αντίθεση με τους ευκίνητους φορείς των ημιαγωγών (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) που τείνουν να διαχέονται προς τις περιοχές με τη μικρότερη συγκέντρωσή τους, η συγκέντρωση των αρνητικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες του τμήματος τύπου p και η συγκέντρωση των θετικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι δότες στο τμήμα τύπου n, παραμένουν αμετάβλητες, αφού τα ιόντα μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική του ουδετερότητα και οι πλευρές της ένωσης φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού (συνήθως 0.6-0.8 Volts), της οποίας το ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων προς το απέναντι τμήμα της ένωσης.

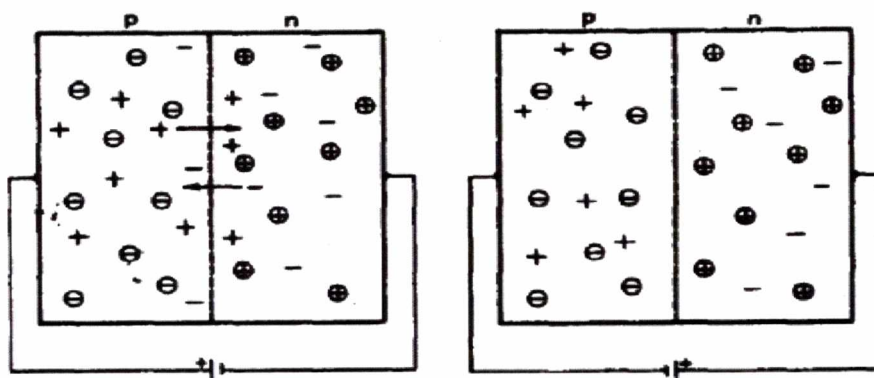
Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι ότι η ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με την φορά αυτού και άρα ανάλογα με την τάση που της επιβάλλεται εξωτερικά. Εξαιτίας αυτής της χαρακτηριστικής συμπεριφοράς της η ένωση p-n ονομάζεται και δίοδος.



### 3.2.5 Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση της Δίοδου

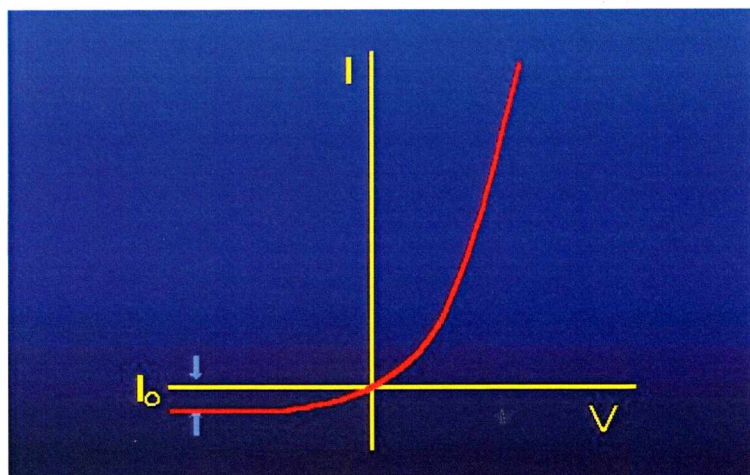
Υπάρχουν δύο τρόποι επιβολής τάσεως σε μια ένωση p-n (δίοδο). Όταν εφαρμόσουμε τον θετικό πόλο της πηγής στον ημιαγωγό τύπου p και τον αρνητικό στον ημιαγωγό τύπου n, τότε η δίοδος είναι ορθά πολωμένη, οπότε και συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης. Τότε, τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή, διαμέσου του τμήματος τύπου n, προς την περιοχή της ένωσης όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής, διαμέσου του τμήματος τύπου p.

Ενώ όταν ο θετικός πόλος της πηγής εφαρμοστεί στον ημιαγωγό τύπου n και ο αρνητικός στον p ημιαγωγό, γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος τύπου p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή, και, από την άλλη μεριά, απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων του τμήματος τύπου n, προς το θετικό πόλο της πηγής. Έτσι, οι συγκεντρώσεις των φορέων μειώνονται πάρα πολύ, το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνει, και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ένα ισχυρό εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή. Το αποτέλεσμα είναι ότι τώρα η δίοδος προβάλλει μεγάλη αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα. Τότε η δίοδος όντας ανάστροφα πολωμένη λειτουργεί σαν ανοιχτός διακόπτης (σχήμα 6). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, αποτελούν διόδους που λειτουργούν σε συνθήκες ορθής πόλωσης. Στο σχήμα 3.10 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη μιας διόδου p-n.



**Σχήμα 3.10:** Συνδεσμολογία ορθής και ανάστροφης πόλωσης

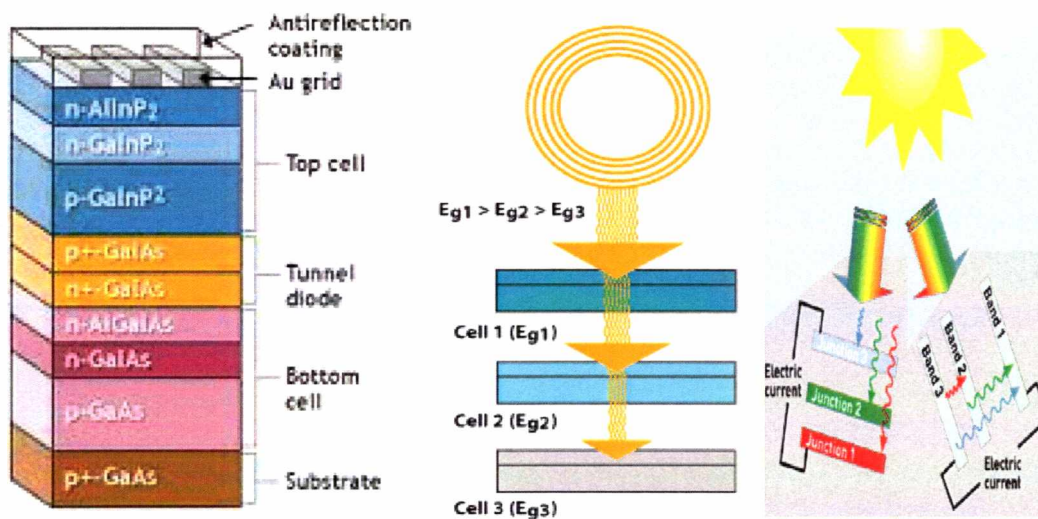
Δηλαδή μπορεί μια δίοδος που έχει σε ορθή πόλωση αντίσταση μόλις 10 Ω, να την αυξάνει στην αντίστροφη πόλωση σε 100 MΩ, δηλαδή να γίνεται δέκα εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη. Το παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 3.11) δείχνει ακριβώς την ιδιόμορφη μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει μια δίοδο ένωσης p-n, σε συνάρτηση με την τιμή της τάσης και το είδος της πόλωσης που εφαρμόζεται



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα I-V της διόδου

### 3.3 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

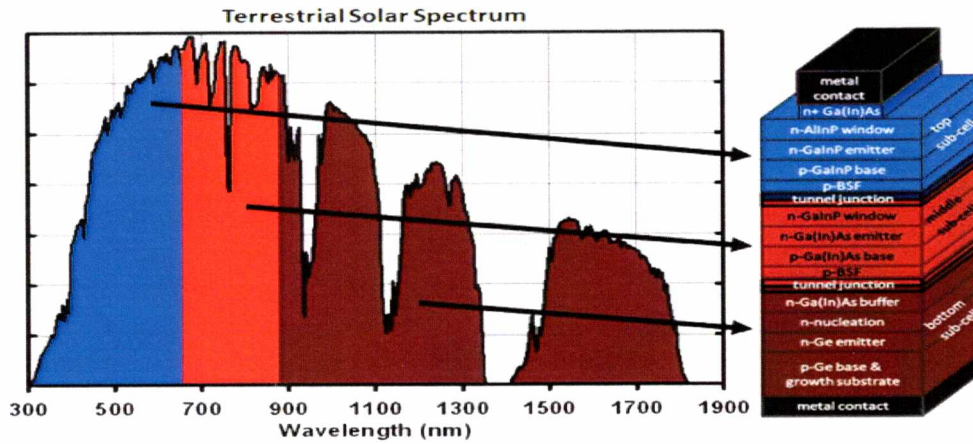
Όπως προαναφέρθηκε, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αποτελούν διόδους ημιαγωγικών ενώσεων τύπου p-n (*single junction*) με τη μορφή επίπεδης πλάκας. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Με άλλα λόγια, η φωτοβολταϊκή ικανότητα αυτών των κυττάρων περιορίζεται στη μερίδα του φάσματος του ήλιου του οποίου η ενέργεια είναι πάνω από το ενεργειακό διάκενο του απορροφώντος υλικού, και τα χαμηλά ενεργειακά φωτόνια δεν χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 3.12: Συσσκευή multijunction

Ένας τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτός ο περιορισμός είναι να χρησιμοποιηθούν δύο (ή περισσότερα) διαφορετικά κύτταρα, με περισσότερα από ένα ενεργειακά διακείνα και περισσότερες από μια επαφές p-n (*multijunction*). Οι συσκευές **Multijunction** μπορούν να επιτύχουν μια υψηλότερη συνολική αποδοτικότητα μετατροπής επειδή μπορούν να εκμεταλεψούν μεγαλύτερο φάσμα του φωτός και να το μετατρέψουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Μια συσκευή multijunction είναι ένας σωρός μεμονωμένων κυττάρων όπου κατεβαίνοντας προς τα κάτω το διάκενο ( $E_g$ ) μικραίνει. Το κορυφαίο κύτταρο συλλαμβάνει τα υψηλής ενέργειας φωτόνια και περνά το υπόλοιπο των φωτονίων για να απορροφηθεί από τα κύτταρα χαμηλότερου διακένου. Τέτοια κύτταρα έχουν φθάσει σε αποδοτικότητες περίπου 35% κάτω από το συγκεντρωμένο φως του ήλιου. Αλλά υλικά που μελετώνται για τις συσκευές multijunction είναι το amorphous silicon και το copper indium diselenide. Όσο διαρκεί η ακτινοβολία, δημιουργείται περίσσια φορέων (ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών).

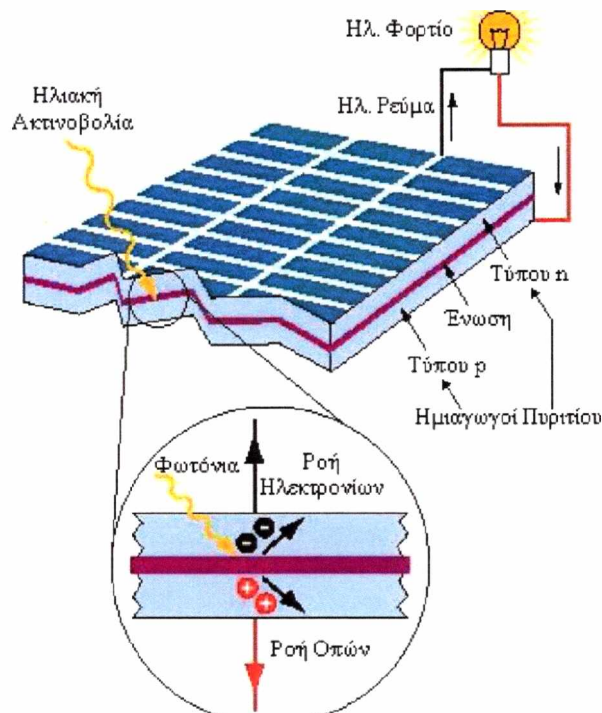




**Σχήμα 3.13:** Αντιστοιχία κυττάρων multijunction με το μήκος κύματος

Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου) δέχονται την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου της ένωσης  $p-n$ . Εξαιτίας αυτού τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $n$  και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $p$ , με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Αν στους ακροδέκτες αυτούς συνδεθεί κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος κα ισχύος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο.

**Συμπερασματικά** η όλη διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού κύτταρου.



**Σχήμα 3.14:** Μηχανισμός εκδήλωσης ΦΒ φαινομένου

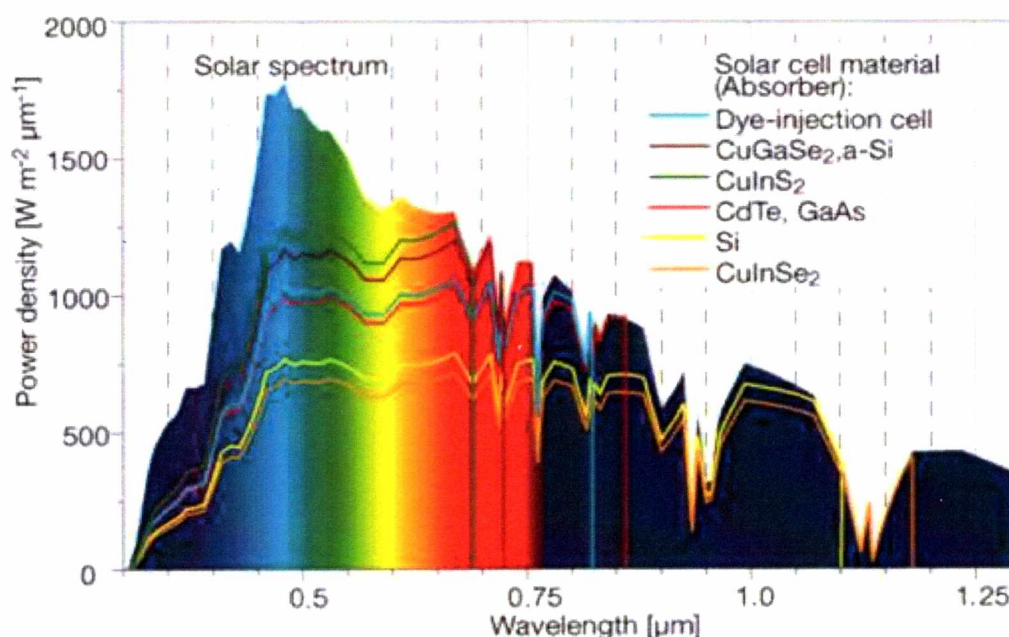


Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες της παραπάνω διάταξης, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ο μηχανισμός εκδήλωσης του οποίου παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 9. Στην πρακτική εκμετάλλευση του φαινομένου αυτού, στηρίζεται η λειτουργία του συνόλου των φωτοβολταϊκών διατάξεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.3.1. Παράγοντες Επίδρασης στην Απόδοση της Φ/Β Μετατροπής

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι η δυνατή η μετατροπή ολόκληρης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μέρος αυτής ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον.

Από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, εκείνη η ποσότητα η οποία αποτελείται από φωτόνια, των οποίων η ενέργεια είναι μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, δεν μπορεί να απορροφηθεί. Για τα φωτόνια αυτά ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι η ακτινοβολία αυτή περνά το ημιαγωγίμο υλικό του στοιχείου και απορροφάται στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο, που βρίσκεται στο πίσω μέρος της κυψέλης, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει.



**Σχήμα 3.15:** Φάσμα ακτινοβολίας ανάλογα με το υλικό του φωτοβολταϊκού κυττάρου

Αλλά και από την ακτινοβολία που τελικά απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο εκείνο το μέρος των φωτονίων των οποίων το ενεργειακό περιεχόμενο είναι ταυτόσημο με αυτό του διακένου, μας βοηθά. Το υπόλοιπο δεν χάνεται, αλλά μεταφέρεται με την μορφή της κινητικής ενέργειας στο ηλεκτρόνιο το οποίο ελευθερώθηκε από τον δεσμό και τελικά και αυτό μετατρέπεται σε θερμότητα. Όμως η ανάπτυξη μεγάλης θερμοκρασίας στο εσωτερικό των φωτοβολταϊκών στοιχείων, οδηγεί σε μείωση της απόδοσης του συστήματος.

Έχει αποδειχτεί ότι η ροή της ακτινοβολίας στο εσωτερικό των κυψελών ακολουθεί εκθετική μορφή σε σχέση με την απόσταση που διανύει αυτή μέσα στην κυψέλη, γεγονός που συνδέεται με την επίδραση του πάχους των ημιαγωγικών τμημάτων. Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο καλείτε φωτόρευμα  $I_{\phi}$ , και του οποίου η τιμή θα είναι ανάλογη προς τα ενεργά φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Το φωτόρευμα είναι ανάλογο της φασματικής απόκρισης ως συνάρτηση του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, γεγονός που αποδεικνύει την εξάρτηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου, από την ποιότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Η πυκνότητα του φωτορεύματος δίνεται από τη σχέση :

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

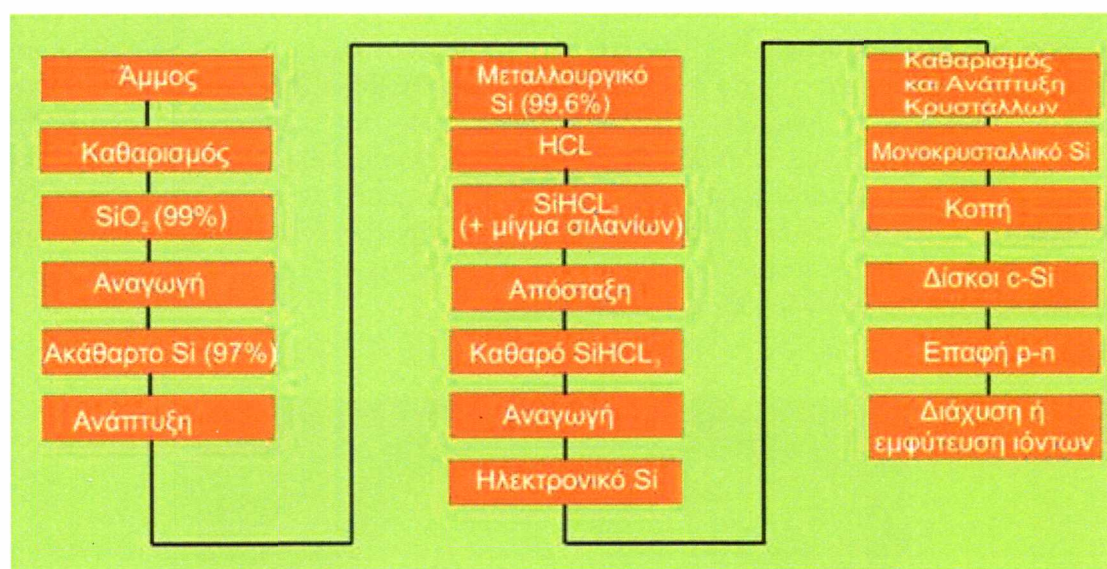
όπου

$e$ , είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο και  $\lambda_g$ , το μέγιστο χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος ακτινοβολίας στον ημιαγωγό.  $S(\lambda)$  είναι η φασματική απόκριση που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με τη φωτονική ροή  $\Phi(\lambda)$ , δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από  $\lambda$  μέχρι  $\lambda + d\lambda$ .  $R(\lambda)$  είναι ο δείκτης ανάκλασης της επιφάνειας του στοιχείου.

### 3.4 Τεχνολογία Φωτοβολταϊκού Στοιχείου

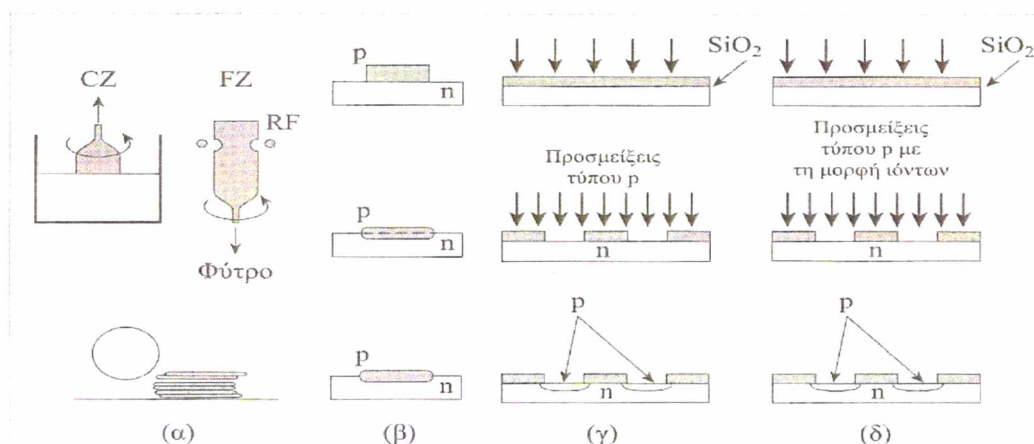
#### 3.4.1 Τεχνικές Δημιουργίας Επαφών p-n Στοιχείων

Για τη δημιουργία μιας επαφής p-n, παρασκευάζεται αρχικά το βασικό υλικό, δηλαδή ο καθαρός (ενδογενής) ημιαγωγός, όπου κυρίως είναι το πυρίτιο, γερμάνιο. Στη συνέχεια δημιουργούνται οι περιοχές τύπου n και p, προσθετικά, με κατάλληλες μεθόδους. Ως δότες χρησιμοποιούνται, συνήθως, το Λίθιο (Li) και ο Φωσφόρος (P), ενώ ως αποδέκτες το Βόριο (B), το Αλουμίνιο (Al) και το Ίνδιο (In). Το Πυρίτιο είναι από τα πλέον διαδεδομένα στοιχεία, στη φύση, ευρισκόμενο με τη μορφή διαφόρων ενώσεων. Το οξείδιο του Πυριτίου, αποτελεί το κύριο συστατικό της άμμου. Το επόμενο σχήμα δείχνει τα βασικά στάδια παραγωγής καθαρού πυριτίου, με πρώτη ύλη, την άμμο.



Σχήμα 3.16:

Διάγραμμα ροής εργασιών παραγωγής ηλεκτρονικά καθαρού πυριτίου με την μορφή κυλίνδρου, με πρώτη ύλη από άμμο.



Σχήμα 3.17 Μέθοδοι παρασκευής ενός καθαρού ημιαγωγού

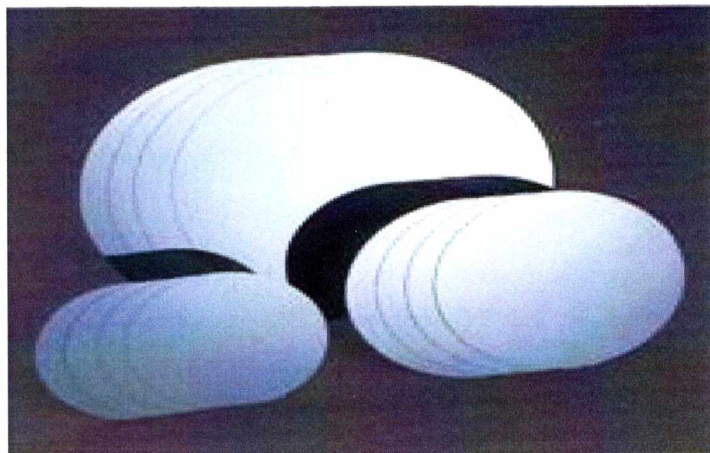


Οι τέσσερις βασικότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή ενός καθαρού ημιαγωγού και την εισαγωγή των διαφόρων προσμίξεων είναι οι ακόλουθες:

1. Μέθοδος ανάπτυξης μονοκρυστάλλου ή μέθοδος Czochralski
2. Μέθοδος κράματος
3. Τεχνική της διάχυσης
4. Τεχνική της εμφύτευσης ιόντων

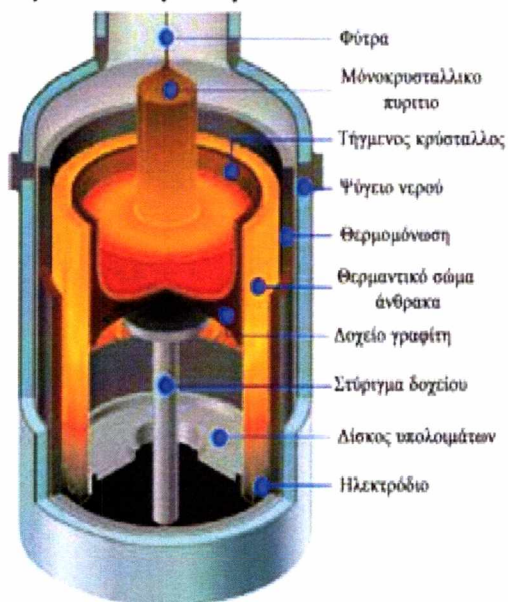
#### ➤ Μέθοδος Αναπτύξεως Μονοκρύσταλλου ή Μέθοδος Czochralski

Μικρό τμήμα του κρυσταλλικού υλικού χρησιμοποιείται ως φυτό κρυστάλλωσης, τιθέμενο σε επαφή με την επιφάνεια τήγματος (θερμοκρασία τήγματος  $1417^{\circ}\text{C}$ ) του ίδιου του κρυσταλλικού υλικού και στη συνέχεια ανασύρεται περιστρεφόμενο πολύ αργά, με ταχύτητα μερικών mm/min. Κρύσταλλοι από το τήγμα προσκολλώνται στο φυτό και έτσι σχηματίζεται σταδιακά, ένας μονοκρύσταλλος, σε κυλινδρική μορφή διαμέτρου  $\sim 6$  in και μήκους 1m. Στη συνέχεια ο κύλινδρος κόβεται σε φέτες κατάλληλου πάχους (wafers). Ανάλογα με το τύπο του υλικού που απαιτείται, προσθέτονται στο τήγμα κατάλληλες, σε κάθε περίπτωση, προσμίξεις. Εφόσον κοπεί σε φέτες και γίνει κατάλληλη επεξεργασία για την δημιουργία των n και p περιοχών, τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια σε μορφή σχάρας. Τα φωτοβολταϊκά που παρασκευάζονται με αυτή τη μέθοδο έχουν απόδοση 13-14%. Είναι οικονομική μέθοδος και δίνει κυλίνδρους μεγάλης διαμέτρου.

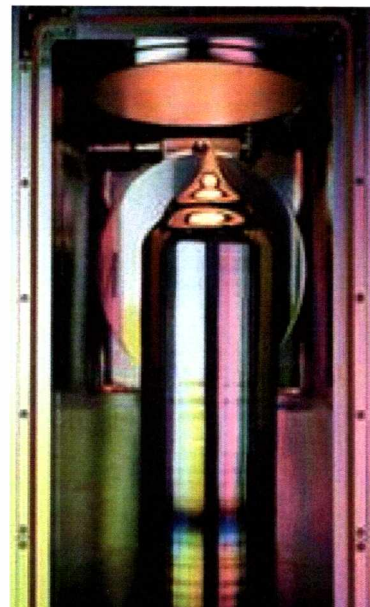


**Σχήμα 3.18:** Φέτες πυριτίου (wafers)



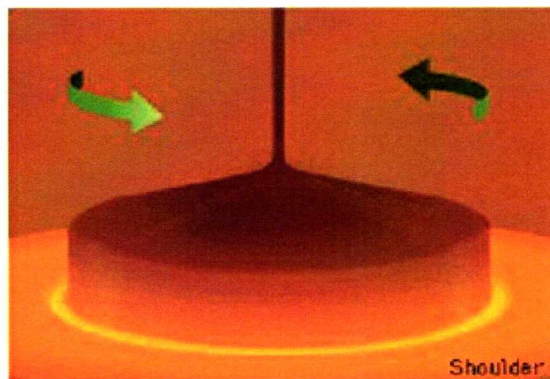
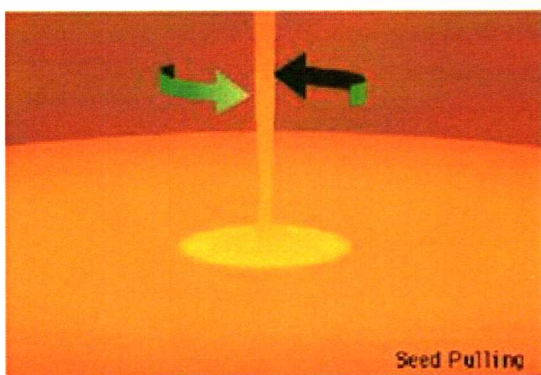
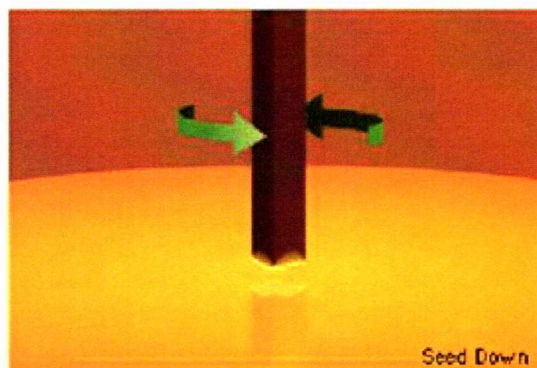


(α)



(β)

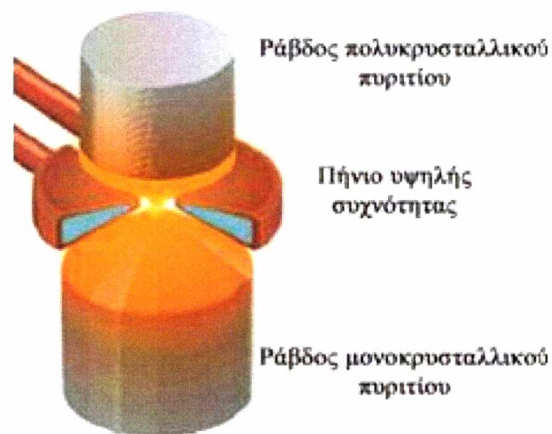
**Σχήμα 3.19:** (α) Δοχείο σχηματισμού κρυστάλλου πυριτίου (β) Κύλινδρος πυριτίου



**Σχήμα 3.20:** Η σειρά της δημιουργίας του κρυστάλλου

### ➤ Μέθοδος της Επιπλέουσας Ζώνης

Παρόμοια μέθοδος με την μέθοδο Czochralski αλλά εξελίσσεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση (από πάνω προς τα κάτω), χωρίς δοχείο τήξεως του πολυκρυσταλλικού πυριτίου (p-Si). Το p-Si σε μορφή ράβδου, τοποθετείται με τον άξονά του κατακόρυφο, σε σύστημα που του επιτρέπει την αργή κατακόρυφη κίνηση. Φύτρο από καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο τοποθετείται κάτω από τον κύλινδρο, ο οποίος κατερχόμενος διέρχεται από χώρο θέρμανσης, με συσκευή υψηλής συχνότητας. Το αντίστοιχο τμήμα (Ζώνη) λιώνει, ανακρυσταλλώμενο στο κρυσταλλικό φύτρο, το οποίο κατέρχεται περιστρεφόμενο. Το λιωμένο πυρίτιο στερεοποιείται δημιουργώντας κατακόρυφο κρύσταλλο υψηλότερης καθαρότητας από την μέθοδο Czochralski. Είναι η πιο ακριβή μέθοδος, όμως τα φωτοβολταϊκά που παράγονται έχουν υψηλότερη απόδοση (17-18%).



Σχήμα 3.21: Μέθοδος της επιπλέουσας ζώνης

### ➤ Μέθοδος Κράματος

Στην επιφάνεια λεπτού πλακιδίου ημιαγωγού τύπου n, τοποθετείται ποσότητα άλλης ουσίας, που συμπεριφέρεται ως αποδέκτης, για τον ημιαγωγό του πλακιδίου. Για παράδειγμα, πάνω σε πλακίδιο Ge, τύπου n, τοποθετείται ποσότητα In, το οποίο είναι εύτηκτο. Το σύστημα θερμαίνεται μέχρι να λιώσει το In. Η διείδυση του στο Ge, δημιουργεί μια περιοχή ευτήκτου κράματος, όπου οι προσμείξεις p υπερτερούν των n. Το τμήμα του In που απομένει αποτελεί τη μεταλλική επαφή της πλευράς αυτής. Παρουσιάζει το μειονέκτημα της αδυναμίας ακριβή καθορισμού των διαφόρων στρωμάτων και μάλιστα με επαναλήψιμο τρόπο.

### ➤ Τεχνική της Διάχυσης

Το υπόστρωμα (ημιαγωγός ορισμένου τύπου πρόσμιξης) τοποθετείται σε κατάλληλο θάλαμο, στον οποίο εισάγεται νέα πρόσμειξη, με τη μορφή ατμών υψηλής θερμοκρασίας, αντίθετου τύπου του υποστρώματος. Το τμήμα αυτό σε στενή επαφή με το υπόλοιπο, που περιέχει την αρχική πρόσμειξη, αποτελούν την επαφή p-n.

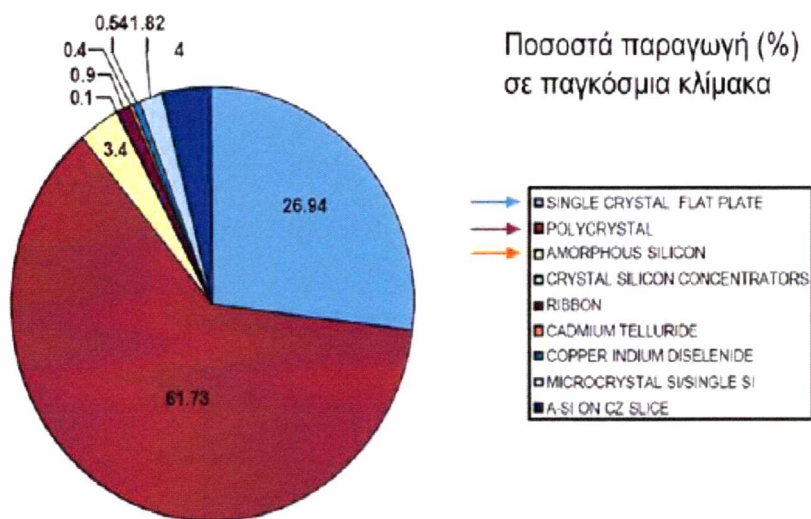


## ➤ Τεχνική της Εμφύτευσης Ιόντων

Τα άτομα ενός τύπου ημιαγωγού ιονίζονται και στη συνέχεια αφού επιταχυνθούν σε ηλεκτρικό πεδίο υψηλής τάσης (50-100 kV), εμφυτεύονται σε υπόστρωμα ημιαγωγού προσμείξεων αντίθετου τύπου. Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελεί η τεχνολογία των ημιαγωγικών διατάξεων με τη μορφή λεπτών υμενίων (films), που έχουν μεγάλη εφαρμογή στην ανάπτυξη φωτοβολταϊκών στοιχείων άμορφου πυριτίου.

### 3.4.2 Φωτοβολταϊκα Στοιχεία Πυριτίου (Si)

Γενικά, τα κύτταρα κατασκευάζονται από ημιαγωγικά υλικά όπως το GaAs, CdTe αλλά αυτή τη στιγμή, Το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για να κατασκευαστούν **φωτοβολταϊκα στοιχεία** στην βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Τα Φ/Β κύτταρα πυριτίου χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά και τα άμορφα. Αυτήν την περίοδο οι τεχνολογίες κρυστάλλινου πυριτίου (ενιαίο κρύσταλλο ή πολυκρυσταλλικό) αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της γενικής παραγωγής κυψελών όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα 3.19. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το **90% της αγοράς** των φωτοβολταϊκών.



Σχήμα 3.22: Υλικά κατασκευής Φ/Β κυττάρων σε παγκόσμια κλίμακα

Το πυρίτιο ήταν ένα από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η γρήγορη ανάπτυξη της τεχνολογίας στην εξερεύνηση του διαστήματος διάνοιξε εξαιρετικές προοπτικές για τη χρήση φωτοβολταϊκών κυττάρων. Το 1958, 108 ηλιακά κύτταρα είχαν σταλεί στο διάστημα για δοκιμή. Η σύνδεση σε σειρά άρχισε αργότερα σε μικρότερο αριθμό. Η επίγεια χρήση ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '70, εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης του 1973-74 και έδωσε ερεθίσματα για την εκπόνηση πληθώρας ερευνητικών μελετών.

Τα σημαντικότερα **πλεονεκτήματα** του πυριτίου είναι:

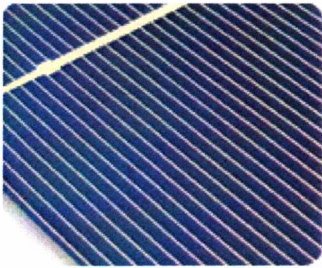
- Μπορεί να βρεθεί πάρα πολύ εύκολα στην φύση. Τα διάφορα ορυκτά και πετρώματα του πυριτίου αποτελούν το 87% του φλοιού της Γης, ενώ είναι το δεύτερο σε αφθονία χημικό στοιχείο στη γήινη φύση μετά το οξυγόνο, με ποσοστό 28% του φλοιού της γης και το έβδομο πιο άφθονο στοιχείο στο Σύμπαν. Είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον.
- Μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί. Επίσης είναι σχετικά εύκολο να μετατραπεί στην μονοκρυσταλλική του μορφή.
- Οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους 125°C κάτι που επιτρέπει την χρήση του πυριτίου σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες ενώ δεν είναι καλός αγωγός της θερμότητας. Αυτός είναι και ο λόγος που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου ανταπεξέρχονται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.
- Πολύ σημαντικό στοιχείο, που συνέβαλε στην γρήγορη ανάπτυξη τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τα τελευταία χρόνια, ήταν η ήδη αναπτυγμένη τεχνολογία, στην βιομηχανία της επεξεργασίας του πυριτίου, στον τομέα της ηλεκτρονικής (υπολογιστές, τηλεοράσεις κλπ). Το 2007 μάλιστα ήταν η πρώτη χρονιά που υπήρχε μεγαλύτερη ζήτηση (σε τόνους κρυσταλλικού πυριτίου) στην αγορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σχέση με αυτήν των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής.

Μια κατηγοριοποίηση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα μπορούσε να γίνει με βάση το πάχος του υλικού που χρησιμοποιείται.



### 3.4.2.1 Τύποι Φωτοβολταϊκών Συστημάτων Πυριτίου «Μεγάλου Πάχους»

#### ➤ Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si )



Το βασικό υλικό είναι μονοκρυσταλλικό και το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (Wafer ~ 300  $\mu\text{m}$ ). Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 13 - 18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Το **μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκα στοιχεία** χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της **καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας** ή "ενεργειακής πυκνότητας". Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (**Czochralski**) και η μέθοδος FZ (**float zone**). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, είναι της **SunPower** με απόδοση πλαισίου 18,5%. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία. Η εγκατάσταση ενός Φ/Β συστήματος 1kWp απαιτεί 7-8  $\text{m}^2$  ενώ παράγει 160-185  $\text{kWh/m}^2$ .

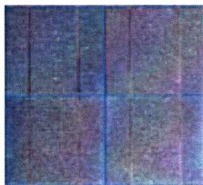
#### ➤ Φωτοβολταϊκα Κελιά Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)



Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Κατασκευάζονται με χύτευση λιωμένου πυριτίου. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα και το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Για την εγκατάσταση συστήματος 1kWp απαιτούνται 8-10  $\text{m}^2$  ενώ παράγει 130-160  $\text{kWh/m}^2$ .

Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

### ➤ Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Ταινίας Πυριτίου (Ribbon Silicon)

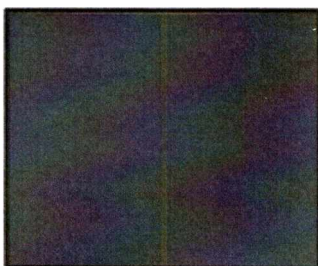


Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αναπτύσσεται από την **Evergreen Solar**. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου.

Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

### 3.4.2.2 Φωτοβολταϊκά Υλικά Λεπτών Επιστρώσεων, (thin film)

#### ➤ Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)



Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη.

Το **a-Si** παρασκευάζεται με σχετικά ανέξοδες μεθόδους, σε σύγκριση με το κρυσταλλικό Si, π.χ. με συμπύκνωση των προϊόντων θερμικής διάσπασης αέριων πυριτιούχων ενώσεων. Η άμορφη όμως κατασκευή του, έχει σαν αποτέλεσμα πολλοί από τους χημικούς δεσμούς στο a-Si να είναι ατελείς ή στρεβλωμένοι, που συνεπάγεται μειονεκτικές ηλεκτρικές ιδιότητες για το υλικό. Π.χ. οι φορείς του a-Si έχουν μικρή κινητικότητα και μικρό μήκος διάχυσης.

Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά **thin films** πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Για την εγκατάσταση 1kWp φωτοβολταϊκού συστήματος χρειάζεται επιφάνεια 10-20m<sup>2</sup>, ενώ παράγει 65-80 kWh/m<sup>2</sup>.

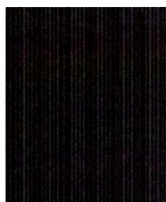
Το σημαντικότερο **πλεονέκτημα** για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις **υψηλές θερμοκρασίες**. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).



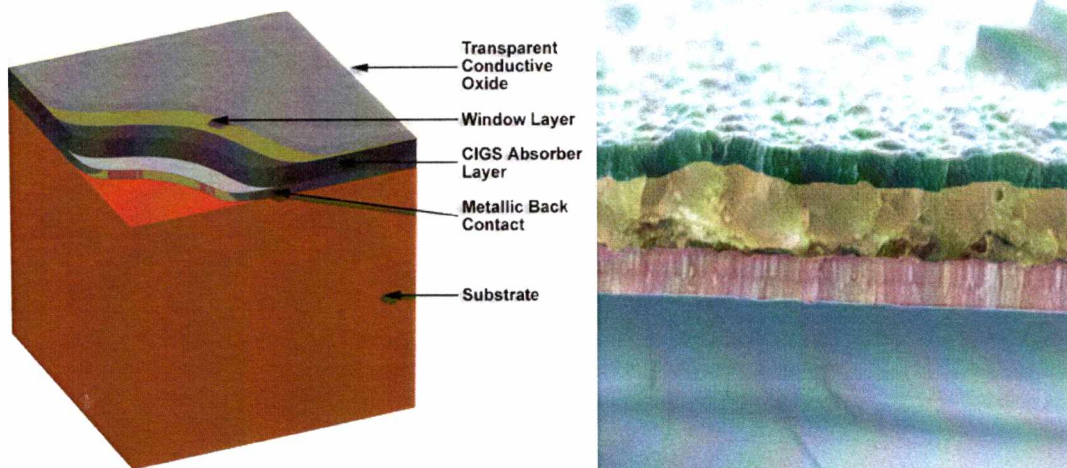
Το **μειονέκτημα** των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν **διπλάσια επιφάνεια** σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκα στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσων αφορά την **διάρκεια ζωής** των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούργια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά. Σήμερα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων φωτοβολταϊκών στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος.

Πολύ σημαντική βελτίωση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του a-Si γίνεται με την προσθήκη ατόμων υδρογόνου, που αποτελούν τέρματα για τους ατελείς δεσμούς και χαλαρώνουν τον ιστό του σώματος. Το υδρογονούχο a-Si περιέχει συνήθως 10-40% υδρογόνο, σε ατομική αναλογία και με τη γενική έννοια, ένα άμορφο κράμα πυριτίου και υδρογόνου. Συμβολίζεται ως a-Si:H. Ανάλογα, και ίσως καλύτερα αποτελέσματα, έχει η προσθήκη ατόμων φθορίου αντί για άτομα υδρογόνου. Η εμπορική παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων από a-Si:H έχει ήδη αρχίσει από το 1983, κυρίως στην Ιαπωνία, σε μορφή διόδων Σότκυ με απόθεση του πυριτίου πάνω σε λεπτά φύλλα ανοξειδωτου χάλυβα. Παράλληλα, εδώ και αρκετό καιρό εξετάζεται ερευνητικά η δυνατότητα κατασκευής φθινών φωτοβολταϊκών στοιχείων κρυσταλλικού ή άμορφου πυριτίου με διάφορες νέες τεχνολογίες, όπως ο σχηματισμός του πυριτίου σε μορφή μεμβράνης που επιπλέει η τραβιέται κατευθείαν από το τήγμα, η απόθεση πάνω σε κεραμικά υποστρώματα ή σε γραφίτη κλπ.

#### ➤ Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)

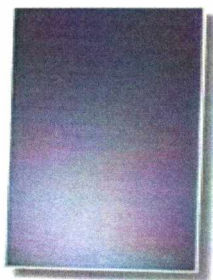


Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο). Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του **18,8%** η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γάλλιου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.



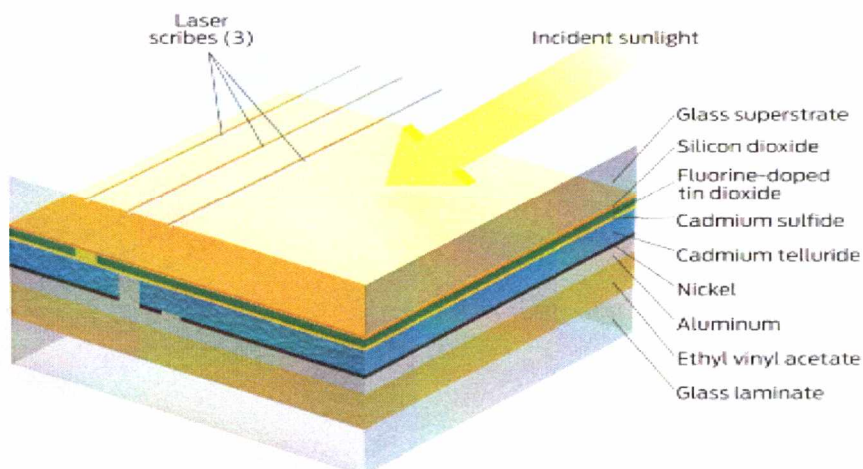
Σχήμα 3.23 : Απεικόνιση επιφανειών CIS

### ➤ Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

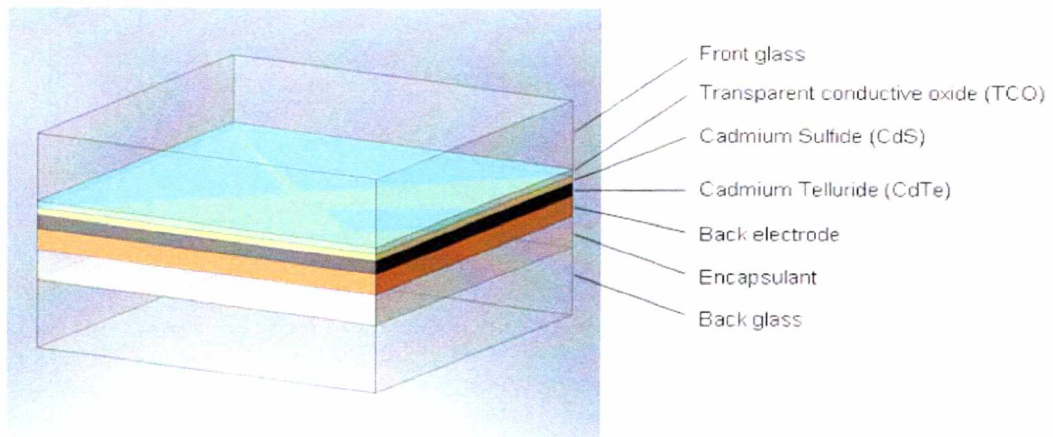


Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκα στοιχεία έχει φθάσει το 16%. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά.

Σημαντικότερος κατασκευαστής για φωτοβολταϊκά στοιχεία CdTe είναι η **First Solar**. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIPV Building Integrated Photovoltaic).

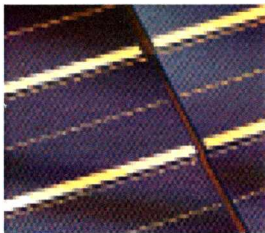






**Σχήμα 3.24:** Απεικόνιση Τελουριούχου Καδμίου (CdTe)


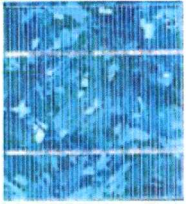
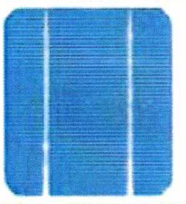
### ➤ Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)



Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσένιο δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταικα στοιχεία **GaAs** είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές **ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators)**. Τα φωτοβολταικα στοιχεία **GaAs** έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

**Πίνακας 3.1** Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

<b>Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών</b> (εξοπλισμός που κυκλοφορεί στην αγορά στις αρχές 2008)			
ΤΥΠΟΣ	'Λεπού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά
Εμφάνιση			
Απόδοση	a-Si: 4,2-6,6% μ-Si: 8,1-8,5% CIS-CIGS: 6-11% CdTe: 6-11,1%	11-14,8%	11-19,3%
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	9-25 m <sup>2</sup>	7-9 m <sup>2</sup>	5,5-9 m <sup>2</sup>
<b>Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά kWp)</b> <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	1.300-1.450	1.300	1.300
<b>Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά m<sup>2</sup>)</b> <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	50-160	145-185	145-235
<b>Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (kg CO<sub>2</sub> ανά kWp)</b>	1.300-1.450	1.300	1.300

### 3.4.2.3 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών.

#### ➤ HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)

Τα πιο γνωστά εμπορικά **υβριδικά φωτοβολταϊκά** στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

Κατασκευάζεται από την **Sanyo Solar**. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο **17,2%** και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Αλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η **υψηλή τους απόδοση** σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το υβριδικό φωτοβολταϊκό είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

### 3.4.2.4 Άλλες τεχνολογίες

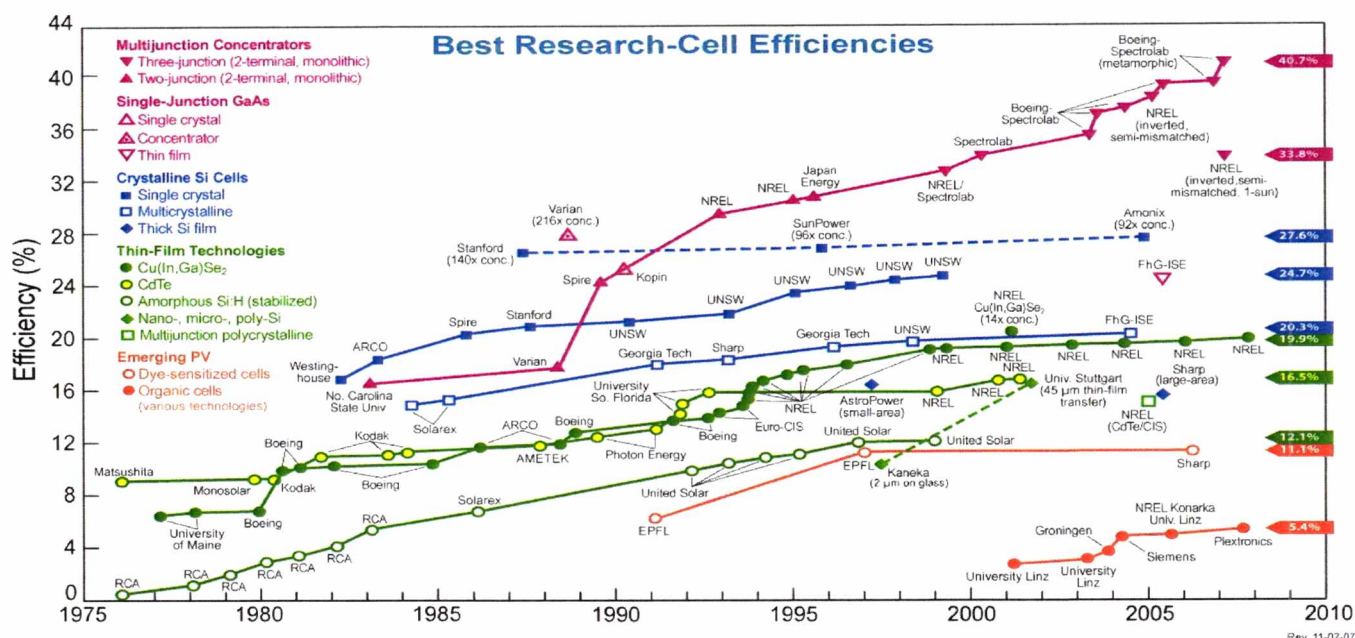
Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι:

- Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si) Με απόδοση η οποία κυμαίνεται μεταξύ 10,4%-13%
- Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία

Από τον Ιανουάριο του 2008, τέλος, εκκρεμεί η πρακτική εφαρμογή μιας εφεύρεσης η οποία υπόσχεται να φέρει πραγματική επανάσταση στα φωτοβολταϊκά: Ο ερευνητής Steven Novack, των Εθνικών Εργαστηρίων του Αϊντάχο (ΗΠΑ), επέδειξε μια εύκαμπτη μεμβράνη η οποία αξιοποιεί το... 80% του ηλιακού φωτός, ακόμη και τη νύκτα! Το κατορθώνει αυτό με την εκτύπωση πάνω στη μεμβράνη μυριάδων νανοκεραιών μικροκυμάτων που συλλαμβάνουν όλο το φάσμα υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ο Νόβακ όμως έχει κολλήσει σε ένα πρόβλημα καθώς για να αντλήσει τη συλλαμβανόμενη από τις κεραίες ενέργεια πρέπει να ενσωματώσει σε αυτές έναν νανοπυκνωτή. Αλλά τέτοια διάταξη που να δρα αποτελεσματικά και αδιατάρακτα σε νανοκλίμακα δεν έχει κατασκευαστεί ακόμη.



Πίνακας 3.2: Εξέλιξη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων



### ➤ Έρευνήτικά Προγράμματα

Σήμερα, στο εργαστήριο, έχουν επιτευχθεί αποδόσεις που ξεπερνούν το 30%. Γενικώς, οι προσπάθειες της έρευνας επικεντρώνονται σε τρεις άξονες. Την αξιοποίηση μεγαλύτερου εύρους του φάσματος του ηλιακού φωτός, την ανάπτυξη υβριδίων με βάση το πυρίτιο τα οποία θα έχουν καλύτερες ιδιότητες, και φυσικά την ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών παραγωγής που θα επιτρέπουν την εμπορική εκμετάλλευση τέτοιων προϊόντων, καταστρώνοντας τα προσιτά από την άποψη του κόστους.

Πρόσφατα ανακοινώθηκε από το πανεπιστήμιο Delaware (University of Delaware) ότι επιτεύχθηκε φωτοβολταϊκή απόδοση 42.8%, σε εργαστηριακό πρότυπο κρυσταλλικού πυριτίου και μάλιστα σε κανονικές συνθήκες στην επιφάνεια της γής. Η απόδοση αυτή ήρθε να καταρρίψει το προηγούμενο ρεκόρ κατά το οποίο είχε καταγραφεί απόδοση 40.7%. Ο απώτερος στόχος υφιστάμενων ερευνητικών προγραμμάτων είναι να επιτευχθούν αποδόσεις της τάξεως του 50%, ενώ ταυτόχρονα βασικό στόχο αποτελεί η εγκαθίδρυση στις εμπορικές εφαρμογές τεχνολογιών με αποδόσεις πάνω από το 20%.

### 3.4.2.5 Οργανικά Φωτοβολταϊκά

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί μια έκρηξη ενδιαφέροντος για την ανάπτυξη υβριδικών διατάξεων (συνδυασμός ανόργανων και οργανικών υλικών), όπως για παράδειγμα σύνθετες δομές αποτελούμενες από αγωγίμα πολυμερή και νανοσωματίδια. Αυτό οφείλεται αφενός στη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας υλικών, η οποία σε συνέργεια με τη νανοτεχνολογία επιτρέπει την ανάπτυξη υλικών με ελεγχόμενες ιδιότητες και αφετέρου στην πολύπλευρη χρησιμότητα των υλικών αυτών καθώς χρησιμοποιούνται όχι μόνο σε ενεργειακές εφαρμογές αλλά και σε ήδη εμπορικές διατάξεις εκπομπής φωτός.

Η ενσωμάτωση των υβριδικών υλικών σε οργανικές (ή απλά πλαστικές) φωτοβολταϊκές διατάξεις φαίνεται να αποτελεί μία ιδιαίτερα υποσχόμενη προσέγγιση, λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει η τεχνολογία αυτή. Πλεονεκτήματα που αξίζει να επισημανθούν είναι :

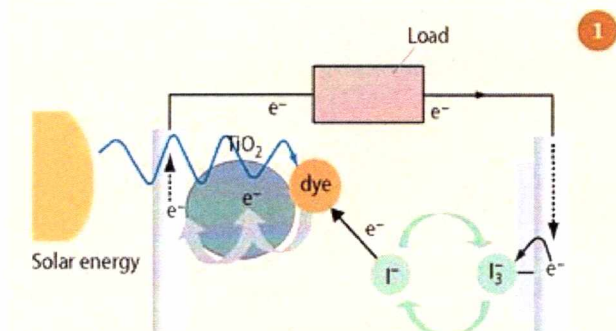
- το χαμηλό κόστος,
- η απλή διαδικασία παρασκευής τους,
- η ικανότητα ανάπτυξης σε μεγάλες διαστάσεις, ακόμα και σε εύκαμπτα υποστρώματα, αλλά και
- η δυνατότητα επιλογής βασικών χαρακτηριστικών τους, όπως για παράδειγμα το φάσμα απορρόφησης.

Σήμερα υπάρχουν τρεις τύποι οργανικών φωτοβολταϊκών διατάξεων:

- οι ηλεκτροχημικές,
- οι οργανικές που βασίζονται σε μικρά οργανικά μόρια (κυρίως χρωστικές)
- οι πολυμερικές.

#### Ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα στις χρωστικές ουσίες ("Grätzel Cells")

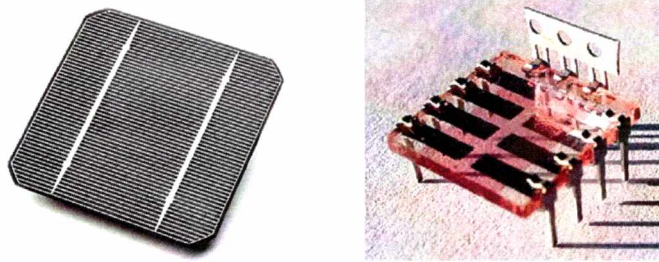
Οι μεγαλύτερες ενεργειακές αποδόσεις (11%) έχουν επιτευχθεί στις ηλεκτροχημικές διατάξεις (που είναι γνωστές ως Gratzel cells), οι οποίες βασίζονται σε νανοκρυσταλλικό  $\text{TiO}_2$  και οργανικές χρωστικές



Σχήμα 3.25: Gratzel cells

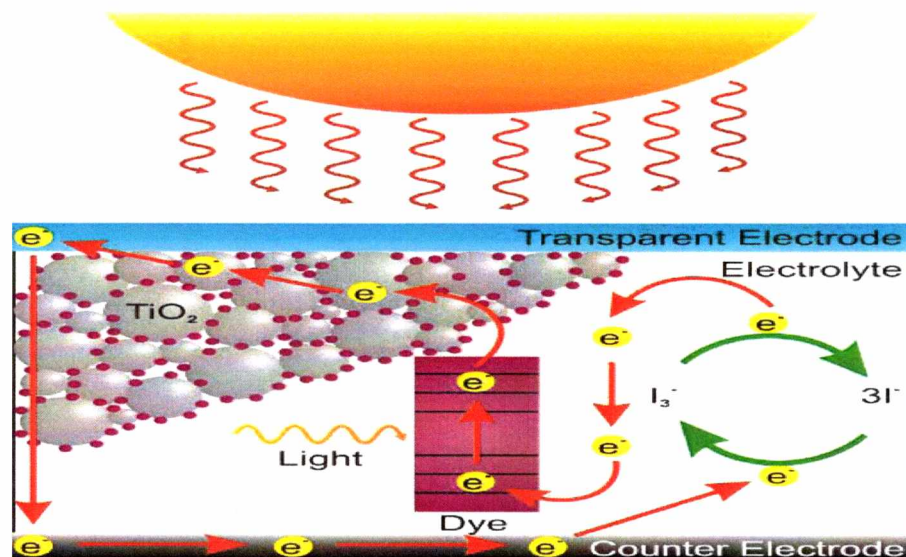
- Μόρια χρωστικής ουσίας (τα οποία απορροφούν ιδιαίτερα το φως και δρουν ως μία μοριακή κεραία) είναι δεμένα σε μία νανοδομημένη ημιαγωγική επιφάνεια.
- Ο νανοδομημένος ημιαγωγός διαθέτει μία τεράστια εσωτερική επιφάνεια, για να μεγιστοποιεί την απορρόφηση του φωτός και να μειώνει το μέγεθος του κυττάρου.
- Το φως συλλαμβάνεται από τα μόρια χρωστικής ουσίας και όχι από τη μήτρα του ημιαγωγού. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο κύτταρο μία μεγαλύτερη περιοχή φάσματος.

Οι διαδικασίες που προκύπτουν σε αυτόν τον τύπο κυττάρου, μιμούνται τη φυσική διαδικασία φωτοσύνθεσης.



**Σχήμα 3.26:** Ένα παραδοσιακό ηλιακό κύτταρο-ένα βιομημητικό κύτταρο

Τα νανοδομημένα ηλιακά κύτταρα προσφέρουν μία λύση παρέχοντας φθηνές, άφθονες ενεργειακές προμήθειες.



**Σχήμα 3.27:** Σχηματική απεικόνιση ενός γενικού ηλιακού κυττάρου που είναι ευαίσθητοποιημένο σε χρωστικές ουσίες (πηγή: M. R. Jones, Wikipedia Commons)



Μια ενδιαφέρουσα κατηγορία υλικών, ως προς την πιθανή χρήση τους σε φωτοβολταϊκές διατάξεις, είναι τα συζυγή πολυμερή (οργανικοί ημιαγωγοί) τα οποία συνδυάζουν τις οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες ενός κλασσικού ημιαγωγού με τις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες ενός πολυμερούς. Οι σχετικές διατάξεις αναπτύσσονται συνήθως από διάλυμα με διάφορες απλές σε διαδικασία τεχνικές εναπόθεσης όπως

- με σταγόνες (drop casting),
- με φυγοκέντριση (spin-coating) και
- με εκτύπωση (printing),

τεχνικές που λειτουργούν σε θερμοκρασίες δωματίου. Παράλληλα, τα πολυμερικά φωτοβολταϊκά δεν εμπεριέχουν υγρά όπως τα αντίστοιχα ηλεκτροχημικά, υγρά τα οποία οδηγούν σε απαίτηση προστασίας από τον αέρα, ενώ μπορούν να εναποτεθούν εύκολα σε μεγάλες πλαστικές εύκαμπτες επιφάνειες.

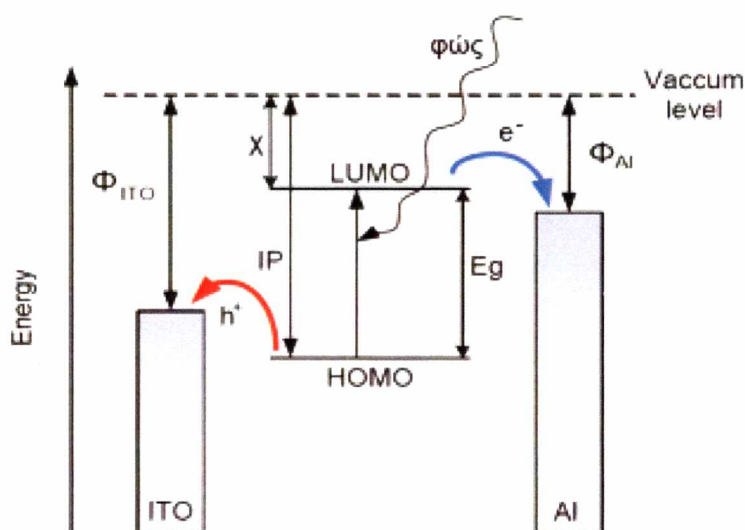
Επομένως, ο συνδυασμός:

- χαμηλού κόστους,
- ευκολίας παρασκευής σε χαμηλές θερμοκρασίες,
- καλών μηχανικών ιδιοτήτων και
- εύκολης μεταβολής των ιδιοτήτων τους,

δίνουν τη δυνατότητα στα συζυγή πολυμερή να χρησιμοποιούνται όχι μόνο σε φωτοβολταϊκές διατάξεις αλλά και σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές, αντικαθιστώντας τους συνήθεις ημιαγωγούς. Επιπλέον, λόγω της αντικατάστασης των κλασσικών γυάλινων υποστρωμάτων από εύκαμπτα πλαστικά, μπορούμε πλέον να μιλάμε για εύκαμπτα φωτοβολταϊκά, τα οποία αναμένεται να οδηγήσουν σε ελάττωση του βάρους αλλά και ανάπτυξη πλήθους σχημάτων που θα επιτρέπουν εξοικονόμηση χώρου. Η κατασκευή των σχετικών διατάξεων μπορεί να γίνει και μέσω συνεχούς διαδικασίας τύπου roll-to-roll, η οποία επιτρέπει μεγαλύτερη, οικονομικότερη και μαζικότερη παραγωγή, αφού επιτρέπει την ανάπτυξη διαδοχικών στρωμάτων με την κίνηση του υποστρώματος από περιστρεφόμενα ρολά.

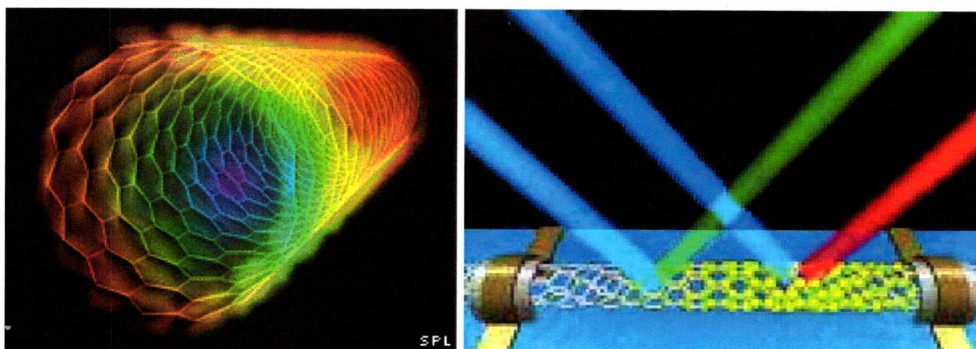
Τέλος, είναι δυνατή η ανακύκλωση αυτών των συσκευών ενώ παρουσιάζουν και καλύτερη αντοχή σε θραύση / κρούση. Το κύριο εμπόδιο μέχρι σήμερα για την εμπορική ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών αυτών είναι οι φτωχές αποδόσεις μετατροπής της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Έχουν αναφερθεί αποδόσεις μέχρι 6%, που είναι σχετικά χαμηλές σε σχέση με τις συμβατικές διατάξεις πυριτίου, όπου αποδόσεις της τάξης του 25% είναι εύκολα εφικτές. Η μη αξιόλογη απόδοση στα οργανικά φωτοβολταϊκά προέρχεται από τη χαμηλή απορρόφηση των πολυμερών στο κόκκινο του ηλιακού φάσματος αλλά και τη σχετικά φτωχή ικανότητα τους στο να δημιουργούν φορτία και να τα μετακινήσουν στα ηλεκτρόδια. Έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, όπως για παράδειγμα, η ανάπτυξη καινοτόμων συζυγών πολυμερών που θα απορροφούν και το κόκκινο μέρος του φάσματος αλλά και η ανάπτυξη τεχνικών που τροποποιούν την απορροφητικότητα της διάταξης. Αναφορικά όμως με τη μη αποδοτική δημιουργία και μετακίνηση φορέων φορτίου, προτού αναφέρουμε τις πιθανές λύσεις, ας εξετάσουμε την αρχή λειτουργίας των οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Γενικά, η λειτουργία τους είναι διαφορετική από αυτή σε κλασσικές ανόργανες διατάξεις, αλλά σχετικά απλή. Η κύρια διαφορά των οργανικών από τις ανόργανες διατάξεις είναι ότι η απορρόφηση φωτός δεν δημιουργεί ελεύθερους φορείς φορτίου αλλά δεσμευμένους, με το δεσμευμένο ζευγάρι θετικού και αρνητικού φορτίου να είναι γνωστό ως εξιτόνιο. Το φωτοενεργό υλικό, που συνήθως είναι ένα μείγμα πολυμερούς με κάποια νανοδομή, τοποθετείται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων, ενός διαφανούς, απ' όπου εισέρχεται το φως, και ενός μεταλλικού, σαν παράδειγμα από αλουμίνιο. Όταν φωτιστεί το φωτοενεργό υλικό, το φως που απορροφάται διεγείρει τα ηλεκτρόνια του πολυμερούς. Η διέγερση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση των ηλεκτρονίων από τον πυρήνα, οπότε το πολυμερές εμφανίζεται σαν να σχηματίζεται από δύο τμήματα, ένα με θετικό και ένα με αρνητικό φορτίο. Ο συνδυασμός των δύο αντίθετων φορτίων είναι το εξιτόνιο, το οποίο μπορεί να διαχωριστεί σε «ελεύθερα» φορτία μέσω ενός ηλεκτρικού πεδίου.



Σε πρώτη προσέγγιση, ο διαχωρισμός των εξιτονίων μπορεί να επιτευχθεί από το εσωτερικό πεδίο που δημιουργεί το διαφορετικό δυναμικό ιονισμού των δύο ηλεκτροδίων. Όμως, τα «ελεύθερα» φορτία που δημιουργούνται μπορούν να επανασυνδεθούν μετά από μετακίνηση τους κατά μερικές δεκάδες nm (10<sup>-9</sup> m), απόσταση πολύ μικρότερη από τη διαδρομή που πρέπει να διανύσουν μέχρι τα ηλεκτρόδια. Για να ενισχυθεί ο διαχωρισμός των εξιτονίων αλλά και να ελαχιστοποιηθεί η επανασύνδεση των φορέων φορτίου, μπορεί να ενσωματωθεί μέσα στο πολυμερές ένα επιπλέον, συνήθως ανόργανο αλλά και μερικές φορές οργανικό, υλικό, το οποίο μπορεί να υποδέχεται και να μεταφέρει ηλεκτρόνια. Η ανάμειξη των δύο υλικών, του πολυμερούς που αποδίδει ηλεκτρόνια και του ανόrganου που τα υποδέχεται, προκαλεί την ανάπτυξη διεπιφανειών μεταξύ διαφορετικών υλικών (ετεροεπαφές), όπου αναπτύσσεται εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που προκαλεί διαχωρισμό των εξιτονίων. Στη συνέχεια, το πολυμερές-δότης ηλεκτρονίων και ο δέκτης ηλεκτρονίων μεταφέρουν τα θετικά και τα αρνητικά φορτία αντίστοιχα στα ηλεκτρόδια. Μια πυκνή κατανομή των διεπιφανειών μέσα στο σύνθετο υλικό εγγυάται μία αποδοτική δημιουργία και μετακίνηση των φορέων φορτίου. Τα υλικά-δέκτες ηλεκτρονίων τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα είναι κυρίως ανόργανες νανοδομές όπως νανοσωλήνες άνθρακα, παράγωγα φουλερινών και νανοδομές οξειδίων μετάλλων, όπως νανοράβδοι.





**Σχήμα 3.28:** νανοσωλήνες από άνθρακα

Οι νανοσωλήνες του άνθρακα (carbon-nanotubes ή απλά nanotubes (νανοσωλήνες)) αποτελούνται από ομόκεντρους κοίλους κυλίνδρους από γραφίτη, οι οποίοι, στην παράπλευρη επιφάνειά τους, συγκροτούνται από πολυάριθμους πενταμελείς δακτυλίους ατόμων άνθρακα. Οι **νανοσωλήνες άνθρακα** παρουσιάζουν στο σύνολό τους ιδιαίτερα ευνοϊκές ηλεκτρονικές ιδιότητες, οι οποίες τους καθιστούν χρήσιμους για διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές. Οι ιδιότητες αυτές, οφείλονται σε ένα κοινό χαρακτηριστικό που εμφανίζουν μεταξύ τους, το οποίο συνίσταται στο γεγονός, ότι τα ηλεκτρόνια μέσα στη μάζα τους είναι περιορισμένα χωρικά. Αυτό σημαίνει, ότι τα ηλεκτρόνια αυτά μπορούν να κινηθούν μόνο πάνω στα φύλλα του γραφίτη τους και όχι κατά την κατεύθυνση που είναι κάθετη στην επιφάνειά τους. Εκτός από αυτό, τα ηλεκτρόνια χαρακτηρίζονται και από πολύ περισσότερες πιθανές καταστάσεις ύπαρξης κατά τη διεύθυνση του μήκους τους, παρά κατά την περιφερειακή τους διεύθυνση, γεγονός που προκύπτει από τη μεγαλύτερη διάσταση που έχει το μήκος από τη διάμετρό τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κίνησή των ηλεκτρονίων τους μέσα στο εσωτερικό της μάζας τους να περιγράφεται από αξονικά κυματικά διανύσματα, τα οποία καθορίζουν έτσι την ευνοϊκή ηλεκτρονική συμπεριφορά τους. Ένα άλλο θετικό στοιχείο που χαρακτηρίζει τους νανοσωλήνες άνθρακα είναι, ότι η πεπερασμένη περιφέρεια και μήκος τους εισάγουν διακριτές ενεργειακές στάθμες στις ηλεκτρονικές ιδιότητες, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται τόσο σαν μέταλλα, όσο και σαν ημιαγώγιμα υλικά. Η συμπεριφορά τους αυτή τους καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλους σε πολυάριθμα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, μεταξύ αυτών στα τρανζίστορς, τις διόδους και τους νανοπυκνωτές. Τέλος, θα πρέπει να προσθέσουμε, ότι οι νανοσωλήνες άνθρακα παρουσιάζουν και τη δυνατότητα εισαγωγής διαφόρων τύπων από προσμίξεις στη μάζα τους, διαφορετικών από αυτές που περιείχαν πριν τον καθαρισμό τους, οι οποίες αντικαθιστούν άτομα C προσδίδοντάς τους ημιαγώγιμες ιδιότητες τύπου p ή / και n. Τέτοιες προσμίξεις είναι για παράδειγμα το Βόριο (B) ή το Άζωτο (N).



