

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ  
ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΡΓΕΙΑΣ  
ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΙ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΑ  
ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ  
ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗ.**

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ : Μαρκάκης Ευάγγελος  
ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ : Μαθιουδάκης Νικόλαος  
Πεντάρης Φραγκίσκος

# ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

## Οι Εναλλακτικές Ενεργειακές Πηγές

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται συνήθως σε μεγάλους θερμοηλεκτρικούς και υδροηλεκτρικούς σταθμούς, ισχύος δεκάδων, εκατοντάδων ή χιλιάδων MW που καταναλώνουν πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο ή ουράνιο και άλλα σχάσιμα υλικά ή χρησιμοποιούν υδατοπτώσεις. Όλες όμως αυτές οι ενεργειακές πηγές έχουν περιορισμένες σχετικά προοπτικές, αφού τα συμβατικά και τα πυρηνικά καύσιμα εξαντλούνται βαθμιαία αλλά και η υδραυλική ενέργεια είναι ποσοτικά καθορισμένη και γεωγραφικά εντοπισμένη. Είναι επομένως φανερό η ύπαρξη ενός ενεργειακού προβλήματος, τουλάχιστον ως προς τη μελλοντική αντιμετώπιση των αναγκών της ανθρωπότητας σε ηλεκτρισμό.

Το πρόβλημα έγινε ιδιαίτερα αισθητό στη δεκαετία του 1970, κυρίως σαν αποτέλεσμα δύο ανεξάρτητων παραγόντων. Ο ένας ήταν η πετρελαϊκή κρίση, που εκδηλώθηκε το 1973 με τον απότομο τετραπλασιασμό της τιμής του αργού πετρελαίου και ακολουθήθηκε με άλλες διαδοχικές αυξήσεις τα επόμενα χρόνια. Ο άλλος παράγοντας ήταν τα δύο πολύ σοβαρά ατυχήματα που έγιναν στους πυρηνικούς σταθμούς του Three Mile Island της Πενσυλβανίας το 1979 και, κυρίως, του Τσερνομπίλ της Ουκρανίας το 1986, που πήραν μεγάλη δημοσιότητα, προκαλώντας στην κοινή γνώμη έντονες αμφιβολίες για την ασφάλεια της λειτουργίας των πυρηνικών εγκαταστάσεων και παγκόσμιες αντιδράσεις για την ίδρυση νέων πυρηνικών σταθμών. Δημιουργήθηκε έτσι ένα πολύ ευνοϊκό κλίμα για την αναζήτηση και εκμετάλλευση άλλων ενεργειακών πηγών. Η γενική τάση ήταν προς ανανεώσιμες (μη εξαντλήσιμες) πηγές, σε αντιδιαστολή με τα συμβατικά καύσιμα και τις υδατοπτώσεις, και προς ήπιες μορφές ενέργειας, σε αντιδιαστολή με την πυρηνική ενέργεια. Συγχρόνως, προωθήθηκε η αντίληψη της κατασκευής σταθμών μικρότερης ισχύος, σε σύγκριση με τους συνήθως κατασκευαζόμενους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και η ανάγκη απαλλαγής από τις πολιτικές και εμπορικές εξαρτήσεις που συνεπάγονταν η γεωγραφική κατανομή των αποθεμάτων των ενεργειακών ορυκτών και κυρίως του πετρελαίου, και το σύστημα της διακίνησης τους.

Στις εναλλακτικές πηγές που εξετάστηκαν περιλαμβάνονται η ενέργεια των ανέμων, των κυμάτων ή ακόμα και των σεισμών, η γεωθερμία, η θερμότητα των ωκεανών, η καύση φυτικών προϊόντων (βιομάζα) ή οργανικών αποβλήτων κ.λ.π. Από αυτές άλλες έφθασαν γρήγορα στο στάδιο των πρακτικών εφαρμογών, άλλες βρίσκονται σε ανάπτυξη και άλλες περιορίστηκαν σε ερευνητικές μελέτες.

Μία άλλη πηγή ενεργείας, που φαίνεται να συνδυάζει ιδανικά τις παραπάνω απαιτήσεις για νέες ενεργειακές αναζητήσεις, και που η ενδεχόμενη αξιοποίηση της βρήκε ανεπιφύλακτη αποδοχή στη διεθνή κοινή γνώμη, είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε σε σημαντική κλίμακα, και παρουσιάζει απεριόριστες μελλοντικές προοπτικές, για την παραγωγή θερμότητας με σκοπό τη θέρμανση νερού (π.χ. στους οικιακούς θερμοσίφωνες), τη θέρμανση χώρων και πολλές άλλες οικιακές, γεωργικές ή βιομηχανικές χρήσεις. Π.χ. στην Ελλάδα, που έχει συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας περίπου  $100 \times 10^9$  KWh, η θέρμανση νερού σε κατοικίες και ξενοδοχεία απορροφά περίπου  $3,5 \times 10^9$  KWh. Από την ποσότητα αυτή, σήμερα, περίπου το 10% προέρχεται από ηλιακή ενέργεια, ενώ για το υπόλοιπο καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο.

Επίσης, η θερμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται, σε λίγες σχετικά εγκαταστάσεις, για την ατμοποίηση νερού που διαβιβάζεται στη συνέχεια σε μια στροβιλογεννήτρια και παράγει τελικά ηλεκτρική ενέργεια. Ο μεγαλύτερος μέχρι σήμερα φωτοθερμικός ηλεκτρικός σταθμός έχει ισχύ 10 MW, ενώ σχεδιάζεται η κατασκευή σταθμών ισχύος μέχρι 100 MW.

## **Η Φωτοβολταϊκή Ενέργεια**

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. Πράγματι, όπως δείχνεται συνοπτικά στον πίνακα 1., η φωτοβολταϊκή μέθοδος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια έχει μόνον πλεονεκτήματα, αν εξαιρεθούν κυρίως το κόστος, που είναι ακόμα αρκετά υψηλό για τις περισσότερες εφαρμογές, και η αδυναμία της

φωτοβολταϊκής γεννήτριας να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια λόγω των διακυμάνσεων της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του 24ώρου.

Ανάλογα με τον βαθμό πολυπλοκότητας στην κατασκευή και τη λειτουργία, μπορούμε να κατατάξουμε τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες σε 3 κυρίως κατηγορίες.

1. Τις απλές διατάξεις, όπου τα ηλιακά στοιχεία\* είναι τοποθετημένα σε σταθερά επίπεδα πλαίσια και δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία με τη φυσική της πυκνότητα και διακύμανση στη διάρκεια της ημέρας.
2. Τις διατάξεις με κινητά πλαίσια που περιστρέφονται αυτόματα και παρακολουθούν συνεχώς την πορεία του ήλιου στον ουρανό, ώστε τα ηλιακά στοιχεία να δέχονται κάθετα την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει ένα ηλιακό στοιχείο μέχρι 50% περίπου, αφού δέχεται πυκνότερη ακτινοβολία, ανά μονάδα εμβαδού της επιφανείας του.
3. Τις διατάξεις που με τη χρησιμοποίηση φακών ή κατόπτρων συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και την στέλνουν πολύ συμπυκνωμένη πάνω στα ηλιακά στοιχεία. Για την αποφυγή θέρμανσης, στις συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές διατάξεις απαιτείται συνήθως η τεχνητή ψύξη των ηλιακών στοιχείων με κυκλοφορία ψυχρού αέρα ή ψυκτικών υγρών.

### ***Πλεονεκτήματα***

1. Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
2. Ικανοποιητική απόδοση μετατροπής.
3. Σχετικά εύκολη μέθοδος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων από πρώτες ύλες που αφθονούν.
4. Πρακτικά απεριόριστη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων (τουλάχιστον 20 ή 30 χρόνια).
5. Τα ηλιακά στοιχεία δεν έχουν κινούμενα μέρη, επομένως είναι σχεδόν απαλλαγμένα από την ανάγκη επίβλεψης και συντήρησης (αρκεί συνήθως η επιθεώρηση τους μία φορά κάθε εξάμηνο). Αλλά και σε περίπτωση βλάβης, η αποκατάσταση της λειτουργίας γίνεται εύκολα λόγω της σπονδυλωτής μορφής της φωτοβολταϊκής διάταξης.

---

\* Χρησιμοποιούνται επίσης οι συνώνυμοι όροι: ηλιακό **κύτταρο**, **κυψελίδα** ή **κυψέλη**

6. Η φωτοβολταϊκή μετατροπή δεν προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον, ούτε θόρυβο ή άλλη ενόχληση και δεν δημιουργεί απόβλητα ή άχρηστα παραπροϊόντα.
7. Δίνει τη δυνατότητα ανεξαρτησίας από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής.
8. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν με όσο μικρή ισχύ ζητηθεί.
9. Η αναλογία της παραγόμενης ισχύος προς το βάρος της διάταξης είναι αρκετά μεγάλη, περίπου  $100\text{W}/\text{I} < \alpha$ , που είναι σημαντική ιδιότητα για τις διαστημικές εφαρμογές.

### **Μειονεκτήματα**

1. Υψηλό κόστος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων.
2. Για τις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται η δαπανηρή αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της αστάθειας και της μεγάλης διακύμανσης της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.
3. Απαιτείται η χρησιμοποίηση μεγάλων σχετικά επιφανειών, λόγω της μικρής πυκνότητας της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.

## **Οι Πρώτες Φωτοβολταϊκές Εφαρμογές**

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών και η καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα **φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία** (ονομάζονται επίσης φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες), δηλαδή δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνουν μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής του και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, ένα ηλιακό στοιχείο μπορεί να δώσει τάση μέχρι 0,5-1,0 V και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40 mA ανά  $\text{cm}^2$  της επιφανείας του.

Η φωτοβολταϊκή μετατροπή είναι μία πολύ πρόσφατη τεχνολογική ανακάλυψη που βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης της. Όπως όμως δείχνεται στον Πίνακα 2., το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι γνωστό από τον περασμένο αιώνα. Ήδη το 1891, που είχε αρχίσει να γίνεται αισθητή η μόλυνση

του περιβάλλοντος στις βιομηχανικές πόλεις, ο R. Appleyard έγραφε ότι είχε την ελπίδα ότι κάποτε «ο ήλιος δεν θα σκορπάει άσκοπα την ενέργεια του στο διάστημα, αλλά με τη χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών στοιχείων η ενέργεια αυτή θα συγκεντρώνεται σε ηλεκτρικές αποθήκες, και έτσι θα καταργηθούν οι ατμομηχανές και θα απαλλαγεί η ατμόσφαιρα από τον καπνό». Εκείνη την εποχή το κυριότερο καύσιμο ήταν το κάρβουνο, αφού δεν είχε αρχίσει ακόμη η μαζική χρήση του πετρελαίου. Ήταν λοιπόν νωρίς για να προβλέψει ο Appleyard την υποκατάσταση και αυτής της πολύ ρυπογόνου ενεργειακής πηγής από την ηλιακή ακτινοβολία.

Η μεγάλη όμως ώθηση προς τις πρακτικές εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής δόθηκε με την πραγματοποίηση ορισμένων κρίσιμων τεχνολογικών προόδων, όπως η παρασκευή καθαρού πυριτίου με τη μέθοδο της τηγμένης ζώνης (1952) και ο σχηματισμός διόδων πυριτίου με διάχυση προσμίξεων (1954), που οδήγησαν τελικά στην κατασκευή ηλιακών στοιχείων σημαντικής απόδοσης (6%) το 1954 και ακόμη μεγαλύτερης (14%) το 1972. Πάντως, η αξιοπιστία τους είχε ήδη αποδειχθεί πολύ νωρίτερα, όταν τα πρώτα ηλιακά στοιχεία πυριτίου που τοποθετήθηκαν στον τεχνητό ερευνητικό δορυφόρο Vanguard 1, τον Μάρτη του 1958, όχι μόνον πέτυχαν να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τον πομπό του στην προβλεπόμενη λιγότερη διάρκεια του προγράμματος, αλλά εξακολούθησαν να λειτουργούν χωρίς προβλήματα επί έξι συνολικά χρόνια, και μάλιστα στο πολύ εχθρικό διαστημικό περιβάλλον, με την έντονη κοσμική ακτινοβολία. Έτσι, από το 1969 και ύστερα όλοι οι τεχνητοί δορυφόροι και τα άλλα διαστημικά οχήματα, είναι εξοπλισμένα με ηλιακά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

- |                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1839 Παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε μεταλλικά ηλεκτρόδια (Pt, Ag) βυθισμένα σε ηλεκτρολύτες (Becquerel). |
| 1937 Κατασκευή ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου από Pbs (Fischer και Godden).                                         |
| 1939 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Se, με απόδοση 1% (Ohl).                                                        |
| 1941 Κατασκευή του πρώτου 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 (Pfann).                                    |

- 1954 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Si με σχηματισμό ένωσης p-n με διάχυση προσμίξεων και με απόδοση 6% (Pfann, Pearson και Chapin).
- 1956 Εμπορική παραγωγή ηλιακών στοιχείων (Εταιρεία Hoffmann).
- 1958 Εκτόξευση του αμερικανικού τεχνητού δορυφόρου Vanguard I, εξοπλισμένου με 6 μικρά στοιχεία Si, ισχύος 5 mW, ως βοηθητική ενεργειακή πηγή.
- 1958 Εκτόξευση σοβιετικού τεχνητού δορυφόρου με αποκλειστική τροφοδότηση από ηλιακά στοιχεία.
- 1959 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από Cds, με απόδοση 5% (Hammond).
- 1972 Κατασκευή του «ιώδους» ηλιακού στοιχείου Si, με απόδοση 14% (Lindmayer και Allison).
- 1976 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από άμορφο δι, με απόδοση 0,01% (Carlson και Wronski).
- 1977 Κατασκευή ηλιακού στοιχείου από GaAs, με απόδοση 16% (Kameth).
- 1981 Πτήση πάνω από τη Μάγχη του αεροπλάνου Solar Challenger, εξοπλισμένου με 16128 ηλιακά στοιχεία Si, ισχύος 2,7 kW.
- 1983 Έναρξη εμπορικής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού σταθμού της Βικτροβίλ, ισχύος 1 MW.
- 1984 Έναρξη βιομηχανικής παραγωγής ηλιακών στοιχείων στην Ιαπωνία από άμορφο πυρίτιο με απόδοση 5%.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.** Οι κυριότεροι σταθμοί στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής μετατροπής.

## **Η Εξέλιξη της Απόδοσης και του Κόστους των Ηλιακών Στοιχείων**

Αφού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, διαπιστώθηκε ότι τα ηλιακά στοιχεία διαθέτουν, καταρχήν, υψηλή αξιοπιστία λειτουργίας και μεγάλη διάρκεια ζωής, ως κύριοι στόχοι βελτίωσης (αλλά και ως κριτήρια αξιολόγησης) παραμένουν συνήθως η απόδοση και το κόστος τους.

Ως συντελεστής της απόδοσης ( $\eta$ ) ή απλούστερα ως **απόδοση** ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μεγίστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Η απόδοση των ηλιακών στοιχείων δεν είναι σταθερή αλλά όπως θα δούμε παρακάτω μεταβάλλεται σημαντικά με το φορτίο του κυκλώματος, καθώς και από άλλους παράγοντες όπως η θερμοκρασία του στοιχείου και η μορφή της ακτινοβολίας.

Για την εκτίμηση του κόστους των ηλιακών στοιχείων χρησιμοποιείται συμβατικά ο όρος **watt αιχμής** ( $W_p$ , peak watt) που είναι η ελάχιστη απαιτούμενη επιφάνεια του στοιχείου για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 1 W όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 kW/m<sup>2</sup>. Π.χ. κόστος ηλιακού στοιχείου 2,93 €/W<sub>p</sub>, σημαίνει ότι το κόστος ενός ή περισσότερων ηλιακών στοιχείων με τόση συνολική επιφάνεια ώστε να παράγουν ηλεκτρική ισχύ 1 W, όταν εκτεθούν σε ακτινοβολία πυκνότητας 1 kW ανά m<sup>2</sup>, είναι 2,93 €. Δηλαδή το W<sub>p</sub> εκφράζει συνδυασμένα το κόστος κατασκευής σε σχέση με την απόδοση του ηλιακού στοιχείου.

Με τη συνεχή πρόοδο που παρατηρείται στην περιοχή της φωτοβολταϊκής μετατροπής, η απόδοση των ηλιακών στοιχείων παρουσιάζει μία σταθερή αύξηση και πλησιάζει προς τη μέγιστη θεωρητική τιμή, η οποία, ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο ημιαγωγό και τη μορφή της ακτινοβολίας, υπολογίζεται σε 25% περίπου. Το υπόλοιπο της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας δεν μπορεί να αξιοποιηθεί, όπως θα δούμε παρακάτω, κυρίως λόγω της πλατειάς ενεργειακής κατανομής των φωτονίων του ηλιακού φάσματος.

Όμοια, το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες διαστημικές εφαρμογές ήταν πολύ υψηλό, περίπου \$ 1000/W<sub>p</sub>. Στη συνέχεια, όμως, με την αύξηση της παραγωγής και τη βελτίωση της τεχνολογίας, πραγματοποιήθηκε η ραγδαία μείωση του κόστους, που δείχνεται στον πίνακα 3.

<i>Έτος</i>	<i>Κόστος ανά W<sub>p</sub></i>
1956	\$1,000
1960	400
1970	100
1975	40
1980	10
1985	7
1990	5

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.** Η εξέλιξη του κόστους των ηλιακών στοιχείων πυριτίου.

Έτσι έγινε δυνατό, εκτός από τις διαστημικές, να αρχίσουν σταδιακά και επίγειες εφαρμογές της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως η



ηλεκτρική τροφοδότηση μικροσυσκευών (ρολόγια, υπολογιστές τσέπης, ραδιόφωνα) και απομονωμένων εγκαταστάσεων (τηλεπικοινωνιακοί αναμεταδότες, σηματοδότες, φάροι, αγροτικές αντλίες νερού, συστήματα καθοδικής προστασίας χαλύβδινων σωληνώσεων, εξαεριστήρες αποθηκευτικών χώρων, εγκαταστάσεις αφαλάτωσης νερού κ.λ.π.). Επίσης η φόρτιση των συσσωρευτών μικρών σκαφών και η κατασκευή αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξοχικά σπίτια ή ακόμα και σε ολόκληρους οικισμούς, κυρίως σε νησιά, έρημους, δάση και γενικά σε περιοχές που δεν εξυπηρετούνται από ηλεκτρικό δίκτυο.

### **Το Παρόν και το Μέλλον της Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας**

Ο μεγαλύτερος φωτοβολταϊκός σταθμός, ισχύος 1 MW, βρίσκεται στη Βίκτορβιλ της Καλιφόρνιας και λειτουργεί με επιτυχία από το 1983, τροφοδοτώντας το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Άλλοι μικρότεροι φωτοβολταϊκοί σταθμοί υπάρχουν επίσης σε δεκάδες αναπτυγμένες ή αναπτυσσόμενες χώρες. Στην Ελλάδα, που λόγω της ευνοϊκής γεωγραφικής θέσης και του κλίματος, ιδίως στις νοτιότερες περιοχές της, δέχεται αρκετά σημαντική ηλιακή ακτινοβολία (περίπου  $4600 \text{ MJ/m}^2$  ετησίως, κατά μέσο όρο, σε σύγκριση με  $8000 \text{ MJ/m}^2$  στις τροπικές και  $2200 \text{ MJ/m}^2$  κοντά στις αρκτικές περιοχές), έχουν ήδη κατασκευασθεί από το 1982 δύο σχετικά μεγάλοι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Ο πρώτος, ισχύος 50 kW, είναι στην Αγία Ρούμελη της Κρήτης και ο δεύτερος, ισχύος 100 kW, είναι στην Κύθνο. Τρεις ακόμη σταθμοί, μικρότερης ισχύος, κατασκευάζονται στα νησιά Γαύδο, Αντικύθηρα και Αρκοί, με τη χρηματοδότηση της ΔΕΗ και της ΕΟΚ, και άλλοι βρίσκονται στο στάδιο της μελέτης. Υπάρχουν επίσης αρκετές άλλες, περίπου 100, φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που ηλεκτροδοτούν φάρους, τηλεπικοινωνιακούς αναμεταδότες, απομονωμένες κατοικίες, αντλητικά συγκροτήματα, σκάφη αναψυχής, συσκευές σεισμικής πρόγνωσης κλπ. Έτσι, η συνολική ισχύς αιχμής των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα φτάνει περίπου τα  $200 \text{ kW}_p^*$ .