Στο εργαστήριο «Κέντρο Τεχνολογίας Υλικών και Λείζερ» του ΤΕΙ Κρήτης, έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια σημαντικές ερευνητικές δραστηριότητες σχετικές με την ανάπτυξη και τη μελέτη καινοτόμων οργανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων και γενικότερα ηλεκτρονικών υλικών νέας γενιάς, τα οποία βασίζονται στη μεταφορά του αρνητικού φορτίου μέσω νανοδομών. Μέχρι σήμερα έχουν διερευνηθεί διεξοδικά διατάξεις που βασίζονται σε συνδυασμό συζυγών πολυμερών με νανοσωλήνες άνθρακα και παράγωγα φουλερίνης. Οι προσπάθειες την περίοδο αυτή εστιάζονται στην ανάπτυξη νανοδομών οξειδίων διάφορων μετάλλων και γραφένιου και την ενσωμάτωσή τους σε φωτοενεργά στρώματα για την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελίδων υψηλής απόδοσης. Η ερευνητική αυτή προσπάθεια πραγματοποιείται σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Κρήτης, το Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας, το Πανεπιστήμιο Cambridge και το Imperial College

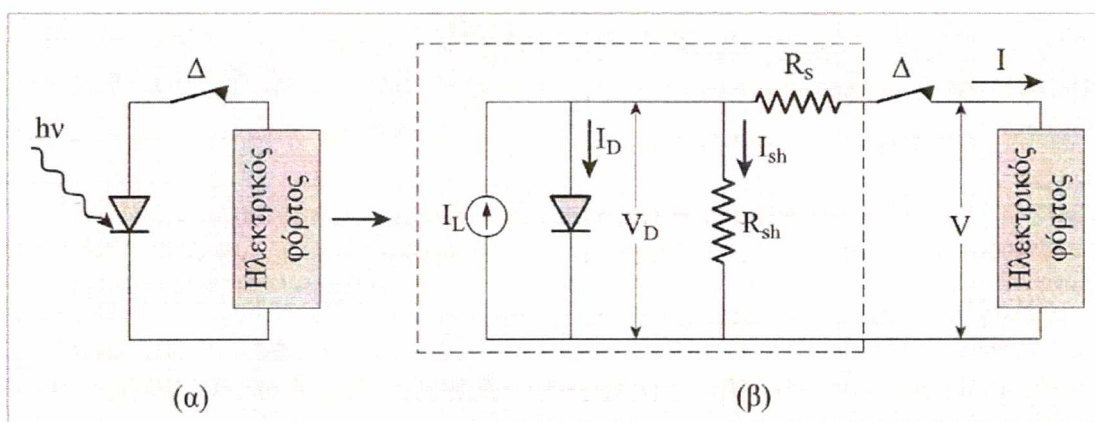


**Σχήμα 3.29:** εύκαμπτα φβ στοιχεία

### 3.5 Τα Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά ενός ΦΒ Στοιχείου

#### 3.5.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού Στοιχείου

Για να αποδοθεί καλύτερα η λειτουργία του φωτοβολταϊκού κυττάρου, είναι χρήσιμο να παρασταθεί με το αντίστοιχο ηλεκτρικό του ισοδύναμο. Ένα ιδανικό ηλιακό κύτταρο μπορεί να παρασταθεί με μια πηγή σταθερού ρεύματος ( $I_L$ ) που ελέγχεται από μια διόδο. Ωστόσο στην πράξη κανένα ηλιακό κύτταρο δεν είναι ιδανικό γι' αυτό τοποθετείται το μη ιδανικό τμήμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, το οποίο περιλαμβάνει, αφενός, την αντίσταση απωλειών διαρροής του ρεύματος μεταξύ των άκρων του φωτοβολταϊκού στοιχείου, που είναι παράλληλα συνδεδεμένη, στα άκρα της διόδου αφετέρου, την αντίσταση απωλειών στο δρόμο ροής του ρεύματος της διόδου, που αντιπροσωπεύεται από αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με τη διόδο (σχήμα 3.26)



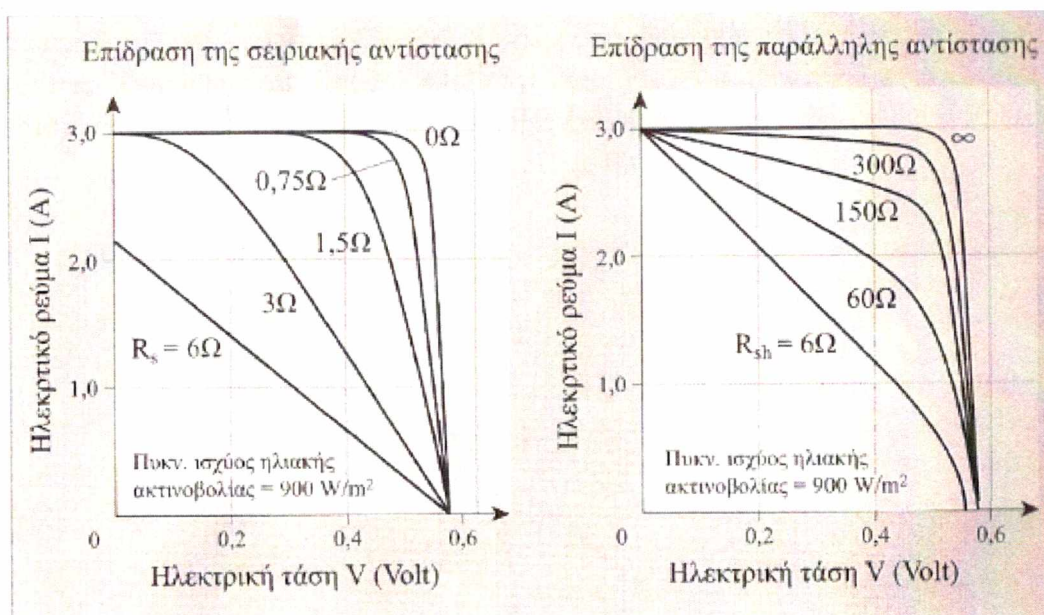
**Σχήμα 3.30 :** (α) Απλό και (β) πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΦΒ στοιχείου. Η εσωτερική αντίσταση διαρροής της επαφής είναι η  $R_{sh}$  και η εσωτερική αντίσταση σε σειρά, η  $R_s$ .

#### ➤ Παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση διαρροής, $R_{sh}$ ( Shunt resistance )

Η αντίσταση αυτή σχετίζεται με τη διαρροή του ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου. Αναλυτικότερα, οι διαδρομές αυτές αφορούν ρεύματα :

1. Διαμέσου του σώματος της διάταξης επαφής
2. Δια των εξωτερικών επιφανειών της επαφής, παράλληλα προς το ηλεκτρικό πεδίο της επαφής και
3. Διαμέσου ηλεκτρικής διάβασης που δημιουργούν οι προσμείξεις της επαφής.

Η τιμή της σε πολύ καλής απόδοσης ΦΒ στοιχεία είναι μεγαλύτερη των  $10^3 \Omega$ . Τιμές χαμηλότερες των  $500 \Omega$ , προκαλούν έντονη κλίση του οριζόντιου τμήματος της χαρακτηριστικής I-V, δηλαδή έντονη ελάττωση του ρεύματος καθώς προχωρούμε προς την τάση ανοικτού κυκλώματος,  $V_{oc}$ . Η ελάττωση είναι εντονότερη όσο η  $R_{SH}$  ελαττώνεται (σχήμα 5.2). Μικρή  $R_{SH}$  χαρακτηρίζει καμπύλη I-V με αντίστοιχα μικρό παραλληλόγραμμο  $I_m \cdot V_m$  μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος  $P_m$  και άρα χαμηλότερη τιμή του συντελεστή ποιότητας, FF.



**Σχήμα 3.31 :** Επίδραση της σε σειρά αντίστασης  $R_s$  και της παράλληλα εμφανιζόμενης  $R_{sh}$ , σε ένα ΦΒ στοιχείο.

#### ➤ Σειριακή αντίσταση $R_s$ (Series resistance)

Η σειριακή αντίσταση αφορά στην αντίσταση που παρουσιάζει η επαφή :

- Κατά τη διόδο του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το σώμα της διόδου
- Στις ωμικές αντιστάσεις των σημείων πρόσφυσης των ηλεκτροδίων της επαφής καθώς και κατά μήκος των μεταλλικών κλάδων τους.

Ουσιαστικά παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά τη ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό (συνήθως τύπου-n) που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως και αποτελείται από πολύ λεπτό στρώμα, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού-ωμικής επαφής και την ωμική επαφή.

Αύξηση της  $R_s$  περιορίζει την περιοχή τάσεων στην οποία αντιστοιχεί σταθερό ρεύμα βραχυκύκλωσης, ίσο με αυτό που αντιστοιχεί στην ιδανική περίπτωση. Άμεσο αποτέλεσμα της αύξησης της  $R_s$  είναι η δραστική ελάττωση της αντιστοιχίας μέγιστης ισχύος που αποδίδει το στοιχείο. Τυπικές τιμές της  $R_s$  , για καλής ποιότητας ΦΒ στοιχεία :  $0.1 \Omega$  έως  $0.3 \Omega$



### 3.5.2 Τάση Ανοικτού Κυκλώματος – Ρεύμα Βραχυκύκλωσης

#### ➤ Το ΦΒ στοιχείο σε Ανοικτό Κύκλωμα

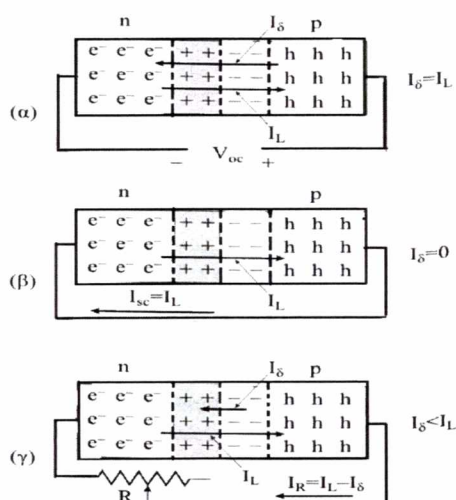
Στην περίπτωση που το φωτοβολταϊκό στοιχείο βρίσκεται σε ανοικτό κύκλωμα και κάτω από συνθήκες σταθερού φωτισμού τα ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στην επαφή είναι αντίθετης φοράς και ίσα κατά απόλυτη τιμή  $I_s = -I_L$  (εικόνα 3.5α). Αυτή η ισότητα ρευμάτων, τα οποία επιβάλλονται αφενός από την διάχυση, λόγω αύξησης των πυκνοτήτων των φορέων πλειονότητας, αφετέρου από την ηλεκτρική τάση του ενδογενούς ηλεκτρικού φραγμού, έχει ως αποτέλεσμα η τάση στα άκρα της επαφής p-n να προσεγγίζει το ύψος της τάσης  $V_{bi}$  (τάση διάχυσης : η τάση που διακόπτει το φαινόμενο της διάχυσης από το ένα τμήμα της επαφής στο άλλο) με φορά αντίθετη αυτής. Ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) και ισχύει :

$$V_{oc} \leq V_{bi}$$

η **ισότητα** αφορά την ιδανική περίπτωση που δεν συμβαίνουν επανασυνδέσεις

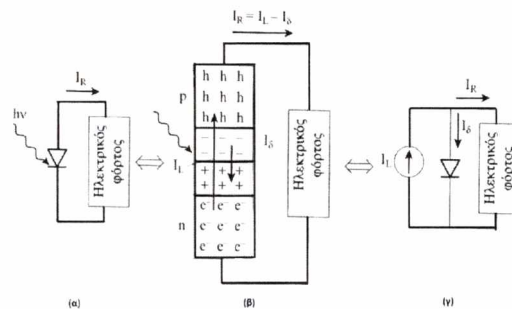
#### ➤ Το ΦΒ στοιχείο σε Κλειστό κύκλωμα

Αν, τώρα, τα άκρα της επαφής p-n που φωτίζεται όπως και πριν κάτω από συνθήκες σταθερού φωτισμού, είναι βραχυκυκλωμένα (με χάλκινο σύρμα πρακτικά μηδενικής αντίστασης), οι αυξημένες πυκνότητες των φορέων πλειονότητας στα άκρα της επαφής δημιουργούν έκχυση τους είτε μέσα από την επαφή, που παρουσιάζει φραγμό, είτε μέσα από το σύρμα, που δεν παρουσιάζει φραγμό. Άρα κατά το βραχυκύκλωμα το ρεύμα  $I_L$  διέρχεται από τον αγωγό βραχυκύκλωσης (εικόνα 3.5β), οπότε ισχύει :  $I_{sc} = I_L$ . Όταν όμως στα άκρα της επαφής συνδέσουμε μια αντίσταση  $R$  (εικόνα 3.5γ) αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα  $I_R = I_L - I_s$ , δηλαδή το ρεύμα  $I_R$  εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης που συνδέουμε στα άκρα της επαφής.



Σχήμα 3.32 : Επαφή p-n

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, φώς δεδομένης πυκνότητας ισχύος και φάσματος δημιουργεί μέσα στο σώμα της φωτοβολταϊκής κυψέλης ηλεκτρικό ρεύμα  $I_L$ . Το ρεύμα αυτό παραμένει σταθερό καθώς αλλάζει η ωμική αντίσταση που είναι συνδεδεμένη στα άκρα του. Έτσι η λειτουργία της ΦΒ κυψέλης είναι ισοδύναμη με εκείνη που θα δημιουργούσε η σύνδεση μιας πηγής σταθερού ρεύματος στα άκρα της διόδου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.6, ειδικότερα θα μπορούσαμε να πούμε ότι η πηγή αυτή προσαρμόζει την τάση στα άκρα της ώστε να διατηρεί το ρεύμα πρακτικά σταθερό, για αυτό παρουσιάζεται και ως πηγή σταθερού ρεύματος.



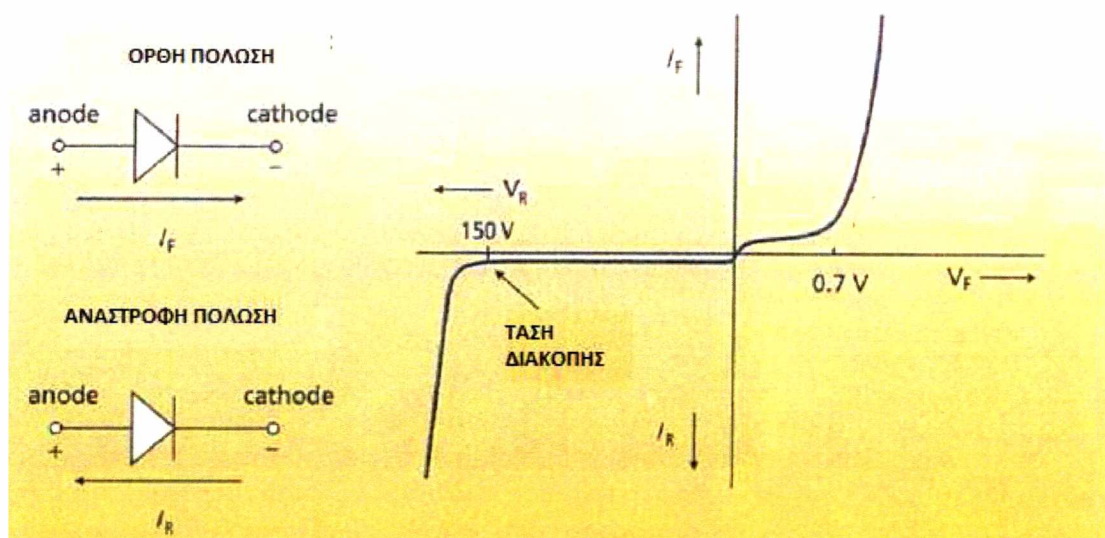
**Σχήμα 3.33 :** (α) τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα που περιλαμβάνει ΦΒ στοιχείο (β) αναλυτική παρουσίαση ρευμάτων στο κύκλωμα (γ) Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

Σύμφωνα με προηγούμενη ανάλυση το ρεύμα  $I_\delta$  είναι σαν να προέρχεται από μια ορθή τάση  $V_F$ , επειδή οφείλεται στην αύξηση των πυκνοτήτων των φορέων πλειονότητας. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οι τιμές του  $I_\delta$  ακολουθούν την καμπύλη I-V της διόδου (εικόνα 3.7). Έτσι, για να κατασκευάσουμε την καμπύλη I-V της φωτιζόμενης διόδου πρέπει να προσθέσουμε την καμπύλη I-V της μη φωτιζόμενης διόδου και την ευθεία  $I = -I_L$ , του φωτορεύματος που αποτελεί την καμπύλη I-V της πηγής σταθερού ρεύματος. Το ρεύμα  $I_R$  όμως έχει αντίθετη φορά από το επιβαλλόμενο στη δίοδο ρεύμα από μία εξωτερική πηγή με ορθή πόλωση, συνεπώς στο διάγραμμα I-V της μη φωτιζόμενης επαφής θα τοποθετήσουμε της τιμές  $I_R$  στον αρνητικό ημιάξονα και σε κάθε τιμή του  $I_\delta$  θα προσθέτουμε το  $-I_L$  και θα βρίσκουμε το  $I_R$ .

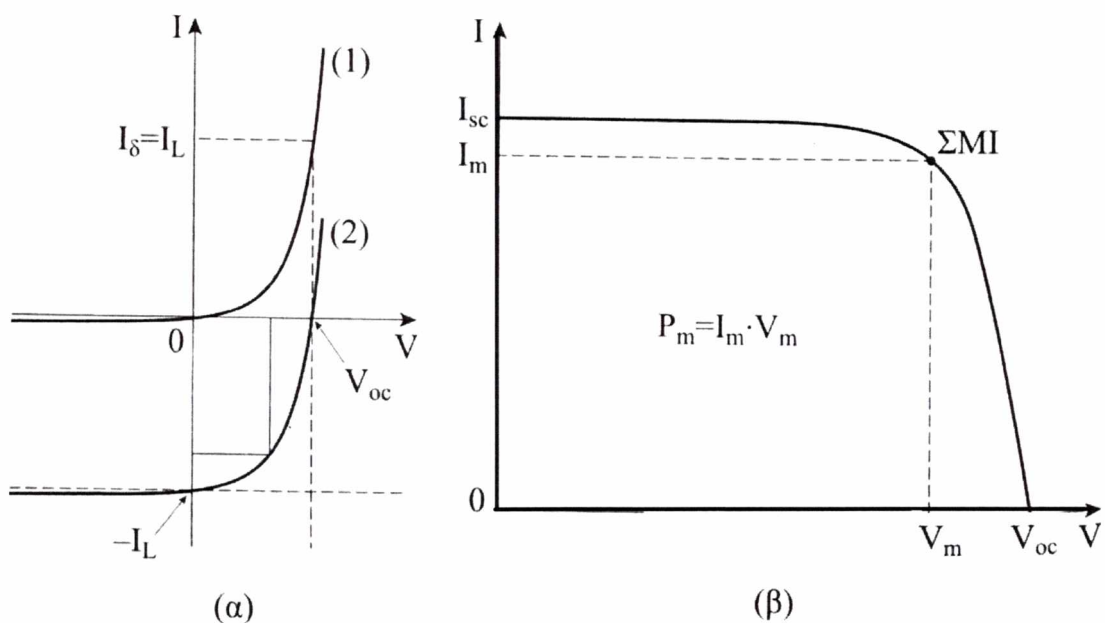
$$I = I_S \left[ e^{\frac{eV}{n_{i\delta} K_B T}} - 1 \right] - I_L$$

(όπου  $n_{i\delta}$  ο παράγων ιδανικότητας της διόδου)

Στην εικόνα 3.33α φαίνεται η καμπύλη I-V της φωτοβολταϊκής κυψέλης στο σκοτάδι (1) και στο φως (2), ενώ στην εικόνα 3.33β δίνεται σε μεγέθυνση το τμήμα της καμπύλης που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο ανεστραμμένο ως προς τις τιμές του ρεύματος, στο οποίο η επαφή p-n συμπεριφέρεται ως φωτοβολταϊκό στοιχείο. Σε εκείνη την περιοχή η φωτοβολταϊκή κυψέλη φέρεται σαν πηγή ενέργειας και παρέχει ενέργεια σ' ένα καταναλωτή ( $P = V \cdot I < 0$ ).



**Σχήμα 3.34:** Χαρακτηριστική καμπύλη I-V επαφής p-n, σε ορθή και ανάστροφη πόλωση



**Σχήμα 3.34:** (α) Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V, ενός ΦΒ στοιχείου, στο σκοτάδι (1) και στο φως (2) (β) Σε μεγέθυνση το τμήμα της καμπύλης στο τέταρτο τεταρτημόριο



### 3.5.3 Η Καμπύλη I-V ενός ΦΒ Στοιχείου

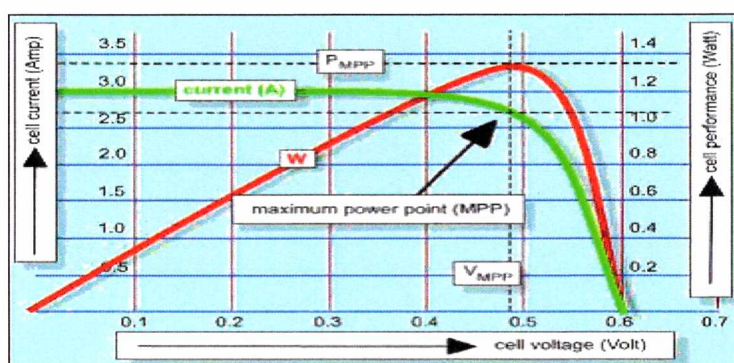
Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το ΦΒ στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Η γραφική παράσταση μεταξύ ρεύματος στην έξοδο (I) και τάσεως στην έξοδο (V) ενός ηλιακού κυττάρου καλείται I-V χαρακτηριστική και έχει επικρατήσει να παριστάνεται στο πρώτο τεταρτημόριο (σχήμα 5.3).

Παρουσιάζει ένα μέγιστο, που όπως μπορούμε να διακρίνουμε στο κοινό διάγραμμα των I-V και P-V, εντοπίζεται στο “γόνατο” της καμπύλης I-V. Οι τιμές ρεύματος – τάσης, στο σημείο μέγιστης ισχύος, συμβολίζονται με  $I_m$  ή  $I_{mpp}$  και  $V_m$  ή  $V_{mpp}$ . Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει το ΦΒ στοιχείο, υπό δεδομένη προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας  $E$  ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) και προκαθορισμένη θερμοκρασία (συνήθως  $25^\circ \text{C}$  ή  $28^\circ \text{C}$ ), ισούται με :

$$P_m = I_m V_m$$

και είναι γνωστή σαν ισχύς αιχμής (peak power). Το μέγεθος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου συνήθως χαρακτηρίζεται από τα Watt αιχμής ( $W_p$ , Watt Peak) που μπορεί να παράγει.

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας (και θερμοκρασίας) και για μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (βραχυκυκλωμένη κατάσταση με μέγιστη τιμή ρεύματος  $I_{SC}$  και μηδενική τάση αν θεωρήσουμε την  $R_S$  πολύ μικρή) και άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης  $V_{OC}$  αν θεωρήσουμε την  $R_{SH}$  πολύ μεγάλη).

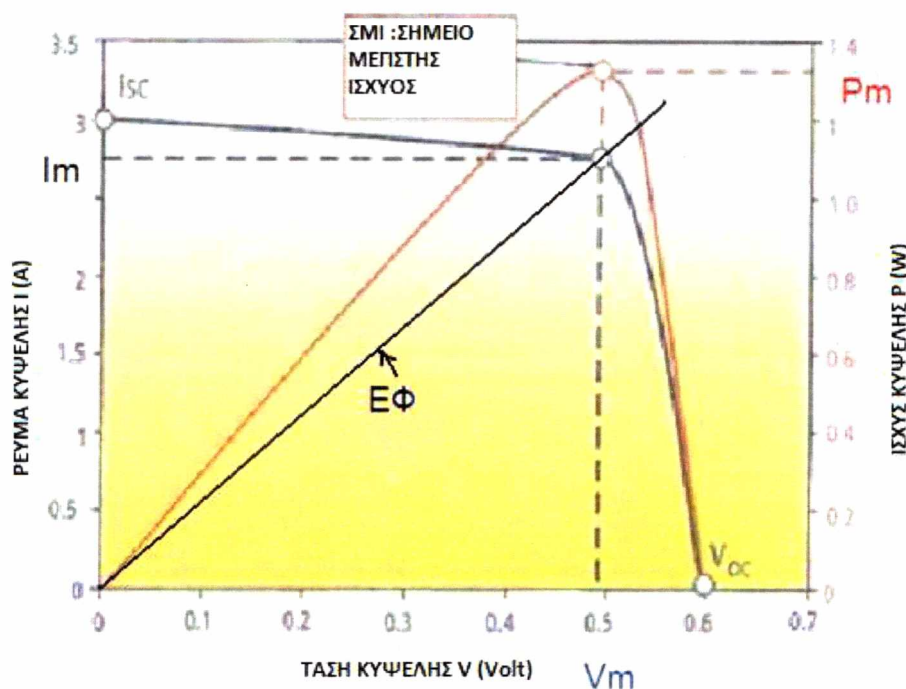


Σχήμα 3.35: Ανεστραμμένη I-V ΦΒ στοιχείου

από το τέταρτο τεταρτημόριο που αυτό παρέχει ενέργεια. Στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάστηκε η παρεχόμενη απ' αυτό και κάτω από σταθερό φωτισμό, ισχύς  $P$ , ως συνάρτηση της τάσης  $V$  στα άκρα του καταναλωτή.

### 3.5.4 Σημείο Λειτουργίας Μέγιστης Ισχύος ( ΣΜΙ )

Για την καλύτερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του φωτοβολταϊκού πρέπει να προσαρμόσουμε την αντίσταση του καταναλωτή ώστε η τάση και το ρεύμα σε αυτόν να αντιστοιχούν στο σημείο μέγιστης λειτουργίας, ΣΜΙ (Maximum Power Point, MPP). Το συμπέρασμα αυτό γίνεται εμφανές αν στην καμπύλη I-V κατασκευάσουμε και την καμπύλη της ισχύος σε συνάρτηση με την τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού,  $P = f(V)$ , όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.9. Προφανώς στις ακραίες συνθήκες για τάση μηδέν και τάση ίση με την  $V_{oc}$ , η παρεχόμενη ισχύς είναι μηδέν συνεπώς είναι αναμενόμενο η καμπύλη της ισχύος να εμφανίζει μέγιστο, το οποίο παρουσιάζεται κοντά στο σημείο που αρχίζει η έντονη πτώση του ρεύματος.

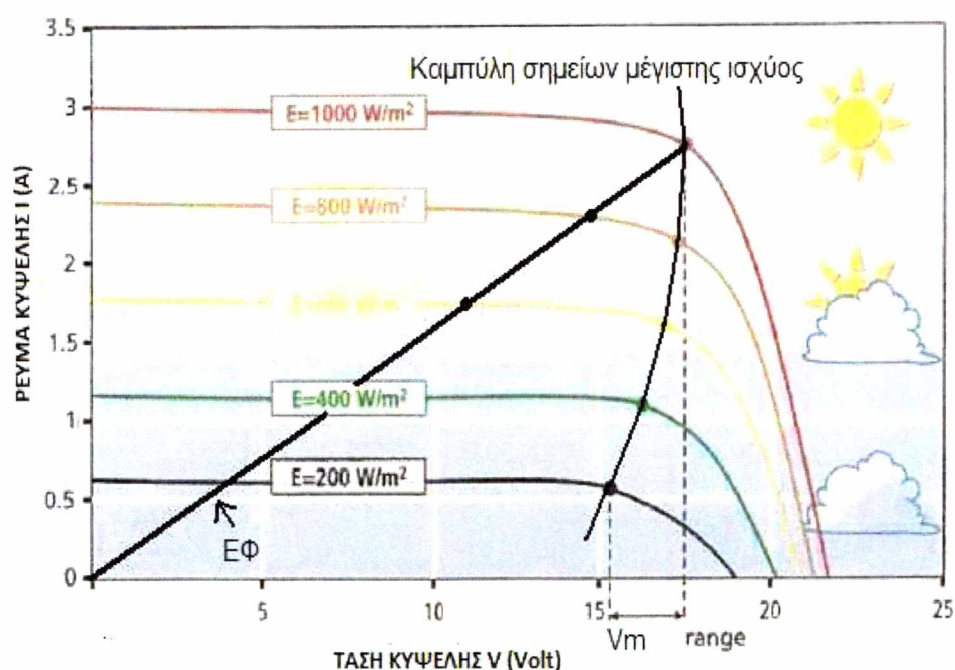


**Σχήμα 3.36:** Ανεστραμμένη καμπύλη I-V στο τεταρτημόριο που το ΦΒ στοιχείο παρέχει ενέργεια.

Στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάστηκε η παρεχόμενη από το ΦΒ, ισχύς  $P$ , ως συνάρτηση της τάσης  $V$  άκρα του καταναλωτή. ΣΜΙ είναι το σημείο Μέγιστης Ισχύος. Σχεδιάστηκε επίσης, η ευθεία φόρτου ΕΦ για ένα ωμικό καταναλωτή με αντίσταση  $R$  ( $R = V_m / I_m$ ).

### 3.5.5 Καμπύλη Φόρτου

Καμπύλη φόρτου είναι η καμπύλη του ρεύματος  $I$  που διαρρέει τη διάταξη σε συνάρτηση με την τάση που εφαρμόζεται στην είσοδό της,  $I=f(V)$ . Αν την τοποθετήσουμε στην καμπύλη  $I-V$  του φωτοβολταϊκού τότε το σημείο τομής αυτών των δύο μας δίνει το σημείο λειτουργίας του συστήματος. Στην εικόνα 3.9 φαίνεται η καμπύλη φόρτου (ΕΦ) για ωμική κατανάλωση, το οποίο είναι ταυτόσημο με το ΣΜΙ. Προφανώς αν μεταβληθεί η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας η καμπύλη  $I-V$  αλλάζει και το σημείο λειτουργίας για δεδομένο φορτίο δεν συμπίπτει με το ΣΜΙ (Σχήμα 3.37).



Σχήμα 3.37: Χαρακτηριστική  $I-V$  συναρτήση ηλιακής ακτινοβολίας.

Για να συμπίπτει το σημείο λειτουργίας με το σημείο μέγιστης ισχύος, προφανώς θα πρέπει να αλλάξει η ωμική αντίσταση έτσι ώστε η νέα ευθεία φορτίου να περνά από το αντίστοιχο νέο ΣΜΙ. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει το ΦΒ στοιχείο είναι  $P_m = V_m I_m$ , όπου  $V_m$  και  $I_m$  η μέγιστη τάση και ρεύμα στο σημείο μέγιστης λειτουργίας.

Σε κάθε περίπτωση, επιδιώκεται η συνεχής σύμπτωση του σημείου λειτουργίας του συστήματος με το εκάστοτε σημείο μέγιστης ισχύος, ώστε να αποδίδεται στο φορτίο η μέγιστη ισχύς. Αυτό γίνεται εφικτό με χρήση ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων <<παραλολούθησης>> του ΣΜΙ, όταν οι συνθήκες αλλάζουν.



### 3.5.6 Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου των Χαρακτηριστικών των ΦΒ Στοιχείων

Τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ελέγχονται σε ένα ΦΒ στοιχείο παρασκευασμένο στο εργαστήριο καθώς επίσης και στο τελικά διατιθέμενο βιομηχανικό προϊόν, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, είναι η ενεργειακή απόδοση,  $\eta$ , ο παράγων πλήρωσης,  $FF$ , το ρεύμα βραχυκύκλωσης,  $I_{sc}$  και η τάση ανοικτού κυκλώματος,  $V_{oc}$ , σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού (πυκνότητα ισχύος και φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας) και θερμοκρασίας του στοιχείου. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών μεγεθών επιτρέπει τον έλεγχο της αποδοτικότητας του ΦΒ στοιχείου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, που αντιπροσωπεύουν τυπικές συνθήκες της ηλιακής ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό, καθορίστηκαν διεθνώς, οι ακόλουθες πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών ενός ΦΒ στοιχείου ή ΦΒ πλαισίου (Standard Test Conditions, STC).

#### Πρότυπες συνθήκες ελέγχου

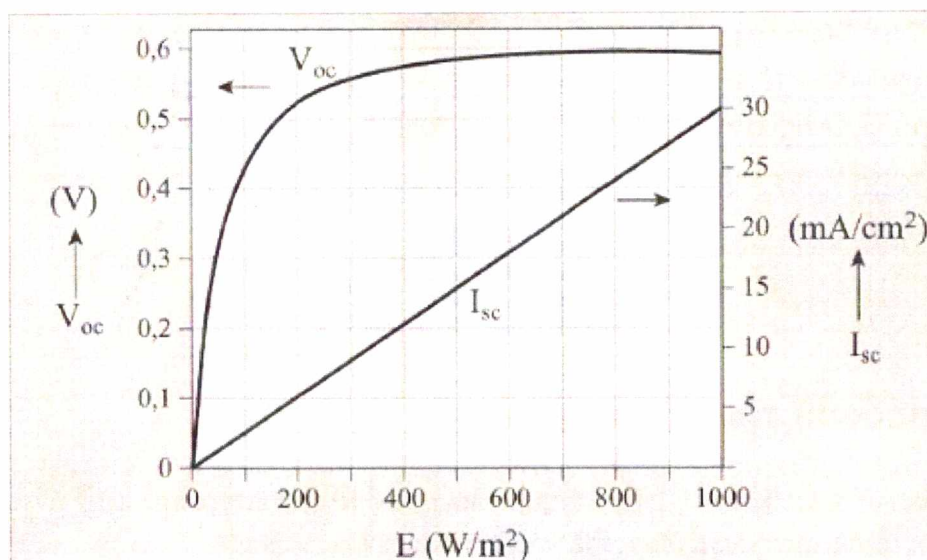
- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος  $E_{STC}=1 \text{ kW/m}^2$  και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με AM1.5 (κάθετη πρόσπτωση)
- Θερμοκρασία του ΦΒ στοιχείου  $\theta_{STC}=25^{\circ} \text{ C} \pm 2^{\circ} \text{ C}$

Στα ειδικά εργαστήρια ελέγχου και πιστοποίησης των χαρακτηριστικών των ΦΒ στοιχείων, ο χώρος ελέγχου βρίσκεται στην προκαθορισμένη θερμοκρασία των  $25^{\circ} \text{ C}$ . Το φάσμα εκπομπής της χρησιμοποιούμενης πηγής φωτισμού, προσομοιάζεται προς το ηλιακό, του συγκεντρωμένου φάσματος (AM1.5). Η πηγή αυτή λειτουργεί στιγμιαία (Flash), ώστε η θερμοκρασία του υλικού του ΦΒ στοιχείου να παραμένει στα προκαθορισμένα όρια των πρότυπων συνθηκών. Επιπλέον, η ακτινοβολία από την τεχνητή πηγή προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου. Συνεπώς οι πρότυπες συνθήκες αφορούν εργαστηριακό περιβάλλον. Στην πράξη, τα ΦΒ στοιχεία, ενσωματωμένα στη μονάδα που ονομάζεται ΦΒ πλαίσιο, λειτουργούν κάτω από φυσικό ηλιακό φως, του οποίου τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας καθ' όλο το έτος. Επιπλέον, η αποδιδόμενη ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και από τις ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες του τόπου εγκατάστασης. Σε ορισμένα εργαστήρια (πχ. στο National Renewable Energy Laboratory, NREL, USA) πραγματοποιούνται μετρήσεις χαρακτηριστικών των ΦΒ στοιχείων- πλαισίων χρησιμοποιώντας φυσικό ηλιακό φως με τα χαρακτηριστικά των πρότυπων συνθηκών.

Με βάση τις πρότυπες συνθήκες, εισάγεται η έννοια της ισχύος αιχμής,  $P_p$  (Peak Power), ως χαρακτηριστικό του ΦΒ στοιχείου με μονάδα μέτρησης στο SI το  $W_p$  (Peak Watt, watt αιχμής). Ισχύς αιχμής ενός Φβ στοιχείου, είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που μπορεί να αποδώσει, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου ( $STC, P_p=P_{m,STC}$ )

### 3.5.7 Εξάρτηση των Ηλεκτρικών Χαρακτηριστικών του ΦΒ από την Πυκνότητα Ησχύος της ΗΜ Ακτινοβολίας

Η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  καθορίζεται, αφενός από τα χαρακτηριστικά της επαφής p-n, όπως το βασικό υλικό, τη συγκέντρωση των προσμείξεων και τη θερμοκρασία, και αφετέρου από την ένταση της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Σχήμα 3.38).

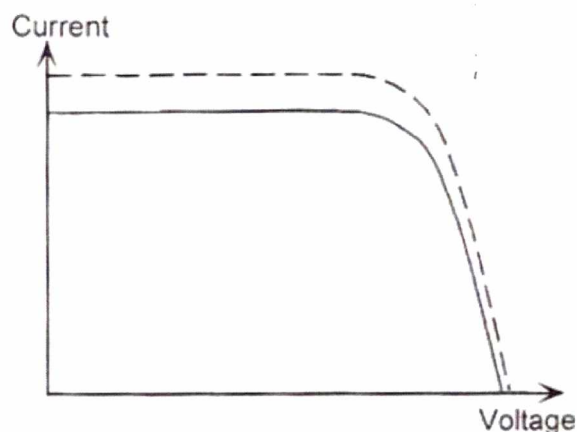


**Σχήμα 3.38:** Μεταβολή της τάσης ανοικτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκύκλωσης ενός ΦΒ στοιχείου, ως συνάρτηση της πυκνότητας ισχύος της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας,  $E$  ( $W/m^2$ ).

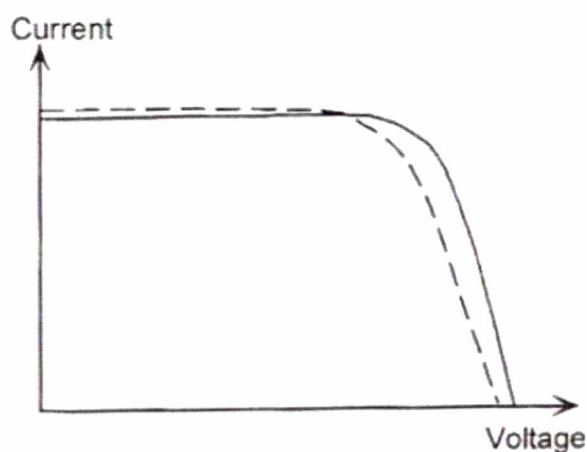
Παρατηρούμε ότι :

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

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η I-V καμπύλη εξαρτάται τόσο από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ) όσο και από τη θερμοκρασία ( $^{\circ}C$ ). Έχοντας δει τη μεταβολή της τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  και του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  συναρτήσει της ακτινοβολίας, μπορούμε να δούμε πως μεταβάλλεται και η I-V χαρακτηριστική του κυττάρου όταν μεταβάλλεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία του.



**Σχήμα 3.39:** Αλλαγή της χαρακτηριστικής I-V σε σχέση με αυξημένη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.



**Σχήμα 3.40 :** Αλλαγή της χαρακτηριστικής I-V σε σχέση με αυξημένη θερμοκρασία στοιχείου.

Όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του κυττάρου, προκαλούνται κάποιες μεταβολές στις παραμέτρους της I-V χαρακτηριστικής (σχήμα 5.6).

Συγκεκριμένα με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου :

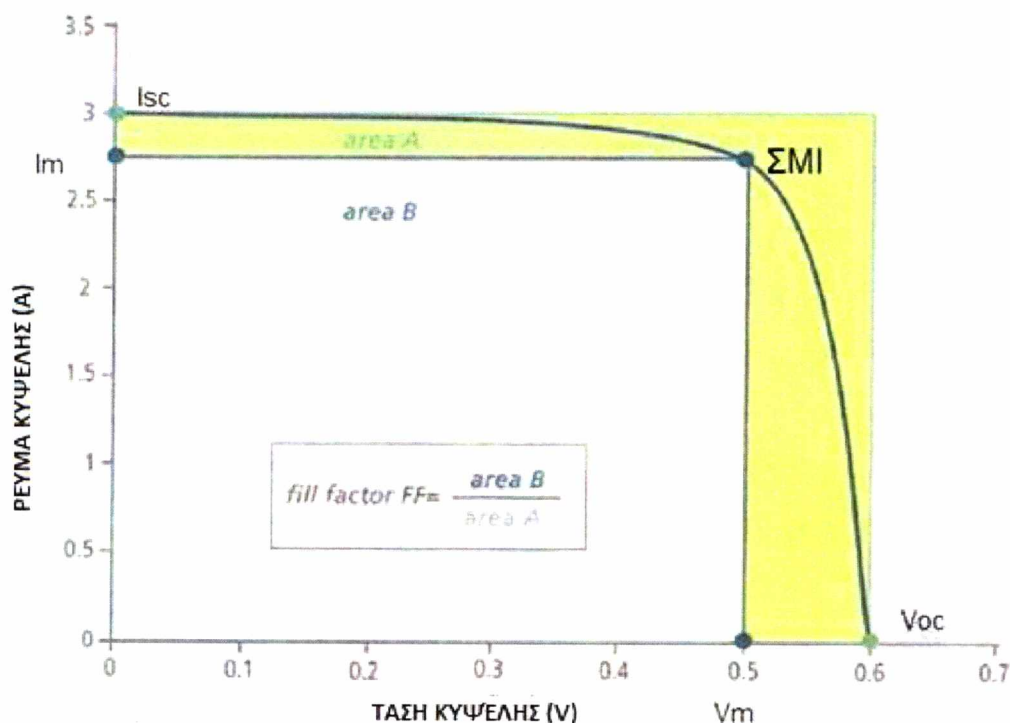
- i. το **ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$**  αυξάνεται ελαφρά (εξαρτάται βέβαια και από την ένταση της ακτινοβολίας και οφείλεται σε μεταβολή της δυνατότητας συλλογής των φορέων, αφού και το ενεργειακό χάσμα μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας).
- ii. Η **τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$**  μειώνεται (οφείλεται σε μεταβολή των χαρακτηριστικών αγωγής της διόδου).
- iii. Η **ισχύς  $P_m$  ( $P_{mpp}$  ή  $P_{max}$ )** μειώνεται ενώ μεταβάλλεται και η μορφή της καμπύλης (το σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης γίνεται πιο στρογγυλεμένο με αύξηση της θερμοκρασίας).



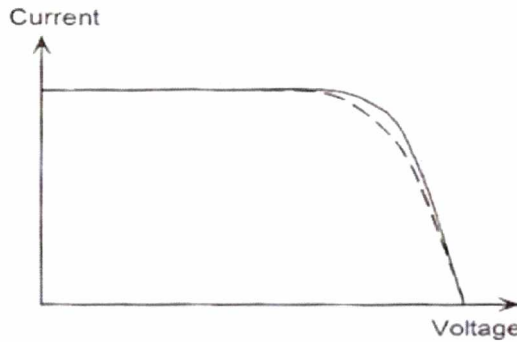
### 3.5.8 Συντελεστής Ποιότητας ή Παράγοντας Πληρότητας ή Πλήρωσης (fill factor)

Ο συντελεστής ποιότητας (παράγοντας πληρότητας ή πλήρωσης) FF (fill factor) είναι ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_m (=I_m \cdot V_m)$  ενός ΦΒ στοιχείου ή ΦΒ πλαισίου γενικότερα, προς το γινόμενο της τάσεως ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$ , επί το ρεύμα βραχυκύκλωσης,  $I_{SC}$ , αντίστοιχα, για τη δεδομένη πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (τύπος 5.2) και είναι ένα μέτρο του πόσο “τετράγωνη” είναι η I-V καμπύλη.

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (\text{τύπος 5.2})$$



Οι τιμές του, που καθορίζονται από το υλικό του φωτοβολταϊκού στοιχείου και τις συνθήκες, είναι μεταξύ 0 και 1. Η τιμή αναφοράς του δίδεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του FF, τόσο περισσότερο η λειτουργία του ΦΒ στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος, στην περιοχή τάσεων 0- $V_{OC}$ . Σ' αυτές τις περιπτώσεις η διάταξη χαρακτηρίζεται αφενός από μικρή ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά, αφετέρου από μεγάλη τιμή παράλληλης αντίστασης. Τυπικές τιμές 0.7 με 0.9 χαρακτηρίζουν ΦΒ στοιχεία με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση αντίστοιχα.



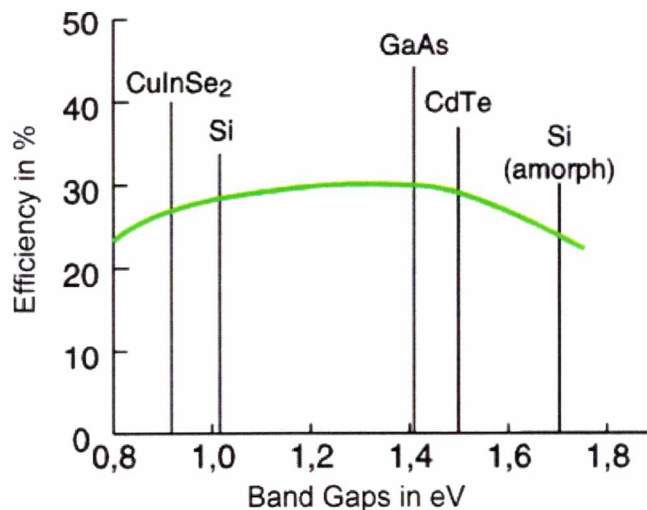
**Σχήμα 5.41:** Αλλαγή της χαρακτηριστικής I-V σε σχέση με αυξημένο συντελεστή ποιότητας

### 3.5.9 Η Απόδοση του ΦΒ Στοιχείου

Ας θεωρήσουμε ότι πάνω στην επιφάνεια ενός ΦΒ στοιχείου (ή πλαισίου) εμβαδού  $S$ , προσπίπτει ισχύς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας,  $P_{inc} = E \cdot S$  (incident), όπου  $E$ , η πυκνότητα ισχύος της. Το πηλίκο της ηλεκτρικής ισχύος  $P_m$ , που αποδίδεται από το ΦΒ στοιχείο (ή πλαίσιο), στο αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος, προς την προσπίπτουσα ισχύ ακτινοβολίας,  $P_{inc}$ , καθορίζει την απόδοση ενεργειακής μετατροπής (energy conversion efficiency),  $\eta$ , του ΦΒ στοιχείου (ή πλαισίου) και δίνεται από τον τύπο 5.4.

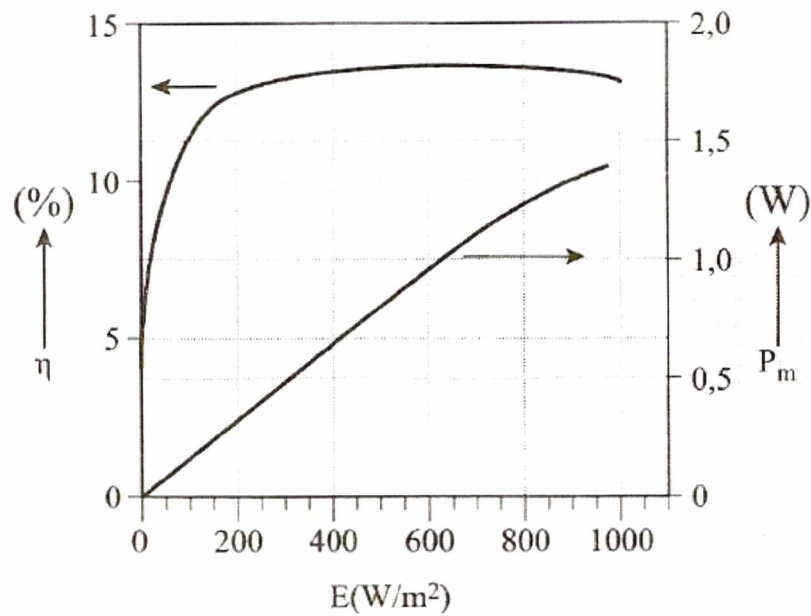
$$\eta_c = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC}}{P_{in}} \quad (\text{τύπος 5.4})$$

Η απόδοση του ΦΒ στοιχείου (ή πλαισίου) εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο ημιαγωγό (σχήμα 5.8) και από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.9 (διατηρώντας τη θερμοκρασία του κυττάρου σταθερή) και μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας (σχήμα 5.10).

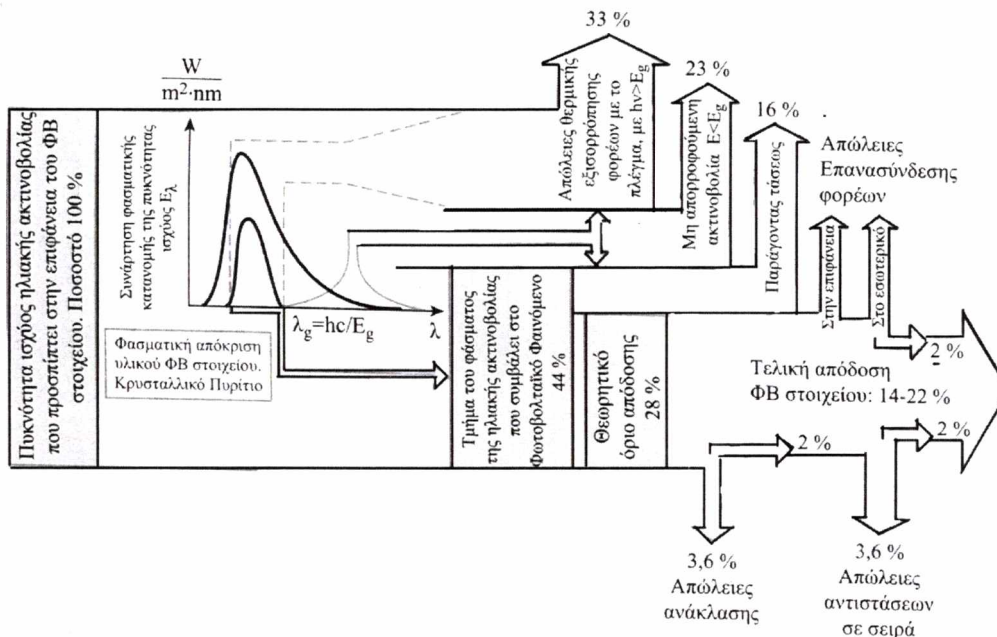


**Σχήμα 5.42 :** Αποδόσεις ΦΒ στοιχείων

Στο σχήμα 3.42 παρουσιάζονται οι ιδανικές αποδόσεις των πιο σημαντικών ΦΒ στοιχείων, ως συνάρτηση του ενεργειακού χάσματος των αντίστοιχων ημιαγωγών στους 300K και για AM1.5. Ο Μέγιστος βαθμός απόδοσης συμβαίνει για ενεργειακό χάσμα στην περιοχή 1.4-1.6 eV.



**Σχήμα 5.43 :** Εξάρτηση της απόδοσης  $\eta$  και της μέγιστης ισχύος,  $P_m$ , ενός ΦΒ στοιχείου c-Si, από την πυκνότητα ισχύος  $E$ , της προσπίπτουσας σ' αυτό ηλιακής ακτινοβολίας, σε τιμές που καλύπτουν ημερήσια μεταβολή κατά μια αίθρια ημέρα.



**Σχήμα 3.44:** Διάγραμμα ροής ενέργειας κατά τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ΦΒ ενέργεια (Διάγραμμα Sankey)



### 3.5.9 Επίδραση Θερμοκρασίας στα Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά του ΦΒ Στοιχείου

Η θερμοκρασία της κυψέλης αυξάνεται με τον φωτισμό, εξαιτίας της μετατροπής μέρους της ηλιακής ενέργειας σε θερμική (αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του υλικού). Στην περίπτωση που το ΦΒ στοιχείο είναι ενσωματωμένο στο ΦΒ πλαίσιο η διαφορά  $\theta_c - \theta_a$ , όπου  $\theta_c$  η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψελίδας και  $\theta_a$  του περιβάλλοντα αέρα, αυξάνει σχεδόν γραμμικά ως συνάρτηση της πυκνότητας της ολικής ακτινοβολίας,  $E$ , με τυπικό ρυθμό:

$$\frac{\theta_c - \theta_a}{E} \approx 30^\circ\text{C} / \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right) \quad (\text{τύπος 3.6})$$

Συνακόλουθα μεταβάλλεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ . Παρατηρώντας το σχήμα 5.10 βλέπουμε ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  αυξάνεται ελαφρώς με την θερμοκρασία λόγω της αύξησης του μήκους διάχυσης των φωτοδημιουργούμενων φορέων μειονότητας με την θερμοκρασία, άρα και αύξηση του πλήθους των φορέων που καταφέρνουν να φτάσουν στους απέναντι χώρους της διάταξης, όπου οι φορείς αυτοί αποτελούν πλειονότητα. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  δίνεται από την σχέση:

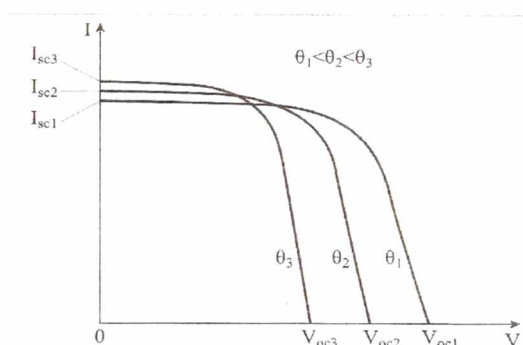
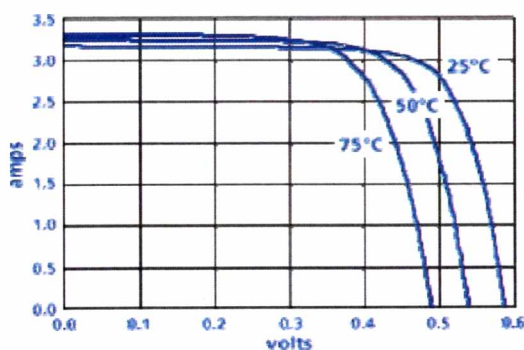
$$I_{sc} = \frac{E}{E_{STC}} \cdot I_{sc,STC} \cdot (1 + a_{I_{sc}} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})) \quad (\text{τύπος 3.3})$$

Όπου  $a_{I_{sc}} = \frac{dI_{sc}}{I_{sc} dT}$  ο θερμικός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης του ΦΒ στοιχείου,

$I_{sc,STC}$  η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε STC (πρότυπες συνθήκες ελέγχου),

$E$ , η πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας,

$E_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$  και  $T = 273 + \theta$



Σχήμα 3.45: Μεταβολή της καμπύλης I-V με την αύξηση της θερμοκρασίας

Αντίθετα η τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας κυψελίδας και μάλιστα η ποσοστιαία ελάττωσή της, ανά βαθμό θερμοκρασίας είναι σχεδόν μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη της αντίστοιχης αύξησης του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  της κυψελίδας. Αυτή η έντονη ελάττωση της  $V_{oc}$  οφείλεται στην ισχυρή εξάρτηση του ρεύματος κόρου,  $I_s$ , της διόδου από την θερμοκρασία.

Η τάσης του ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  δίνεται από τη σχέση:

$$V_{OC} = V_{OC,STC} \cdot (1 + \beta_{V_{oc}} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})) \cdot (1 + \delta(\theta_c) \ln(\frac{E}{E_{STC}})) \quad (\text{τύπος 3.4})$$

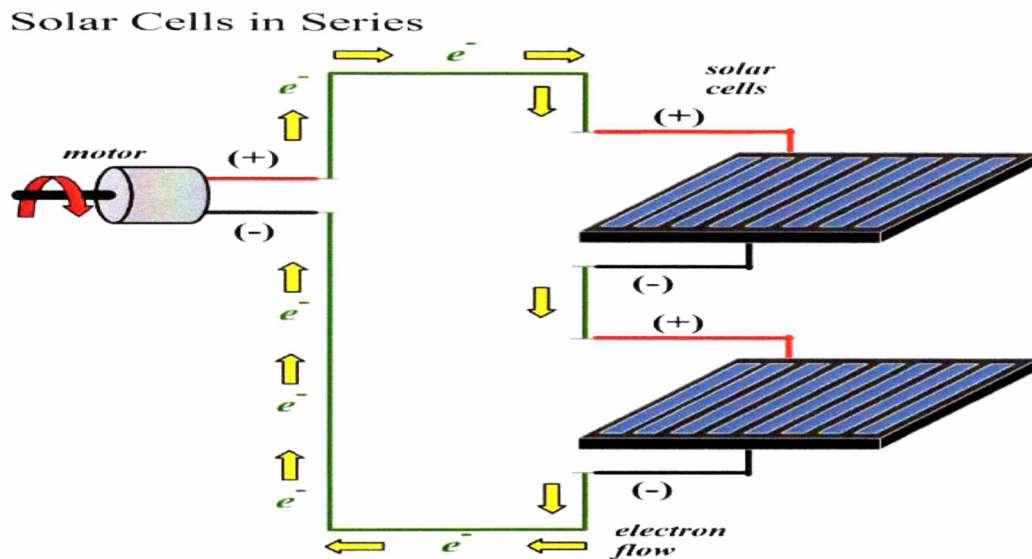
$V_{OC,STC}$  η τάση ανοικτού κυκλώματος

$\delta(\theta_c)$ , διορθωτικός παράγοντας της εξάρτησης  $V_{oc}$  από την  $E$  και

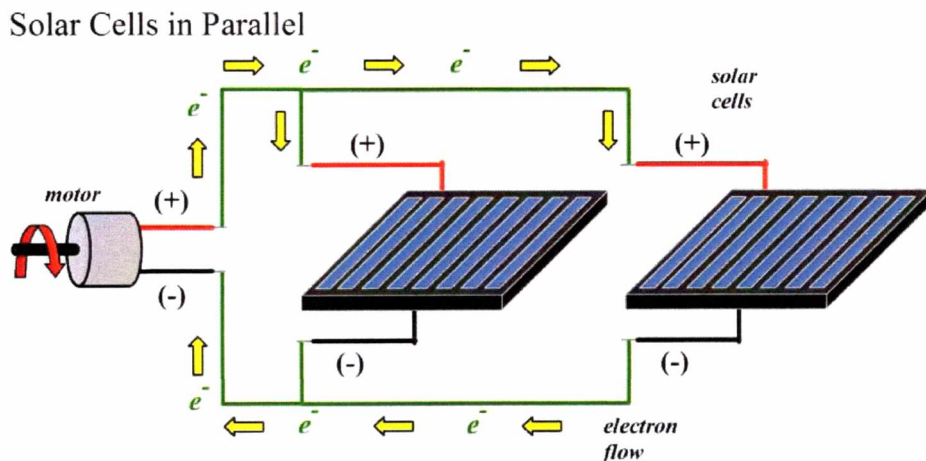
$\beta_{V_{oc}} = \frac{dV_{OC}}{V_{OC} \cdot dT}$ , ο θερμικός συντελεστής τάσης του ανοικτού κυκλώματος του ΦΒ

### 3.6 Τρόποι Σύνδεσης ΦΒ Στοιχείων

Τα ηλιακά κύτταρα συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα όπως φαίνεται στα σχήματα 3.46 και 3.47 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.46: Σύνδεση σε σειρά



Σχήμα 3.47: Σύνδεση παράλληλα

#### ➤ Ρεύμα

Το ρεύμα σε μία **εν σειρά** συνδεσμολογία κυψελών είναι το ίδιο σε κάθε σημείο της συνδεσμολογίας, ίδιο με αυτό που παράγεται από μία κυψέλη. Εάν μία κυψέλη με χαρακτηριστικά χαμηλού ρεύματος συνδεθεί σε μια συνδεσμολογία με άλλες κυψέλες που έχουν χαρακτηριστικά υψηλότερου ρεύματος, η συνδεσμολογία θα περιοριστεί στο ρεύμα της κυψέλης χαμηλού ρεύματος.

$$I_{\text{σειράς}} = (I_{\text{max}} \text{ μίας κυψέλης})$$



## ➤ Τάση

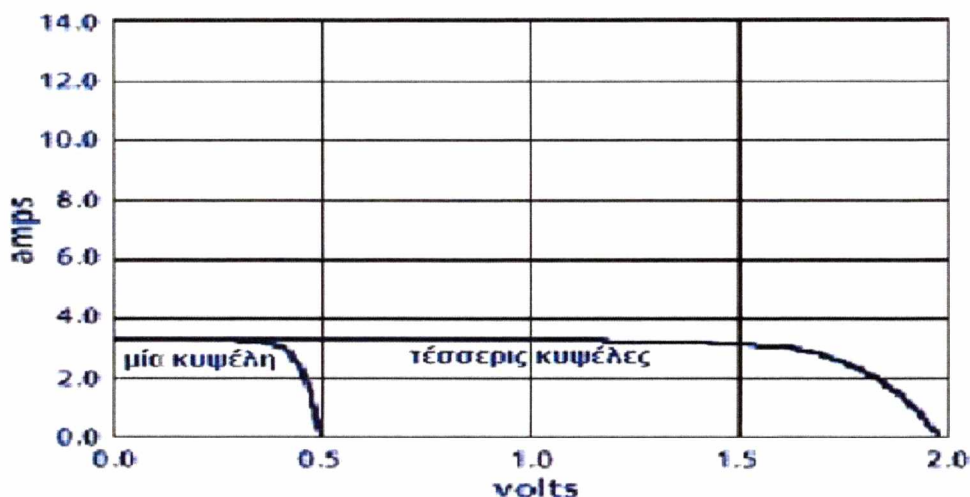
Η τάση σε μία εν σειρά συνδεσμολογία κυψελών είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων κάθε κυψέλης. Υποθέτοντας όμοιες κυψέλες, η τάση μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$V_{\text{σειράς}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) V_{\text{max}} (\text{μιας κυψέλης})$$

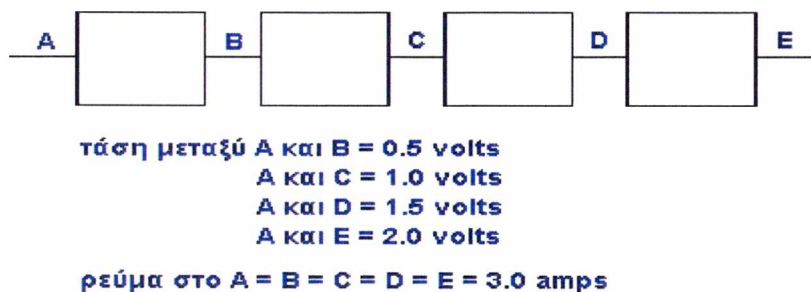
Η παραγόμενη ισχύς από μία συνδεσμολογία κυψελών ισούται με το ρεύμα της συνδεσμολογίας πολλαπλασιαζόμενο με την τάση της.

$$P_{\text{σειράς}} = I_{\text{σειράς}} V_{\text{σειράς}}$$

Οι μεμονωμένες κυψέλες μπορεί να λειτουργούν σε διαφορετικές τάσεις, αλλά κάθε μία κυψέλη θα λειτουργεί με το ίδιο ρεύμα όπως και οι άλλες στη συνδεσμολογία. Σχήμα 3.48 φαίνεται πώς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά I-V των μεμονωμένων κυψελών για να διαμορφώσουν την καμπύλη I-V της εν σειρά συνδεσμολογίας, ενώ στην εικόνα 1.2.6 παρουσιάζεται μία εν σειρά συνδεσμολογία από τέσσερις κυψέλες και τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος αυτών.



**Σχήμα 3.48:** Τυπικές καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες εν σειρά



**Σχήμα 3.49:** Τέσσερις ηλιακές κυψέλες συνδεδεμένες εν σειρά

### Σύνδεση εν παραλλήλω

Εάν οι κυψέλες (ή τα πλαίσια) συνδεθούν παράλληλα, μπορεί να γίνει μία εκτίμηση του ρεύματος, της τάσης και της ισχύος τους με τις μεθόδους που περιγράφονται στη συνέχεια, υποθέτοντας και πάλι ότι οι συνθήκες λειτουργίας είναι οι ίδιες και ότι οι κυψέλες έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά I-V.

#### ➤ Ρεύμα

Το παραγόμενο ρεύμα από μια ομάδα κυψελών συνδεδεμένων παράλληλα ισούται με το άθροισμα των μεμονωμένων ρευμάτων κάθε κυψέλης. Υποθέτοντας παρόμοιες κυψέλες, το ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$I_{\text{παράλληλα}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) * (I_{\text{max}} \text{ μίας κυψέλης})$$

#### ➤ Τάση

Η τάση μεταξύ δύο κόμβων μιας ομάδας κυψελών συνδεδεμένων εν παραλλήλω είναι ίση με την τάση κάθε κυψέλης:

$$V_{\text{παράλληλα}} = (V_{\text{max}} \text{ μίας κυψέλης})$$

#### ➤ Ισχύς

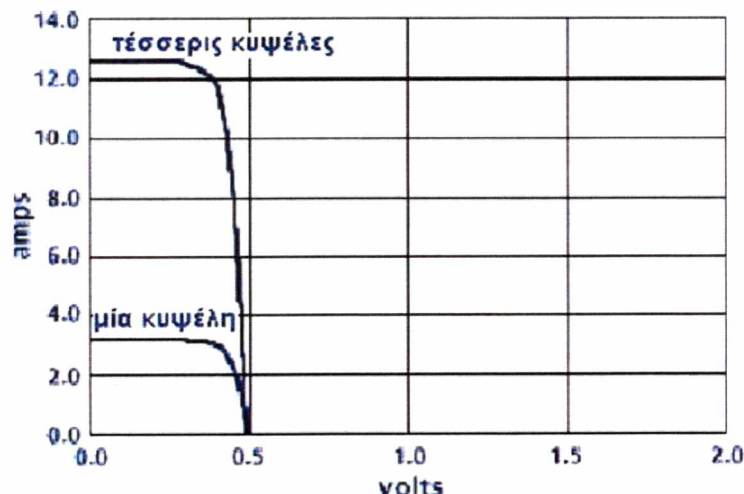
Η παραγόμενη ισχύς από κυψέλες εν παραλλήλω είναι ίση με το παράλληλο ρεύμα πολλαπλασιασμένο με την παράλληλη τάση της.

$$P_{\text{παράλληλα}} = I_{\text{παράλληλα}} * V_{\text{παράλληλα}} \Rightarrow$$

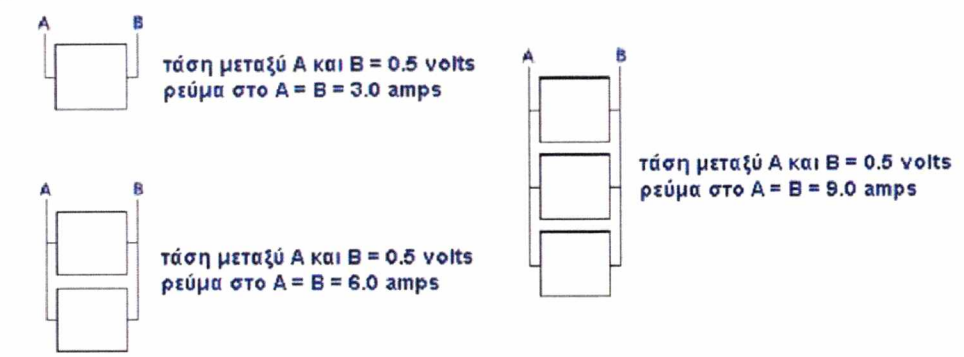
$$P_{\text{παράλληλα}} = (\text{Αριθμός κυψελών}) * (I_{\text{max}} \text{ μίας κυψέλης}) * (V_{\text{max}} \text{ μίας κυψέλης})$$

Όταν μια ομάδα κυψελών συνδέεται παράλληλα, οι μεμονωμένες κυψέλες μπορεί να παράγουν διαφορετικά ρεύματα, αλλά κάθε κυψέλη θα λειτουργεί στην ίδια τάση.

Στο σχήμα 3.50 φαίνεται πώς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά I-V των μεμονωμένων κυψελών για να διαμορφώσουν την καμπύλη I-V της ομάδας των κυψελών εν παραλλήλω, ενώ στο σχήμα 3.51 απεικονίζονται ομάδες κυψελών εν παραλλήλω και τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος αυτών.



**Σχήμα 3.50:** Καμπύλες I-V για μία και τέσσερις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα



**Σχήμα 3.51:** Μία, δύο, και τρεις κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα

Μία συνηθισμένη τιμή για τις τάσεις  $V_1$  και  $V_2$  με καλό ηλιασμό είναι 0,4V - 1,0V, ενώ τα ρεύματα  $I_1$ ,  $I_2$  εξαρτώνται από την επιφάνεια των αντιστοίχων ηλιακών κυψελών. Συνήθεις πρακτικές τιμές αυτών είναι 20 mA/cm<sup>2</sup> -40 mA/cm<sup>2</sup> της επιφάνειας της κυψέλης.

Αν πολλές διατάξεις της εικόνας 1.2.3 συνδεθούν μεταξύ τους παράλληλα προκύπτει ένας φωτοβολταϊκός συλλέκτης. Στους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες οι ηλιακές κυψέλες συνδεσμοολογούνται μικτά. Με κατάλληλη συνδεσμοολογία των συλλεκτών προκύπτουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και αυτά συνδεόμενα στη σειρά μεταξύ τους δίνουν τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες.

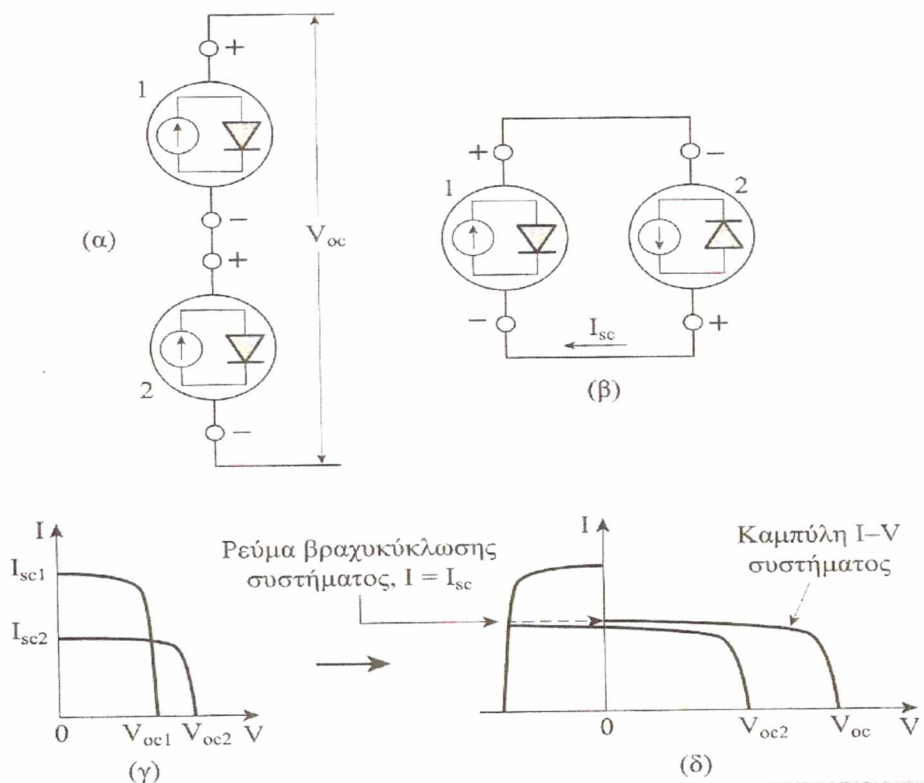
#### • Δίοδοι παράκαμψης

**Οι δίοδοι παράκαμψης** χρησιμοποιούνται για την προστασία των συνδεσμοολογιών εν σειρά των κυψελών. Εν γένει, ένα πλαίσιο προσφέρεται από τον κατασκευαστή με ενσωματωμένη μια δίοδο παράκαμψης, η οποία συνδέεται παράλληλα με ολόκληρο το πλαίσιο. Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, η δίοδος δεν κάνει τίποτα εκτός από το να καταναλώνει μία ελάχιστη ποσότητα ισχύος. Εάν σκιαστεί ή υποστεί βλάβη μέρος του πλαισίου, η δίοδος παράκαμψης εκτρέπει το ρεύμα μέσω αυτής και γύρω από το πλαίσιο. Χωρίς τη δίοδο, το πλαίσιο που σκιάζεται ή έχει υποστεί βλάβη διαχέει το ρεύμα υπό μορφή θερμότητας και τελικά καταστρέφεται.

#### • Δίοδοι φραγής ή απομόνωσης

**Οι δίοδοι φραγής** εγκαθίστανται για να αποτρέψουν την αντιστροφή της ροής του ρεύματος προς τα πλαίσια. Μια δίοδος φραγής συνδέεται συνήθως εν σειρά μεταξύ της συστοιχίας και των μπαταριών. Αντ' αυτού, εάν ένας αριθμός συνδεσμοολογιών συνδέονται εν σειρά, οι δίοδοι φραγής μπορούν να συνδεθούν εν σειρά με κάθε μία συνδεσμοολογία. Ενίοτε ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στα Φ/Β συστήματα για τη ρύθμιση της ισχύος εξαλείφει την ανάγκη προσθήκης μιας διόδου φραγής.





**Σχήμα 3.52** Ηλεκτρική συμπεριφορά δυο ανόμοιων ΦΒ στοιχείων.

(α) παραστατικό διάγραμμα σύνδεσης σε σειρά. (β) το ΦΒ 1 ( $I_{sc1}, V_{oc1}$ ), μπορεί να θεωρηθεί ότι πολώνει ανάστροφα το στοιχείο 2 ( $I_{sc2}, V_{oc2}$ ). (γ) οι χαρακτηριστικές των δυο ΦΒ στοιχείων. (δ) Αναστρέφεται η καμπύλη του 1, ως προς τον άξονα των ρευμάτων. Η τομή της νέας καμπύλης του 1 με την καμπύλη του 2, δίδει το κοινό ρεύμα στην κατάσταση βραχυκύκλωσης (ρεύμα βραχυκύκλωσης). Αφού το προσδιορίσουμε, κατασκευάζουμε την τελική καμπύλη του συστήματος των δύο, με χαρακτηριστικά σημεία  $I_{sc}$  και  $V_{oc} = V_{oc1} + V_{oc2}$ .

### 3.7 Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο

Το βασικό και χαρακτηριστικό κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι η Φ/Β γεννήτρια, που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα Φ/Β ηλιακά στοιχεία.

Η τάση όμως και η ισχύς των Φ/Β στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών.

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

Τα Φ/Β πλαίσια του εμπορίου δεν έχουν τυποποιημένες διαστάσεις και ισχύεις. Σε συμβατικές συνθήκες αιχμής έχουν συνήθως, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή, τάση εξόδου από 4 V μέχρι 22 V , και ένταση ρεύματος από περίπου 0,5 A μέχρι 2,5A. Πριν βγουν στο εμπόριο, τα Φ/Β πλαίσια υποβάλλονται συνήθως σε μια σειρά από αυστηρές δοκιμές ποιοτικού ελέγχου με θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, καθώς και σε δοκιμασία 5ήμερης συνεχούς παραμονής σε ατμόσφαιρα σχετικής υγρασίας 95% και θερμοκρασίας 95 °C, για να ελεγχθεί η στεγανότητά τους.

### 3.8 Απόδοση ΦΒ πλαισίου και Παράγοντες που την Επηρεάζουν

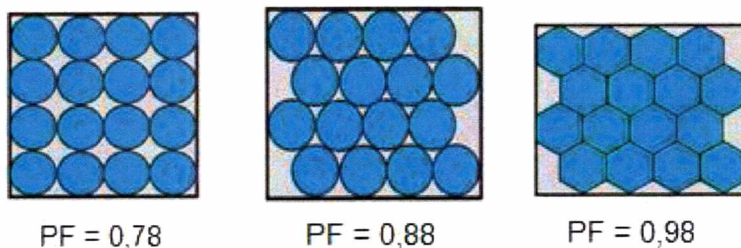
#### ➤ Απόδοση ΦΒ πλαισίου

Ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης ενός ΦΒ πλαισίου, εμβαδού  $S$ , προσδιορίζεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας  $E \cdot S$ , όπου  $E$  η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του πλαισίου:

$$n_m = \frac{P_m}{E \cdot S} \text{ (τύπος )}$$

Εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής του, την θερμοκρασία των ΦΒ κυψελών και την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση τους είναι μικρότερη της αντίστοιχης της ΦΒ κυψέλης (ΦΒ στοιχείο) εργαστηριακής παραγωγής επειδή:

- 1) η μη πλήρης κάλυψη της επιφάνειας του από ΦΒ κυψέλες, η οποία καθορίζεται από τον παράγοντα κάλυψης (PF–Packing Factor), που αποτελεί το πηλίκο της πραγματικής επιφάνειας των ΦΒ κυψελών προς την επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου (εικόνα 3.16).
- 2) η ανομοιογένεια των ΦΒ κυψελών που συνθέτουν το ΦΒ πλαίσιο και
- 3) η ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα του πλαισίου.

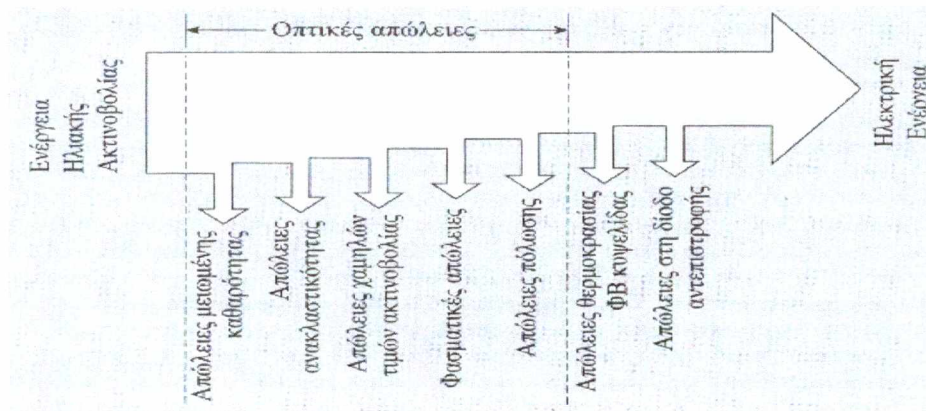


**Σχήμα 3.53** Κάλυψη επιφάνειας πλαισίου από ΦΒ κυψέλες

Η υψηλή θερμοκρασία των ΦΒ στοιχείων του πλαισίου και η εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα την αλλοίωση της δομής της κυψελίδας καθώς και η ρύπανση της επιφάνειας του, όπως π.χ. από τη σκόνη, μειώνουν την ενεργειακή απόδοση του. Εν συντομία οι κυριότερες απώλειες που συντελούν στην μείωση του στιγμιαίου συντελεστή απόδοσης  $\mathbf{n_m}$  του ΦΒ πλαισίου είναι:

- η γήρανση του ΦΒ πλαισίου, δηλαδή στη μείωση της απόδοσης του λόγω αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των κυψελίδων του ΦΒ πλαισίου,
- οι απώλειες οπτικού δρόμου και θερμοκρασίας κυψελίδας και
- στις απώλειες στη δίοδο αντεπιστροφής.





**Σχήμα 3.54 :** Διάγραμμα Sankey για τη ροή ενέργειας σε ΦΒ πλαίσιο

Ο συντελεστής απόδοσης  $\eta_m$  μπορεί να αποδοθεί και ως γινόμενο των επιμέρους στιγμιαίων συντελεστών ενεργειακών απωλειών από την σχέση:

$$\eta_m = \eta_{καθ} * \eta_R * \eta_{LI} * \eta_S * \eta_P * \eta_T * \eta_D * \eta_{m,STC}$$

$\eta_{καθ}$  : Συντελεστής καθαρότητας υαλοπίνακα ΦΒ πλαισίου

$\eta_R$  : Συντελεστής απόκλισης λόγω διαφοροποίησης της ανακλαστικότητας σε γωνίες πρόσπτωσης διάφορες της καθέτου του ΦΒ πλαισίου

$\eta_{LI}$  : Συντελεστής απόκλισης στην περιοχή χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας

$\eta_S$  : Συντελεστής φασματικής απόκλισης λόγω διαφορετικού φάσματος σε σχέση με το φάσμα AM1,5 (STC)

$\eta_P$  : Συντελεστής απόκλισης εξαιτίας της πόλωσης της ηλιακής ακτινοβολίας

$\eta_T$  : Συντελεστής απόκλισης της απόδοσης του ΦΒ πλαισίου εξαιτίας της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας της κυψέλης σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς 25 °C .

$\eta_D$  : Συντελεστής απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής

$\eta_{m,STC}$  : Συντελεστής απόδοσης ΦΒ πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες (STC)

Η τελική τιμή του συντελεστή απόδοσης καθορίζεται και από τον παράγοντα γήρανσης του ΦΒ πλαισίου  $\eta_\gamma$ .

## ➤ Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση

### 1. Παράγων ή συντελεστής γήρανσης $\eta_{\gamma,m}$

Αφορά στη μείωση της απόδοσης των ΦΒ πλαισίων στο χρόνο ζωής τους και εκφράζεται συνήθως με το ποσοστό γήρανσης ανά έτος χρήσης. Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσής τους άρα και της ισχύος αιχμής και οφείλεται κυρίως σε υπερθερμάνσεις των ΦΒ κυψελών που καταστρέφουν την δομή του υλικού τους.

### 2. Οπτικές ενεργειακές απώλειες

Αποτελούν όλες εκείνες τις απώλειες που καθορίζονται από την απόκλιση της απόδοσης σε σχέση με τις πρότυπες συνθήκες, λόγω των παρακάτω αιτιών:

- Διαφοροποίηση ανακλαστικότητας ΦΒ πλαισίου σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC.
- Επίδραση διαφοροποίησης φάσματος ακτινοβολίας σε σχέση με το AM1,5 (STC)
- Απώλειες διαφοροποίησης της πόλωσής
- Απώλειες χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας
- Καθαρότητα όψεως του ΦΒ πλαισίου

### 3. Επίδραση Θερμοκρασίας ΦΒ Κυψέλης

Περιγράφει τη διαφοροποίηση της απόδοσης του ΦΒ πλαισίου, λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης σε σχέση με την θερμοκρασία της στις πρότυπες συνθήκες (STC) και δίνεται από την ίδια σχέση που χρησιμοποιείτε στην περίπτωση μεμονωμένου ΦΒ στοιχείου :

$$\eta_T = 1 + \gamma_{mp} \cdot (\theta_c - \theta_{STC})$$

όπου,

- $\gamma_{mp} = \frac{dP}{P_m \cdot dT}$ , ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του ΦΒ στοιχείου
- $\theta_c$ , θερμοκρασία κυψέλης θεωρούμενη ίδια για όλες τις κυψέλες.

Μια αναλυτική έκφραση για την εξάρτηση της θερμοκρασίας της κυψέλης από τις συνθήκες περιβάλλοντος, είναι:

$$\theta_c = \theta_a + \frac{G_t}{G_{STC}} \cdot (T_1 \cdot e^{B \cdot ws} + T_2 + \Delta\theta)$$

- $\theta_a$ , η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα
- $G_t$ , η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου
- $B$ , εμπειρικός συντελεστής
- $ws$ , η ταχύτητα του ανέμου

- $T_1$ ,  $T_2$ , εμπειρικοί συντελεστές που υπολογίζονται βάση τις οριακές τιμές της θερμοκρασίας της κυψέλης σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμου αντίστοιχα και  $\Delta\theta$ , η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της κυψέλης και της πίσω επιφάνειας του ΦΒ πλαισίου.

#### 4. Συντελεστής απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής

Περιγράφει τις απώλειες που προέρχονται από την δίοδο αντεπιστροφής που τοποθετείται για να αποτρέπεται η εκφόρτιση του συσσωρευτή διαμέσου της ΦΒ συστοιχίας όταν αυτή δεν φωτίζεται.

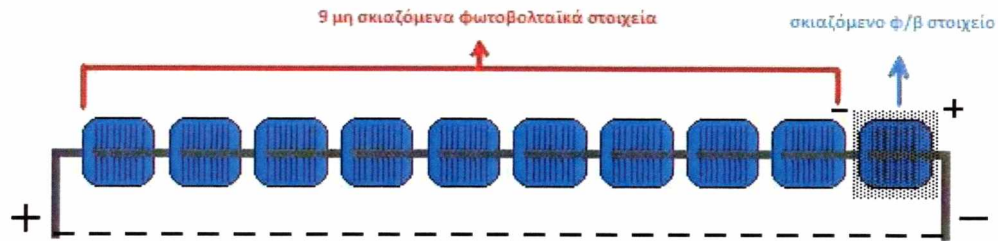
### 3.9 Προβλήματα Σκίασης ή Βλάβης ενός ΦΒ Στοιχείου του Πλαισίου

Η σκίαση μέρους ή όλου του πλαισίου οδηγεί στην ανάστροφη πόλωση των σκιασμένων κυττάρων του και σε υπερθέρμανση, που πολλές φορές μπορεί να είναι καταστροφική. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο θερμής κηλίδας (hot spot) του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Τα σκιασμένα κύτταρα λειτουργούν ως μια μεγάλη αντίσταση, στην οποία καταναλώνεται, η ούτως ή άλλως μειωμένη ενέργεια που παράγουν τα υπόλοιπα μη σκιασμένα κύτταρα. Παρατεταμένος σκιασμός κάποιων κυττάρων, σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπόλοιπων κυψελίδων, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή αυτού του στοιχείου και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου στοιχείου του. Για να αποτραπεί μια τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους παράκαμψης (Bypass diodes) που τοποθετούνται στο κιβώτιο συνδέσεων, το οποίο βρίσκεται στο πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού πλαισίου, επιτρέποντας τη χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου ακόμα κι αν κάποιο φωτοβολταϊκό στοιχείο του υστερεί ή καταστραφεί.

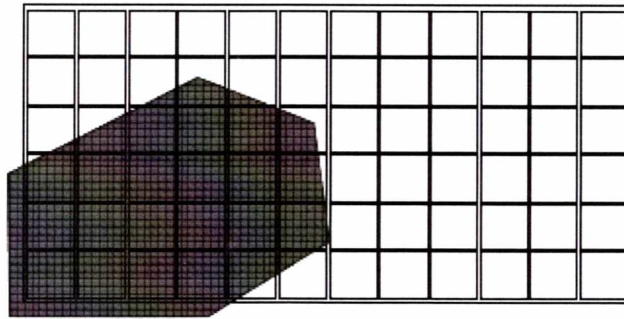
Όπως έχει αποδειχθεί, στην περίπτωση φυσικής σκίασης φωτοβολταϊκού πλαισίου μονοκρυσταλλικού πυριτίου, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.15, η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος τάσης παίρνει τη μορφή του σχήματος 5.16. Στο διάγραμμα 5.16 απεικονίζονται οι αποδόσεις τριών διαφορετικών συστημάτων: το πρώτο αποτελείται από πέντε φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου υψηλής απόδοσης και 215 Wp το καθένα, το δεύτερο από έξι φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου με ισχύ αιχμής 175 Wp το καθένα και το τρίτο από δεκαέξι φωτοβολταϊκά πλαίσια τελουριούχου καδμίου CdTe με ισχύ αιχμής 65 Wp.

Όσον αφορά στα δύο συστήματα των μονοκρυσταλλικών πλαισίων πυριτίου, παρατηρούμε ότι η καμπύλη που αντιστοιχεί στα σκιασμένα πλαίσια (διακεκομμένη κόκκινη και μπλε χαρακτηριστική) μειώνεται ανομοιόμορφα με “κύματα”, λίγο στην αρχή και πιο έντονα κοντά στην περιοχή του σημείου μέγιστης ισχύος, ενώ η διαφορά από το αντίστοιχο μη σκιασμένο σύστημα είναι ουσιαστική. Αντίθετα για τα σκιασμένα πλαίσια τελουριούχου καδμίου παρατηρείται και πάλι μείωση της παραγόμενης απόδοσης, χωρίς όμως να αλλάζει η γενικότερη μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παρουσιάζει την επιρροή ακόμη και της μικρής σκιάς στην απόδοση μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

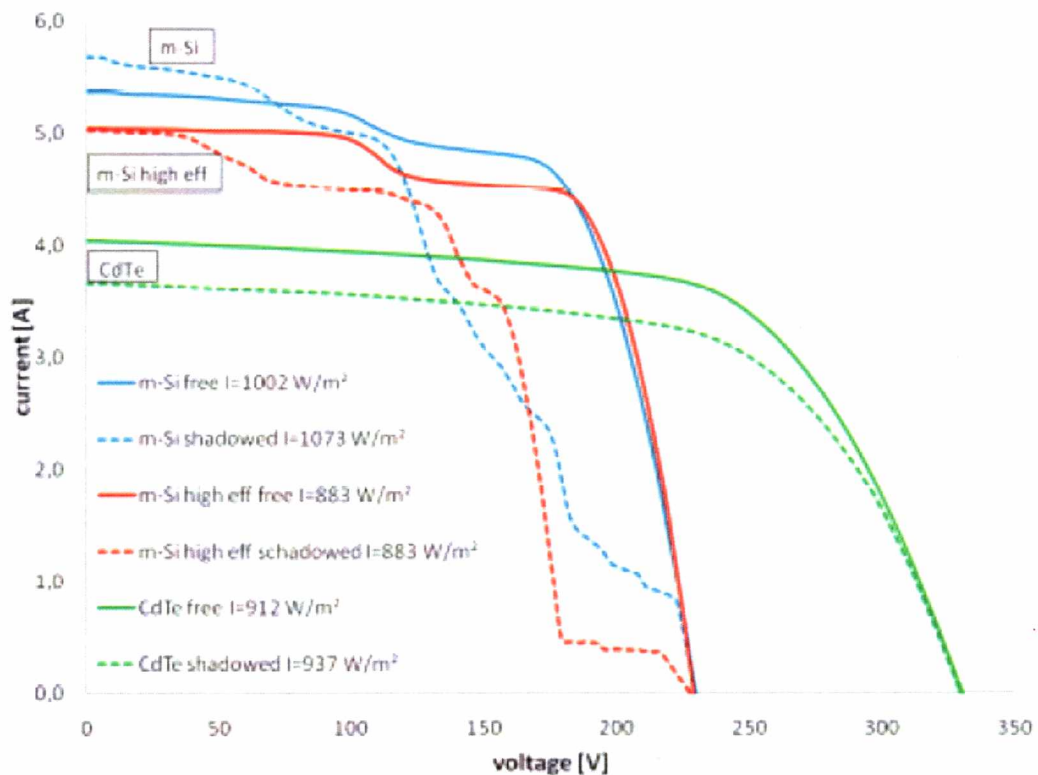




Σχήμα 3.55: Διάταξη φ/β στοιχείων σε σειρά με ένα σκιαζόμενο



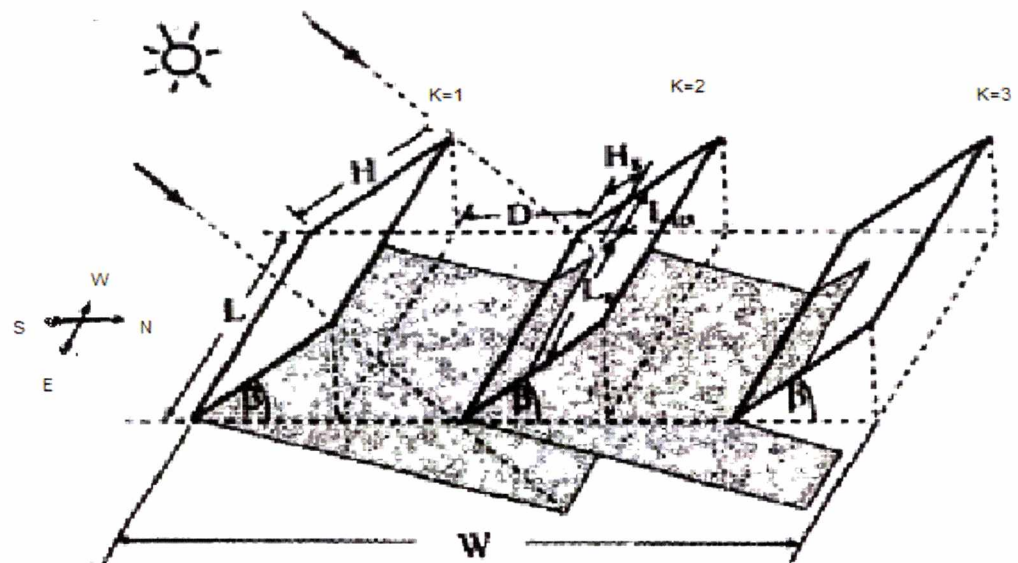
Σχήμα 3.56: Μερική φυσική σκίαση φωτοβολταϊκού πλαισίου μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



Σχήμα 3.57 : Σύγκριση της απόδοσης φωτοβολταϊκών πλαισίων όταν αυτά σκιάζονται μερικώς ή καθόλου.

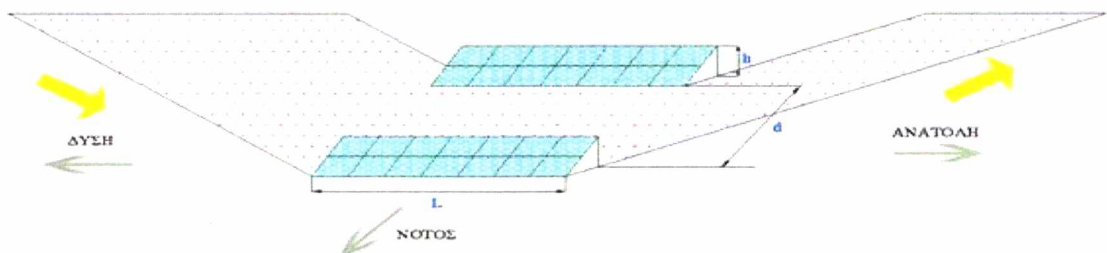
### 3.10 Απόσταση μεταξύ Διαδοχικών Συστοιχιών ΦΒ Συγκροτήματος

Στην περίπτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων μεγάλης κλίμακας, όπως συστοιχίες, καθώς και σε περιπτώσεις όπου ο χώρος εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι περιορισμένος, οι διατεταγμένοι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες είναι πιθανό να σκιάζονται κατά τη διάρκεια της ημέρας από γειτονικές σειρές (σχήμα 5.17). Για να αποφευχθεί η λειτουργία των πλαισίων και η μειωμένη παραγωγή της ισχύος όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, θα πρέπει να βρεθεί η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των σειρών.

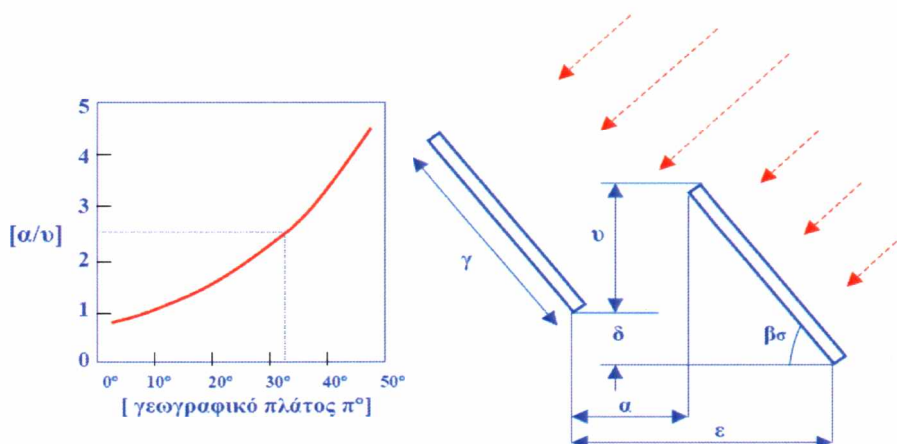


Σχήμα 3.58 : Σκίαση από γειτονικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Μία επιλογή για την τοποθέτηση των συστοιχιών θα ήταν η απόσταση μεταξύ των συστοιχιών να είναι ίση με το μέγιστο μήκος της μεσημεριανής σκιάς κατά την διάρκεια του έτους, στις 21 Δεκεμβρίου. Η λύση αυτή είναι ενεργειακά ασύμφορη, διότι πριν και μετά το μεσημέρι, η σκιά θα καλύπτει μεγάλο μέρος της συστοιχίας. Γι' αυτό το λόγο η μελέτη γίνεται έτσι ώστε η απώλεια ισχύος να μην ξεπερνά ένα καθορισμένο ποσοστό, π.χ 5%, αν και κατά την ανατολή και τη δύση για κάποιο χρονικό διάστημα η πίσω συστοιχία θα σκιάζεται. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η ενεργειακή απολαβή κατά τη διάρκεια όλου του έτους και το σύνολο και η έκταση των συστοιχιών να είναι η ελάχιστη.



Το πρώτο διάγραμμα του σχήματος 3.59 μας βοηθά στον προσδιορισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των ηλιακών συλλεκτών στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, ώστε η μια σειρά να μη σκιάζει την επόμενη. Συγκεκριμένα, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, μπορούμε να βρούμε την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του λόγου της ελεύθερης απόστασης  $a$  ανάμεσα στις δύο σειρές προς το ύψος κατασκευής στήριξης του συλλέκτη  $u$ .



**Σχήμα 3.59:** Η καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης  $a$  ανάμεσα στις γειτονικές σειρές των ηλιακών συλλεκτών μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας, προς την επικάλυψη του ύψους του  $u$ , σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου  $\pi^0$ , ώστε να μην εμποδίζεται ουσιαστικά η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. β) Η έννοια των μηκών  $a$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  και  $\epsilon$ , και της γωνίας της κλίσης  $\beta_\sigma$ , για τη διάταξη των ηλιακών συλλεκτών στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Το διάγραμμα είναι εμπειρικό και προέρχεται από την έκδοση “Stand – alone Photovoltaic Systems” της εταιρίας Monegon (1980).

Αν  $\gamma$  είναι το πλάτος του στηρίγματος, που συμπίπτει με το πλάτος του πλαισίου,  $\beta_\sigma$  είναι η κλίση του και  $\delta$  είναι η υψομετρική διαφορά (αν υπάρχει) ανάμεσα στα στηρίγματα των δύο σειρών, τότε το  $u$  δίνεται προφανώς από τον τύπο 5.8:

$$u = \gamma \mu \beta_\sigma + \delta$$

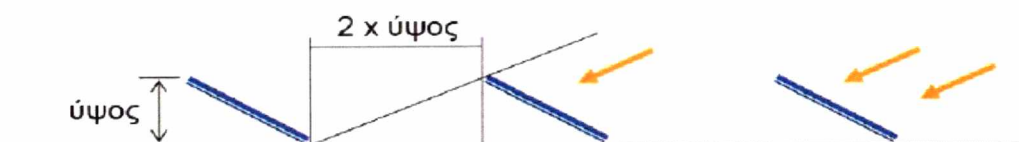
όπου το πρόσημο γίνεται ( - ) όταν η κλίση του εδάφους είναι ευμενής και ( + ) όταν είναι δυσμενής και

$$\delta = \epsilon \cdot K_\epsilon$$

όπου  $K_\epsilon$  η κλίση του εδάφους και το  $\epsilon$  υπολογίζεται από τον τύπο 5.10.

Βρίσκοντας από το διάγραμμα την αντίστοιχη τιμή του  $a$ , μπορούμε να υπολογίσουμε την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση των σειρών  $\epsilon$  από τον τύπο 5.10:

$$\epsilon = a + \gamma \sin \beta \quad (\text{τυπος 5.10})$$



Ένας πρακτικός κανόνας για να αποφευχθούν τυχόν απώλειες λόγω σκίασης



### 3.11 Φωτοβολταϊκά Πάνελ και Συστοιχίες

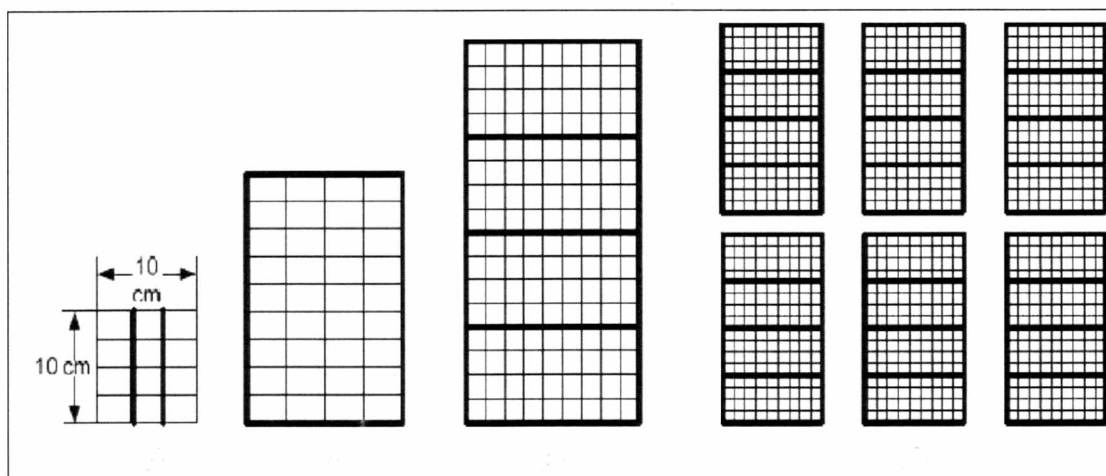
Συνώνυμο σχεδόν με το Φ/Β πλαίσιο είναι το Φ/Β πάνελ (PANEL). Όπως και το πλαίσιο έχει επίσης συναρμολογηθεί και προκατασκευασθεί στο εργοστάσιο και είναι έτοιμο για τοποθέτηση στην Φ/Β εγκατάσταση, αλλά με τη διαφορά ότι ένα πάνελ μπορεί να αποτελείται από περισσότερα χωριστά πλαίσια (το ένα δίπλα στο άλλο), που είναι σε κοινή συσκευασία και κοινή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους. ο αριθμός των πλαισίων ενός πάνελ είναι τόσο, ώστε οι διαστάσεις και το βάρος να μην είναι εμπόδιο για τη μεταφορά και την τοποθέτησή του στη Φ/Β εγκατάσταση. π.χ το πάνελ που αποτελείται από 4 Φ/Β πλαίσια και έχει συνολικές διαστάσεις 122 cm × 122 cm και συνολικό βάρος περίπου 23 kg. Δηλαδή μπορεί να μεταφερθεί εύκολα από έναν τεχνίτη.

Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός Φ/Β συστήματος, είναι σκόπιμο οι συνδέσεις των Φ/Β στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και στα πάνελ ή ανάμεσα στα γειτονικά πλαίσια και πάνελ, να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες. Έτσι, αν ένα Φ/Β στοιχείο σκιαστεί (π.χ. από ένα πουλί ή από τις ακαθαρσίες που μπορεί να αφήσει) ή αν πάθει βλάβη (π.χ. μία διακοπή στους ηλεκτρικούς αγωγούς) δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το σύστημα, όπως αν συνέβαινε αν όλα τα Φ/Β στοιχεία ήταν σε σύνδεση σε σειρά.

Η Φ/Β γεννήτρια μιας μικρής Φ/Β εγκατάστασης μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο πλαίσιο ή πάνελ. Σε μεγαλύτερες όμως εγκαταστάσεις, ομάδες περισσότερων Φ/β πλαισίων ή πάνελ τοποθετούνται σε κοινή κατασκευή στήριξης, π.χ. ξύλινα ή μεταλλικά ικριώματα, και ονομάζονται Φ/Β συστοιχίες (arrays) . Η σύνδεση των Φ/Β πλαισίων, στη σειρά ή παράλληλα, γίνεται με τρόπο που η τάση εξόδου της συστοιχίας να αποκτά την επιθυμητή τιμή. Είναι φανερό ότι η διαφορετική συνδεσμολογία των πλαισίων μιας Φ/Β γεννήτριας δεν μεταβάλλει την ισχύ της, αφού όποια αύξηση της τάσης εξόδου της γεννήτριας συνεπάγεται ανάλογη μείωση της έντασης του ρεύματος που παράγει.

Στις μεγάλες Φ/Β εγκαταστάσεις π.χ. συνολικής ισχύος αιχμής πάνω από 20 kWp, πολλές Φ/Β συστοιχίες σχηματίζουν ένα υποσυγκρότημα συστοιχιών (arrays subfield) και το σύνολο των υποσυγκροτημάτων αποτελεί το συγκρότημα συστοιχιών (array field) ή το Φ/Β πάρκο του Φ/Β σταθμού. Εδώ, ειδικότερα θα ασχοληθούμε με τις συνηθισμένες Φ/Β εγκαταστάσεις που αποτελούνται από σταθερούς επίπεδους συλλέκτες και δέχονται φυσικό ηλιακό φως, δηλαδή χωρίς τη χρησιμοποίηση φακών ή κατόπτρων για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Βλέπουμε ότι κάθε Φ/Β εγκατάσταση έχει σπονδυλωτή συγκρότηση από Φ/Β πλαίσια, πάνελ ή συστοιχίες, που το πλήθος τους. (και η συνολική επιφάνειά τους) καθορίζεται από την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που επιδιώκεται να παραχθεί. Η δομή αυτή επιτρέπει την εύκολη επέκταση των Φ/Β εγκαταστάσεων, με την προσθήκη νέων συλλεκτών, για την αντιμετώπιση των αναγκών που θα προέλθουν από ενδεχόμενη μελλοντική αύξηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης.



**Σχήμα 3.60:** (α) Φωτοβολταϊκό στοιχείο (β) Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με 32 φ/β στοιχεία (γ) Φ/β συστοιχία με 4 πλαίσια (4x32 στοιχεία) (δ) Φ/β συγκρότημα με 24 πλαίσια (24x4x32 στοιχεία). Περιέχεται σε κοινό πλαίσιο στήριξης.

Έχουν εντοπισθεί δύο κύριοι τύποι προβλημάτων κατά τη σύνδεση των φ/β πανέλων: το πρόβλημα σφάλματος (mismatch) και το πρόβλημα ζεστού σημείου (hot spot). Ο πρώτος τύπος προβλήματος συνίσταται στο γεγονός ότι η σύνδεση των φ/β στοιχείων δεν αποδίδει ισχύ ίση με το άθροισμα ισχύος των στοιχείων. Αυτό μπορεί να συμβεί διότι το ρεύμα που διαρρέει την κατασκευή, δε μπορεί να υπερβεί σε ένταση την ένταση ρεύματος του πιο αδύνατου ηλιακού στοιχείου. Οι συνέπειες του προβλήματος αυτού, αποτελούν αιτίες εμφάνισης του προβλήματος «ζεστού σημείου». δηλαδή, η απώλεια ισχύος που παρατηρείται στο πρόβλημα «σφάλματος», διοχετεύεται από τα πιο ισχυρά στοιχεία στα πιο αδύναμα, με αποτέλεσμα τότε το ράγισμα των φ/β στοιχείων, φαινόμενο που ονομάζεται πρόβλημα «ζεστού σημείου». Το πρόβλημα ζεστού σημείου αντιμετωπίζεται προστατεύοντας τα πιο αδύναμα φ/β στοιχεία. Αυτό μπορεί να γίνει συνδέοντας διόδους παράλληλα με ομάδα αδύναμων στοιχείων, συνήθως ανά 15. Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζεται, εν μέρει, και το πρόβλημα «σφάλματος». ωστόσο, το τελευταίο μπορεί να αντιμετωπισθεί με την ταξινόμηση των φ/β στοιχείων σε ομάδες με όμοιο κύκλωμα βραχυκύκλωσης και παράλληλης σύνδεσης των ομάδων αυτών.

### 3.12 Αξιολόγηση Τεχνολογιών

Το κόστος αγοράς των Φ/Β πλαισίων καθορίζεται από αρκετούς παράγοντες, οι οποίοι με τη σειρά τους καθορίζονται από τα φυσικά και τα δομικά χαρακτηριστικά του πλαισίου. Φυσικά χαρακτηριστικά του πλαισίου είναι η γεωμετρία, το βάρος και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του. Ο σχεδιαστής του πλαισίου πρέπει να δώσει ιδιαίτερη σημασία στις διαστάσεις του πλαισίου, ώστε να υπάρχει η βέλτιστη τοποθέτηση (παράγοντας κάλυψης-packing factor) των Φ/Β στοιχείων και εξοικονόμηση της διαθέσιμης επιφάνειας, χωρίς να παρουσιαστεί πρόβλημα υπερθέρμανσης των στοιχείων και ηλεκτρικής επαφής μεταξύ τους. Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή πρέπει να παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στις καιρικές συνθήκες, μικρό βάρος και καλή απαγωγή της θερμότητας.

Αναλυτικότερα ο υαλοπίνακας του πλαισίου πρέπει να παρουσιάζει μικρή ανακλαστικότητα, μικρό δείκτη διάθλασης, μεγάλη αντοχή στο χαλάζι, αργή γήρανση και μικρό βάρος. Η πίσω επιφάνεια του πλαισίου κατασκευάζεται από πλαστική ύλη. Πρέπει να έχει την δυνατότητα αποβολής της παραγόμενης θερμότητας και να μην επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες, την υπεριώδη ακτινοβολία και να έχει μικρό βάρος. Όλη η κατασκευή συνδέεται με μεταλλικό πλαίσιο (συνήθως από ανοδιωμένο αλουμίνιο).

Επιπλέον τα Φ/Β πλαίσια πρέπει να πληρούν τις προδιαγραφές της Ε.Ε, έχοντας υποβληθεί στις παρακάτω δοκιμασίες:

- Θερμικών κύκλων
- Θερμικού σοκ
- Ψύξης-υγρασίας
- Ηλεκτρικής μόνωσης
- Κρούσεων χαλαζόπτωσης
- Μηχανικής αντοχής και στρέψης
- Περιβάλλοντος άλμης
- Ακτινοβολιών και έκθεσης στο νερό
- Πεδίου

Οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν την ποιότητα και τη διάρκεια ζωής του πλαισίου. Έτσι το κόστος παραγωγής του πλαισίου αυξάνεται με την ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται. Η δομή των υλικών, που χρησιμοποιούνται, αναφέρεται στην τεχνολογία παρασκευής του Φ/Β στοιχείου. Το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους κατασκευής ενός πλαισίου το καταλαμβάνει ο ημιαγωγός. Η τιμή του εξαρτάται από το τύπο του ημιαγωγικού στοιχείου.



Το **άμορφο πυρίτιο** είναι το πιο φθινό υλικό που υπάρχει αυτή τη στιγμή σε βιομηχανική παραγωγή. Τα χαρακτηριστικά του όμως δεν επιτρέπουν την εφαρμογή του σε μεγάλες εγκαταστάσεις. Έτσι λοιπόν η χρήση του περιορίζεται εκεί όπου οι ενεργειακές ανάγκες είναι μικρές. Βρίσκει βέβαια πολλές εφαρμογές την ενσωμάτωση των Φ/Β πλαισίων σε κτίρια (κατασκευάζονται έως και κεραμίδια από άμορφο πυρίτιο). Οι τιμές των πλαισίων από άμορφο πυρίτιο κυμαίνονται από 3 €/Wp έως 4,7 €/Wp.

Το **πολυκρυσταλλικό πυρίτιο** καταλαμβάνει αρκετό μέρος της αγοράς καθώς παρουσιάζει σχετικά καλά χαρακτηριστικά. Εφαρμόζεται συνήθως σε οικιακές και εφαρμογές μεσαίου μεγέθους, όπου οι απαιτήσεις σε ενέργεια δεν είναι πολύ μεγάλες και το κόστος παίζει σημαντικό ρόλο. Η τιμή του κυμαίνεται από 4 €/Wp έως 5,5 €/Wp.

Το **μονοκρυσταλλικό πυρίτιο** είναι ότι καλύτερο υπάρχει αυτή τη στιγμή στην αγορά, σε μορφή πλαισίου, από άποψη απόδοσης και απόσβεσης κεφαλαίου. Με την τιμή του να μειώνεται και η απόδοσή του να αυξάνεται φτάνοντας τα επίπεδα του πολυκρυσταλλικού, τείνει να καταλάβει την αγορά. Η τιμή του κυμαίνεται από 4 €/Wp έως 6,5 €/Wp.

Τα πολύ καλά χαρακτηριστικά του το κάνουν ιδανικό για εγκαταστάσεις με μεγάλες απαιτήσεις ενέργειας, όπως Φ/Β πάρκα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και οικίες. Προτιμάται σε μεγάλα πάρκα καθώς έχει μεγάλη απόδοση, καταλαμβάνει μικρότερη έκταση και παράγει περισσότερη ενέργεια ανά τ.μ, κάτι που σημαίνει ταχύτερη απόσβεση κεφαλαίου και μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η μείωση του διοξειδίου του άνθρακα συμβάλει όχι μόνο στην αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και τις συνέπειες αυτού, αλλά και στους εθνικούς στόχους που έχουν τεθεί στις χώρες που υπέγραψαν το πρωτόκολλο του Κιότο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

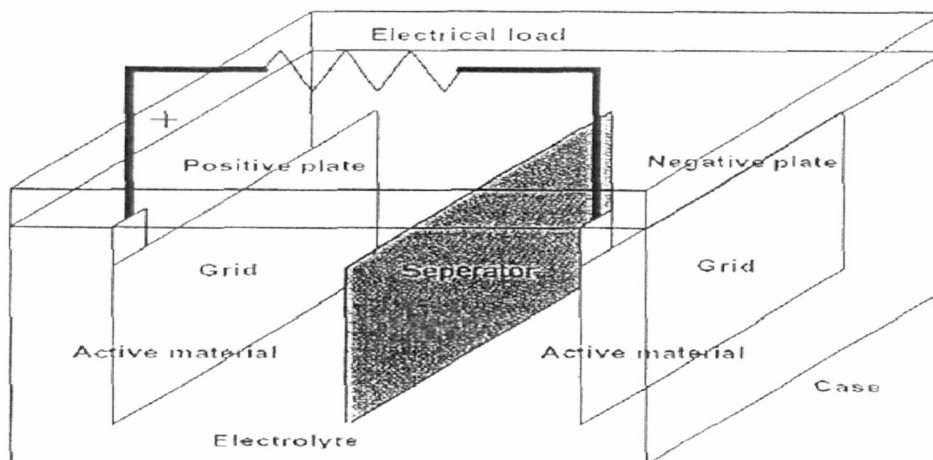
## 4.1 Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές

Η μπαταρία είναι μια συσκευή η οποία αποθηκεύει χημική ενέργεια και την αποδεσμεύει με τη μορφή ηλεκτρισμού. Εδώ εκτός από τα βασικά στοιχεία της τεχνολογίας των συσσωρευτών θα εξεταστούν και τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας τους, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

### 4.1.1 Αρχή Λειτουργίας και Τύποι Συσσωρευτών

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι ουσιαστικά μετατροπείς χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και συνήθως, έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν αυτή τη μετατροπή και προς την αντίθετη κατεύθυνση παρέχοντας με άμεσο τρόπο τη δυνατότητα συσσώρευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα να αποταμιεύουν ενέργεια ανά πάσα στιγμή ή όχι είναι αυτή που χωρίζει τους συσσωρευτές στις δύο κυριότερες κατηγορίες. Στην κατηγορία των πρωτευόντων (primary) συσσωρευτών ανήκουν αυτοί που έχουν αποθηκευμένη χημική ενέργεια την οποία και μπορούν να την αποδώσουν ως ηλεκτρική, δεν μπορούν όμως να επαναφορτιστούν. Οι τυπικές μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία και επειδή δεν μπορούν να επαναφορτιστούν δεν είναι λειτουργικές στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοια συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των δευτερευόντων (secondary) συσσωρευτών. Η δυνατότητα τους να επαναφορτίζονται είναι αυτή που τους κάνει κατάλληλους για φωτοβολταϊκά συστήματα και ο πιο συνηθισμένος τύπος τους είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξειδίου.

#### ➤ Σχεδιαστική δομή και αρχή λειτουργίας συσσωρευτών



**Σχήμα 4.1** Κυψελίδα συσσωρευτή

Δομική μονάδα του συσσωρευτή είναι η κυψελίδα (cell) και μία εποπτική παρουσίαση της μονάδας αυτής δίνεται στο σχήμα 4.1.



Η κυψελίδα είναι η βασική ηλεκτροχημική μονάδα της μπαταρίας, συνίσταται από μία θετική και μία αρνητική πλάκα που είναι βυθισμένες σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη και περικλείονται σε ένα δοχείο. Με τη βοήθεια του παραπάνω σχήματος θα γίνει μία περιγραφή των συστατικών μερών της κυψελίδας ώστε να γίνεται στη συνέχεια, πιο εύκολα και κατανοητά η αναφορά σε σχετικά θέματα.

**Ενεργό Υλικό (Active Material):** Το ενεργό υλικό είναι ένας συνδυασμός υλικών τα οποία από τη θετική και την αρνητική πλάκα, είναι οι βασικοί συντελεστές της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μέσα στην κυψελίδα. Η ποσότητα του ενεργού υλικού σε μία μπαταρία είναι ανάλογη της χωρητικότητάς της. Σε μία τυπική μπαταρία μολύβδου, το ενεργό υλικό είναι συνδυασμός διοξειδίου του μολύβδου ( $\text{PbO}_2$ ) στη θετική πλάκα με μεταλλικό πορώδη μόλυβδο ( $\text{Pb}$ ) στην αρνητική, που αντιδρούν σε διάλυμα θεικού οξέος ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) κατά τη λειτουργία της μπαταρίας.

**Ηλεκτρολύτης:** Ο ηλεκτρολύτης είναι το αγωγίμο μέσο που επιτρέπει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της ιοντικής ανταλλαγής ή της ανταλλαγής ηλεκτρονίων, επάνω στις πλάκες της κυψελίδας. Στις μπαταρίες μολύβδου είναι διάλυμα θεικού οξέος ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) σε υγρή μορφή ή σε μορφή gel, ενώ στις μπαταρίες νικελίου ( $\text{Ni}$ ) είναι διάλυμα υδροξειδίου του καλίου ( $\text{KOH}$ ). Όταν ο ηλεκτρολύτης είναι υγρό διάλυμα, συχνά, απαιτείται η αναπλήρωση νερού λόγω του φαινομένου της εξαέρωσης.

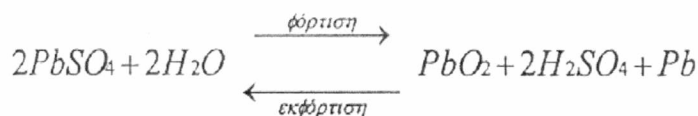
**Πλέγμα (Grid):** Σε μία μπαταρία μολύβδου, το πλέγμα συνήθως είναι ένα πλαίσιο από κράμα μολύβδου το οποίο υποστηρίζει το ενεργό υλικό επάνω στις πλάκες και είναι αγωγός ηλεκτρικού ρεύματος. Υλικά κράματος όπως το αντιμόνιο ( $\text{Sb}$ ) ή το ασβέστιο ( $\text{Ca}$ ) συχνά χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν τη μηχανική αντοχή των πλακών και έχουν χαρακτηριστική επίδραση στις επιδόσεις της μπαταρίας. Οι συσσωρευτές με μικρή πρόσμιξη αντιμόνιου ( $\text{Sb} < 3\%$ ) στα θετικά ηλεκτρόδια, έχουν ως αποτέλεσμα να μπορούν να λειτουργούν διατηρούμενοι σε άριστη κατάσταση συνεχώς για 3 χρόνια σε παράλληλη, standby λειτουργία όταν τις διαπερνάει ρεύμα 2,23 V/cell και βρίσκονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C.

**Πλάκες (Plates):** Οι πλάκες, που συνίστανται από το πλέγμα και από το ενεργό υλικό, είναι το βασικό στοιχείο της μπαταρίας και συνήθως αναφέρονται ως ηλεκτρόδια. Γενικά, υπάρχει ένα πλήθος αρνητικών και θετικών πλακών, συνδεδεμένων παράλληλα, μέσα σε μία κυψελίδα. Το πάχος τους και η σχέσεις των επιφανειών μεταξύ των αρνητικών και των θετικών πλακών, έχουν καθοριστική επίδραση στα χαρακτηριστικά της μπαταρίας.

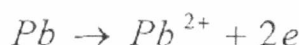
**Διαχωριστής (Separator):** Ο διαχωριστής είναι ένα πορώδες απομονωτικό μέσο μεταξύ των πλακών της μπαταρίας που εμποδίζει την αγωγή επαφή μεταξύ θετικού και αρνητικού ηλεκτροδίου. Σε πολλές περιπτώσεις ο διαχωριστής εφαρμόζεται σαν φάκελος και περικλείει ολόκληρο το ηλεκτρόδιο, εμποδίζοντας τη δημιουργία βραχυκυκλώματος, λόγω των διαχεόμενων υλικών στο κάτω μέρος των πλακών.

**Πόλοι ή Τερματικοί Πόλοι (Terminal Poles):** Οι πόλοι είναι οι εξωτερικές θετικές ή αρνητικές, ηλεκτρικές συνδέσεις της μπαταρίας. Ένα φορτίο ή ένα φωτοβολταϊκό σύστημα συνδέεται με τη μπαταρία μέσω των πόλων.

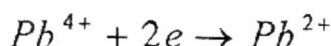
Ο τύπος των δευτερευόντων συσσωρευτών μπορεί να αναφέρεται ως Μολύβδου-Οξειδίου (lead-acid ή απλά Pb), Νικελίου-Καδμίου (Ni-Cd), Αργύρου-Ψευδαργύρου κτλ, ανάλογα με το υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων τους. Ειδικότερα, όσο αφορά τους συσσωρευτές μολύβδου, το κράμα του πλέγματος των ηλεκτροδίων τους, τους κατατάσσει σε υποκατηγορίες (Μολύβδου-Ασβεστίου Pb-Ca, Μολύβδου-Αντιμονίου Pb-Sb) και το κράμα αυτό μαζί με τον τρόπο κατασκευής του συσσωρευτή, καθορίζει τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του και τις χρήσεις για τις οποίες αυτός προορίζεται. Σε όποιον τύπο και αν ανήκουν οι συσσωρευτές, ο μηχανισμός της λειτουργίας τους στηρίζεται σε μία αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία η οποία, για τους συσσωρευτές μολύβδου περιγράφεται από την αντίδραση:



Οι κυψελίδες των συσσωρευτών Pb αποτελούνται από ζεύγη μονωμένων πλακών βυθισμένων στο ίδιο διάλυμα θεικού οξέος ( $H_2SO_4$ ). Οι πλάκες του αφόρτιστου συσσωρευτή καλύπτονται από θεικό μόλυβδο  $PbSO_4$  (ή ακριβέστερα  $Pb^{2+}SO_4^{2-}$ ). Κατά το στάδιο της φόρτισης, διασπάται ο θεικός μόλυβδος και σχηματίζεται οξείδιο του μολύβδου  $PbO_2$  (ή ακριβέστερα  $Pb^{4+}O_2^{2-}$ ) στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός Pb στις πλάκες των αρνητικών. Αντίστροφα, κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και κατά την τροφοδότηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων, ο Pb οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων προς ιόντα  $Pb^{2+}$  και δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα

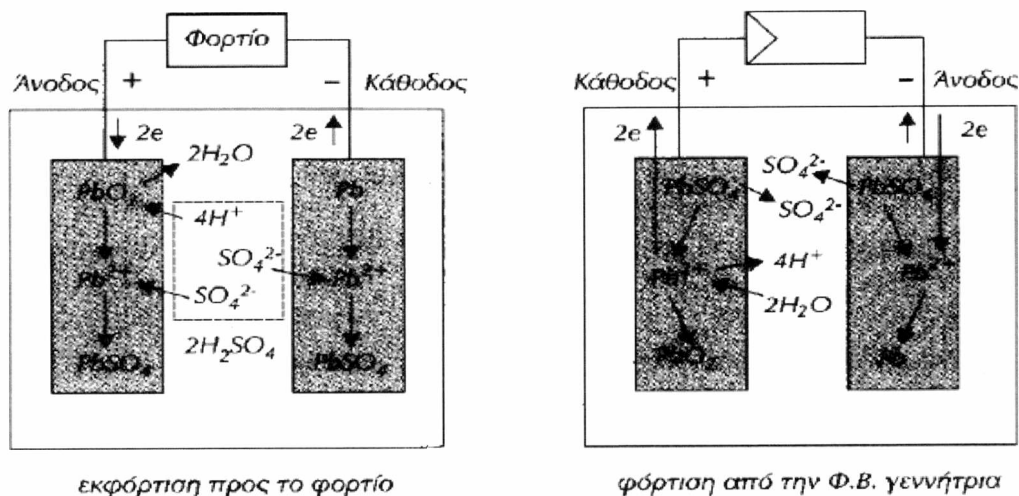


ενώ στις θετικές πλάκες ο  $Pb^{4+}$  ανάγεται προς  $Pb^{2+}$ , παίρνοντας ηλεκτρόνια από



το εξωτερικό κύκλωμα :

Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων, δηλαδή τα ιόντα  $Pb^{2+}$  ενώνονται με θεικά ιόντα ( $SO_4^{2-}$ ) από το διάλυμα και επανασχηματίζουν θεικό μόλυβδο πάνω στις πλάκες. Έτσι, καταναλώνεται θεικό οξύ και αραιώνεται το διάλυμα στις κυψελίδες. Με τη διαδικασία της φόρτισης, τα θεικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα και η περιεκτικότητά του αποκαθίσταται στην κανονική τιμή. Ένας συσσωρευτής αποτελείται από μία συνάθροιση κυψελίδων και η ονομαστική του τάση είναι το άθροισμα των ονομαστικών τάσεων των κυψελίδων του. Έτσι ένας συσσωρευτής με ονομαστική τιμή 60Volt αποτελείται από 30 κυψελίδες ονομαστικής τιμής 2Volt η καθεμία.



Σχήμα 4.2 Λειτουργία συσσωρευτή μολύβδου – οξέος

### ➤ Τύποι συσσωρευτών

Έχει ήδη αναφερθεί ότι τα υλικά του κράματος στο πλέγμα των πλακών κατηγοριοποιούν τους συσσωρευτές μολύβδου και νικελίου σε υποκατηγορίες. Αυτοί οι συνδυασμοί, μαζί με άλλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, καθορίζουν τις ιδιαιτερότητες των επιδόσεων τους και τις εφαρμογές για τις οποίες είναι περισσότερο κατάλληλοι. Γνωστοί και ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι συσσωρευτών μολύβδου είναι:

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

Για εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων, όπου οι ανάγκες κατανάλωσης πολύ σπάνια συμβαδίζουν με τις ώρες παραγωγής και την παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, περισσότερο κατάλληλοι είναι οι συσσωρευτές που έχουν τη δυνατότητα να υποστούν βαθιά εκφόρτιση χωρίς να αλλοιώνεται η χωρητικότητά τους και να μειώνεται η διάρκεια ζωής. Αναλόγως του φορτίου, άλλοτε είναι απαραίτητη η δυνατότητα παροχής εντόνου ρεύματος για μικρά χρονικά διαστήματα και άλλοτε η παροχή μίας κανονικής τιμής ρεύματος για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Συχνά οι απαιτήσεις του φορτίου σε κατανάλωση δεν είναι τόσο μεγάλες όσο η ανάγκη η κατανάλωση να παρέχεται με αξιοπιστία και για μεγάλες χρονικές περιόδους και άλλες φορές ο τόπος της εγκατάστασης είναι τόσο δυσπρόσιτος που προτιμώνται συσσωρευτές με μικρές ανάγκες συντήρησης και επίβλεψης.



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

Πολύ δημοφιλής επιλογή για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι οι συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη (Captive Electrolyte Lead-Acid Batteries), λόγω της στεγανότητας τους και της ευκολίας μετακίνησης που παρουσιάζουν. Έχουν βαλβίδα εξαέρωσης, που ανοίγει σε ορισμένη πίεση όταν υπερφορτιστούν, για να απελευθερωθούν τα αέρια που δημιουργήθηκαν όμως, δεν υπάρχει δυνατότητα αναπλήρωσης του ηλεκτρολύτη. Το γεγονός ότι δεν έχουν απαιτήσεις συντήρησης (ούτε και δυνατότητα), σε συνδυασμό με την ευκολία στη μετακίνηση, τις καθιστά ιδανικές για συστήματα σε απομακρυσμένα ή δυσπρόσιτα μέρη. Εκτός από το πρόβλημα της υπερφόρτισης, η απώλεια ηλεκτρολύτη μπορεί να επιταχυνθεί λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα της αναπλήρωσης του, ειδικά μέτρα πρέπει να ληφθούν. Είναι δυνατόν να γίνει θερμοκρασιακή αντιστάθμιση και ρύθμιση ακριβείας ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση και η υπερβολική εκφόρτιση και μέσω του περιορισμού του φορτίου να αποφευχθεί ο μεγάλος ρυθμός εκφόρτισης. Έτσι μειώνεται σημαντικά η απώλεια ηλεκτρολύτη και αυξάνεται αντιστοίχως η διάρκεια ζωής. Μέσω του αλγορίθμου φόρτισης αντιμετωπίζεται η ευαισθησία που παρουσιάζουν οι συσσωρευτές αυτοί στη διαδικασία φόρτισης. Οι συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη δεν αντιμετωπίζουν τόσο μεγάλο πρόβλημα μείωσης χωρητικότητας σε ψυχρότερο περιβάλλον όσο αυτοί του υγρού ηλεκτρολύτη, παρέχονται σε δύο τύπους (gelled electrolyte, AGM) και πάνω από τα μισά απομακρυσμένα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα τους χρησιμοποιούν.

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι εκτός από τα υλικά του κράματος στο πλέγμα των ηλεκτροδίων, άλλα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, όπως ο τρόπος κατασκευής τους ή οι σχετικές διαστάσεις, ο αριθμός και η γεωμετρία των πλακών τους, μπορούν να τους κατατάξουν σε ειδικότερες κατηγορίες. Για παράδειγμα, συσσωρευτές μολύβδου με θετικές πλάκες μεγαλύτερης επιφάνειας από αυτή των αρνητικών, αναφέρονται με το συνοδευτικό σύμβολο GroEH, ενώ για οπλισμένα θετικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται το συνοδευτικό OpzS. Έτσι, το συνοδευτικό 5OpzS, υποδεικνύει κυψελίδα με 5 θετικές πλάκες, τύπου OpzS.

#### 4.1.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη, όρια λειτουργίας και προστασία των συσσωρευτών.

Η δυνατότητα αποταμίευσης ενέργειας, οι περιορισμοί στο ρεύμα που μπορεί να παρασχεθεί προς κατανάλωση από έναν συσσωρευτή, η συμπεριφορά του σε σχέση με τη θερμοκρασία και τα όρια της λειτουργίας του γενικότερα, θα είναι το θέμα των επόμενων παραγράφων.

##### 4.1.2.1 Χωρητικότητα

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα συσσωρευτή ή που μπορεί να αποδοθεί από αυτόν, είναι η χωρητικότητα  $C$  του συσσωρευτή. Η χωρητικότητα συνήθως καθορίζεται για ένα συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης ή περίοδο εκφόρτισης. Εξαρτάται από αρκετούς σχεδιαστικούς παράγοντες, στους οποίους συμπεριλαμβάνονται :

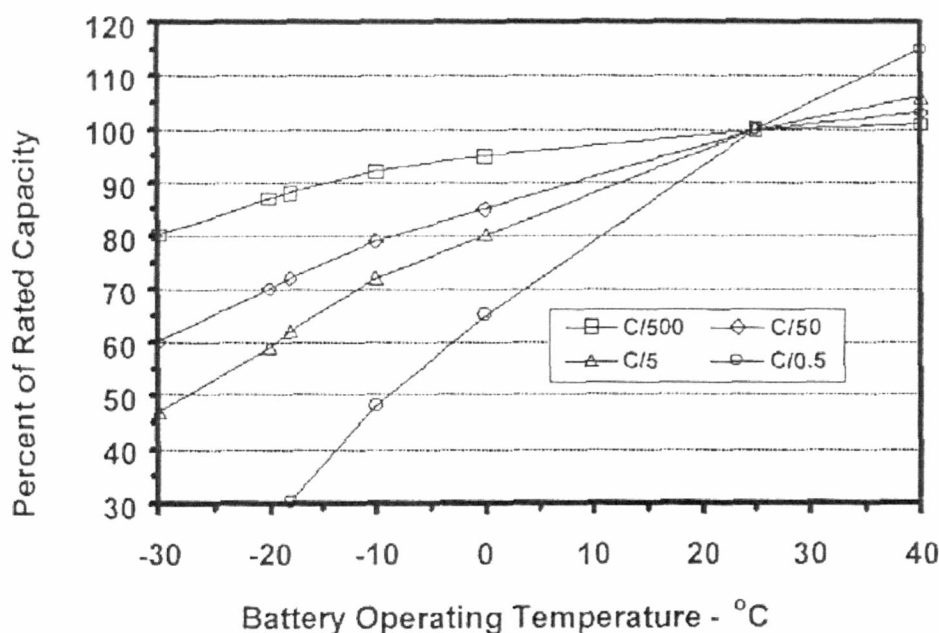
- η ειδική πυκνότητα του ηλεκτρολύτη,
- η ποσότητα του ενεργού υλικού,
- ο αριθμός, ο σχεδιασμός και οι φυσικές διαστάσεις των πλακών (ηλεκτροδίων).

Λειτουργικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρητικότητα είναι:

- ο ρυθμός εκφόρτισης,
- το βάθος της εκφόρτισης (ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας που αποδόθηκε από τη μπαταρία),
- η τάση της μπαταρίας στο τέλος της εκφόρτισης (τάση αποκοπής),
- η θερμοκρασία,
- η ηλικία της μπαταρίας και το ιστορικό της χρήσης της (κακή χρήση κτλ).

Η συνήθης μονάδα έκφρασης της χωρητικότητας του συσσωρευτή είναι το Amber-hour (Ah) και ο ρυθμός εκφόρτισης εκφράζεται ως το κλάσμα της χωρητικότητας  $C$  προς τη διάρκεια της περιόδου εκφόρτισης σε ώρες (π.χ. εκφόρτιση σε 120 ώρες ισοδυναμεί με ρυθμό εκφόρτισης  $C/120$ ). Φυσικά, η μονάδα του ρυθμού εκφόρτισης είναι το Amber. Έτσι, μία μπαταρία με χωρητικότητα  $C=375$  Ah ορισμένη σε ρυθμό εκφόρτισης  $C/120$ , δηλαδή 375A, μπορεί να αποδίδει 375A για χρονικό διάστημα 120 ωρών (η χωρητικότητα ορισμένη για ρεύμα εκφόρτισης 375A μπορεί να αναφέρεται και ως  $K_{375}$ ). Μερικές φορές η χωρητικότητα σε αποθηκευμένη ενέργεια του συσσωρευτή, εκφράζεται σε Kilowatt-hour (KWh) και υπολογίζεται προσεγγιστικά πολλαπλασιάζοντας τη χωρητικότητα σε Ah με την ονομαστική τάση του συσσωρευτή και διαιρώντας με 1000. Για παράδειγμα, συσσωρευτής 12V, 100Ah, έχει χωρητικότητα σε αποθηκευμένη ενέργεια  $12 \cdot 100 / 1000 = 1.2$  KWh.

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης χωρητικότητας, είναι ένας καθοριστικός παράγοντας στην επιλογή του αριθμού των κυψελίδων και του τύπου του συσσωρευτή. Δεδομένου του μέγιστου ρεύματος που μπορεί ένα φορτίο να καταναλώσει και του χρονικού διαστήματος που το φορτίο μπορεί να εξαρτάται αποκλειστικά από τον συσσωρευτή (δηλαδή την αυτονομία του), η χωρητικότητα που απαιτείται πρέπει να είναι ορισμένη για ρυθμό εκφόρτισης τουλάχιστον ίσο με το μέγιστο ρεύμα κατανάλωσης ή για χρόνο εκφόρτισης τουλάχιστον ίσο με τον χρόνο που το φορτίο θα καταναλώνει αποκλειστικά από τον συσσωρευτή. Σημαντικός παράγοντας επιλογής της χωρητικότητας είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή καθώς οι επιδράσεις της μπορεί να είναι σημαντικές. Ειδικότερα για συσσωρευτές μολύβδου, η θερμοκρασία λειτουργίας μεταβάλλει έντονα τη χωρητικότητα τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας, έχει αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας, ενώ για λειτουργία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες μειώνεται. Όταν η θερμοκρασία λειτουργίας πέσει σημαντικά, η ιδέα της προσέγγισης της αρχικής χωρητικότητας μέσω εσκεμμένης υπερφόρτισης πρέπει να εγκαταλειφθεί, αφού υπάρχει κίνδυνος εξαέρωσης. Η ποσοστιαία μεταβολή της χωρητικότητας ορισμένης για χρόνους εκφόρτισης 500, 50, 5 και 0.5 ώρες σε σχέση με την θερμοκρασία λειτουργίας για συσσωρευτές μολύβδου φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα (σχήμα 4.3).



**Σχήμα 4.3** - Επί τις εκατό ποσοστιαία μεταβολή της χωρητικότητας για συσσωρευτές μολύβδου.

Σε χαμηλές θερμοκρασίες, μέτρα πρέπει να λαμβάνονται για τη φόρτιση ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα εξαέρωσης του ηλεκτρολύτη και για την εκφόρτιση που πρέπει να είναι περιορισμένη.

Άλλο μέτρο της χωρητικότητας του συσσωρευτή είναι η κατάσταση φόρτισης (state of charge ή SOC), που ορίζεται σαν το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας και εκφράζεται ως το ποσοστό της ενέργειας ενός πλήρως φορτισμένου συσσωρευτή. Έτσι, ένας συσσωρευτής του οποίου τα  $\frac{3}{4}$  της ενέργειας του έχουν αφαιρεθεί, δηλαδή έχει εκφορτιστεί κατά 75%, λέγεται ότι βρίσκεται στο 25%



SOC. Μία μέθοδος μέσω της οποίας μπορεί να εκτιμηθεί το SOC του συσσωρευτή είναι η μέτρηση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη. Αυτή ορίζεται ως το κλάσμα της πυκνότητας του διαλύματος του ηλεκτρολύτη προς την πυκνότητα του καθαρού νερού. Σε έναν πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή μολύβδου, η περιεκτικότητα σε θειικό οξύ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) είναι 36% κατά βάρος ή 25% κατ' όγκο και το ειδικό βάρος του διαλύματος είναι περίπου 1.25 στους 27°C. Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται το ειδικό βάρος του διαλύματος του μειώνεται και επανέρχεται όταν επαναφορτίζεται.

#### 4.1.2.2 Εκφόρτιση και επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης.

Το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης (depth of discharge ή DOD) είναι το μέγιστο ποσοστό της χωρητικότητας το οποίο μπορεί να αποδοθεί από τη μπαταρία. Συνήθως καταδεικνύεται από την τάση αποκοπής ή τάση βάθους εκφορτίσης και από τον ρυθμό εκφορτίσης. Στα τυπικά φωτοβολταϊκά συστήματα, προβλέπεται μία τάση αποκοπής του φορτίου από τη συσκευή του ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών και έτσι καθορίζεται το επιτρεπόμενο βάθος εκφορτίσης για δεδομένο ρυθμό εκφορτίσης. Οι τιμές του επιτρεπόμενου DOD μπορούν να είναι από 80% έως και 15% της χωρητικότητας ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας μειώνεται η πυκνότητα του διαλύματος του ηλεκτρολύτη, δηλαδή μειώνεται το ειδικό του βάρος. Το φαινόμενο της μείωσης του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη για λειτουργία του συσσωρευτή σε θερμοκρασίες που πλησιάζουν τη θερμοκρασία στερεοποίησης του νερού (0°C). Σε έναν πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή μολύβδου, η συγκέντρωση ηλεκτρολύτη στο διάλυμα είναι περίπου 35% κατά βάρος και το σημείο στερεοποίησης του διαλύματος είναι πολύ χαμηλό (περίπου -60°C). Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται, το διάλυμα του ηλεκτρολύτη αραιώνεται και το σημείο στερεοποίησης του διαλύματος πλησιάζει το σημείο στερεοποίησης του νερού (0°C). Υπάρχει λοιπόν το ενδεχόμενο της στερεοποίησης του με αποτέλεσμα τη διαστολή και την πιθανή διάρρηξη των τοιχωμάτων του δοχείου της κυψελίδας. Για να αποφευχθεί αυτή η εξέλιξη, το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης πρέπει να μειώνεται θέτοντας την τάση αποκοπής του φορτίου στην συσκευή ρυθμιστή φόρτισης σε κατάλληλο σημείο. Το αποτέλεσμα θα είναι ο συσσωρευτής να μην εκφορτίζεται πλήρως και η θερμοκρασία στερεοποίησης να διατηρείται χαμηλά. Το κόστος θα είναι η μείωση της αυτονομίας του συστήματος μπαταρίας-συσσωρευτή.

Για να διατηρείται η αυτονομία, η χωρητικότητα του συσσωρευτή πρέπει να επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη, τόσο τη μείωση της σε χαμηλές θερμοκρασίες όσο και το DOD στις θερμοκρασίες αυτές. Η τάση του βάθους εκφόρτισης σχετίζεται με τον ρυθμό εκφόρτισης για τον οποίο είναι καθορισμένη η χωρητικότητα.

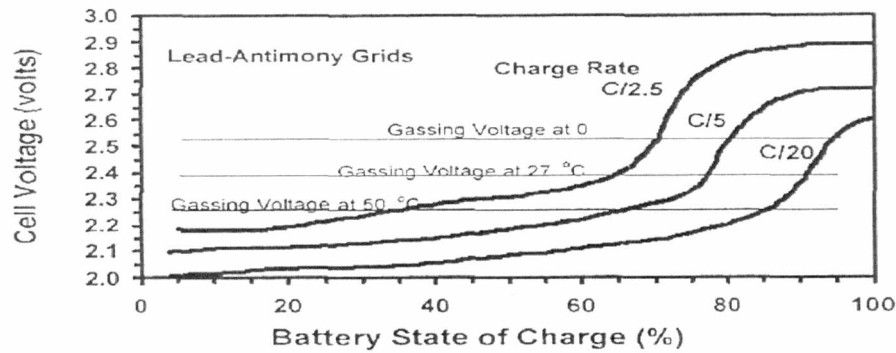
#### 4.1.2.3 Αυτοεκφόρτιση

Η αυτοεκφόρτιση είναι η διαδικασία κατά την οποία ο συσσωρευτής υφίσταται μείωση του SOC (state of charge), χωρίς να είναι συνδεδεμένος με κάποια κατανάλωση. Τα αίτια είναι οι εσωτερικοί χημικοί μηχανισμοί ή άλλες απώλειες της μπαταρίας και σημαντικοί παράγοντες στη διαδικασία της αυτοεκφόρτισης είναι τα ενεργά υλικά και τα στοιχεία του κράματος του πλέγματος που επιλέχθηκαν κατά τον σχεδιασμό του συσσωρευτή. Τυπικό μέγεθος αυτοεκφόρτισης είναι η απώλεια του 0.7% του SOC ανά ημέρα και για τον λόγο αυτό, οι συσσωρευτές πρέπει να βρίσκονται σε συνθήκες συντηρητικής φόρτισης ακόμα και αν δεν υπάρχει κατανάλωση.

#### 4.1.2.4 Φόρτιση

Η φόρτιση του συσσωρευτή είναι η διαδικασία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με παροχή ηλεκτρικού ρεύματος προς τον συσσωρευτή. Οι μέθοδοι φόρτισης που εφαρμόζονται από τους ρυθμιστές φόρτισης στα φωτοβολταϊκά συστήματα (και που αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο), διαφέρουν γενικά από αυτές που εφαρμόζουν οι κατασκευαστές για να καθορίσουν τις επιδόσεις της μπαταρίας.

Οι προδιαγραφές δεν περιορίζουν κατά κανόνα το ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή εφόσον δεν γίνει υπέρβαση της τάσης εκλύσεως αερίων. Ωστόσο, η τάση εκλύσεως αερίων γίνεται μικρότερη καθώς το ρεύμα φόρτισης γίνεται μεγαλύτερο. Γενικά η έκλυση αερίων είναι αναπόφευκτη αφού συμβαίνει τόσο κατά τη διάρκεια της φόρτισης όσο και μετά την υπέρβαση της τάσης εκλύσεως αερίων. Για σωστή φόρτιση του συσσωρευτή ένα σωστό σημείο ισορροπίας πρέπει να αναζητείται μεταξύ της μέγιστης δυνατής φόρτισης και της τάσης εκλύσεως αερίων, αφού και οι δύο είναι παράγοντες που σχετίζονται με τη διάρκεια ζωής του συσσωρευτή. Άλλος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για το επιδιωκόμενο SOC είναι η - θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η χωρητικότητα του συσσωρευτή, μειώνεται όμως η τάση εκλύσεως αερίων. Έτσι, το μέγιστο SOC που μπορεί να επιτευχθεί σε δεδομένη θερμοκρασία, κατά κάποιο τρόπο φράσσεται από την τάση εκλύσεως αερίων. Στο διάγραμμα του σχήματος που ακολουθεί, παρουσιάζεται η σχέση της τάσης ανά κυψελίδα και του SOC που μπορεί να επιτευχθεί με τρεις διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης (C/2.5, C/5, C/20) καθώς και οι τάσεις εκλύσεως αερίων σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας για συσσωρευτή μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sb).



**Σχήμα 4.4:** Διάγραμμα cell voltage - SOC και επίπεδα τάσης εκλύσεως αερίων για συσσωρευτή Pb-Sb

#### 4.1.1.5 Συντελεστής φόρτισης και απόδοση ισχύος

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

$$\text{Συντελεστής φόρτισης} = \frac{\text{εισερχόμενη ποσότητα Ah}}{\text{εξερχόμενη ποσότητα Ah}}$$

Αντίστοιχα, ο λόγος της ισχύος που δίνει ένας πλήρως φορτισμένος συντελεστής προς την ενέργεια που απαιτείται για να φορτιστεί πλήρως ονομάζεται απόδοση ισχύος. Δηλαδή ισχύει:

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

#### 4.1.2.6. Έκλυση ατμών, δημιουργία κρυστάλλων και διάβρωση στους συσσωρευτές μολύβδου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η υπερβολική φόρτιση και το αυξημένο ρεύμα φόρτισης των συσσωρευτών οδηγεί σε έκλυση αερίων. Το φαινόμενο αφορά στον σχηματισμό αερίου οξυγόνου ( $O_2$ ) στις θετικές πλάκες και αερίου υδρογόνου ( $H_2$ ) στις αρνητικές. Γενικά, αυτό το εκρηκτικό αέριο μίγμα ελευθερώνεται μέσω των βαλβίδων εξαερισμού και οδηγεί στην απώλεια νερού. Σε συσσωρευτές δεσμευμένου ηλεκτρολύτη, ένας εσωτερικός μηχανισμός επιτρέπει τον επανασχηματισμό νερού από το αέριο μίγμα για την αποκατάσταση του διαλύματος του ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, αν η πίεση των ατμών αυξηθεί ιδιαίτερα, αυτοί απελευθερώνονται στον αέρα μέσω των βαλβίδων ασφαλείας, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα αναπλήρωσης του χαμένου νερού. Για φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούν τέτοιους συσσωρευτές, είναι ανάγκη να γίνεται



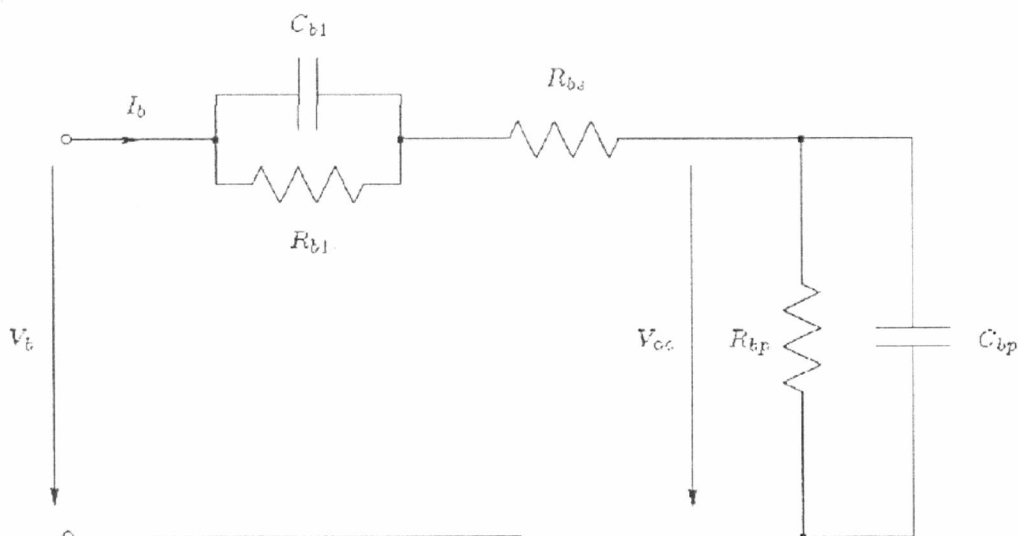
προσεκτική ρύθμιση στην επιλογή της τάσης πλήρους φόρτισης και στον ρυθμό φόρτισης των συσσωρευτών για να διατηρηθεί η διάρκεια ζωής τους.

Σε κάποιους συσσωρευτές συχνά επιδιώκεται η έκλυση ατμών. Πρόκειται για τους συσσωρευτές υγρού καταλύτη με ανοικτή βαλβίδα εξαερισμού και η αιτία έχει σχέση με τη δημιουργία βαρέως θειικού οξέως, το οποίο σχηματίζεται στις πλάκες και επικάθεται στο πάτο του δοχείου. Με την πάροδο του χρόνου ο ηλεκτρολύτης επικάθεται και δημιουργείται μεγαλύτερη συγκέντρωση στο κάτω μέρος των κυψελίδων, με αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη λειτουργία και τη σταδιακή διάβρωση του πλέγματος που οδηγεί στη συντόμευση της ζωής του συσσωρευτή. Η δημιουργία ατμών, σε τέτοιους συσσωρευτές, έχει αποτέλεσμα την ανάδευση του διαλύματος και αποτελεί μία μέθοδο συντήρησης. Κατά κανόνα, η έκλυση ατμών πρέπει να περιορίζεται ιδιαίτερα αν οι συσσωρευτές βρίσκονται κοντά σε χώρους εργασίας.

Αν ο συσσωρευτής βρεθεί για παρατεταμένο χρονικό διάστημα σε κατάσταση μερικής φόρτισης, κρύσταλλοι θειικού μολύβδου αναπτύσσονται επάνω στην επιφάνεια των θετικών πλακών. Οι κρύσταλλοι με την πάροδο του χρόνου αυξάνονται, μειώνοντας την ποσότητα του ενεργού υλικού που συμμετέχει στην αντίδραση και την ενεργή επιφάνεια των πλακών με αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας του συσσωρευτή. Αν οι κρύσταλλοι γίνουν πολύ μεγάλοι μπορούν να προκαλέσουν μη αναστρέψιμες μηχανικές βλάβες στο πλέγμα των πλακών. Αυτό είναι ένα συνηθισμένο πρόβλημα στα φωτοβολταϊκά συστήματα όπου οι συσσωρευτές, λόγω καιρικών συγκυριών, μπορούν να βρεθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κατάσταση μερικής φόρτισης και για τον λόγο αυτό απαιτείται εφαρμογή ρεύματος εξισορρόπησης για συντήρηση. Γενικότερα, το πλέγμα μπορεί να υποστεί διάβρωση για πολλούς λόγους όπως η οξείδωση και συχνά η αντοχή του είναι αυτή που υποδεικνύει την διάρκεια ζωής του συσσωρευτή.

#### **4.1.3 Προσαρμογή της λειτουργίας του συσσωρευτή σε ΦΒ σύστημα**

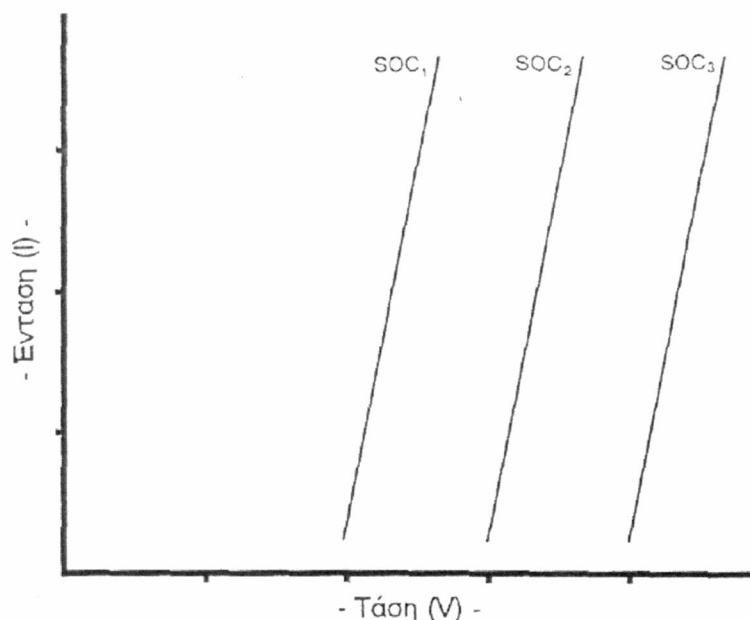
Από όσα έχουν ήδη αναφερθεί, οι συσσωρευτές είναι αναπόσπαστο μέρος των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για να βελτιστοποιηθεί η συνεργασία τους με τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες και για να γίνει ο σχεδιασμός των συσκευών που θα επιληφθούν αυτής της συνεργασίας, όπως ο ρυθμιστής φόρτισης συσσωρευτών, υπάρχει η ανάγκη ανάπτυξης ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού μοντέλου, που θα συμπεριληφθεί στο συνολικό μοντέλο του συστήματος. Το ισοδύναμο μοντέλο του σχήματος 4.5 που ακολουθεί είναι μία βελτίωση του κοινώς χρησιμοποιούμενου ισοδύναμου μοντέλου Thevenin.



**Σχήμα 4.5** Ισοδύναμο κύκλωμα συσσωρευτή μολύβδου

Η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή αντιπροσωπεύεται από τις αντιστάσεις  $R_{bs}$ ,  $R_{b1}$  και  $R_{bp}$ . Η  $R_{bs}$  είναι η αντίσταση που οφείλεται στις πλάκες και στη μάζα του ηλεκτρολύτη και η  $R_{b1}$  μαζί με τον πυκνωτή  $C_{b1}$  αντιπροσωπεύει την αντίσταση που οφείλεται στη διάχυση του ηλεκτρολύτη. Με τη χρήση αυτών των στοιχείων μοντελοποιείται το φαινόμενο της διαφοροποίησης της τάσης του συσσωρευτή όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα (φόρτισης ή εκφόρτισης) από την τάση ανοικτοκυκλώματος ( $V_{oc}$ ). Η  $R_{bp}$  είναι η αντίσταση απωλειών λόγω αυτοεκφόρτισης και ο πυκνωτής  $C_{bp}$  σχετίζεται με τη χωρητικότητα του συσσωρευτή σε ηλεκτροχημική ενέργεια.

Η εσωτερική αντίσταση που παρουσιάζει ο συσσωρευτής, ως απαραίτητη απομονωτική βαθμίδα μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, είναι ένα κρίσιμο στοιχείο που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Στις συνήθεις τάσεις και στις συνήθεις εντάσεις ρεύματος φόρτισης, η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας παρουσιάζει τη συμπεριφορά που αποδίδεται προσεγγιστικά από την ακόλουθη χαρακτηριστική  $I$ - $V$  (σχήμα 4.6).