---

\* Στο διάγραμμα 4, στο τέλος του βιβλίου, δίνεται η σημερινή συμμετοχή των διαφόρων ενεργειακών πηγών στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα.

Τα περιθώρια παραπέρα διάδοσης των φωτοβολταϊκών εφαρμογών, έστω και με το σημερινό υψηλό κόστος, είναι μεγάλα. Ειδικότερα στην Ελλάδα, θα μπορούσαν να ηλεκτροδοτηθούν πολλοί από τους περίπου 1000 μικρούς οικισμούς, με συνολικό πληθυσμό 50.000 κατοίκων, που δεν έχουν ακόμα συνδεθεί με το δίκτυο της ΔΕΗ, καθώς και τις άλλες περίπου 50.000 κατοικίες, διάσπαρτες σε διάφορες περιοχές της χώρας, που είναι χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα φωτοβολταϊκής ηλεκτροδότησης πολλών από τα περίπου 6000 επαγγελματικά σκάφη αναψυχής μήκους 8-15 m (στα μικρότερα δεν χρειάζεται διότι συνήθως δεν έχουν ηλεκτρικές συσκευές, ενώ τα μεγαλύτερα σκάφη είναι έτσι και αλλιώς εξοπλισμένα με νηζελογεννήτριες), τους 800 φάρους, τις 2000 σιδηροδρομικές διαβάσεις που δεν έχουν ηλεκτρική σήμανση κλπ.

Η κατασκευή των περισσότερων από τους αρκετά μεγάλους φωτοβολταϊκούς σταθμούς έχει γίνει με οικονομική ενίσχυση από τις κυβερνήσεις των αντίστοιχων χωρών, από διεθνείς οργανισμούς, ερευνητικά ιδρύματα ή βιομηχανίες, για κοινωνικούς λόγους ή για την απόκτηση εμπειρίας. Εξάλλου είναι φανερό ότι για να συναγωνιστεί η φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, με οικονομικά κριτήρια, τις συμβατικές πηγές ηλεκτρισμού σε μεγάλη κλίμακα (κίνηση αυτοκινήτων, τροφοδότηση βιομηχανιών και αστικών περιοχών κ.λ.π.), θα πρέπει να προηγηθεί σημαντική παραπέρα μείωση του κόστους των ηλιακών στοιχείων, καθώς και των άλλων εξαρτημάτων των φωτοβολταϊκών συστημάτων (συσσωρευτές αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, ρυθμιστές, μετατροπείς κ.λ.π.). Θα πρέπει όμως επίσης να αλλάξει ριζικά η τεχνολογία κατασκευής των ηλιακών στοιχείων. Αυτό γίνεται φανερό με τον παρακάτω απλό συλλογισμό.

Το προϊόν των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ενέργεια. Επομένως ένα λογικό κριτήριο για τη σκοπιμότητα επιλογής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ο σύντομος χρόνος ανταπόδοσης της ενέργειας που καταναλώθηκε για την κατασκευή του. Οι γνωστές όμως σήμερα τεχνολογικές μέθοδοι κατασκευής φωτοβολταϊκών ηλιακών στοιχείων είναι πολύ ενεργοβόρες. Δηλαδή, υπολογίζεται ότι ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί συνεχώς επί 5 περίπου χρόνια τουλάχιστον, για να παραχθεί η ποσότητα της ενέργειας που καταναλώθηκε για τη μεταλλουργική παραγωγή του απαιτούμενου πυριτίου, τον καθαρισμό του

και τη διαμόρφωση του σε ηλιακά στοιχεία\*. Η ουσιαστικά παραγωγικά νεκρή αυτή χρονική διάρκεια της αποπληρωμής του ενεργειακού χρέους του συστήματος, είναι καταρχήν πολύ μεγάλη για να δικαιολογηθεί σήμερα η γενική χρήση της φωτοβολταϊκής μετατροπής σε όλες τις ενεργειακές εφαρμογές. Έτσι, και μέχρι την ανάπτυξη των νέων κατασκευαστικών τεχνολογιών και υλικών, η χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών συστημάτων περιορίζεται συνήθως σε ειδικότερες εφαρμογές, όπως αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Όπως είναι φυσικό, το διεθνές ενδιαφέρον για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν διατηρείται στην ίδια ένταση με την πάροδο του χρόνου, αλλά αυξάνει παραπάνω ή υποχωρεί ανάλογα με τις παράλληλες εξελίξεις στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, στο κόστος των καυσίμων και στις προοπτικές ανάπτυξης των άλλων ανταγωνιστικών μεθόδων. Το ίδιο άλλωστε ισχύει και για τις άλλες (δηλαδή τις θερμικές) μεθόδους εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και για τη γενικότερη αξιοποίηση των εναλλακτικών ενεργειακών πηγών. Πάντως η γενική εκτίμηση είναι ότι σε 10 ή 20 χρόνια τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα καλύπτουν σε πολλές χώρες ένα σημαντικό ποσοστό (π.χ. το 10-20%) των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ παράλληλα θα κυριαρχούν σε εξειδικευμένους τομείς, όπως οι διαστημικές εφαρμογές, η ηλεκτροδότηση νησιών και γεωγραφικά απομονωμένων εγκαταστάσεων κ.λ.π. Την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση της εξέλιξης αυτής μπορούν να επηρεάσουν αποφασιστικά διάφοροι θετικοί ή αρνητικοί απρόβλεπτοι παράγοντες, όπως οι απότομες μεταβολές στο κόστος των καυσίμων (σαν μεγάλη πτώση της διεθνούς τιμής του πετρελαίου στις αρχές του 1986 ή την άνοδο της κατά τη διάρκεια του πολέμου στον Περσικό Κόλπο το 1991), τα πυρηνικά ατυχήματα, οι οικολογικές κινητοποιήσεις για την προστασία του περιβάλλοντος και οι κυβερνητικές επιλογές.

---

\* Ο υπολογισμός αφορά στα ηλιακά στοιχεία από μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, που μέχρι πρόσφατα (περίπου το 1984) ήταν τα μόνα που κατασκευάζονταν σε εμπορική κλίμακα. Ήδη παράγονται σε μικρές ποσότητες, και άλλα είδη ηλιακών στοιχείων με τη χρησιμοποίηση λιγότερο ενεργοβόρων μεθόδων.

# Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

## Η Σύσταση του Ηλιακού Φάσματος

Η διαμόρφωση του φάσματος του φωτός που εκπέμπει ο ήλιος προσομοιάζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5800 K, όση είναι, κατά μέσο, η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ήλιου. Η προσέγγιση αυτή είναι επαρκής για τη μελέτη των θερμικών εφαρμογών της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως π.χ. η θέρμανση νερού («ηλιακοί θερμοσίφωνες»). Στις περιπτώσεις αυτές ενδιαφέρει συνήθως η συνολική θερμική ισχύς της ακτινοβολίας και ο μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας π.χ. στους ηλιακούς συλλέκτες του «θερμοσίφωνα» ή τους θερμοσυσσωρευτικούς τοίχους του κτιρίου κλπ. Δεν είναι όμως το ίδιο και για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας αφού αυτή, όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο, καθορίζεται από τη λεπτομερειακή φωτονική σύσταση της ακτινοβολίας. Άλλωστε, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι κατασκευασμένα από ημιαγωγούς, και όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η δυνατότητα της απορρόφησης των φωτονίων της ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό εξαρτάται ουσιαστικά από τη σύγκριση της τιμής της ενέργειας τους, σε σχέση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού.

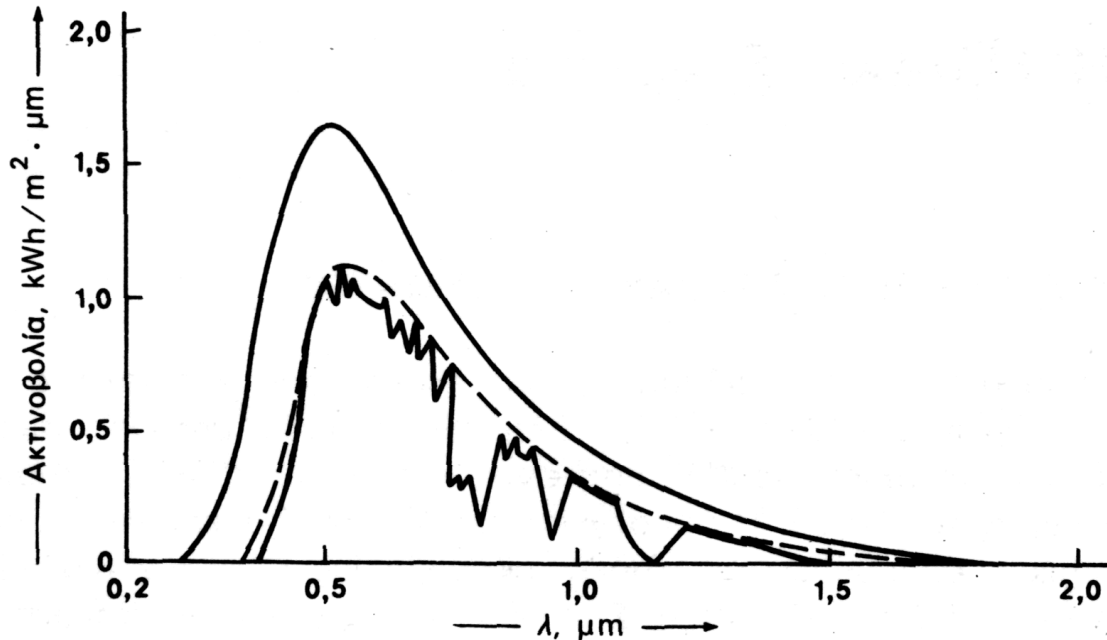
Εκτός από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία\* ο ήλιος εκπέμπει και μια ασθενή σωματιδιακή ακτινοβολία, που αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κυρίως ηλεκτρόνια και πρωτόνια, και ονομάζεται **ηλιακός άνεμος**. Σε περιπτώσεις ηλιακών εκρήξεων η ένταση του ηλιακού ανέμου αυξάνει σημαντικά και μπορεί να φτάσει π.χ. τα  $10^8$  πρωτόνια ανά  $\text{cm}^2$  και sec, στην απόσταση που βρίσκεται η γη. Πάντως, η μορφή αυτή της ηλιακής ακτινοβολίας δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής εκμετάλλευσης.

Η ανάγκη για τη λεπτομερειακή εξέταση της φασματικής σύστασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές γίνεται φανερή στο σχήμα 1, που δείχνει τη μεγάλη διαφοροποίηση του πραγματικού φάσματος του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της γης, σε σχέση με την προσέγγιση που

---

\* Οι διάφορες περιοχές του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δείχνονται στο διάγραμμα 5, στο τέλος του βιβλίου.

αναφέρθηκε παραπάνω. Βλέπουμε ότι το ηλιακό φως αποκτά τελικά μία πολύ ανώμαλη φασματική κατανομή, που οφείλεται σε εκλεκτικές απορροφήσεις και σκεδάσεις στα συστατικά της ατμόσφαιρας που διασχίζει.



**Σχήμα 1.** Το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην εκπομπή μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5800 K (εξωτερική συνεχής γραμμή), το φάσμα της ίδιας πηγής ύστερα από απορροφήσεις από το όζον και από σκεδάσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (ασυνεχής γραμμή), και το πραγματικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης σε συνθήκες μέτριας υγρασίας (εσωτερική συνεχής γραμμή).

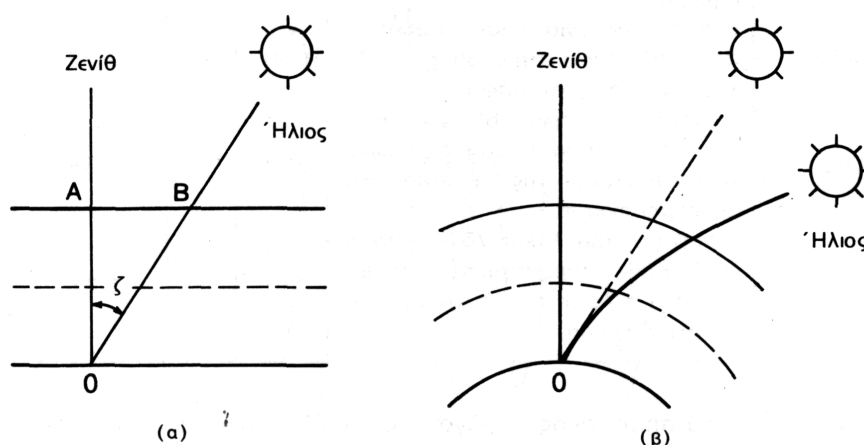
Ενδεικτική, άλλωστε, της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η εξάρτηση της έντασης της από το υψόμετρο της τοποθεσίας της γης, που δέχεται την ακτινοβολία. Έτσι, έχει μετρηθεί ότι ενώ στη στάθμη της θάλασσας η μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει μέχρι περίπου 900-1000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

Το όζον, που είναι άφθονο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, απορροφά έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία, και ειδικότερα στην περιοχή 0,2-0,35 μm, το μοριακό οξυγόνο απορροφά κυρίως στην περιοχή του ερυθρού (π.χ. 0,63 και 0,69 μm), το διοξείδιο του άνθρακα στο υπέρυθρο (2,7 και 4,3μm) και οι υδρατμοί στο ερυθρό και στο υπέρυθρο. Επίσης, από τη συνολική ηλιακή

ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, συνήθως λιγότερο από το 60% είναι άμεση, σε μορφή δέσμης ακτινών, που μπορούν π.χ. να εστιαστούν με κάτοπτρα ή φακούς. Η υπόλοιπη είναι διάχυτη, διότι έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα σ' αυτήν.

## Οι Συμβατικές Ηλιακές Ακτινοβολίες

Πέρα από τη γεωγραφική θέση και το υψόμετρο, η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις Εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες, και κυρίως τη θέση του ήλιου στον ουρανό και την περιεκτικότητα της υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Συμβατικά, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα μέχρι τη στάθμη της θάλασσας, που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του ήλιου, χαρακτηρίζεται από μία κλίμακα **μάζας αέρα** *AM* (air mass, ονομάζεται επίσης οπτική αέρια μάζα) βαθμολογημένης με την τέμνουσα (το αντίστροφο του συνημίτονου) της **ζενιθιακής απόστασης** ( $\zeta$ ), δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στη θέση του ήλιου και στην κατακόρυφο (Σχήμα 2.). Δηλαδή η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της.



**Σχήμα 2.** Η εξάρτηση της κλίμακας μάζας αέρα (*AM*) από τη θέση του ήλιου, (α) Απλοποιημένη απεικόνιση, με την ατμόσφαιρα να έχει επίπεδη ανάπτυξη σε άπειρη έκταση. Εξ ορισμού είναι  $AM = OB/OA = 1 / \sin \zeta$ . (β) Η πραγματική διαμόρφωση της γήινης ατμόσφαιρας, με τα στρώματα της να ορίζονται από σφαιρικές επιφάνειες, και η αντίστοιχη ατμοσφαιρική διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της μέσα από τα στρώματα αυτά.

Συγκεκριμένα, ως *AM1* συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ, που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια, ως *AM1,5* συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία 45° από το ζενίθ, ως *AM2* με τον ήλιο σε γωνία 60° κ.λ.π. Το μηδέν της κλίμακας (*AM0*) συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της γης από τον ήλιο. Στον πίνακα 4. γράφονται οι πυκνότητες της ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες πρότυπες συνθήκες στην κλίμακα μάζας αέρα. Πάντως, η παραπάνω προτυποποίηση δεν είναι πάρα πολύ αυστηρή. Έτσι π.χ. εκτός από τις τιμές του πίνακα, η *AM0* αναφέρεται επίσης ως 1353 W/m<sup>2</sup>, ή *AM2* ως 740 W/m<sup>2</sup> κ.λ.π.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.** Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα (Air mass)

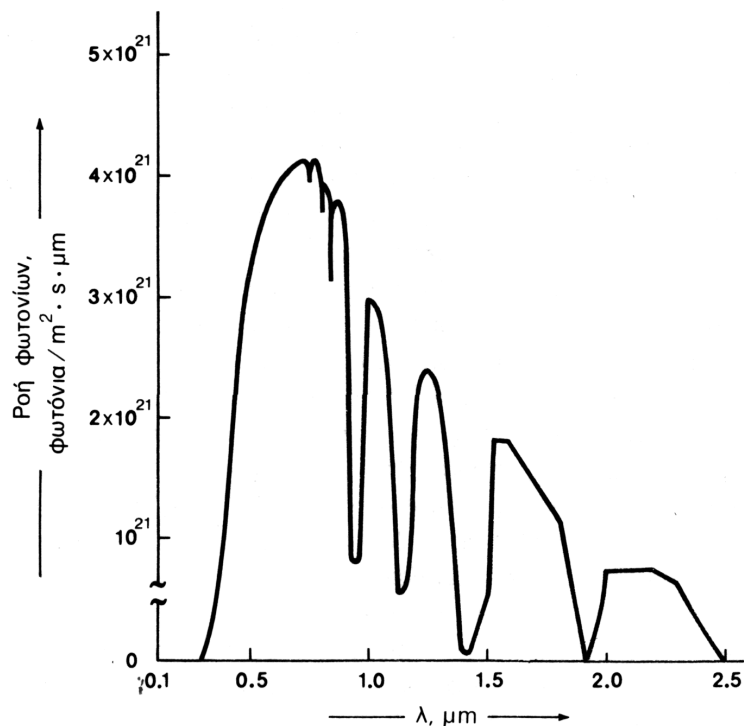
<i>Τιμή μάζας αέρα</i>	<i>Συμβατικές συνθήκες</i>	<i>Ισχύς</i>	<i>Μέση ενέργεια των φωτονίων</i>
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα.	1350 W/m <sup>2</sup>	1,48 eV
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	1060	1,32
AM2	Απόσταση του ήλιου 60° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	880	1,38
AM3	Απόσταση του ήλιου 70,5° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	750	1,21

Ο άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας της διαμόρφωσης των μετεωρολογικών συνθηκών, δηλαδή η ατμοσφαιρική υγρασία, χαρακτηρίζεται από το ύψος *w* της στήλης του νερού (μετρημένης σε cm), που σχηματίζεται από την υποθετική συμπύκνωση του συνόλου των υδρατμών της ατμόσφαιρας, στον συγκεκριμένο τόπο και χρόνο.

Πάντως, έτσι και αλλιώς, το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας συγκεντρώνεται στη φασματική περιοχή του κυανού και του πράσινου, και ειδικότερα σε μήκη κύματος από 0,45 μέχρι 0,6  $\mu\text{m}$ , που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας περίπου 2,1 -2,8 eV. Για την αντιστοιχία μήκους κύματος και ενέργειας των φωτονίων, υπενθυμίζεται ότι από τη σχέση  $\nu = c/\lambda$ , που συνδέει τη συχνότητα  $\nu$  και το μήκος κύματος  $\lambda$  μιας ακτινοβολίας με την ταχύτητα του φωτός  $c$ , βρίσκουμε ότι η ενέργεια του φωτονίου  $h\nu$ , σε eV, συνδέεται με το αντίστοιχο μήκος της ακτινοβολίας  $\lambda$ , σε  $\mu\text{m}$ , με τη σχέση  $h\nu = 1,238/\lambda$ .