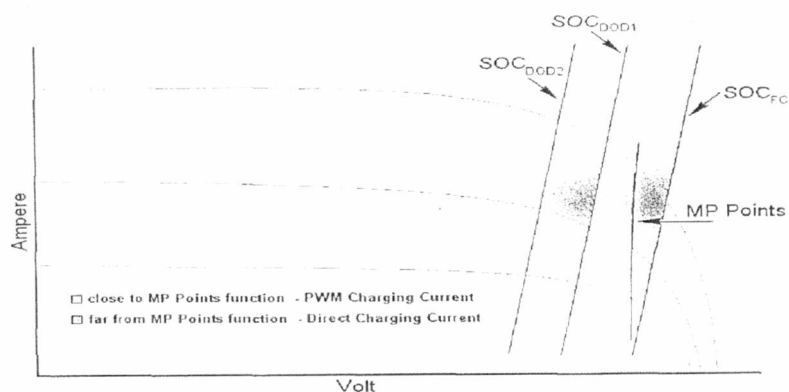
**Σχήμα 4.6** I-V χαρακτηριστική συσσωρευτή σε τρία διαφορετικά SOC.

Όπως προδίδεται και από τις τάσεις που αντιστοιχούν σε κάθε Καμπύλη, το SOC (state of charge) της πρώτης από αριστερά καμπύλης είναι μικρότερο από το SOC της δεύτερης και το SOC της δεύτερης από αυτό της τρίτης. Φαίνεται, από την μεγάλη κλίση των καμπυλών, ότι η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας είναι πολύ χαμηλής τιμής. Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου και η μετατόπιση των σημείων λειτουργίας ενός συστήματος φωτοβολταϊκού στοιχείου και ωμικού φορτίου, καθώς μεταβάλλεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, ο άμεσος αποδέκτης της ηλεκτρικής ενέργειας, είτε είναι μόνο η μπαταρία (συστήματα νυκτερινού φωτισμού, φάροι κτλ), είτε η μπαταρία σε συνδυασμό με κάποια άλλη παράλληλη κατανάλωση. Και στις δύο περιπτώσεις, σκοπός του σχεδιασμού είναι η μεγιστοποίηση της μεταφοράς ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια προς την κατανάλωση, αναλόγως της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Ειδικά στη δεύτερη περίπτωση, όταν το φορτίο είναι εξαιρετικά υψηλό (η αντίσταση που παρουσιάζει είναι μικρή σε σχέση με αυτή της μπαταρίας) απαιτείται ειδικός σχεδιασμός ώστε το σημείο ισορροπίας του συστήματος να βρίσκεται κοντά στα σημεία μέγιστης ισχύος (MPP) της I-V χαρακτηριστικής της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Στην πρώτη όμως περίπτωση, όπου η κατανάλωση λαμβάνει χώρα σε διαφορετικές χρονικές περιόδους από αυτές που λαμβάνει η παροχή ενέργειας από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια ή που η κατανάλωση είναι σχετικά μικρή, ο σχεδιασμός μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά και η μεταφορά ισχύος να είναι ικανοποιητική.



Ο σχεδιασμός των συστημάτων που επιλαμβάνονται την αναζήτηση του ακριβούς σημείου μέγιστης ισχύος ονομάζεται Maximum Power Point tracking (MPP tracking). Από το σχήμα 4.6 φαίνεται ότι καθώς το SOC της μπαταρίας αυξάνεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η καμπύλη μετατοπίζεται προς τα δεξιά ενώ όταν η μπαταρία βρεθεί σε μειωμένο SOC η καμπύλη έχει μετατοπιστεί προς τα αριστερά. Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε λόγος για τον έλεγχο και καθορισμό του SOC της μπαταρίας, για την αποδοτικότερη αξιοποίηση της χωρητικότητας και για λόγους προστασίας της μπαταρίας, μέσω χαρακτηριστικών τάσεων λειτουργίας της. Επίσης, όπως έχει αναφερθεί με συνδυασμό παράλληλης και σειριακής σύνδεσης φωτοβολταϊκών στοιχείων κατασκευάζονται φωτοβολταϊκά πλαίσια με I-V χαρακτηριστική λειτουργίας η οποία είναι ο αντίστοιχος γραμμικός συνδυασμός των επιμέρους χαρακτηριστικών καμπυλών. Αν οι χαρακτηριστικές I-V κατάλληλης μπαταρίας και φωτοβολταϊκής συστοιχία παρατεθούν στο ίδιο διάγραμμα (σχήμα 4.7), δίνεται μία οπτική παρουσίαση ενός ακόμα πολύ σημαντικού κριτηρίου για τον καθορισμό και τον έλεγχο του SOC της μπαταρίας.



**Σχήμα 4.7** Κοινό διάγραμμα των χαρακτηριστικών I-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου για διάφορες εντάσεις ακτινοβολίας και της μπαταρίας για τρία διαφορετικά SOC.

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται αντιληπτή η δυνατότητα να λειτουργεί το σύστημα μπαταρίας φωτοβολταϊκού πλαισίου κοντά στα σημεία μέγιστης ισχύος (MP) φροντίζοντας το SOC της μπαταρίας. Η γραμμή φορτίου βρίσκεται λίγο δεξιά από την καμπύλη των σημείων MP όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη ( $SOC_{FC}$  : SOC at full charge) και μετατοπίζεται προς τα αριστερά καθώς αυξάνεται το βάθος εκφόρτισης (DOD: depth of discharge). Η λειτουργία του συστήματος σε σημεία κοντά σε σημεία μέγιστης ισχύος, επιτυγχάνεται επιβάλλοντας έναν κατάλληλο αλγόριθμο φόρτισης ο οποίος συντηρεί την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μεταξύ αυτών που αντιστοιχούν σε καμπύλες μεταξύ του  $SOC_{FC}$  και ενός  $SOC_{DOD1}$ , με DOD1 το οποίο εκτός των άλλων πρακτικών περιορισμών που σχετίζονται με τη μπαταρία, τώρα επιλέγεται και με βάση το επίπεδο προσαρμογής που επιθυμεί να επιτύχει ο σχεδιαστής του συστήματος. Όταν το φορτίο δεν υπάρχει ή είναι σχετικά μικρό σε σχέση με τη μπαταρία (και συνήθως αυτό ισχύει αφού υφίσταται περιορισμούς λόγω του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος εκφόρτισης του συσσωρευτή), ο σχεδιαστής μπορεί να βασίζεται μόνο στη χαρακτηριστική I-V της μπαταρίας για να προσαρμόσει τη συνολική κατανάλωση (μπαταρία ή/και φορτίο) με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ώστε να επιτύχει ικανοποιητικά επίπεδα μεταφοράς ισχύος.

#### 4.1.4 Τεχνικές φόρτισης μπαταρίας

Ένας φορτιστής έχει τρεις βασικές λειτουργίες :

1. Να διοχετεύει την ενέργεια από το μέσο στην μπαταρία (φόρτιση).
2. Να βελτιστοποιεί το ποσοστό φόρτισης (σταθεροποίηση).
3. Να ξέρει πότε για να σταματήσει (τερματισμός).

##### ➤ Τερματισμός φόρτισης:

Μόλις φορτιστεί πλήρως μια μπαταρία, το ρεύμα φόρτισης πρέπει να αποκοπεί. Αν δεν γίνει αυτό το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή θερμότητας και αερίων τα οποία καταστρέφουν τις μπαταρίες. Ένας καλός φορτιστής πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύσει πότε η ανασύνθεση των ενεργών χημικών ουσιών είναι πλήρης και για να σταματήσει τη διαδικασία φόρτισης προτού να γίνει οποιαδήποτε ζημία ενώ διατηρεί τη θερμοκρασία κυττάρων μέσα σε ασφαλή όρια. Ανιχνεύοντας αυτό το σημείο και τερματίζοντας τη φόρτιση επιτυγχάνουμε αύξηση της ζωής της μπαταρίας. Στους περισσότερους φορτιστές το σημείο αυτό είναι ένα προκαθορισμένο ανώτατο όριο τάσης.

##### ➤ Ασφαλής φόρτιση:

Εάν για οποιοδήποτε λόγο υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτισης της μπαταρίας, όπως λάθος στον καθορισμό του ανώτατου όριο τάσης , αυτό θα συνοδευθεί από μια άνοδο στη θερμοκρασία. Ελαττώματα μέσα στην μπαταρία ή υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορούν επίσης να οδηγήσουν μια μπαταρία πέρα από τα ασφαλή όρια θερμοκρασίας της. Οι υψηλές θερμοκρασίες καταστρέφουν τις μπαταρίες και ο έλεγχος της θερμοκρασίας κυττάρων είναι ένας καλός τρόπος ελέγχου της κατάστασης αυτών. Ο έλεγχος φόρτισης βάσει της θερμοκρασίας της μπαταρίας, είναι ένας αλλός τρόπος ρύθμισης φόρτισης . Τέτοια προφύλαξη ασφάλειας είναι ιδιαίτερα σημαντική για μπαταρίες υψηλής ισχύος όπου οι συνέπειες αποτυχίας είναι σοβαρές και ακριβές.

##### ➤ Χρόνος φόρτισης:

Φορτίζοντας γρήγορα μια μπαταρία, στέλνουμε ενέργεια στην μπαταρία με γρηγορότερο ρυθμό από το χρόνο που χρειάζεται για να γίνει η χημική διαδικασία σ' αυτή, με καταστροφικά αποτελέσματα. Γι' αυτό το λόγο είναι σημαντικός ο χρόνος φόρτισης της μπαταρίας. Ο χρόνος φόρτισης είναι ανάλογος της χωρητικότητας της μπαταρίας , του ρυθμού φόρτισης και των απωλειών φόρτισης. Σε ιδανικές συνθήκες χωρίς απώλειες φόρτισης , ο χρόνος πλήρους φορτισης μιας άδειας μπαταρίας είναι το πηλίκο της χωρητικότητας της (σε Αμπέρ) , προς το ρυθμό φόρτισης (ρεύμα φόρτισης σε Αμπέρ). Ο ιδανικός ρυθμός φόρτισης είναι το 10% της χωρητικότητας της μπαταρίας και ο μέγιστος το 20%. Έτσι αν π.χ. έχουμε μια μπαταρία χωρητικότητας 10Ah και τη φορτίζουμε με ρύθμο 10% δηλ 1A , χωρίς απώλειες , θα χρειαστούν 10 ώρες για πλήρη φόρτιση της αν αυτή είναι άδεια.

#### 4.1.5 Μέθοδοι φόρτισης:

**1. Σταθερής τάσης:** είναι βασικά μια παροχή συνεχούς ρεύματος που δημιουργείται από ένα μετασχηματιστή υποβιβασμού και ένα ανορθωτή. Τέτοιους βρίσκουμε συχνά σε φορτιστές μπαταριών αυτοκινήτων (lead-acid), και φορτιστές μπαταριών lithium-ion όπου προστίθενται στοιχεία προστασίας για τις μπαταρίες και την ασφάλεια του χρήστη.

**2. Σταθερού ρεύματος:** οι φορτιστές αυτοί μεταβάλλουν την παρεχόμενη τάση για να διατηρήσουν σταθερό το ρεύμα που δίνουν, σβήνοντας όταν η τάση φτάσει στο επίπεδο μιας πλήρους φόρτισης. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται συνήθως σε μπαταρίες νικελίου-καδμίου και νικελίου-μετάλλου.

**3. Ελαττώμενου ρεύματος:** η φόρτιση γίνεται από μια ανεξέλεγκτη σταθερή πηγή τάσης. Το ρεύμα μικραίνει καθώς η τάση κυττάρων αυξάνεται, ενώ υπάρχει σοβαρός κίνδυνος υπερφόρτωσης. Αυτό αντιμετωπίζεται με περιορισμό του ρυθμού και του χρόνου φόρτισης. Τέτοιος φορτιστής είναι κατάλληλος μόνο για μπαταρίες τύπου SLA.

**4. Παλμική φόρτιση:** το ρεύμα παραδίδεται στη μπαταρία σε παλμούς. Ο ρυθμός φόρτισης (βασισμένο στο μέσο ρεύμα) μπορεί να ελεγχθεί καθορίζοντας το εύρος των παλμών. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, οι μικρές περιόδους ανάπαυσης σταθεροποιούν τις χημικές ενέργειες στην μπαταρία αφού εξισώνεται η αντίδραση σε όλο τον όγκο του ηλεκτροδίου πριν ξαναρχίσει η φόρτιση. Αυτό επιτρέπει στη χημική αντίδραση να συμβαδίσει με το ποσοστό απορρόφησης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης αυτή η μέθοδος μπορεί να μειώσει τις ανεπιθύμητες χημικές αντιδράσεις στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων όπως δημιουργία αερίων και κρυστάλλου.

**5. Φόρτιση Buhr ή αρνητική παλμική φόρτιση :** χρησιμοποιείται από κοινού με τη παλμική φόρτιση και εφαρμόζει έναν πολύ σύντομο παλμό εκφόρτισης 2 έως 3 φορές το ρεύμα φόρτισης για 5 χιλιοστά του δευτερολέπτου, κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπαυσης για να αποπολώσει το κύτταρο. Αυτοί οι παλμοί αποσπούν οποιεσδήποτε φυσαλίδες αερίου που έχουν δημιουργηθεί στα ηλεκτρόδια κατά τη φόρτιση.

**6. Φόρτιση IUI :** αρχικά η μπαταρία φορτίζεται με σταθερό ρυθμό έως ότου η τάση κυττάρων φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή – συνήθως κοντά σε αυτή στην οποία δημιουργούνται αέρια. Τότε ο φορτιστής σταθεροποιεί τη τάση του και το ρεύμα που απορροφά η μπαταρία μειώνεται. Χρησιμοποιείται για γρήγορη φόρτιση ειδικών τύπων μπαταριών μολύβδου.

Σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες οι λειτουργίες Trickle charge είναι ο ρυθμός απαιτούμενης φόρτισης που αντισταθμίζει το ρυθμό εκφόρτισης της μπαταρίας και Float charge η κατάσταση στην οποία το φορτίο και η μπαταρία είναι συνδεδεμένα παράλληλα με τον φορτιστή και διατηρούν τη τάση στα άκρα της μπαταρίας μικρότερη από το ανώτατο όριο της μπαταρίας.

### ➤ Ρυθμός φόρτισης:

Η φόρτιση των μπαταριών μπορεί να γίνει με ποικίλους ρυθμούς ανάλογα με την απαίτηση. Χαρακτηριστικά παρουσιάζονται κατωτέρω οι εξής ρυθμοί:

1. Αργή : 14-16 ώρες με ρυθμό 0.1c (10%)
2. Γρήγορη : 3 έως 6 ώρες με ρυθμό 0.3c (30%)
3. Ταχεία : λιγότερο από 1 ώρα με ρυθμό 1.0c (100%)

Όπου ρεύμα φόρτισης = ρυθμός % X Ah(μπαταρίας)

#### 4.1.6 Τύποι φορτιστών

Οι φορτιστές συνήθως εκδηλώνουν μια μορφή διαχείρισης της τάσης για να ελεγχθεί η τάση φόρτισης που εφαρμόζεται στην μπαταρία. Η ποιότητα και απόδοση ενός φορτιστή είναι πάντοτε ανάλογη της τιμής του. Μερικά παραδείγματα ακολουθούν:

**1. Διακοπτικός ρυθμιστής (switcher) :** χρησιμοποιεί διαμόρφωση πλάτους παλμού για να ελέγξει την τάση. Έχει χαμηλή απαίτηση ισχύος και είναι αποδοτικότερος από τους γραμμικούς ρυθμιστές αλλά είναι πίο σύνθετος. Χρειάζεται ένα μεγάλο παθητικό φίλτρο για να εξομαλύνει τους παλμούς.

**2. Ρυθμιστής σειράς (γραμμικός) :** λιγότερο σύνθετος αλλά με περισσότερες απώλειες και παραγωγή θερμότητας. Όλο το ρεύμα περνά μέσω κάποιου ρυθμιστικού στοιχείου που πρέπει να είναι υψηλής ισχύος (μόσφει, τρανζίστορ). Επειδή δεν υπάρχει καμία μετατροπή, παραδίδει συνεχές ρεύμα και δεν χρειάζεται φίλτρο εξόδου. Οι ρυθμιστές σειράς έχουν συνήθως καλύτερα χαρακτηριστικά ελέγχου και φόρτισης.

**3. Ρυθμιστής εκτροπής :** περισσότερο χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα δεδομένου ότι είναι σχετικά φτηνοί για να κατασκευαστούν και απλοί για να σχεδιαστούν. Το ρεύμα φόρτισης ελέγχεται από έναν διακόπτη ή τρανζίστορ που συνδέεται παράλληλα με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και την μπαταρία. Η υπερφόρτωση της μπαταρίας αποτρέπεται με την εκτροπή του Φ/β μέσω του τρανζίστορ όταν φθάσει η τάση σε ένα προκαθορισμένο όριο.

**4. Ρυθμιστής Buck :** λειτουργεί με ένα DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού. Είναι υψηλής απόδοσης και έχει χαμηλές απώλειες θερμότητας. Δεν χρησιμοποιεί μετασχηματιστή, καταπονεί λίγο τα διακοπτικά του στοιχεία και έχει ένα μικρό φίλτρο εξόδου.

**5. Φορτιστής παλμών :** χρησιμοποιεί τρανζίστορ σειράς που μπορεί ανοιγοκλείσει. Όταν η τάση μπαταρίας είναι χαμηλή το τρανζίστορ μένει κλειστό και περνάει το ρεύμα της πηγής στη μπαταρία. Καθώς η τάση της μπαταρίας πλησιάζει την επιθυμητή τάση το τρανζίστορ ανοιγοκλείνει για να διατηρήσει την επιθυμητή τάση. Επειδή ενεργεί διακοπτικά παράγει λιγότερη θερμότητα και επειδή ενεργεί και γραμμικά το φίλτρο εξόδου μπορεί να είναι μικρότερο.



**6. Επαγωγική φόρτιση** : αναφέρεται στο σχέδιο του φορτιστή. Ουσιαστικά η πλευρά εισόδου του φορτιστή, το μέρος που συνδέεται με τη πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, κατασκευάζεται από έναν μετασχηματιστή που είναι χωρισμένος σε δύο μέρη. Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή στεγάζεται σε μια μονάδα που συνδέεται με τη πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή στεγάζεται στην συσκευή που περιέχει την μπαταρία, μαζί με τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά στοιχεία. Αυτό επιτρέπει στην μπαταρία να φορτιστεί χωρίς κάποια σύνδεση με τη πηγή και χωρίς έκθεση οποιωνδήποτε επαφών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ηλεκτροπληξία στο χρήστη.

## 4.2 Ηλεκτρονικά Στοιχεία Φωτοβολταϊκών

Ο μετατροπέας DC-DC αποτελεί τμήμα της φ/β εγκατάστασης. Χαρακτηριστικά του μετατροπέα αυτού είναι το μεγάλο εύρος τάσης από τη μεριά σύνδεσης με τη φ/β γεννήτρια και το μικρό από τη μεριά σύνδεσης με το σύστημα συσσώρευσης της ενέργειας ή το δίκτυο κατανάλωσης. Με τον τρόπο αυτό εξιτγχάνεται και η πρώτη ομαλοποίηση της τάσης συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τη γεννήτρια. Οι διακυμάνσεις της παραγόμενης τάσης, οφείλονται κυρίως στην ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη). Οι διακυμάνσεις, ακόμα, της αποδιδόμενης από την φ/β γεννήτρια ισχύος, χωρίς τα κατάλληλα μέτρα, οδηγούν σε λειτουργία της πέραν του σημείου μέγιστης απόδοσης ισχύος (maximum powerpoint). Οι απώλειες που σχετίζονται με τη δυσλειτουργία αυτή μπορούν να αντιμετωπισθούν με τη χρήση συστήματος που εντοπίζει το σημείο λειτουργίας με τη μέγιστη απόδοση ισχύος. Το σύστημα αυτό είναι γνωστό ως Maximum Power Point Tracker (MPPT).

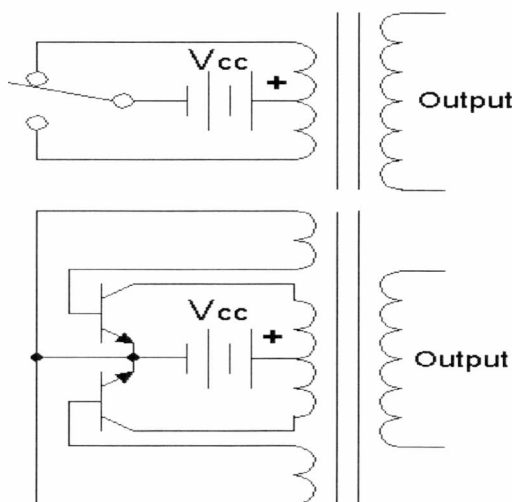
### 4.2.1 Αντιστροφέας

Ένας αντιστροφέας μετατρέπει τη συνεχή τάση από τις μπαταρίες ή τα ηλιακά πλαίσια, στην τυποποιημένη τάση οικιακού εναλλασσόμενου ρεύματος έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα κοινά εργαλεία και τις συσκευές, αντίθετα με τους μετατροπείς που είναι ουσιαστικά φορτιστές μπαταριών ή και παροχές συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος. Το συνεχές ρεύμα δεν είναι χρησιμοποιήσιμο για διάφορες συσκευές, φώτα, αντλίες κλπ, έτσι τα περισσότερα συστήματα περιλαμβάνουν έναν αναστροφέα κάποιου τύπου. Υπάρχουν διαθέσιμες συνεχείς συσκευές, αλλά είτε είναι ακριβές ή υποδιαίστερες έναντι αυτών εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι πιο κοινές εισόδοι τάσης για τους αναστροφείς είναι 12, 24 και 48 βολτ.

Υπάρχουν επίσης τύποι αντιστροφέων, οι οποίοι δεν χρησιμοποιούν συνήθως μπαταρίες αλλά τα Φ/β πλαίσια ή οι ανεμογεννήτριες τροφοδοτούν άμεσα τον αναστροφέα και η έξοδος του αναστροφέα είναι συνδεδεμένη στις γραμμές μεταφοράς. Η παραγόμενη ενέργεια είτε πωλείται πίσω στην εταιρεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή χρησιμοποιείται απευθείας. Αυτοί οι αντιστροφείς απαιτούν συνήθως μια αρκετά υψηλή τάση εισόδου - 48 βολτ ή περισσότερα. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν με μπαταρίες, αλλά θα υπάρξουν απώλειες στη αποδοτικότητα τροφοδότησης των γραμμών μεταφοράς. Η απώλεια μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με τον αναστροφέα, το μέγεθος και τον τύπο μπαταριών.

#### 4.2.1.1. Λειτουργία και τύποι αντιστροφέα

Ένας αντιστροφέας παίρνει τη συνεχή τάση και τροφοδοτεί ένα ζευγάρι (ή περισσότερα) τρανζίστορ ισχύος. Με γρήγορο ανοιγοκλείσιμο των τρανζίστορ και σύνδεση της εξόδου αυτών σε μετασχηματιστή ανύψωσης δημιουργείται εναλλασσόμενο ρεύμα στο ένα τυλίγμα του το οποίο επάγει εναλλασσόμενη τάση στο άλλο τυλίγμα. Αναλόγως της ποιότητας και πολυπλοκότητας του αντιστροφέα, μπορεί να δώσει στην έξοδο ένα τετραγωνικό κύμα, ένα κύμα σχεδόν-ημιτόνο (τροποποιημένο ημίτονο), ή ένα αληθινό ημιτόνοειδές κύμα.



Σχήμα 4.8: Τυπική διάταξη αντιστροφέα.

1. Οι **τετραγωνικοί αντιστροφείς κυμάτων** είναι κατάλληλοι για κάποιου τύπου ηλεκτρικών εργαλείων μηχανών και πυρακτωμένων φώτων.
2. Οι **αντιστροφείς κυμάτων σχεδόν-ημιτόνου** έχουν περισσότερα κυκλωματικά στοιχεία πέρα από την απλή μετατροπή, και βγάζουν ένα κύμα που μοιάζει με αλλοιωμένο τετραγωνικό κύμα που είναι κατάλληλο για τις περισσότερες τυποποιημένες συσκευές, αλλά μπορεί να μην είναι κατάλληλο για μερικές ηλεκτρονικές συσκευές. Συσκευές που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά για να ελέγξουν τη θερμοκρασία ή χρονόμετρα μπορούν να έχουν προβλήματα με τα τροποποιημένα κύματα ημιτόνου. Οι περισσότεροι υπολογιστές, τηλεοράσεις και παρόμοιες συσκευές δεν θα έχουν κανένα πρόβλημα. Μια συσκευή με μοτέρ θα χρησιμοποιήσει περίπου 20% περισσότερη ενέργεια με ένα τροποποιημένο κύμα ημιτόνου απ'ό,τι με ένα αληθινό κύμα ημιτόνου.
3. Οι **αντιστροφείς ημιτονοειδών κυμάτων** δίνουν κύμα που είναι το ίδιο με αυτό που πέρνουμε από την εταιρεία παραγωγής και ακόμα, συχνά είναι καλύτερο και καθαρότερο. Οι αντιστροφείς κυμάτων ημιτόνου μπορούν να τροφοδοτήσουν όλες τις εναλλασσόμενες συσκευές, όμως είναι ακριβότεροι από τους άλλους τύπους.

Οι αντιστροφείς έρχονται σε δύο βασικούς τύπους - με ή χωρίς ενσώματομένους φορτιστές μπαταριών. Αυτοί με ενσώματομένους φορτιστές είναι πρακτικοί εάν επιδιώκουμε φόρτιση των μπαταριών με εναλλασσόμενο ρεύμα. Είναι επίσης ουσιαστικοί εάν χρησιμοποιούμε τον αντιστροφέα για την οργάνωση ενός συστήματος UPS για εφεδρική ενέργεια. Αλλά συνήθως σε Φ/β συστήματα δε είναι απαραίτητοι και οι περισσότεροι μικροί αναστροφείς κάτω των 1000 Watt δεν διαθέτουν φορτιστή.

Σχεδόν όλοι οι αντιστροφείς-φορτιστές έχουν και ρυθμιστή φορτίσης έτσι μπορούν να μένουν ανελλιπώς συνδεδεμένοι με το σύστημα. Επίσης διαθέτουν ηλεκτρονόμο (ρελέ) για χρήση ενέργειας σε φόρτιση των μπαταριών. Εάν υπάρξει απώλεια εναλλασσόμενου ρεύματος, ο αντιστροφέας μεταπηδά αυτόματα στις μπαταρίες. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν γίνεται καν αντιληπτή αυτή η εναλλαγή.

#### **4.2.1.2 Απόδοση του αντιστροφέα.**

Η αποδοση του αντιστροφέα έχει να κάνει με πόσο καλά μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Αυτή κυμαίνεται συνήθως από 85% ως 95%, με 90% μέσο όρο. Εντούτοις οι εκτιμήσεις αποδοσης δίνονται συνήθως για ένα ανθεκτικό φορτίο (π.χ μια ηλεκτρική θερμάστρα). Κατά την λειτουργία τέτοιων συσκευών, η απόδοση εξαρτάται από δύο παράγοντες - την απόδοση του αντιστροφέα, και την απόδοση της κυματομορφής.

Η απόδοση κυματομορφής σημαίνει ότι οι περισσότερες μηχανές και πολλές ηλεκτρονικές συσκευές τρέχουν καλύτερα και χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια με ένα ημιτονοειδές κύμα. Χαρακτηριστικά, μια ηλεκτρική μηχανή (όπως μια αντλία ή ένα ψυγείο) θα χρησιμοποιήσει από 15% μέχρι 20% περισσότερη ενέργεια με ένα τροποποιημένο ημιτονοειδές κύμα απ'ό,τι με ένα αληθινό ημιτονοειδές κύμα. Αναφορικά με την απόδοση του αντιστροφέα ένας αντιστροφέας με απόδοση 90% και τροποποιημένου ημιτονοειδούς κύματος δεν είναι 90% κατά τη λειτουργία ενός συμπίεστη, επειδή οι ηλεκτρικές μηχανές είναι λιγότερο αποδοτικές. Χρησιμοποιούν περίπου 20% περισσότερη δύναμη σε ένα ημιτονοειδές κύμα. Οι αντιστροφείς είναι επίσης λιγότερο αποδοτικοί όταν χρησιμοποιούνται σε χαμηλά όριο της μέγιστης δύναμής τους. Παραδείγματος χάριν, η χρησιμοποίηση ενός αντιστροφέα 1000 Watt για να τροφοδοτήσει 20 Watt φορτίο θα χρειαστεί να απορροφήσει 30 με 40 Watt από την μπαταρία, δεδομένου ότι ο ίδιος ο αντιστροφέας καταναλώνει ενέργεια απλώς για να τεθεί σε λειτουργία.

#### **4.2.2 Σχεδίαση ρυθμιστή φόρτισης**

Ένα ηλιακό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται

1. Φ/Β πλαίσια για την παραγωγή,
2. μπαταρίες για την αποθήκευση,
3. έναν ρυθμιστή για να κρατήσει τις μπαταρίες σε καλή λειτουργούσα κατάσταση, και
4. έναν μετατροπέα για παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ο ηλιακός ρυθμιστής φόρτισης πρέπει να προστατεύει την μπαταρία από την υπερφόρτωση σε περίοδο ισχυρού ήλιου και λίγης κατανάλωσης. Για τη ρύθμιση της παραγώγιμης ισχύος ενός Φ/Β, υπάρχουν διάφοροι πιθανοί τρόποι. Ένας **γραμμικός ρυθμιστής σειράς** μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αλλά έχει το μειονέκτημα του ότι προκαλεί κάποια πτώση τάσης και έχει κάποια εσωτερική κατανάλωση ισχύος κατά περιόδους όταν ο ήλιος είναι αδύνατος και το φορτίο είναι βαρύ. Είναι πολύ καλύτερο να χρησιμοποιηθεί ένας **ρυθμιστής εκτροπής**, που είναι ανενεργός σε τέτοιους χρόνους, και παρεμβίνει μόνο όταν υπάρχει υπερβολική ενέργεια.

Τέτοιοι ρυθμιστές εκτροπής είναι οι ON-OFF ρυθμιστές, όπου έχουν μια απλή συσκευή διακοπών (mosfet,relay) που απομονώνουν το Φ/Β από το σύστημα όταν φορτίσει πλήρως η μπαταρία, και έπειτα το επαναφέρουν όταν μειωθεί η τάση της μπαταρίας (κάτω από 14V). Το μόνο πλεονέκτημα αυτού του ρυθμιστή είναι ότι είναι πολύ απλός και φθηνός. Τα μειονεκτήματα όμως αυτού του συστήματος είναι σημαντικά:

- Η παραγόμενη τάση από το Φ/Β κυμαίνεται όλη την ώρα μεταξύ περίπου 13 και 14.5V,
- η μπαταρία βρίσκεται μεταξύ υπερφόρτισης και ανάγκης να δώσει όλο το ρεύμα στο φορτίο, το οποίο μειώνει σοβαρά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας,
- και σε περίπτωση αποσύνδεσης ή αποτυχίας της μπαταρίας δίνει παλμοειδές είσοδο στο υπόλοιπο σύστημα με κίνδυνο καταστροφής του.

Ένας ρυθμιστής εκτροπής δεν έχει τα παραπάνω μειονεκτήματα εφόσον αντί να βγάζει το Φ/Β εκτός και να το επαναφέρει, καίει την ενέργεια από το πλαίσιο κατά τη πλήρη φόρτιση και τη μη ανάγκη για τροφοδότηση φορτίου, και κρατά σταθερή τη τάση εξόδου. Όταν η παραγόμενη ισχύς από το Φ/Β είναι ίση ή μεγαλύτερη από το φορτίο, και η μπαταρία πλήρως φορτισμένη, το φορτίο τροφοδοτείται από το Φ/Β και η μπαταρία δεν επηρεάζεται. Επίσης όταν η μπαταρία είναι πλήρως εκφορτισμένη υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της έτσι ο ρυθμιστής παρέχει προστασία σε τέτοιες περιπτώσεις (τάση μικρότερη 10.5V) αποσυνδέοντας το φορτίο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

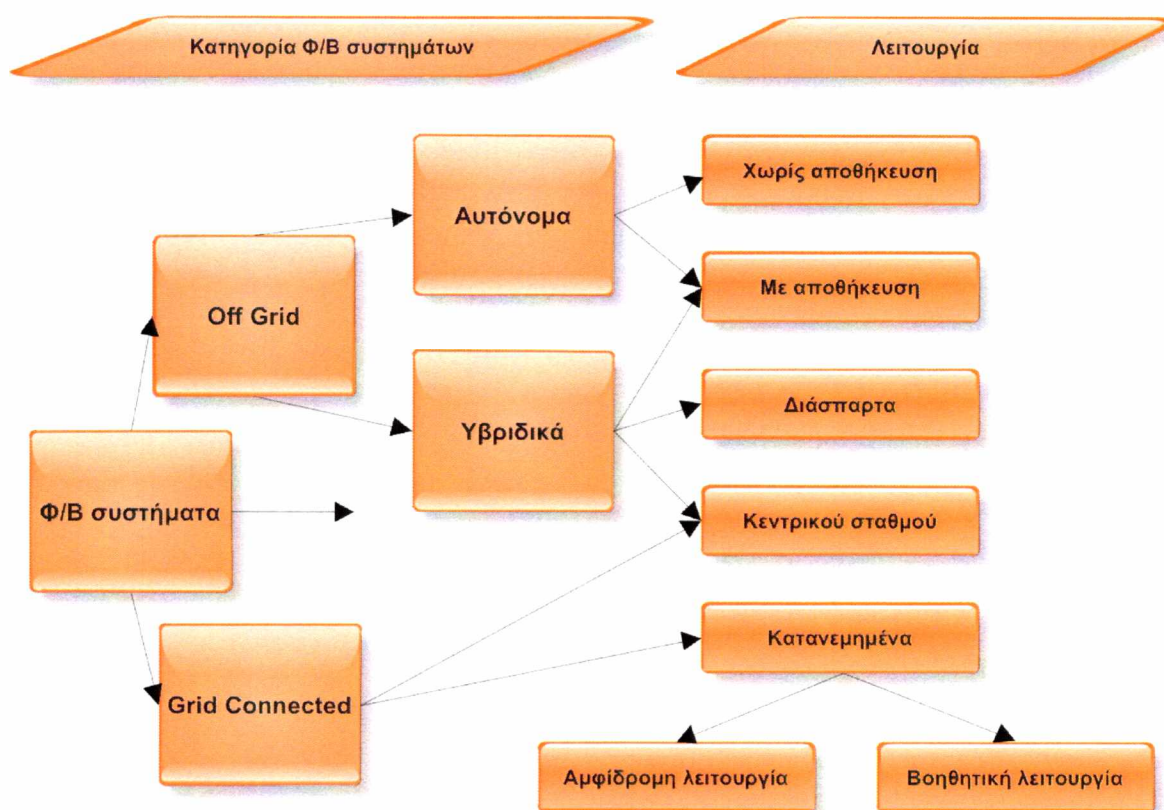
### Φωτοβολταϊκά Συστήματα

## 5.1 Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος σε κάθε περίπτωση κατηγοριοποιούνται και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Ένας πρώτος διαχωρισμός των Φ/Β συστημάτων μπορεί να γίνει ανάλογα με τις εγκαταστάσεις που τροφοδοτούν (κάποιο απομακρυσμένο νησί, κάποιο φωτοβολταϊκό πάρκο κ.λπ.). Με βάση λοιπόν αυτό το κριτήριο οι δύο βασικές κατηγορίες είναι:

- Απομονωμένα ή εκτός δικτύου Φ/Β συστήματα (stand alone – off grid)
- Συστήματα συνδεδεμένα σε δίκτυο (On grid)

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται όλες οι **κατηγορίες** και **υποκατηγορίες** φωτοβολταϊκών συστημάτων με τις λειτουργίες τους.



Σχήμα 5.1 Κατηγορίες και λειτουργία ΦΒ συστημάτων

### 5.1.1 Απομονωμένα Φ/Β Συστήματα

Πρόκειται για συστήματα που δεν είναι ενταγμένα σε κάποιο εθνικό ή μικρότερης κλίμακας δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και για αυτό το λόγο αποκαλούνται και εκτός δικτύου συστήματα. Ενδεικνύονται σε περιπτώσεις που η διανομή – μεταφορά ενέργειας είναι αδύνατη ή σε περιπτώσεις που απαιτείται πλήρης ενεργειακή αυτονομία. Διακρίνονται στις εξής επιμέρους κατηγορίες:

#### 5.1.1.1 Αυτόνομα Φ/Β Συστήματα

Σε αυτά τα συστήματα η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται αποκλειστικά από Φ/Β συστοιχίες και η παροχή της γίνεται είτε με άμεσο τρόπο (Συστήματα άμεσης τροφοδοσίας του φορτίου direct coupled) είτε με τη βοήθεια συσσωρευτών (με αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας). Τέλος η αποδιδόμενη ενέργεια μπορεί να είναι είτε συνεχούς είτε εναλλασσόμενης τάσης. Τα χαρακτηριστικά διαγράμματα και των δύο περιπτώσεων ακολουθούν από κάτω.

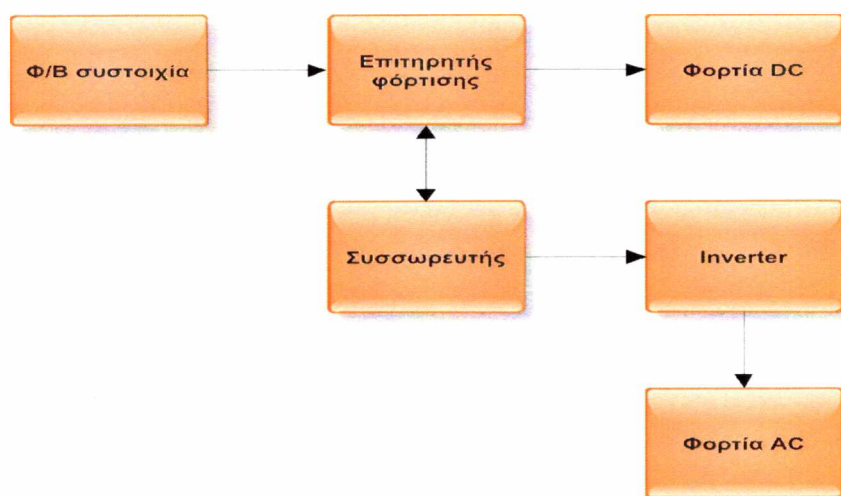
Τα βασικά μέρη ενός αυτόνομου συστήματος είναι:

- Τα φωτοβολταϊκά πάνελ
- οι συσσωρευτές
- ο ρυθμιστής φόρτισης
- ο αντιστροφέας dc/ac (για τις καταναλώσεις των 230Volt)
- ασφάλειες
- διακόπτες dc
- όργανα μέτρησης χωρητικότητας συσσωρευτών

Το κύκλωμα dc συνήθως έχει τάση λειτουργίας 12,24 ή 48 volt.

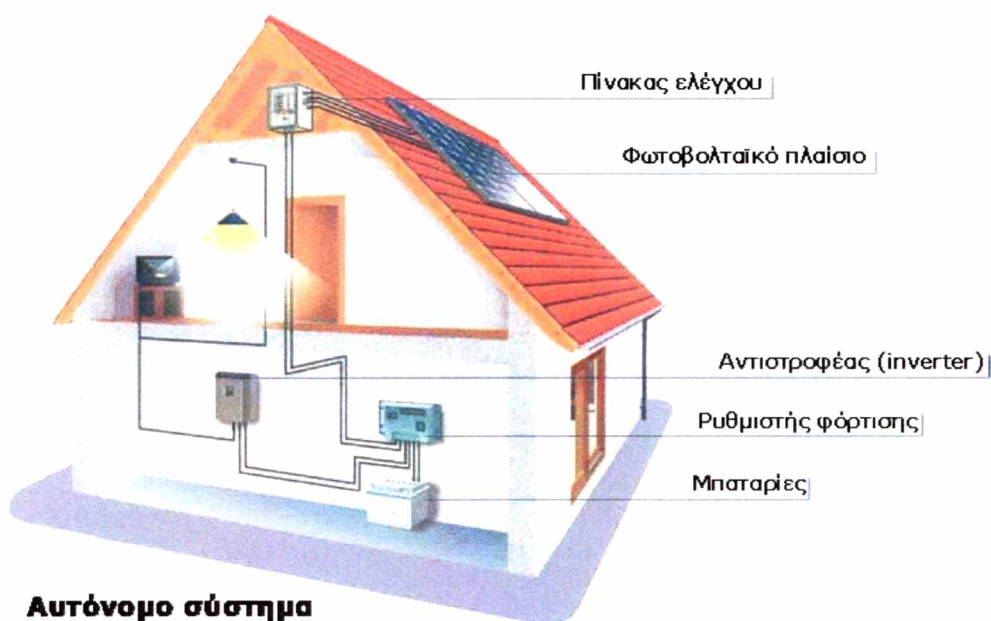


(α)



(β)

**Σχήμα 5.2** Αυτόνομο ΦΒ σύστημα (α) με συστοιχία συνδεδεμένη απευθείας στο φορτίο (DC) . (β) με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και τροφοδοσία φορτίων συνεχούς και εναλλασσόμενης τάσεως



**Αυτόνομο σύστημα**

#### 5.1.1.2 Υβριδικά Φ/Β Συστήματα

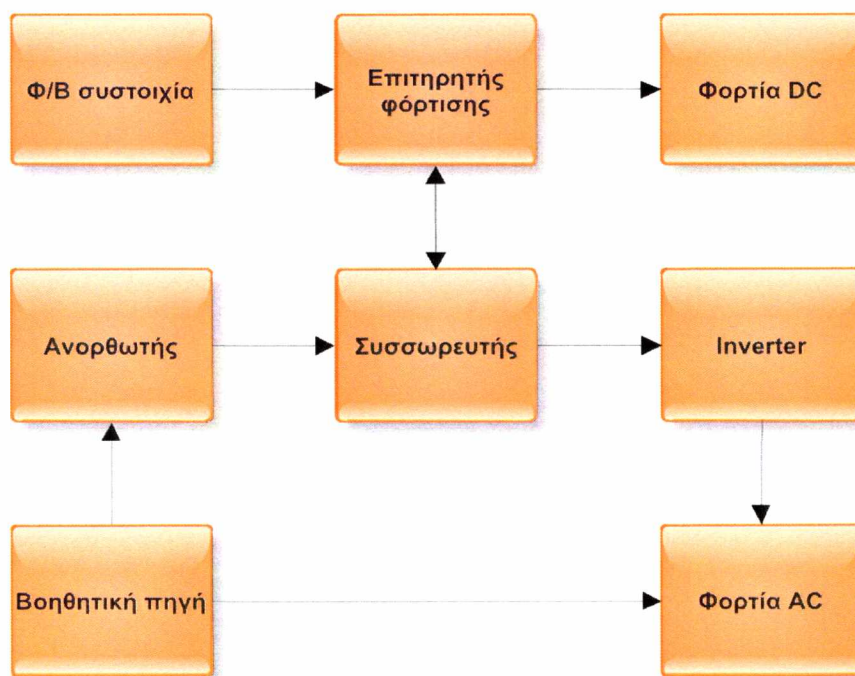
Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται όταν οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν αποκλειστικά από τις Φ/Β συστοιχίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο συνδυασμός των Φ/Β με κάποια άλλη πηγή παραγωγής ενέργειας, ανανεώσιμης ή μη. Σε τέτοια συστήματα όπως φαίνεται και πιο κάτω συνηθίζεται η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.



Συνήθως ένα τέτοιο σύστημα επιβάλλεται από το κόστος. Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να τροφοδοτήσουν οποιαδήποτε εγκατάσταση (όπως ένα εξοχικό σπίτι) αλλά το κόστος μπορεί να είναι μεγάλο. Για τον λόγο αυτό τα φωτοβολταϊκά μπορούν να συνδυαστούν και με άλλες πηγές ενέργειας. Για παράδειγμα υπάρχουν περιοχές με καλό αιολικό δυναμικό και μάλιστα συνήθως όταν υπάρχει συννεφιά ο αέρας είναι ισχυρότερος. Έτσι μπορεί μια ανεμογεννήτρια και μια φωτοβολταϊκή συστοιχία να αλληλοσυμπληρώνονται σε μια εγκατάσταση.

Σε αυτήν την περίπτωση οι δύο πηγές ενέργειας τροφοδοτούν τις συστοιχίες των συσσωρευτών μέσω ρυθμιστών φόρτισης και από εκεί η ενέργεια διοχετεύεται στις καταναλώσεις της εγκατάστασης.

Γενικότερα οι τεχνολογίες που μπορεί να συμμετέχουν σε μια υβριδική εγκατάσταση είναι συνήθως οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες, οι **ανεμογεννήτριες**, και οι πετρελαιοκινητήρες Η/Ζ. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι ενεργειακές πηγές μπαίνουν παράλληλα στο τοπικό δίκτυο με σκοπό την αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιλογή ενός τέτοιου συστήματος προέρχεται από έναν συγκερασμό μετεωρολογικών και οικονομοτεχνικών δεδομένων.



Σήμα 5.3 Αυτόνομο ΦΒ υβριδικό σύστημα

### 5.1.1.3 Μηχανισμοί Ασφαλείας για τα Αυτόνομα Συστήματα

Οι κεραυνοί και άλλες διακυμάνσεις της ισχύος μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες καταστροφές στο ΦΒ σύστημά αν δεν έχουν παρθεί τα απαραίτητα μέτρα. Μηχανισμοί ασφαλείας προστατεύουν τα αυτόνομα συστήματα από το να πάθουν ζημιά ή ακόμη και να βλάψουν ανθρώπους.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά ασφαλείας που πρέπει να διαθέτει το ΦΒ σύστημά είναι:

#### ➤ Ασφάλειες Διακοπής

Οι Ασφάλειες Διακοπής προστατεύουν το κύκλωμα και τα στοιχεία του μικρού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας από διακυμάνσεις ισχύος και τυχόν δυσλειτουργίες του εξοπλισμού. Εξασφαλίζουν επίσης ότι το σύστημα μπορεί να τεθεί με ασφάλεια εκτός λειτουργίας για συντήρηση και επισκευή. Στην περίπτωση που το σύστημά είναι διασυνδεδεμένο στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, οι ασφάλειες διακοπής εξασφαλίζουν ότι ο μηχανισμός παραγωγής ενέργειας είναι απομονωμένος από το δίκτυο, κάτι που είναι σημαντικό για την ασφάλεια των ανθρώπων που εργάζονται στις γραμμές ηλεκτροδότησης του δικτύου.

#### ➤ Εξοπλισμός Γείωσης

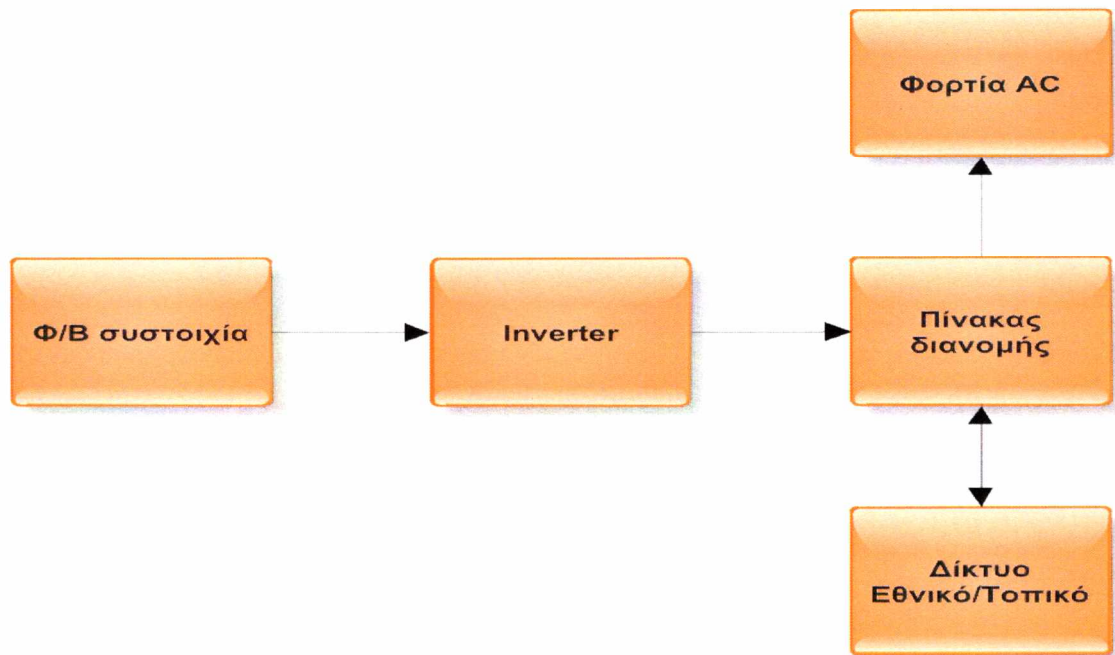
Αυτός ο εξοπλισμός παρέχει μια καλά ορισμένη διαδρομή χαμηλής αντίστασης από το σύστημά στο έδαφος για να το προστατέψει από διακυμάνσεις φορτίου που προέρχονται από κεραυνούς ή δυσλειτουργία του εξοπλισμού. Θα πρέπει να γειωθεί τόσο η ανεμογεννήτρια ή το φωτοβολταϊκό σύστημα όσο και ο εξοπλισμός εξισορρόπησης. Θα πρέπει να έχει συμπεριληφθεί στη γείωση οποιοδήποτε εκτεθειμένο μεταλλικό στοιχείο που θα μπορούσε να έρθει σε επαφή με τον άνθρωπο.

#### ➤ Προστασία Διακύμανσης

Αυτές οι συσκευές βοηθούν στην προστασία του συστήματός σας στην περίπτωση που αυτό ή οι γειτονικές γραμμές (για την περίπτωση διασυνδεδεμένου συστήματος) χτυπηθούν από κεραυνό.

### 5.1.2 Φ/B Συστήματα Συνδεδεμένα στο Δίκτυο

Αυτά είναι τα συνηθέστερα και παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος των εγκατεστημένων Φ/B συστημάτων. Χαρακτηριστική εφαρμογή αυτού του είδους των συστημάτων είναι και τα ενσωματωμένα σε κτίρια Φ/B. Είναι διασυνδεδεμένα σε κάποιο δίκτυο ηλεκτρικής παροχής και αντλούν από αυτό ισχύ όταν αδυνατούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους. Σε περίπτωση φυσικά περίσσειας ενέργειας η ροή ισχύος είναι ανάποδη, από τις Φ/B συστοιχίες προς το δίκτυο δηλαδή.



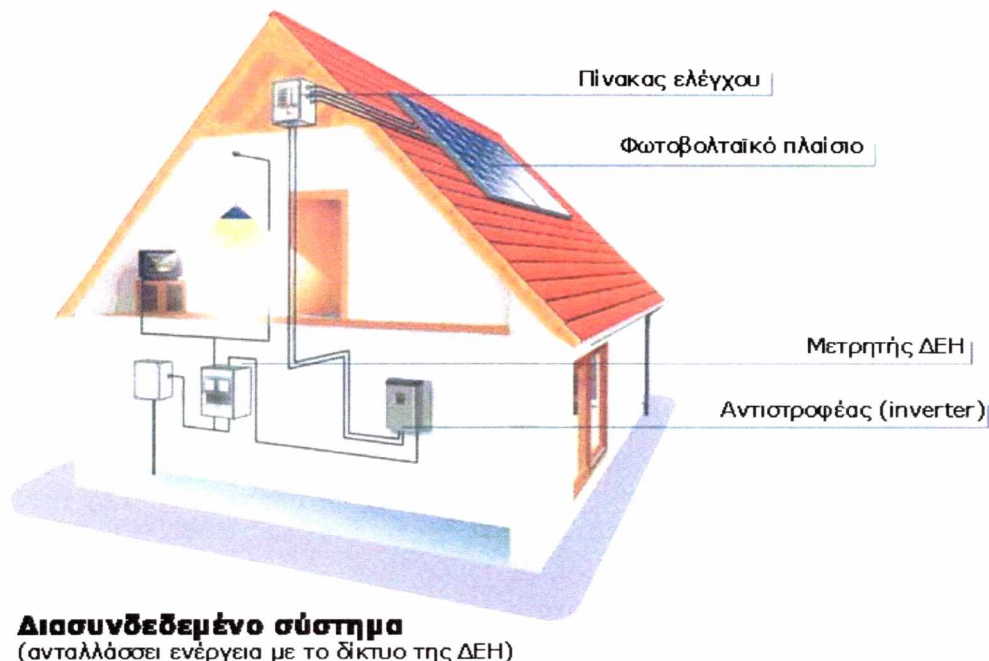
Σχήμα 5.4 ΦΒ σύστημα συνδεδεμένο στο εθνικό ή τοπικό δίκτυο

Μπορούν να αποτελούν κεντρικούς σταθμούς με μεγάλη ισχύ η οποία διοχετεύεται στο δίκτυο (centralized systems) ή να είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο ως κατακευμασμένα συστήματα (distributed systems) . Τα τελευταία είναι και τα πιο συνηθισμένα και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τρόπο αλληλεπίδρασης τους με το δίκτυο ως εξής:

- Φ/B συστήματα που χρησιμοποιούν το δίκτυο ως **βοηθητική πηγή** ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση ο σχεδιασμός του συστήματος γίνεται με βάση τις μέσες μηνιαίες απαιτήσεις ενέργειας της εφαρμογής. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται και **grid back up**. Ουσιαστικά σε αυτήν την περίπτωση ο σχεδιασμός του συστήματος γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι το σύνολο της ενέργειας που παράγεται θα απορροφάται από τις ηλεκτρικές καταναλώσεις της εγκατάστασης.
- Φ/B συστήματα τα οποία λειτουργούν με συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο. Εδώ ο σχεδιασμός γίνεται με βάση τις αντίστοιχες ετήσιες απαιτήσεις. Όταν μια εγκατάσταση χρησιμοποιεί το δίκτυο ως **εναλλακτική πηγή** τροφοδότησης ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση που η παραγωγή του τοπικού φβ σταθμού δεν επαρκεί κάποιες ώρες της ημέρας (ή γενικότερα δεν επαρκεί) για να τροφοδοτήσει την ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης.



Στις πιο πάνω περιπτώσεις η εγκατάσταση μπορεί να απορροφά ενέργεια από το δίκτυο για να πληρώσει τις ενεργειακές τις ανάγκες. Επίσης μπορεί να συμβαίνει και το αντίστροφο. Δηλαδή όταν η ενέργεια που παράγεται από την μονάδα είναι περισσότερη από αυτήν που καταναλώνεται, η περίσσεια της ενέργειας μπορεί να διοχετεύεται (πωλείται) στο δίκτυο. Ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να διαθέτει δύο μετρητικά συστήματα, το ένα από τα οποία θα μετρά την εξερχόμενη ενέργεια και το άλλο την εισερχόμενη. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται και grid interactive.



➤ **Κατηγοριοποίηση διασυνδεδεμένων συστημάτων με κριτήριο τα συστήματα στήριξης**

1. Στήριξη με σταθερό σύστημα στο έδαφος.
2. Στήριξη με σταθερό σύστημα σε επικλινή στέγη.
3. Στήριξη με σταθερό σύστημα σε επίπεδη οροφή κτιρίου.
4. Στήριξη με σύστημα ηλιοστατών στο έδαφος (πολύ σπάνια σε οροφές αν επαρκούν τα κριτήρια στατικότητας)

➤ **Πλεονεκτήματα σταθερών συστημάτων**

Γενικά τα **σταθερά συστήματα** πλεονεκτούν σε σχέση με τα **tracker**

- στην απλότητα της κατασκευής,
- στο κόστος εγκατάστασης,
- στην ταχύτητα εγκατάστασης,
- στο κόστος συντήρησης,
- στην μεγαλύτερη ανεξάρτηση του επενδυτή από τον κατασκευαστή και σε θέματα αξιοπιστίας (reliability, availability).



## 5.2 Φωτοβολταϊκά Πάρκα με Ηλιοστάτες (solar tracker)

Στα φωτοβολταϊκά πάρκα πολλές φορές συνιθίζεται η χρήση συστημάτων παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται ηλιοστάτες ή trackers. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι η άμεση ακτινοβολία (direct irradiation) προσπίπτει στα πάνελ κάθετα με αποτέλεσμα την αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν 3 βασικά είδη τέτοιων συστημάτων.

- Παρακολούθηση της τροχιάς στον κάθετο άξονα (**vertical one axis tracker**)-> (Μικρή αύξηση απόδοσης)
- Παρακολούθηση της τροχιάς στον οριζόντιο άξονα (**horizontal one axis tracker**) -> (Μέσαία αύξηση απόδοσης)
- Παρακολούθηση της τροχιάς και στους δύο άξονες (**dual axis tracker**) -> (Μέγιστη αύξηση απόδοσης)

Επίσης ανάλογα με την μέθοδο που δίνει κίνηση στους άξονες του συστήματος διακρίνονται σε:

- Υδραυλικά συστήματα κίνησης
- Ηλεκτρικά συστήματα κίνησης

### ➤ Πλεονεκτήματα κινητών συστημάτων (ηλιοστατών)

Τα tracker πλεονεκτούν συνολικά στην απόδοση της επένδυσης του φωτοβολταϊκού συστήματος και αποδίδουν μεγαλύτερα οικονομικά ωφέλη (όταν όμως ισχύουν και αρκετοί άλλοι παράμετροι). Υπάρχει ένα αυξημένο κόστος γενικότερα στην κατασκευή και την εγκατάσταση αλλά οι ηλιοστάτες μπορούν να αυξήσουν αρκετά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Φυσικά αυτό και μόνο το γεγονός αποτελεί βασικό κριτήριο για πολλούς επενδυτές που επιθυμούν το μέγιστο όφελος από την επένδυση τους. Η αύξηση αυτή μπορεί ξεκινάει από 10% (για συστήματα μονού άξονα) να φτάσει ακόμα και το 40% (αλλά για κάποιες μόνο εποχές του χρόνου). Ο υπολογισμός της μέσης ετήσιας αύξησης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενός συστήματος είναι το κρίσιμο μέγεθος που θα πρέπει να υπολογιστεί κανείς για να βγάλει χρήσιμα συμπεράσματα.

Η χρήση των tracker πάντως συστήνεται μόνο σε περιοχές που έχουν υψηλό ποσοστό άμεσης ακτινοβολίας (όπως στην Ελλάδα). Για αυτόν ακριβώς τον λόγο μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι στην Ισπανία και την Γερμανία (οι 2 περισσότερο ώριμες αγορές του κόσμου) όπου έχουν τοποθετηθεί πολλά φωτοβολταϊκά πάρκα χρησιμοποιούνται διαφορετικές πρακτικές όσον αφορά τα συστήματα στήριξης. Στην μεν συνεφιασμένη Γερμανία τα συντριπτικά περισσότερα εγκατεστημένα συστήματα είναι σταθερά, ενώ στην Ισπανία τα trackers έχουν κατακτήσει ένα πολύ σημαντικό μερίδιο της αγοράς.

**Συμπερασματικά** υπάρχουν αρκετές παράμετροι που θα πρέπει κανείς να σταθμίσει για να προχωρήσει στην επιλογή ενός σταθερού συστήματος στήριξης σε σχέση με ένα σταθερό.

#### ➤ **Μειονεκτήματα Κινητών Συστημάτων (ηλιοστατών)**

Στα μειονεκτήματα των κινητών συστημάτων μπορούν να αναφερθούν:

- Το αυξημένο κόστος της επένδυσης.
- Η ύπαρξη κινητών μερών η οποία και αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος.
- Η ανάγκη για αυτοκατανάλωση κάποιας ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας για την περιστροφή (κίνηση) των συστημάτων.
- Το αυξημένο κόστος συντήρησης.
- Η μεγαλύτερη ανάγκη για απομακρυσμένο (τηλεπικοινωνιακά) έλεγχο του συστήματος μιας και η πιθανότητα αστοχίας είναι μεγαλύτερη.
- Μεγαλύτερος κίνδυνος καταστροφής σε περίπτωση ακραίων καιρικών φαινομένων.

**Συμπερασματικά** υπάρχουν αρκετές παράμετροι που θα πρέπει κανείς να σταθμίσει για να προχωρήσει στην επιλογή ενός σταθερού συστήματος στήριξης σε σχέση με ένα σταθερό. Φωτογραφίες από φωτοβολταϊκά έργα σταθερά και κινητά.

### **5.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Φ/Β Συστημάτων**

Τα Φ/Β συστήματα αποτελούν ένα ταχύτατα αναπτυσσόμενο τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας των πολλών πλεονεκτημάτων τους έναντι των συμβατικών τρόπων παραγωγής ενέργειας.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα τους είναι:

- Είναι από τους πλέον φιλικούς προς το περιβάλλον τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς δεν εκπέμπονται τοξικά ή άλλα αέρια και δεν επιβαρύνεται το οικοσύστημα με την παραγωγή παραπροϊόντων κατά την διαδικασία ηλεκτροπαραγωγής.
- Πηγή ενέργειας αποτελεί η ηλιακή ακτινοβολία και ως πρώτη ύλη κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιλέγονται υλικά που υπάρχουν σε αφθονία στη φύση.

- Χαρακτηρίζονται από τεράστιο εύρος εφαρμογών και μπορούν να τοποθετηθούν παντού αρκεί να υπάρχει στοιχειώδης ηλιοφάνεια.
- Έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής και δεν απαιτούν συχνές και δαπανηρές συντηρήσεις.
- Ένα Φ/Β σύστημα είναι ανεξάρτητο από ηλεκτρικά δίκτυα διανομής ενώ σε περιπτώσεις αυτόνομων δικτύων υπάρχει το όφελος της μη ύπαρξης απωλειών κατά τη διαδικασία μεταφοράς και διανομής.
- Είναι αθόρυβα
- Η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συμβαδίζει στις περισσότερες των περιπτώσεων με τη μέγιστη ζήτηση.

Στον αντίποδα υπάρχουν **μειονεκτήματα** όπως:

- Υψηλό κόστος κατασκευής του συστήματος λόγω του ότι από μόνη της η διαδικασία παραγωγής Φ/Β στοιχείων είναι δαπανηρή.
- Έχουν χαμηλό βαθμό απόδοσης, κάτι που σημαίνει απαίτηση μεγάλων εκτάσεων και επιφανειών προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική παραγωγή ισχύος.
- Υψηλό κόστος εγκατάστασης, οπότε και σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος αγοράς τους οδηγούν σε μεγάλη χρονική διάρκεια για να γίνει απόσβεση.

Το ενθαρρυντικό στα παραπάνω είναι ότι τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει μεγάλα βήματα προόδου τόσο στις τιμές των Φ/Β οι οποίες έχουν πέσει αισθητά όπως και στις αποδόσεις τους οι οποίες εμφανίζουν ανοδική πορεία.

## 5.4 Εφαρμογές Φωτοβολταϊκών

Τα Φ/Β συστήματα απευθύνονται σε περιοχές εφαρμογών, όπου το σχετικά υψηλό κόστος τους δεν αποτελεί σημαντικό εμπόδιο. Οι εφαρμογές αυτές συνήθως χαρακτηρίζονται από:

- χαμηλές ενεργειακές ανάγκες
- έλλειψη εναλλακτικών τρόπων παροχής ενέργειας ή, όπου υπάρχουν, αυτοί είναι πολύ ακριβοί (π.χ. σύνδεση με ένα απομακρυσμένο δίκτυο)
- απαιτήσεις υψηλής αξιοπιστίας ή και χαμηλές ανάγκες συντήρησης

**Σαν κυριότερες κατηγορίες εφαρμογών Φ/Β συστημάτων μπορούν να θεωρηθούν οι εξής:**

### **α) Καταναλωτικά προϊόντα (0.001 - 100Wp)**

Τα συστήματα της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται σε περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο ή σε τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, κλπ., για την εξυπηρέτηση αναγκών φωτισμού και ψύξης και για προϊόντα όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές, φανοί κ.ά.

### **β) Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100Wp – 200KWp)**

Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και μικρούς οικισμούς που δεν είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Ακόμη χρησιμοποιούνται για :

- αφαλάτωση / άντληση / καθαρισμό νερού
- φωτισμό (δρόμων , πάρκων , αεροδρομίων)
- συστήματα τηλεπικοινωνιών , τηλεμετρήσεων και συναγερμού
- συστήματα σηματοδότησης (οδικής κυκλοφορίας, ναυτιλίας, αεροναυτιλίας)
- ψύξη (αγροτικών προϊόντων , φαρμάκων κ.λπ.)

### **γ) Συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο ( 200 KWp - αρκετά MWp)**

Στην κατηγορία αυτ, διακρίνονται δύο κατηγορίες συστημάτων.

- Φ/Β συστήματα μεγέθους έως μερικών εκατοντάδων kWp που τροφοδοτούν κατοικίες, συγκροτήματα κατοικιών ή άλλα κτίρια και όπου η τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια τροφοδοτείται (πωλείται) προς το δίκτυο
- Φ/Β σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο

Για τα Φ/Β συστήματα που αναρτώνται σε κτίρια (σε προσόψεις, οροφές , κλπ.), σε σύνδεση με το δίκτυο, τελευταία έχει εκδηλωθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον . Τα οφέλη που προκύπτουν είναι:

1. συγχρονισμός Ψυκτικών φορτίων κτιρίων με μέγιστη παραγόμενη ισχύ από Φ/Β
2. αποφυγή χρήσης γης
3. αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Επίσης, γίνεται προσπάθεια για χρήση των Φ/Β και ως δομικών στοιχείων στα κτίρια, αυξάνοντας έτσι τα οικονομικά οφέλη, εκτός από αυτά που ήδη αναφέρθηκαν.



### 5.4.1 Φωτοβολταϊκά Ενσωματωμένα σε Κτίρια

Οι εφαρμογές των φωτοβολταϊκών είναι πολλές και προσαρμόζονται σε κάθε απαίτηση. Εκτός τις απλές εφαρμογές για παραγωγή ενέργειας που τοποθετούνται στο έδαφος, υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθούν στις στέγες, στις προσόψεις κτιρίων και όπου αλλού υπάρχει δυνατότητα και διαθέσιμος χώρος.

#### ➤ Εγκατάσταση σε Στέγες

Υπάρχει δυνατότητα να εγκατασταθούν φωτοβολταϊκά σε κτίρια για τα οποία δεν έχει προβλεφθεί η τοποθέτησή τους. Λόγω των φυσικών χαρακτηριστικών των Φ/Β (αθόρυβα, ελαφριά κ.λ.π.) μπορούν να τοποθετηθούν σε οικιστικά σύνολα, σε αθλητικές εγκαταστάσεις, σε δημόσια κτίρια, σε βιομηχανικούς χώρους κ.α. Η εγκατάστασή τους γίνεται ύστερα από κατάλληλη αυτοψία του χώρου, πολλές φορές χωρίς να είναι απαραίτητες οι αλλαγές στη δομή του κτιρίου.

Τα Φ/Β πλαίσια συνήθως είναι όπως και τα πλαίσια που χρησιμοποιούνται στις απλές εφαρμογές (από άμορφο, πολυκρυσταλλικό ή μονοκρυσταλλικό πυρίτιο), Βέβαια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλαίσια που να προσαρμόζονται στην αρχιτεκτονική και στην αισθητική του κτιρίου (οι εταιρίες Φ/Β, ύστερα από παραγγελία, κατασκευάζουν πλαίσια σε διάφορα χρώματα και σχέδια).

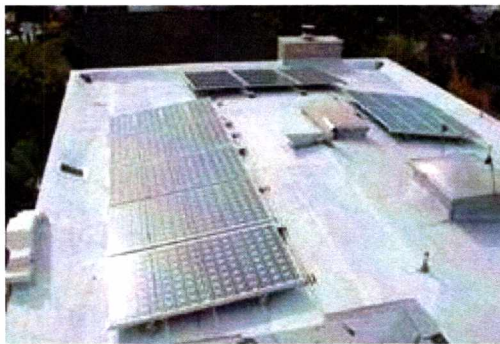


**Σχήμα 5.5 Τοποθέτηση Φ/Β σε στέγη παλαιού σπιτιού**

Οι τρόποι τοποθέτησης διαφέρουν ανάλογα με τον τρόπο εγκατάστασης. Μπορούν να τοποθετηθούν οριζόντια, κάθετα ή κεκλιμένα και με νότιο, κατά προτίμηση, προσανατολισμό, για μέγιστη απόδοση. Δεν αποκλείεται και διαφορετικός προσανατολισμός, με μειονέκτημα την απόδοση του συστήματος.

## ➤ Τοποθέτηση σε Οροφή ή Στέγη

Τα Φ/Β τοποθετούνται στην οροφή ή τη στέγη του κτιρίου σε μεταλλικές βάσεις στήριξης όπως και στο έδαφος. Οι βάσεις στηρίζονται με κατάλληλους αποστάτες στην οροφή χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα στεγανότητας. Είναι κατάλληλα κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα και αλουμίνιο, με τις απαραίτητες προδιαγραφές, για τέτοιες εφαρμογές.



**Σχήμα 5.6**

Φ/Β σε οροφή με διαφορετικούς προσανατολισμούς Φ/Β σε οροφή τοποθετημένα με κλίση

Στην αγορά κυκλοφορούν ευλύγιστα Φ/Β από άμορφο πυρίτιο. Είναι σε μορφή ταινίας και απλώνονται στην οροφή ή τη στέγη του κτιρίου. Είναι πολύ εύκολα, γρήγορα και οικονομικά στην εγκατάσταση καθώς είναι πολύ ελαφριά, εύκαμπτα και δεν απαιτείται βάση στήριξης, αρκεί να εξασφαλίζεται ο σωστός αερισμός τους.



**Σχήμα 5.7**

Τοποθέτηση ευλύγιστων Φ/Β σε στέγη Τοποθέτηση ευλύγιστων Φ/Β σε στέγη

Μπορεί να γίνει εφαρμογή σε ιστορικά και παραδοσιακά κτίρια χωρίς να επηρεάζεται η εμφάνισή τους. Παρουσιάζουν όμως τα μειονεκτήματα του άμορφου πυριτίου, δηλαδή μειωμένη απόδοση και απαιτείται σχεδόν διπλάσια επιφάνεια Φ/Β.

Ένα άλλο προϊόν είναι Φ/Β άμορφου πυριτίου ενσωματωμένα σε υγρομονωτική (στεγανωτική) μεμβράνη. Κατά την τοποθέτηση στην οροφή, τα στεγανωτικά φύλλα κολλούνται με θερμοκόλληση δημιουργώντας μια ενιαία υδατοστεγανή επιφάνεια. Έτσι εξυπηρετεί δυο σκοπούς: την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την υγρομόνωση.





**Σχήμα 5.8**

*Τοποθέτηση ευλύγιστων Φ/Β σε στέγη Υγρομωτικές μεμβράνες με ενσωματωμένα Φ/Β*

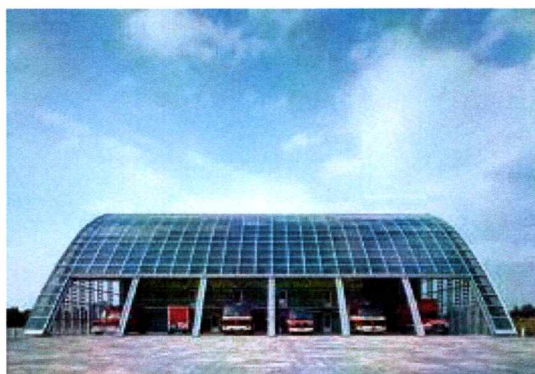
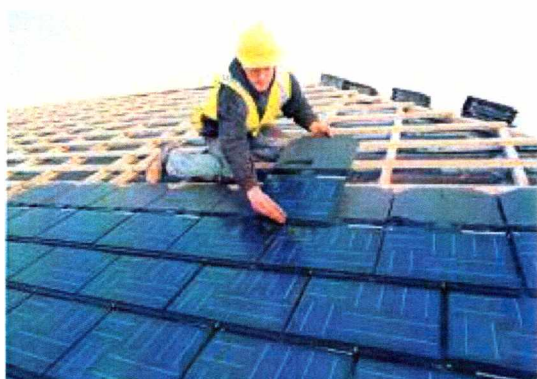
### ➤ **Φ/Β Ενσωματωμένα σε Κτίρια ως Διακοσμητικά και Δομικά Στοιχεία**

Φωτοβολταϊκά μπορούν να τοποθετηθούν κατάλληλα ώστε να αποτελούν στοιχεία του κτιρίου. Τοποθετούνται σε κτίρια μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, εφόσον δεν έχει γίνει πρόβλεψη, ή κατά την κατασκευή ως δομικό στοιχείο του κτιρίου εξοικονομώντας χρήματα από δομικά υλικά (κεραμίδια, υαλοπετάσματα κ.λ.π.)



**Σχήμα 5.9** Φ/Β με μορφή κεραμιδιού

Στο εμπόριο κυκλοφορούν Φ/Β (άμορφα, πολυκρυσταλλικά και μονοκρυσταλλικά) σε σχήμα και διαστάσεις όμοια με τα κεραμίδια, αντικαθιστώντας τα παραδοσιακά κεραμίδια. Τοποθετούνται από την νότια πλευρά του κτιρίου από τον τεχνικό που τοποθετεί και τα απλά κεραμίδια, έχοντας προβλεφθεί οι κατάλληλες ηλεκτρικές συνδέσεις. Βεβαίως μπορούν να αντικαταστήσουν και ήδη τοποθετημένα κεραμίδια.



(α)

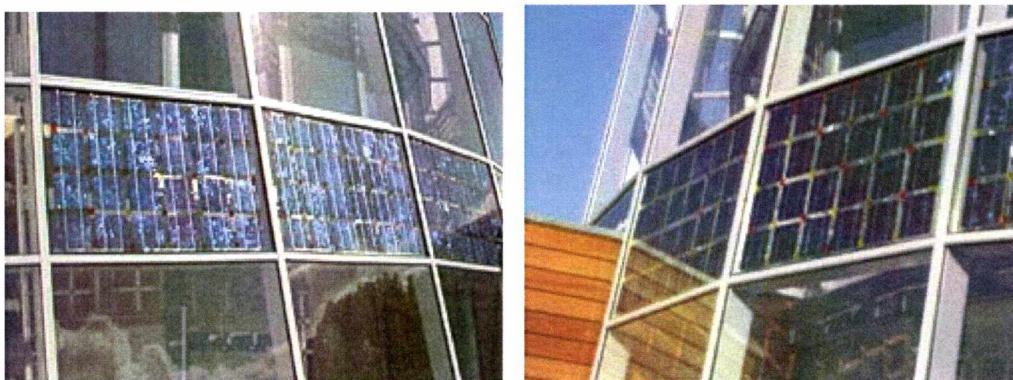
(β)

**Σχήμα 5. 10: (α) Ηλιακά κεραμίδια (β) Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε πυροσβεστικό σταθμό**



## ➤ Φ/Β Υαλοπετάσματα

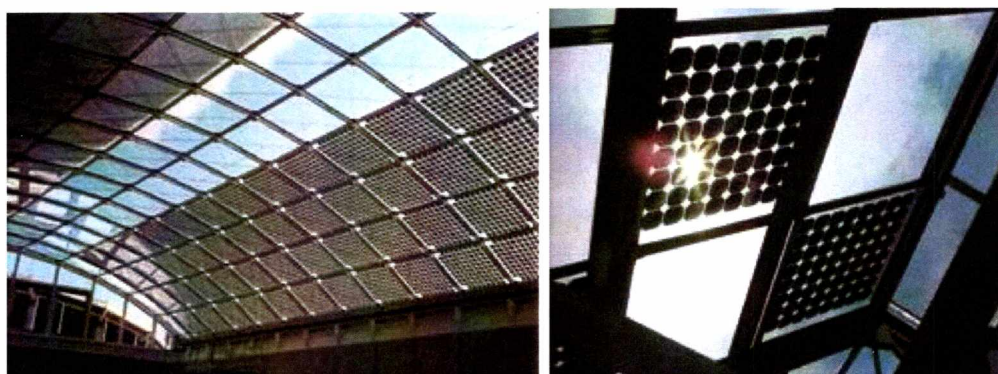
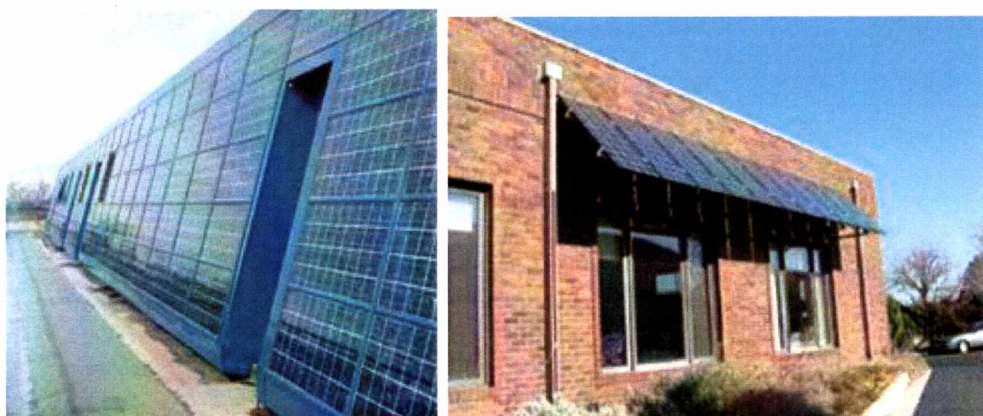
Τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί διαφανή Φ/Β. Δηλαδή το πλαίσιο που βρίσκονται τα Φ/Β στοιχεία είναι κατασκευασμένα ώστε να επιτρέπουν ένα μέρος από το φως να περνάει στην πίσω πλευρά του. Τοποθετούνται σε οροφές κτιρίων και σε παράθυρα, αντικαθιστώντας τμήματα της οροφής, επικάλυψη της πρόσοψης, αντικατάσταση των κλασικών υαλοπετασμάτων ή υαλοπινάκων και ως σκίαστρα. Έτσι γίνεται εξοικονόμηση χρημάτων από δομικά υλικά και παράλληλα υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, φωτισμός και θέρμανση για το κτίριο. Επίσης δίνεται η ευκαιρία σε αρχιτέκτονες να σχεδιάσουν κτίρια νέας τεχνολογίας με μοντέρνο σχεδιασμό και πρωτοποριακές λύσεις (πράσινα σπίτια-green houses).



**Σχήμα 5.11** Φ/Β σε προσόψεις κτιρίων

Οι Φ/Β υαλοπίνακες μπορούν να αντικαταστήσουν τους κλασσικούς υαλοπίνακες στα παράθυρα και στις προσόψεις των γυάλινων κτιρίων δίνοντας ένα εντυπωσιακό αισθητικό αποτέλεσμα. Μέρη γυάλινης οροφής μπορούν να αντικατασταθούν με ΦΒ υαλοπίνακες δίνοντας τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας για το κτίριο.

Είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται συχνά σε κτίρια με μεγάλες προσόψεις και με νότιο προσανατολισμό. Δημιουργείται ένας τύπος θερμοκηπίου το οποίο θερμαίνει τον εσωτερικό αέρα του κτιρίου μειώνοντας σημαντικά τις ανάγκες θέρμανσης του κτιρίου. Ο σχεδιασμός του κτιρίου πρέπει να είναι τέτοιος ώστε κατά τους θερινούς μήνες να υπάρχει ο κατάλληλος αερισμός ώστε η ανάγκη κλιματισμού να γίνεται ελάχιστη.



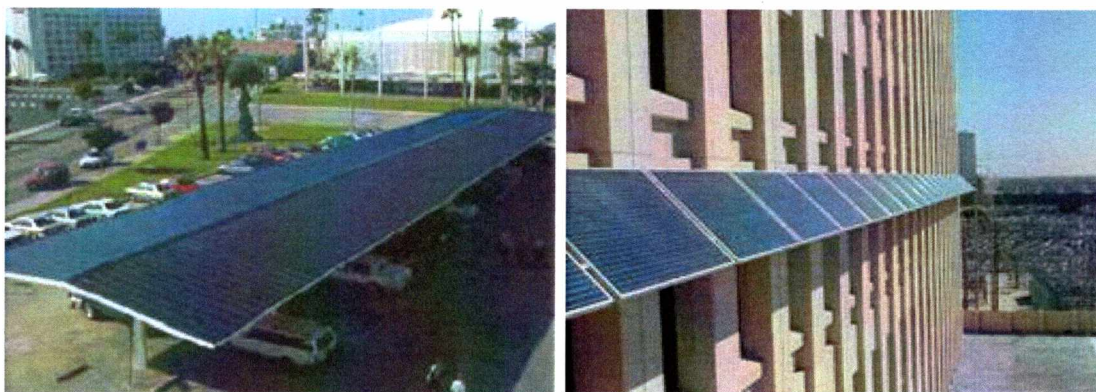
**Σχήμα 5.11** Φ/Β υαλοπίνακες σε οροφές κτιρίων

Μπορούν να αντικαταστήσουν σκίαστρα σε θέσεις στάθμευσης, σε κτίρια, σε βιομηχανικούς χώρους, σε γήπεδα, σε πρατήρια υγρών καυσίμων και όπου είναι αναγκαία η σκίαση κάποιου χώρου. Έτσι η επιφάνεια που θα καταλάμβανε ένα απλό σκίαστρο, μετατρέπεται εκμεταλλεύσιμη μέσω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της ταυτόχρονης δημιουργίας της απαραίτητης σκιάς.



**Σχήμα 5.12** Φ/Β σκίαστρα σε αθλητικές εγκαταστάσεις





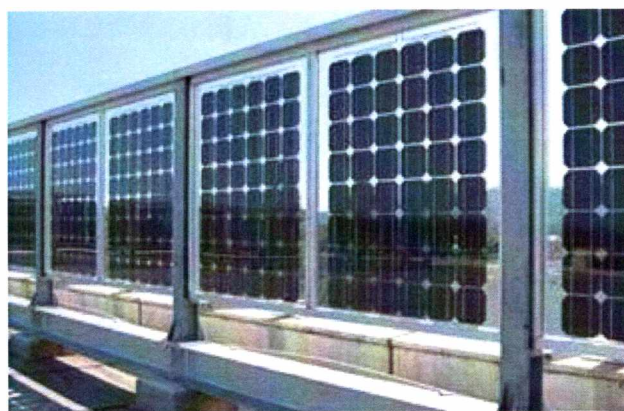
**Σχήμα 5.13** Φ/Β σκιάστρα σε χώρο στάθμευσης

Σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους, που διέρχονται μέσα από κατοικημένες περιοχές, δημιουργείται σημαντική ηχορύπανση. Η αντιμετώπιση της γίνεται με ηχοφράκτες. Οι ηχοφράκτες είναι πετάσματα τοποθετημένα κάθετα, κατασκευασμένα από διαφανή πλαστική ύλη καταλαμβάνοντας σημαντική επιφάνεια.



**Σχήμα 5.14** Φ/Β τοποθετημένα σε τοιχοπετάσματα δρόμων σε ρόλο ηχοφράγματος

Η επιφάνεια γίνεται εκμεταλλεύσιμη τοποθετώντας Φ/Β υαλοπίνακες στην θέση της πλαστικής ύλης. Τοποθετούνται επίσης πάνω στη διαχωριστική νησίδα των δρόμων. Τα Φ/Β υαλοπετάσματα δεν είναι τίποτα άλλο από ένα απλό υαλοπέτασμα στο οποίο έχουν ενσωματωθεί Φ/Β στοιχεία. Το διαφανές υλικό είναι ρητίνη με χαρακτηριστικά αντίστοιχα των κλασικών πλαισίων. Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στα καιρικά φαινόμενα. Στο κάτω μέρος του πλαισίου βρίσκεται το κουτί των ηλεκτρικών συνδέσεων.



**Σχήμα 5.15** Φ/Β υαλοπίνακες τοποθετημένοι σε οροφή κτιρίου

Με κατάλληλο αρχικό σχεδιασμό του κτιρίου είναι εφικτό να επιτευχθούν αποδόσεις ίδιες με αυτές της σταθερής κλίσης. Δεν αποκλείεται βέβαια και η τοποθέτηση με διαφορετική κλίση και προσανατολισμό, με επίπτωση στην απόδοση του συστήματος.



**Σχήμα 5.16** Φ/Β υαλοπίνακες κατά την τοποθέτηση σε οροφή κτιρίου





**Σχήμα 5.17:** Ενσωμάτωση άμορφων φωτοβολταϊκών στο Τεχνολογικό Μουσείο Θεσσαλονίκης



(α)



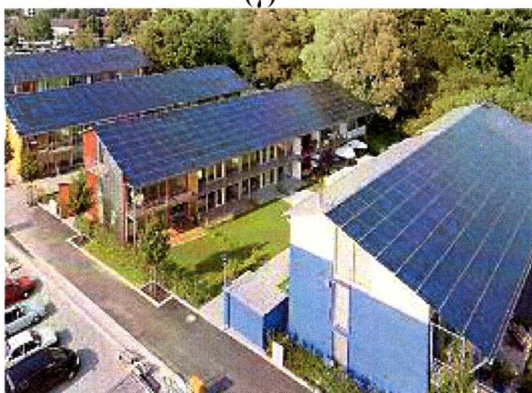
(β)



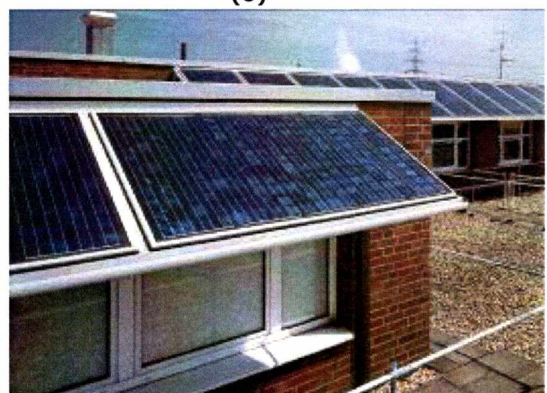
(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

**Σχήμα 5.18:** Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών (α) σε δημόσιο κτίριο (β) σε σκέπαστρο (γ) σε γήπεδο ποδοσφαίρου (δ) σε χώρο στάθμευσης (ε) σε οικισμό (στ) σε ρόλο σκιάστρων





**Σχήμα 5.19:** το Φ/Β πάρκο 9 MW της BP Solar στο Madrideo της Ισπανίας

**Σχήμα 5.20:** (α) Ενσωμάτωση ΦΒ στο σταθμό του μετρό στο αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος (β) Εφαρμογή φωτοβολταϊκών στη στέγη της Γερμανικής Σχολής (γ) Εφαρμογή ΦΒ που επιτρέπουν τη διέλευση φυσικού φωτός σε εμπορικό κτίριο (δ) Διαφανή ΦΒ σε στέγη κατοικίας επιτρέπουν τη διέλευση του φυσικού φωτός (ε)/(δ) Ενσωμάτωση ΦΒ σε



(α)



(β)

στέγες κτιρίων



(γ)



(δ)



(ε)



(δ)



### ➤ Επικαθίσεις και καθαρισμός Φ/Β πλαισίων

Η ρύπανση των Φ/Β πλαισίων μειώνει σημαντικά την απόδοση του συστήματος και τον χρόνο ζώνης του. Η σκόνη, η γύρη των φυτών, άλατα και μικροσωματίδια προκαλούν μείωση της καθαρότητας της επιφάνειας των Φ/Β πλαισίων καθώς η ηλιακή ακτινοβολία που καταλήγει στο Φ/Β στοιχείο είναι σημαντικά μικρότερη λόγω των ρύπων. Κατά τους θερινούς μήνες το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα αυξημένο. Κατά την διάρκεια της ημέρας και λόγω της ξηρασίας, στην ατμόσφαιρα υπάρχουν μεγάλες ποσότητες σκόνης η οποία επικάθεται στα πλαίσια. Την νύχτα η υγρασία σε συνδυασμό με τη σκόνη που υπάρχει στα πλαίσια, δημιουργεί λάσπη η οποία κατά την διάρκεια της ημέρας στεγνώνει με συνέπεια να τίθεται σημαντικό πρόβλημα ρύπανσης. Η μακροχρόνια επικάθηση αντικειμένων, φύλλων, κλαδιών, περιττωμάτων πουλιών, που σκιάζουν ένα ή περισσότερα Φ/Β στοιχεία, προκαλούν έντονο πρόβλημα λειτουργίας και απόδοσης του Φ/Β πλαισίου. Όταν ένα Φ/Β στοιχείο σκιάζεται ενώ τα υπόλοιπα Φ/Β στοιχεία του πλαισίου δέχονται ηλιακή ακτινοβολία, παρουσιάζεται το φαινόμενο της θερμής κηλίδας. Είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να καταστρέψει το Φ/Β στοιχείο άρα και όλο το πλαίσιο. Γι' αυτό τοποθετούνται στο κιβώτιο συνδέσεως δίοδοι παράκαμψης, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πλαίσιο χωρίς να επηρεάζει το υπόλοιπο σύστημα.

Έτσι επιβάλλεται ο τακτικός καθαρισμός των Φ/Β πλαισίων του συστήματος και η επιθεώρηση του για τυχόν αντικείμενα τα οποία δημιουργούν πρόβλημα. Η βροχή είναι μια πολύ καλή λύση κατά την διάρκεια του χειμώνα. Το καλοκαίρι οι βροχές είναι σπάνιες άρα ο φυσικός καθαρισμός των πλαισίων είναι αδύνατος. Τα πλαίσια μπορούν να καθαριστούν με χρήση νερού και μαλακής βούρτσας, αποφεύγοντας βέβαια τη δημιουργία ζημιών. Σε μεγάλα συστήματα υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης αυτόματου συστήματος πλύσης κάτι το οποίο αυξάνει σημαντικά το κόστος. Στα Φ/Β συστήματα που είναι σε προσόψεις κτιρίων ο καθαρισμός μπορεί να γίνει και μέσω των συνεργείων καθαρισμού του εξωτερικού των κτιρίων.

Σε μέρη με μεγάλο υψόμετρο η επικάθηση χιονιού είναι συχνό φαινόμενο κατά την διάρκεια του χειμώνα. Όταν η χιονόπτωση είναι μικρής έκτασης, το χιόνι την ημέρα λιώνει πάνω στα πλαίσια χωρίς να δημιουργεί πρόβλημα. Όμως όταν η χιονόπτωση είναι έντονη πρέπει να υπάρχει συνεργείο που να αφαιρεί το χιόνι, για να μη διακόπτεται η παραγωγή ενέργειας.

Η κλίση του πλαισίου βοηθάει στο καθαρισμό του πλαισίου. Αν η κλίση αυτή είναι μικρή, οι ρύποι είναι δύσκολο να φύγουν. Έτσι ακόμα και στον ισημερινό, που κανονικά πρέπει η τοποθέτηση των πλαισίων να είναι οριζόντια, τοποθετούνται με μια μικρή κλίση για ευκολότερο καθαρισμό τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### **Συγκεντρωτικά Φωτοβολταικα/Θερμικά Συστήματα & Μηχανισμοί Ψύξης**



## 6.1 Συγκεντρωτικά Συστήματα

### 6.1.1 Εισαγωγή

Τα συγκεντρωτικά μέσα χρησιμοποιούν φακούς ή κάτοπτρα για να συγκεντρώσουν το φως του ήλιου επάνω σε ένα δέκτη. Αυτό επιτρέπει την μείωση της επιφάνειας φωτοβολταϊκών κυττάρων που απαιτείται για την παραγωγή ενός δεδομένου ποσού ισχύος. Ο στόχος είναι να μειωθεί σημαντικά το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται με την αντικατάσταση των φωτοβολταϊκών κυττάρων, με το λιγότερο ακριβό οπτικό υλικό. Αυτό παρέχει επίσης την ευκαιρία να χρησιμοποιηθούν φωτοβολταϊκά κύτταρα υψηλής απόδοσης, που θα ήταν απαγορευτικά ακριβά χωρίς την χρήση συγκέντρωσης. Κατά συνέπεια, τα συγκεντρωτικά συστήματα μπορούν εύκολα να υπερβούν την απόδοση ενεργειακής μετατροπής του 20%. Στο μέλλον, η χρήση των κυττάρων multijunction, αναμένεται να αυξήσει την απόδοση πάνω από 30%. Ενώ η έννοια είναι απλή, και έχει μελετηθεί από την αρχή που έκαναν τα φωτοβολταϊκά την εμφάνισή τους, η πρακτική έχει αποδειχθεί απατηλά δύσκολη. Οι κεντρικές τεχνικές δυσκολίες, εντούτοις, οφείλονται στην ανάγκη των συγκεντρωτικών συστημάτων για αντοχή κάτω από υψηλές τιμές ροής θερμότητας και στην μεγάλη ηλεκτρική πυκνότητα ρεύματος, συν την ανάγκη για τα οικονομικώς πιο αποδοτικά και αξιόπιστα συστήματα παρακολούθησης του ήλιου.

Τα κύρια εμπόδια εφαρμογής των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών οφείλονται στο γεγονός ότι τα συγκεντρωτικά συστήματα, που πρέπει στις περισσότερες περιπτώσεις να ακολουθούν τον ήλιο, εξυπηρετούν την παραγωγή μεγάλων ενεργειακών φορτίων και όχι τις εφαρμογές στα κτίρια. Τα συγκεντρωτικά συστήματα αναπτύχθηκαν με βασική ιδέα την παραγωγή μεγάλων ποσών μη ρυπαντικής ανανεώσιμης ενέργειας. Μέχρι τώρα, το κόστος είναι υψηλό για να ανταγωνιστούν τα συμβατικά καύσιμα. Το χάσμα του κόστους όμως στενεύει και εμφανίζεται μια ισχυρή πιθανότητα, όπου τα μελλοντικά συγκεντρωτικά συστήματα θα είναι οικονομικώς αποδεκτά για την εφαρμογή τους.

### 6.1.2 Βασικοί Τύποι Συγκεντρωτικών Μέσων

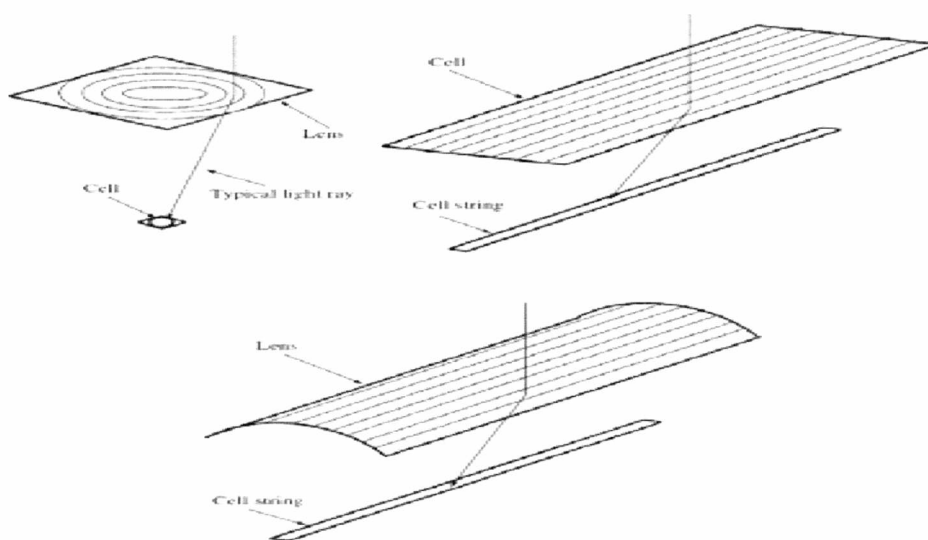
Τα συγκεντρωτικά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με :

- τα οπτικά μέσα που χρησιμοποιούνται για να συγκεντρώσουν το φως του ήλιου,
- τον αριθμό των αξόνων που κινούνται για να παρακολουθήσουν τον ήλιο και
- τον λόγο συγκέντρωσης.

Οι σημαντικότεροι τύποι συγκεντρωτικών συστημάτων είναι V-Trough, Fresnel και κυλινδροπαραβολικά.

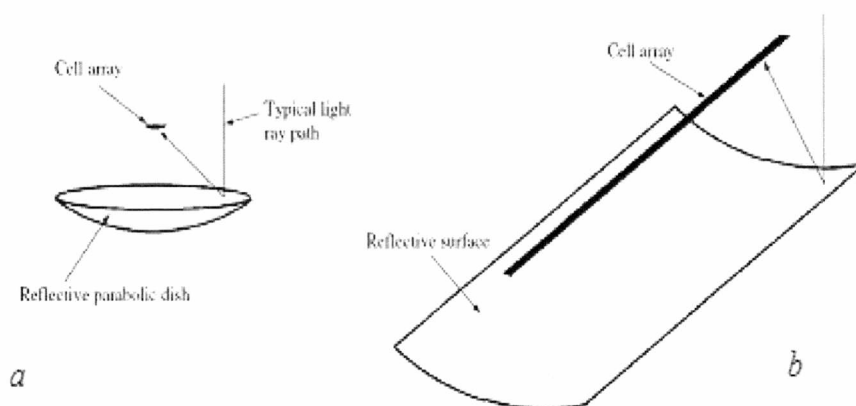
#### 6.1.2.1 Τύποι Οπτικών Μέσων

Τα περισσότερα συγκεντρωτικά συστήματα χρησιμοποιούν είτε τους φακούς είτε τα παραβολικά και τα κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα. Οι φακοί οποιουδήποτε μεγέθους άνω των 5cm διαμέτρου είναι πολύ παχιοί και δαπανηροί για να είναι πρακτικοί, επομένως, επιλέγονται συνήθως οι φακοί Fresnel. Ένας φακός Fresnel είναι ο λεπτός φακός όπου σε κάθε σημείο ή τμήμα του, η διάθλαση των προσπιπτουσών ακτίνων είναι διαφορετική, με αποτέλεσμα την σύγκλισή τους σε ένα εστιακό σημείο ή γραμμή. Έτσι, οι φακοί Fresnel ανάλογα με την συμμετρία που έχουν, μπορούν να εστιάζουν το φως σε ένα σημείο (κυκλική συμμετρία) ή σε μια γραμμή (x ή y συμμετρία). Οι φακοί σημειακής εστίασης, χρησιμοποιούν συνήθως ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο πίσω από κάθε φακό, ενώ οι φακοί γραμμικής εστίασης έχουν μια σειρά φωτοβολταϊκών κυττάρων. Το υλικό της επιλογής για το φακό είναι το γυαλί ή το ακρυλικό πλαστικό (methacrylate polymethyl ή PMM), το οποίο έχει καλή εφαρμογή και έχει παρουσιάσει μεγάλη αντοχή στις καιρικές συνθήκες.



**Σχήμα 6.1:** Διαμορφώσεις φακών Fresnel. (α) Φακός Fresnel σημειακής εστίασης. (β) Γραμμικός φακός Fresnel ή γραμμικής εστίασης. (γ) Καλυμμένος δια θόλου γραμμικός φακός Fresnel

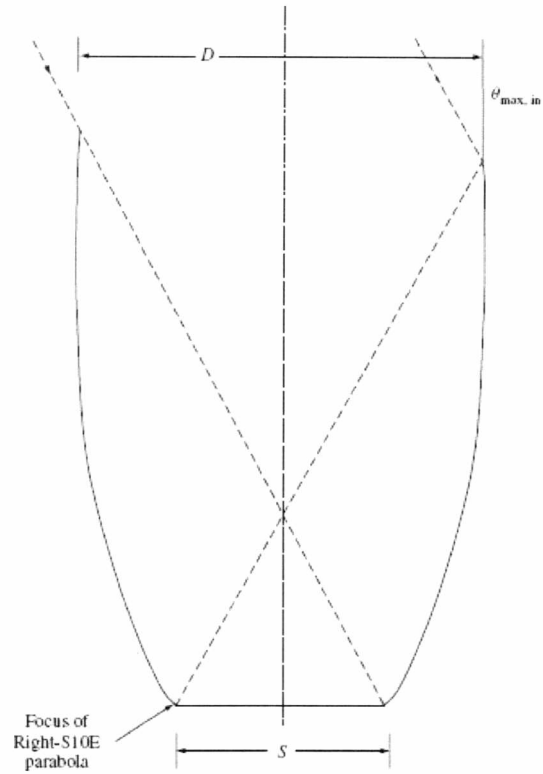
Μια εναλλακτική περίπτωση στη χρήση των φακών είναι η χρήση των κατόπτρων. Όπως είναι γνωστό, μια ανακλαστική επιφάνεια με τη μορφή μιας παραβολής, θα κατευθύνει τις προσπίπτουσες ακτίνες παράλληλα με τον άξονα της παραβολής, σε ένα σημείο που βρίσκεται στην εστία της παραβολής. Όπως στους φακούς, υπάρχουν 2 είδη παραβολικών συγκεντρωτικών μέσων, αυτά της σημειακής εστίασης (σφαιρικά κάτοπτρα), που διαμορφώνονται με την περιστροφή της παραβολής γύρω από τον άξονά της και τη δημιουργία ενός παραβολοειδούς και αυτά της γραμμικής εστίασης (κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα), που διαμορφώνονται με την επέκταση της παραβολής ως προς τον άξονα της καθέτου της παραβολής). Οι σχηματικές αναπαραστάσεις, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 6.2:** Ανακλαστικοί τύποι συγκεντρωτικών μέσων. **(α)** Ανακλαστικός σφαιρικής παραβολικής επιφάνειας, που εστιάζει σε ένα σημειακό απορροφητή. **(β)** γραμμικό κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο που εστιάζει σε μια γραμμική εστία

Μια άλλη γεωμετρία συγκεντρωτικών μέσων είναι αυτή του σύνθετου παραβολικού συγκεντρωτικού μέσου (CPC), που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3. Εδώ οι πλευρές του συγκεντρωτικού συστήματος είναι παραβολές, εντούτοις, η εστίαση για κάθε παραβολή είναι στην αντίθετη πλευρά του απορροφητή και ο άξονας της παραβολής  $\alpha$  είναι κατά μήκος της κατεύθυνσης της μέγιστης γωνίας αποδοχής,  $\theta_{\max}$ . Το σύστημα CPC είναι ενδιαφέρον, δεδομένου ότι παρέχει τη μέγιστη συγκέντρωση συγκριτικά με το μέγεθος του οπτικού ανοίγματος, ή αλλιώς, για μια δεδομένη μέγιστη γωνία αποδοχής. Για την υψηλή συγκέντρωση, ένα CPC πρέπει να είναι μακρύ και λεπτό, με αποτέλεσμα η χρήση του να περιορίζεται για εφαρμογές στα συστήματα χαμηλής συγκέντρωσης είτε ως δευτεροβάθμιο οπτικό μέσο συγκέντρωσης.



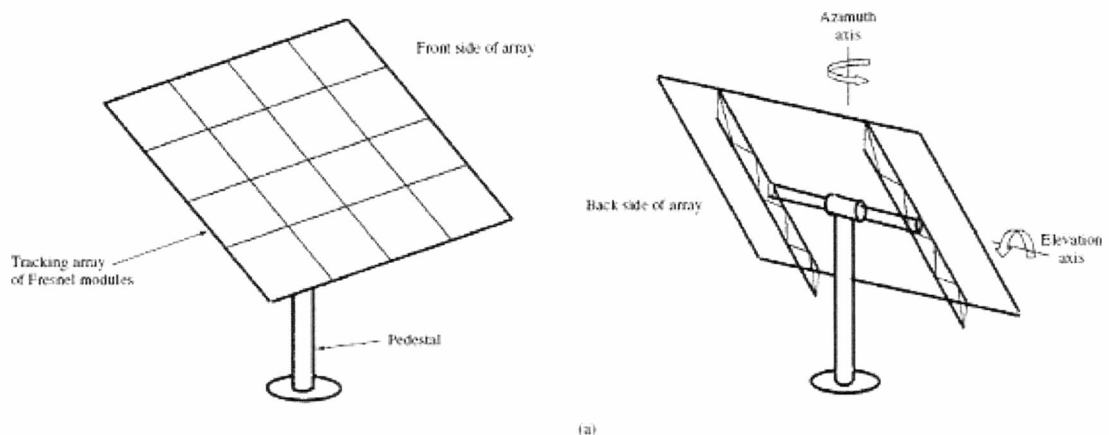


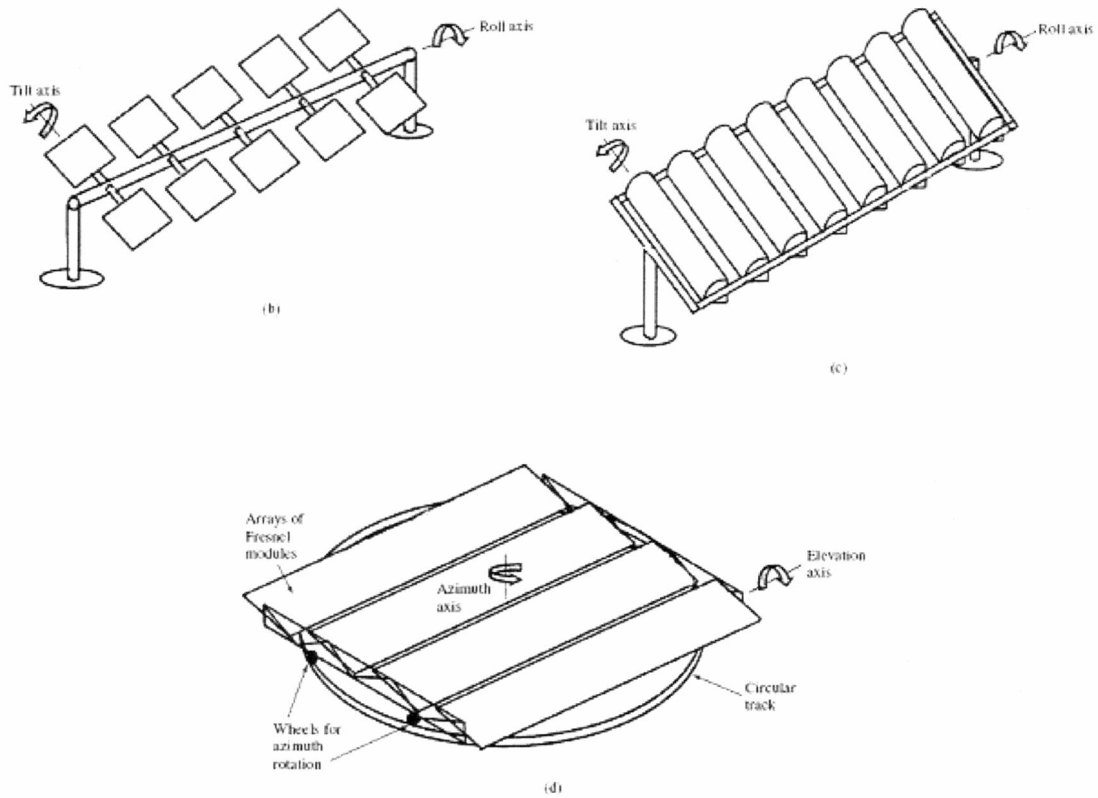
**Σχήμα 6.3:** Γεωμετρία του σύνθετου παραβολικού συγκεντρωτικού μέσου, όπου σε αυτήν την περίπτωση έχουμε  $\theta_{\max, in} = 30^\circ$

### 6.1.2.2 Τύποι Συστημάτων Παρακολούθησης του Ήλιου (SOLAR TRACKERS)

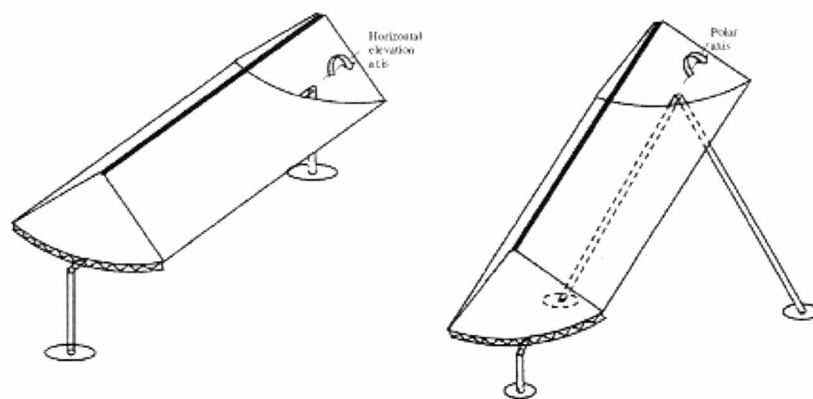
Τα συγκεντρωτικά συστήματα, για την επίτευξη σημαντικών λόγων συγκέντρωσης ή ακόμα και για την λειτουργία τους, απαιτούν την χρήση συστημάτων παρακολούθησης του ήλιου, τους ηλιακούς ιχνηλάτες (solar trackers). Η οπτική σημειακής εστίασης γενικά απαιτεί την ιχνηλάτιση του ήλιου σε δύο άξονες έτσι ώστε το σύστημα να είναι πάντα προσανατολισμένο, διότι μικρές αποκλίσεις από τον προσανατολισμό, είναι καταστροφικές για το σύστημα. Από μια μηχανική σκοπιά, η ιχνηλάτιση του ήλιου σε δύο άξονες είναι πιο σύνθετη από αυτή του μονού άξονα, αλλά τα συστήματα σημειακής εστίασης μπορούν να επιτύχουν πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις του ήλιου και επομένως την χρήση μικρότερης επιφάνειας απορροφητή. Τα κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα γραμμικής εστίασης χρειάζονται την ιχνηλάτιση κατά μήκος ενός άξονα έτσι ώστε το είδωλο να περιορίζεται σύμφωνα με τη γραμμή εστίασης. Τα γραμμικά συγκεντρωτικά συστήματα Fresnel υφίστανται οπτικές παρεκκλίσεις όταν ο ήλιος δεν είναι κάθετος στο επίπεδο των φακών. Αυτό περιορίζει γενικά τα γραμμικά συστήματα Fresnel στην χρήση ιχνηλάτων ηλίου διπλού άξονα.

Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι συστημάτων παρακολούθησης, του ήλιου. Δύο μεγάλες κατηγορίες διαχωρισμού των συστημάτων αυτών είναι βάση της κίνησής τους, δηλαδή μονού ή διπλού άξονα, ενώ μια δεύτερη κατηγοριοποίηση είναι βάση του άξονα συντεταγμένων που κινούνται (ύψος, αζιμούθιο, πολικός άξονας) και της δομής που χρησιμοποιούν. Οι σημαντικότεροι τύποι παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:





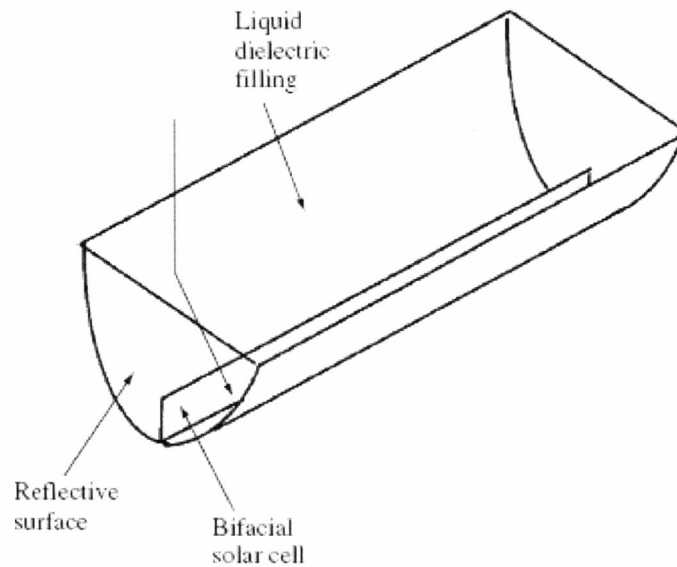
**Σχήμα 6.4:** Τύποι ιχνηλάτισης του ήλιου σε διπλό άξονα. **(α)** Ιχνηλάτης δύο αξόνων με την παρακολούθηση των συντεταγμένων του ύψους και αζιμούθιου που τοποθετείται σε ένα βάθρο. **(β)** Ρύθμιση παρακολούθησης περιστροφής-κλίσης που χρησιμοποιεί τον κεντρικό σωλήνα ροπής. **(γ)** Ρύθμιση παρακολούθησης περιστροφής-κλίσης που χρησιμοποιεί πλαίσια μονάδων. **(δ)** Ιχνηλάτης δύο αξόνων περιστροφικών επιφανειών.



**Σχήμα 6.5:** Τύποι ιχνηλατικής του ήλιου ενός άξονα. **(α)** Οριζόντιος ιχνηλάτης ενός άξονα με κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο. **(β)** πολικός ιχνηλάτης ενός άξονα με το κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο.



Αξίζει να σημειώσουμε πως υπάρχουν γεωμετρικές διατάξεις συγκεντρωτικών συστημάτων που δεν χρησιμοποιούν ιχνηλάτιση του ήλιου. Σε γενικές γραμμές, είναι δυνατό να υπάρξει συγκέντρωση χωρίς την χρήση ιχνηλάτισης του ήλιου. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν συνήθως την μη γραμμική οπτική όπως το σύνθετο παραβολικό συγκεντρωτικό σύστημα (CPC) που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.6.



**Σχήμα 6.6:** Μια από τις πολλές στατικές γεωμετρίες συγκεντρωτικών μέσων. Σε αυτήν την περίπτωση ένας διπλής όψης απορροφητής, είναι τοποθετημένος στο σημείο εστίασης ενός συστήματος CPC.

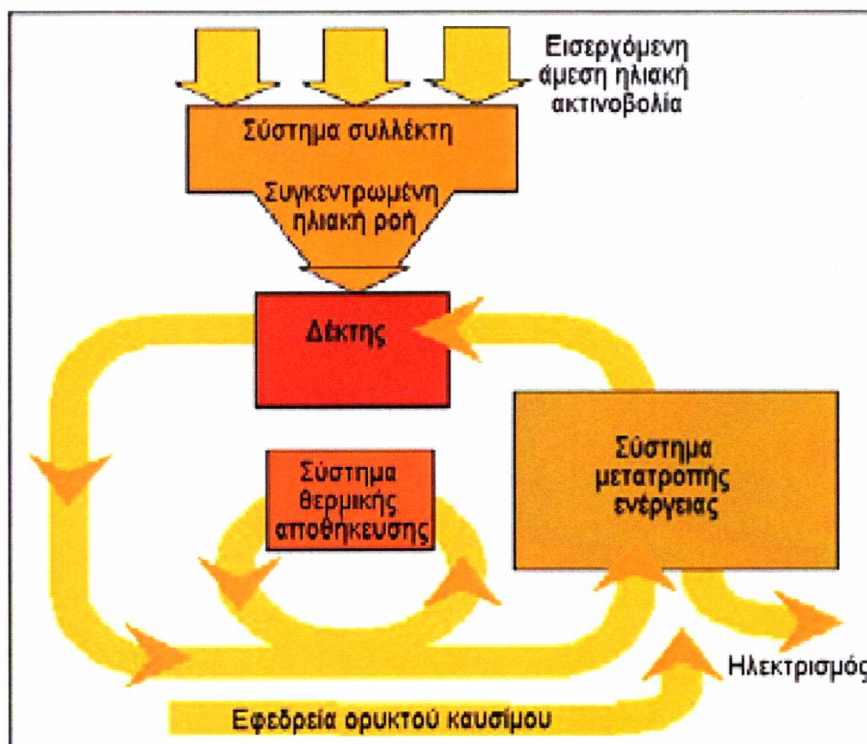
Η γοητεία των ακίνητων συγκεντρωτικών συστημάτων είναι πράγματι μεγάλη, λόγω της μη απαιτούμενης παρακολούθησης του ήλιου, με αποτέλεσμα την οικονομικά αποδοτικότερη χρήση τους για συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Δυστυχώς όμως, κανένα σχέδιο ακίνητων συγκεντρωτικών μέσων δεν έχει βρεθεί ακόμα όπου το προστιθέμενο κόστος του συγκεντρωτικού μέσου να είναι λιγότερο από το επιπρόσθετο ενεργειακό κέρδος που επιτυγχάνεται μέσω της συγκέντρωσης. Η ανακάλυψη και η ανάπτυξη ενός πρακτικού, οικονομικώς αποδοτικού ακίνητου συγκεντρωτικού μέσου θα ήταν μια σημαντική συμβολή για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών.

### 6.1.3 Τύποι Ηλιακών Συγκεντρωτικών Συστημάτων

Οι τεχνολογίες ηλιακής συγκέντρωσης είναι διατάξεις που συγκεντρώνουν την ηλιακή ενέργεια εστιάζοντας την ηλιακή ακτινοβολία σ' ένα σημείο ή μια γραμμή εστίασης. Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας, με χρήση της ηλιακής συγκέντρωσης, βρίσκονται ήδη στο στάδιο της εμπορευματοποίησης, και μονάδες ισχύος πολλών MW παράγουν τη φθηνότερη ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως τα τελευταία 15 έτη. Τα τελικά στάδια ηλεκτροπαραγωγής με χρήση συστημάτων ΗΣΣ είναι όμοια με αυτά της συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής, καθώς η τελική διεργασία ενεργειακής μετατροπής βασίζεται στη χρήση ατμού ή αερίου για την περιστροφή στροβίλων ή την κίνηση ενός εμβόλου σε μια μηχανή Stirling. Σε ένα σύστημα ΗΣΣ ο ατμός ή το θερμό αέριο παράγεται μέσω της συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Όλες οι τεχνολογίες ηλιακής θερμικής ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνουν έναν αριθμό βασικών σταδίων:

1. Συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός συστήματος συλλεκτών.
2. Συγκέντρωση (ή εστίαση) της ακτινοβολίας σε έναν δέκτη.
3. Μετατροπή της από το δέκτη σε θερμική ενέργεια.
4. Μεταφορά της θερμικής ενέργειας στο σύστημα ενεργειακής μετατροπής.
5. Μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό.



Σχήμα 6.7: Βασικές αρχές της τεχνολογίας Ηλεκτροπαραγωγής με Ηλιακή Συγκέντρωση.

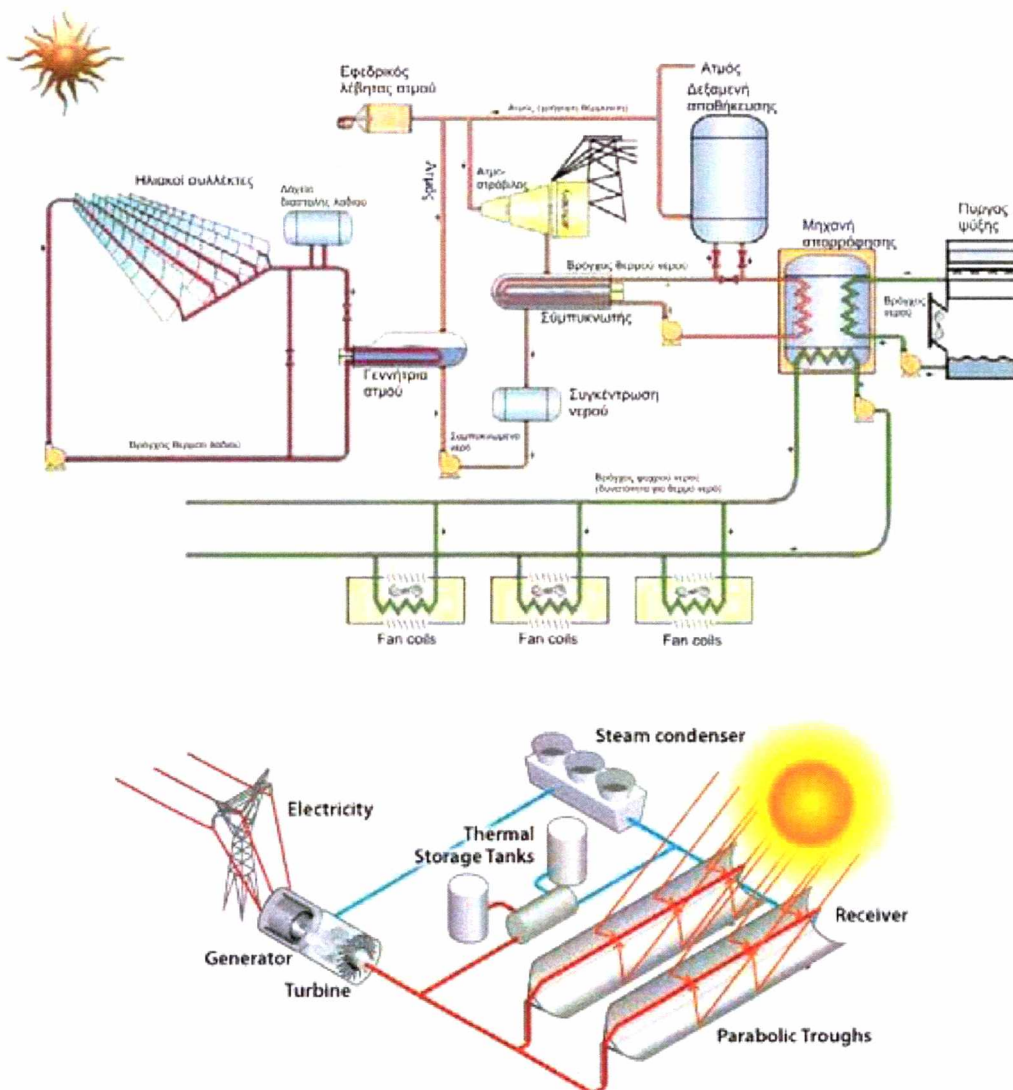
Πολλά τέτοια συστήματα είναι δυνατά, τα οποία μάλιστα μπορούν να συνδυάζονται με άλλες ανανεώσιμες και μη τεχνολογίες σε υβριδικά συστήματα. Ωστόσο θεωρείται, ειδικότερα από το πρόγραμμα SolarPaces της Διεθνούς Επιτροπής Ενέργειας (IEA), ότι οι τέσσερις πολλά υποσχόμενες αρχιτεκτονικές θερμικής ηλιακής ηλεκτροπαραγωγής, οι οποίες χαρακτηρίζονται από την τεχνική που χρησιμοποιείται για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας και είναι οι πιο διαδεδομένες, είναι:

- τα κοίλα παραβολικά κάτοπτρα,
- οι ηλιακοί πύργοι ισχύος,
- τα συστήματα δίσκου, και
- οι φακοί Fresnel.

### 6.1.3.1 Κυλινδροπαραβολικά Συστήματα

#### ➤ Περιγραφή Λειτουργίας του Συστήματος

Η τεχνολογία κοίλων παραβολικών κατόπτρων είναι αυτήν την περίοδο η πιο ώριμη τεχνολογία ηλιακής θερμικής ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό οφείλεται πρωτίστως σε εννέα μεγάλες εμπορικού επιπέδου ηλιακές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, η πρώτη εκ των οποίων έχει τεθεί σε εφαρμογή στην έρημο της Καλιφόρνιας Mojave από το 1984. Αυτές οι εγκαταστάσεις, που συνεχίζουν να λειτουργούν σε καθημερινή βάση, κυμαίνονται σε μέγεθος από 14 έως 80 MW, ενώ το συνολικό εγκατεστημένο δυναμικό τους είναι 354 MW. Τα μεγάλα πεδία των συλλεκτών παραβολικών κατόπτρων παρέχουν τη θερμική ενέργεια που χρησιμοποιείται για να παράγει ατμό για έναν κύκλο στροβίλων/γεννητριών κύκλου Rankine.



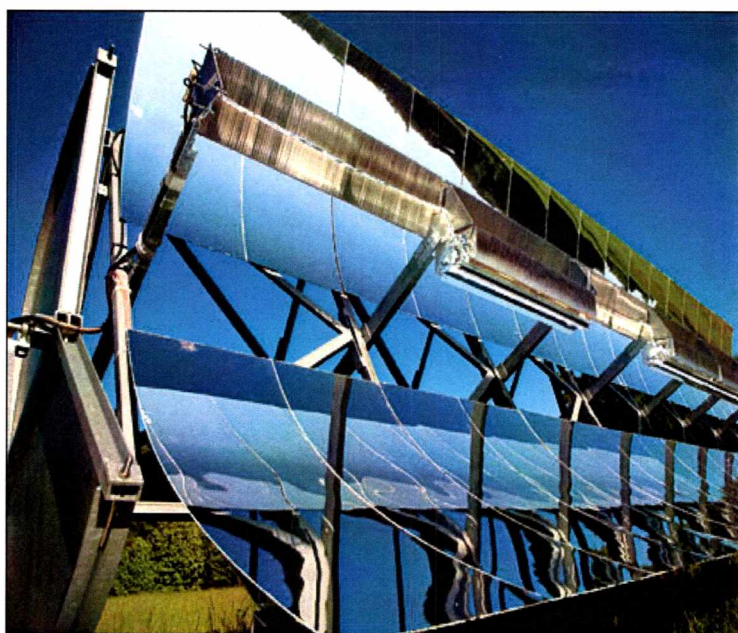
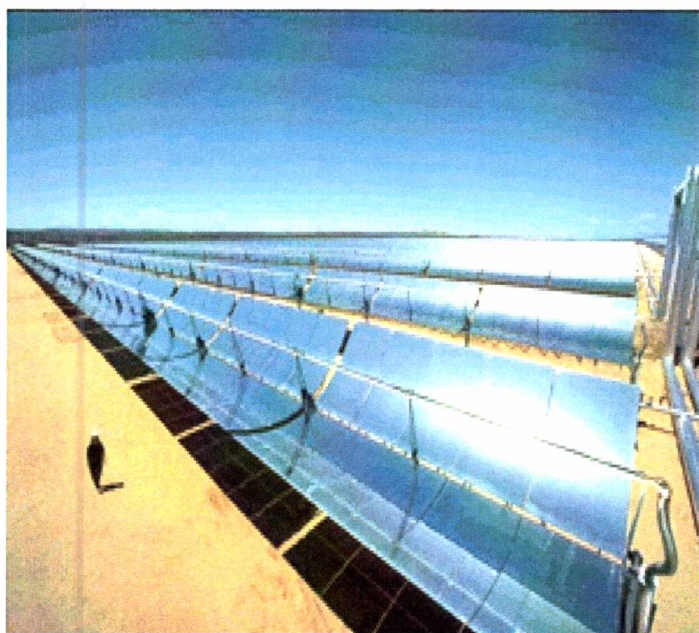
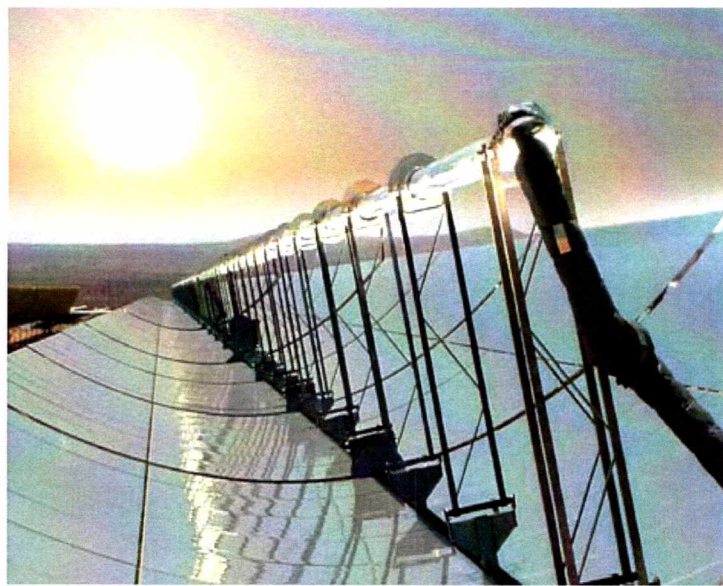
**Σχήμα 6.8:** Διαγράμματα λειτουργίας ενός σταθμού κυλινδροπαραβολικών ηλιακών συλλεκτών κύκλου Rankine



Τα σχήματα 6.8 παρουσιάζουν ένα διάγραμμα λειτουργίας που είναι αντιπροσωπευτικό της πλειοψηφίας των ηλιακών εγκαταστάσεων παραβολικών κατόπτρων που βρίσκονται σε λειτουργία σήμερα. Το ηλιακό πεδίο αποτελείται από πολλές παράλληλες σειρές ηλιακών συλλεκτών που ευθυγραμμίζονται οριζόντια ώστε να παρακολουθούν τον ήλιο κατά μήκος ενός άξονα - συνήθως κατά τον άξονα βορά-νότου. Κάθε ηλιακός συλλέκτης αποτελείται από μια ανακλαστική επιφάνεια παραβολικού σχήματος η οποία συγκεντρώνει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε έναν σωληνωτό δέκτη που είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστιακής γραμμής του κοίλου. Ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας θερμαίνεται καθώς κυκλοφορεί διαμέσου του δέκτη και καταλήγει σε μια σειρά εναλλακτών θερμότητας (γεννήτρια ατμού) που παράγουν υπέρθερμο ατμό περίπου στους 400°C. Ο υπέρθερμος ατμός τροφοδοτείται μετά σε έναν συμβατικό ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την έξοδο του στρόβιλου ο ατμός οδηγείται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας, τον συμπυκνωτή, στο δευτερεύον του οποίου ρέει μέσα σε σωλήνες ψυχρό νερό, με αποτέλεσμα την συμπύκνωση του ατμού σε κορεσμένο υγρό. Το ψυχρό νερό του συμπυκνωτή ρέει σε κλειστό κύκλωμα, ψυχόμενο σε πύργους ψύξης, οι οποίοι είναι και αυτοί εναλλάκτες θερμότητας με ψυκτικό μέσον τον αέρα του περιβάλλοντος. Το κορεσμένο υγρό νερό από το συμπυκνωτή συμπιέζεται από τις αντλίες τροφοδοσίας του λέβητα και οδηγείται στο διαχωριστή ατμού, απ' όπου η υγρή φάση του νερού οδηγείται στην γεννήτρια του ατμού και κλείνει έτσι ο κύκλος του νερού.

Ιστορικά, οι εγκαταστάσεις παραβολικών κατόπτρων έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια ως πρωταρχική πηγή για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι εγκαταστάσεις μπορούν να λειτουργήσουν σε πλήρη ισχύ χρησιμοποιώντας μόνο την επαρκή ηλιακή είσοδο. Κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, οι εγκαταστάσεις λειτουργούν συνήθως για 10 έως 12 ώρες ημερησίως σε ονομαστική ηλεκτρική έξοδο. Εντούτοις, μέχρι σήμερα, όλες οι εγκαταστάσεις είναι υβριδικές. Δηλαδή έχουν έναν εφεδρικό λέβητα ατμού, που λειτουργεί με ορυκτά καύσιμα και χρησιμοποιείται για να συμπληρώσει την ηλιακή έξοδο κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης παράλληλα με τη γεννήτρια ατμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν προαιρετικοί βοηθητικοί αναθερμαντές ορυκτών καυσίμων. Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον ατμολέβητα ορυκτών καυσίμων είναι περιορισμένο σε κάποια λογικά όρια. Τα όρια αυτά διαφέρουν από χώρα σε χώρα: 25% στη Καλιφόρνια, 15% στην Ισπανία, κανένα όριο στην Αλγερία. Στο σχήμα 6.9 φαίνεται επίσης ότι η θερμική αποθήκευση είναι μια προαιρετική δυνατότητα που μπορεί να προστεθεί για την κάλυψη των αναγκών τροφοδοσίας με ηλεκτρική ενέργεια.



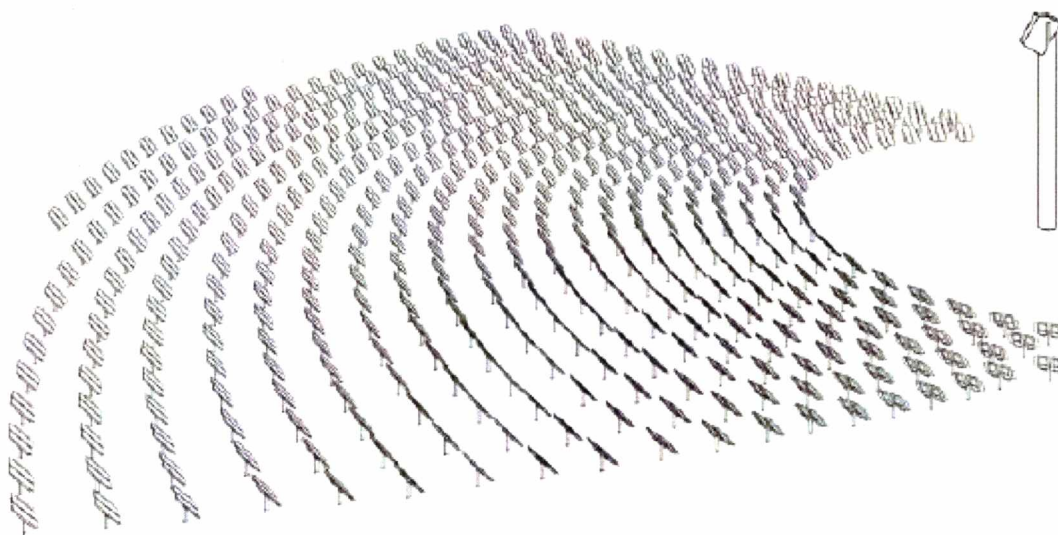


**Σχήμα 6.9:** Εγκατεστημένες μονάδες ηλιακών κυλινδροπαραβολικών συλλεκτών

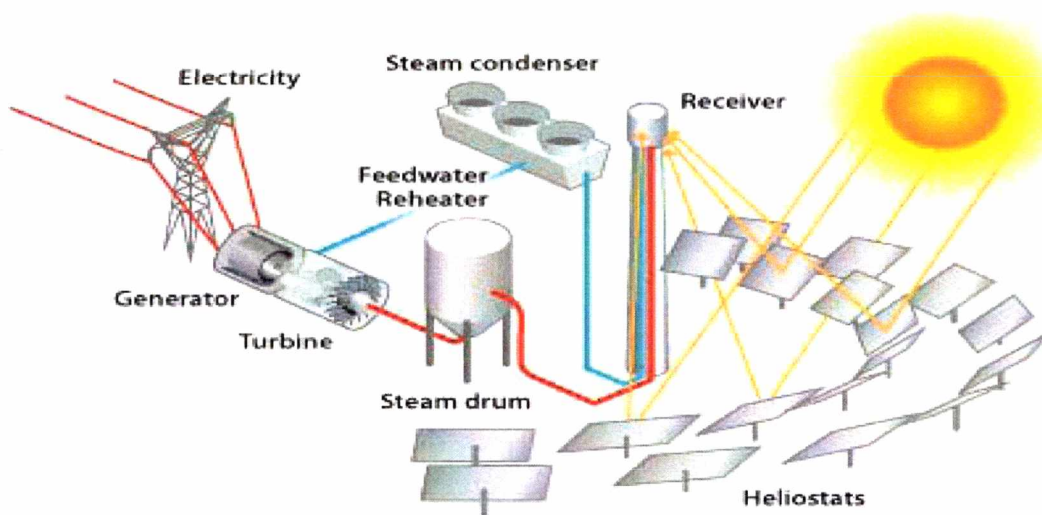


### 6.1.3.2 Συστήματα Ηλιακών Πύργων Ισχύος

Στους πύργους ισχύος, οι ηλιοστάτες παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου ώστε να ανακλάται και να συγκεντρώνεται το άμεσο ηλιακό φως σε έναν κεντρικό δέκτη (εναλλάκτη θερμότητας) τοποθετημένο στην κορυφή ενός πύργου (σχήμα 6.10). Εκεί η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική, καθώς θερμαίνεται ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Το τελευταίο διοχετεύεται προαιρετικά στο σύστημα αποθήκευσης και, εν τέλει, στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρισμό και τροφοδοτεί το δίκτυο.



**Σχήμα 6.10:** Πεδίο ηλιοστατών που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα σύστημα ηλιακού πύργου.



**Σχήμα 6.11 :** Εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας με ηλιακό πύργο ισχύος

Ο χαρακτηριστικός λόγος συγκέντρωσης των συστημάτων αυτών κυμαίνεται από 200 έως 1000. Ενώ το μέγεθος τους φτάνει από 10 ως 200 MW. Η υψηλή προσπίπτουσα ηλιακή ροή στο δέκτη (κατά μέσο όρο μεταξύ 300 και 1000 kW/m<sup>2</sup>) επιτρέπει τη λειτουργία σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες μέχρι και 1000°C. Τα συστήματα ηλιακού πύργου μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε συμβατικές θερμικές εγκαταστάσεις με ορυκτά καύσιμα για υβριδική λειτουργία. Ακόμα, λόγω της δυνατότητας για θερμική αποθήκευση, μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με υψηλούς ετήσιους συντελεστές δυναμικού (το ποσοστό του έτους που η τεχνολογία μπορεί να αποδώσει ηλιακή ενέργεια στην ονομαστική ισχύ). Δηλαδή σταθμοί πύργου ισχύος που περιλαμβάνουν σύστημα αποθήκευσης μπορούν να σχεδιαστούν για ετήσιο συντελεστή δυναμικού της τάξης του 60-70% (περίπου 4500 ώρες λειτουργίας ετησίως) όταν οι σταθμοί χωρίς αποθήκευση περιορίζονται σε αντίστοιχες τιμές κοντά στο 25%. Τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών συνοψίζονται στον πίνακα 6.1.

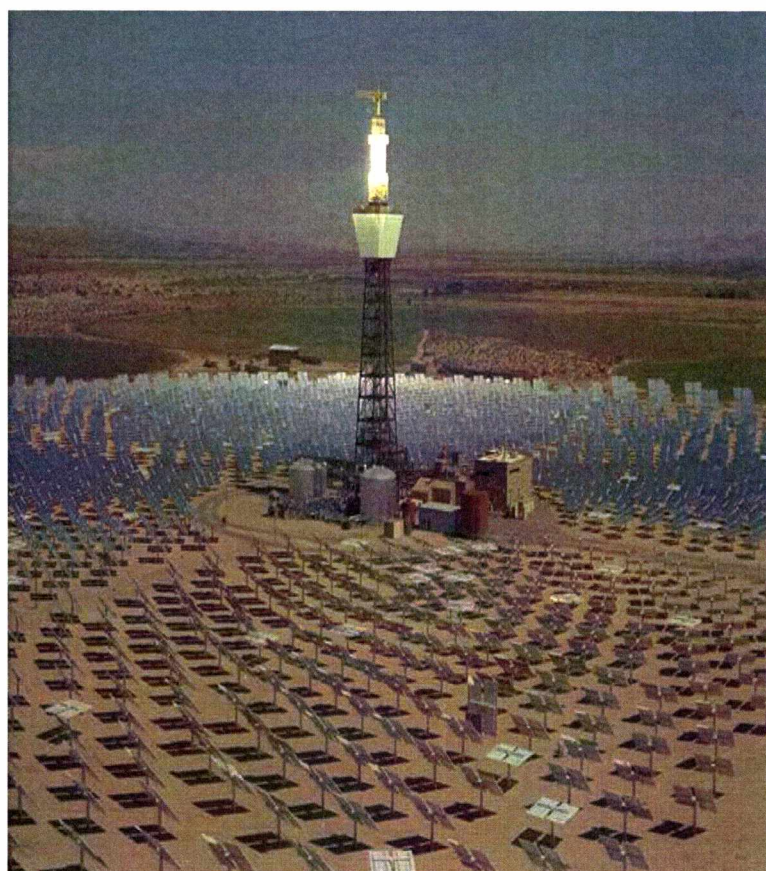
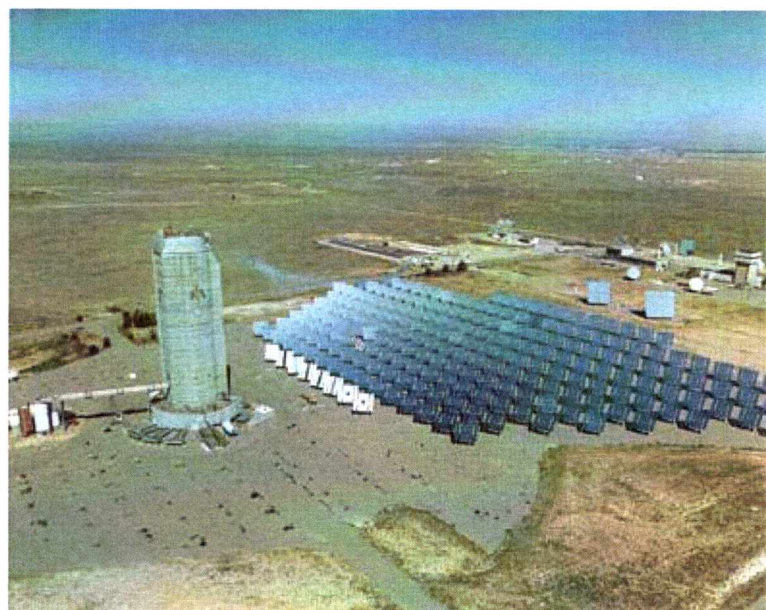
**Πίνακας 6.1:** Βασικά χαρακτηριστικά συστημάτων πύργου ισχύος.

Τυπικό μέγεθος	10-200MW <sup>a</sup>
Θερμοκρασία λειτουργίας	
Rankine	565 °C
Brayton	800 °C
Ετήσιος συντελεστής δυναμικού	20-77 % <sup>a</sup>
Απόδοση αιχμής	16-23 % <sup>a</sup>
Ετήσια καθαρή απόδοση	12-20 % <sup>a</sup>
Εμπορική κατάσταση	Επίδειξη κλιμακωτής αύξησης (10-30 MW)
Ρίσκο ανάπτυξης της τεχνολογίας	Μεσαίο
Διαθέσιμο μέσο αποθήκευσης	Νιτρικό άλας για δέκτες τηγμένου άλατος κεραμική επίπεδη επιφάνεια για δέκτες ατμοσφαιρικού αέρα
Υβριδικά σχέδια	Ναι
Κόστος επένδυσης	
\$ W <sup>-1</sup>	4.4-2.5 <sup>a</sup>

Οι τιμές με δείκτη “a” υποδηλώνουν την αναμενόμενη πρόοδο από το παρόν μέχρι το 2030.

Λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών τους, τα συστήματα ηλιακού πύργου ήταν σε θέση να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία θερμικών ρευστών, όπως αέρα, νερό/ατμό, τηγμένο νιτρικό άλας και υγρό νάτριο. Η επιλογή του θερμικού ρευστού σε συνδυασμό με την επιλογή της τεχνολογίας του δέκτη καθορίζουν και τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος.





Σχήμα 6.12: Εγκαταστάσεις ηλιακών πύργων ισχύος



### 6.1.3.3 Παραβολικά Συστήματα Σημειακής Εστίας (Συστήματα Δίσκου/Μηχανής)

Στα συστήματα δίσκου/μηχανής ένας δίσκος παρακολουθεί τον ήλιο και συγκεντρώνει την άμεση ηλιακή ενέργεια σε έναν δέκτη στο εστιακό του σημείο, όπου απορροφάται και μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Μια θερμική μηχανή (συνήθως η μηχανή Stirling) μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική. Η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη βοήθεια μιας γεννήτριας που είναι ενσωματωμένη πάνω στο δέκτη. Οι δίσκοι παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου σε δύο άξονες και, για το λόγο αυτό, είναι τα πιο αποδοτικά συστήματα συλλεκτών, καθώς είναι συνεχώς στραμμένα προς τον ήλιο. Στο σχήμα 6.13 παρουσιάζεται ένα σύστημα δίσκου/μηχανής.

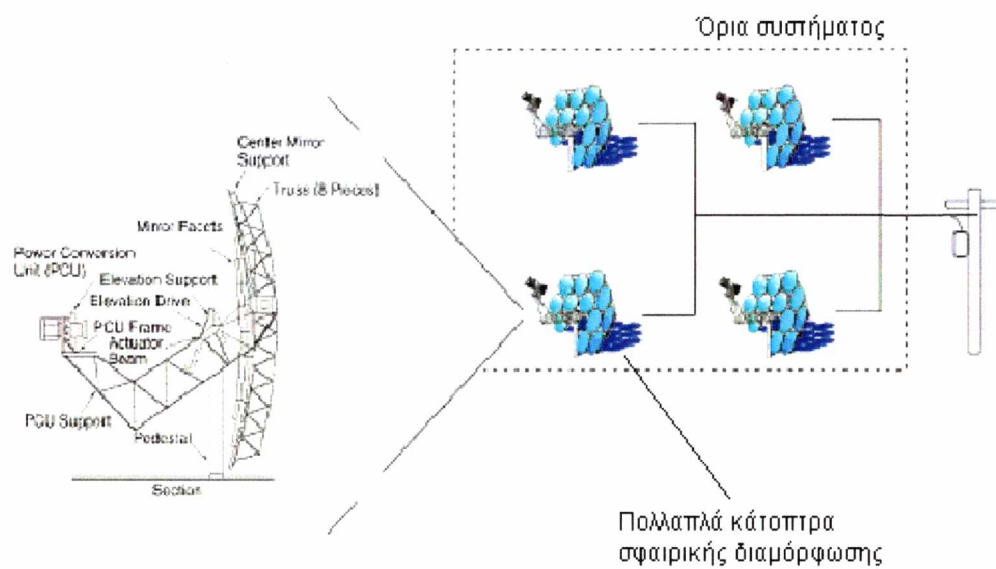
Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, δυνατότητα αρθρωτής, σπονδυλωτής κατασκευής (δηλαδή μια μονάδα μπορεί να αποτελείται από πολλαπλά κάτοπτρα-υπομονάδες), αυτονομία λειτουργίας, και από μια εγγενή υβριδική δυνατότητα, δηλαδή η ικανότητα να λειτουργούν είτε με ηλιακή ενέργεια είτε με ορυκτά καύσιμα είτε και με τα δύο μαζί. Από όλες τις ηλιακές τεχνολογίες, ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό έχει αναφερθεί στα συστήματα δίσκου/μηχανής (29,4%), και για το λόγο αυτό έχουν το δυναμικό να καταστούν μια από τις λιγότερο ακριβές πηγές ανανεώσιμης ενέργειας. Η πολυσυναρτησιακότητα των συστημάτων δίσκου/μηχανής επιτρέπει την αυτόνομη χρήση τους για απόμακρες εφαρμογές ή την ομαδοποίησή τους για εφαρμογές ηλεκτροδότησης σε μικρά δίκτυα ή απομονωμένα σημεία του δικτύου. Τα συστήματα δίσκου μπορούν επίσης να λειτουργούν υβριδικά με κάποιο συμβατικό καύσιμο ώστε να παρέχουν εμπορεύσιμη ισχύ. Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται στο στάδιο της τεχνικής εξέλιξης και απομένουν κάποια προβλήματα προς επίλυση που αφορούν τις ηλιακές συνιστώσες και την εμπορική διαθεσιμότητα μιας τέτοιας θερμικής μηχανής ικανής να εκτίθεται σε ηλιακές ακτίνες.

Η **συνολική απόδοση** του συστήματος μπορεί να οριστεί ως:

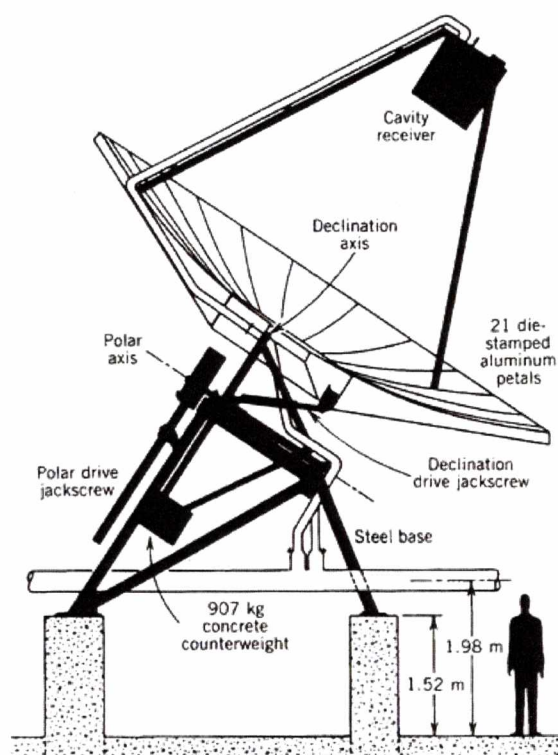
$$\eta = \eta_c \eta_R \eta_{Eng} \eta_{Gen} = \frac{P}{A_c I}$$

Όπου:

- $\eta_c$  είναι η απόδοση του συλλέκτη-συγκεντρωτικού μέσου ,
- $\eta_R$  είναι η απόδοση του δέκτη,
- $\eta_{Eng}$  είναι η απόδοση της μηχανής,
- $\eta_{Gen}$  είναι η απόδοση της γεννήτριας,
- $P$  είναι η παραγόμενη ισχύς,
- $A_c$  είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του συγκεντρωτικού μέσου, και  $I$  είναι η άμεση κάθετη ακτινοβολία.



**Σχήμα 6.13:** Σχηματική παράσταση ενός συστήματος δίσκου/μηχανής με τον συνδυασμό τεσσάρων μονάδων των 25 kW<sub>e</sub>.



**Σχήμα 6.14:** Σχέδιο και μορφή ενός παραβολικού ηλιακού συστήματος σημειακής εστίας



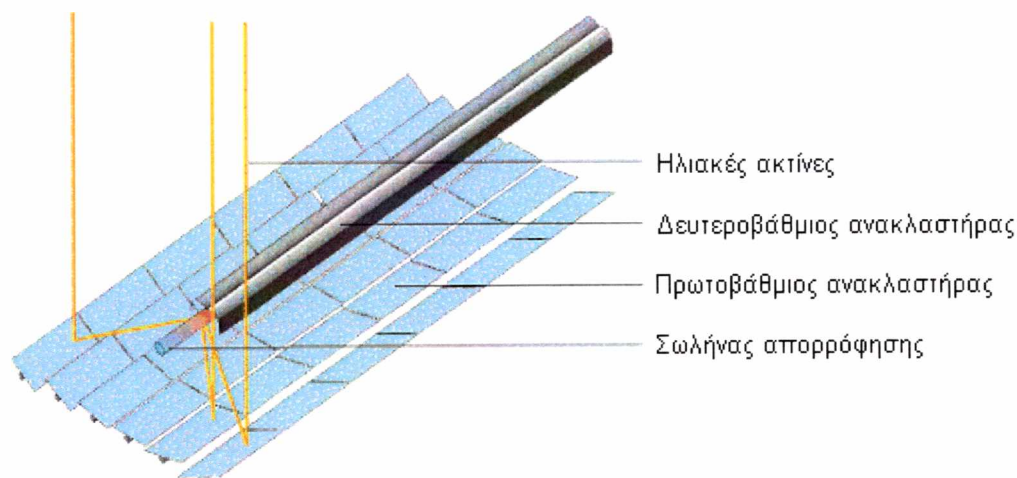
#### 6.1.3.4 Συστήματα FRESNEL

Το σύστημα του συλλέκτη κατόπτρων Fresnel έχει πολλές ομοιότητες με αυτό των παραβολικών κατόπτρων. Και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν ένα σωληνωτό δέκτη που είναι τοποθετημένος κατά μήκος της εστιακής γραμμής του συλλέκτη. Εντούτοις οι σημαντικές τεχνικές διαφορές που υπάρχουν στους συλλέκτες των δύο συστημάτων καθιστούν το σύστημα κατόπτρων Fresnel ένα ξεχωριστό συγκεντρωτικό ηλιακό σύστημα. Η βελγική εταιρεία Solarmundo είναι η πρώτη που εφάρμοσε την τεχνολογία αυτή και υποστήριξε τις λειτουργικές και οικονομικές δυνατότητες του συλλέκτη Fresnel. Οι εγκαταστάσεις Solarmundo βρίσκονται στη Λιέγη, στο Βέλγιο, και έχουν έκταση 2.500 m<sup>2</sup>. παρουσιάζονται οι θερμικές και οι γεωμετρικές ιδιότητες του συλλέκτη Solarmundo καθώς και η διαφορετική συμπεριφορά των συλλεκτών κατόπτρων Fresnel έναντι των παραβολικών κατόπτρων.

Ο συλλέκτης κατόπτρων Fresnel αποτελείται από πολλές παράλληλες σειρές ανακλαστήρων που συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη τοποθετημένο κατά μήκος των σειρών αυτών και σε αρκετά μέτρα ύψος. Οι ανακλαστήρες αυτοί είναι γνωστοί ως πρωτοβάθμιοι για να μη συγχέονται με ένα δευτεροβάθμιο ανακλαστήρα που είναι τοποθετημένος στο επάνω μέρος του δέκτη και κατευθύνει όλες τις εισερχόμενες ακτίνες στο σωλήνα απορρόφησης, (σχήμα 6.15).

Σύμφωνα με το πρότυπο Solarmundo οι πρωτοβάθμιοι, που κάθε ένας έχει πλάτος 0.5 m, δεν είναι απολύτως επίπεδοι αλλά έχουν μια πολύ μικρή καμπυλότητα. Ο συλλέκτης αποτελείται από 48 σειρές καθρεφτών (κατά πλάτος), πράγμα που "οδηγεί σε" ένα συνολικό πλάτος 24 m. Η αρχή Fresnel είναι πολύ απλή: Επειδή η σχετική κίνηση όλων των πρωτοβάθμιων καθρεφτών είναι ίδια κατά την παρακολούθηση του ήλιου, άπαξ τοποθετηθούν σωστά, η κίνηση τους μετά μπορεί να συζευχθεί μηχανικά. Αρκετές σειρές καθρεφτών οδηγούνται από μία μόνο μηχανή.