### Η Ακτινοβολία του «ΕΝΟΣ ΗΛΙΟΥ»

Το σχήμα 3. δείχνει τη ροή των φωτονίων που αντιστοιχεί στα διάφορα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας AM1,5, όταν φτάνει στη γη, στη στάθμη της θάλασσας. Η καμπύλη έχει βγει υπολογιστικά, δηλαδή έχουν αφαιρεθεί από το διαστημικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας τα φωτόνια που εκτιμήθηκε ότι απορροφούνται ή σκεδάζονται από το όζον, τους υδρατμούς και τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας.



**Σχήμα 3.** Η συμβατική φωτονική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες AM1.5.



Η ηλιακή ακτινοβολία  $AM1,5$  έχει πυκνότητα  $935 \text{ W/m}^2$  και αποτελεί, χονδρικά μια αρκετά αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που περίπου δέχεται σε επιφάνεια κάθετη προς την ακτινοβολία και στις ευνοϊκότερες δυνατές συνθήκες αιχμής (καλοκαίρι, μεσημέρι, καθαρός ουρανός κ.λ.π.) ένα μεγάλο μέρος από τις περισσότερο κατοικημένες και αναπτυγμένες περιοχές της γης\*. Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλεύεται στα  $1000 \text{ W/m}^2$ , ονομάζεται συμβατικά **ακτινοβολία ενός ήλιου** (ή ενός πλήρους ήλιου) και παίρνεται συχνά σαν βάση σύγκρισης της ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η μονάδα αυτή χρησιμοποιείται επίσης για την αναφορά της **ισχύος αιχμής** των φωτοβολταϊκών διατάξεων, καθώς και για την πυκνότητα της ακτινοβολίας στις συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν φακούς ή κάτοπτρα. Π.χ. η συγκεντρωμένη δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας με πυκνότητα ισχύος  $100 \text{ k W/m}^2$  ονομάζεται «100 ήλιοι».

Οι συνθήκες  $AM0$  και  $AM2$  χρησιμοποιούνται συχνά ως πρότυπες για τον έλεγχο και την αξιολόγηση των ηλιακών στοιχείων που προορίζονται για διαστημικές και επίγειες εφαρμογές, αντίστοιχα. Για αντικειμενικές συγκρίσεις είναι απαραίτητο να γίνεται σαφής αναφορά των συνθηκών διεξαγωγής των μετρήσεων, διότι οι ιδιότητες των ηλιακών στοιχείων, και γενικότερα η απόδοση τους, επηρεάζονται σημαντικά από τη μορφή της ακτινοβολίας που δέχονται. Π.χ. από τις δύο παραπάνω συνθήκες, η  $AM2$  δίνει μεγαλύτερη απόδοση στα ηλιακά στοιχεία πυριτίου από όσο η  $AM0$ , διότι ένα μεγάλο μέρος από τα φωτόνια από την υπεριώδη και την υπέρυθρο περιοχή της ακτινοβολίας, που όπως δείχτηκε στο σχήμα 3., έχουν αφαιρεθεί από την  $AM2$ , έχουν σχετικά μικρή μόνο συμβολή ή είναι εντελώς άχρηστα για φωτοβολταϊκή μετατροπή με πυρίτιο. Συγκεκριμένα, η ενέργεια των φωτονίων της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου ενώ η ενέργεια των περισσότερων φωτονίων της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι μικρότερη από αυτό. Επομένως, στην πρώτη περίπτωση, ένα μικρό μόνο μέρος της ενέργειας των φωτονίων αξιοποιείται για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών. Επίσης, στη δεύτερη περίπτωση,

---

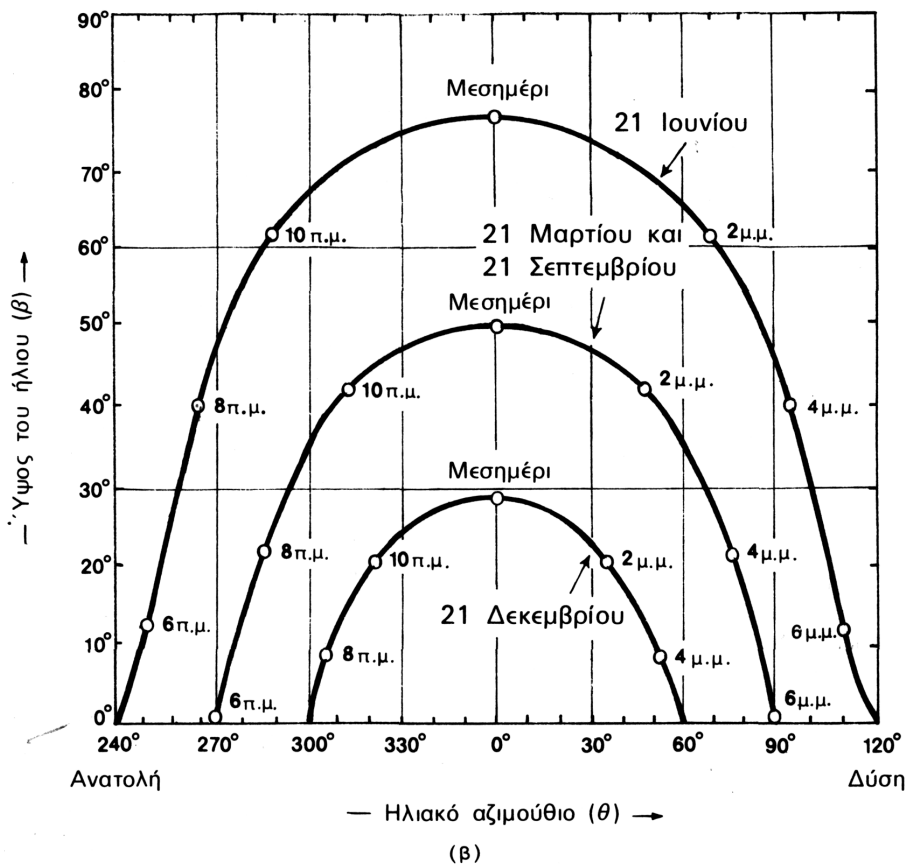
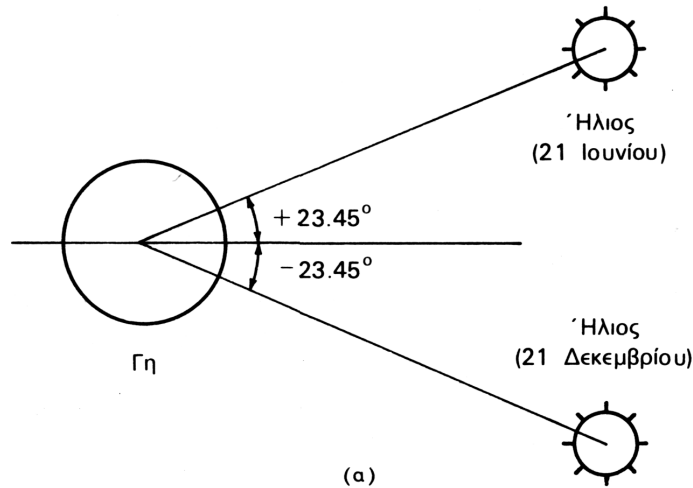
\* Στο τέλος (Διάγραμμα 1) υπάρχει ένας χάρτης με τη μέση ένταση της ηλιακής ενέργειας που δέχονται οι διάφορες περιοχές της γης.

δηλαδή για το μεγαλύτερο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, η ενέργεια των φωτονίων δεν επαρκεί για τη διέγερση των ηλεκτρονίων σθένους του πυριτίου και τη μεταφορά τους στη ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι, η απόδοση ενός κοινού ηλιακού στοιχείου πυριτίου καλής ποιότητας, μπορεί να είναι 16% σε συνθήκες  $AM2$ , ενώ σε συνθήκες  $AM0$  δεν ξεπερνά το 11,5%.

## Ηλιακή Γεωμετρία

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και θα αναλυθεί και στη συνέχεια, η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας και η φωτονική της σύσταση παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ανάλογα με την ώρα, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία, σε αιωρούμενα σωματίδια και σε άλλα συστατικά. Επίσης, επηρεάζονται σε αξιόλογο βαθμό και από άλλους προβλεπόμενους ή απρόβλεπτους παράγοντες, όπως οι ηλιακές κηλίδες και εκρήξεις, η ατμοσφαιρική ρύπανση κλπ.

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια μιας χρονιάς, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της **απόκλισης** ( $\delta$ ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού (Σχήμα 4). Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο. Οι ακραίες της τιμές είναι  $+ 23.45^\circ$  στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και  $-23.45^\circ$  στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο).



**Σχήμα 4.** Η μεταβολή της απόκλισης και η επίδραση της στην τροχιά του ήλιου στον ουρανό, (α) Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο, (β) Παράδειγμα των αντίστοιχων τροχιών που διαγράφει ο ήλιος στον ουρανό στη διάρκεια της ημέρας, κατά τα ηλιοστάσια καθώς και τις ισημερίες, σε τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος βόρειο 38°, όπως της Αθήνας. Οι ενδείξεις του μεσημεριού και των ωρών της ημέρας είναι σε ηλιακές τιμές.

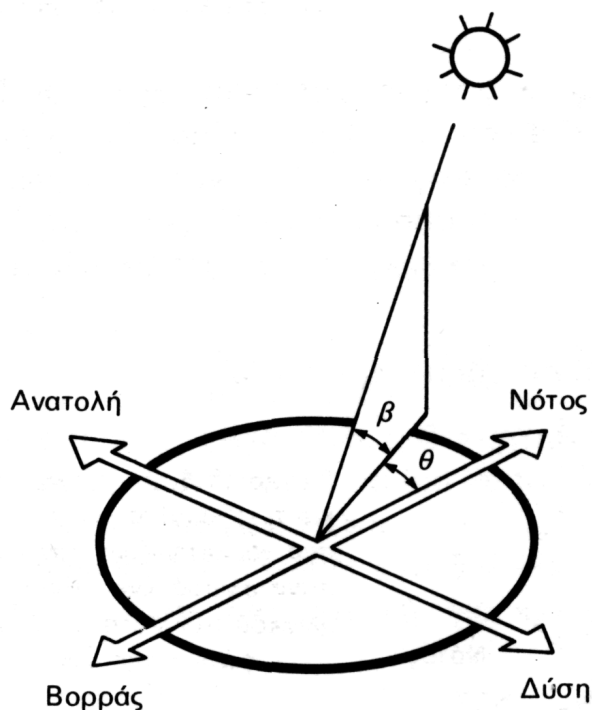
Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι ότι οι κυκλικές τροχιές του διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ τον χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο. Παράλληλα, διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στις διάφορες εποχές του έτους. Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σε έναν τόπο, είναι η θεωρητική **ηλιοφάνεια**, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια που δείχνει τον μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα. Επίσης, ο αριθμός των **ηλιοφεγγών** ημερών, στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται καθόλου από σύννεφα, καθώς και των **ανήλιων** ημερών, που ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα σε ολόκληρο το διάστημα της ημέρας.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.** Ενδεικτικά μετεωρολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά στην Αθήνα.

<i>α) Ύψος του ήλιου, θεωρητική ηλιοφάνεια και μέση θερμοκρασία του αέρα στις φωτεινές ώρες της ημέρας.</i>												
<i>Ημερομηνία</i>		<i>Ύψος του ήλιου το μεσημέρι</i>		<i>Θεωρητική ηλιοφάνεια</i>		<i>Μέση θερμοκρασία</i>						
21	Μαρτίου (εαρινή ισημερία)	51,08°		11,9	ώρες	13°	C					
21	Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο)	75,25°		14,8	ώρες	25°	C					
21	Σεπτεμβρίου (φθινοπωρινή ισημερία)	51,08°		11,9	ώρες	23°	C					
21	Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο)	28,35°		9,5	ώρες	11°	C					
<i>β) Μέσος αριθμός ηλιοφεγγών και ανήλιων ημερών και οι ώρες της μέσης πραγματικής ηλιοφάνειας στους διάφορους μήνες του έτους.</i>												
<i>Είδος ημερών</i>	<i>I</i>	<i>Φ</i>	<i>Μ</i>	<i>Α</i>	<i>Μ</i>	<i>Ι</i>	<i>Ι</i>	<b><i>A</i></b>	<i>Σ</i>	<i>Θ</i>	<i>N</i>	<i>Δ</i>
Ηλιοφεγγείς	3,2	4,3	5,6	7,5	7,0	11,9	21,3	21,6	15,4	8,9	3,8	3,4
Ανήλιες	3,7	3,1	2,5	1,1	0,5	0,1	0,0	0,0	0,2	1,0	2,5	4,1
Ηλιοφάνεια (ώρες)	123	139	180	233	303	335	373	357	277	211	162	127

Για παράδειγμα, στον πίνακα 5. δίνονται οι τιμές για τα χαρακτηριστικά ορισμένων εποχών στην Αθήνα, και είναι φανερό οι μεγάλες διαφορές μεταξύ τους.

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες: το ύψος και το αζιμούθιο. Το **ύψος** του ήλιου ( $\beta$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα (Σχήμα 5). Αντί για το ύψος, χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική της γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, που όπως είδαμε ονομάζεται **ζενιθιακή απόσταση** (ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου. Ζενίθ είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου, και ο όρος προέρχεται από την αραβική λέξη *senit* που σημαίνει ευθεία οδός.

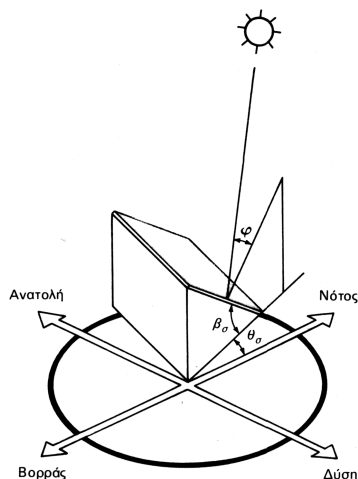


**Σχήμα 5.** Οι γωνίες του ύψους ( $\beta$ ) και του αζιμούθιου ( $\theta$ ), που περιγράφουν κάθε στιγμή τη θέση του ήλιου στον ουρανό.

Η δεύτερη χαρακτηριστική γωνία του ήλιου, το ηλιακό **αζιμούθιο** ( $\theta$ ), είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Ο όρος προέρχεται από την αραβική έκφραση *as summut*, που σημαίνει κατεύθυνση. Προς τα δεξιά από τον νότο, το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές, και προς τα αριστερά αρνητικές. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς, καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό.

## Ο 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. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επιπέδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες: την κλίση και την αζιμούθια γωνία (Σχήμα 6). Η **κλίση** του συλλέκτη ( $\beta_{\sigma}$ ) είναι η διέδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα. Δείχνει πόσο γέρνει ο συλλέκτης και μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 180°. Για γωνίες  $\beta_{\sigma} > 90^{\circ}$  το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.



**Σχήμα 6.** Η κλίση ( $\beta_{\sigma}$ ) και η αζιμούθια γωνία ( $\theta_{\sigma}$ ), που χαρακτηρίζουν τον προσανατολισμό ενός επιπέδου ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης.

Η **αζιμούθια γωνία** του συλλέκτη ( $\theta_{\sigma}$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από - 180° μέχρι + 180°. Η γωνία - 180° (που συμπίπτει με την + 180°) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς τον βορρά, η γωνία -90° προς την ανατολή, η γωνία 0° προς τον νότο και η γωνία + 90° προς τη δύση.

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε έναν επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης ( $\varphi$ ) είναι 0°. Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έχουν

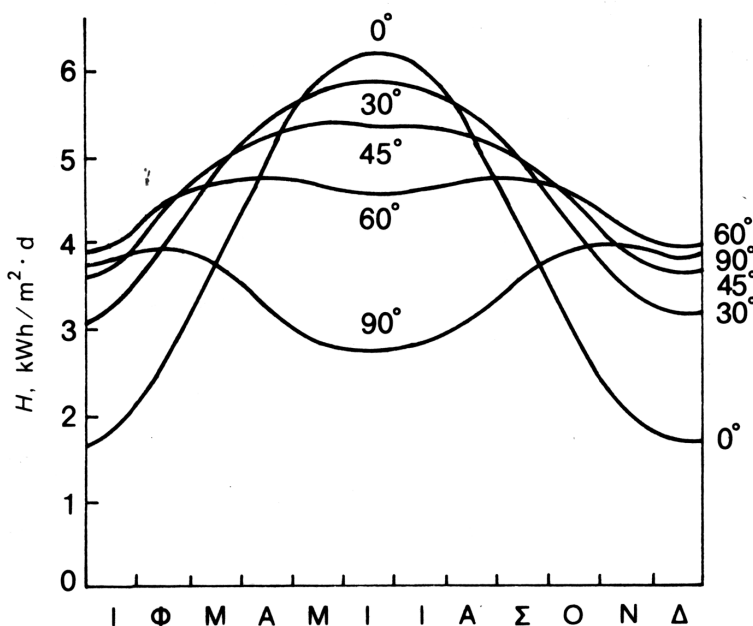
κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκύτταρων) ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές. Έτσι, η χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε ειδικές περιπτώσεις εφαρμογών, όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα.

## Η Βέλτιστη Κλίση

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

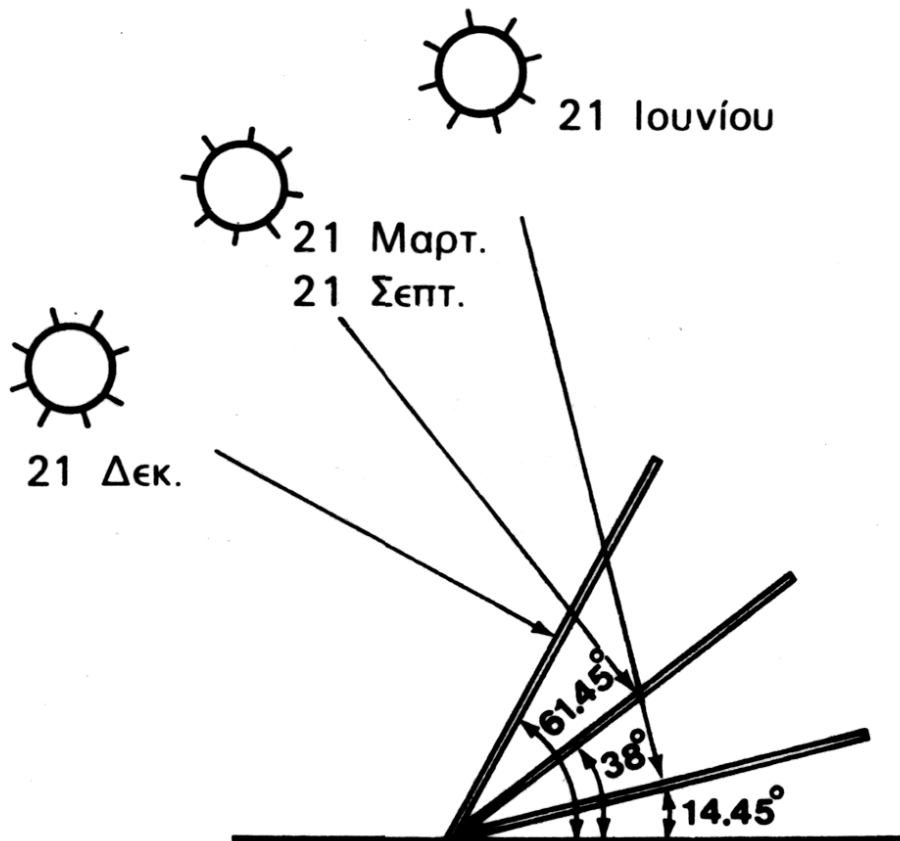
$$\text{συν}\varphi = \text{συν}\beta \text{ ημ}\beta_{\sigma} \text{ συν}(\theta_{\sigma} - \theta) + \text{ημ}\beta \text{ συν}\beta_{\sigma} \quad (1)$$

Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με τον γεωγραφική παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι  $0^{\circ}$  (προς το νότο). Αλλά λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή (Σχήμα 7).



**Σχήμα 7.** Παράδειγμα της εξάρτησης της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας  $H$ , που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια κατά τη διάρκεια των διαφόρων μηνών του έτους, σε συνάρτηση με την κλίση της. Το παράδειγμα είναι για τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $45^{\circ}$  και αφορά σε κλίσεις του ηλιακού συλλέκτη ( $\beta_{\sigma}$ ) ίσες με  $0^{\circ}$  (οριζόντιο επίπεδο),  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ , και  $90^{\circ}$  (κατακόρυφο επίπεδο).

Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  ως  $15^\circ$  μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για τον χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου  $10^\circ$  ως  $15^\circ$  μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου. Στο σχήμα 8 δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικότερες ημερομηνίες του έτους.



**Σχήμα 8.** Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (21 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και στην εαρινή (21 Μαρτίου) και τη φθινοπωρινή (21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $38^\circ$ , όπως η Αθήνα. Τα ύψη του ήλιου που εικονίζονται αφορούν στα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια



**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.** Γεωγραφικό πλάτος (κατά προσέγγιση) διαφόρων ελληνικών πόλεων και περιοχών

<i>Πόλη η περιοχή</i>	<i>Γεωγραφικό πλάτος</i>
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεοσιάδα	41°30'
Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κιλκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα, Ξάνθη, Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	41°
Καστοριά, Πτολεμαΐδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη, Πολύγυρος, Σαμοθράκη	40°30'
Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτόχωρο, Κασσάνδρα, Λήμνος	40°
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα, Βόλος	39°30'
Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκύρος, Μυτιλήνη	39°
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Άμφισσα, Λειβαδιά, Θήβα, Χαλκίδα, Χίος	38°30'
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα, Ραφήνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	38°
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Άργος, Ναύπλιο, Πόρος, Σύρος, Πάτμος	37°30'
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρτος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	37°
Γύθειο, Μήλος, Σαντορίνη, Ρόδος	36°30'
Κύθηρα, Καστελλόριζο	36°
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσσος, Κάρπαθος	35°30'
Χώρα Σφακίων, Ιεράπετρα, Αγ. Νικόλαος Κρήτης, Κύπρος	35°

Επίσης, στον πίνακα 6. δίνονται τα γεωγραφικά πλάτη διαφόρων ελληνικών περιοχών, για την επιλογή της σωστής κλίσης του ηλιακού συλλέκτη. Υπάρχουν και εφαρμογές, όπου κρίνεται σκόπιμη η αναπροσαρμογή της κλίσης του συλλέκτη δύο ή περισσότερες φορές στη διάρκεια του έτους, ώστε να παρακολουθεί κάπως την απόκλιση του ήλιου.

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

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

Η ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα της ανάκλασης εκφράζεται από ένα συντελεστή που κυμαίνεται από 0, για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, μέχρι 1, για πλήρη ανάκλαση. Στον πίνακα 3.4 δίνονται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης για ορισμένα από τα είδη επιφανειών που συμβαίνει να έχει το περιβάλλον στις περιοχές, όπου τοποθετούνται οι ηλιακοί συλλέκτες.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.** Παραδείγματα τιμών του συντελεστή ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

<i>Είδος επιφάνειας</i>	<i>Συντελεστής ανάκλασης</i>
Επιφάνεια νερού, θάλασσα	0,05
Ασφαλτόστρωμα	0,07
Αγρός με σκοτεινόχρωμο χώμα	0,08
Πράσινος αγρός	0,15
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0,24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου ή χρωματισμένη με ανοιχτό χρώμα	0,30
Χιόνι	0,60

## Ροή και Ένταση της Ακτινοβολίας

Κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα τροφοδοτείται με ηλιακή ενέργεια και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Ένα βασικό όμως μειονέκτημα του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ότι, σε αντίθεση με πολλά άλλα συστήματα μετατροπής, η τροφοδοσία του δεν είναι καθόλου σταθερή αλλά αυξομειώνεται μεταξύ μιας μέγιστης και της μηδενικής τιμής, ακολουθώντας συχνά απρόβλεπτες και απότομες διακυμάνσεις. Είναι λοιπόν χρήσιμο να εξετάσουμε με περισσότερες λεπτομέρειες πώς μεταβάλλεται χρονικά η ενέργεια που δέχεται ένας ηλιακός συλλέκτης.

Αρχικά, πρέπει να γίνει μια διευκρίνιση ως προς την ορολογία. Το ποσό της ενέργειας που περιέχεται στο φως του ήλιου, ονομάζεται συνήθως **ένταση** της ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς να συγκεκριμενοποιείται η έννοια της λέξης. Η «ένταση» είναι ένας πολύ γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μέγεθος ή την αποτελεσματικότητα διαφόρων φαινομένων. Π.χ. μιλάμε για ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, του ηλεκτροστατικού πεδίου, του ήχου, του ανέμου, της βροχής κ.λ.π. Σε αυστηρότερη ορολογία, το μέγεθος που χαρακτηρίζει την ποσότητα της ενέργειας, την οποία μεταφέρει σε έναν τόπο μια ακτινοβολία που μεταδίδεται προς μια κατεύθυνση στο χώρο, ονομάζεται **ροή ακτινοβολίας** ( $H$ ). Ορίζεται, συγκεκριμένα, ως το ποσό της ενέργειας της ακτινοβολίας που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα του εμβαδού μιας επιφάνειας, τοποθετημένης κάθετα στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας εκφράζεται συνήθως σε  $\text{kW/m}^2$ .

Ακριβολογώντας παραπέρα, βλέπουμε ότι ο όρος «ροή ακτινοβολίας» έχει έννοια όταν πρόκειται μόνο για ακτινοβολία που αποτελείται από δέσμη παράλληλων ακτίνων. Όταν όμως η ακτινοβολία είναι διάχυτη και διαδίδεται προς διάφορες κατευθύνσεις, όπως συμβαίνει συχνά με ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, τότε ως μέτρο του ποσού της ενέργειας που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα μιας επιφάνειας, χρησιμοποιείται περισσότερο ο γενικότερος όρος **ένταση ακτινοβολίας**. Συνώνυμη, για οποιαδήποτε χρήση, είναι η **πυκνότητα ισχύος** της ακτινοβολίας.

Με τον ίδιο όρο, «ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας», χαρακτηρίζεται και η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που δέχεται μια επιφάνεια σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Π.χ. στον σχεδιασμό των φωτοβολταϊκών συστημάτων

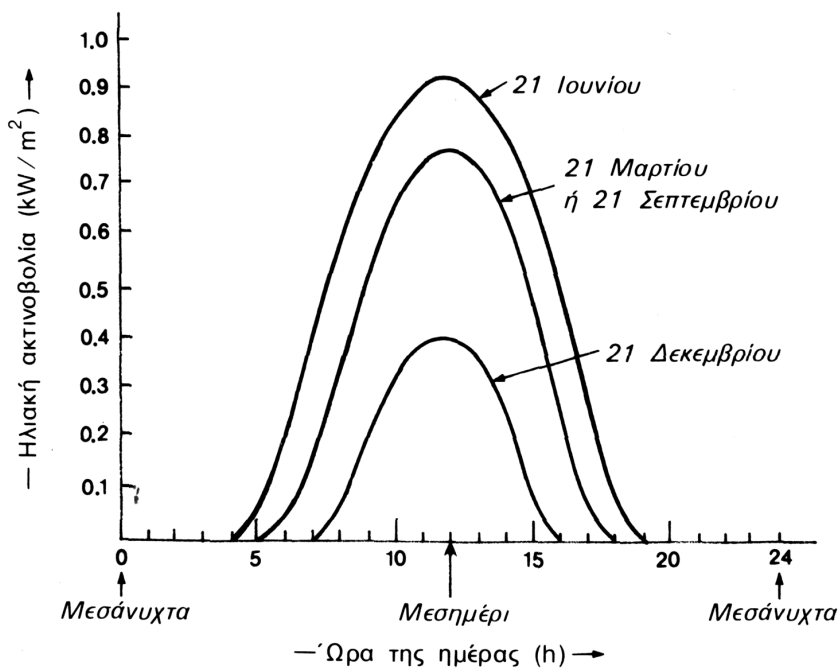
χρησιμοποιείται συχνά ως μετεωρολογικό δεδομένο η μέση ηλιακή ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο οριζόντιας επιφάνειας και ανά ημέρα, και εκφράζεται συνήθως σε  $\text{kW/m}^2 \cdot \text{day}$ .

Μια ανάλογη ασάφεια στη φωτοβολταϊκή ορολογία υπάρχει και σε άλλες γλώσσες. Π.χ. στα αγγλικά οι όροι *solar irradiance*, *intensity of radiation*, *insolation* (στην Αμερική), *solar power*, *solar radiation* χρησιμοποιούνται σχεδόν αδιάκριτα για να χαρακτηρίσουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ως πυκνότητα ισχύος ή ως πυκνότητα ενέργειας.

Συχνά, δεν μας ενδιαφέρει τόσο η συνολική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας, όσο η κατανομή της μέσα στο ηλιακό φάσμα. Ως **φασματική ροή ακτινοβολίας** ( $H_\lambda$ ) ορίζεται το ποσό της ενέργειας με μήκη κύματος μεταξύ  $\lambda$  και  $\lambda + d\lambda$ , που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα του εμβαδού μιας επιφάνειας τοποθετημένης κάθετα στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Συνήθως εκφράζεται σε μονάδες  $\text{kW/m}^2 \cdot \mu\text{m}$ , όπως στο σχήμα 1.

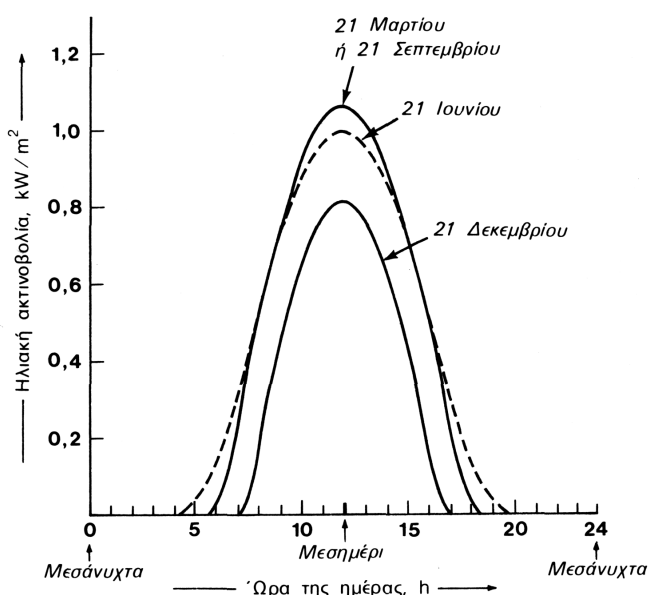
## **Η Διακύμανση της Ηλιακής Ακτινοβολίας**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Στο σχήμα 9. δείχνονται παραδείγματα της ομαλής μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας για 3 ενδεικτικές ημερομηνίες (καλοκαίρι, άνοιξη και φθινόπωρο, χειμώνα) σε συνθήκες ιδανικά καθαρού ουρανού. Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της μέγιστης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. Π.χ. στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12.25' τον χειμώνα, και 13.25' το καλοκαίρι, όταν ισχύει η θερινή ώρα.



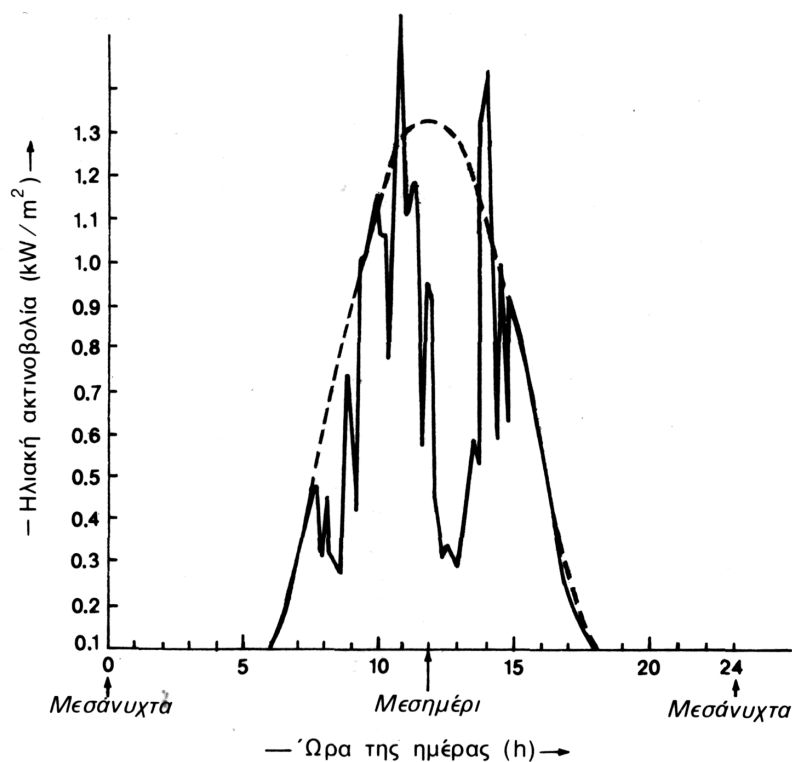
**Σχήμα 9.** Παράδειγμα της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια των φωτεινών ωρών τριών χαρακτηριστικών ημερομηνιών, με εντελώς καθαρό ουρανό. Οι ώρες είναι σε ηλιακές τιμές.

Έχουμε ήδη τονίσει ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια γίνεται σημαντικά μεγαλύτερη όταν βρίσκεται σε κατάλληλη κλίση, ώστε η πρόσπτωση των ακτινών να γίνεται περισσότερο κάθετα (Σχήμα 10). Στην περίπτωση αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέγιστη ισχύς της ακτινοβολίας το ηλιακό μεσημέρι στις ευνοϊκότερες ημέρες του έτους, δεν διαφέρει πάρα πολύ από τόπο σε τόπο και η τιμή  $1 \text{ kW/m}^2$  αποτελεί μια πολύ χονδρική, αλλά πάντως γενικά αποδεκτή προσέγγιση.



**Σχήμα 10.** Η διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις γεωγραφικές, εποχικές και κλιματικές συνθήκες του παραδείγματος του σχήματος 3.9, αλλά με τον ηλιακό συλλέκτη σε κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.

Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης γίνεται ανώμαλη, όπως δείχνεται στο σχήμα 11. Οι παρατηρούμενες απότομες πτώσεις της έντασης οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος. Επίσης, το γρήγορο πέρασμα ενός σμήνους πουλιών ή ενός αεροπλάνου μέσα από τη δέσμη του ηλιακού φωτός που δέχεται ο συλλέκτης, καταγράφεται σαν μια πολύ οξεία στιγμιαία πτώση της έντασης της ακτινοβολίας. Παρατηρούμε, ακόμη, εξάρσεις που ξεπερνούν τις κανονικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Προφανώς στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα θα συμβαίνει αθροιστική επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας από τον ήλιο<sup>1</sup>; μέσα από ένα άνοιγμα των νεφών, και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.



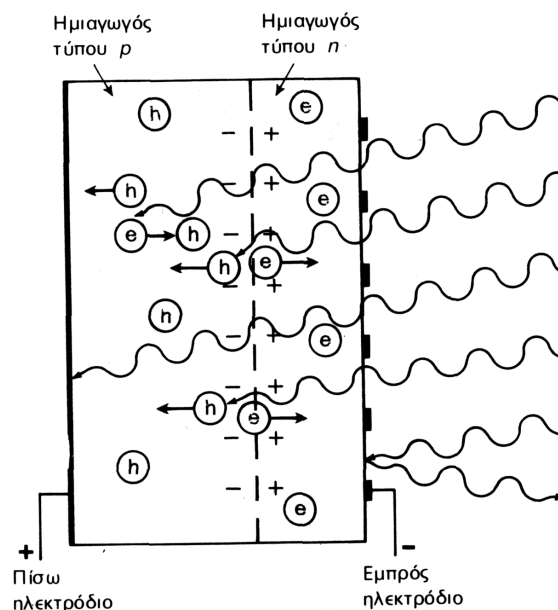
**Σχήμα 11.** Παράδειγμα της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια των φωτεινών ωρών μιας ημέρας με μερική νέφωση. Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη διακύμανση με εντελώς καθαρό ουρανό.

Στη διάρκεια του έτους, στο βόρειο ημισφαίριο, ο αριθμός των φωτεινών ωρών της ημέρας, η μέγιστη ισχύς καθώς και η συνολική ημερήσια ενέργεια που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια, φτάνουν στις μέγιστες τιμές τους στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) και πέφτουν στις αντίστοιχες ελάχιστες τιμές τους στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Στις επιφάνειες, όμως, π.χ. που βρίσκονται σε κλίση ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, η μέγιστη τιμή της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι στα ηλιακά μεσημέρια των ισημεριών (21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου), διότι όπως δείχτηκε στο σχήμα 8, τότε δέχονται κάθετα τις ακτίνες του ήλιου.

# Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

## Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η  $p - n$  εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα απ' τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στέρεο (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης  $p - n$  οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου (Σχήμα 12.).



**Σχήμα 12.** Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο. Τα φωτόνια της ακτινοβολίας, που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός του όψη, τύπου  $n$  στο παράδειγμα του σχήματος, παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια,  $e^-$ ) ή προς τα πίσω (οι οπές,  $h^+$ ), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ ένα άλλο μέρος της διέρχεται από το στοιχείο χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο.



Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $\eta$  και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου  $\rho$ , με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων  $\rho$  και  $\eta$  μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων ειδών. Π.χ. από διόδους ετεροενώσεων  $\rho - \eta$  διαφορετικών ημιαγωγών ή από διόδους Σότκυ που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

## **Η Απορρόφηση της Ακτινοβολίας στα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία**

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία\* δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος εκείνο που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι, η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγωγίμο υλικό του στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει, όπως είδαμε,

---

\* Ταυτοίσοι με το στοιχείο είναι και οι όροι **κύτταρο**, **κυψέλη** και **κυψελίδα**

στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται, σαν κινητική ενέργεια, στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό, και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα. Όπως θα αναλυθεί όμως παρακάτω, η αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιδρά αρνητικά στην απόδοσή τους.

Η ενέργεια ενός φωτονίου  $E$  συνδέεται με τη συχνότητα της ακτινοβολίας  $\nu$  και με το μήκος κύματος  $\lambda$  με τις σχέσεις:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

όπου  $h$  είναι η σταθερά δράσης του Planck ( $h = 6,3 \times 10^{-34}$  J s) και  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός ( $c = 3 \times 10^8$  m/s). Επομένως, αν το ενεργειακό διάκενο είναι σε μονάδες ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και το μήκος κύματος σε μικρόμετρα ( $\mu\text{m}$ ), τότε το μέγιστο χρησιμοποιήσιμο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό, ενεργειακού διακένου  $E_g$ , θα είναι:

$$\lambda_g = \frac{1,238}{E_g} \quad (2)$$

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού διεισδύει μια μονοχρωματική δέσμη ακτινοβολίας από όμοια φωτόνια ενέργειας  $h\nu$ , που έχει ροή (ή ένταση ή πυκνότητα ισχύος - είδαμε ότι η ορολογία είναι ανεκτική) ίση με  $H$  μονάδες ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας. Η ροή των φωτονίων ( $\Phi$ ), δηλαδή το πλήθος των φωτονίων ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου, θα είναι:

$$\Phi = \frac{H}{h\nu} = \frac{H\lambda}{hc} \quad (3)$$

Βλέπουμε, όπως άλλωστε είναι αυτονόητο, ότι, για σταθερή ένταση  $H$ , η ροή  $\Phi$  είναι αντίστροφα ανάλογα με την ενέργεια των φωτονίων  $h\nu$ , που είναι το ίδιο, αυξάνει γραμμικά με το  $\lambda$ .