Ο δευτεροβάθμιος συγκεντρωτής όχι μόνο διευρύνει το στόχο για τους ανακλαστήρες Fresnel αλλά λειτουργεί και ως μόνωση κατά των απωλειών από το σωλήνα απορρόφησης. Το πίσω τμήμα του συγκεντρωτή αυτού καλύπτεται από μια αδιαφανή μόνωση, ενώ στο μπροστινό τμήμα ένα κατοπτρικό τζάμι μειώνει τις απώλειες θερμότητας από μεταφορά.

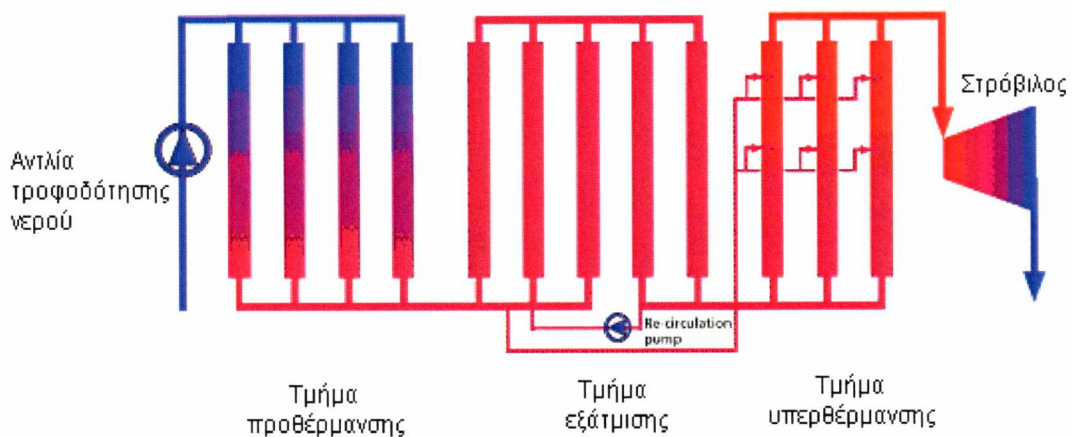


Σχήμα 6.15: Αρχή λειτουργίας του συλλέκτη fresnel

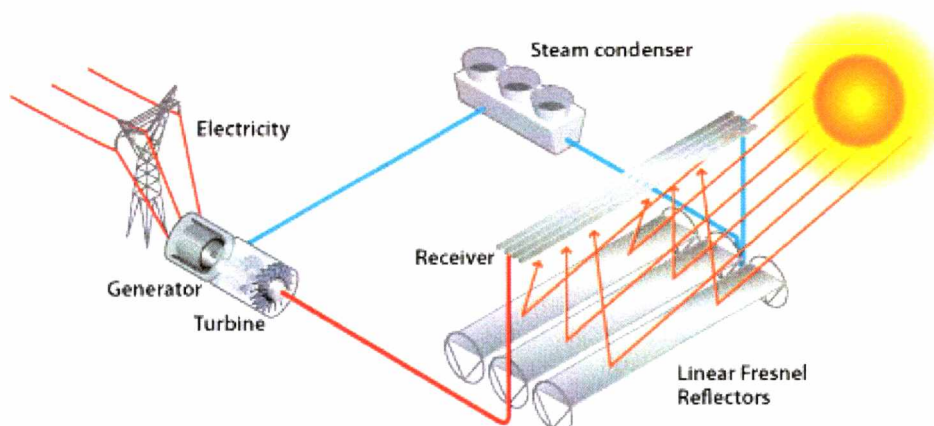
Ο σωλήνας απορρόφησης έχει εσωτερική διάμετρο 18cm και είναι τοποθετημένος κατά μήκος πάνω σε σταθερά μεταλλικά στηρίγματα (ράγες), χωρίς να απαιτούνται τόξα στήριξης όπως στα ηλιακά παραβολικά κάτοπτρα, αλλά και επιτρέποντας έτσι τη θερμική διαστολή του σωλήνα. Η συνολική μετακίνηση λόγω της διαστολής σε μια εγκατάσταση μήκους ενός χιλιομέτρου μπορεί να είναι πάνω από 6 μέτρα στο τέλος ενός σωλήνα.

Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που ρέει μέσα στο δέκτη είναι νερό. Ωστόσο, η παραγωγή του ατμού δε γίνεται σε εναλλάκτες θερμότητας αλλά μέσα στον ίδιο το σωλήνα απορρόφησης. Γίνεται δηλαδή άμεση παραγωγή ατμού.

Το βασικό σχέδιο ενός ολόκληρου πεδίου συλλεκτών για άμεση παραγωγή ατμού παρουσιάζεται στο σχήμα 6.16. Το ηλιακό πεδίο για ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 50 MW αναπτύσσεται σε 12 σειρές συλλεκτών κάθε μια μήκους 1000 m. Οι σειρές μπορούν να είναι εγκατεστημένες ή μια κοντά στην άλλη έτσι ώστε η χρήση εδάφους του ηλιακού πεδίου να είναι πρακτικά όχι μεγαλύτερη απ' ό,τι η έκταση των καθρεφτών. Οι σειρές συλλεκτών συνδέονται παράλληλα και σε σειρά και το ηλιακό πεδίο διαιρείται σε τρία τμήματα: της προθέρμανσης, της εξάτμισης και της υπερθέρμανσης.



Σχήμα 6.16: Η ροή στο πεδίο του συλλέκτη



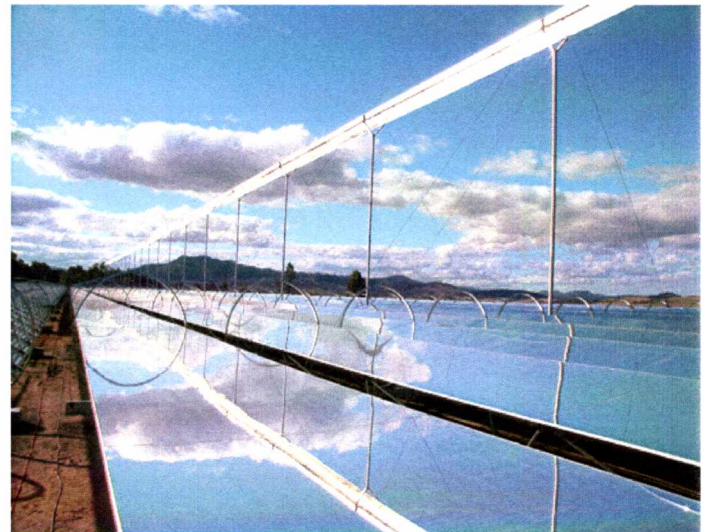
Σχήμα 6.17 : Γραμμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με το σύστημα κατόπτρων Fresnel



Τα βασικά **πλεονεκτήματα** του συλλέκτη με κάτοπτρα Fresnel, σε σύγκριση με τους συλλέκτες κυλινδροπαραβολικών κατόπτρων είναι:

- Φτηνά επίπεδα κάτοπτρα και απλό σύστημα παρακολούθησης του ήλιου.
- Σταθερός σωλήνας απορρόφησης χωρίς την ανάγκη για εύκαμπτες ενώσεις υψηλής πίεσης.
- Το πλάτος του συλλέκτη κατόπτρων Fresnel για έναν σωλήνα απορρόφησης μπορεί να είναι τρεις φορές το πλάτος των κυλινδροπαραβολικών κατόπτρων.
- Λόγω της άμεσης παραγωγής ατμού δεν υπάρχουν εναλλάκτες θερμότητας.
- Αποδοτική χρήση του εδάφους καθώς οι συλλέκτες μπορεί να είναι τοποθετημένοι ο ένας δίπλα στον άλλον.
- Εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής ακόμη και σε περιοχές με σχετικά χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία.

Τα πλεονεκτήματα αυτά οδηγούν σε μια μείωση του κόστους περίπου 50% για το ηλιακό πεδίο έναντι των κυλινδροπαραβολικών κατόπτρων. Εκτός από το μειωμένο κόστος του ηλιακού πεδίου, οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης είναι και αυτές ιδιαίτερα μειωμένες.



**Σχήμα 6.18:** Εγκατάσταση γραμμικών συστημάτων ανακλαστήρων Fresnel



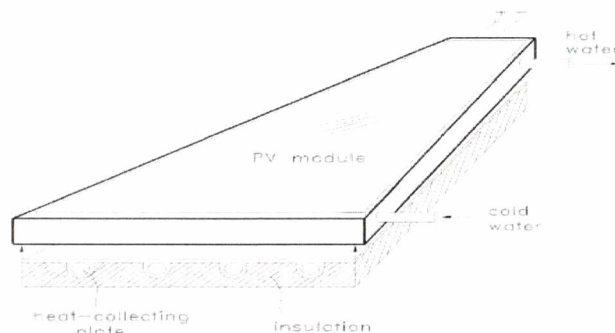
## 6.2 Υβριδικά Συγκεντρωτικά Συστήματα CPV/T & Τρόποι Ψύξης

Πέρα από τα συγκεντρωτικά συστήματα υψηλής συγκέντρωσης που αναφέρθηκαν πριν, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί από εταιρείες συγκεντρωτικά υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, για εγκατάσταση κυρίως στον κτιριακό τομέα. Τα φωτοβολταϊκά, από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, μόνο ένα μικρό μέρος μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ το υπόλοιπο μεταδίδεται προς το περιβάλλον με μορφή θερμότητας. Εκτός αυτού, με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας, η ηλεκτρική τους απόδοση μειώνεται. Με την ψύξη όμως του συστήματος μέσω κάποιου ρευστού (νερό ή αέρα), απάγεται η θερμότητα από το φωτοβολταϊκό, και το θερμό ρευστό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των θερμικών αναγκών. Αυτή είναι και η αρχή λειτουργίας των υβριδικών συστημάτων, τα οποία έχουν σαν σκοπό την όσο καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, με τις λιγότερες απώλειες βελτιώνοντας την συνολική ενεργειακή απόδοση. Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι ψύξης είναι με την χρήση νερού ή αέρα. Η ψύξη με νερό γίνεται με δύο τρόπους :

1. ψύξη μέσω εξάτμισης με σωλήνες θερμότητας (heatpipes) και
2. άμεση ψύξη

Η φυσική ή βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα, αν και είναι απλή και οικονομική, για την απομάκρυνση της θερμότητας δεν αποτελεί πρακτική λύση για χώρες όπως η Ελλάδα, αφού η θερμοκρασία του αέρα τους περισσότερους μήνες του χρόνου είναι μεγαλύτερη από 20°C αλλά και γιατί ο αέρας έχει μικρή πυκνότητα με αποτέλεσμα η ψύξη να μην είναι αποδοτική. Από την άλλη το νερό ως ψυκτικό μέσο, με την χρήση εναλλάκτη θερμότητας στη πίσω επιφάνεια του ΦΒ, είναι πιο αποδοτικό αφού το νερό του δικτύου έχει μια σταθερή θερμοκρασία γύρω στους 20 °C όλο το έτος, αποτελεί όμως μια διαδικασία ακριβότερη από την απαγωγή θερμότητας με την χρήση αέρα.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια το ρευστό απολαβής της θερμότητας να μην χρησιμοποιείται μόνο για την ψύξη του ΦΒ αλλά και για άλλες πρακτικές εφαρμογές, σ' αυτήν την περίπτωση λοιπόν συνιστούν τα φωτοβολταϊκά θερμικά συστήματα (ΦΒ/Θ ή PV/T) αέρα ή νερού. Αυτές οι διατάξεις αποτελούνται από τα ΦΒ πλαίσια και τις θερμικές μονάδες και μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό και θερμότητα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται τόσο ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αλλά και η ολική ενέργεια που αποδίδουν.



Σχήμα 6.19: Τυπικό φωτοβολταϊκό θερμικό (ΦΒ/Θ) σύστημα

Με την σημερινή τεχνολογία των (ΦΒ/Θ) συσκευών η συνολική απόδοση είναι μικρότερη από αυτή δύο ξεχωριστών συσκευών (ΦΒ και θερμική) για την περίπτωση ανύψωσης του νερού στο επίπεδο πρακτικής χρήσης ( 50°C – 60 °C). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμική απόδοση μιας μονάδας απαγωγής θερμότητας ενσωματωμένη σε ένα ΦΒ/Θ σύστημα είναι αρκετά μειωμένη από την αντίστοιχη τιμή μιας συμβατικής μονάδας μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα.

Όμως με κριτήριο την παραγωγή ηλεκτρισμού η παραγωγή ενέργειας που αποδίδεται ανά μονάδα επιφανείας είναι πολύ μεγαλύτερη στην περίπτωση της ΦΒ/Θ συσκευής από ότι στην περίπτωση των δύο ξεχωριστών συσκευών . Επίσης υπερτερεί σε εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών (π.χ θέρμανση κολυμβητικών δεξαμενών, προθέρμανση νερού, κ.λ.π) αλλά και από πλευράς χρησιμοποιούμενων υλικών και αισθητικής όπου οι δύο ξεχωριστές συσκευές διαφορετικής όψης έχουν αντικατασταθεί από μία συσκευή ενιαίας όψης. Στο σχήμα 6.19 φαίνεται ένα ΦΒ/Θ σύστημα.

Συμφωνά με μελέτες που έχουν γίνει φαίνεται ότι η ενσωμάτωση των μονάδων απαγωγής θερμότητας στα ΦΒ μειώνουν σημαντικά τον χρόνο απόσβεσης της επένδυσης. Χαρακτηρίστηκα αναφέρεται σε έρυνες που έχουν γίνει, ότι η ενσωμάτωση μιας μονάδας απαγωγής θερμότητας μπορεί να μειώσει τον χρόνο απόσβεσης έως και 2,5 φορές εάν αυτή ενσωματωθεί σε φωτοβολταϊκό σύστημα πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) και έως 4,5 στην περίπτωση που αυτή ενσωματωθεί σε φωτοβολταϊκό σύστημα άμορφου πυριτίου (a-Si). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα πολυκρυσταλλικού πυριτίου (pc-Si) έχουν σχεδόν το διπλάσιο κόστος ανά επιφάνεια ανοίγματος σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα άμορφου πυριτίου (a-Si). Ένα εύρημα από την ίδια μελέτη που παρουσιάζει ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι ενώ η χρήση του διάχυτου ανακλαστήρα αυξάνει την ηλεκτρική και θερμική απόδοση επιδρά ελάχιστα στο χρόνο απόσβεσης της επένδυσης.

Επιπλέον όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία με την χρήση υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος (ΦΒ/Θ) η απόδοση του συστήματος αυξάνει σημαντικά ενώ το κόστος της συνολικά παραγόμενης ενέργειας αναμένεται να είναι χαμηλότερο κατά αντιστοιχία με το κόστος της παραγόμενης ενέργειας ενός απλού ΦΒ.

Συνεπώς τα **πλεονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων (ΦΒ/Θ)** είναι τα ακόλουθα:

- Μείωση κόστους: Το κόστος ενός (ΦΒ/Θ) συστήματος είναι σχεδόν 25% λιγότερο από τα ξεχωριστά συστήματα ΦΒ και θερμικού συστήματος. Ενώ η ενσωμάτωση του συστήματος στο κτήριο επιτρέπει την μείωση του κόστους (κατασκευής του κτηρίου) αντικαταστάοντας στοιχεία της κατασκευής με τα ΦΒ.
- Η παραγωγή ενέργεια αυξάνεται ανά μονάδα επιφανείας.
- Αισθητική



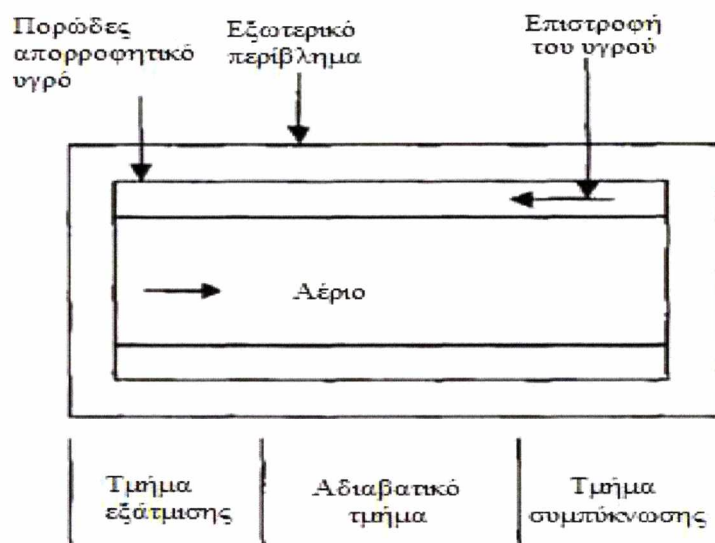
### 6.2.1 Ψύξη με εξάτμιση

Η μέθοδος της ψύξης με εξάτμιση είναι βασισμένη στη θεωρία του σωλήνα θερμότητας. Σε αυτήν την μέθοδο, η ψύξη της ΦΒ κυψέλης γίνεται με ελεγχόμενη κυκλοφορία αερίου που ρέει μέσα από τους σωλήνες θερμότητας. Το σχήμα του ΦΒ πάνελ είναι τετραγωνικής ή κυλινδρικής μορφής. Το επιλεγμένο ψυκτικό ρευστό απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης θερμότητας και εξατμίζεται. Τέλος, θα συμπυκνωθεί μέσα στο συμπυκνωτή και θα επιστρέψει σε υγρή μορφή στην ΦΒ κυψέλη μέσω των σωλήνων θερμότητας όπου και θα ξαναεξατμιστεί. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνεται η ποσότητα των ατμών που συμπυκνώνονται στον συμπυκνωτή.

Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιείται ο σωλήνας θερμότητας κυλινδρικής γεωμετρίας, αλλά ανάλογα τις απαιτήσεις μπορεί να έχουμε και σωλήνες θερμότητας τετραγωνικής ή ορθογώνιας γεωμετρίας. Ο σωλήνας θερμότητας είναι μια συσκευή με πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα, και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας από μια θέση σε μια άλλη με μικρή απόκλιση της θερμοκρασίας. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται ο σωλήνας θερμότητας φαίνονται στην εικόνα 4.1. Αποτελείται από τρία τμήματα τα οποία είναι:

1. Τμήμα εξάτμισης.
2. Τμήμα συμπυκνωτών.
3. Αδιαβατικό τμήμα που διαχωρίζει το τμήμα εξάτμισης και το τμήμα του συμπυκνωτή.

Η σχεδίαση και ο αριθμός των σωλήνων θερμότητας εξαρτώνται από την απαιτούμενη ποιότητα της θερμότητας που πρέπει να μεταφερθεί και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.



Σχήμα 6.20 Μέρη από τα οποία αποτελείται ο σωλήνας θερμότητας.



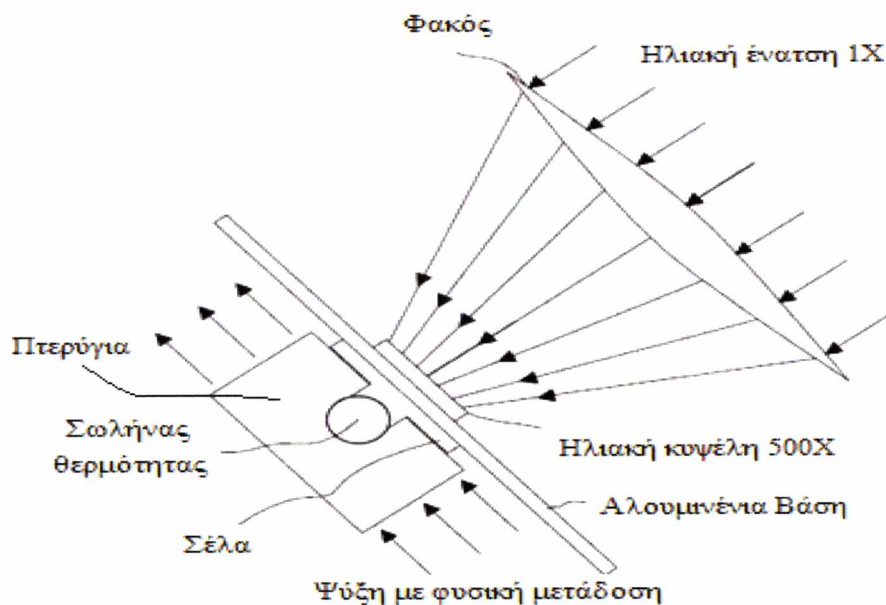
### 6.2.2 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά συστήματα συγκέντρωσης (CPV)

Τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα (PV) λειτουργούν με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ενός ηλίου, όπου ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ενός ηλίου είναι περίπου  $1000 \text{ W/m}^2$ , με ολόκληρη την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών να καλύπτεται με ηλιακές κυψέλες. Το υλικό των ΦΒ είναι ακριβό, έτσι το κόστος ολόκληρου του συστήματος είναι αρκετά υψηλό. Σαν εναλλακτική λύση, τα φωτοβολταϊκά συστήματα συγκέντρωσης (CPV) χρησιμοποιούν οπτικά στοιχεία χαμηλότερου κόστους όπως οι καθρέφτες μίνι-αντανάκλασης ή ο φακός Fresnel όπου συγκεντρώνουν ηλιακή ένταση από 200 έως 1000 ήλιους, με συνέπεια να έχουμε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με 200 έως 1000 φορές λιγότερο υλικό ημιαγωγών πυριτίου. Τα τετραγωνικά μέτρα του πυριτίου αντικαθίστανται με τετραγωνικά μέτρα φακών ή ανακλαστήρων χαμηλότερου κόστους τα οποία είναι και αρκετά αποδοτικότερα από τα συμβατικά ηλιακά κύτταρα πυριτίου.

Η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια που παραδίδεται στην ηλιακή κυψέλη είναι από 20 έως  $75 \text{ W/cm}^2$ . Η ενέργεια που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική πρέπει να απελευθερωθεί για να αποτρέψει την υπερβολική θέρμανση των κυττάρων και για να αυξήσει την αποδοτικότητα τους. Επομένως, η ψύξη ηλιακών κυψελών είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα του συστήματος CPV για τους εξής λόγους:

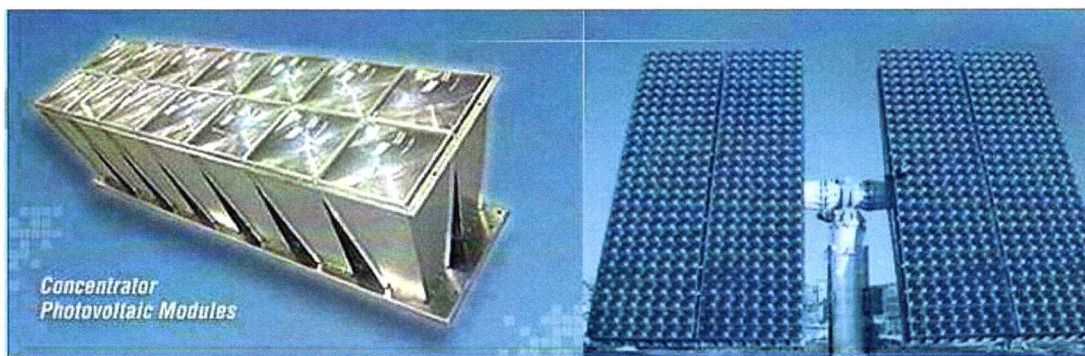
- Πρώτον γιατί η απόδοση των ηλιακών κυψελών είναι εξαρτώμενη της θερμοκρασίας των κυψελών διότι με μείωση της θερμοκρασίας έχουμε αύξηση της απόδοσης.
- Δεύτερον, γιατί το ηλιακό κύτταρο πρέπει να κρατηθεί κάτω από το σημείο τήξης της βάσης στην οποία στηρίζεται για να μην οδηγήσει το ΦΒ σύστημα συγκέντρωσης σε αποτυχία και
- τρίτον, η αξιοπιστία και η διάρκεια ζωής της ηλιακής κυψέλης είναι συνάρτηση του αριθμού θερμικών κύκλων και του μεγέθους της θερμότητας που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της.

Μια σχηματική αναπαράσταση του συστήματος CPV με έναν σωλήνα θερμότητας παρουσιάζεται στο σχήμα 6.20. Το ηλιακό κύτταρο τοποθετείται πάνω σε μια αλουμινένια βάση. Η ηλιακή ακτινοβολία πριν φθάσει στην ηλιακή κυψέλη έχει γίνει 500 φορές μεγαλύτερη μέσω του φακού Fresnel. Η συγκεντρωμένη ροή χτυπά τη ηλιακή κυψέλη, παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια που παράγεται περνά από την κυψέλη μέσω της σέλας, και από εκεί στον σωλήνα θερμότητας, έπειτα διανέμεται από το σωλήνα θερμότητας σε μια σειρά πτερυγίων, όπου και αφαιρείται με φυσική μετάδοση.



**Σχήμα 6.21:** Φωτοβολταϊκό σύστημα συγκέντρωσης με φακούς Fresnel.

Στο Σχήμα 6.22 φαίνεται ένα CPV τύπου GEN 1 της εταιρίας EMCORE. Όπως φαίνεται στα αριστερά της εικόνας, το σύστημα της EMCORE αποτελείται από πολλές ηλιακές κυψέλες, όπου η καθεμία έχει επιφάνεια  $1\text{cm}^2$ . Κάθε κυψέλη σφραγίζεται σε ένα κιβώτιο και τοποθετείται σε μια αλουμινένια βάση πάχους  $0,5\text{cm}$ . Όπως φαίνεται στη δεξιά εικόνα, οι κυψέλες τοποθετούνται σε ένα σύστημα δύο αξόνων όπου η κατεύθυνση τους είναι πάντα προς τον ήλιο. Τα ηλιακά πάνελ ακολουθούν τον ήλιο με περιστροφή γύρω από έναν κάθετο άξονα. Τα κύτταρα περιστρέφονται και γύρω από έναν οριζόντιο άξονα. Αυτό βοηθάει στη σχεδίαση των σωλήνων θερμότητας, εφόσον ο σωλήνας θερμότητας είναι οριζόντιος για όλες τις συνθήκες λειτουργίας, απλοποιώντας έτσι τη σχεδίαση τους.



**Σχήμα 6.22:** Φωτοβολταϊκό σύστημα συγκέντρωσης της EMCORE



Οι απαιτήσεις ψύξης των κυψελών δίνονται στον πίνακα 6.2. Η ψύξη γίνεται με φυσική μετάδοση θερμότητας, δεδομένου ότι η εξαναγκασμένη μετάδοση απαιτεί ανεμιστήρα, και η ισχύς που απαιτείται για να τροφοδοτήσει τον ανεμιστήρα μειώνει την συνολική απόδοση του συστήματος.

**Πίνακας 6.2** Απαιτήσεις ψύξης των ΦΒ κυψελών συγκέντρωσης

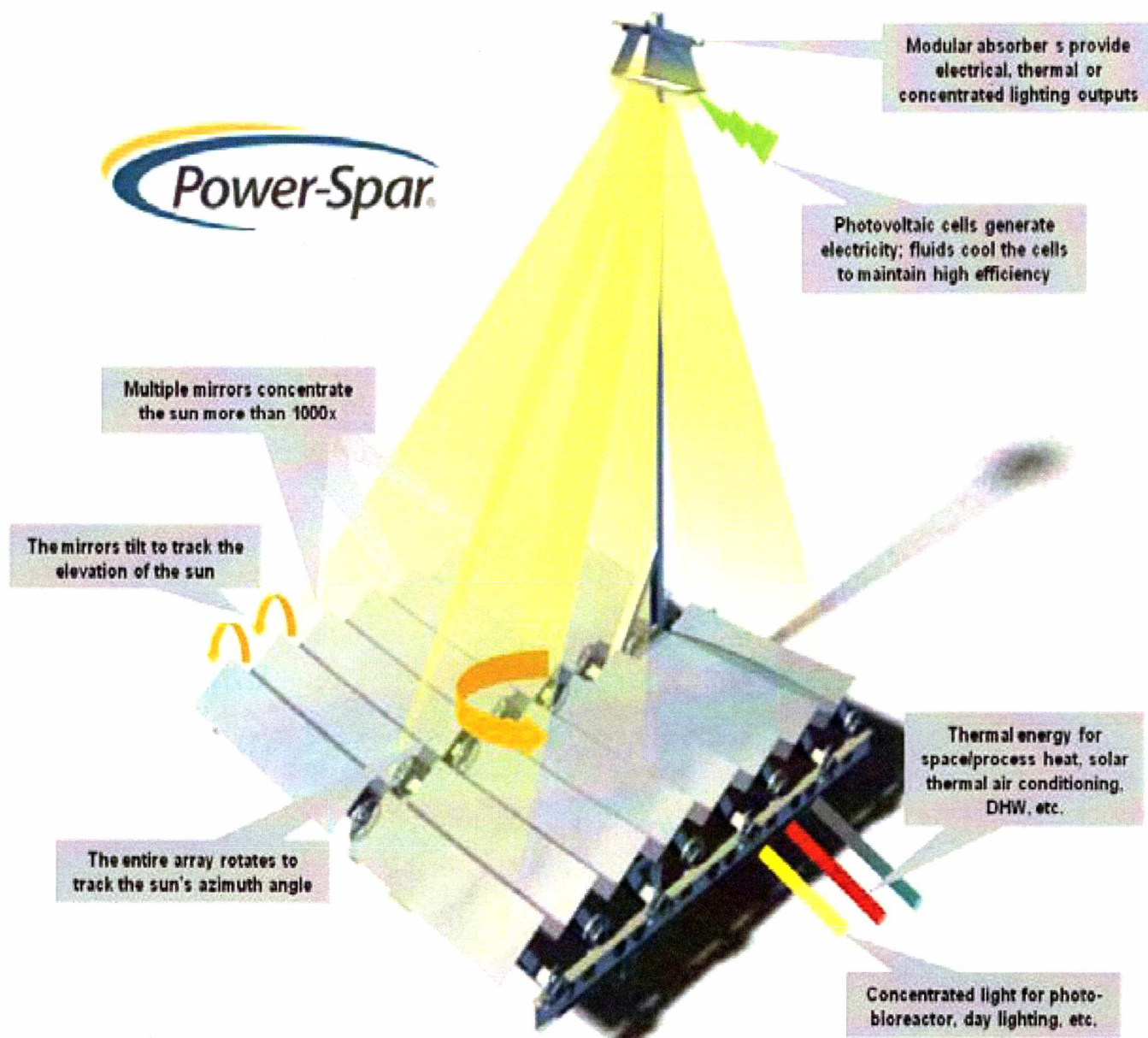
Διαστάσεις κελιού	1 cm x 1 cm
Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας	Περίπου 500 ήλιοι
Απαγωγή θερμότητας σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας	Περίπου 40 W
Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ σωλήνα θερμότητας και περιβάλλοντος σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας	25 °C
Διάρκεια ζωής	20 με 30 χρόνια
Τρόπος ψύξης	Παθητική

Ενώ η φυσική μετάδοση επιτρέπει την παθητική αφαίρεση της θερμότητας, η απαγωγή θερμότητας με φυσική μετάδοση είναι από 10 έως 100 φορές χειρότερη από την ψύξη με εξαναγκασμένη μετάδοση. Όσο αυξάνεται το μέγεθος του αποδέκτη θερμότητας (ψήκτρα), αυξάνονται και οι απώλειες μετάδοσης θερμότητας με αποτέλεσμα να πέφτει η απόδοση του CPV. Επειδή η φυσική μεταφορά απαιτεί μεγάλο αποδέκτη θερμότητας, οι απώλειες αυτές αναμένεται να είναι σημαντικές. Οι σωλήνες θερμότητας παρέχουν μια μέθοδο για να προσδώσουν ισοθεμικά τη θερμότητα σε όλα τα πτερύγια, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος.

**6.2.2.1 Συγκεντρωτικό Υβριδικό Σύστημα POWER SPAR**

Το συγκεντρωτικό σύστημα Power-Spar της εταιρείας Menova, κινείται σε δύο-άξονες, όπου μια μηχανή ρυθμίζει την κλίση των καθρεπτών σύμφωνα με τη γωνία του ύψους του ήλιου και μια δεύτερη μηχανή περιστρέφει ολόκληρη την διάταξη κατά την γωνία του αζιμούθιου. Κάθε ένας από τους ανακλαστικούς καθρέφτες είναι παραβολικός, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται συγκέντρωση στον απορροφητή μεγαλύτερη από 1000 ήλιους (Σχήμα 6.22). Το σύστημα αυτό είναι εμπορικά διαθέσιμο σήμερα σε τρεις διαφορετικές τύπους: ως υβριδικό φωτοβολταϊκό/θερμικό σύστημα (CPVT), ως συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σύστημα (CPV) και ως συγκεντρωτικό θερμικό σύστημα (CT).



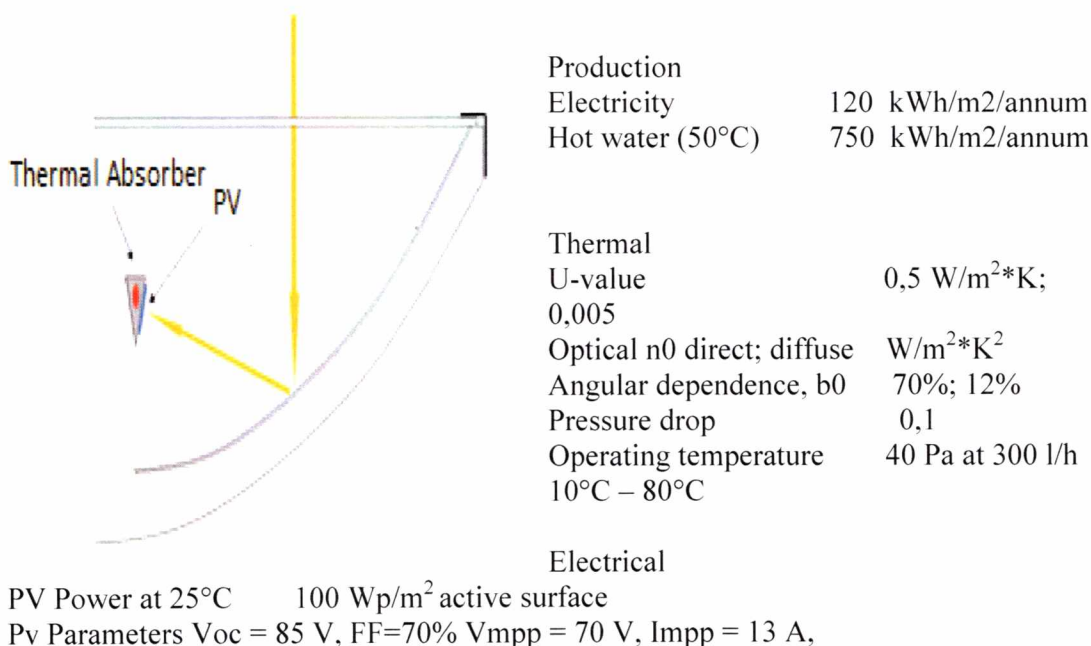


**Σχήμα 6.22:** Απεικόνιση της λειτουργίας ενός συγκεντρωτικού υβριδικού συστήματος Power-Spar, συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.

Η διαδικασία λειτουργίας του είναι απλή: ένα ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF) διαβρέχει τις πίσω επιφάνειες των κυττάρων PV για να τα ψήξει και για να διατηρήσει υψηλά την απόδοσή τους, με αποτέλεσμα να απάγει θερμότητα από τα κύτταρα PV και να θερμαίνεται. Εν συνεχεία, το θερμό ρευστό χρησιμοποιείται για την θέρμανση χώρων ή θέρμανση νερού για χρήση στο κτίριο. Με το συνυπολογισμό μιας ηλιακής θερμικής μονάδας κλιματισμού (STAC), η θερμική ενέργεια μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει ψύξη σε ένα κτίριο. Πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι και στο σύστημα CPVT και στο CPV, η θερμοκρασία του HTF κρατιέται όσο το δυνατόν χαμηλότερη για να μεγιστοποιείται η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος. Έτσι, οι θερμοκρασίες του ρευστού πρέπει να προσαρμόζονται ανάλογα με τις θερμικές απαιτήσεις της εγκατάστασης, γι αυτό και ένα κατάλληλο ρευστό μεταφοράς θερμότητας επιλέγεται για να δώσει κάθε φορά τις επιθυμητές θερμοκρασίες εξόδου.

### 6.2.2.2 Συγκεντρωτικό Υβριδικό Σύστημα ABSOLICON X10

Το συγκεντρωτικό σύστημα Absolicon X10 βασίζεται στην ιδέα μιας οικονομικώς αποδοτικής συσκευής με χρήση της συγκέντρωσης του ήλιου για παραγωγή μεγαλύτερων ενεργειακών ποσών και ταυτόχρονης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Η ανακλαστική επιφάνεια είναι σχήματος παραβολικού και στην εστία της βρίσκονται τα φωτοβολταϊκά κύτταρα που απορροφούν την συγκεντρωτική ακτινοβολία. Ανάμεσά τους, ρευστό διαβρέχει την επιφάνειά τους για την ψύξη και την καλύτερη λειτουργία τους, ενώ ταυτόχρονα, με την απαγωγή της θερμότητας, το ρευστό θερμαίνεται και αξιοποιείται για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της εγκατάστασης. Η σχηματική αναπαράσταση του συστήματος με τα τεχνικά χαρακτηριστικά, παρουσιάζεται παρακάτω:



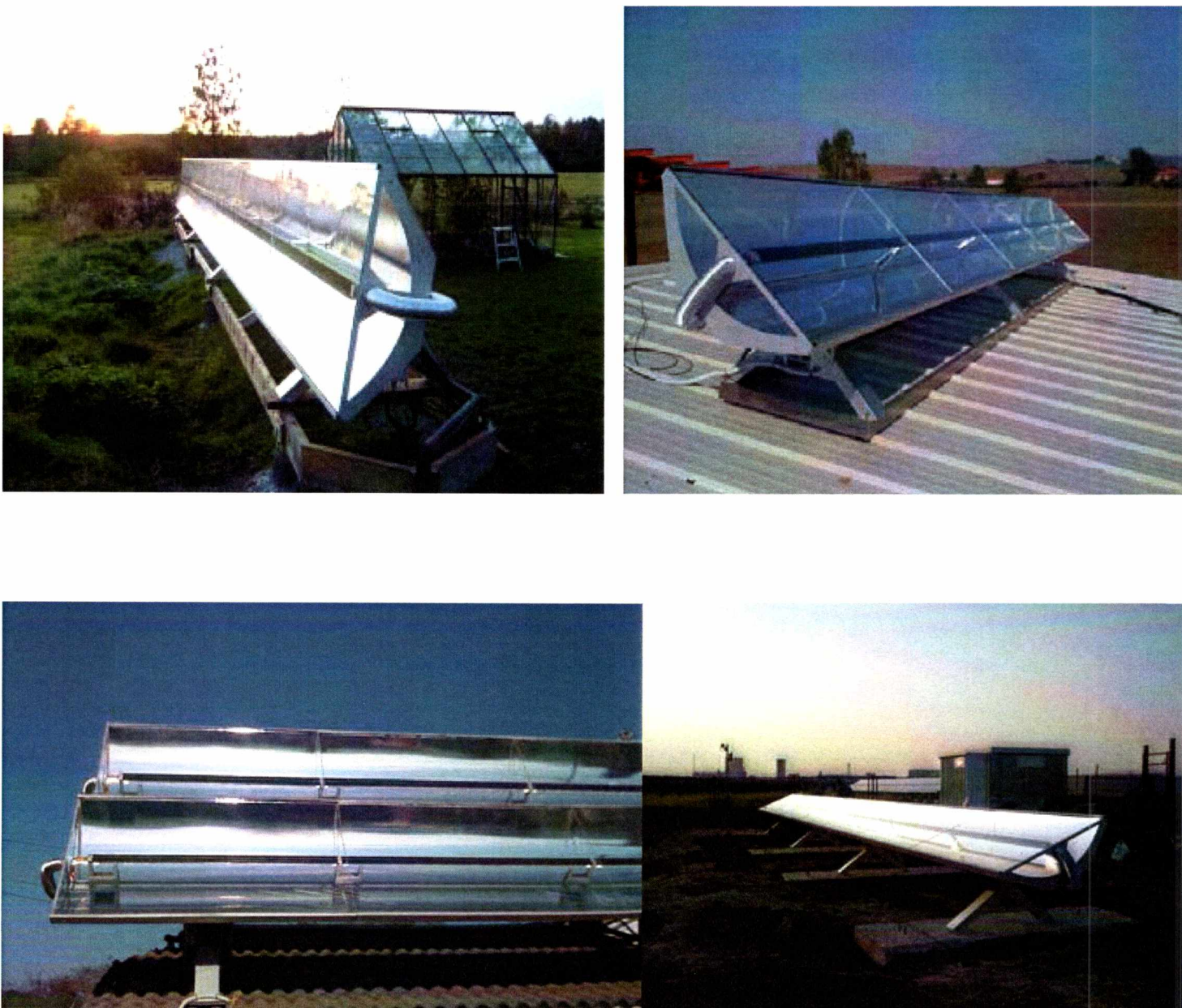
**Σχήμα 6.23:** Απεικόνιση της λειτουργίας και των τεχνικών χαρακτηριστικών ενός συγκεντρωτικού υβριδικού συστήματος Absolicon X10, συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.



Έτσι, με το X10, χρειάζεται μόνο ένα σύστημα προκειμένου να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Με αυτόν τον τρόπο το X10 βελτιστοποιεί τη χρήση του χώρου εγκατάστασης, παραδείγματος χάριν στις κορυφές στεγών όπου η ενότητα μπορεί να εγκατασταθεί, ενώ συγχρόνως μειώνονται εντυπωσιακά οι δαπάνες εγκατάστασης, με την χρήση λιγότερων καλωδίων και σωλήνων. Το σύστημα κινείται κατά ένα άξονα (γωνία ύψους του ήλιου ή ζενίθια γωνία), χρησιμοποιώντας μια συσκευή καταδίωξης του ήλιου και ελέγχου (PLC), ενώ με τη βοήθεια ενσωματωμένων αισθητήρων θερμοκρασίας, εξασφαλίζεται ότι το ηλιακό σύστημα δεν θα υπερθερμαθεί ποτέ.

Η X10 κατασκευή βελτιστοποιείται για τις εγκαταστάσεις μεγαλύτερες από 20m<sup>2</sup>. και προσφέρεται σε τέσσερα διαφορετικά μήκη 6,10,14 και 18 μέτρα. Αυτά τα διαφορετικά μήκη μπορούν να συνδεθούν σε σειρά για εγκαταστάσεις χωρίς περιορισμούς επιφάνειας για την κάλυψη μεγάλων θερμικών αναγκών, όπως παραδείγματος χάριν τα ξενοδοχεία, τα νοσοκομεία, τις βιομηχανίες, τα αθλητικά κέντρα, τους αερολιμένες και τις πολυκατοικίες.

**Σχήμα 6.24:** Εγκατεστημένες μονάδες του συγκεντρωτικού συστήματος Absolicon X10.





### 6.2.2.3 Κατηγορίες/Έρευνα ΦΒ Συστημάτων Συγκέντρωσης

Από έρευνα που έγινε από τους Royne, Dey, και Mills [2005], βρέθηκε ότι υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες κυττάρων CPV: 1. Με μονό κύτταρο, 2. Με γραμμικό συγκεντρωτή, και 3. CPV υψηλής πυκνότητας. Η ψύξη μέσω σωλήνων θερμότητας είναι κατάλληλη για την κατηγορία μονοκύτταρων CPV για υψηλό λόγο συγκέντρωσης, π.χ., για 1.000 ήλιους, και σε CPV με γραμμικούς συγκεντρωτές για χαμηλό λόγο συγκέντρωσης, πχ για 30 ήλιους. Ο πίνακας 4.2 συνοψίζει την έρευνα που έχει γίνει για την ψύξη των CPV μέσω σωλήνων θερμότητας.

➤ **Μονοκύτταρα CPV:** Οι Beach και White [1981] χρησιμοποίησαν έναν σωλήνα θερμότητας χαλκού με συγκολλημένα διαμήκη πτερύγια χαλκού για να αφαιρέσουν θερμότητα περίπου εφτακοσίων ήλιων, χρησιμοποιώντας το νερό ή την ακετόνη σαν ρευστό εργασίας. Το σύστημα ήταν ένας θερμοσίφωνας με λέβητα, και εξετάστηκε σε κάθετη διάταξη. Η αφαίρεση θερμότητας έγινε με φυσική μεταφορά. Η διαφορά θερμοκρασία μεταξύ της κυψέλης και του περιβάλλοντος ήταν περίπου 30°C. Σε μελέτη που πραγματοποίησε ο Farahat [2004] συγκρίνοντας το σωλήνα θερμότητας και την εξαναγκασμένη ψύξη με νερό για τα μονοκύτταρα συστήματα, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το σύστημα ψύξης με σωλήνες θερμότητας ήταν καλύτερο.

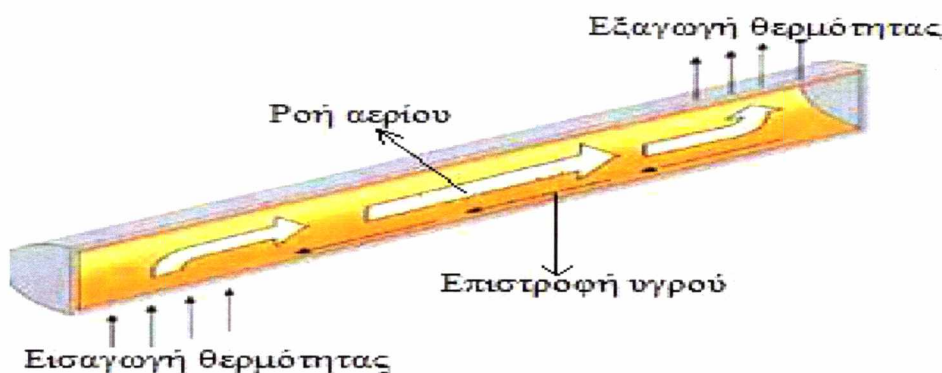
➤ **Γραμμικός συγκεντρωτής:** Οι Feldman, Kenney, και Edenburn [1981] εξέτασαν την ψύξη με σωλήνες θερμότητας σε έναν γραμμικό συγκεντρωτή με λόγο συγκέντρωσης περίπου εικοσιτεσσάρων ήλιων. Ο σωλήνας θερμότητας ήταν μια θερμοσιφωνική διάταξη ειδικής κατασκευής, με βενζόλιο ως ρευστό εργασίας. Η θερμότητα απορροφήθηκε από δύο πιάτα αλουμινίου με κατακόρυφα πτερύγια. Η θερμοκρασία του τμήματος εξάτμισης υπερέβη τη θερμοκρασία αντοχής του δηλαδή τους 140°C για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από 1 m/s. Οι Akbarzadeh και Wadowski [1996] έψυξαν έναν γραμμικό συγκεντρωτή με μια θερμοσιφωνική διάταξη από χαλκό, με λόγο συγκέντρωσης περίπου είκοσι ήλιων. Το ρευστό εργασίας ήταν η ψυκτική ουσία R-11 (τριχλωρομονοφθορομεθάνιο), λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας του, τους 40°C. Η ψύξη έγινε με φυσική μεταφορά. Το υλικό, το μέγεθος, και ο προσανατολισμός πτερυγίων δεν διευκρινίστηκαν.

**Πίνακας 6.3** Συγκεντρωτικά στοιχεία μεθόδων ψύξης που εφαρμόστηκαν στις κατηγορίες των CPV

Έρευνα που έγινε από τους	Υλικό σωλήνα θερμότητας	Ρευστό εργασίας	Ηλιακή ακτινοβολία	Τύπος CPV	Αποτελέσματα
Akbarzadeh και Wadowski (1996)	Χαλκός	Φρέον R-11	20 ήλιων	Γραμμικός Συγκεντρωτής	Η θερμοκρασία κρατήθηκε κάτω από τους 46°C
Feldman, Kenney, Και Edenburn (1981)	Από αλουμίνιο ο σωλήνας θερμότητας και τα ενσωματωμένα πτερύγια	Βενζόλη	24 ήλιων	Γραμμικός Συγκεντρωτής	Η ταχύτητα του ανέμου απαιτείται να είναι 1 m/s ή υψηλότερη
Beach και White (1981)	Από χαλκό ο σωλήνας θερμότητας και τα συγκολλημένα πτερύγια	Ακετόνη ή νερό	Μέχρι 700 ήλιους	Μονοκύτταρος	Εξετάστηκε η κάθετη διάταξη μόνο και η θερμοκρασία μεταξύ σωλήνα θερμότητας και αέρα ήταν περίπου 30°C

### 6.2.3 Σωλήνες Θερμότητας

Οι σωλήνες θερμότητας μεταφέρουν την θερμότητα του ρευστού εργασίας σε δύο φάσεις (Σχήμα 6.25 ). Ο σωλήνας θερμότητας είναι βασικά ένας σφραγισμένος σωλήνας, συνήθως κατασκευασμένος από θερμοαγώγιμο υλικό (π.χ. χαλκός ή αλουμίνιο). Η εισαγωγή θερμότητας ατμοποιεί το υγρό ρευστό εργασίας μέσα από το τμήμα εξάτμισης. Ο ατμός, που φέρνει τη λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης, ρέει προς το πιο ψυχρό τμήμα των συμπυκνωτών. Στο συμπυκνωτή, ο ατμός υγροποιείται και απορροφάται από ένα πορώδες υλικό απελευθερώνοντας θερμική ενέργεια. Σε υγρή μορφή ξανά, το ψυκτικό μέσο κατευθύνεται από το πορώδες απορροφητικό υλικό προς τη μεριά του σωλήνα θερμότητας με την υψηλότερη θερμοκρασία (βάση ψήκτρας). Η διαδικασία αλλαγής φάσης και η διφασική κυκλοφορία συνεχίζονται εφ' όσον διατηρείται η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του τμήματος εξάτμισης και του συμπυκνωτή. Οι σωλήνες θερμότητας είναι μια ιδανική συσκευή για τα συστήματα CPV.



**Σχήμα 6.25:** Σωλήνας θερμότητας (Heat Pipe)

Οι σωλήνες θερμότητας είναι παθητικές θερμικές συσκευές όπου η θερμότητα μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ χαμηλή πτώση τη θερμοκρασίας. Οι σωλήνες θερμότητας είναι επίσης μετασχηματιστές ροής θερμότητας. Παίρνουν τη θερμότητα σε πολύ υψηλή ροή (από την πίσω πλευρά της ηλιακής κυψέλης του CPV) και τη μεταφέρουν σε έναν αποδέκτη θερμότητας (ψήκτρα) με σημαντικά χαμηλότερη ροή θερμότητας (φυσική μεταφορά στο περιβάλλον). Επειδή ο σωλήνας θερμότητας λειτουργεί σχεδόν ισοθεμικά, το τμήμα του αποδέκτη θερμότητας θα λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά. Η χαρακτηριστική αντίσταση διάδοσης του αποδέκτη θερμότητας εξουδετερώνεται και επομένως, ο αποδέκτης θερμότητας μπορεί να έχει μικρότερο μέγεθος και κόστος.

### **6.2.3.1 Κατασκευαστικά Στοιχεία των Σωλήνων Θερμότητας**

Οι σωλήνες θερμότητας κατασκευάζονται από μια μεγάλη ποικιλία υλικών τόσο για το εξωτερικό περίβλημα όσο και για το εσωτερικό μέρος, ανάλογα με το ρευστό εργασίας. Τα υλικά κατασκευής και το ρευστό εργασίας πρέπει να είναι συμβατά, αυτό σημαίνει ότι το ρευστό λειτουργίας δεν πρέπει να διαβρώνει και να ενώνεται χημικά με τα μεταλλικά μέρη του σωλήνα θερμότητας και ειδικά του τμήματος που ελευθερώνει το μη-συμπυκνωμένο αέριο (NCG). Εάν δημιουργηθεί NCG, μια ποσότητα του θα μπλοκαριστεί στο τμήμα συμπύκνωσης και η απόδοση του σωλήνα θερμότητας θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου.

### **6.2.3.2 Υλικά Σωλήνων Θερμότητας**

Για τη περιοχή θερμοκρασιών που μας ενδιαφέρουν (από  $-20$  μέχρι  $100^{\circ}\text{C}$ ), τα δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά του εξωτερικού περιβλήματος και των εσωτερικών τοιχωμάτων είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Ο χαλκός έχει υψηλότερη πυκνότητα και θερμική αγωγιμότητα από το αλουμίνιο, αλλά είναι ακριβότερος. Ένα πλεονέκτημα του χαλκού είναι ότι ακόμα και αν η επιφάνεια του σκονιστεί η σκουριάσει συνεχίζει να έχει υψηλή αξιοπιστία. Πλεονέκτημα του αλουμινίου είναι ότι απομακρύνει εύκολα ποσότητες θερμότητας από το εσωτερικό του με χαμηλό κόστος.

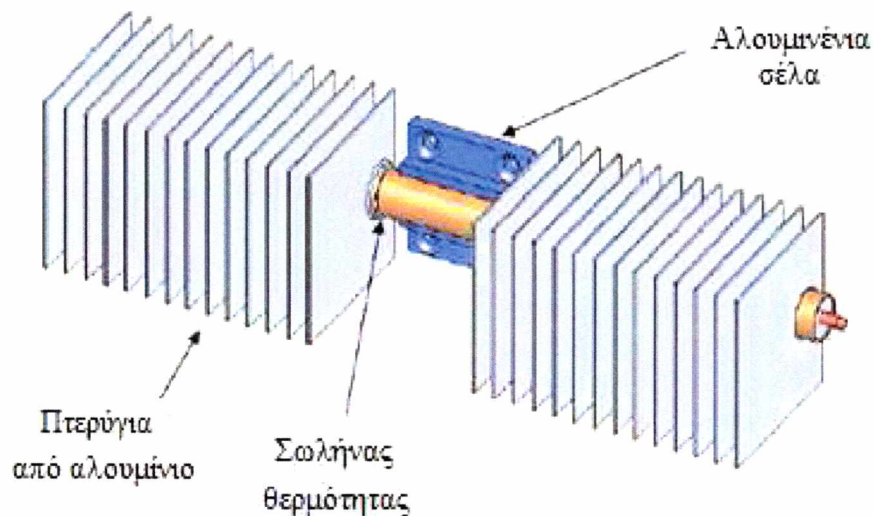


### 6.2.3.3 Ρευστά Λειτουργίας βάσει των Υλικών του Σωλήνα Θερμότητας

Η επιλογή του ρευστού εργασίας εξαρτάται από την επιλογή του υλικού των τοιχωμάτων και των αυλακιών. Αυτό γίνεται για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του σωλήνα θερμότητας. Οι σωλήνες θερμότητας για την ψύξη των CPV κατασκευάζονται για λειτουργία περίπου 30 ετών. Η μη συμβατότητα μεταξύ των δύο υλικών αναμένεται να δημιουργήσει διάβρωση και μη-συμπυκνωμένα αέρια (NCG), επίσης τα προϊόντα διάβρωσης που παράγονται στα αυλάκια του σωλήνα θερμότητας εμποδίζουν την καλή λειτουργία του και σε ακραίες καταστάσεις μπορεί να έχουμε διαρροή.

Οι συνδυασμοί για βέλτιστη λειτουργία, συνάρτηση της θερμοκρασίας είναι:

- Χαλκός/νερό
- Αλουμίνιο/αμμωνία



**Σχήμα 6.26:** Σωλήνας θερμότητας νερού χαλκού

Ωστόσο, και με τα δύο ρευστά έχουμε πιθανά προβλήματα. Το νερό παγώνει στους 0°C, και έτσι μεταφέρεται πολύ μικρή ισχύς σε θερμοκρασίες κάτω από 30°C. Τα συστήματα χαλκού/νερού πρέπει να σχεδιαστούν ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες σε περίπτωση που παγώσει το νερό. Η λειτουργία τους για θερμοκρασίες πάνω από 30°C δεν αποτελεί πρόβλημα, διότι το σύστημα θερμαίνεται πριν αρχίσει να λειτουργεί. Από την άλλη η αμμωνία έχει υψηλή πίεση ατμού. Η απόδοση των σωλήνων θερμότητας με χρήση αμμωνίας ως ρευστό εργασίας πέφτει σε θερμοκρασίες πάνω από τους 80°C.

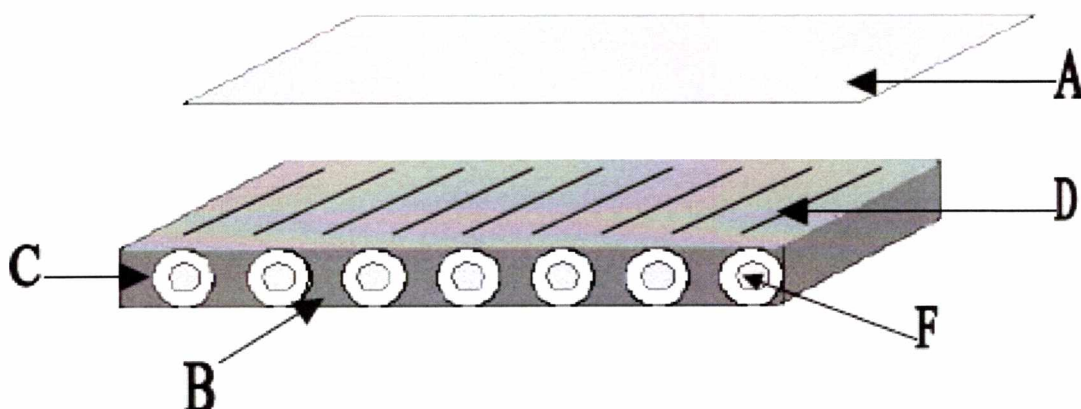
#### 6.2.4 Μέθοδος Υδρόψυξης (Άμεση Ψύξη)

Η θερμότητα είναι ο λόγος για την αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών κυψελών και της μείωσης της αποδοτικότητας τους. Σε ορισμένα φωτοβολταϊκά πάνελ η θερμότητα αφαιρείται από έναν αποδέκτη θερμότητας (ψήκτρα) και διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Μια άλλη λύση για την απαγωγή της θερμότητας είναι να ψυχθούν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες με τη βοήθεια νερού, ώστε να κρατηθεί η θερμοκρασία λειτουργίας τους μέσα σε κάποια όρια και παράλληλα να αυξηθεί η απόδοσή τους. Σε μια τέτοια περίπτωση, γίνεται εκμετάλλευση του ζεστού νερού που παράγεται από έναν συλλέκτη. Μια τέτοια διάταξη είναι ο συλλέκτης ΦΒ/Θ (PVT), ο οποίος είναι σε γενικές γραμμές ένας ηλιακός-θερμικός συλλέκτης με τις φωτοβολταϊκές κυψέλες να βρίσκονται συνδεδεμένες πάνω στη επιφάνεια ενός πάνελ. Τα κύρια πλεονεκτήματα του συλλέκτη ΦΒ/Θ είναι:

1. Μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας, λόγω του χαμηλότερου κόστους συσκευασίας και καλύτερη εκμετάλλευση της διαδικασίας μετατροπής της ενέργειας.
2. Με την ψύξη των φωτοβολταϊκών κυψελών και διατήρηση της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία λειτουργίας, αυξάνεται η αποδοτικότητα τους.
3. Χρησιμοποίηση της παραχθείσας θερμότητας για θέρμανση νερού ή άλλου μέσου ψύξης.

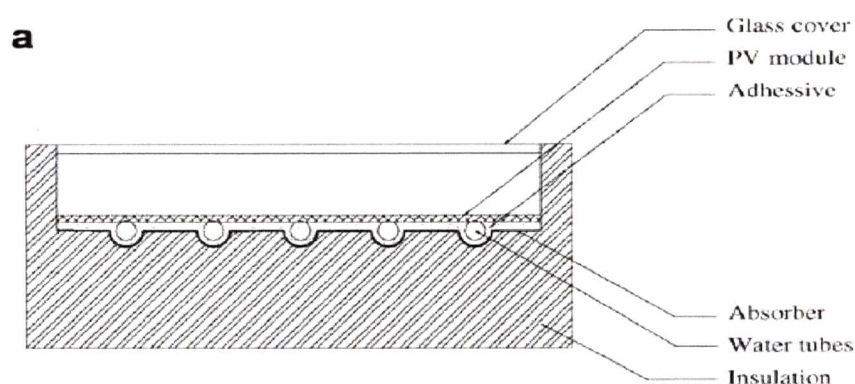
##### 6.2.4.1 Εισαγωγή στα Υβριδικά ΦΒ Συστήματα Νερού

Το σύστημα που χρησιμοποιεί υγρό σαν ψυκτικό μέσο, καλείται υβριδικό. Μετασχηματίζει την ακτινοβολία του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια και ταυτόχρονα απορροφά τη θερμότητα από το πάνελ του ΦΒ. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η θερμοκρασία του ΦΒ, επομένως αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης, και η θερμότητα που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη ενός μέρους των θερμικών απαιτήσεων ενός κτηρίου ή μιας βιομηχανικής εγκατάστασης.

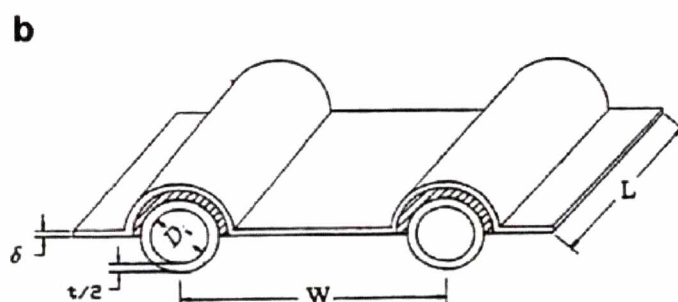


Σχήμα 6.27: Υβριδικό σύστημα

Από το σχήμα 6.27 φαίνεται ότι, το υβριδικό σύστημα κατασκευάζεται από ένα ΦΒ πάνελ «Α», έναν εναλλάκτη θερμότητας «Β» που αποτελείται από τους σωλήνες «C» και τα πτερύγια «D» σε επαφή με την πίσω πλευρά του ΦΒ πάνελ. Επίσης υπάρχει και θερμική μόνωση γύρω και πίσω από τον εναλλάκτη θερμότητας. Το ρευστό «F» περνά μέσα από τους σωλήνες του εναλλάκτη θερμότητας. Ολόκληρη η εγκατάσταση μπορεί να περιλαμβάνει και ένα σύστημα που να μπορεί να καταγράφει και να ελέγχει τη θερμοκρασία εισόδου του νερού. Το κρύο νερό μπορεί να αποθηκευτεί σε μια δεξαμενή και μέσω μιας αντλίας να γίνει η κυκλοφορία του νερού για την ψύξη του ΦΒ. Μια άλλη δεξαμενή χρησιμοποιείται για να αποθηκευτεί το ζεστό νερό που προέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας. Το κρύο νερό εισάγεται στην πρώτη δεξαμενή από το δίκτυο της ύδρευσης, έτσι θα πρέπει η θερμοκρασία της πρώτης δεξαμενής να βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα για την καλύτερη ψύξη του ΦΒ.



**Σχήμα 6.28:** : Θερμική μονάδα απολαβής θερμότητας ενσωματωμένη σε φωτοβολταϊκό σύστημα.



**Σχήμα 6.29:** Οι κυριότερες διαστάσεις της θερμικής μονάδας.

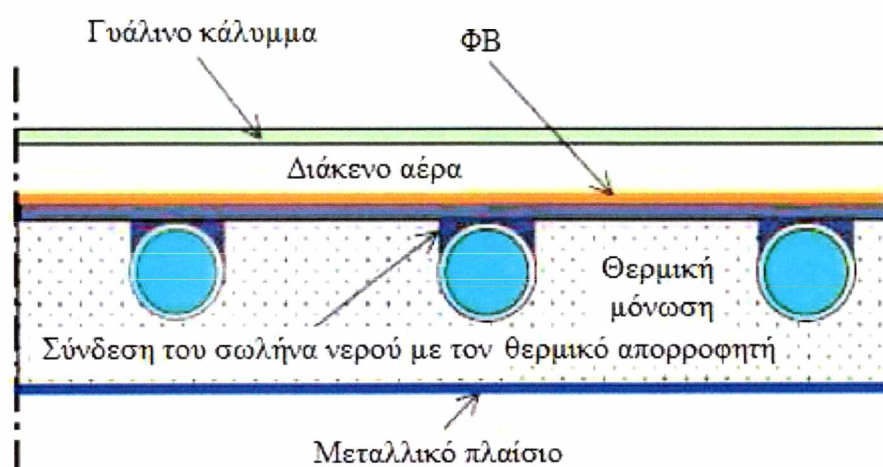


### 6.2.4.2 Βασικές Διατάξεις ΦΒ/Θ Συλλεκτών Νερού

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συλλεκτών που χρησιμοποιούν το νερό σαν μέσο απαγωγής της θερμότητας, όπου κάθε τύπος διαφέρει από τον άλλον στην μονάδα απαγωγής θερμότητας που χρησιμοποιεί, η οποία καθορίζει την θερμική και ηλεκτρική απόδοση του ΦΒ/Θ συλλέκτη. Οι κυριότεροι συλλέκτες νερού είναι:

#### 1. Οι Επίπεδοι Συλλέκτες (flat – plate collectors) :

Είναι οι πιο διαδεδομένοι και παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες. Η διαφορά τους έγκειται στα φωτοβολταϊκά πάνελ που είναι εγκατεστημένα στην κορυφή της απορροφητικής πλάκας όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.30.

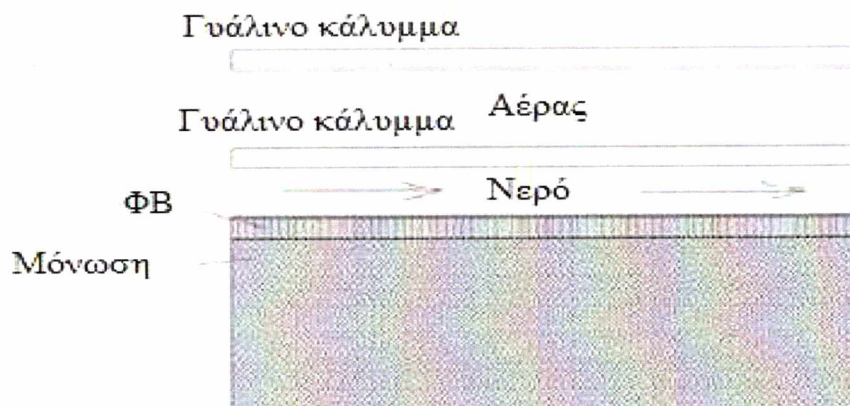


**Σχήμα 6.30:** Διάταξη επίπεδου συλλέκτη

Η θερμική μόνωση αυτών των συστημάτων μπορεί να βελτιωθεί τοποθετώντας περισσότερα γυάλινα καλύμματα, κάθε όμως επιπλέον κάλυμμα δημιουργεί επιπρόσθετη αντανάκλαση με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης, γι' αυτό και στην πράξη χρησιμοποιούνται επίπεδοι συλλέκτες με ένα ή το πολύ δύο καλύμματα.

#### 2. Οι ΦΒ/Θ Συλλέκτες με Κανάλια (Channel PV/T - collectors):

Σε αυτή την κατηγορία συλλεκτών έχουμε περιορισμό στον τύπο του υγρού που θα χρησιμοποιηθεί για την απαγωγή θερμότητας, διότι το απορροφητικό φάσμα του υγρού που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι αρκετά διαφορετικό από το απορροφητικό φάσμα του φωτοβολταϊκού ώστε να επιτρέπει στο φωτοβολταϊκό να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία.



**Σχήμα 6.31:** : Διάταξη ΦΒ/Θ συλλέκτη με κανάλια

Στις περισσότερες εφαρμογές γίνεται η χρήση νερού ως μέσο απαγωγής, το οποίο έχει μικρή επικάλυψη της απορροφητικής ικανότητας του φωτοβολταϊκού. Το μειονέκτημα αυτών των συλλεκτών είναι ότι εάν χρησιμοποιηθεί αρκετά πλατύ κανάλι, το γυάλινο κάλυμμα θα πρέπει να είναι μεγάλο και αρκετά παχύ για να αντέξει την πίεση του νερού με αποτέλεσμα η κατασκευή να είναι αρκετά βαριά και εύθραυστη. Γι'αυτό και έχουν γίνει δοκιμές των συλλεκτών αυτών με διάφανα και αδιάφανα ΦΒ πάνελ. Τα αδιάφανα πάνελ έχουν καλύτερη θερμική απόδοση αλλά υψηλότερο κόστος και επιπλέον έχουν καλύτερη αντοχή στην πίεση του νερού διότι μπορούν να προσαρτηθούν πάνω τους κατάλληλα ελάσματα. Παραλλαγή αυτού του τύπου των συλλεκτών είναι το νερό να ρέει κάτω από το φωτοβολταϊκό.

### 3. Οι Ελεύθερης Ροής ΦΒ/Θ Συλλέκτες (free flow PV/T collectors):

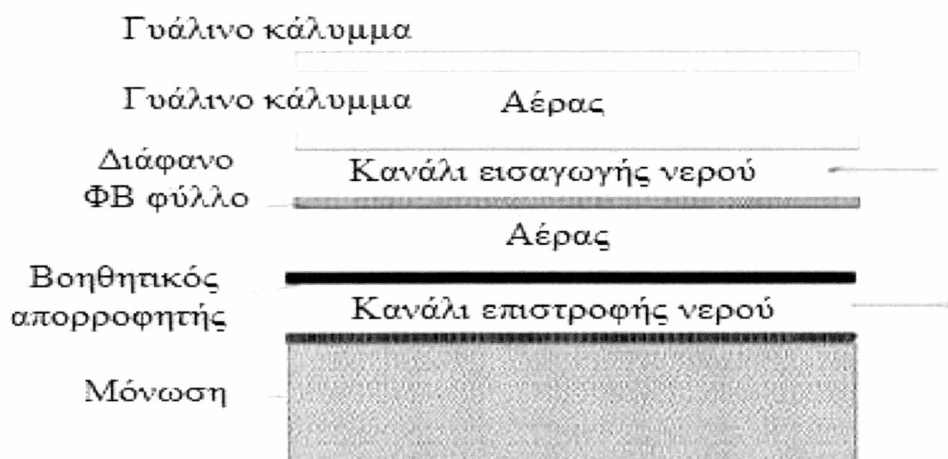
Σε αυτή τη κατηγορία συλλεκτών η ροή του νερού γίνεται πάνω από τον απορροφητή χωρίς περιορισμό, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.32. Επίσης μια άλλη διαφορά με τους συλλέκτες με κανάλια είναι ότι έχουν μόνο ένα γυάλινο κάλυμμα με αποτέλεσμα η αντανάκλαση και το κόστος των υλικών να μειώνεται και επιπλέον δεν υπάρχει πρόβλημα αντοχής της πίεσης από το επιπλέον γυάλινο κάλυμμα. Το υγρό που κυκλοφορεί πάνω από το ΦΒ θα πρέπει να είναι διάφανο σε σχέση με το ηλιακό φάσμα που ενεργοποιεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε κάθε ΦΒ πλαίσιο, όπως και στην περίπτωση των συλλεκτών με κανάλια. Η χρήση του νερού σαν μέσο απαγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφόσον η πίεση εξάτμισης δεν είναι πολύ χαμηλή. Το μειονέκτημα τους είναι οι αυξημένες θερμικές απώλειες λόγω εξάτμισης οι οποίες αυξάνονται με αύξηση της θερμοκρασίας.



**Σχήμα 6.32:** :Διάταξη ελεύθερης ροής ΦΒ/Θ συλλέκτη.

#### 4. Οι ΦΒ/Θ Συλλέκτες Διπλής Απορρόφησης (two absorber PV/T collectors):

Σε αυτούς τους συλλέκτες έχουμε δύο απορροφητές, τον ρόλο του κύριου απορροφητή παίζει ένα διάφανο φωτοβολταϊκό φύλλο και τον ρόλο του βοηθητικού απορροφητή παίζει μια μαύρη μεταλλική πλάκα όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.33.



**Σχήμα 6.33:** ΦΒ/Θ συλλέκτης διπλής απορρόφησης

Οι συλλέκτες αυτού του τύπου αποτελούνται από δύο κανάλια το ένα πάνω στο άλλο, η εισαγωγή του νερού γίνεται από το πάνω κανάλι και η επιστροφή του από το κάτω. Με αυτό τον τύπο του συλλέκτη ασχολήθηκε ο Hendrie όπου και απέδειξε την υψηλή θερμική απόδοση του. Οι περιορισμοί στο βάρος των καναλιών ισχύουν και εδώ. Βελτίωση της απόδοσης αυτού του συστήματος μπορούμε να έχουμε με χρήση ενός διαφανού μονωτικού στρώματος ανάμεσα στο επάνω και κάτω κανάλι όπου με αυτό τον τρόπο μειώνονται οι θερμικές απώλειες, όμως αυτό μειώνει την ικανότητα του συλλέκτη.

#### 6.2.4.3 Περιορισμοί και Παραδοχές Υβριδικών ΦΒ/Θ Συστημάτων

Η φυσική κυκλοφορία αέρα αποτελεί μια απλή και χαμηλού κόστους μέθοδο για να αφαιρέσει τη θερμότητα από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και να κρατήσει την ηλεκτρική απόδοση σε ικανοποιητικό επίπεδο. Η εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα είναι αποδοτικότερη αλλά οι πρόσθετες ενεργειακές απαιτήσεις της αντλίας μειώνουν το καθαρό κέρδος του συστήματος σε ηλεκτρική ενέργεια. Η άμεση εξαγωγή της θερμότητας από την πίσω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού με τη χρήση κάποιου υγρού είναι αποτελεσματικότερος τρόπος ψύξης. Για να αποφύγουμε τα προβλήματα λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού, χρησιμοποιείται και ένας εναλλάκτης θερμότητας σε θερμική επαφή με την πίσω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού.



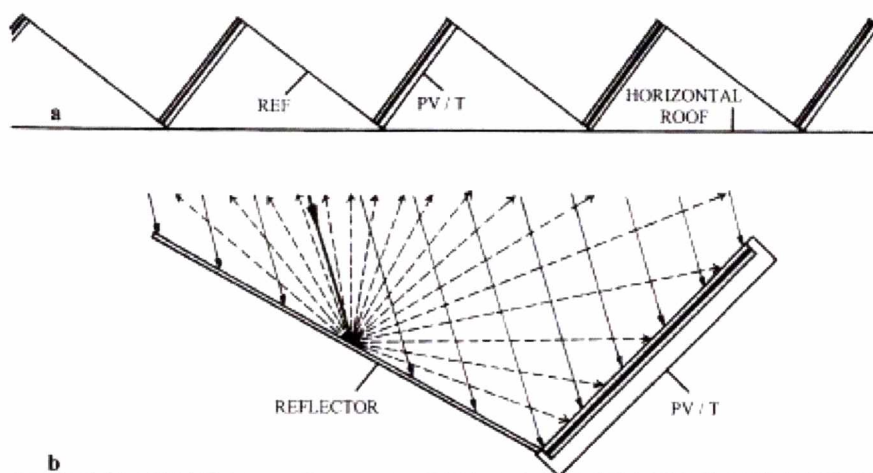
Η θερμοκρασία λειτουργίας της θερμικής μονάδας στα υβριδικά συστήματα ΦΒ/Θ έχει επιπτώσεις στην ηλεκτρική απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Για να μεγιστοποιήσουμε την ηλεκτρική παραγωγή, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο πρέπει να βρίσκεται στην βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία εξαρτάται από την εισερχόμενη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση ενός ρευστού για την απαγωγή της θερμότητας, το οποίο θα έχει κατάλληλη ροή μάζας (παροχή) ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη άνοδο της θερμοκρασίας του υγρού στην έξοδο του. Το ζεστό νερό που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρου, σε πισίνες ή σε βιομηχανίες. Μεγαλύτερες θερμοκρασίες μπορεί να φανούν πιο χρήσιμες για θέρμανση αλλά τότε μειώνεται η ηλεκτρική απόδοση του φωτοβολταϊκού.

Για το φωτοβολταϊκό σε περιοχές με χαμηλή θερμοκρασία και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, η θέρμανση χώρου είναι περισσότερο απαραίτητη για σχεδόν όλο το έτος και η ψύξη των ΦΒ με αέρα μπορεί να φανεί πιο αποδοτική έναντι της ψύξης με νερό. Επομένως το μέσο ψύξης εξαρτάται από την μέση τιμή της θερμοκρασίας της περιοχής, της ηλιακής ακτινοβολίας και τις ανάγκες που έχουμε για ηλεκτρική ή θερμική απόδοση.