Ας συμβολίσουμε, στη συνέχεια με  $\Phi_0$  την αρχική τιμή της ροής των φωτονίων στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού, με  $x$  την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στον ημιαγωγό, αρχίζοντας από την επιφάνεια του, και με  $\Phi(x)$  την τιμή της ροής των φωτονίων (δηλαδή το πλήθος των φωτονίων που δεν έχουν ακόμα απορροφηθεί) στο βάθος αυτό. Η ευκολία με την οποία πραγματοποιείται η απορρόφηση των φωτονίων, που είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα για τη χρησιμοποίηση του ημιαγωγού ως υλικού κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού

στοιχείου, θα δίνεται από τον ρυθμό της μεταβολής της  $\Phi$  με την αύξηση της απόστασης που διανύει η ακτινοβολία. Ο ρυθμός αυτός έχει αρνητική τιμή, αφού η  $\Phi$  μειώνεται με την αύξηση του  $x$ , και είναι προφανώς ανάλογος με τη συγκεκριμένη τιμή της  $\Phi$  στο βάθος  $x$ , δηλαδή με τη  $\Phi(x)$ . Θα ισχύει επομένως η σχέση:

$$\frac{-d\Phi}{dx} = a\Phi(x) \quad (4)$$

και η σταθερά της αναλογίας  $a$ , που δίνεται σε αντίστροφες μονάδες μήκους, ονομάζεται **συντελεστής απορρόφησης** της υπόψη ακτινοβολίας.

Δοθέντος ότι για  $x = 0$  η  $\Phi(x)$  παίρνει την τιμή  $\Phi_0$ , η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης είναι:

$$\Phi_x = \Phi_0 \exp(-ax) \quad (5)$$

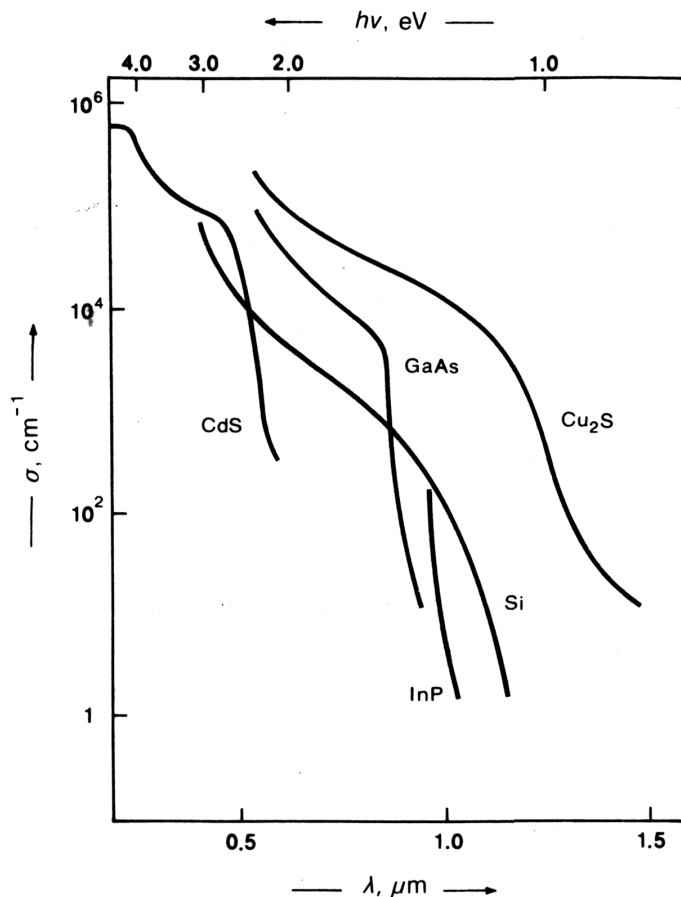
που ονομάζεται νόμος του Μπερ (Beer).

Στη συνέχεια, βρίσκουμε εύκολα ότι:

$$\frac{-d\Phi}{dx} = a\Phi_0 \exp(-ax) \quad (6)$$

δηλαδή ότι ο ρυθμός της απορρόφησης των φωτονίων, επομένως και της δημιουργίας των φορέων από την ακτινοβολία που δέχεται ο ημιαγωγός, είναι μεγαλύτερος κοντά στην επιφάνεια του και εξασθενίζει εκθετικά με την απόσταση από αυτή.

Όπως δείχνεται και στο σχήμα 13, η τιμή του συντελεστή απορρόφησης μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, μηδενίζεται όταν το  $\lambda$  υπερβαίνει το  $\lambda_g$  του ημιαγωγού, αφού για αυτά τα μήκη κύματος δεν πραγματοποιείται καμιά απορρόφηση φωτονίων. Αντίθετα, παίρνει μεγάλες τιμές προς την πλευρά των μικρών μηκών κύματος, που σημαίνει ότι η απορρόφηση πρακτικά όλων των αντίστοιχων φωτονίων γίνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού.



**Σχήμα 13.** Η μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης ( $\sigma$ ) σε συνάρτηση με το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) ή την ενέργεια των φωτονίων ( $h\nu$ ) της ακτινοβολίας, για τους κυριότερους ημιαγωγούς των φωτοβολταϊκών διατάξεων.

## Η Δημιουργία του Φωτορεύματος

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (για απλούστευση, γράφεται συνήθως φ/β στοιχείο) δέχεται μια κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα  $I_{\phi}$ , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Π.χ. αν υποθέσουμε ότι έχουν εξασφαλιστεί οι δύο βασικές προϋποθέσεις για ένα καλό φωτοβολταϊκό στοιχείο, δηλαδή η ένωση  $p - n$  να βρίσκεται σε κατάλληλη απόσταση από την όψη του στοιχείου και η μέση διάρκεια ζωής των φορέων μειονότητας στον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο, να είναι αρκετά μεγάλη. Τότε, για την πυκνότητα του φωτορεύματος, ισχύει ικανοποιητικά η σχέση:

$$I_{\phi} = eg(L_n + L_p) \quad (4.7)$$

όπου  $e$  είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο,  $\sigma$  είναι ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας (πλήθος ζευγών ηλεκτρονίων-οπών ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου του ημιαγωγού), και  $L_n, L_p$  είναι τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών, αντίστοιχα.

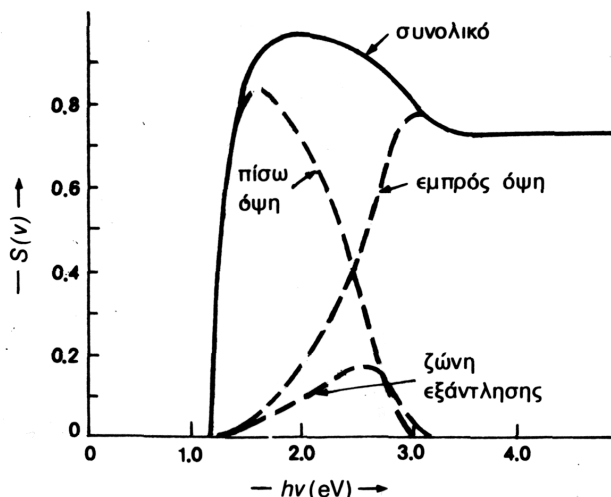
Ένα χρήσιμο μέγεθος για τον υπολογισμό του φωτορεύματος είναι η **φασματική απόκριση**  $S$  (ή απόδοση συλλογής ή κβαντική απόδοση), που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, σε σχέση με τη φωτονική ροή  $\Phi$ , δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Για ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda$ , η φασματική απόκριση  $S(\lambda)$  θα είναι:

$$S(\lambda) = \frac{I_\varphi(\lambda)}{e\Phi(\lambda)} \quad (8)$$

όπου  $\Phi(\lambda)$  είναι το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από  $\lambda$  μέχρι  $\lambda + d\lambda$ , και επομένως το συνολικό φωτόρευμα του στοιχείου, όταν δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία, θα είναι:

$$I_\Phi = e \int_0^{\lambda_s} S(\lambda)\Phi(\lambda)d\lambda \quad (9)$$

Η τιμή της φασματικής απόκρισης, και συνεπώς του φωτορεύματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, εξαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης και το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων κλπ. Στο σχήμα 14. δείχνεται η μεταβολή της φασματικής απόκρισης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου του εμπορίου, σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται.



**Σχήμα 14.** Η μεταβολή της φασματικής απόκρισης  $S(v)$  σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας, στις 3 περιοχές ενός φωτοβολταϊκού ηλιακού στοιχείου πυριτίου: εμπρός όψη τύπου  $n$ , ζώνη εξάντλησης, και πίσω όψη τύπου  $p$ .

Όταν το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου δεν είναι αμελητέο, η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda)[1 - R(\lambda)]\Phi(\lambda)d\lambda \quad (10)$$

όπου  $R(\lambda)$  είναι ο δείκτης ανάκλασης για την ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda$ .

### Τα Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων - Πρώτη Προσέγγιση

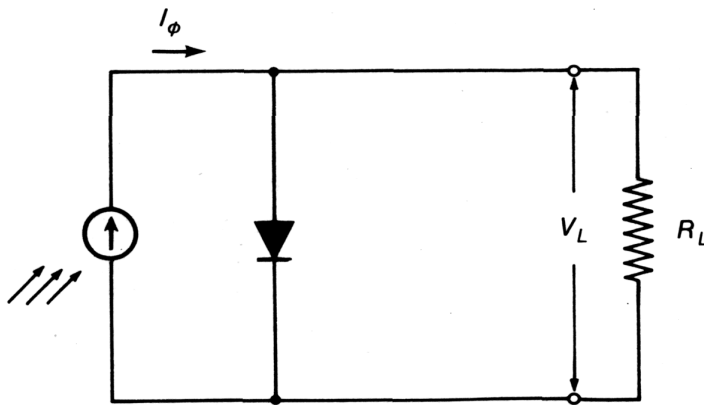
Για να προχωρήσουμε σε μία πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να το θεωρήσουμε ότι αποτελεί μία πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο, και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο διάγραμμα του σχήματος 15.

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα. Δηλαδή, σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα ισχύει η σχέση:

$$I_{\Gamma} = I_o \left[ \exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

από την οποία βρίσκουμε ότι η τιμή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης του στοιχείου  $V_{oc}$  (από την αγγλική έκφραση open-circuit voltage) θα είναι:

$$V_{oc} = \frac{\gamma kT}{e} \ln\left(\frac{I_{\Phi}}{I_o} - 1\right) \quad (11)$$



**Σχήμα 15.** Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του  $I_{\phi}$  είναι πολύ μεγαλύτερη από του  $I_o$  και επομένως η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί στη:

$$V_{oc} = \frac{\gamma k T}{e} \ln \frac{I_{\phi}}{I_o} \quad (12)$$

που δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρρευμα, δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Από τις σχέσεις για το  $I_o$ , που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούμε να βρούμε την εξάρτηση της  $V_{oc}$  από τις διάφορες ιδιότητες του ημιαγωγού, όπως το ενεργειακό διάκενο  $E_g$ , η ενδογενής συγκέντρωση των φορέων  $n_j$  οι συγκεντρώσεις των προσμίξεων  $N_A$  και  $N_D$  κλπ.

Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα ( $I_{sc}$  (από την αγγλική έκφραση short-circuit current) θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρρευμα:

$$I_{sc} = I_{\phi} \quad (13)$$

Όταν όμως το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης  $R_L$  (από την αγγλική έκφραση load resistance), το ρεύμα θα πάρει μία μικρότερη τιμή  $I_L$  που βρίσκεται με τη λύση της εξίσωσης:

$$I_L = I_{\phi} - I_o \left[ \exp\left(\frac{e I_L R_L}{\gamma k T}\right) - 1 \right] \quad (14)$$

Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης (δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος) για την οποία η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο θα γίνεται μεγίστη. Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση  $V_m$  που δίνεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$\frac{I_{\phi}}{I_o} + 1 = \left( 1 + \frac{e V_m}{\gamma k T} \right) \exp\left(\frac{e V_m}{\gamma k T}\right) \quad (15)$$

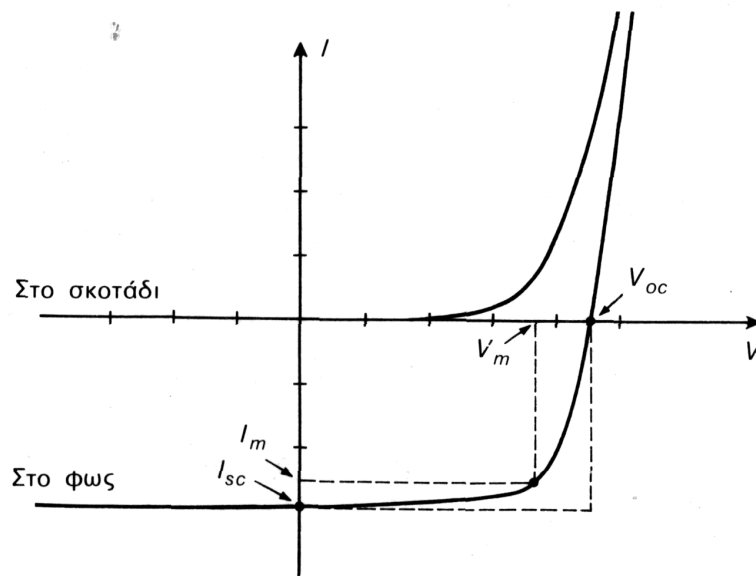
## Ο Συντελεστής Πλήρωσης

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_m = I_m V_m$  προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης  $I_{sc} V_{oc}$  ενός

φωτοβολταϊκού στοιχείου, ονομάζεται **συντελεστής πλήρωσης**  $FF$  (από την αγγλική έκφραση fill factor). Δηλαδή:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (16)$$

Στο διάγραμμα του σχήματος 16, ο  $FF$  δίνεται από το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη  $I-V$  του στοιχείου, σε συνθήκες ακτινοβολήσης, προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ .



**Σχήμα 16.** Η χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ( $I$ ) - τάσης ( $V$ ) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως. Διακρίνονται τα δύο ορθογώνια που ο λόγος των εμβαδών τους καθορίζει την τιμή του συντελεστή πλήρωσης. Στο διάγραμμα, δεν δείχνεται το ανάστροφο ρεύμα κόρου, λόγω της ασήμαντα μικρής τιμής του, σε σύγκριση με το φωτόρρευμα του στοιχείου.

Οι τρεις παραπάνω παράμετροι, δηλαδή ο  $FF$ , η  $I_{sc}$  και η  $V_{oc}$  είναι τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους. Επιστρέφοντας στον συντελεστή απόδοσης των στοιχείων  $\eta$  που αναφέραμε στην αρχή, μπορούμε τώρα να τον ορίσουμε με τη σχέση:

$$\eta = \frac{P_m}{HxA} = \frac{I_m \times V_m}{HxA} = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{HxA} \quad (17)$$

όπου  $H$  είναι η ένταση (πυκνότητα της ισχύος) της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, εμβαδού  $A$ . Όπως βλέπουμε, για την



πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων, επιδιώκεται οι τιμές των  $FF$ ,  $I_{sc}$  και  $V_{co}$  να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

Προφανώς θα ισχύει και η σχέση:

$$n = \frac{\Phi(E_g) V_m}{\Phi E_\mu} \quad (18)$$

όπου  $\Phi(E_g)$  είναι η ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού,  $\Phi$  είναι η συνολική φωτονική ροή στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο, και  $E_\mu$  είναι η μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας.

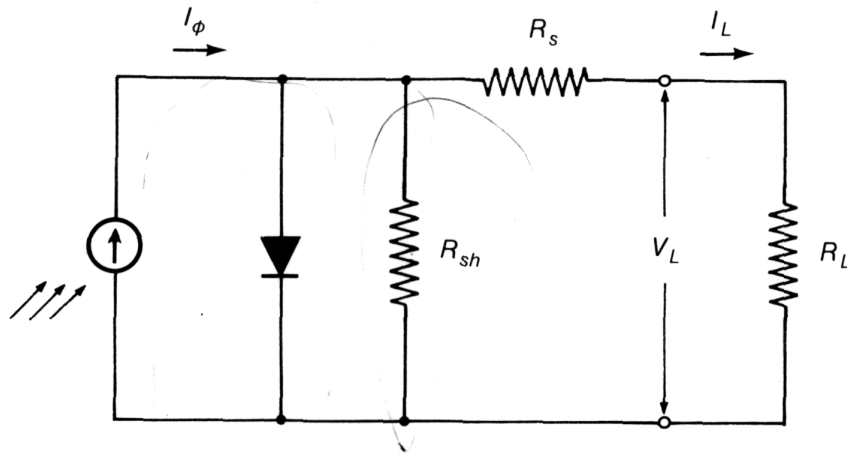
Στην ηλιακή ακτινοβολία, περίπου τα 2/3 των φωτονίων έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου (περίπου 1,1 eV). Επίσης, η  $V_m$  των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίσο με το 1/3 της  $E_\mu$  της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως βρίσκουμε πρόχειρα ότι η θεωρητική απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου:

$$n = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{3} = 22\%$$

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση της ακτινοβολίας. Δηλαδή, μια δέσμη ακτινοβολίας θα προκαλέσει σε ένα στοιχείο την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με μια άλλη δέσμη ίσης ισχύος αλλά πλουσιότερη σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο.

### **Τα Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων - Δεύτερη Προσέγγιση**

Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.4 περιγράφει ιδανικές συνθήκες, που δεν υπάρχουν στα πραγματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Μια σωστότερη προσέγγιση αποτελεί το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 17 διότι περιέχει και τις αναπόφευκτες αντιστάσεις  $R_s$  (από την αγγλική έκφραση series resistance) που



**Σχήμα 17.** Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, που περιλαμβάνει τις αντιστάσεις σειράς  $R_s$ , καθώς και τις παράλληλες αντιστάσεις  $R_{sc}$

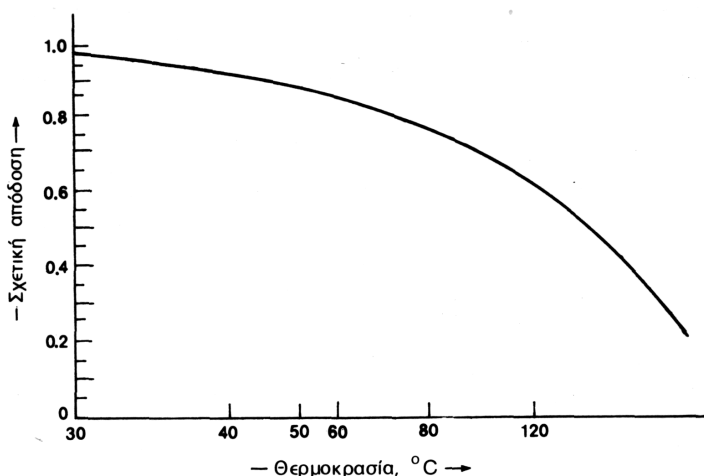
παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό (κυρίως στο εμπρός επιφανειακό στρώμα του) και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια\*. Ακόμα, επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού λόγω επίσης αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$  (από την αγγλική έκφραση shunt resistance). Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου η  $R_s$  είναι μικρότερη από 5  $\Omega$  και η  $R_{sh}$  είναι μεγαλύτερη από 500  $\Omega$ . Πάντως επηρεάζουν αισθητά την τιμή της τάσης  $V_L$  και του ρεύματος  $I_L$  που διαρρέει το φορτίο του κυκλώματος  $R_L$  με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της απόδοσης του στοιχείου. Στην περίπτωση αυτή ισχύει η σχέση:

$$I_L \left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = I_\Phi - I_o \left[ \exp \left( \frac{e(V_L - I_L R_s)}{\gamma k T} \right) - 1 \right] - \frac{V_L}{R_{sh}} \quad (19)$$

Εκτός από τις αντιστάσεις  $R_s$  και  $R_{sh}$  ένας άλλος παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η θερμοκρασία τους. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της  $V_{oc}$  και του  $FF$ .

\* Το ίδιο σύμβολο ( $R_s$ ) χρησιμοποιείται συνήθως και για την αντίσταση φύλλου (sheet resistance), που εκφράζει σε μονάδες  $\Omega/\square$  την αντίσταση ενός τετραγωνικού στρώματος ημιαγωγού, καθορισμένου πάχους.

Παράλληλα, μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Σχήμα 18).



**Σχήμα 18.** Τυπική καμπύλη της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους. Η κλίμακα του άξονα των τεταγμένων δίνει το ποσοστό της απόδοσης του στοιχείου σε σχέση με την απόδοσή του στη συμβατική θερμοκρασία 20° C. Η κλίμακα της θερμοκρασίας στον άξονα των τεταγμένων είναι λογαριθμική.

Αν ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με μια συμβατική θερμοκρασία (π.χ. 20° C) είναι  $\eta$ , η τιμή του σε μια διαφορετική θερμοκρασία  $\theta$  θα είναι:

$$\eta_{\theta} = \eta \sigma_{\theta} \quad (20)$$

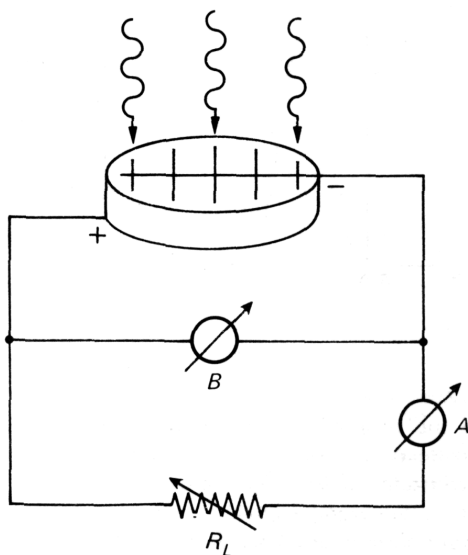
όπου  $\sigma_{\theta}$  είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης. Στη συμβατική θερμοκρασία, ο  $\sigma_{\theta}$  είναι ίσος με τη μονάδα, και μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας, για τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου.

### **Η Αποδοτική Λειτουργία των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων - Σταθερές Συνθήκες**

Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές (συσσωρευτές, ξηρά στοιχεία, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγη, μεγάλα δίκτυα διανομής), οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά (και μη γραμμικά) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος

που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή.

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ας εξετάσουμε τη συμπεριφορά του όταν οι πόλοι του συνδεθούν με ένα κύκλωμα που περιέχει μια μεταβλητή αντίσταση (Σχήμα 19).

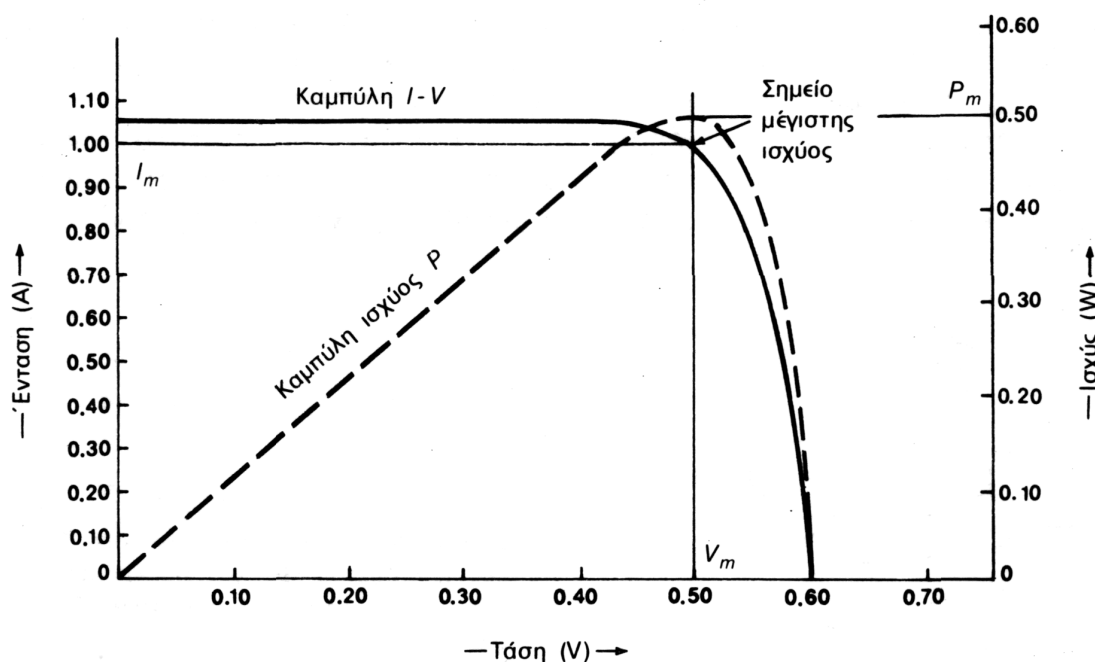


**Σχήμα 19.** Πειραματική διάταξη, με ένα βολτόμετρο ( $B$ ), ένα αμπερόμετρο ( $A$ ) και μια μεταβλητή αντίσταση ( $R_L$ ), για τη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Είδαμε παραπάνω ότι όταν η τιμή της αντίστασης είναι μηδέν, δηλαδή στη βραχυκυκλωμένη κατάσταση, η ένταση του ρεύματος παίρνει τη μέγιστη τιμή  $I_{sc}$ , ενώ η τάση θα μηδενιστεί. Αντίθετα, όταν η τιμή της αντίστασης τείνει στο άπειρο, δηλαδή στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση, μηδενίζεται η ένταση του ρεύματος αλλά η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή  $V_{oc}$ . Επομένως, στη βραχυκυκλωμένη και στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση η ηλεκτρική ισχύς που παράγει το στοιχείο ( $P = IV$ ) είναι μηδέν, αφού αντίστοιχα είναι μηδενική η τάση, στην πρώτη περίπτωση, και η ένταση του ρεύματος στη δεύτερη.

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος, ανάμεσα στις παραπάνω ακραίες καταστάσεις, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές, όπως δείχνεται στο σχήμα 20. Παράλληλα, μεταβάλλεται ομαλά και η ισχύς που παράγει το στοιχείο, με μέγιστη  $P_m$  σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης  $V_m$  και έντασης  $I_m$ . Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το ζεύγος αυτό καθορίζει, σε σχέση με το ζεύγος των τιμών  $V_{oc}$  και  $I_{sc}$  τον συντελεστή απόδοσης του στοιχείου  $\eta$ . Επομένως, από πρακτική άποψη, είναι πολύ σημαντικό ***η αντίσταση του κυκλώματος που***

**τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο να έχει κατάλληλη τιμή, ώστε στις συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας να παράγεται από το στοιχείο η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς.**

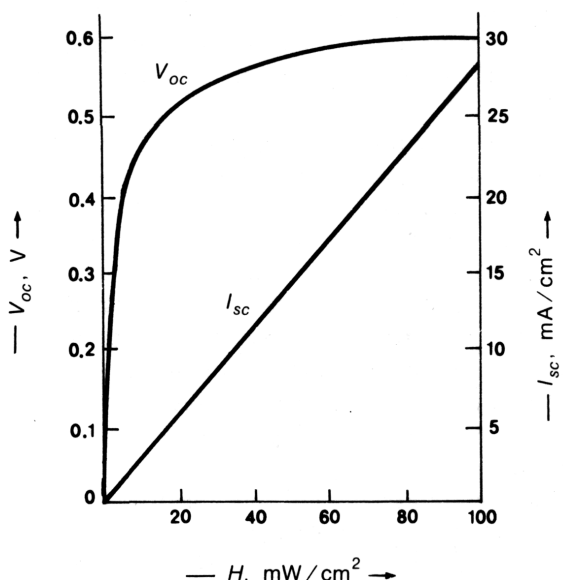


**Σχήμα 20.** Η συνεχής καμπύλη δείχνει ένα παράδειγμα της μεταβολής της τάσης ( $V$ ) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος ( $I$ ) που παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου, σε συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, και για μεταβαλλόμενη αντίσταση του κυκλώματος από μηδέν (όπου  $V = 0$ ) μέχρι άπειρη (όπου  $I=0$ ). Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο (η κλίμακα της ισχύος είναι στον δεξιό άξονα του διαγράμματος).  $V_m$  και  $I_m$  είναι η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ  $P_m$ .

### **Η Αποδοτική Λειτουργία των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων - Μεταβαλλόμενες Συνθήκες**

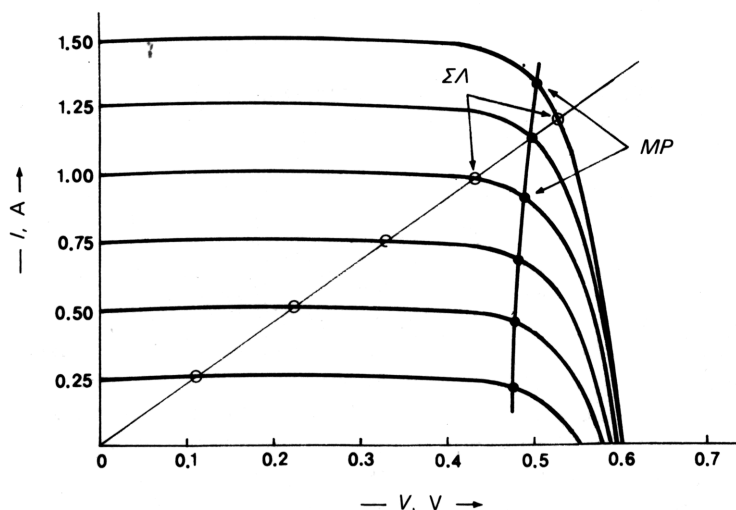
Τα παραπάνω αφορούν σε συνθήκες σταθερής ισχύος της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και σταθερής θερμοκρασίας του. Βλέπουμε όμως στο σχήμα 21, ότι η μεταβολή της πυκνότητας της ισχύος της ακτινοβολίας συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης και της βραχυκυκλωμένης έντασης του ρεύματος από το μηδέν (για το σκοτάδι) μέχρι τις μέγιστες τιμές τους, για τη μέγιστη ένταση της ακτινοβολίας. Επίσης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται

αισθητή μείωση της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι θα δημιουργείται πρόβλημα για τη διατήρηση της βελτιστοποίησης της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από ένα ηλιακό φωτοβολταϊκό στοιχείο κατά τη διάρκεια της ημέρας και των εποχών του έτους. Σε επόμενο κεφάλαιο θα δούμε ότι αυτό αντιμετωπίζεται συχνά στις εφαρμογές με τη χρησιμοποίηση ρυθμιστικών διατάξεων που φέρνουν συνεχώς την τάση και την ένταση του στοιχείου, στο ευνοϊκό ζεύγος τιμών, για τις συγκεκριμένες κάθε στιγμή συνθήκες.



**Σχήμα 21.** Η μεταβολή της α-νοιχτοκυκλωμένης τάσης ( $V_{oc}$ ) και της βραχυκυκλωμένης έντασης του ρεύματος ( $I_{sc}$ ) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου σε συνάρτηση με την ισχύ της ακτινοβολίας ( $H$ ), που δέχεται ανά μονάδα της επιφάνειάς του.

Στο σχήμα 22 βλέπουμε ότι για διαφορετικές πυκνότητες της ακτινοβολίας, σχηματίζεται μια οικογένεια μετατοπισμένων καμπυλών έντασης-τάσης. Είναι φανερό ότι π.χ. για την ακτινοβολία που δίνει  $I_{sc} = 1,25\text{A}$



**Σχήμα 22.**

Η μετατόπιση των σημείων λειτουργίας ( $\Sigma 1$ ) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου και η απομάκρυνση του από τα αντίστοιχα σημεία της μέγιστης ισχύος ( $MP$ ) της καμπύλης έντασης ( $I$ ) - τάσης ( $V$ ), για διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά για σταθερή τιμή της αντίστασης του κυκλώματος.

έχουμε περίπου  $I_m = 1,1$  A και  $V_m = 0,5$  V, και επομένως η κατάλληλη αντίσταση του κυκλώματος για να παράγεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό στοιχείο του παραδείγματος είναι  $R_L = V_m / I_m = 0,5 / 1,1 = 0,455$  Ω. Η αντίσταση όμως αυτή βλέπουμε ότι είναι εντελώς ακατάλληλη για όλες τις άλλες συνθήκες ακτινοβολίας, αφού η ευθεία με κλίση  $0,455$  Ω τέμνει τις αντίστοιχες καμπύλες  $I - V$  σε σημείο διαφορετικό από το σημείο της μέγιστης ισχύος.

Πάντως, σε κάθε περίπτωση, λόγω της πολύ μικρής τιμής του ανάστροφου ρεύματος κόρου  $I_0$ , η ένταση του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πρακτικά ανάλογη προς την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται, δηλαδή προς το γινόμενο της έντασης (της πυκνότητας της ισχύος) της ακτινοβολίας επί το εμβαδόν της επιφανείας του. Επίσης, από τις διάφορες καμπύλες  $I-V$  βλέπουμε ότι, με τη μεταβολή της αντίστασης του κυκλώματος, η ένταση του ρεύματος παραμένει περίπου σταθερή για το μεγαλύτερο τμήμα του διαγράμματος, ενώ μεταβάλλεται ουσιαστικά η τάση. Δηλαδή, το φωτοβολταϊκό στοιχείο συμπεριφέρεται, σε μεγάλο βαθμό, σαν πηγή περίπου σταθερού ρεύματος, με την προϋπόθεση ότι παραμένει σταθερή η πυκνότητα της ακτινοβολίας.

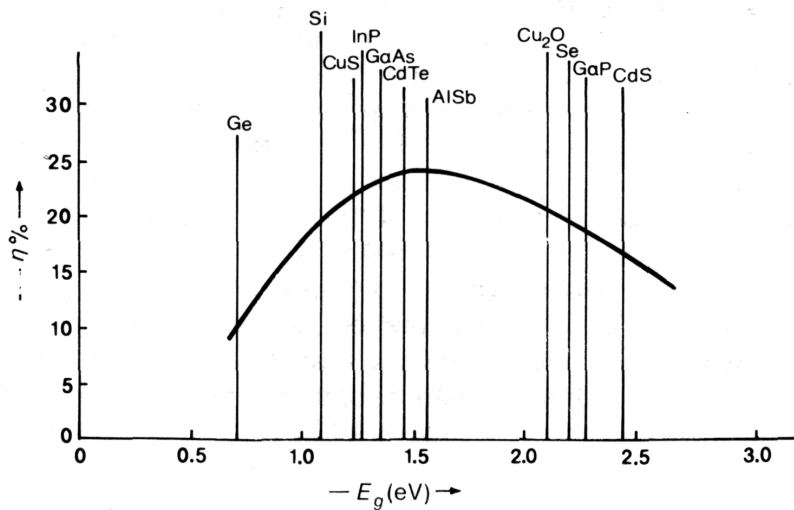
Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και η ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται από 3 μεταβλητούς παράγοντες: την ένταση της ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία του στοιχείου, και την αντίσταση του κυκλώματος. Προφανώς, στον σχεδιασμό και τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων επιδιώκεται οι παράγοντες αυτοί να παίρνουν ευνοϊκές τιμές, ώστε να παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς, όσο επιτρέπει ο συντελεστής απόδοσης των στοιχείων.

### **Αξιολόγηση των Ημιαγωγών για Ηλιακές Φωτοβολταϊκές Εφαρμογές**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένας ημιαγωγός μπορεί να απορροφήσει μόνο τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο. Και μάλιστα, από τα φωτόνια αυτά αξιοποιείται φωτοβολταϊκά το μέρος μόνο της

ενέργειας τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια μετατρέπεται σε συνήθως ανεπιθύμητη θερμότητα. Επομένως, η τιμή του ενεργειακού διακένου των ημιαγωγών είναι ένα από τα κυριότερα κριτήρια που καθορίζουν την καταλληλότητα τους για να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στο σχήμα 23 βλέπουμε λοιπόν ότι οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας (περίπου 25%) μπορούν να πραγματοποιηθούν σε φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5 eV.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό κριτήριο είναι το *είδος* του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού, δηλαδή αν είναι άμεσο ή έμμεσο. Τα φωτόνια απορροφούνται ευκολότερα στους ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού διακένου και έτσι το φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν χρειάζεται να έχει μεγάλο πάχος, με αποτέλεσμα να μπορεί να γίνει μεγάλη εξοικονόμηση υλικού.



**Σχήμα 23.** Η θεωρητική απόδοση ( $\eta$ ) των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε συνάρτηση με το ενεργειακό διάκενο ( $E_g$ ) του ημιαγωγού από τον οποίο είναι κατασκευασμένα. Άλλοι θεωρητικοί υπολογισμοί δίνουν ελαφρά διαφορετικές τιμές για την απόδοση των ίδιων στοιχείων.

Π.χ. στο αρσενικούχο γάλλιο (GaAs), που είναι ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου, για να απορροφηθεί το 80% των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο (1,43 eV), αρκεί στρώμα πάχους 1  $\mu\text{m}$ , ενώ αντίστοιχα στο πυρίτιο (Si) χρειάζεται στρώμα πάχους περίπου 100 $\mu\text{m}$ . Αυτό άλλωστε δείχτηκε και στο σχήμα 13, όπου είναι φανερό ότι



ο συντελεστής απορρόφησης στο GaAs, για τα φωτόνια που μας ενδιαφέρουν, είναι περίπου 10 ή περισσότερες φορές μεγαλύτερος από του Si.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8.** Οι μεγαλύτερες αποδόσεις φωτοβολταϊκής μετατροπής (πάνω από 10%), που έχουν πραγματοποιηθεί με ηλιακά στοιχεία, σε ενοσησιακές συνθήκες.

<b>Υλικό</b>	<b>Τύπος στοιχείων</b>	<i>Μέγιστη απόδοση σε ακτινοβολία AM1</i>
n-Ga <sub>0,3</sub> Al <sub>0,7</sub> As/p-GaAs	Ομοένωση – ετεροδομή	24%
GaAs	Ομοένωση	22%
n-AlAs/p-GaAs	Ετεροένωση	18,5%
Si (μονοκρυσταλλικό)	Ομοένωση	18%
Si (πολυκρυσταλλικό)	Ομοένωση	16%
Au/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /p-Si	Σότκυ	10%
p-Cu <sub>x</sub> S/n-CdS	ετεροένωση	10%

Άλλα σημαντικά κριτήρια για την αξιολόγηση των ημιαγωγών, αλλά και των υπολοίπων υλικών κατασκευής των ηλιακών στοιχείων, είναι το κόστος της παραγωγής τους, η σταθερότητα τους στην επίδραση των εξωτερικών συνθηκών, και κυρίως της υγρασίας και της θερμότητας, η τοξικότητα των διαφόρων συστατικών, το ειδικό τους βάρος κ.λ.π.

Όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, από τα πολλά ημιαγωγικά υλικά που έχουν ως τώρα μελετηθεί για ηλιακή φωτοβολταϊκή μετατροπή, μεγάλη εφαρμογή έχει βρει μόνο το πυρίτιο, αν και άλλοι ημιαγωγοί έχουν δώσει καλύτερες αποδόσεις (πίνακας 8). Πολύ σημαντικές προοπτικές για σύντομη ανάπτυξη έχουν επίσης το θειούχο κάδμιο (CdS) λόγω χαμηλού κόστους, και το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) λόγω μεγάλης απόδοσης. Πάντως η ερευνητική αναζήτηση συνεχίζεται έντονη με στόχο την ανακάλυψη και άλλων υλικών, ίσως οργανικής σύστασης, που ενδεχομένως να συνδυάζουν χαμηλό κόστος, εύκολη εφαρμογή και αξιόλογη απόδοση.