Σε όλες τις εφαρμογές ΦΒ/Θ συστημάτων το συμπληρωματικό κόστος του θερμικού μέρους (εξαγωγή θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, το ρευστό λειτουργίας και ο τρόπος ροής του, οι σωλήνες κυκλοφορίας, οι αντλίες, η θερμική μονάδα αποθήκευσης νερού, κ.λπ.) πρέπει να συγκριθεί με το κόστος μια συμβατικής εγκατάστασης φωτοβολταϊκού, υπολογίζοντας το κέρδος της ηλεκτρικής παραγωγής που έχουμε με ψύξη, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το σύστημα και να το καταστήσει οικονομικά αποδοτικό. Η προστιθέμενη θερμική μονάδα πρέπει να είναι ανθεκτική, δεδομένου ότι η ψύξη του φωτοβολταϊκού μπορεί να δώσει στα ηλιακά κύτταρα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το κόστος της θερμικής μονάδας είναι το ίδιο για όλους τους τύπους των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούνται στα υβριδικά συστήματα, για την ίδια απαγωγή θερμότητας και για ίση επιφάνεια της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, αλλά η θερμική αποδοτικότητα διαφέρει ανάλογα τον τύπο του φωτοβολταϊκού. Τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου (a-Si) εμφανίζουν μεγαλύτερη θερμική απόδοση λόγω του ότι έχουν μικρότερη ηλεκτρική απόδοση και μικρότερες οπτικές απώλειες.

Στις σταθερές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται συνήθως σε παράλληλη διάταξη, σε απόσταση μεταξύ τους για να αποφευχθεί το φαινόμενο της σκίασης (shading). Καθώς οι ηλιακές ακτίνες πέφτουν πάνω στην οριζόντια επιφάνεια μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας δεν εκμεταλλεύεται από την ΦΒ εγκατάσταση. Αυτό συμβαίνει από την άνοιξη μέχρι το φθινόπωρο λόγω της μεγαλύτερης απόστασης του ήλιου από τη επιφάνεια της θάλασσας. Μέρος αυτή της ακτινοβολίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, γι'αυτό και έχουν προταθεί οι συμπληρωματικοί διάχυτοι ανακλαστήρες που τοποθετούνται μεταξύ των παράλληλων πλαισίων του φωτοβολταϊκού όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.34, αυξάνοντας την έκθεση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών. Οι διάχυτοι συμπληρωματικοί ανακλαστήρες επιτυγχάνουν μια ομαλότερη διανομή της πρόσθετης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των ΦΒ, η οποία μπορεί να είναι σχεδόν ομοιόμορφη εφόσον έχουν την κατάλληλη γεωμετρία

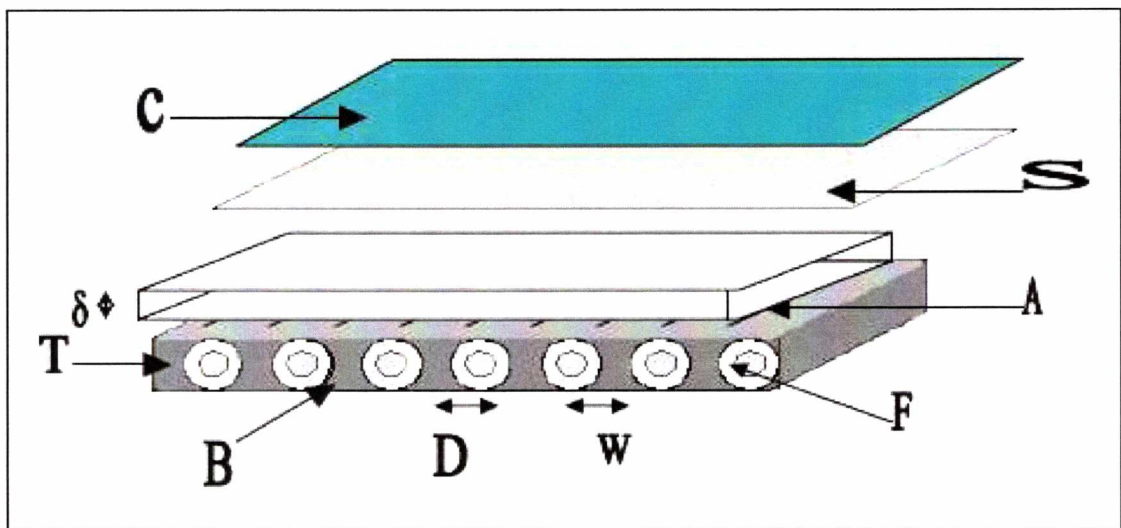
τα συστήματα των ανακλαστήρων. Η πρόσθετη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των ΦΒ είναι χαμηλότερη από αυτή που έχουμε με κατοπτρικούς ανακλαστήρες, αλλά οι διάχυτοι ανακλαστήρες είναι φτηνότεροι και μπορούν να συνδυαστούν πιο εύκολα με τυπικά μεγέθη ΦΒ. Στα υβριδικά ΦΒ/Θ συστήματα αυτή η πρόσθετη ηλιακή εισαγωγή μπορεί να αυξήσει τη θερμική και ηλεκτρική παραγωγή τους, κρατώντας τη θερμοκρασία των ΦΒ σε ένα λογικό επίπεδο. Η εισαγωγή συμπληρωματικών διάχυτων ανακλαστήρων στα υβριδικά ΦΒ/Θ συστήματα προτείνεται κυρίως για οικονομική βελτίωση της συνολικής εγκατάστασης.



**Σχήμα 6.34:** Συνδυασμός ΦΒ/Θ συστημάτων με επίπεδους διάχυτους ανακλαστήρες

#### 6.2.4.4 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Απόδοση των ΦΒ/Θ Συστημάτων

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών επηρεάζεται πέρα από φυσικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου και από λειτουργικούς και κατασκευαστικούς. Αυτοί οι παράγοντες είναι η ροή μάζας του ρευστού εργασίας, ο γεωμετρικός λόγος  $W/D$ , δηλαδή ο λόγος της απόστασης μεταξύ δύο σωλήνων προς την διάμετρο του σωλήνα, η χρήση ή όχι γυάλινου καλύμματος, η πρόσθετη τοποθέτηση συγκεντρωτή ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμική αγωγιμότητα του απορροφητή με το ρευστό. Η γενική διαμόρφωση ενός υδρόψυκτου συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 6.35.



**Σχήμα 6.35:** Βασικό μοντέλο υδρόψυκτου ΦΒ

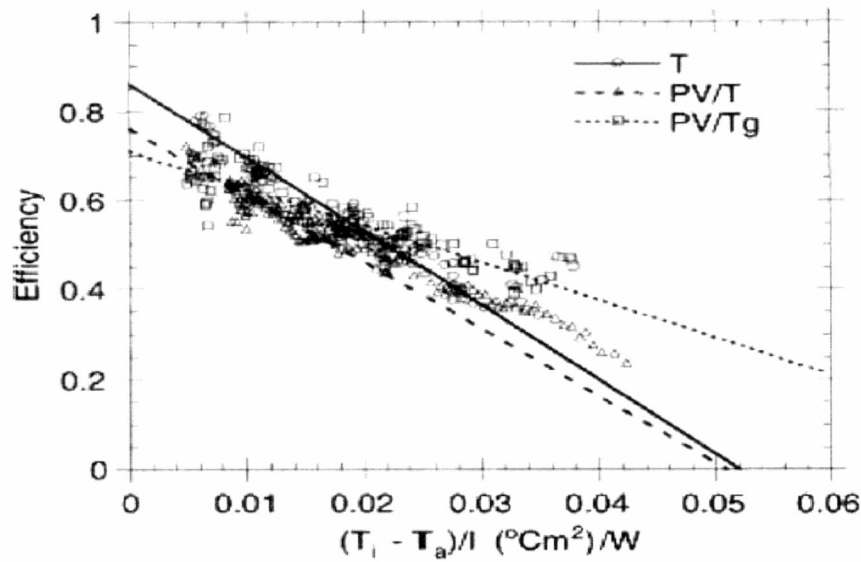
Όπου τα γράμματα στην παραπάνω εικόνα σημαίνουν:

**C** είναι η κάλυψη του συστήματος, **S** είναι το ηλιακό πλαίσιο, **A** είναι ο απορροφητής,  $\delta$  είναι το πάχος του απορροφητή, **D** είναι η διάμετρος του σωλήνα, **W** η απόσταση μεταξύ δύο σωλήνων, **F** το ρευστό που περνά μέσω των σωλήνων, **B** είναι ο εναλλάκτης θερμότητας και το **T** αντιπροσωπεύει κάθε σωλήνα.

## **I. ΦΒ/Θ Συλλέκτες με Χρήση Καλύμματος**

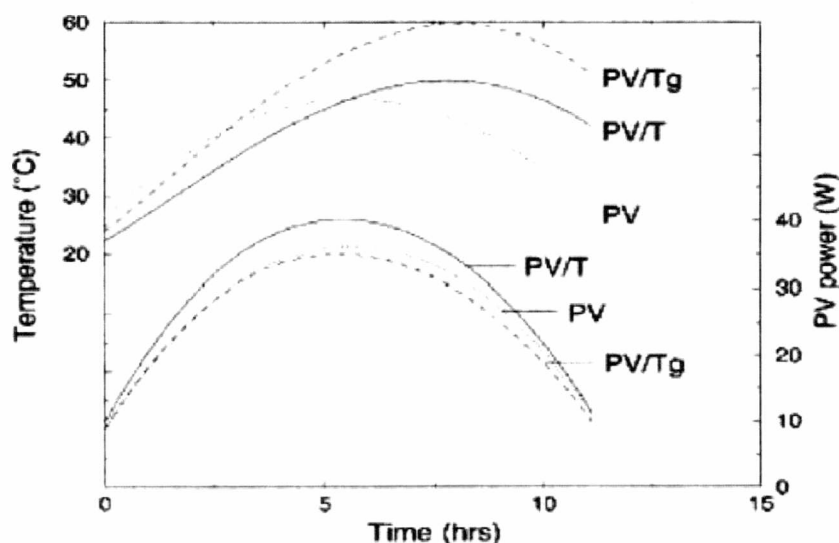
Δυο μελετητές ο Sandnes και ο Rekstad σχεδίασαν κατασκεύασαν και δοκίμασαν ένα ΦΒ/Θ συλλέκτη και ανέπτυξαν ένα αναλυτικό μοντέλο για αυτά τα συστήματα μετατρέποντας το πολύ γνωστό μοντέλο για τους επίπεδους συλλέκτες των Hottel και Willier ώστε να περιλαμβάνει τις επιδράσεις των ΦΒ κελιών και της γεωμετρία του απορροφητή που χρησιμοποιείται. Ο συλλέκτης ΦΒ/Θ κατασκευάστηκε κολλώντας ένα ΦΒ κελί πυριτίου (mc-Si) σε ένα μαύρο πλαστικό απορροφητή. Καθώς το ΦΒ κελί είναι πολύ εύθραυστο και έχει αρκετά μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής από τον πλαστικό απορροφητή, χρησιμοποιείται κόλλα πυριτίου (πάχους 0,5mm) επειδή είναι αρκετά ελαστική ώστε να απορροφάει την διαφορά της θερμικής διαστολής ανάμεσα στο ΦΒ κελί και στον πλαστικό απορροφητή. Οι δύο ερευνητές εξήγησαν ότι η επίδραση της επιπλέον χρήσης γυάλινου καλύμματος στο συλλέκτη ΦΒ/Θ ήταν να μειωθούν οι θερμικές απώλειες. Όμως η ενεργειακή απορρόφηση μειώθηκε (περίπου 10%) και αυτή λόγω της αντανάκλασης από το γυαλί. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται οι καμπύλες θερμικής απόδοσης όπως αυτές προέκυψαν από τα πειραματικά αποτελέσματα για ένα θερμικό συλλέκτη (T), ένα φωτοβολταϊκό θερμικό συλλέκτη ΦΒ/Θ (PV/T), και ένα φωτοβολταϊκό συλλέκτη με γυάλινο κάλυμμα (PV/Tg)





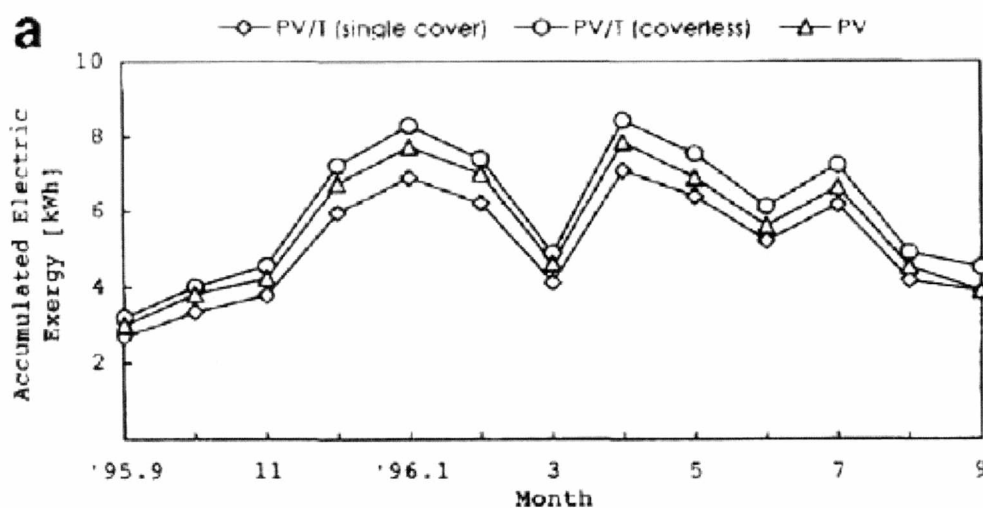
**Σχήμα 6.36:** Καμπύλες θερμικής απόδοσης από πειραματικά αποτελέσματα.

Από το σχήμα φαίνεται ότι ο θερμικός απορροφητής (T) απορροφά ακτινοβολία περισσότερο αποτελεσματικά. Καλύπτοντας τον απορροφητή με ΦΒ κελιά, μειώνεται η ενέργεια που απορροφάτε από τον απορροφητή ενώ πέφτει και ο συντελεστής θερμικής απώλειας. Επιπλέον προσθέτοντας γυάλινο κάλυμμα (PV/Tg) στο συλλέκτη μειώνονται οι θερμικές απώλειες αλλά μειώνεται επίσης και η ενέργεια που απορροφάτε από το συλλέκτη λόγω της αντανάκλασης από το γυάλινο κάλυμμα. Ενώ στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η καμπύλη θερμοκρασίας κελίου σε σχέση με την ισχύ του φωτοβολταϊκού και του χρόνου για ένα ΦΒ/Θ σύστημα (PV/T), ένα ΦΒ/Θ σύστημα με γυάλινο κάλυμμα (PV/Tg) και ένα ΦΒ σύστημα χωρίς θερμική μόνωση.



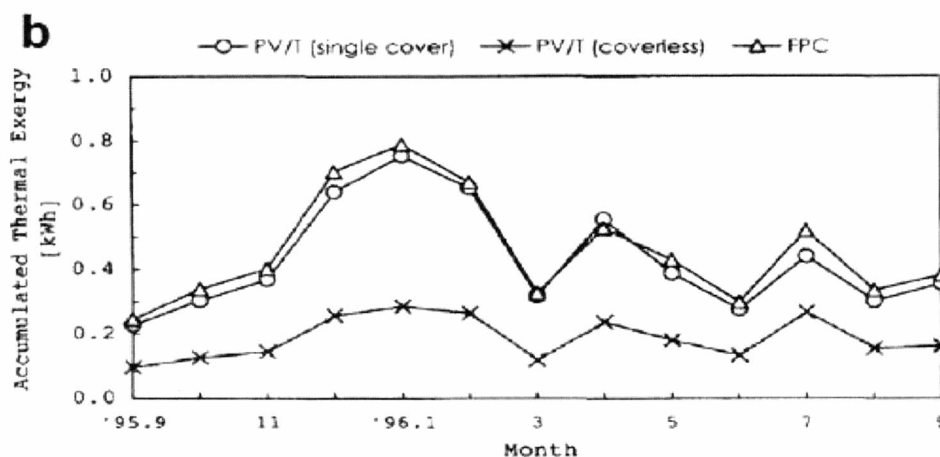
**Σχήμα 6.37:** Καμπύλη θερμοκρασίας κελίου σε σχέση με την ισχύ του φωτοβολταϊκού και του χρόνου.

Η συνολική ηλεκτρική ενέργεια ενός συστήματος ΦΒ για μία τυχαία μέρα είναι 306.9Wh, για το ΦΒ/Θ χωρίς γυάλινο κάλυμμα είναι 339.3 Wh, και για το ΦΒ/Θ με γυάλινο κάλυμμα 296.2 Wh. Είναι εμφανές από τα αποτελέσματα ότι το ΦΒ/Θ χωρίς γυάλινο κάλυμμα παράγει την μεγαλύτερη ηλεκτρική ενέργεια. Από την άλλη μεριά η χειρότερη ηλεκτρική απόδοση του συστήματος οφείλεται στην χαμηλή θερμοπερατότητα της ακτινοβολίας λόγω της ύπαρξης του γυάλινου καλύμματος. Οι ερευνητές Fujisawa και Tani σχεδίασαν και κατασκεύασαν ένα συλλέκτη ΦΒ/Θ για να κάνουν μετρήσεις. Χρησιμοποίησαν την εξέργεια για να προσδιορίσουν την πειραματική απόδοση του συστήματος αφού αυτή μπορεί να δώσει ποιοτικούς υπολογισμούς συγκρίνοντας την ηλεκτρική και την θερμική ενέργεια. Όπου εξέργεια είναι η μέγιστη ποσότητα αξιοποιήσιμης ενέργειας δηλαδή το γινόμενο της διαθέσιμης ενέργειας επί ένα συντελεστή χρησιμοποίησης. Από τα αποτελέσματα βρήκαν ότι ο ΦΒ/Θ συλλέκτης χωρίς κάλυμμα παράγει την μεγαλύτερη εξέργεια όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα 6.38.

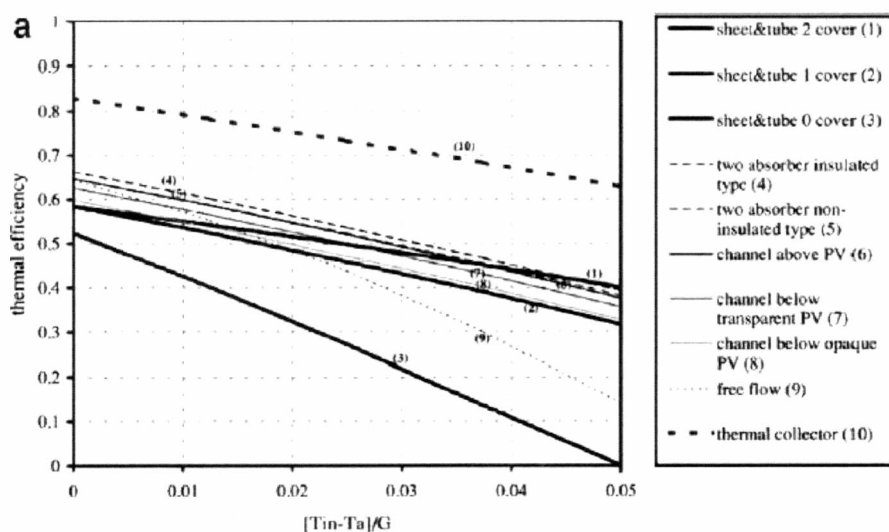


Σχήμα 6.38 Καμπύλη εξέργειας.

Από την άλλη μεριά βρήκαν ότι η θερμική απόδοση του ΦΒ/Θ συλλέκτη με γυάλινο κάλυμμα ήταν συγκρίσιμη με αυτή του επίπεδου θερμικού συλλέκτη.



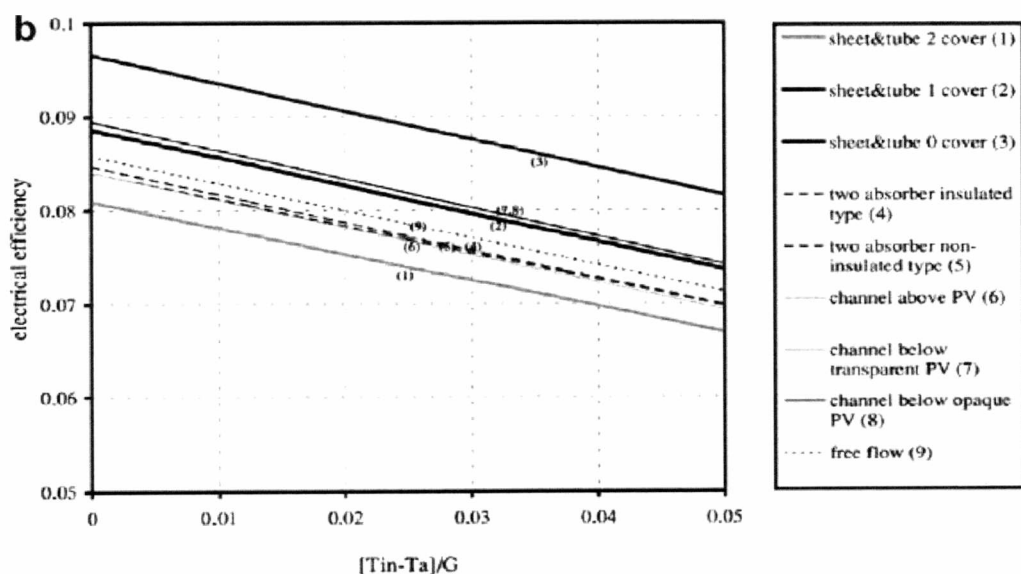
Σχήμα 6.39 Καμπύλη θερμικής παραγωγής.



**Σχήμα 6.40 :** Θερμική παραγωγή για τους διάφορους τύπους ΦΒ/Θ συλλεκτών.

Τέλος ο ΦΒ/Θ συλλέκτης χωρίς κάλυμμα ήταν κατώτερος λόγω των θερμικών απωλειών από το πάνω μέρος. Ο Zondag και οι συνεργάτες του ασχοληθήκαν και αυτοί με αυτό το ερευνητικό πεδίο. Στην δικιά τους αριθμητική μελέτη επικεντρώθηκε στο γεγονός ότι ο συλλέκτης με σωλήνες και χωρίς κάλυμμα όπως φαίνεται στο σχήμα παρουσιάζει πολύ φτωχή θερμική απόδοση λόγω των μεγάλων θερμικών απωλειών από το πάνω μέρος στο περιβάλλον.

Από την άλλη μεριά αναφέρεται ότι η ηλεκτρική απόδοση του επίπεδου συλλέκτη με σωλήνες και με δύο καλύμματα πέφτει δραματικά λόγω της μειωμένης ακτινοβολίας που φτάνει στο κελί, αποδιδόμενο στην αντανάκλαση από τα δύο καλύμματα (καμπύλη 1 στο σχήμα 6.41). Επίσης είναι προφανές από την (καμπύλη 3 στο σχήμα 6.41) ότι η καλύτερη ηλεκτρική απόδοση επιτυγχάνεται από ΦΒ/Θ συλλέκτη χωρίς γυάλινο κάλυμμα που συμφωνεί με τα ευρήματα των άλλων ερευνητών.



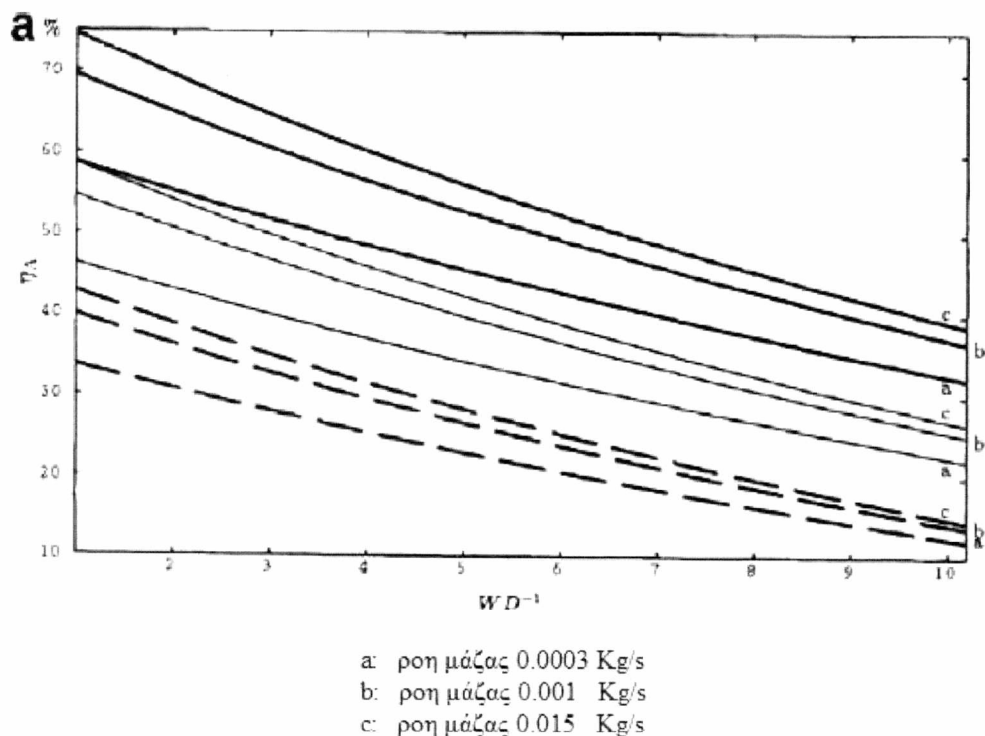
**Σχήμα 6.41:** Ηλεκτρική παραγωγή για τους διάφορους τύπους ΦΒ/Θ συλλεκτών.



## II. Επίδραση της Ροής Μάζας του Εργαζόμενου Ρευστού

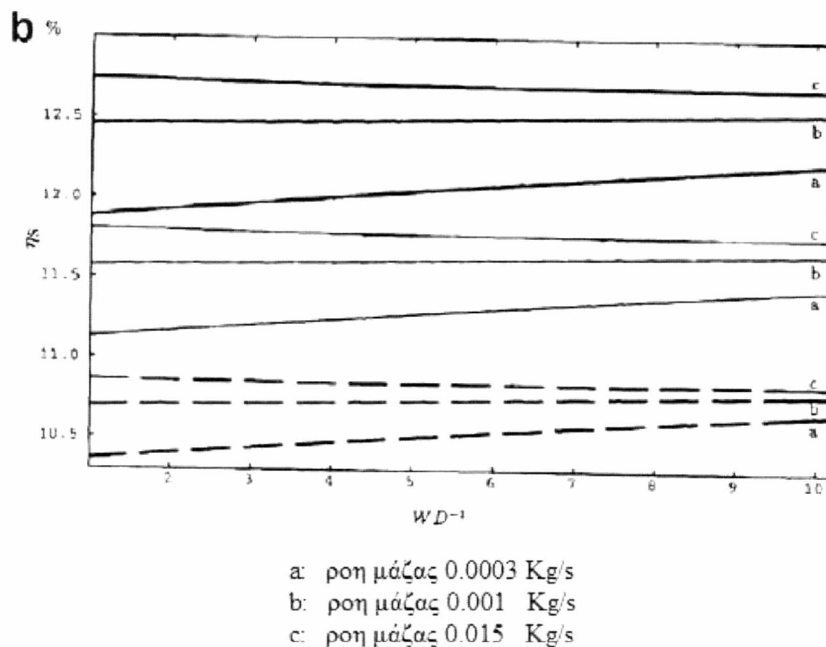
Οι ΦΒ/Θ συλλέκτες μπορούν να εργασθούν με φυσική κυκλοφορία ή με βεβιασμένη κυκλοφορία χρησιμοποιώντας αντλίες ή ανεμιστήρες για να μετακινήσουν το ρευστό. Αρκετοί ερευνητές ασχολήθηκαν με την επίδραση της ροής μάζας στην απόδοση του ΦΒ/Θ συλλέκτη. Όλοι κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα: ότι δηλαδή η απόδοση του ΦΒ/Θ συλλέκτη εξαρτάται από τη ροή μάζας καθώς η ταχύτητα του νερού μέσα στο σωλήνα αυξάνει, αυξάνει και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το πλάι, ο οποίος μεγιστοποιεί και την ψύξη του ΦΒ/Θ αλλά και την μεταφορά θερμότητας στο νερό. Παρόλα αυτά οι διάφοροι ερευνητές που ασχολήθηκαν με αυτό το θέμα δεν συμφωνούν στην τιμή της βέλτιστης μάζας.

Ο Bergene και ο Lonvik πραγματοποίησαν μια παραμετρική μελέτη της ροής μάζας σαν συνάρτηση των γεωμετρικών παραμέτρων  $W/D$ . Από τις μετρήσεις που έκαναν βρήκαν ότι η θερμική απόδοση αυξάνεται μόνο κατά 0,10 όταν η ροή μάζας αυξηθεί από 0,001 σε 0,075 kg/s όπως φαίνεται και από το σχήμα 6.41. Συνεπώς πρότειναν ότι όταν η ροή μάζας είναι γύρω στα 0,001 kg/s δεν υπάρχει όφελος να αυξηθεί παραπάνω. Στα σχήματα 6.42 & 6.43 φαίνεται η θερμική ( $\eta_A$ ) και ηλεκτρική απόδοση ( $\eta_s$ ) σαν συνάρτηση του  $W/D$  με  $W$  σταθερό και το  $D$  να μεταβάλλεται από 0.01 στο 0.10 m με σταθερό βήμα ίσο με 0.010 m. Η γραμμοσκιασμένη γραμμή, η λεπτή γραμμή και η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύουν θερμοκρασίες εισόδου του νερού 280 K, 300 K and 320 K αντίστοιχα. Οι καμπύλες a, b και c αντιπροσωπεύουν ροή μάζας 0.0003, 0.001 and 0.015 kg/s, αντίστοιχα.



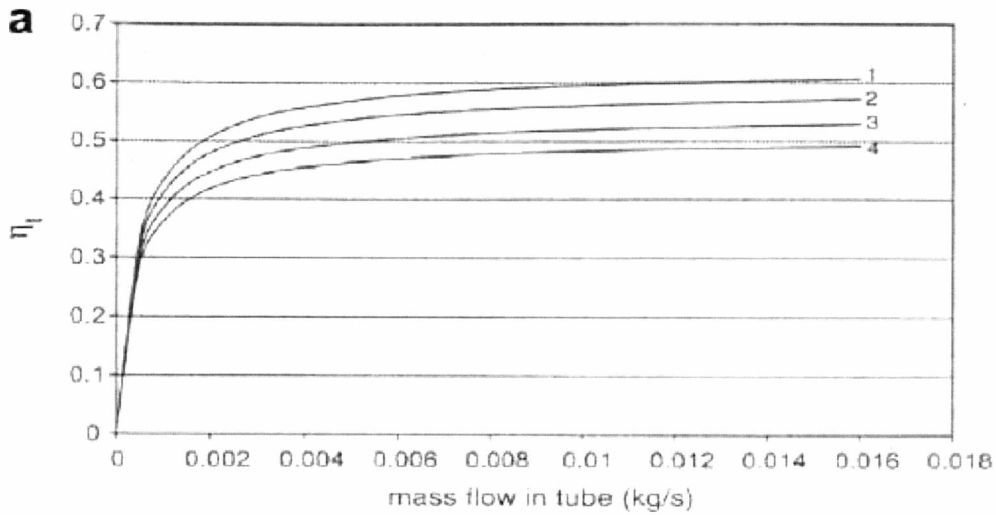
Σχήμα 6.42 : Θερμική παραγωγή σαν συνάρτηση του  $W/D$ .

Όσον αναφορά την ηλεκτρική απόδοση η ροή μάζας είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες (ο άλλος είναι η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού).

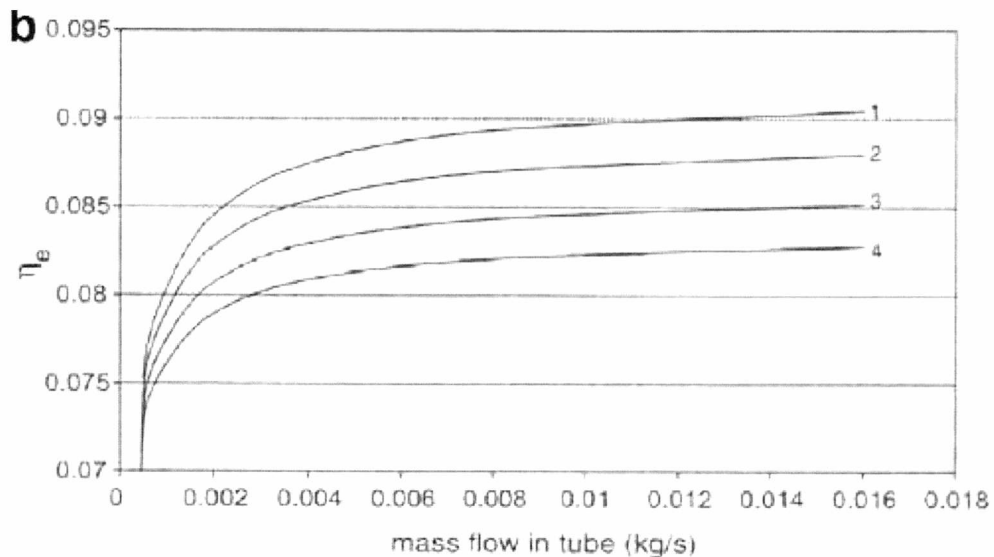


**Σχήμα 6.43:** Ηλεκτρική παραγωγή σαν συνάρτηση του  $W/D$ .

Επιπλέον όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα σε μικρές ροές μάζας η ηλεκτρική απόδοση αυξάνεται με αύξηση του  $W/D$  ενώ σε μεγάλες ροές μάζας συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο. Ο Chow αναφέρει ότι καθώς η ροή μάζας μέσα στο σωλήνα πηγαίνει από 0.002 σε 0.016 kg/s, για επιφάνεια  $2 \text{ m}^2$  ΦΒ/Θ συλλέκτη (0.001–0.008 kg/s  $\text{m}^2$ ) η θερμική και η ηλεκτρική απόδοση αυξάνονται. Στα σχήματα φαίνεται η θερμική και ηλεκτρική απόδοση σαν συνάρτηση της ροής μάζας για διάφορες θερμικές αγωγιμότητες της απορροφητικής πλάκας με του σωλήνες. Η καμπύλη 1 έχει 10,000 W/m K (καλύτερη δυνατή αγωγιμότητα), καμπύλη 2: 100 W/m K, καμπύλη 3: 45 W/m K, καμπύλη 4: 25 W/m K (χειρότερη αγωγιμότητα)



**Σχήμα 6.44:** Θερμική παραγωγή σαν συνάρτηση της ροής μάζας του εργαζόμενου μέσου



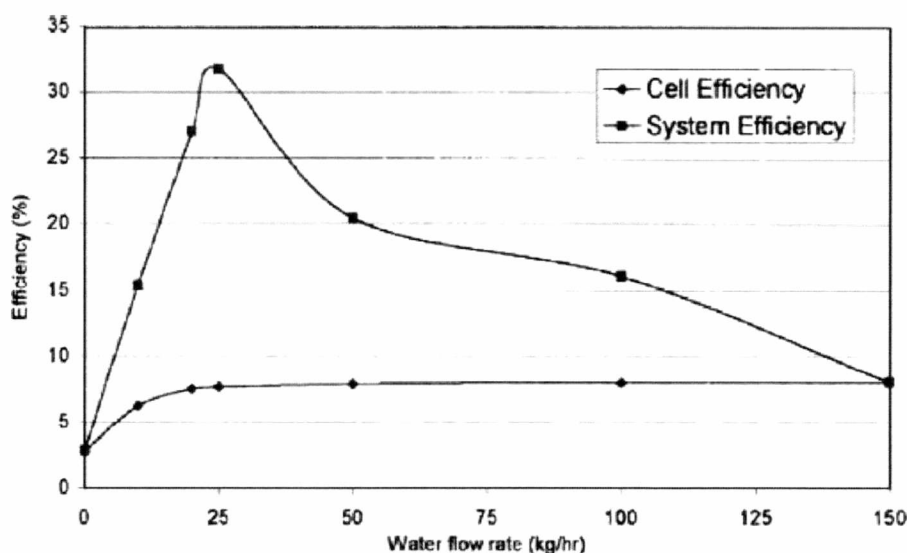
**Σχήμα 6.45:** Ηλεκτρική παραγωγή σαν συνάρτηση της ροής μάζας του εργαζόμενου μέσου .

Ο Garg και ο Agarwal εξομοίωσαν για διαφορετικά μεγέθη επιφανειών κελιών, ροής μάζας λύνοντας τις αντιπροσωπευτικές εξισώσεις. Το σύστημα αποτελείται από ένα ΦΒ/Θ συλλέκτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού, μια αντλία και ένα διαφορικό εκλεκτη. Η βέλτιστη ροή μάζας βρέθηκε ότι είναι 0.03 kg/s για επιφάνεια συλλέκτη  $2\text{m}^2$  (ή  $0.015\text{ kg/sm}^2$ ), για να έχουμε μέγιστη θερμική απόδοση. Παρόλα αυτά, η ηλεκτρική απόδοση βρέθηκε ότι μειώνεται όταν η ροή μάζας είναι 0.03 kg/s και ήταν ελάχιστη όταν η ηλιακή ακτινοβολία ήταν μέγιστη (λόγω της μέγιστης θερμότητας στον απορροφητή). Η μέση ηλεκτρική απόδοση και η ημερήσια απόδοση του ΦΒ/Θ συστήματος αυξάνεται με την αύξηση της συνολικής ροής μάζας. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι για ροή μάζας 0,07 kg/s η ισχύς της αντλίας είναι 0,176 W και γενικά θεωρείται πολύ μικρή.



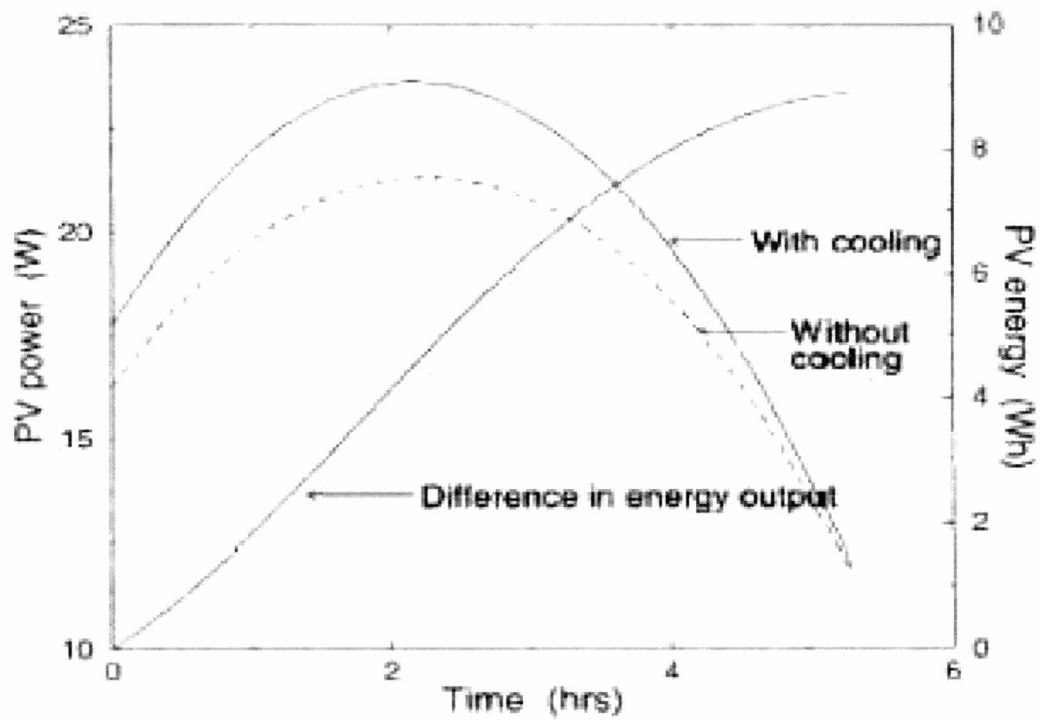
Ο Morita και οι συνεργάτες του πραγματοποίησαν μια αριθμητική ανάλυση, καθορίζοντας τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας χρησιμοποιώντας την αξιολόγηση μέσω της εξέργειας για συλλέκτη με μονό κάλυμμα και χωρίς κάλυμμα. Ανάπτυξαν σχέσεις ενεργειακής ισορροπίας βασισμένες σε αναλυτικά μοντέλα των ΦΒ/Θ. Η ροή μάζας σε μέγιστη απόδοση εξέργεια για μονού γυάλινου καλύμματος και για συλλέκτη ΦΒ/Θ χωρίς κάλυμμα είναι 0.0014 και 0.0049 kg/s αντίστοιχα. Η επιφάνεια του ΦΒ/Θ συλλέκτη ήταν 0,61m<sup>2</sup> (ή 0.002 and 0.008 kg/s m<sup>2</sup> αντίστοιχα ).

Στην εξομοίωση που έκανε ο Kalogirou χρησιμοποιώντας TRNSYS, που δημοσιεύτηκε το 2001, αναφέρεται ότι για ένα ΦΒ/Θ σύστημα επιφάνειας 5.1m<sup>2</sup> η βέλτιστη ροή μάζας ένα 10,25 l/h (0.007 kg/s) όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα 6.46.



**Σχήμα 6.46:** Ηλεκτρική απόδοση σαν συνάρτηση της ροής μάζας του εργαζόμενου μέσου .

Επιπλέον η ετήσια ηλεκτρική απόδοση για ένα ΦΒ/Θ σύστημα που λειτουργεί στην βέλτιστη ροή μάζας (10, 25 l/h) ανέρχεται στο 7,7% παρουσιάζοντας σημαντική αύξηση σε σχέση με το συμβατικό ΦΒ που στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας έχει ετήσια ηλεκτρική απόδοση 2.8%. Από την άλλη μεριά ο Sandnes και ο Rekstad ανέφερα όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.47 μια βελτίωση της ηλεκτρικής απόδοσης σαν αποτέλεσμα της ψύξης των κελιών που ανήλθε στα 8,8%.



Σχήμα 6.47: Εξομοίωση παραγωγής φωτοβολταϊκού με και χωρίς ψύξη.

## I. Γεωμετρία και Διαστάσεις του Συλλέκτη Απορρόφησης

Οι ερευνητές Bergene και Lonvik ασχολήθηκαν με την επίδραση της απόστασης μεταξύ των σωλήνων και την αναλογία διαμέτρου ( $W/D$ ) και αναφέρουν τα ακόλουθα.

- Η θερμική απόδοση πέφτει σχεδόν στο μισό όταν ο λόγος ( $W/D$ ) αυξηθεί από το 1 στο 10 κρατώντας το  $W$  σταθερό. Δεν αναμένεται να έχουμε τα ίδια αποτελέσματα όταν αυξηθεί το  $W$  και κρατηθεί σταθερό το  $D$ .
- Αύξηση του ( $W/D$ ) από 1 στο 10 έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας εξόδου του εργαζόμενου μέσου.
- Παρότι η ηλεκτρική απόδοση δεν επηρεάζεται από το μήκος του ελάσματος δεν συμβαίνει το ίδιο και με τη συνολική απόδοση (αυτή επηρεάζεται).
- Σε σχέση με τη μελέτη βελτίωσης της θερμικής απόδοσης υπάρχει σημαντική εξάρτηση του κόστους υλικού (όπως αυτού του σωλήνα) και πάντα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

## II. Θερμική Αγωγιμότητα του Απορροφητή με το Ρευστό

Όπως ο Florschuetz ανέφερε στην αναλυτική του δουλειά, ότι αρκετά μεγάλες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας του απορροφητή με το ρευστό  $U_f$ , δεν απαιτούνται από τον παράγοντα θερμικής απομάκρυνσης ώστε να είναι λογικές οι τιμές του, ειδικά για συλλέκτες με τουλάχιστον ένα κάλυμμα. Για να αποφευχθούν μεγάλα κόστη για μικρές βελτιώσεις της απόδοσης παράμετροι όπως το κόστος των υλικών και πτώση πίεσης πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη όταν πρόκειται για εφαρμογή σχεδιαστικών διαδικασιών. Ο Chow όπως φαίνεται και στα σχήματα 6.44, 6.45 επεξεργάζεται δύο κατασκευαστικά ελαττώματα που βρέθηκαν σε ΦΒ/Θ συλλέκτες α) ατελής συγκόλληση ανάμεσα στο ΦΒ και στο επίπεδο συλλέκτη και τις σωλήνες β) ατελή δέσιμο μεταξύ του επίπεδου συλλέκτη και των σωλήνων).

## III. Επίδραση Ανάλογα με το Σχέδιο

Ο Zondag και οι συνεργάτες του σύγκρινε την απόδοση εφτά διαφορετικών συστημάτων ΦΒ/Θ, όπου τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 6.4 :** Τιμές θερμικών και ηλεκτρικών αποδόσεων διάφορων σχεδιαστικώντύπων ΦΒ/Θ συσκευών

Panel type	Thermal efficiency	Electrical efficiency
PV panel	–	0.097
Sheet and tube PV/T, no cover	0.52	0.097
Sheet and tube PV/T, 1 cover	0.58	0.089
Sheet and tube PV/T, 2 covers	0.58	0.081
PV/T collector with cannal above PV	0.65	0.084
PV/T collector with cannal below opaque PV	0.60	0.090
PV/T collector with cannal below transparent PV	0.63	0.090
Free flow PV/T collector	0.64	0.086
Two-absorber PV/T collector (insulated type)	0.66	0.085
Two-absorber PV/T collector (noninsulated type)	0.65	0.084
Thermal collector	0.83	–



Από τα αποτελέσματα παρατηρούνται τα εξής :

- Όλα τα σχέδια των καναλιών (όπως παρουσιάστηκαν σε πιο πάνω ενότητα) έχουν ελαφρώς μεγαλύτερη απόδοση από τους επίπεδους απορροφητές λόγω των καλύτερων χαρακτηριστικών των καναλιών όσον αναφορά την μεταφορά θερμότητας (σχήματα 6.40, 6.41).
- Στην περίπτωση της ελεύθερης ροής η εξάτμιση μειώνει την θερμική απόδοση και η συμπύκνωση στο πάνω μέρος του γυάλινου καλύμματος προκαλεί επιπλέον αντανάκλασεις.
- Εφόσον ο επίπεδος απορροφητής είναι ο ευκολότερος να σχεδιαστεί (και έχει μόνο 2% μικρότερη απόδοση από τα σχέδια με τα κανάλια) αποδείχτηκε ο πιο ελπιδοφόρος από αυτά που εξετάστηκαν.

#### **IV. Επίδραση από τον Τύπο του Κελιού**

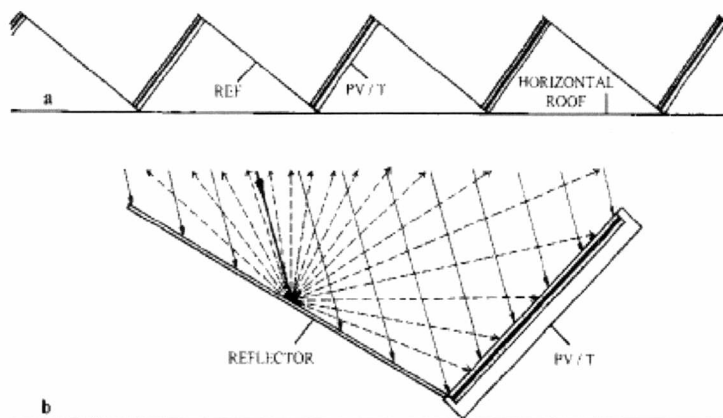
Το υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία των Φ/Β κελιών, είναι το Πυρίτιο (Si). Η αιτία είναι ίσως ότι το πυρίτιο έχει ήδη πλούσιο παρελθόν 3-4 δεκαετιών οπότε οι ιδιότητες του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στην αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες. Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιάσουμε το αντίκτυπο που έχει η θερμοκρασία στους κύριους τύπους του πυριτίου που είναι το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si) , το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (mc-Si) και το άμορφο πυρίτιο (a-Si). Η θερμοκρασία των ΦΒ συστημάτων αυξάνει από την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό επιδρώντας αρνητικά στο βαθμό απόδοσης. Στα μονοκρυσταλλικά κελιά πυριτίου (c-Si) και στα πολυκρυσταλλικά κελιά πυριτίου (mc-Si) η αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά περισσότερο από τα αντίστοιχα κελιά άμορφου πυριτίου. Για τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) και πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si) για κάθε ένα βαθμό που αυξάνει η θερμοκρασία ο βαθμός απόδοσης πέφτει κατά περίπου 0,45% (δηλαδή  $-0,45 \pm 0,50\%/K$ ), ενώ για τα κελιά άμορφου πυριτίου (a-Si) είναι περίπου 0,25% ( $0,25\%/K$ ).

Από πειράματα πάνω σε ένα σύστημα με κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si) και ένα με κελιά άμορφου πυριτίου (a-Si) διαπιστώθηκε ότι τα κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si) χρησιμοποιούμενα σε ΦΒ/Θ συστήματα δίνουν μεγαλύτερη συνολική ενέργεια συγκρινόμενα με αυτά άμορφου πυριτίου (a-Si). Παρόλα αυτά τα κελιά άμορφου πυριτίου (a-Si) έχουν μικρότερη ηλεκτρική απόδοση και μεγαλύτερη θερμική απόδοση (μεγαλύτερη ηλιακή συνεισφορά στην θέρμανση του νερού) από ότι τα πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si).

## V. Επίδραση από τα Συστήματα Συγκέντρωσης της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Με τη χρήση των συστημάτων συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούμε να αυξήσουμε την ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των ΦΒ/Θ συστημάτων και έτσι εξισορροπείται η μείωση της ηλεκτρικής παραγωγής λόγω των οπτικών απωλειών από την πρόσθετη τοποθέτηση των γυάλινων καλυμμάτων.

Οι διάχυτοι ανακλαστήρες είναι οι πιο διαδεδομένοι από όλα τα συστήματα συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτοί τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να ακουμπούν στο πάνω μέρος των ΦΒ/Θ συσκευών της μίας σειράς και στο κάτω μέρος των ΦΒ/Θ συσκευών της πίσω σειράς. Με την διάταξη αυτή η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα ΦΒ πλαίσια είναι αυξημένη όλο το έτος και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας της εγκατάστασης. Οι διάχυτοι ανακλαστήρες προτείνονται αντί των συνηθισμένων κατοπτρικών επιφανειών επειδή εξασφαλίζουν μια σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων και κατά συνέπεια αποφεύγεται η μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης τους λόγω της διαφορετικής έντασης φωτός στην επιφάνειά τους.



**Σχήμα 6.48** Συνδυασμός ΦΒ/Θ συσκευών με επίπεδους διάχυτους ανακλαστήρες σε διάταξη οριζόντιας οροφής κτιρίου.

Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι τα πιο συχνά παρατηρούμενα συστήματα στη βιβλιογραφία που εξετάστηκαν πειραματικά για τον προσδιορισμό της απόδοσης τους (θερμική και ηλεκτρική) καθώς της οικονομικής τους βιωσιμότητας είναι τα ακόλουθα.

- ΦΒ/Θ σύστημα νερού χωρίς κάλυμμα.
- ΦΒ/Θ σύστημα νερού με κάλυμμα.
- ΦΒ/Θ σύστημα με διάχυτο ανακλαστήρα χωρίς γυάλινο κάλυμμα.
- ΦΒ/Θ σύστημα νερού με διάχυτο ανακλαστήρα και με γυάλινο κάλυμμα.

Τα συστήματα αυτά δοκιμάστηκαν κατά περίπτωση για διάφορους τύπους ηλιακών κελιών.

Τα κυριότερα **συμπεράσματα** που προκύπτουν:

1) Η απαγωγή θερμότητας με την κυκλοφορία νερού μέσω εναλλάκτη θερμότητας είναι μεγαλύτερη απ'ότι με κυκλοφορία αέρα, ειδικά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού όπου η θερμοκρασία του νερού που ρέει στους αγωγούς του δικτύου είναι χαμηλότερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

2) Τα ΦΒ/Θ συστήματα με την πρόσθετη τοποθέτηση γυάλινης επιφάνειας αυξάνουν την θερμική απόδοση, αλλά μειώνουν την ηλεκτρική απόδοση λόγω των οπτικών απωλειών. Η μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης είναι μεγαλύτερη από την αύξηση της θερμικής.

3) Η χρήση του συμπληρωματικού διάχυτου ανακλαστήρα αυξάνει και την ηλεκτρική και θερμική απόδοση των ΦΒ/Θ συστημάτων.

4) Τα ΦΒ/Θ συστήματα με συμπληρωματικούς διάχυτους ανακλαστήρες έχουν μεγαλύτερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης απ'ότι τα ΦΒ/Θ συστήματα με ψύξη με νερό.

5) Όταν χρησιμοποιείται αέρας σαν μέσο απαγωγής θερμότητας η τοποθέτηση γυάλινου καλύμματος και διάχυτου ανακλαστήρα αυξάνει τη θερμική απόδοση του ΦΒ/Θ συστήματος δύο φορές περισσότερο από'τι θα αυξανόταν αν χρησιμοποιούνταν νερό σαν μέσο απαγωγής θερμότητας.

6) Η μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης των ΦΒ με την πρόσθετη τοποθέτηση γυάλινου καλύμματος αντισταθμίζεται με την τοποθέτηση διάχυτων ανακλαστήρων.

Η συνεχής βελτίωση των βαθμών απόδοσης των ΦΒ/Θ καθώς και η σταδιακή μείωση των τιμών τους, λόγω της συνεχής ανάπτυξης της τεχνολογίας κατασκευής των ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται στις ΦΒ κυψέλες, έχει στρέψει το ενδιαφέρον προς αυτά τα συστήματα έναντι των υπολοίπων συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πράσινης ενέργειας.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>**

### **ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ**

## 7.1 Περιβαλλοντικά Θέματα & Επιπτώσεις ΑΠΕ

Ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα τεχνολογίας φιλικής προς το περιβάλλον είναι οι ΑΠΕ. Σε αυτές τις τεχνολογίες έχει γίνει διαχωρισμός σε ήπιες μορφές ενεργείας. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για εκείνες της ενέργειας που είναι ανανεώσιμες και δεν προξενούν σημαντικές βλάβες στο περιβάλλον και ταυτόχρονα δεν περικλείουν σημαντικούς κοινωνικούς κινδύνους. Σε αυτό τον όρο δεν μπορούμε να εντάξουμε τη υδροηλεκτρική, γεωθερμική και την ενεργεία από την καύση βιομάζας οι οποίες είναι μεν ανανεώσιμες αλλά ενίοτε προκαλούν σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα.

Τα **πλεονεκτήματα** των ήπιων μορφών ενεργείας είναι τα εξής:

- Δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Προσφέρονται για την κατασκευή μικρών και αποκεντρωμένων μονάδων, κοντά στο τόπο κατανάλωσης, πράγμα σημαντικό για πολλές χώρες.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.
- Είναι κατανοητές πολύ πιο ομοιόμορφα στο σύνολο του πλανήτη.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.

Τα **μειονεκτήματα** που επιβαρύνουν οικονομικά την εκμετάλλευσή τους είναι:

- Η παροχή των περισσότερων ήπιων πηγών είναι ασυνεχής και μεταβαλλόμενη. Πολλές φορές το μέγιστο της προσφοράς συμπίπτει με το ελάχιστο της ζήτησης. Η αποθήκευσή τους σε πρωτογενή μορφή δεν είναι δυνατή και χρειάζεται να αναπτυχθούν τρόποι αποθήκευσης σε δευτερογενή μορφή.
- Βρίσκονται πολύ διασκορπισμένες, γι' αυτό μόνο ένα μικρό μέρος τους είναι εκμεταλλεύσιμο.
- Η τεχνολογία για την αξιοποίησή τους, σε ορισμένες περιπτώσεις, ελέγχεται από πολιτικά και οικονομικά συμφέροντα.

Στην Ελλάδα, οι οικονομοτεχνικές συνθήκες για την αξιοποίηση των ήπιων μορφών ενεργείας είναι πολύ ευνοϊκές, διότι:

- Η παροχή των περισσότερων ήπιων πηγών (ηλιοφάνεια, άνεμοι κ.λπ.) είναι σημαντική, μια από τις πιο πλούσιες χώρες της Ευρώπης.
- Η τεχνολογία για την εκμετάλλευσή τους μπορεί, σε σημαντικό βαθμό, να αναπτυχθεί στη χώρα.
- Το πετρέλαιο είναι εισαγόμενο.
- Η γεωγραφική κατάσταση της Ελλάδας είναι μεγάλη, άρα συμφέρει η κατασκευή μικρών σταθμών κοντά στο τόπο κατανάλωσης.

### 7.1.1 Ανάλυση Εκτίμησης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα επιφέρει κάποιες επιπτώσεις στο περιβάλλον, μικρές ή μεγάλες, θετικές ή αρνητικές, άμεσες ή έμμεσες. Ειδικότερα οι δραστηριότητες που αφορούν τη χρήση φυσικών πόρων ή την κατασκευή τεχνικών έργων έχουν κατά κανόνα σημαντικές επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον, οι οποίες μπορεί να πολλαπλασιαστούν ή να μειωθούν, ανάλογα με τις λύσεις που επιλέγονται για την αντιμετώπιση των προβλημάτων. Η ύπαρξη των επιπτώσεων δεν απαιτεί να καταργηθούν οι ανθρώπινες δραστηριότητες, ούτε όμως η αναγκαιότητα των έργων μπορεί να δικαιολογεί οποιαδήποτε επέμβαση στο περιβάλλον.

Οι λύσεις πρέπει να αναζητούνται με περίσκεψη και προσεκτικά βήματα, με βάση κοινά αποδεκτούς στόχους, όπως οι ακόλουθοι, που θα έπρεπε να αποτελούν και κριτήρια αξιολόγησης των σχεδίων και προγραμμάτων:

- Η ανάπτυξη αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Η ποιότητα ζωής δεν σημαίνει μόνον αριθμητική αύξηση του εισοδήματος, αλλά συμπεριλαμβάνει "την πρόσβαση στους πόρους που είναι αναγκαίοι για μια αξιοπρεπή και υγιή διαβίωση, όπως η τροφή, το καθαρό νερό, η εκπαίδευση, η υγειονομική περίθαλψη και η πολιτική ελευθερία", σύμφωνα με τη διατύπωση διεθνών οργανισμών.
- Η αειφόρος χρήση των φυσικών πόρων, δηλαδή "η μεγιστοποίηση του καθαρού οφέλους της οικονομικής ανάπτυξης, υπό τον όρο διατήρησης της λειτουργικότητας και της ποιότητας των φυσικών πόρων διαχρονικά".
- Η ορθολογική και αντικειμενική αποτίμηση αφ' ενός μεν των επιπτώσεων μιας δραστηριότητας στο περιβάλλον και αφ' ετέρου των κοινωνικών συνεπειών που θα προκύψουν από αυτήν, ώστε να είναι δυνατή μια ουσιαστική σύγκριση κόστους/οφέλους.

Οι αρχές αυτές, που έχουν προέλθει όχι μόνον από τον οικολογικό χώρο, αλλά και από σημαντικούς οικονομολόγους και κοινωνιολόγους που αντιλαμβάνονται την αλληλεξάρτηση των προβλημάτων, είναι πια γενικώς αποδεκτές και έχουν ενσωματωθεί σε διεθνή και ευρωπαϊκά κείμενα, όπως στη διακήρυξη του Ρίο, στην συνθήκη του Κιότο, στη συνθήκη του Μάαστριχ και στα πενταετή Προγράμματα για το Περιβάλλον της Ευρωπαϊκής Ένωσης με οδηγίες και νομούς.



### 7.1.2 Περιεχόμενο Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Οι ελάχιστες αναγκαίες πληροφορίες που πρέπει να περιέχονται σε μια Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) είναι γενικά οι εξής:

- **Περιγραφή του έργου**  
Περιγράφεται το προτεινόμενο έργο και οι δραστηριότητες σχετικά με αυτό. Δίνονται με ακρίβεια όλες οι πληροφορίες για την πιθανή επιρροή του στο περιβάλλον, καθώς και για το σκοπό του και την ανάγκη πρόωθής του.
- **Περιγραφή του περιβαλλοντικού πλαισίου**  
Περιγράφεται το περιβάλλον της περιοχής που αφορά το έργο και ενδέχεται να επηρεαστεί απ' αυτό, άμεσα ή έμμεσα. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στο τοπίο, στη χλωρίδα, στην πανίδα, στα ευαίσθητα οικοσυστήματα, στο έδαφος, στα νερά, στον αέρα, στους ενδεχόμενους θορύβους και οσμές, στις κλιματικές παραμέτρους, στους φυσικούς πόρους, στο δομημένο περιβάλλον με έμφαση στην αρχιτεκτονική κληρονομιά, στον ανθρώπινο πληθυσμό και στην οικονομική και κοινωνική κατάσταση, καθώς και στις σχέσεις ανάμεσα σε όλους αυτούς τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.
- **Συνοπτική περιγραφή των δυνατών εναλλακτικών λύσεων**  
Γίνεται περιγραφή των υπαρκτών εναλλακτικών λύσεων με σκοπό την ελαχιστοποίηση αρνητικής επιρροής στο περιβάλλον.
- **Εκτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων**  
Γίνεται εκτίμηση, σύμφωνα με ορισμένη μέθοδο, όλων των επιπτώσεων στο περιβάλλον, από κάθε μια εναλλακτική λύση του έργου. Είναι συνήθως απαραίτητη η διάκριση ανάμεσα στις επιπτώσεις που θα προκληθούν κατά τη φάση κατασκευής και κατά τη φάση λειτουργίας του έργου. Λαμβάνονται υπ' όψη και οι κοινωνικές, οικονομικές και πολιτιστικές πλευρές των επιπτώσεων.
- **Συγκριτική εκτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εναλλακτικών λύσεων**  
Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα σημεία που είναι κρίσιμα για την τελική επιλογή.
- **Περιγραφή των επανορθωτικών μέτρων**  
Αναφέρονται τα μέτρα προληπτικής ή διορθωτικής δράσης, τα οποία προτείνονται για την αποφυγή, μείωση ή άρση των αρνητικών επιπτώσεων.
- **Μη τεχνική περίληψη των πληροφοριών της ΜΠΕ**  
Περιλαμβάνει απλοποιημένη περιγραφή της μελέτης, ώστε να γίνεται κατανοητή από τους ειδικούς.

### 7.1.3 Κατηγορίες Επιπτώσεων

Ο χαρακτηρισμός και η στάθμιση των επιπτώσεων αποτελούν το πιο κρίσιμο στάδιο της ΜΠΕ. Είναι σημαντικό να γίνει η ακριβέστερη δυνατή εκτίμηση των επιπτώσεων, τόσο ως προς τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά, όσο και ως ποσοτικές παραμέτρους, όπου αυτό είναι εφικτό. Οι επιπτώσεις μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες, ανάλογα με τις πιο σημαντικές ιδιότητές τους, ως εξής:

#### ➤ Θετικές- Αρνητικές

Συνήθως, ένα έργο ή δραστηριότητα που χωροθετείται σε φυσικό χώρο επιφέρει διάφορες δυσμενείς αλλαγές ή γενικότερη υποβάθμιση του περιβάλλοντος, επομένως οι επιπτώσεις του θεωρούνται αρνητικές. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου η επέμβαση είναι θετική για το περιβάλλον, είτε διότι αυτός είναι ο στόχος της, είτε διότι το ωφελεί με έμμεσο τρόπο.

#### ➤ Μεγάλες-Μικρές

Οι επιπτώσεις χαρακτηρίζονται σε σχέση με το μέγεθος της επηρεαζόμενης περιοχής ή με τον αριθμό και τα προβλήματα των επηρεαζόμενων ανθρώπων ή με την ένταση του περιβαλλοντικού προβλήματος που δημιουργούν. Από την άποψη αυτή μια επίπτωση μπορεί να είναι μεγαλύτερης ή μικρότερης έκτασης και σημασίας.

#### ➤ Βραχυπρόθεσμες-Μακροπρόθεσμες

Ορισμένες επιπτώσεις μπορεί να εμφανιστούν από τα πρώτα στάδια κατασκευής ή λειτουργίας του έργου, ενώ άλλες επιπτώσεις υπάρχει το ενδεχόμενο να συμβούν μετά από μακρύ χρονικό διάστημα. Π.χ. η αύξηση ενός πληθυσμού φυτού ή ζώου, λόγω εκτεταμένων αλλαγών στο οικοσύστημα, μπορεί να σημαίνει μακροπρόθεσμα την εξαφάνιση κάποιων άλλων, σπάνιων, ειδών της χλωρίδας ή της πανίδας.

#### ➤ Άμεσες-Έμμεσες

Άμεσες επιδράσεις είναι εκείνες που επιφέρουν οι ίδιες οι δραστηριότητες ενός έργου, ενώ έμμεσες επιδράσεις, είναι εκείνες που εμφανίζονται ως δευτερογενές αποτέλεσμα των πρώτων και είναι συνήθως μακροπρόθεσμες. Ας θεωρήσουμε π.χ. μια δραστηριότητα που περιλαμβάνει εκτεταμένη απομάκρυνση της βλάστησης από τις όχθες ενός ποταμού. Το περιβαλλοντικό χαρακτηριστικό που επηρεάζεται άμεσα είναι η διάβρωση του εδάφους. Η αλλαγή αυτή όμως μπορεί να προκαλέσει έμμεσες αλλαγές σε περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά του νερού, όπως το διαλυμένο οξυγόνο, τα αιωρούμενα στερεά, τη συγκέντρωση νιτρικών, την κατανάλωση των υδρόβιων ειδών ή τον αριθμό των ατόμων κάθε είδους. Η συνεπαγόμενη υπερβολική ανάπτυξη των αλγών πιθανόν να οδηγήσει σε υψηλές τιμές BOD που με τη σειρά τους θα επηρεάσουν τις μορφές χρήσης των υδάτων από τον άνθρωπο, με αποτέλεσμα δυσμενείς κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Είναι φανερό ότι τέτοιου είδους διαδοχικές αλληλοεπιδράσεις μπορεί να είναι απεριόριστες. Ο μελετητής πρέπει να έχει την ανάλογη πείρα, ώστε να ξέρει πότε να σταματήσει την ανίχνευση αυτών των αλληλεπιδράσεων, χωρίς βέβαια να παραλείψει κάποια σημαντική επίπτωση.

#### ➤ Αθροιστικές

Η εκτίμηση των επιπτώσεων πρέπει να λαμβάνει υπ' όψη τις αθροιστικές επιπτώσεις όλων των προτεινομένων δραστηριοτήτων σε κάθε περιβαλλοντική συνιστώσα. Μπορεί η συνολική επίπτωση να είναι πολύ δυσμενής, ενώ οι επί μέρους επιπτώσεις αμελητέες.

### ➤ Συνεργητικές

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στο συνεργισμό των επιπτώσεων. Η συνδυασμένη επίδραση δύο ή περισσότερων δραστηριοτήτων σ' ένα περιβαλλοντικό χαρακτηριστικό ενδέχεται να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την επίδραση που προκύπτει απλά ως άθροισμα των ξεχωριστών επιπτώσεων. Για παράδειγμα, έχει βρεθεί ότι 0,25 ppm διοξειδίου του θείου και 0,03 ppm όζοντος, ξεχωριστά, δεν προκαλούν καταστροφή των φύλλων του καπνού σε 2 ώρες, σε συνδυασμό όμως, επιφέρουν καταστροφή στο 40% των φύλλων.

### ➤ Αναστρέψιμες-Μη αναστρέψιμες

Η δυνατότητα αποφυγής ή διόρθωσης μιας επίπτωσης είναι ένα σημείο εξαιρετικά σημαντικό. Μερικές επιπτώσεις είναι τελεσίδικες, όπως π.χ. η εξαφάνιση ενός ενδημικού είδους ή είναι αδύνατο να διορθωθούν μέσα στο χρονικό διάστημα στο οποίο εκτείνεται η πρόβλεψη της μελέτης, όπως π.χ. η διάβρωση του εδάφους ή ερημοποίηση. Μια ανεπανόρθωτη περιβαλλοντική επίπτωση είναι κατ' αρχήν ασυμβίβαστη με την έννοια της αειφορίας και επιβαρύνει σοβαρά την περιβαλλοντική εικόνα του έργου. Η αντιστρεψιμότητα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, επομένως, πρέπει να παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιλογή των εναλλακτικών λύσεων, ανάμεσα στις οποίες είναι και η μηδενική. Η απαλλαγή του περιβάλλοντος από μια επίπτωση ενός έργου μπορεί να επιτευχθεί στις εξής περιπτώσεις:

- Επανόρθωση της επίπτωσης από δυνάμεις της φύσης, π.χ. βιοαποικοδόμηση ρύπων, οπότε η επίπτωση χαρακτηρίζεται ως αντιστρεπτή.
- Αποφυγή της επίπτωσης με κατάλληλες προληπτικές ενέργειες, π.χ. φροντίδα για προσεκτική χρήση εκσκαφικών μηχανημάτων, ώστε να μην τραυματιστεί το τοπίο, οπότε η επίπτωση χαρακτηρίζεται ως αντιμετωπίσιμη.
- Διόρθωση της επίπτωσης με κατάλληλες ενέργειες μετά το έργο, π.χ. φυτεύσεις των κατάλληλων ιθαγενών ειδών χλωρίδας για την επούλωση τραυμάτων του τοπίου, οπότε η επίπτωση χαρακτηρίζεται ως ανατάξιμη.

Όταν η επίπτωση δεν είναι ούτε αντιστρεπτή, ούτε αντιμετωπίσιμη, ούτε ανατάξιμη, τότε θεωρείται μη αναστρέψιμη.



## 7.2 Περιβαλλοντικά Θέματα Φωταβολταϊκών Συστημάτων

Τα Φ/Β συστήματα έχουν αθόρυβη λειτουργία, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής, δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες, δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας (στο δίκτυο ή σε συσσωρευτές) και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση.

Οι ενδεχόμενες επιπτώσεις που μπορεί να έχει η χρήση και η τελική διάθεση των Φ/Β έχουν εξεταστεί ενδελεχώς εδώ και αρκετά χρόνια, αφού εκατομμύρια συστήματα βρίσκονται ήδη εγκατεστημένα σε όλο τον κόσμο. Οι επιπτώσεις διακρίνονται σε αυτές που αφορούν:

- Στη λειτουργική περίοδο των Φ/Β.
- Στην τελική διάθεση των Φ/Β μετά το πέρας του ωφέλιμου χρόνου ζωής τους (ο οποίος ανέρχεται σε 30 χρόνια περίπου).

### 1. Λειτουργική περίοδος Φ/Β

Κατά τη λειτουργία τους, τα Φ/Β δεν προκαλούν καμία περιβαλλοντική όχληση, αφού είναι αθόρυβα, δεν εκλύουν ρύπους και δεν παράγουν απόβλητα. Αντιθέτως, η εγκατάσταση Φ/Β συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος με την υποκατάσταση ρυπογόνων ενεργειακών πόρων. Επιπλέον, λόγω της φύσης των χρησιμοποιούμενων υλικών (τα οποία προσομοιάζουν σε κοινά δομικά υλικά), τα Φ/Β μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα στο κέλυφος των κτηρίων ή/και σε ελεύθερα οικοπέδα εντός οικισμών, χωρίς να δημιουργούν προβλήματα αισθητικής φύσης (βλ. περισσότερα στις τεχνικές προδιαγραφές). Αντίθετα μάλιστα, τα Φ/Β προσφέρονται για καινοτόμες και δημιουργικές αρχιτεκτονικές εφαρμογές.

Πιθανή βλάβη στις συστοιχίες συσσωρευτών των αυτόνομων Φ/Β συστημάτων είναι δυνατόν να προκαλέσει σχετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως έκρηξη, διαφυγή επικίνδυνων αερίων και ουσιών. Για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας βλάβης στις συστοιχίες συσσωρευτών, απαιτείται τακτικός έλεγχος των συσσωρευτών, αερισμός, ειδική ηλεκτρική εγκατάσταση στον χώρο των συσσωρευτών και αυτόματο σύστημα ανίχνευσης αερίων.

Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον από τυχόν απαιτήσεις για τη διάνοιξη δρόμων και επέκταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζονται με τα μέτρα που συνήθως απαιτούνται κατά την κατασκευή και λειτουργία των δικτύων αστών.

## 2. Τελική διάθεση Φ/Β

Σε ότι αφορά στο στάδιο της τελικής διάθεσης των Φ/Β, αυτό αντιμετωπίζεται πλέον και νομοθετικά, μιας και είναι υποχρεωτική η ανακύκλωση των πλαισίων, των συσσωρευτών (εάν υπάρχουν) και των ηλεκτρονικών μερών του συστήματος. Ήδη, σε ευρωπαϊκό επίπεδο, έχει δημιουργηθεί η πρώτη μονάδα ανακύκλωσης Φ/Β πλαισίων (στη Γερμανία), αν και ο μεγάλος όγκος «απορριμμάτων» προς ανακύκλωση αναμένεται μετά από δύο τουλάχιστον δεκαετίες.

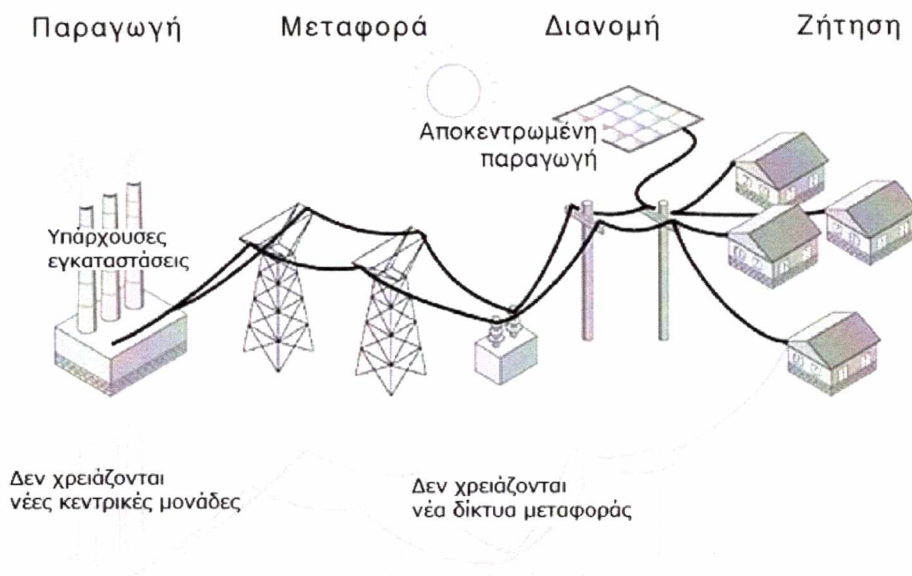
Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται κωδικοποιημένα τα περιβαλλοντικά θέματα που σχετίζονται με τα Φ/Β συστήματα και τα μέτρα αντιμετώπισης ανεπιθύμητων καταστάσεων που μπορούν να εφαρμοστούν.

**Πίνακας 7.1: Περιβαλλοντικά Θέματα Φωταβολταϊκών Συστημάτων**

<b>Περιβαλλοντικά Θέματα Φωταβολταϊκών Συστημάτων</b>		
<b>Θετικές επιδράσεις</b>	<b>Επιπτώσεις</b>	<b>Προτάσεις</b>
Αποφυγή εκπομπών CO <sub>2</sub> .	Χρήση γης ; απαίτηση μεγάλων εκτάσεων σε περίπτωση κεντρικών συστημάτων.	Κατάλληλη χωροθέτηση: Χρήση σε απομονωμένες περιοχές - αποφυγή ευαίσθητων οικολογικά περιοχών. Ενσωμάτωση σε μεγάλα κτήρια.
Απουσία θορύβου.	Αισθητική ένταξη.	Κατάλληλη χωροθέτηση: Ενσωμάτωση των Φ/Β ως δομικών στοιχείων του κτηρίου.
Απουσία μεγάλων καλωδιώσεων	Κατασκευαστική φάση (αναφέρεται σε μεγάλα συστήματα/Β).	Εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών τοποθέτησης. Αποκατάσταση του χώρου. Αποφυγή εγκατάστασης σε ευαίσθητες περιοχές.
	Χρήση τοξικών και εύφλεκτων υλικών (κατά τη διάρκεια της κατασκευής των στοιχείων).	Εφαρμογή βέλτιστων βιομηχανικών πρακτικών και κατάλληλης διάθεσης αποβλήτων. Τήρηση κανόνων υγιεινής και ασφαλείας.