## Ηλιακά Στοιχεία Πυριτίου

### *Η Επιλογή και η συμπεριφορά του πυριτίου*

Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1,1 eV. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητες (έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή διακένου) δεν είναι ιδεώδεις για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή αλλά μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής των ηλιακών στοιχείων. Η αιτία είναι ίσως ότι το πυρίτιο έχει ήδη ένα πλούσιο παρελθόν 3-4 δεκαετιών σαν το κύριο υλικό των διατάξεων των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής. Επομένως οι ιδιότητες του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στην αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, με ικανοποιητική χημική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής, με τη χρησιμοποίηση τεχνολογικών μεθόδων δοκιμασμένων με επιτυχία.

Επίσης, τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου έχουν λειτουργήσει με απολύτως ικανοποιητική αξιοπιστία σε ακραίες συνθήκες, τόσο σε διαστημικές όσο και σε επίγειες εφαρμογές. Π.χ. σε διαστημόπλοια σε τροχιά προς τον πλανήτη Δία με ένταση ακτινοβολίας μόλις 50W/m<sup>2</sup> και θερμοκρασία -120°C, ή σε άλλα διαστημόπλοια σε τροχιά προς τον Ερμή και την Αφροδίτη με ένταση ακτινοβολίας 2,5kW/m<sup>2</sup> και θερμοκρασία 140°C, ή σε συστήματα συγκεντρωμένου φωτός, στην επιφάνεια της γης, ισχύος εκατοντάδων ήλιων. Επίσης, σε πλαίσια τοποθετημένα σε κορυφές βουνών εκτεθειμένα σε χιονοθύελλες και ταχύτητες ανέμου πάνω από 100km/h, στο έντονο διαβρωτικό περιβάλλον της θαλάσσιας ατμόσφαιρας, σε περιοχές με μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές κλπ. Ενδεικτικό της επιτυχίας των ηλιακών στοιχείων πυριτίου είναι ο εντυπωσιακός ρυθμός της αύξησης της παραγωγής τους. Πριν από είκοσι χρόνια, η ετήσια παραγωγή των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου δεν ξεπερνούσε, σε συνολική ισχύ αιχμής, τα λίγα kW<sub>p</sub>, και προορίζονταν αποκλειστικά για τηλεπικοινωνιακούς, μετεωρολογικούς και ερευνητικούς δορυφόρους. Σήμερα η ετήσια παραγωγή τους έχει φτάσει τα 10 MW<sub>p</sub> (αύξηση περίπου 1000 φορές), από τα οποία μόλις τα 150

$kW_p$  προορίζονται για δορυφορικές ή άλλες διαστημικές εφαρμογές, ενώ το υπόλοιπο χρησιμοποιείται σε επίγειες φωτοβολταϊκές διατάξεις.

Σύμφωνα με έναν θεωρητικό υπολογισμό, η απόδοση των ηλιακών στοιχείων πυριτίου μπορεί να φθάσει μέχρι 23,92% για συνθήκες AM1. Ο υπολογισμός έχει γίνει για ηλιακό στοιχείο πάχους 100  $\mu\text{m}$  με εμπρός τμήμα τύπου  $\eta$  πάχους 0,2  $\mu\text{m}$  και ζώνη εξάντλησης πάχους 0,15  $\mu\text{m}$ . Το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας θεωρήθηκε 150  $\mu\text{m}$  και ο μέσος χρόνος ζωής τους 20  $\mu\text{s}$ , περίπου. Ένα τέτοιο στοιχείο θα έδινε ανοιχτοκυκλωμένη τάση  $V_{oc} = 0,1V$  και πυκνότητα βραχυκυκλωμένου φωτορεύματος  $I_{\phi} = 40 \text{ mA/cm}^2$ , περίπου.

Πειραματικά, η μεγαλύτερη απόδοση ηλιακού στοιχείου πυριτίου σε συνθήκες AM1 μετρήθηκε εργαστηριακά 19%, με απώλειες ανάκλασης 3% και συντελεστή πλήρωσης 0,77. Στις πρακτικές εφαρμογές, τα ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου μεγάλης επιφάνειας έχουν απόδοση περίπου 10%-12% ή λίγο μεγαλύτερη\*.

## Η παρασκευή του ηλιακού στοιχείου

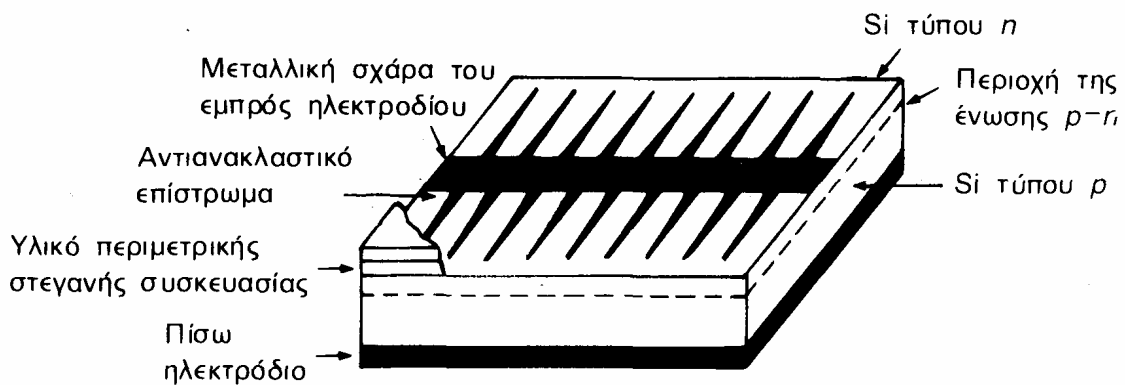
Για να έχει το πυρίτιο, αλλά και κάθε άλλος κρυσταλλικός ημιαγωγός, ικανοποιητικές ιδιότητες για φωτοβολταϊκές και γενικότερα για ηλεκτρονικές εφαρμογές (π.χ. μεγάλη κινητικότητα, μεγάλο μήκος διάχυσης και μεγάλο χρόνο ζωής των φορέων - κυρίως των φορέων μειονότητας - πριν από την επανασύνδεση τους) πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό τους πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής. Η πρώτη φάση του

---

\* Πρόσφατα, στη διάρκεια της εκτύπωσης του βιβλίου, ο R. Swanson του αμερικανικού πανεπιστημίου Stanford ανακοίνωσε ότι κατασκεύασε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου με την εκπληκτικά μεγάλη απόδοση 27,5%. Η επιτυχία του νέου στοιχείου ίσως οφείλεται στις παρακάτω 3 πρωτότυπες ιδέες: (1) Στο επιφανειακό στρώμα  $\text{SiO}_2$  της εμπρός όψης του στοιχείου γίνεται κατάλληλη χημική προσβολή ώστε να αποκτήσει πολύ ανώμαλη επιφάνεια. Έτσι, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο διαχέεται με μεγάλες γωνίες και τα φωτόνια διασχίζουν μεγάλες διαδρομές μέσα στον ημιαγωγό, μέχρι να συναντήσουν την πίσω όψη του στοιχείου και να απομακρυνθούν. Επομένως, έχουν αυξημένη πιθανότητα να απορροφηθούν στους χημικούς δεσμούς του ημιαγωγού και να δημιουργήσουν ζεύγη φορέων. (2) Η διαμόρφωση των περιοχών τύπου  $\eta$  και  $\rho$  του δίσκου γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε και τα δύο ηλεκτρόδια του στοιχείου, θετικό και αρνητικό, να βρίσκονται στην πίσω όψη του, αφήνοντας την εμπρός όψη εντελώς ελεύθερη για τη συλλογή της ακτινοβολίας. (3) Οι περιοχές  $\eta$  και  $\rho$  του στοιχείου δεν είναι ογκώδεις ούτε συνεχείς σε όλη την επιφάνεια των αντίστοιχων ηλεκτροδίων, αλλά αποτελούνται από διάσπαρτες μικρές ρηχές νησίδες στην πίσω όψη του στοιχείου, σε επαφή με τα ηλεκτρόδια. Δηλαδή στο μεγαλύτερο μέρος του όγκου του, ο ημιαγωγός παραμένει ενδογενής. Έτσι, μειώνεται πολύ η πιθανότητα να συμβούν επανασυνδέσεις, αφού οι περιοχές  $\eta$  και  $\rho$  είναι μικρές και επομένως είναι απίθανο οι φορείς που δημιουργήθηκαν από την απορρόφηση φωτονίων να βρεθούν σε εχθρικό περιβάλλον, ως φορείς μειονότητας.

καθαρισμού του πυριτίου γίνεται με την ανάτηξη και στη συνέχεια τη μετατροπή του «μεταλλουργικού» πυριτίου σε αέριο τριχλωροσιλάνιο ( $\text{SiHCl}_3$ ) που αποχωρίζεται από τις διάφορες προσμίξεις με κλασματική απόσταξη. Το «μεταλλουργικό» πυρίτιο έχει καθαρότητα περίπου 99,6%, που είναι πολύ καλή για τις συνηθισμένες τεχνικές χρήσεις, αλλά εντελώς ανεπαρκής για ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Στη συνέχεια, το τριχλωροσιλάνιο ανάγεται με υδρογόνο και συμπυκνώνεται πυρίτιο ποιότητας «ημιαγωγού» ή «ηλεκτρονικής», που τήκεται και ανακρυσταλλώνεται με ακόμη μεγαλύτερη καθαρότητα, π.χ. της τάξης του 99,999999%, σε κυλινδρική μονοκρυσταλλική μορφή, διαμέτρου περίπου 10 cm. Από τον κύλινδρο κόβονται δίσκοι, πάχους περίπου 0,5mm, οι οποίοι λειαινούνται με επιμέλεια για την απομάκρυνση των ελαττωμάτων της κοπής και στη συνέχεια διαμορφώνονται σε διόδους  $p-n$  με επίταξη, διάχυση ή εμφύτευση προσμίξεων. Το τελικό στάδιο είναι η συγκόλληση των ηλεκτροδίων στην εμπρός και πίσω όψη του δίσκου, η αλληλοσύνδεση των έτοιμων πια στοιχείων, η κάλυψη της εμπρός επιφάνειας τους με ένα αντανακλαστικό επίστρωμα για τη μείωση της ανάκλασης του φωτός και η στεγανή συσκευασία σε πλαίσια (Σχήμα 24.).



Σχήμα 24. Σχηματική απεικόνιση της τομής ενός συσκευασμένου ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το παράδειγμα αφορά σε στοιχείο πυριτίου τύπου  $n/p$ .

Το ηλεκτρόδιο της εμπρός όψης του ηλιακού στοιχείου αποτελείται από ένα αραιό μεταλλικό δικτυωτό πλέγμα, σε σχήμα σχάρας, ώστε να αφήνει ελεύθερο το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας για να δέχεται το φως. Το πλέγμα είναι συνήθως από κράματα αργύρου και καλύπτει περίπου το 1-5% της επιφάνειας του στοιχείου. Το ηλεκτρόδιο του πίσω τμήματος του δίσκου, όπου δεν υπάρχει

πρόβλημα κάλυψης, αφού δεν δέχεται ακτινοβολία, αποτελείται συνήθως από ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου, σε όλο το πλάτος του στοιχείου. Υπάρχουν, όμως εξαιρέσεις σε διατάξεις συνδυασμένων ηλιακών στοιχείων, που αναφέρονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Κανονικά, περίπου το 30% της ηλιακής ακτινοβολίας, που πέφτει σε μια επιφάνεια πυριτίου, ανακλάται πάλι προς το περιβάλλον. Για να μειωθεί η μεγάλη αυτή απώλεια, επικαλύπτονται τα ηλιακά στοιχεία με ένα στρώμα από κατάλληλα αντανάκλαστικά υλικά (π.χ.  $\text{SiO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), που περιορίζουν την ανάκλαση περίπου στο 5%.

Η επίδραση της υγρασίας του περιβάλλοντος μπορεί να προκαλέσει πρόωρη φθορά στα ηλιακά στοιχεία, και κυρίως στις ηλεκτρικές τους συνδέσεις. Γι' αυτό, τα συναρμολογημένα στοιχεία καλύπτονται συνήθως με ένα λεπτό γυαλί, που επικολλάται πάνω τους με τη βοήθεια ενός διαφανούς πλαστικού φύλλου, στεγανοποιούνται με μια περιμετρική ελαστική ταινία και το σύνολο συγκρατείται ισχυρά και μόνιμα με τη βοήθεια μιας άλλης περιμετρικής ταινίας, μεταλλικής, συνήθως από αλουμίνιο.

Η δαπάνη για τα πρόσθετα αυτά υλικά και εργασίες, πέρα από το κόστος παραγωγής των ηλιακών στοιχείων, είναι μία σημαντική επιβάρυνση για τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Σύμφωνα με μια εκτίμηση, το κόστος του εξοπλισμού μιας βιομηχανικής εγκατάστασης για την παραγωγή και τον έλεγχο πλαισίων με ηλιακά στοιχεία πυριτίου, με ετήσια δυναμικότητα ισχύος αιχμής 150  $\text{kW}_p$ , που φαίνεται ότι αποτελεί το μικρότερο οικονομικό μέγεθος βιομηχανικής μονάδας, υπολογίζεται σε \$ 185.000. Η εγκατάσταση αυτή θα απασχολεί 20 εργαζόμενους και η ετήσια δαπάνη για την προμήθεια των έτοιμων ηλιακών στοιχείων από άλλον κατασκευαστή θα είναι \$ 700.000 περίπου. Επίσης, θα απαιτούνται περίπου άλλα \$ 120.000 ετησίως για την προμήθεια των υλικών συναρμολόγησης των πλαισίων.

Η τεχνολογία που περιγράφηκε παραπάνω ήταν μέχρι πρόσφατα η μοναδική βιομηχανική μέθοδος κατασκευής ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων, και εξακολουθεί να εφαρμόζεται από πολλούς κατασκευαστές. Είναι μία διαδικασία πολύ ενεργοβόρα και δαπανηρή, με αποτέλεσμα το κόστος του δίσκου να φτάνει περίπου τα \$ 350 ανά  $\text{m}^2$ , και το πλήρες ηλιακό πλαίσιο τα \$ 1.000 ανά  $\text{m}^2$ . Τα τελευταία όμως 2-3 χρόνια άρχισε να αναπτύσσεται παραγωγικά η κατασκευή ηλιακών στοιχείων από φθηνότερα υλικά και με απλούστερες μεθόδους, που αναμένεται ότι θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους.

Το πρώτο βήμα προήλθε από τη διαπίστωση ότι, σε αντίθεση προς άλλες ηλεκτρονικές εφαρμογές, για την κατασκευή καλών ηλιακών στοιχείων δεν απαιτείται να είναι το πυρίτιο μονοκρυσταλλικό. Ικανοποιητικές αποδόσεις δίνουν και τα ηλιακά στοιχεία από πολύ κρυσταλλικό πυρίτιο, με την προϋπόθεση ότι το μέγεθος των κόκκων του θα είναι αρκετά μεγάλο, της τάξης του 1 mm, ώστε να εκτείνονται σε ολόκληρο το πάχος του δίσκου.

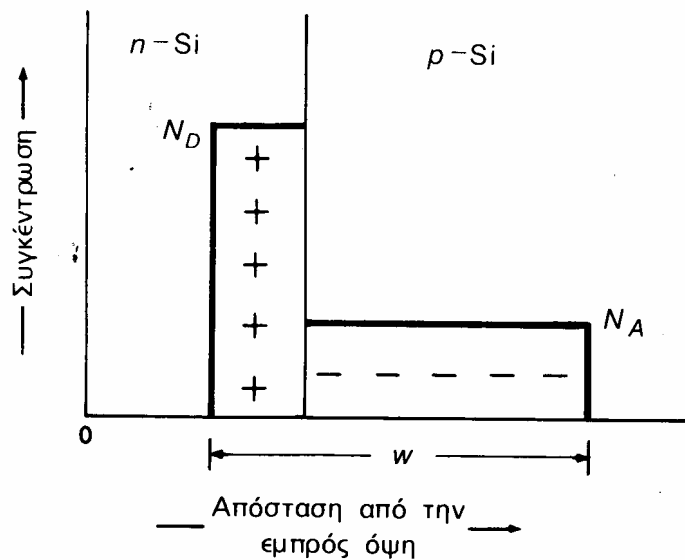
## **Η διαμόρφωση της διόδου**

Συνήθως, η διόδος των ηλιακών στοιχείων πυριτίου διαμορφώνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η εμπρός τους όψη να είναι τύπου  $n$  με προσμίξεις ατόμων φωσφόρου, και το πίσω τμήμα να είναι τύπου  $p$  με προσμίξεις ατόμων βορίου. Κατασκευάζονται όμως επίσης στοιχεία με αντίθετη ένωση, δηλαδή εμπρός τύπου  $p$  και πίσω τύπου  $n$ , κυρίως για διαστημικές εφαρμογές, διότι έχουν μεγαλύτερη αντοχή (στις ισχυρές ακτινοβολίες).

Στο διάγραμμα του σχήματος 13 είδαμε ότι, για τους περισσότερους ημιαγωγούς, ο συντελεστής απορρόφησης έχει μια περίπου σταθερή (και μεγάλη) τιμή για όλα τα φωτόνια που απορροφούν, ενώ για το πυρίτιο αυξάνει αργά με τη μείωση του μήκους κύματος των φωτονίων. Έτσι, όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία, όπως είναι το ηλιακό φως, το μέρος της εκείνο που έχει μικρό σχετικά μήκος κύματος, απορροφάται ολόκληρο σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια. Αν, π.χ. το εμπρός τμήμα του στοιχείου είναι τύπου  $n$ , υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι οπές που δημιουργούνται από το φως να συναντήσουν αμέσως ελεύθερα ηλεκτρόνια (τα οποία αφθονούν στο τμήμα τύπου  $n$  ως φορείς πλειονότητας) και να επανασυνδεθούν, πριν προλάβουν να διαχυθούν προς τη ζώνη εξάντλησης της διόδου. Γι' αυτό, το εμπρός τμήμα των ηλιακών στοιχείων πυριτίου κατασκευάζεται σε πολύ λεπτό πάχος (της τάξης του  $\mu\text{m}$ ) ώστε οι περισσότεροι φορείς, που δημιουργούνται με την απορρόφηση της ακτινοβολίας, να έχουν την ευκαιρία να πλησιάσουν προς τη ζώνη εξάντλησης και να εκτραπούν υπό την επίδραση του πεδίου της. Έτσι, καθώς οι οπές οδηγούνται προς το τμήμα τύπου  $p$  και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια προς το τμήμα τύπου  $n$ , όπου και οι μὲν και τα δε είναι φορείς πλειονότητας, η πιθανότητα να μη συναντήσουν αντίθετους φορείς και να μην επανασυνδεθούν (και επομένως

να μπορέσουν να συμβάλλουν στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου) είναι μεγάλη. Όσο καθαρότερος είναι ένας ημιαγωγός, τόσο μεγαλύτερο μήκος διάχυσης έχουν οι φορείς του και τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχουν, ως φορείς μειονότητας, να φτάσουν στη ζώνη εξάντλησης της διόδου.