Η Φ/Β τεχνολογία είναι μια από τις καθαρότερες και ασφαλέστερες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συνυπολογιζόμενης και της διαδικασίας κατασκευής των Φ/Β πλαισίων. Οι πρώτες ύλες κατασκευής Φ/Β στοιχείων και πλαισίων είναι κυρίως αδρανή υλικά, όπως πυρίτιο, γυαλί, αλουμίνιο κ.λπ.. Για κάθε kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Φ/Β αποφεύγεται η έκλυση περίπου 0,9kg ρύπων στην ατμόσφαιρα, κυρίως διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), αλλά και διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>), αιωρούμενων μικροσωματιδίων και υδρογονανθράκων, που θα εκπέμπονταν αν χρησιμοποιούνταν συμβατικά καύσιμα. Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα του ενός κιλοβάτ, αποτρέπει κάθε χρόνο την έκλυση 1,4 τόνων διοξειδίου του άνθρακα, όσο δηλαδή θα απορροφούσαν δύο στρέμματα δάσους. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα πυροδοτούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και αλλάζουν το κλίμα της Γης, ενώ η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον.

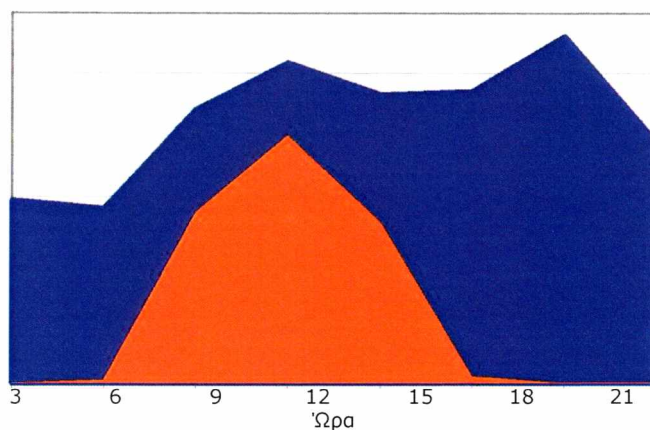
Η βαθμιαία αύξηση των μικρών ηλεκτροπαραγωγών μπορεί να καλύψει αποτελεσματικά τη διαρκή αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα έπρεπε να καλυφθεί με μεγάλες επενδύσεις για σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Η παραγωγή ηλεκτρισμού από μικρούς παραγωγούς μπορεί να περιορίσει επίσης την ανάγκη επενδύσεων σε νέες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος μιας νέας γραμμής μεταφοράς είναι πολύ υψηλό, αν λάβουμε υπόψη μας πέρα από τον τεχνολογικό εξοπλισμό και θέματα που σχετίζονται με την εξάντληση των φυσικών πόρων και τις αλλαγές στις χρήσεις γης.



**Σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα, η παραγωγή γίνεται με μικρές μονάδες κοντά στην κατανάλωση και αποφεύγονται έτσι οι μεγάλες κεντρικές μονάδες και τα ακριβά δίκτυα με τις μεγάλες απώλειες**

Οι διάφοροι μικροί παραγωγοί "πράσινης" ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν ιδανική λύση για τη μελλοντική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιπτώσεις όπου αμφισβητείται η ασφάλεια της παροχής. Η τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν δοκιμάζεται από δαπανηρές ενεργειακές απώλειες που αντιμετωπίζει το ηλεκτρικό δίκτυο (απώλειες, οι οποίες στην Ελλάδα ανέρχονται σε 10,6% κατά μέσο όρο). Από την άλλη, η μέγιστη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού συμπίπτει χρονικά με τις ημερήσιες αιχμές της ζήτησης (ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες), βοηθώντας έτσι στην εξομάλυνση των αιχμών φορτίου, στην αποφυγή black-out και στη μείωση του συνολικού κόστους της ηλεκτροπαραγωγής, δεδομένου ότι η κάλυψη αυτών των αιχμών είναι ιδιαίτερα δαπανηρή. Σημειωτέον ότι, κάθε ώρα black-out κοστίζει στην εθνική οικονομία 25-40 εκατ. ευρώ.



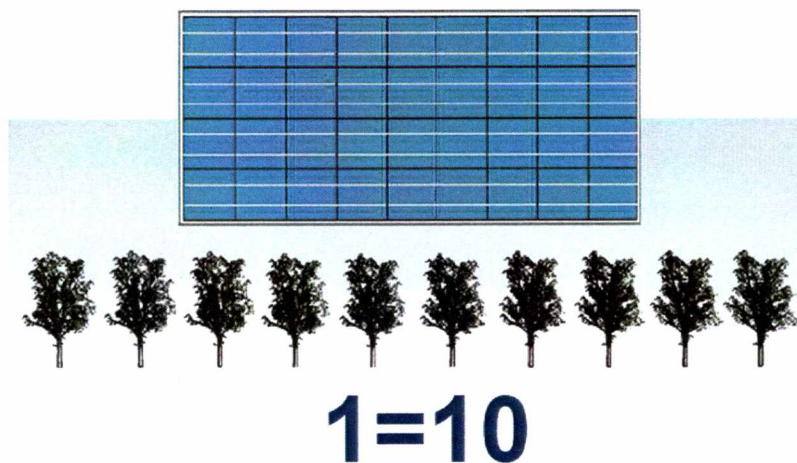


**Σχήμα 7.1** Τα φωτοβολταϊκά καλύπτουν τη μεσημεριανή αιχμή της κατανάλωσης

■ Παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού ■ Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

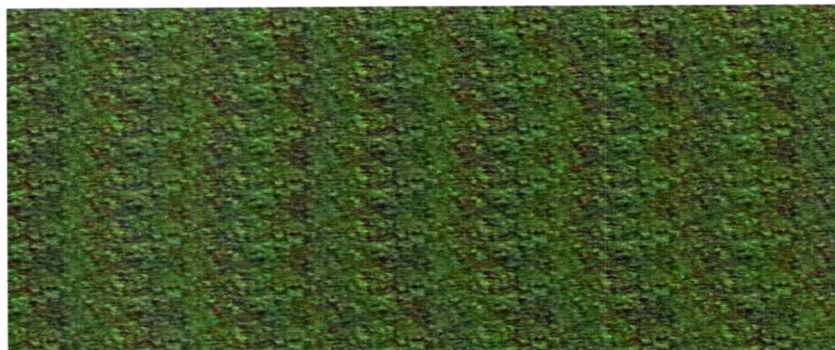
Μια σημαντική παράμετρος είναι η δέσμευση γης για τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς, όταν οι υποδομές γίνονται πάνω στο έδαφος (περίπου 16 στρέμματα ανά Wp). Η χρήση γης μπορεί να μειωθεί, όταν τα Φ/Β τοποθετούνται σε ύψος με χρήση κατακόρυφου άξονα στήριξης. Η χρήση γης αποφεύγεται πλήρως, όταν τα Φ/Β συστήματα εγκαθίστανται σε επιφάνειες κτιρίων. Εκτιμάται ότι το διαθέσιμο δυναμικό από την εκμετάλλευση κατάλληλων επιφανειών σε οροφές κτιρίων στην Ευρώπη ανέρχεται σε 600GWp. Στην Ελλάδα, η συνολική ηλιακά εκμεταλλεύσιμη επιφάνεια σε οροφές κτιρίων εκτιμάται στα 80km<sup>2</sup>.

## ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΟΦΕΛΗ



Ένα μέσο φωτοβολταϊκό πλαίσιο ισοδυναμεί με 10 δέντρα

## ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΟΦΕΛΗ



# 1=200

Ένα τετραγωνικό μέτρο φωτοβολταϊκού  
ισοδυναμεί με 200 τετραγωνικά μέτρα δάσους

**Σχήμα 7.1:** περιβαλλοντικά οφέλη Φωτοβολταϊκών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας των Φ/Β είναι η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μηδενική ρύπανση της ατμόσφαιρας. Άλλα πλεονεκτήματα είναι τα παρακάτω:

- Μεγάλη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων (πάνω από 25 χρόνια).
- Αθόρυβη λειτουργία.
- Μη κινητά μέρη.
- Χαμηλό μεταφορικό κόστος.
- Μηδαμινό κόστος συντήρησης και λειτουργίας.
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης τους σε οροφές και προσόψεις κτηρίων ως κύρια δομικά στοιχεία, σε περίπτωση έλλειψης χώρου.
- Δυνατότητα επέκτασης του συστήματος ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Η ανάπτυξη των Φ/Β εφαρμογών έχει πολλαπλά οφέλη για τους καταναλωτές, την εταιρεία ηλεκτρισμού και την εθνική οικονομία. Συγκεκριμένα έχουμε:

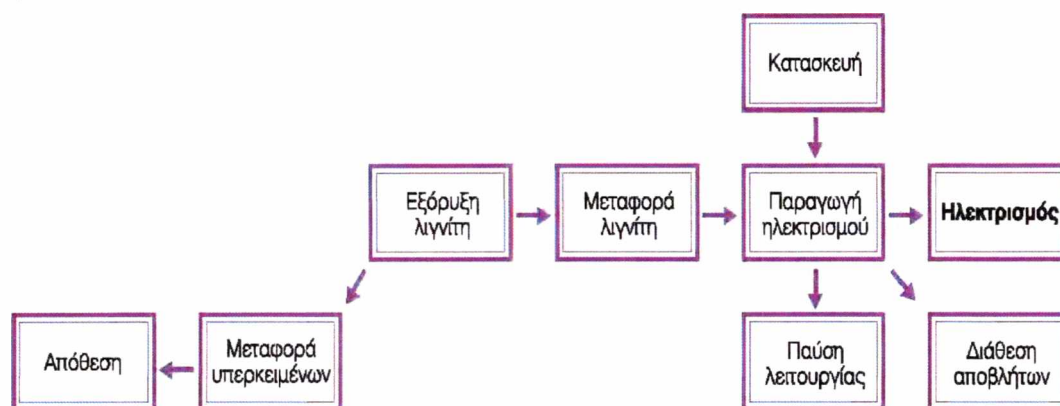
- Αξιοποίηση μιας εγχώριας και ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, που βρίσκεται σε αφθονία, με συμβολή στην ασφάλεια παροχής ενέργειας και στη μείωση των διακοπών ρεύματος.
- Ενίσχυση του ηλεκτρικού δικτύου στις ώρες των μεσημβρινών αιχμών, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο έλλειψης ή πολύ υψηλού κόστους αιχμής, όπου τα Φ/Β παράγουν το μεγάλο μέρος ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μείωση των απωλειών του δικτύου με την παραγωγή στον τόπο της κατανάλωσης, ελάφρυνση των γραμμών και χρονική μετάθεση των επενδύσεων στο δίκτυο.
- Αύξηση του τουρισμού, λόγω καθαρότερου περιβάλλοντος και θετικής εικόνας των προορισμών με Φ/Β (οικολογικός τουρισμός), ιδιαίτερα στα νησιά.

- Κοινωνική προσφορά του παραγωγού/καταναλωτή και συμβολή του στη βιώσιμη ανάπτυξη.
- Ανάπτυξη οικονομικών δραστηριοτήτων με έντονη συμβολή σε αναπτυξιακούς και κοινωνικούς στόχους, με τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.
- Ανάπτυξη βιομηχανικών δραστηριοτήτων, εντός και εκτός της χώρας στους κλάδους της κατασκευής Φ/Β, ανάπτυξης ηλεκτρονικών ισχύος και παραγωγής μπαταριών για Φ/Β εφαρμογές.
- Η ανάπτυξη των Φ/Β συμβάλλει επίσης στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Είναι χαρακτηριστικό ότι για κάθε νέο μεγαβάτ (MW) Φ/Β δημιουργούνται περίπου 50 νέες θέσεις εργασίας (20 στην κατασκευή Φ/Β και 30 στην εμπορία, εγκατάσταση και παροχή των συναφών υπηρεσιών).



### 7.2.1 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (I.CA) - Σύγκριση με Θερμοηλεκτρικό Σταθμό

Τα διαφορετικά στάδια του Κύκλου Ζωής ενός Λιγνιτικού Σταθμού παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί :



Τα βασικά χαρακτηριστικά του Κύκλου Ζωής ενός Λιγνιτικού Σταθμού (περιοχή Πτολεμαΐδας) δίνονται παρακάτω:

**Πίνακας 7.2:** βασικά χαρακτηριστικά του Κύκλου Ζωής ενός Λιγνιτικού Σταθμού

Φάση	Παράμετρος	Ποσότητα
1.Εξόρυξη λιγνίτη	Θέση	Πτολεμαΐδα
	Τύπος ορυχείων	Επιφανειακός
	% υπερκείμενα στο λιγνίτη	3,3-5m <sup>3</sup> /t
2.Μεταφορά	Αέριες εκπομπές	TSP 1.525 t/yr
		NO <sub>x</sub> 203 t/yr
		S02 94,5 t/yr
		C02 114.946 t/yr
3.Παραγωγή ηλεκτρισμού	Καύσιμο	Λιγνίτης
	Θέση	Άγιος Δημήτριος - Πτολεμαΐδα
	Εγκατεστημένη ισχύς	366,5 MW
	Παραγωγή ενέργειας	2.199.000 MWh
	Αέριες εκπομπές	TSP 556 t/yr
		NO <sub>x</sub> 2,170 t/yr
		S02 2.615 t/yr
		C02 2.902.680 t/yr
4.Κατασκευή σταθμού	Υλικά	107.500 t ατσάλι
		198.000 t τσιμέντο
5. Απόβλητα	Στερεά απόβλητα	12.200.000 m <sup>3</sup> /yr (λιγνιτορυχείο)
		355.000 t/yr (σταθμός)
	Υγρά απόβλητα	1.500.000 t/yr

Κατά τη φάση λειτουργίας ενός Φ/Β συστήματος δεν παράγονται αέριες εκπομπές στην ατμόσφαιρα και δεν υποβαθμίζεται η ποιότητά της. Αντίθετα, χάρη στη λειτουργία του, επέρχεται μείωση των συνολικών ποσοτήτων αέριων ρυπαντών (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, σωματίδια κ.λπ.), λόγω της υποκατάστασης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από συμβατικά καύσιμα στους σταθμούς της ΔΕΗ, με ανάλογη που παράγεται από ΑΠΕ (Φ/Β).

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την ειδική εκπομπή ρύπων των μονάδων της ΔΕΗ στο διασυνδεδεμένο σύστημα, η λειτουργία ενός θερμοηλεκτρικού σταθμού συνεισφέρει στην έκλυση των ακόλουθων ατμοσφαιρικών ρύπων:

**Πίνακας 7.3:** εκπομπές ρύπων μονάδων ΔΕΗ

Ρύποι	Εκπομπές (g/kWh)
CO <sub>2</sub>	850,00
SO <sub>2</sub>	15,50
CO	0,18
NO <sub>x</sub>	1,20
HC	0,05
Σωματίδια	0,8

Τα διαφορετικό στάδια του Κύκλου Ζωής ενός Φ/Β παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:

**Πίνακας 7.4:** Στάδια κύκλου ζωής Φ/Β



Οι συνολικές εκπομπές αέριων ρύπων, και ειδικότερα CO<sub>2</sub>, στα διαφορετικά στάδια ζωής ενός Φ/Β συστήματος ποικίλουν ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και χρήση των Φ/Β. Όσο περνούν τα χρόνια και η τεχνολογία εξελίσσεται, μειώνονται και οι εκπομπές ρύπων ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Σήμερα για εγκαταστάσεις στη Νότια Ευρώπη, τα φωτοβολταϊκά λεπτής επίστρωσης εκπέμπουν 25 g CO<sub>2</sub>/kWh, και τα φωτοβολταϊκά πυριτίου 32 g CO<sub>2</sub>/kWh, ενώ στο μέλλον αναμένεται να εκπέμπουν αμφότερα 15 g CO<sub>2</sub>/kWh. Πρόκειται για αρκετά χαμηλές τιμές, σημαντικά χαμηλότερες από τα 400 g CO<sub>2</sub>/kWh που εκπέμπονται από την ηλεκτροπαραγωγή με φυσικό αέριο και συνδυασμένο κύκλο. Τα συστήματα απορρόφησης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (Carbon Capture and Storage- CCS) που εφαρμόζονται πιλοτικά σε συνδυασμό με ηλεκτροπαραγωγή από καύση άνθρακα εκλύουν 120-200 g CO<sub>2</sub>/kWh (χωρίς σύστημα CCS η καύση άνθρακα αποδίδει στην ατμόσφαιρα περίπου 1.000 g CO<sub>2</sub>/kWh). Τα φωτοβολταϊκά εκπέμπουν επίσης λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα από τα συστήματα βιομάζας (45 g CO<sub>2</sub>/kWh), αλλά περισσότερο από τους πυρηνικούς σταθμούς (6-25 g CO<sub>2</sub>/kWh) και τα αιολικά πάρκα (11 g CO<sub>2</sub>/kWh).

Η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την Ελλάδα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση λιγνίτη σε σχέση με τις ΑΠΕ παρατίθεται στον πίνακα που ακολουθεί (δεν υπάρχουν στοιχεία για τα Φ/Β συστήματα):

**Πίνακας 7.5:** Περιβαλλοντικές επιπτώσεις λιγνίτη σε σχέση με τις ΑΠΕ

Επίπτωση	Εκτιμώμενο κόστος (mECU/kWh)			
	Λιγνίτης	Βιομάζα	ΜΥΗΕ	Αιολικά Πάρκα
Δημόσια υγεία	17,1	5,8	Αμελητέες	Αμελητέες
Επαγγελματικές ασθένειες	0,12	0,016	0,26	Αμελητέες
Επαγγελματικά ατυχήματα	-	-	-	-
Γεωργία			0,11	Αμελητέες
- SO <sub>2</sub>	0,027	0,0013		
- NO <sub>x</sub>	0,35	0,011		
Οικοσυστήματα	Ποσοτικοποιείται μόνο η επίπτωση	Αμελητέες	3,6	Αμελητέες
Δάση	-	-	0,055	-
Χρήση γης	-	-	-	0,14
Υλικά	0,27	0,0289	-	Αμελητέες
Μνημεία	0,019	-	-	-
Θόρυβος	Αμελητέες	Μη ποσοτικοποιημένα	0,097	1,12
Τοπίο	Αμελητέες	Μη ποσοτικοποιημένα	Αμελητέες	Αμελητέες



**Πίνακας 7.6:** Αποφυγή εκλυόμενων ρύπων (σε gr) ανά ηλιακή ακτινοβολία

Υποκατάσταση	Αποφυγή εκλυόμενων ρύπων (σε gr) ανά ηλιακή κιλοβατώρα (λαμβάνοντας υπ' όψη και τις απώλειες του δικτύου)			
	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>
Λιγνίτη	1.482	1-1,8	1,17-1,23	1,1
Πετρελαίου (χαμηλού θείου)	830	3,5	1,5	0,34
Φυσικού αερίου	475	0,017	0,6	-
Μέσου ενεργειακού μείγματος χώρας (2008)	1.017	CO <sub>2</sub> : διοξείδιο του άνθρακα, SO <sub>2</sub> : διοξείδιο του θείου NO <sub>x</sub> : οξειδία του αζώτου, PM <sub>10</sub> : μικροσωματίδια		

Ο παραπάνω πίνακας συνοψίζει την ποσότητα των ρύπων (σε γραμμάρια) η έκλυση των οποίων αποφεύγεται για κάθε ηλιακή κιλοβατώρα που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

### 3.5.3. Εκπομπή τοξικών ουσιών (καδμίου)

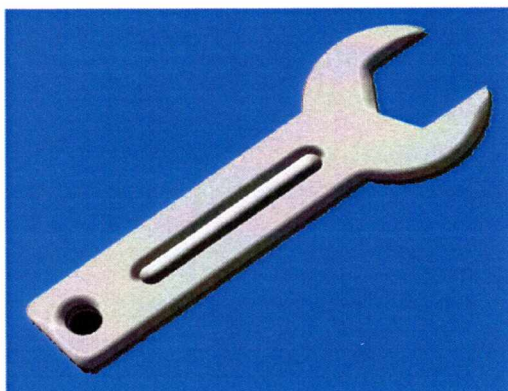
Τα φωτοβολταϊκά γενικά δεν εκπέμπουν επικίνδυνες τοξικές ουσίες στο περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια αρκετό σκεπτικισμό έχει προκαλέσει η χρήση καδμίου στα φωτοβολταϊκά λεπτής επίστρωσης καδμίου/τελλουρίου CdTe. Το κάδμιο είναι ένα μη βιοδιασπώμενο, τοξικό και καρκινογόνο στοιχείο που δεν αποικοδομείται από τους οργανισμούς και συγκεντρώνεται κατά μήκος των τροφικών αλυσίδων. Σχετικά με το κάδμιο που χρησιμοποιείται στα πανέλα καδμίου/τελλουρίου πρέπει να επισημανθεί ότι πρόκειται για αρκετά σταθερής μορφής κάδμιο που είναι μη διαλυτό στο νερό, έτσι οι πιθανότητες διαφυγής καδμίου στο περιβάλλον είναι μικρές. Η ποσότητα καδμίου που χρησιμοποιείται στα πανέλα είναι μικρή (5-10 g/m<sup>2</sup>) και το κάδμιο είναι εντελώς απομονωμένο μέσα στο πανέλο. Ακόμη και σε περίπτωση πυρκαγιάς, οι πιθανότητες διαφυγής καδμίου στο περιβάλλον είναι μικρές αν χρησιμοποιηθεί διπλό τζάμι προστασίας. Με τις κατάλληλες τεχνικές ελέγχου μπορεί να διασφαλισθεί ότι οι εκπομπές καδμίου από την παραγωγή των πανέλων είναι σχεδόν μηδενικές. Υποστηρίζεται επιπλέον από κάποιους ότι τα πανέλα καδμίου-τελλουρίου είναι ένας ασφαλής τρόπος φύλαξης του καδμίου που ούτως ή άλλως παράγεται κατά τη διαδικασία εξαγωγής του ψευδαργύρου. Πολύ σημαντική διαδικασία για να εξασφαλιστεί η μη διαφυγή καδμίου στο περιβάλλον είναι η ανακύκλωση των παλιών πανέλων.

Ανάλυση του κύκλου ζωής των φωτοβολταϊκών καδμίου-τελλουρίου δείχνει ότι το μεγαλύτερο μέρος του εκπεμπόμενου καδμίου παράγεται κατά την ηλεκτροπαραγωγή για να παραχθεί η ενέργεια που απαιτείται σε όλο τον κύκλο ζωής. Έτσι τελικά τα φωτοβολταϊκά πυριτίου εκπέμπουν ελαφρώς περισσότερο κάδμιο στο περιβάλλον (0,80,9 g/GWh) από τα φωτοβολταϊκά καδμίου (0,3 g/GWh) για εγκαταστάσεις στη Νότια Ευρώπη. Φυσικά πολύ περισσότερο κάδμιο εκπέμπει η συμβατική ηλεκτροπαραγωγή: άνθρακας 3,1 g/GWh, λιγνίτης 6,2 g/GWh ,πετρέλαιο 43,3 g/GWh.

### **3.5.1. Χρόνος επανάκτησης της ενέργειας**

Ο δείκτης αυτός δείχνει πόσα χρόνια (ή μήνες) πρέπει να παράγει ενέργεια μια μονάδα παραγωγής προκειμένου να έχει παράγει τόση ακριβώς ενέργεια όση δαπανήθηκε συνολικά για την κατασκευή, τοποθέτηση και συναρμολόγησή της. Αφορά το συνολικό κύκλο ζωής των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας, δηλαδή περιλαμβάνει στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών, την ενέργεια για την εξόρυξη των πρώτων υλών, για την κατασκευή τους στη βιομηχανική μονάδα και για τις εργασίες εγκατάστασης που απαιτούνται πάνω στο χωράφι ή τη στέγη. Ο χρόνος επανάκτησης ενέργειας εξαρτάται από την ηλιοφάνεια της περιοχής που βρίσκεται η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση και από το είδος της χρησιμοποιούμενης φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Σε γενικές γραμμές τα φωτοβολταϊκά πυριτίου έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες περιόδους επανάκτησης ενέργειας, από τα φωτοβολταϊκά λεπτής επίστρωσης. Επίσης στη Βόρεια και Κεντρική Ευρώπη ο χρόνος επανάκτησης είναι μεγαλύτερος από ότι στη Νότια. Κατά μέσο όρο ο χρόνος επανάκτησης της ενέργειας για φωτοβολταϊκά πυριτίου είναι 1,5 με 2 χρόνια στη Νότια Ευρώπη και 2,7 με 3,5 στην Κεντρική Ευρώπη. Για φωτοβολταϊκά λεπτής επίστρωσης, υπάρχουν λιγότερα στοιχεία, καθώς αποτελούν ακόμη μικρό ποσοστό των συνολικών εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών. Τα διαθέσιμα στοιχεία ωστόσο δείχνουν ότι ο χρόνος επανάκτησης της ενέργειας είναι περίπου 1 με 1,2 έτη στη Νότια Ευρώπη.

## ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΑ ΟΦΕΛΗ



**1=20**

Τα φωτοβολταϊκά δημιουργούν 20 φορές περισσότερες θέσεις εργασίας από το λιγνίτη για την ίδια παραγωγή ενέργειας

**Σχήμα 7.3** Αναπτυξιακά οφέλη ΦΒ

Οι εν δυνάμει οχλήσεις που προκύπτουν από τη χρήση των Φ/Β συστημάτων, εστιάζονται στα εξής θέματα

1. Περίπτωση ατυχήματος (θραύση πλαισίων ή πυρκαγιά).
2. Αισθητικά αποδεκτή ενσωμάτωση των Φ/Β.
3. Προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν οι συσσωρευτές (αφορά μόνο σε αυτόνομα συστήματα ή/και συστήματα UPS).

### ➤ Περίπτωση ατυχήματος

Σε ό,τι αφορά στην περίπτωση ατυχήματος (θραύση πλαισίων ή πυρκαγιά), δεν υπάρχει πρόβλημα από τη θραύση των Φ/Β πλαισίων, καθώς αυτά είναι σχεδιασμένα να αντέχουν σε δυνατές κρούσεις, θερμικές καταπονήσεις, θαλάσσιο αμμόδη άνεμο, χαλαζόπτωση και επικάλυψη πάγου. Ακόμη και σε περίπτωση θραύσης, όμως, δεν έχουμε αποκόλληση τεμαχίων γυαλιού, αλλά απλώς μειωμένη λειτουργικότητα ή/και αστοχία του πλαισίου. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, οι εκλύσεις προσομοιάζουν σε αυτές ενός γυαλιού που λιώνει σε υψηλές θερμοκρασίες. Στο παρελθόν, είχαν εκφραστεί κάποιες επιφυλάξεις για ορισμένες τεχνολογίες Φ/Β (όπως των πλαισίων τεχνολογίας CdTe), οι οποίες, λόγω του ενθυλακωμένου καδμίου, θεωρήθηκε ότι μπορεί να οδηγήσουν στην έκλυση τοξικών ουσιών σε περίπτωση καύσης του πλαισίου.



### ➤ Αισθητική ένταξη Φ/Β

Τα Φ/Β μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά, παρέχοντας τη δυνατότητα για καινοτόμους αρχιτεκτονικούς σχεδιασμούς, καθώς διατίθενται σε ποικιλία χρωμάτων, μεγεθών, σχημάτων και μπορούν να παρέχουν ευελιξία και πλαστικότητα στη φόρμα, ενώ δίνουν και δυνατότητα διαφορικής διαπερατότητας του φωτός, ανάλογα με τις ανάγκες του σχεδιασμού. Το ορατό μέρος των Φ/Β συστημάτων αφορά στα Φ/Β πλαίσια και μόνο, αφού τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος (αντιστροφέας και πιθανώς συσσωρευτές) βρίσκονται συνήθως σε κάποιο φυλασσόμενο χώρο. Αν και το θέμα της αισθητικής είναι εν πολλοίς υποκειμενικό, δεν έχουν καταγραφεί παράπονα αισθητικής φύσης για τα Φ/Β πλαίσια (πολλά από τα οποία είναι υψηλής αισθητικής και προορίζονται για ειδικές αρχιτεκτονικές εφαρμογές). Επιπλέον, λόγω της σκουρόχρωμης επιφάνειάς τους, τα Φ/Β δεν προκαλούν θαμβώσεις ή ενοχλητικές αντανακλάσεις, σε αντίθεση με ορισμένες άλλες εφαρμογές γυάλινων επιφανειών. Όταν υπάρχει πρόβλημα αισθητικής ενσωμάτωσης, αυτό δεν αφορά στα Φ/Β πλαίσια, αλλά, συνήθως, στις βάσεις στήριξης. Τα Φ/Β μπορούν να τοποθετηθούν σε επίπεδες ή κεκλιμένες στέγες, σε κεραμοσκεπές (υποκαθιστώντας πιθανώς τα κεραμίδια), σε προσόψεις κτιρίων, σε ελεύθερα οικόπεδα, σε μη κτιριακές κατασκευές, σε ρόλο ηχοφράγματος, κ.λπ..

### ➤ Προδιαγραφές συσσωρευτών

Στην περίπτωση αυτόνομων συστημάτων ή/και συστημάτων UPS, απαιτείται η χρήση συσσωρευτών ανοιχτού ή κλειστού τύπου, ειδικά σχεδιασμένων για Φ/Β (χαμηλού αντιμονίου <3%). Οι προδιαγραφές των συσσωρευτών θα πρέπει να ακολουθούν τις γενικές κατευθύνσεις που περιγράφονται στο πρότυπο EN IEC 61427 (ή ισοδύναμες). Το εν δυνάμει πρόβλημα με τους συσσωρευτές απορρέει από τη μη χρηστή τελική διάθεσή τους. Κάτι τέτοιο, όμως, προλαμβάνεται πλέον από τη σχετική νομοθεσία που προβλέπει την ανακύκλωσή τους. Βέβαια, η πλειοψηφία των εφαρμογών της διεθνούς αγοράς αφορά σε συστήματα διασυνδεδεμένα με δίκτυα, τα οποία δεν απαιτούν τη χρήση συσσωρευτών.

### ➤ Κόστος εξοπλισμού και Τοποθέτησης Φ/Β

Το κόστος ενός Φωτοβολταϊκού συστήματος ανά εγκατεστημένο KW εξαρτάται από:

- την τεχνολογία των πάνελ που θα χρησιμοποιηθεί (π.χ. τα πάνελ άμορφου πυριτίου κοστίζουν φτηνότερα αλλά απαιτούν περίπου διπλάσια έκταση)
- την προέλευση των πάνελ και των λοιπών στοιχείων του εξοπλισμού (τα ευρωπαϊκά είναι ακριβότερα αλλά και πιο αξιόπιστα από τα κινέζικα)
- το μέγεθος του Φ/Β Συστήματος (όσο μικρότερη είναι η ισχύς, τόσο μεγαλύτερο είναι το κόστος ανά εγκατεστημένο KW)
- τη δυσκολία της εγκατάστασης (δυσπρόσιτες περιοχές, ή εγκαταστάσεις με αυξημένη τεχνική δυσκολία κοστίζουν περισσότερο)
- τη μορφολογία του εδάφους (ένα σχετικά ίσιο χωράφι έχει μικρότερο κόστος χωματουργικών και λοιπών εργασιών στήριξης)
- την απόσταση της εγκατάστασης από το δίκτυο της ΔΕΗ (υπολογίζεται επιπλέον το κόστος επέκτασης του δικτύου)

Το κόστος για κάθε εγκατεστημένο KW κυμαίνεται από 4.600 Ευρώ (για εγκατάσταση με thin film- λεπτού υμεναίου άμορφου πυριτίου σε σκεπή κτιρίου) έως 7.000 ευρώ (για εγκαταστάσεις με πάνελ πολυκρυσταλικού ή μονοκρυσταλικού πυριτίου, σύστημα ανίχνευσης του ήλιου δύο αξόνων και πλήρη διαμόρφωση χώρου και περίφραξη ασφαλείας).

### 7.3 Θεσμικοί Φορείς της Αγοράς Ενέργειας

#### ➤ Η ΠΑΕ



Η ΠΑΕ είναι η ανεξάρτητη διοικητική αρχή (ελέγχεται μόνο από τον Υπουργό Ανάπτυξης) που έχει ως σκοπό να ελέγχει την λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η ΠΑΕ γνωμοδοτεί για την χορήγηση αδειών για δραστηριότητες στον χώρο της Ηλεκτρικής Ενέργειας, για τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας, τον τρόπο λειτουργίας της αγοράς και γενικότερα έχει ουσιαστικό ρόλο στην δημιουργία μιας υγιούς και ελεύθερης αγοράς με σκοπό την παροχή των βέλτιστων υπηρεσιών στον τελικό αποδέκτη που είναι ο καταναλωτής. Η σύσταση της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας επιβλήθηκε ουσιαστικά από την ανάγκη εναρμόνισης της Ελληνικής νομοθεσίας με την Κοινοτική Οδηγία 96/92ΕΚ (Σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας) και συστήθηκε με τον νόμο Ν.2773/22-12-99 (Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας - Ρύθμιση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής και λοιπές διατάξεις).

#### ➤ Η ΔΕΗ Α.Ε.



Η ΔΕΗ είναι ο συντριπτικά μεγαλύτερος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα και ο ρόλος της στο πεδίο ήταν καταλυτικός στα 50 χρόνια της ύπαρξης της. Με τις νομοθετικές ρυθμίσεις των τελευταίων ετών και την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας έγινε ανώνυμος εταιρεία με το ΠΔ333/2000. Οι κύριοι σκοποί της εταιρείας σύμφωνα με το καταστατικό της είναι:

- Η άσκηση εμπορικής και βιομηχανικής δραστηριότητας στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και στο εξωτερικό.
- Η μελέτη, η επίβλεψη, η κατασκευή, η εκμετάλλευση, η συντήρηση και η λειτουργία εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως και δικτύων μεταφοράς και διανομής.
- Η προμήθεια καθώς και η πώληση ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η εξόρυξη, η παραγωγή και η προμήθεια ενεργειακών πρώτων υλών και γενικότερα η δραστηριοποίηση στον ευρύτερο τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας με την μορφή συνεργασιών, επενδύσεων κτλ.



Από την 1.1.2001 λειτουργεί ως ανώνυμη εταιρία ενώ από τις 12.12.2001 έχει εισαχθεί στα Χρηματιστήρια Αξιών Αθηνών και Λονδίνου. Κατέχει περίπου το 96% της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος στην Ελλάδα (12.695 MW) η οποία προέρχεται από λιγνιτικές, υδροηλεκτρικές, πετρελαϊκές μονάδες, μονάδες φυσικού αερίου καθώς και από αιολικά και ηλιακά πάρκα. Παράγει από λιγνίτη το 61% περίπου της ηλεκτρικής της παραγωγής (2ος μεγαλύτερος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση). Έχει στην ιδιοκτησία της το εθνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μήκους 11.400 χλμ. καθώς και το δίκτυο διανομής συνολικού μήκους 208.000 χλμ. Είναι η μοναδική εταιρία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, την οποία παρέχει σε 7,1 εκατομμύρια πελάτες μέσω ενός δικτύου των 277 καταστημάτων.

➤ **ΔΕΣΜΗΕ Α.Ε.**



Ο Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ) είναι ανώνυμη εταιρεία που έχει σκοπό τη λειτουργία, εκμετάλλευση, διασφάλιση της συντήρησης και μέριμνα για την ανάπτυξη του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας κατά την έννοια του άρθρου 2 του Νόμου 2773/1999, σε ολόκληρη τη χώρα, καθώς και των διασυνδέσεων του με τα άλλα δίκτυα για να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια, κατα τρόπο επαρκή, ασφαλή, οικονομικά αποδοτικό και αξιόπιστο. Σκοπός του είναι η βέλτιστη κατανομή του φορτίου στο δίκτυο. Ταυτόχρονα ο ΔΕΣΜΗΕ θα μεριμνά, όταν υπάρξουν στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας περισσότεροι παραγωγοί και προμηθευτές, για την εκκαθάριση των μεταξύ του συναλλαγών. Επειδή η ακριβής κατανάλωση ρεύματος δεν μπορεί να προβλεφθεί, αναμένεται ότι κάποιοι παραγωγοί θα παράγουν περισσότερο ρεύμα απ'όσο μπορούν να διαθέσουν και το αντίθετο. Για την κάλυψη των αναγκών τους θα προβαίνουν σε αγοραπωλησία του πλεονάζοντος/ελλείποντος μεταξύ τους και ο ΔΕΣΜΗΕ θα καταγράφει ποιος οφείλει σε ποιον.

Ο ΔΕΣΜΗΕ είναι και ο φορέας του κράτους που αγοράζει την παραγόμενη ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε περιοχές της χώρας που είναι διασυνδεδεμένες με το εθνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Στις μη-διασυνδεδεμένες περιοχές, ο αντίστοιχος φορέας είναι η ΔΕΗ. Και οι δυο περιπτώσεις αγοραπωλησίας ενέργειας διέπονται από το νόμο για τις ΑΠΕ.

Συστήθηκε με το Προεδρικό Διάταγμα 328/12-12-2000 και ανήκει κατά 51% στο κράτος. Το υπόλοιπο 49% ανήκει στις εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως τώρα η μοναδική είναι η ΔΕΗ, αλλά αυτό αναμένεται να αλλάξει σύντομα. Η ίδρυσή του εντάσσεται στο πλαίσιο της απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και της επιδίωξης να κυριαρχήσουν συνθήκες ανταγωνισμού στην παραγωγή και διάθεση του ρεύματος. Πριν τη σύστασή του την ευθύνη για το δίκτυο είχε η ΔΕΗ.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>**

### **ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ & ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

## 8.1 Νομοθετικές Ρυθμίσεις

Στα μέσα του 2010, το Κοινοβούλιο ενέκρινε ένα νέο νόμο για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Ν. 3851/2010, ΦΕΚ 85Α, 4-6-2010), ο οποίος επιφέρει σημαντικές αλλαγές σε ότι αφορά στην αδειοδότηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ακολούθησαν μια σειρά από υπουργικές αποφάσεις, οι οποίες τροποποίησαν παλαιότερες ρυθμίσεις κυρίως πολεοδομικού χαρακτήρα για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, διαμορφώνοντας ένα εντελώς νέο επενδυτικό τοπίο.

### ➤ κομβικά σημεία

Ορίζεται, ως εθνικός στόχος, η κάλυψη με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) του 40% τουλάχιστον της ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ως το 2020. Το μερίδιο όμως των φωτοβολταϊκών στο μίγμα των ΑΠΕ, το οποίο καθορίστηκε στο Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ τον Ιούλιο του 2010 και εξειδικεύτηκε περαιτέρω με υπουργική απόφαση τον Σεπτέμβριο του 2010, δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική δυναμική της αγοράς και στο έντονο επενδυτικό ενδιαφέρον που έχει εκδηλωθεί.

Συγκεκριμένα, ο εθνικός στόχος για τα φωτοβολταϊκά είναι η εγκατάσταση 1.500 MWp ως το 2014 και συνολικά 2.200 MWp ως το 2020. Από την ισχύ αυτή, τα 750 MWp έχει αποφασιστεί ότι θα δοθούν στους κατ' επάγγελμα αγρότες (500MWp ως το 2014 και 750 MWp συνολικά ως το 2020), 350 MWp θα πρέπει να εγκατασταθούν σε κτίρια (200 MWp ως το 2014 και 350 MWp συνολικά ως το 2020) και τα υπόλοιπα 1.100 MWp θα κατανεμηθούν στους υπόλοιπους επενδυτές που προσδοκούν να αναπτύξουν φωτοβολταϊκούς σταθμούς επί εδάφους. Ο επίσημος αυτός στόχος είναι μόλις το ένα τρίτο απ' αυτό που ο ΣΕΦ (σύνδεσμος εταιριών φωτοβολταϊκών) θεωρεί ως ρεαλιστικό και ως ανταποκρινόμενο στις πραγματικές ανάγκες και δυνατότητες της αγοράς. Από την κοινοτική νομοθεσία προβλέπεται η δυνατότητα αναθεώρησης των ενδεικτικών στόχων για κάθε τεχνολογία ανά διετία ή και νωρίτερα αν χρειαστεί, και επομένως μπορεί μελλοντικά να υπάρξουν διορθωτικές κινήσεις προς αυτή την κατεύθυνση.

Ο νέος νόμος απλοποιεί κάποιες από τις παλιές διαδικασίες αδειοδότησης. Συγκεκριμένα, δεν απαιτείται πλέον άδεια παραγωγής ή άλλη διαπιστωτική απόφαση (γνωστή και ως "εξαίρεση") για φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος **έως 1 MWp**. Για φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος **μεγαλύτερης του 1 MWp** απαιτείται η έκδοση άδειας παραγωγής η οποία εκδίδεται από τη ΠΑΕ (και όχι από τον υπουργό Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής όπως ίσχυε μέχρι σήμερα). Για τα συστήματα που απαιτείται άδεια παραγωγής απαιτείται επίσης η έκδοση άδειας εγκατάστασης και άδειας λειτουργίας (οι οποίες εκδίδονται από την αρμόδια Περιφέρεια) όπως και στο παρελθόν. Επίσης, δεν απαιτείται περιβαλλοντική αδειοδότηση για συστήματα που εγκαθίστανται σε κτίρια και οργανωμένους υποδοχείς βιομηχανικών δραστηριοτήτων.

Για συστήματα που εγκαθίστανται σε γήπεδα (οικόπεδα και αγροτεμάχια), δεν απαιτείται περιβαλλοντική αδειοδότηση για συστήματα έως **500 KWp** εφόσον πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Για τα συστήματα αυτά, απαιτείται ειδική περιβαλλοντική εξαίρεση ("βεβαίωση απαλλαγής από ΕΠΟ"-Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων) από την αρμόδια Περιφέρεια, η οποία, σύμφωνα με το νόμο, δίνεται σε 20 μέρες από την υποβολή της σχετικής αίτησης. Για όσα συστήματα εγκαθίστανται σε γήπεδα, απαιτείται ΕΠΟ εφόσον εγκαθίστανται σε περιοχές Natura, παράκτιες ζώνες (100μ από οριογραμμή αιγιαλού) και σε γήπεδα που γειτνιάζουν σε απόσταση μικρότερη από εκατόν πενήντα (150) μέτρα, με άλλο γήπεδο για το οποίο έχει εκδοθεί άδεια παραγωγής ή απόφαση ΕΠΟ ή Προσφορά Σύνδεσης φωτοβολταϊκού σταθμού και η συνολική ισχύς των σταθμών υπερβαίνει τα 500 KMr.

Για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν απαιτείται οικοδομική άδεια, αλλά έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας από την αρμόδια Διεύθυνση Πολεοδομίας. Για φωτοβολταϊκά συστήματα που εγκαθίστανται σε κτίρια και έχουν ισχύ έως **100 kWp**, δεν απαιτείται ούτε αυτή η έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας, αλλά αρκεί πλέον μια απλή γνωστοποίηση προς τη ΔΕΗ ότι ξεκινά η εγκατάσταση. Η ευνοϊκή αυτή ρύθμιση αφορά τον οικιακό τομέα καθώς και τα μικρά και μεσαία συστήματα που εγκαθίστανται σε κτίρια επιχειρήσεων.

Στις συμβάσεις σύνδεσης που συνάπτει ο αρμόδιος Διαχειριστής με τους φορείς φωτοβολταϊκών σταθμών που εξαιρούνται από τη λήψη άδειας παραγωγής, καθορίζεται προθεσμία σύνδεσης στο Σύστημα ή Δίκτυο, η οποία είναι αποκλειστική, και ορίζεται εγγύηση ή ποινική ρήτρα που καταπίπτει αν ο φορέας δεν υλοποιήσει τη σύνδεση εντός της καθορισθείσας προθεσμίας. Το ύψος της εγγύησης καθορίζεται με υπουργική απόφαση. Από την εγγύηση αυτή απαλλάσσονται όσα έργα αφορούν εγκαταστάσεις σε κτίρια και όσοι σταθμοί έχουν υπογράψει σύμβαση σύνδεσης πριν τις 4-6-2010 (ημερομηνία ισχύος του νέου νόμου 3851/2010).



Οι τιμές πώλησης της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας καθορίζονται ως εξής:

Πίνακας 8.1: τιμές πώλησης κιλοβατώρας

Έτος	Συστήματα σε οικιακές & εμπορικές στέγες ≤10 kWp (€/MWh)	Μήνας	Ηπειρωτικό δίκτυο (€/MWh)		Μη διασυνδεδεμένα νησιά (€/MWh)
			>100kWp	≤100kWp	Ανεξαρτήτως ισχύος (με εξαίρεση τα μικρά συστήματα έως 10 σε κτίρια όπου ισχύουν ενιαίες τιμές για όλη τη χώρα)
2009	550	Φεβρουάριος	400	450	450
		Αύγουστος			
2010		Φεβρουάριος			
2011		Αύγουστος	392,04	441,05	441,05
		Φεβρουάριος	372,83	419,43	419,43
		Αύγουστος	351,01	394,88	394,88
2012	522,5	Φεβρουάριος	333,81	375,53	375,53
		Αύγουστος	314,27	353,56	353,56
2013	496,38	Φεβρουάριος	298,38	336,23	336,23
		Αύγουστος	281,38	316,55	316,55
2014	471,56	Φεβρουάριος	268,94	302,56	302,56
		Αύγουστος	260,97	293,59	293,59
Για κάθε έτος ν από το 2015 και μετά  μΟΤΣν-1 = Μέση Οριακή Τιμή Συστήματος κατά το προηγούμενο έτος ν-1	-5% ετησίως		1,3*μΟΤΣν-1	1,4*μΟΤΣν-1	1,4*μΟΤΣν-1
Διάρκεια σύμβασης	25 έτη	20 έτη			
Οι τιμές που καθορίζονται στον ανωτέρω πίνακα αναπροσαρμόζονται κάθε έτος, κατά ποσοστό 25% του δείκτη τιμών καταναλωτή του προηγούμενου έτους					

Σημειωτέον ότι, από τον Φεβρουάριο του 2010, **δεν υπάρχουν πια επιδοτήσεις** για τα φωτοβολταϊκά από τον αναπτυξιακό νόμο, όπως ίσχυε παλαιότερα. Δεδομένης όμως της διαχρονικής πτώσης των τιμών που αναμένεται να συνεχιστεί μακροχρόνια, οι επενδύσεις είναι βιώσιμες και κερδοφόρες και μόνο με την τιμή που παρέχεται από το νόμο και περιγράφεται στον παραπάνω πίνακα 8.1..

Ένα ζήτημα που απασχόλησε στο παρελθόν πολλούς επενδυτές είναι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σε **γαίες υψηλής παραγωγικότητας**. Ο νέος νόμος προβλέπει πλέον τα εξής:

- Απαγορεύεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς σε αγροτεμάχια της Αττικής που χαρακτηρίζονται ως αγροτική γη υψηλής παραγωγικότητας, καθώς και σε περιοχές της Επικράτειας που έχουν ήδη καθοριστεί ως αγροτική γη υψηλής παραγωγικότητας από εγκεκριμένα Γενικά Πολεοδομικά Σχέδια (Γ.Π.Σ.) ή Σχέδια Χωρικής Οικιστικής Οργάνωσης Ανοιχτής Πόλης (Σ.Χ.Ο.Ο.Α.Π.) του Ν.2508/1997 (ΦΕΚ 124 Α'), καθώς και Ζώνες Οικιστικού Ελέγχου (Ζ.Ο.Ε.) του άρθρου 29 του Ν.1337/1983 (ΦΕΚ 33 Α'), εκτός αν διαφορετικά προβλέπεται στα εγκεκριμένα αυτά σχέδια.
- Με την επιφύλαξη του προηγούμενου εδαφίου, επιτρέπεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκούς σταθμούς σε αγροτεμάχια που χαρακτηρίζονται ως αγροτική γη υψηλής παραγωγικότητας. Στην περίπτωση αυτή η άδεια χορηγείται μόνον αν οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί για τους οποίους έχουν ήδη εκδοθεί άδειες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή, σε περίπτωση απαλλαγής, δεσμευτικές προσφορές σύνδεσης από τον αρμόδιο Διαχειριστή, καλύπτουν εδαφικές εκτάσεις που δεν υπερβαίνουν το 1% του συνόλου των καλλιεργούμενων εκτάσεων του συγκεκριμένου νομού. Για την εφαρμογή της διάταξης του προηγούμενου εδαφίου χρησιμοποιούνται τα στοιχεία της Ετήσιας Γεωργικής Στατιστικής Έρευνας του έτους 2008 της Γενικής Γραμματείας της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας της Ελλάδας. Για τον υπολογισμό της κάλυψης λαμβάνεται υπόψη η οριζόντια προβολή επί του εδάφους των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Με κοινή απόφαση των Υπουργών Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων και Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής είναι δυνατόν να ορίζονται όροι και προϋποθέσεις για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών σε αγροτεμάχια που χαρακτηρίζονται ως αγροτική γη υψηλής παραγωγικότητας, περιλαμβανομένων της μέγιστης κάλυψης εδάφους ανά σταθμό, των ελάχιστων αποστάσεων από τα όρια του γηπέδου του σταθμού, περιορισμών στον τρόπο θεμελίωσης και υποχρεώσεων για την αποκατάσταση του γηπέδου μετά την αποξήλωση των φωτοβολταϊκών σταθμών.

## 8.2 Επενδύσεις για Οικιακά Εμπορικά και Βιομηχανικά Συστήματα

Για όσους ενδιαφέρονται να ξεκινήσουν τώρα μία επένδυση στα φωτοβολταϊκά, ισχύουν τα εξής:

### 8.2.1. Οικιακά Συστήματα

Από 1<sup>η</sup> Ιουλίου 2009 ισχύει ένα πρόγραμμα για την εγκατάσταση μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων στον οικιακό-κτιριακό τομέα. Με το πρόγραμμα αυτό δίνονται κίνητρα με τη μορφή ενίσχυσης της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας, ώστε ο οικιακός καταναλωτής να κάνει απόσβεση του συστήματος που εγκατέστησε και να έχει και ένα λογικό κέρδος.

Αφορά οικιακούς καταναλωτές που επιθυμούν να εγκαταστήσουν φωτοβολταϊκά ισχύος έως 10 κιλοβάτ (KWp) στο δώμα ή τη στέγη νομίμως υφισταμένου κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων στεγάστρων βεραντών, προσόψεων και σκιάστρων, καθώς και βοηθητικών χώρων του κτιρίου, όπως αποθήκες και χώροι στάθμευσης. Για να ενταχθούν στο πρόγραμμα, θα πρέπει να έχουν στην κυριότητά τους το χώρο στον οποίο εγκαθίσταται το φωτοβολταϊκό σύστημα. Από τον Σεπτέμβριο του 2010, το Πρόγραμμα αφορά όλη την Επικράτεια. Ως μέγιστη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο πλαίσιο του Προγράμματος ορίζεται, για την ηπειρωτική χώρα, τα Διασυνδεδεμένα με το Σύστημα Νησιά και την Κρήτη τα 10 KWp και για τα λοιπά Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά τα 5 KWp.

Για τις **πολυκατοικίες** θα πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω όροι. Είτε να συμφωνήσουν εγγράφως οι υπόλοιποι ιδιοκτήτες, είτε το φωτοβολταϊκό να εγκατασταθεί εξ ονόματος όλων των ιδιοκτητών (τους οποίους στην περίπτωση αυτή εκπροσωπεί ο διαχειριστής). Σε κάθε πολυκατοικία μπορεί να μπει ένα μόνο σύστημα. Αν η ταράτσα είναι κοινόκτητη και οι κύριοι του χώρου αυτού θέλουν να την παραχωρήσουν σε κάποιο άλλο ιδιοκτήτη του κτιρίου που δεν έχει δικαιώματα στην ταράτσα, μπορούν να το κάνουν. Αν το σύστημα μπει σε στέγαστρο βεράντας διαμερίσματος, προφανώς μπορούν να μουν περισσότερα του ενός συστήματα σε μια πολυκατοικία.

Όλη η παραγόμενη από το φωτοβολταϊκό ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ και ο οικιακός μικροπαραγωγός ενέργειας πληρώνεται γι' αυτή με 55 λεπτά την κιλοβατώρα (0,55 €/ kWh), τιμή που είναι εγγυημένη για 25 χρόνια. Ο οικιακός μικροπαραγωγός ενέργειας συνεχίζει να αγοράζει ρεύμα από τη ΔΕΗ και να το πληρώνει στην τιμή που το πληρώνει και σήμερα (περίπου 10-12 λεπτά την κιλοβατώρα). Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι η ΔΕΗ θα εγκαταστήσει ένα νέο μετρητή για να καταγράφει την παραγόμενη ενέργεια. Αν, για παράδειγμα, στο δίμηνο το φωτοβολταϊκό παράγει ηλεκτρική ενέργεια αξίας 300 € και στο κτίριο καταναλώνεται ενέργεια αξίας 100 €, θα έρθει πιστωτικός λογαριασμός 200 €, ποσό που θα καταθέσει η ΔΕΗ στον τραπεζικό λογαριασμό του ιδιοκτήτη του φωτοβολταϊκού.



Δύο είναι οι **προϋποθέσεις** για να ενταχθεί κανείς στο πρόγραμμα:

- Να έχει μετρητή της ΔΕΗ στο όνομά του (ή στον κοινόχρηστο λογαριασμό της πολυκατοικίας αν επιλεγεί η συλλογική εγκατάσταση).
- Να καλύπτει μέρος των αναγκών σε ζεστό νερό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. ηλιακό θερμοσίφωνα, βιομάζα, γεωθερμική αντλία θερμότητας).

Μια ιδιαίτερα σημαντική ρύθμιση είναι ότι ο οικιακός παραγωγός ηλιακού ηλεκτρισμού δεν θεωρείται πια επιτηδευματίας, με άλλα λόγια απαλλάσσεται από το άνοιγμα βιβλίων στην εφορία. Όπως αναφέρει η σχετική κοινή υπουργική απόφαση, "δεν υφίστανται για τον κύριο του φωτοβολταϊκού συστήματος φορολογικές υποχρεώσεις για τη διάθεση της ενέργειας αυτής στο δίκτυο". Με άλλα λόγια, τα όποια έσοδα έχει ο οικιακός μικροπαραγωγός από την πώληση της ενέργειας δεν φορολογούνται.

Για την εγκατάσταση οικιακών φωτοβολταϊκών, δεν απαιτείται πλέον καμία άδεια (με εξαίρεση διατηρητέα κτίρια και παραδοσιακούς οικισμούς όπου απαιτείται η έγκριση της Επιτροπής Πολεοδομικού και Αρχιτεκτονικού Ελέγχου [ΕΠΑΕ]). Σύμφωνα με την ΥΑ 36720/25-8-2010 "Έγκριση ειδικών όρων για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών και ηλιακών συστημάτων σε κτίρια και οικοπέδα εντός σχεδίου περιοχών και σε οικισμούς" (ΦΕΚ 376/6-9-2010) δεν χρειάζεται πλέον ούτε η άδεια εργασιών μικρής κλίμακας από την Πολεοδομία, όπως ίσχυε μέχρι πρότινος. Απλώς γνωστοποιεί κανείς την έναρξη εργασιών στη ΔΕΗ όταν καταθέτει εκεί φάκελο για σύνδεση του συστήματος με το δίκτυο.

### **8.2.2 Μικρές Εφαρμογές έως 10 ΚΜw σε Στέγες Επιχειρήσεων**

Από 1<sup>η</sup> Ιουλίου 2009 ισχύει ένα πρόγραμμα για την εγκατάσταση μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων στον κτιριακό τομέα. Με το πρόγραμμα αυτό δίνονται κίνητρα με τη μορφή ενίσχυσης της παραγόμενης ηλιακής κιλοβατώρας, ώστε η μικρή επιχείρηση να κάνει απόσβεση του συστήματος που εγκατέστησε και να έχει και ένα λογικό κέρδος.

Το πρόγραμμα αφορά πολύ μικρές επιχειρήσεις που επιθυμούν να εγκαταστήσουν φωτοβολταϊκά ισχύος έως 10 κιλοβάτ (kWp) στο δώμα ή τη στέγη νομίμως υφισταμένου κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων στεγάστρων βεραντών, προσόψεων και σκιάστρων, καθώς και βοηθητικών χώρων του κτιρίου, όπως αποθήκες και χώροι στάθμευσης. Για να ενταχθούν στο πρόγραμμα, θα πρέπει να έχουν στην κυριότητά τους το χώρο στον οποίο εγκαθίσταται το φωτοβολταϊκό σύστημα. Πολύ μικρή επιχείρηση είναι αυτή που απασχολεί έως 10 άτομα και έχει κύκλο εργασιών και σύνολο ενεργητικού έως 2 εκατ. € ετησίως.

Από τον Σεπτέμβριο του 2010, το Πρόγραμμα αφορά όλη την Επικράτεια. Ως μέγιστη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο πλαίσιο του Προγράμματος ορίζεται, για την ηπειρωτική χώρα, τα Διασυνδεδεμένα με το Σύστημα Νησιά και την Κρήτη τα 10 kWp και για τα λοιπά Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά τα 5 kWp.

Όλη η παραγόμενη από το φωτοβολταϊκό ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ και ο μικροπαραγωγός ενέργειας πληρώνεται γι' αυτή με 55 λεπτά την κιλοβατώρα (0,55 kWh τιμή που είναι εγγυημένη για 25 χρόνια. Ο μικροπαραγωγός ενέργειας συνεχίζει να αγοράζει ρεύμα από τη ΔΕΗ και να το πληρώνει στην τιμή που το πληρώνει και σήμερα.

Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι η ΔΕΗ θα εγκαταστήσει ένα νέο μετρητή για να καταγράφει την παραγόμενη ενέργεια. Αν, για παράδειγμα, στο δίμηνο το φωτοβολταϊκό παράγει ηλεκτρική ενέργεια αξίας 1.000 € και η επιχείρηση καταναλώνει ενέργεια αξίας 400 €, θα έρθει πιστωτικός λογαριασμός 600 €, ποσό που θα καταθέσει η ΔΕΗ στον τραπεζικό λογαριασμό του ιδιοκτήτη του φωτοβολταϊκού.

Μία είναι η προϋπόθεση για να ενταχθεί κανείς στο πρόγραμμα: να μην έχει πάρει η επιχείρηση κάποια άλλη επιδότηση για το φωτοβολταϊκό από εθνικά ή κοινοτικά προγράμματα. Τα όποια έσοδα έχει η επιχείρηση από την πώληση της ενέργειας δεν φορολογούνται, με την προϋπόθεση ότι τα κέρδη εμφανίζονται σε ειδικό λογαριασμό αφορολόγητου αποθεματικού. Σε περίπτωση διανομής ή κεφαλαιοποίησής τους, ισχύει η τρέχουσα φορολογία για τα κέρδη που διανέμονται.

Για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών αυτής της ισχύος σε κτίρια, δεν απαιτείται πλέον καμία άδεια (με εξαίρεση διατηρητέα κτίρια και παραδοσιακούς οικισμούς όπου απαιτείται η έγκριση της Επιτροπής Πολεοδομικού και Αρχιτεκτονικού Ελέγχου [ΕΠΑΕ]). Σύμφωνα με την ΥΑ 36720/25-8-2010 "Έγκριση ειδικών όρων για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών και ηλιακών συστημάτων σε κτίρια και οικόπεδα εντός σχεδίου περιοχών και σε οικισμούς" (ΦΕΚ 376/6-9-2010) δεν χρειάζεται πλέον ούτε η άδεια εργασιών μικρής κλίμακας από την Πολεοδομία, όπως ίσχυε μέχρι πρότινος. Απλώς γνωστοποιεί κανείς την έναρξη εργασιών στη ΔΕΗ όταν καταθέτει εκεί φάκελο για σύνδεση του συστήματος με το δίκτυο.

Σημειώνεται ότι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ισχύος άνω των 10 kWp σε εμπορικές- βιομηχανικές στέγες, διέπεται από άλλους κανόνες και ισχύουν γι' αυτά τα συστήματα άλλα κίνητρα.

### **8.2.3 Μικρές Εφαρμογές έως 10 kWp σε Στέγες Κτιρίων του Δημοσίου και μη Κερδοσκοπικών Οργανισμών**

Με βάση το νέο νόμο για τις ΑΠΕ, τα κίνητρα και οι όροι που ισχύουν για τον οικιακό-κτιριακό τομέα, ισχύουν πλέον και για κτίρια όπου στεγάζονται Νομικά Πρόσωπα Δημοσίου Δικαίου (Ν.Π.Δ.Δ.) ή Νομικά Πρόσωπα Ιδιωτικού Δικαίου (Ν.Π.Ι.Δ.) μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα, τα οποία έχουν στην κυριότητά τους το χώρο στον οποίο εγκαθίσταται το φωτοβολταϊκό σύστημα. Το δικαίωμα εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος σε κτίριο ιδιοκτησίας Νομικού Προσώπου Δημοσίου Δικαίου, τη χρήση του οποίου έχει αναλάβει διαχειριστής (π.χ. σχολική επιτροπή), παρέχεται στον διαχειριστή, μετά από συναίνεση του κυρίου του κτιρίου.

Αν οι παραπάνω οργανισμοί επιθυμούν να εγκαταστήσουν φωτοβολταϊκό σύστημα με ισχύ μεγαλύτερη των 10 kWp, θα πρέπει να το κάνουν ως επιχειρηματική δραστηριότητα (να το αναλάβει π.χ. μία αναπτυξιακή εταιρία ενός Δήμου) και προφανώς με τα κίνητρα που ισχύουν και για τους υπόλοιπους επιχειρηματίες.

#### 8.2.4 Εμπορικές-Βιομηχανικές Στέγες

Ο Ν.3851/2010 και η ΥΑ 36720/25-8-2010 (ΦΕΚ 376/6-9-2010) επιτρέπουν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων κάθε ισχύος στο δώμα ή τη στέγη νομίμως υφισταμένου κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων στεγάστρων βεραντών, προσόψεων και σκιάστρων, καθώς και βοηθητικών χώρων του κτιρίου, όπως αποθήκες και χώροι στάθμευσης. Για τα συστήματα αυτά δεν απαιτείται περιβαλλοντική αδειοδότηση, ενώ για συστήματα ισχύος έως 1 MWp δεν απαιτείται και άδεια παραγωγής ή άλλη διαπιστωτική απόφαση. Για συστήματα >1 MWp απαιτείται άδεια παραγωγής από τη ΡΑΕ (η οποία συνοδεύεται και από δύο ακόμη άδειες: την άδεια εγκατάστασης και την άδεια λειτουργίας τις οποίες εκδίδει η αρμόδια Περιφέρεια).

Για **συστήματα με ισχύ από 10 kWp έως 100 kWp** τα μόνα βήματα που απαιτούνται είναι η προσφορά όρων σύνδεσης από τη ΔΕΗ και η υπογραφή της σύμβασης αγοροπωλησίας με τον ΔΕΣΜΗΕ.

Για συστήματα με ισχύ **από 100 kWp έως 1.000 kWp (1 MWp)** τα βήματα που απαιτούνται είναι η έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας από την Πολεοδομία, η προσφορά όρων σύνδεσης από τη ΔΕΗ και η υπογραφή της σύμβασης αγοροπωλησίας με τον ΔΕΣΜΗΕ.

Για **συστήματα με ισχύ μεγαλύτερη από 1 MWp** τα βήματα που απαιτούνται είναι η έκδοση άδειας παραγωγής από τη ΡΑΕ και στη συνέχεια άδειας εγκατάστασης από την Περιφέρεια, έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας από την Πολεοδομία, προσφορά όρων σύνδεσης από τη ΔΕΗ, υπογραφή της σύμβασης αγοροπωλησίας με τον ΔΕΣΜΗΕ και τελικά έκδοση άδειας λειτουργίας από την Περιφέρεια. Τα παραπάνω ισχύουν μόνο για το ηπειρωτικό δίκτυο, αφού τα αυτόνομα νησιωτικά δίκτυα θεωρούνται κορεσμένα και θα υπάρχουν κατά διαστήματα ειδικές ρυθμίσεις γι' αυτά. Σε κάθε περίπτωση πάντως, στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, μιλάμε πάντα για συστήματα με ισχύ μικρότερη των 100 kWp..

#### 8.2.5 Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί επί Εδάφους

Για **συστήματα με ισχύ έως 500 kWp** τα βήματα που απαιτούνται είναι η βεβαίωση απαλλαγής από Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ) η οποία χορηγείται από την Περιφέρεια (από την υποχρέωση αυτή εξαιρούνται τα έργα εντός οργανωμένων υποδοχέων βιομηχανικών δραστηριοτήτων), η έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας από την Πολεοδομία, η προσφορά όρων σύνδεσης από τη ΔΕΗ και η υπογραφή της σύμβασης αγοροπωλησίας με τον ΔΕΣΜΗΕ.

Για **συστήματα με ισχύ έως 500 kWp έως 1.000 kWp (1 MWp)** τα βήματα που απαιτούνται είναι η Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ) η οποία χορηγείται από την Περιφέρεια (από την υποχρέωση αυτή εξαιρούνται τα έργα εντός οργανωμένων υποδοχέων βιομηχανικών δραστηριοτήτων), η έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας από την Πολεοδομία, η προσφορά όρων σύνδεσης από τη ΔΕΗ και η υπογραφή της σύμβασης αγοροπωλησίας με τον ΔΕΣΜΗΕ.



Για **συστήματα με ισχύ μεγαλύτερη από 1 MWp** τα βήματα που απαιτούνται είναι η έκδοση άδειας παραγωγής από τη ΡΑΕ και στη συνέχεια άδειας εγκατάστασης από την Περιφέρεια (που προϋποθέτει και έγκριση ΕΠΟ όπου αυτή απαιτείται), έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας από την Πολεοδομία, προσφορά όρων σύνδεσης από τη ΔΕΗ, υπογραφή της σύμβασης αγοροπωλησίας με τον ΔΕΣΜΗΕ και τελικά έκδοση άδειας λειτουργίας από την Περιφέρεια. Ειδικά για την τελευταία αυτή κατηγορία, δεν είναι ακόμη σαφές αν η ΡΑΕ θα εξετάζει άμεσα τις νέες αιτήσεις, δεδομένου του πλαφόν που έχει τεθεί αλλά και του μεγάλου αριθμού αιτήσεων που έχουν ήδη κατατεθεί στο παρελθόν.

### **8.2.6 Παλιές Αιτήσεις για Φωτοβολταϊκούς Σταθμούς**

Ο νέος νόμος επιταχύνει τις διαδικασίες για τις παλιές αιτήσεις που είχαν κατατεθεί στη ΡΑΕ για έκδοση άδειας παραγωγής. Κι αυτό γιατί με το νέο νόμο καταργείται η διαδικασία της Προκαταρκτικής Περιβαλλοντικής Εκτίμησης και Αξιολόγησης (ΠΠΕΑ) και η περιβαλλοντική αδειοδότηση θα γίνεται πλέον σε ένα ενιαίο στάδιο, αυτό της Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ). Έτσι, όσες αιτήσεις για άδεια παραγωγής βρίσκονταν στο στάδιο της ΠΠΕΑ, έχοντας περάσει θετικά τα υπόλοιπα κριτήρια αξιολόγησης της ΡΑΕ, έλαβαν άδεια παραγωγής.

Όσοι φωτοβολταϊκοί σταθμοί (κυρίως "εξαίρεσεις") βρίσκονταν στο στάδιο της ΕΠΟ και δεν συνεχίζουν να έχουν τέτοια υποχρέωση με βάση τη νέα νομοθεσία, θα πρέπει να λάβουν τώρα μόνο τη βεβαίωση απαλλαγής από την Περιφέρεια και να προχωρήσουν στο επόμενο στάδιο (προσφορά όρων σύνδεσης). Η βεβαίωση αυτή πρέπει να δοθεί εντός αποκλειστικής προθεσμίας είκοσι (20) ημερών από την αρμόδια περιβαλλοντική αρχή της οικείας Περιφέρειας, μετά την άπρακτη παρέλευση της οποίας θεωρείται αυτή χορηγηθείσα.

Ο κάτοχος άδειας παραγωγής μπορεί, μετά από σχετική απόφαση της ΡΑΕ, να μεταβιβάσει την άδειά του σε άλλα φυσικά ή νομικά πρόσωπα. Αντίθετα, οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί που απαλλάσσονται από άδεια παραγωγής, δεν επιτρέπεται να μεταβιβάζονται πριν από την έναρξη της λειτουργίας τους. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η μεταβίβασή τους σε νομικά πρόσωπα, εφόσον το εταιρικό κεφάλαιο της εταιρίας προς την οποία γίνεται η μεταβίβαση κατέχεται εξ ολοκλήρου από το μεταβιβάζον φυσικό ή νομικό πρόσωπο. Ειδικά για τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς που εγκαθίστανται από κατ' επάγγελμα αγρότες, δεν επιτρέπεται η μεταβίβασή τους πριν από την πάροδο πενταετίας από την έναρξη λειτουργίας τους, εκτός αν πρόκειται για μεταβίβαση λόγω κληρονομικής διαδοχής.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## Ορολογία - Ορισμοί

<b>Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο</b>	Η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική τάση. Για ευκολία, συνήθως χρησιμοποιούμε τη σύντμηση Φ/Β για τη λέξη "φωτοβολταϊκό" (photovoltaic - PV).
<b>Φωτοδίοδος</b>	Είναι η δίοδος εκείνη που παράγει διαφορά δυναμικού στα άκρα της όταν δέχεται ακτινοβολία Φωτονίων (photodiode).
<b>Φωτοβολταϊκή Κυψέλη</b>	Είναι η συστοιχία πολλών Φωτοδιοδών κατάλληλα συναρμολογημένων που αποτελούν μία αυτόνομη μονάδα (photovoltaic sell).
<b>Φωτοβολταϊκός Συλλέκτης</b>	Είναι μία μήτρα αποτελούμενη από κατάλληλα συναρμολογημένες Φωτοβολταϊκές κυψέλες. Χαρακτηρίζονται από : <b>α)</b> την Ονομαστική τους ισχύ σε Wp <b>β)</b> την τεχνολογία σύνθεσης των Φωτοδιοδών (Πολυκρυσταλλικά, Μονοκρυσταλλικά, Άμορφα, Εύκαμπτα λεπτού υμένα) <b>γ)</b> τις διαστάσεις. Αποτελούν τη βασική δομική μονάδα των Φωτοβολταϊκών συστοιχιών και συνεπώς του όλου πάρκου (photovoltaic module).
<b>Φωτοβολταϊκό Πάνελ</b>	Είναι ένας Φωτοβολταϊκός συλλέκτης μεγάλων διαστάσεων και μεγάλου βάρους Χαρακτηρίζεται από την Ονομαστική του ισχύ από 400Wp έως 800Wp περίπου το κάθε ένα Τα Φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για εγκατάσταση (photovoltaic panel).
<b>Φωτοβολταϊκή Συστοιχία</b>	Είναι μια αυτόνομη ομάδα από Φωτοβολταϊκούς συλλέκτες κατάλληλα συναρμολογημένους. Η Φωτοβολταϊκή στήλη ορίζει την Τάση του Φωτοβολταϊκού πεδίου. Η κάθε στήλη τοποθετείτε συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης.
<b>Φωτοβολταϊκό Πεδίο</b>	Είναι το σύνολο των Φωτοβολταϊκών στηλών μιας εγκατάστασης. Χαρακτηρίζεται από την τάση και το ρεύμα παροχής (photovoltaic field).
<b>kW</b>	Είναι η μονάδα μέτρησης Ισχύος [ $1 \text{ kW} = 1.000 \text{ Watt}$ , $1 \text{ MW} = 1.000 \text{ kW}$ ]
<b>kWp</b>	Είναι η Ονομαστική μονάδα μέτρησης ισχύος του Φωτοβολταϊκού στοιχείου.
<b>kWh</b>	Είναι η μονάδα μέτρησης ηλεκτρικής ενέργειας.
<b>Αντιστροφέας (inverter)</b>	Ονομάζεται η Ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο, για τη μεταφορά στο δίκτυο της ΔΕΗ.

<b>Ελεγκτής Ρυθμιστής φόρτισης (charge controller)</b>	Ονομάζεται η Συσκευή που χρησιμοποιείται σε αυτόνομα συστήματα για να ελέγχει την ρύθμιση της φόρτισης των συσσωρευτών βαθιάς εκφόρτισης.
<b>Τράπεζα Μπαταριών</b>	Πρόκειται για συγκεκριμένο αριθμό μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης κατάλληλα συναρμολογημένων ώστε να αποδίδουν την ενέργεια που απαιτείτε για την λειτουργία του συστήματος που τροφοδοτείτε από αυτές.
<b>Μπαταρίες Βαθιάς Εκφόρτισης</b>	Ονομάζονται οι μπαταρίες (συσσωρευτές) Μολύβδου (Mb) που μπορούν να παρέχουν μεγάλα ρεύματα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Χαρακτηρίζονται από την ονομαστική τους τάση (1,5VDC) και την χωρητικότητά του σε Αμπερώρες (1000 έως 3000 Ah).
<b>Υβριδικοί Σταθμοί</b>	Είναι οι Σταθμοί που αποθηκεύουν Ηλεκτρική Ενέργεια και χρησιμοποιούν μία τουλάχιστον Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας.
<b>Αυτόνομος Παραγωγός ΑΠΕ</b>	Ονομάζεται ο Παραγωγός που διαθέτει σταθμό Ηλεκτρικής Ενέργειας για ιδιόχρηση χωρίς να τροφοδοτεί με την παραγόμενη ενέργεια το Σύστημα ή το Δίκτυο.
<b>Αυτοπαραγωγός Η.Ε από ΑΠΕ</b>	Ονομάζεται ο Παραγωγός που διαθέτει σταθμό Η.Ε. κυρίως για ιδιόχρηση και διοχετεύει το τυχόν πλεόνασμα Η.Ε. στο Σύστημα ή στο Δίκτυο.
<b>Δίκτυο</b>	Ονομάζεται το δίκτυο διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας της χώρας (ΔΕΗ, ΔΕΣΜΗΕ).
<b>Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας</b>	Είναι οι γραμμές υψηλής τάσης (χερσαίες ή θαλάσσιες) που μεταφέρουν Ηλεκτρική Ενέργεια από ένα υποσταθμό σε άλλο ή προς άλλη διασύνδεση. Στο σύστημα ΔΕΝ περιλαμβάνονται οι Γεννήτριες Παραγωγής Ηλεκτρισμού.
<b>Εγκατεστημένη Ισχύς Φ/Β</b>	Είναι το άθροισμα της Ονομαστικής Ισχύος του Φωτοβολταϊκού Στοιχείου.
<b>Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά</b>	Ονομάζονται τα Νησιά που δεν είναι συνδεδεμένα με το ενιαίο δίκτυο της χώρας - ΔΕΗ.
<b>ΑΠΕ</b>	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Οι μη ορυκτές πηγές ενέργειας.
<b>ΚΑΠΕ</b>	Κέντρο Ανανεώσιμο Πηγών Ενέργειας.
<b>ΡΑΕ</b>	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, "Φωτοβολταϊκά Συστήματα", Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2007.

Μενδρινός, Κ. Καρύτσας, "Γεωθερμία, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, εμπειρία Κ.Α.Π.Ε. ", Αθήνα.

"Ετήσια Έκθεση Κ.Α.Π.Ε.", Αθήνα 2008.

"Περιβαλλοντικός οδηγός Γεωθερμίας", Υπουργείο Ανάπτυξης  
1. Λαμπρίδης, Π. Ντοκόπουλος, Γ. Παπαγιάννης, "Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας ", Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2006.

Β.Α. Σωτηρόπουλος, "Τεχνική Φυσικών Ιεργασιών ΙΙ Ατμοπαραγωγικές Εγκαταστάσεις (Λέβητες)", Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία, Θεσσαλονίκη 1997.

ΚΑΠΕ (1997), Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας & Περιβάλλον, Οδηγός στα πλαίσια του προγράμματος □Ε.Π.Ε.3.4.6.□

ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ <http://www.rae.gr/>  
SelasEnergy <http://www.selasenergy.gr/>

Οδηγός ΥΠΑΝ □Περιβαλλοντικές επιπτώσεις φωτοβολταϊκής τεχνολογίας□

"Planning and installing photovoltaic systems. A guide for installers, architects and engineers", 2nd edition, 2008

Επίδραση στην Αξιοπιστία του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος από την Εγκατάσταση Φ/Β Μονάδων", Ευαγγελοπούλου Κλειώ, Κουτρούλη Λήδα, ΑΠΘ 2008

<http://www.selasenergy.gr/fundamentals.php>

[http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Solar\\_cell/1](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/el/Solar_cell/1)

<http://e-fotovoltaiika.blogspot.com/>

[http://gneng.blogspot.com/p/blog-page\\_19.html](http://gneng.blogspot.com/p/blog-page_19.html)

[http://www.elecnetsolar.gr/?page\\_id=472](http://www.elecnetsolar.gr/?page_id=472)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000104183