Παράλληλα, για την αύξηση της παραπάνω πιθανότητας, επιδιώκεται να αποκτήσει μεγάλο πάχος η ζώνη εξάντλησης της διόδου, που πετυχαίνεται με τη διαμόρφωση του εμπρός τμήματος σε τύπου  $n^+$  (δηλαδή με μεγάλη συγκέντρωση δοτών\*) ενώ στο τμήμα τύπου  $p$  η συγκέντρωση αποδεκτών είναι σχετικά μικρή (Σχήμα 25.). Συνηθισμένες τιμές για τα ηλιακά στοιχεία του εμπορίου είναι  $N_D = 5 \times 10^{19}$  ανά  $\text{cm}^3$  και  $N_A = 10^{16}$  ανά  $\text{cm}^3$  περίπου. Όπως δείχνεται στο σχήμα, το μεγαλύτερο μέρος της ζώνης εξάντλησης της διόδου εκτείνεται προς το τμήμα τύπου  $p$ .



**Σχήμα 25.** Τα φορτία των διεγερμένων προσμίξεων στην ένωση  $p-n$  ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου τύπου  $n^+/p$ . Με  $w$  συμβολίζεται το πάχος της ζώνης εξάντλησης της διόδου.

### Ανταγωνιστικά μεγέθη

Ο επιτυχημένος σχεδιασμός ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου προϋποθέτει τη μελέτη και επιλογή των βέλτιστων μεγεθών για πολλές

\* Υπενθυμίζουμε ότι ο συμβολισμός  $n$  δείχνει ότι η συγκέντρωση των προσμίξεων δοτών είναι πάνω από περίπου 10 άτομα ανά  $\text{cm}^3$ . Όμοια, το  $p$  δείχνει ότι είναι μεγάλη η συγκέντρωση των προσμίξεων αποδεκτών.

παραμέτρους που επιδρούν ανταγωνιστικά στην απόδοση του. Π.χ. όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το πάχος του εμπρός τμήματος του στοιχείου πρέπει να είναι πολύ λεπτό, δηλαδή να μην ξεπερνά το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας ώστε να έχουν μεγάλη πιθανότητα να φτάσουν στην περιοχή της ζώνης εξάντλησης της διόδου. Αυτό, σε ένα στοιχείο  $\eta^+/\rho$  (δηλαδή με εμπρός τμήμα τύπου  $\eta^+$  και πίσω τμήμα τύπου  $\rho$ ) βοηθά στη διάσωση των οπών που δημιουργήσε το φως στο εμπρός τμήμα του, δεν ισχύει όμως το ίδιο και για τους φορείς μειονότητας του πίσω τμήματος. Συγκεκριμένα, όσα φωτόνια απορροφούνται βαθύτερα στο τμήμα  $\rho$  του στοιχείου, δημιουργούν επίσης ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών, με φορείς μειονότητας τώρα τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Πάλι, όμως, η ζώνη εξάντλησης δεν πρέπει, κατά μέσο όρο, να απέχει από την περιοχή αυτή περισσότερο από το μήκος διάχυσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Επομένως, η απόσταση της ζώνης εξάντλησης από την εμπρός όψη του στοιχείου καθορίζεται από τον βέλτιστο συνδυασμό των τιμών του μήκους διάχυσης των φορέων και του συντελεστή απορρόφησης του ημιαγωγού.

Επίσης, για να παράγεται μεγάλη ανοιχτοκυκλωμένη τάση  $V_{oc}$  (που συνεπάγεται μεγάλη απόδοση) πρέπει το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο στην ένωση  $\rho$ - $\eta$  του στοιχείου να είναι ισχυρό. Δηλαδή πρέπει να υπάρχει σχετικά μεγάλη συγκέντρωση προσμίξεων αποδεκτών στο τμήμα τύπου  $\rho$  και δοτών στο τμήμα  $\eta$ . Οι μεγάλες, όμως συγκεντρώσεις προσμίξεων μειώνουν τον χρόνο ζωής των φορέων μειονότητας και προκαλούν πρόωρες επανασυνδέσεις, μειώνοντας έτσι την ένταση του φωτορεύματος, με άμεση πάλι (και ανάλογη) δυσμενή επίδραση στην απόδοση του στοιχείου.

Μία σχετικά πρόσφατη επινόηση, που έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα για την παρεμπόδιση των πολλών επανασυνδέσεων των φορέων, είναι η ανάπτυξη ενός κατάλληλου πεδίου στο πίσω τμήμα του στοιχείου, γνωστού με την ονομασία BSF (back surface field, πεδίο της πίσω επιφάνειας). Συγκεκριμένα, σε ένα στοιχείο π.χ.  $\eta^+/\rho$ , δημιουργείται στην ακραία ζώνη του τμήματος τύπου  $\rho$  που εφάπτεται με το πίσω ηλεκτρόδιο, μία στενή περιοχή τύπου  $\rho^+$ , με αυξημένη συγκέντρωση αποδεκτών. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (φορείς μειονότητας) που δημιουργήσε η ακτινοβολία στο τμήμα τύπου  $\rho$ , εμποδίζονται με την παρεμβολή της περιοχής  $\rho^+$  να διαχυθούν προς το πίσω ηλεκτρόδιο και να επανασυνδεθούν. Αντίθετα,



εκτρέπονται πάλι προς τα εμπρός, προς τη ζώνη εξάντλησης της διόδου. Στα ηλιακά στοιχεία πυριτίου BSF, που μπορούν να είναι τύπου  $n^+ / p / p^+$  ή τύπου  $p^+ / n / n^+$ , η πίσω περιοχή της αυξημένης συγκέντρωσης προσμίξεων είναι πολύ λεπτή. Π.χ. σε ένα στοιχείο  $n^+ / p / p^+$ , συνολικού πάχους 250  $\mu\text{m}$ , το πάχος της περιοχής τύπου  $p^+$  (με  $10^{18}$  αποδέκτες ανά  $\text{cm}^3$ ) δεν ξεπερνά το 0,5  $\mu\text{m}$ .

Ένα άλλο προφανές αντικείμενο συμβιβαστικής επιλογής στον σχεδιασμό των ηλιακών στοιχείων είναι οι διαστάσεις της μεταλλικής σχάρας που αποτελεί το εμπρός τους ηλεκτρόδιο. Ένα σχετικά μεγάλο πλάτος και μια πυκνή διάταξη των γραμμών του πλέγματος της σχάρας είναι καταρχήν πλεονεκτικό διότι συνεπάγεται μικρή μόνον αντίσταση για τη συλλογή των φορέων του ρεύματος, δηλαδή μικρή  $R_s$ , και επομένως μικρή απώλεια από την ηλεκτρική ισχύ που παράγει το στοιχείο. Συγχρόνως, όμως, αυτό απαιτεί σχετικά μεγάλη κάλυψη της εμπρός όψης του στοιχείου από το αδιαφανές μεταλλικό υλικό του ηλεκτροδίου, που σημαίνει μείωση της ωφέλιμης επιφάνειας υποδοχής της ακτινοβολίας και αντίστοιχη μείωση της απόδοσης του στοιχείου. Συνήθως επιλέγεται, με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, ένα αρκετά πολύπλοκο σχήμα για το εμπρός ηλεκτρόδιο, με κεντρικούς αγωγούς και πλευρικά δάκτυλα, ώστε να συμβιβάζονται ικανοποιητικά οι δύο παραπάνω ανταγωνιστικές επιπτώσεις. Όπως δείχτηκε στο σχήμα 5.1, το πλάτος των πλευρικών δακτύλων αυξάνει συνεχώς, στη διαδρομή τους από την περίμετρο προς τον κεντρικό αγωγό του εμπρός ηλεκτροδίου, καθώς συλλέγονται οι φορείς και αυξάνει η ένταση του ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται η αντίσταση των δακτύλων παράλληλα με την αύξηση του ρεύματος και επομένως δεν μεγαλώνουν οι απώλειες της ηλεκτρικής ισχύος ( $P = I^2 R$ ) που παράγει το ηλιακό στοιχείο. Άλλοι κατασκευαστές διαμορφώνουν διαφορετικά το εμπρός ηλεκτρόδιο του ηλιακού στοιχείου, με τον σκοπό πάντα να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες της ηλεκτρικής ισχύος. Π.χ. έχουν κατασκευαστεί πλέγματα με ορθογωνική, κυκλική ή ακτινωτή μορφή.

Στην περίπτωση πλέγματος με  $\mu$  ισοκαταναμημένους αγωγούς, η τιμή της αντίστασης στην όψη του στοιχείου δίνεται αρκετά ικανοποιητικά από τη σχέση:

$$R_s = R'_s / 8\mu^2 \quad (21)$$

όπου  $R'_s$  είναι εδώ η αντίσταση φύλλου του ημιαγωγού, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο. Π.χ. σε ένα συνηθισμένο ηλιακό φωτοβολταϊκό

στοιχείο πυριτίου τύπου  $\eta^{\pm}/\rho$ , με αντίσταση φύλλου  $R'_s = 50\Omega/\square$  και με πλέγμα ηλεκτροδίου από 6 αγωγούς, η αντίσταση σειράς στην εμπρός όψη του είναι περίπου:  $R_s = 50/8 \times 6^2 = 0,27\Omega$ .

## Άμορφο πυρίτιο

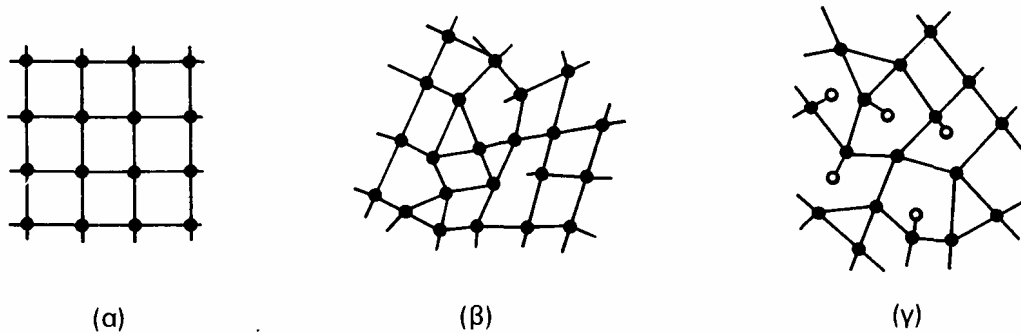
Είδαμε παραπάνω ότι για να έχει ικανοποιητική συμπεριφορά ως υλικό κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων, το πυρίτιο πρέπει να είναι μονοκρυσταλλικό ή, έστω, πολυκρυσταλλικό αλλά να αποτελείται από κόκκους μεγάλου μεγέθους. Είναι επομένως καταρχήν παράδοξο ότι το άμορφο πυρίτιο, δηλαδή ένα υλικό με τόσο μεγάλη αταξία στη δομή του ώστε να μην υπάρχουν διακριτά όρια κόκκων, θα μπορούσε να ήταν κατάλληλο για την κατασκευή ηλιακών στοιχείων.

Όπως, όμως, διαπιστώθηκε, το άμορφο πυρίτιο (συμβολίζεται συνήθως a-Si) είναι ένας ημιαγωγός που διαφέρει ουσιαστικά από το κρυσταλλικό πυρίτιο. Π.χ. το ενεργειακό διάκενο δεν έχει σταθερή τιμή αλλά κυμαίνεται, ανάλογα με τον τρόπο της παρασκευής του, από 1,2 μέχρι 1,6 eV περίπου, σε σύγκριση με το 1,1 eV του κρυσταλλικού πυριτίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα του a-Si για φωτοβολταϊκές εφαρμογές σε ηλιακά στοιχεία είναι ότι ο συντελεστής απορρόφησης της ακτινοβολίας ξεπερνά το  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ , είναι δηλαδή πολύ μεγαλύτερος από του κρυσταλλικού πυριτίου. Έτσι, ως προς την ιδιότητα αυτή, το a-Si συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου και αρκεί ένα λεπτό στρώμα, πάχους λίγων μm, για την κατασκευή ηλιακών στοιχείων.

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.

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 (Σχήμα 26). Το υδρογονούχο a-Si περιέχει συνήθως 10-40% υδρογόνο, σε ατομική αναλογία, και είναι με τη γενική

έννοια, ένα άμορφο κράμα πυριτίου και υδρογόνου. Συμβολίζεται συχνά ως  $\alpha\text{-Si:H}$ . Ανάλογα, και ίσως καλύτερα αποτελέσματα, έχει η προσθήκη ατόμων φθορίου αντί για άτομα υδρογόνου.



**Σχήμα 26.** Σχηματική απεικόνιση (α) του κρυσταλλικού πυριτίου, (β) του άμορφου πυριτίου με ατελείς και στρεβλωμένους δεσμούς, (γ) του υδρογονούχου άμορφου πυριτίου με συμπληρωμένους και χαλαρωμένους τους δεσμούς του. Οι μαύροι κύκλοι δείχνουν τις θέσεις των ατόμων Si και οι άσπροι τις θέσεις των ατόμων H.

Η εμπορική παραγωγή ηλιακών στοιχείων από  $\alpha\text{-Si:H}$  έχει ήδη αρχίσει από το 1983, κυρίως στην Ιαπωνία, σε μορφή διόδων Σότκυ με απόθεση του πυριτίου πάνω σε λεπτά φύλλα από ανοξειδωτο χάλυβα. Η απόδοση τους είναι περίπου 5%, αλλά πιστεύεται ότι με τις κατάλληλες βελτιώσεις η απόδοση των ηλιακών στοιχείων άμορφου πυριτίου θα φθάσει μελλοντικά το 15%. Παράλληλα, από αρκετό καιρό εξετάζεται ερευνητικά η δυνατότητα κατασκευής φτηνών ηλιακών 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 κ.λ.π.

### ***Ηλιακά Στοιχεία Θειούχου Καδμίου***

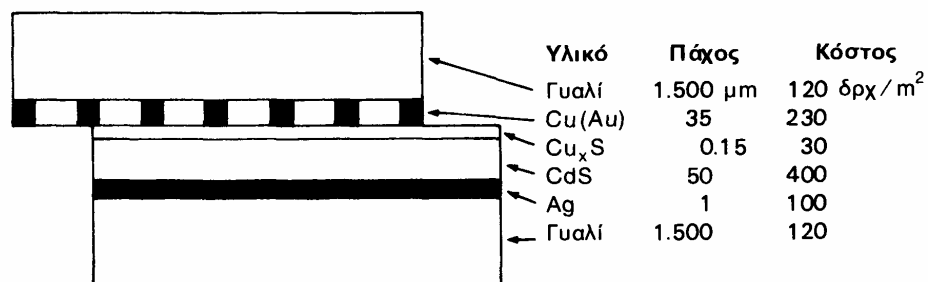
Το θειούχο κάδμιο ( $\text{CdS}$ ) είναι ένας ημιαγωγός με άμεσο και σχετικά μεγάλο ενεργειακό διάκενο ( $E_g = 2,45 \text{ eV}$ ), που έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές, όπως για την κατασκευή φωτοκύτταρων, ενισχυτών φωτός, φωσφοριστών, ανιχνευτών ακτινοβολίας κ.λ.π. Το  $\text{CdS}$  συμπεριφέρεται συνήθως σαν ημιαγωγός τύπου  $n$ . Δηλαδή οι φορείς πλειονότητας είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, χωρίς να απαιτείται η προσθήκη ξένων ατόμων-δοτών.

Παλαιότερα, είχε θεωρηθεί ότι η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων από CdS, με εμπρός ηλεκτρόδιο από χαλκό, οφείλονταν αποκλειστικά στο CdS, γι' αυτό επικράτησε η ονομασία του ως στοιχεία θείουχου καδμίου. Σήμερα, είναι γνωστό ότι οφείλεται στην ετεροένωση μεταξύ του στρώματος του CdS και ενός λεπτού στρώματος θείουχου χαλκού, που σχηματίζεται με την επίδραση του CdS στον Cu, από τον οποίο, όπως είπαμε, είναι κατασκευασμένο το εμπρός ηλεκτρόδιο. Η σύσταση του στρώματος αυτού αποδίδεται συνήθως με τον χημικό τύπο  $Cu_2S$ , αλλά σωστότερο είναι να γράφεται  $Cu_xS$ , όπου το  $x$  κυμαίνεται από 1,96 μέχρι 1,99. Το  $Cu_xS$  είναι επίσης ημιαγωγός, με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1,2eV, και έχει χαρακτήρα τύπου  $p$ . Δηλαδή οι φορείς πλειονότητας είναι οι οπές, χωρίς την προσθήκη προσμιξέων.

Το ενεργειακό διάκενο του  $Cu_xS$  είναι αρκετά ευνοϊκό για την απορρόφηση των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας. Έχει όμως πολύ μικρό μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας, περίπου 50nm, και επομένως το πάχος του στρώματος του πρέπει να είναι αντίστοιχα μικρό π.χ. να μην ξεπερνά τα 150nm (δηλαδή 0,15μm). Εξάλλου, όπως αναφέρθηκε, το ενεργειακό διάκενο του CdS είναι σχετικά μεγάλο, και έτσι στο στρώμα του η απορρόφηση φωτονίων είναι μικρή. Το αποτέλεσμα είναι ότι η πυκνότητα του παραγομένου φωτορεύματος στα ηλιακά στοιχεία  $Cu_xS/CdS$ , δηλαδή τα ampères του ρεύματος ανά μονάδα επιφάνειας του στοιχείου, είναι μικρή, η μισή περίπου σε σύγκριση με τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου.

Οι παραγόμενες σήμερα ποσότητες ηλιακών στοιχείων  $Cu_xS/CdS$  είναι ακόμη μικρές, αλλά πιστεύεται ότι υπάρχουν σημαντικές μελλοντικές προοπτικές διότι μπορούν να κατασκευασθούν από σχετικά φτηνά υλικά και με απλές μεθόδους. Το σχήμα 27. δείχνει μία τέτοια διάταξη, με κόστος υλικών περίπου 1.000 δρχ. ανά  $m^2$ , που είναι πραγματικά ασήμαντο σε σύγκριση με τα ηλιακά στοιχεία κρυσταλλ

ικού  
πυριτίου.



**Σχήμα 27.** Διαστάσεις και κόστος των συστατικών ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου  $Cu_xS/CdS$ . Η σχάρα του εμπρός ηλεκτροδίου είναι από επτιχαλκωμένο χρυσό. Το πίσω ηλεκτρόδιο είναι από άργυρο. Το εμπρός γυαλί και ηλεκτρόδιο δείχνονται μετατοπισμένα για να γίνει εμφανέστερη η δομή του στοιχείου.

Τα ηλιακά στοιχεία  $Cu_xS/CdS$  έχουν αρκετά ικανοποιητική απόδοση, περίπου 10%, αλλά υπάρχουν κάποιες επιφυλάξεις για τη σταθερότητα τους, ιδίως στην επίδραση της υγρασίας. Δεν πιστεύεται δηλαδή ότι εξασφαλίζουν την πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής (πάνω από 20 χρόνια) που αναμένεται για τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου.

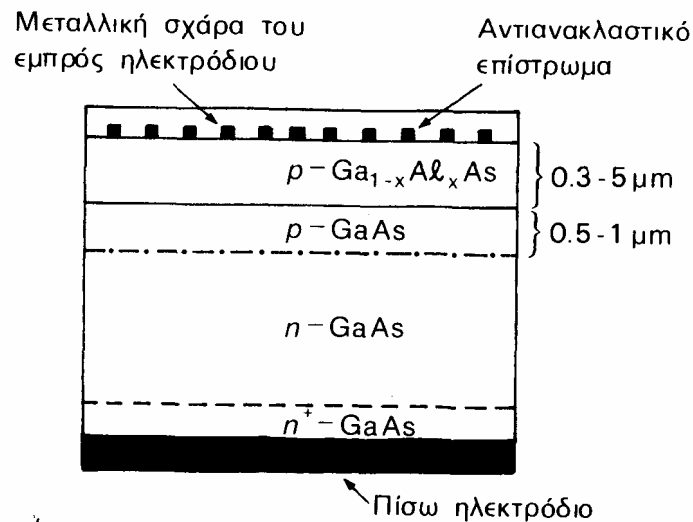
### ***Ηλιακά Στοιχεία Αρσενικούχου Γαλλίου***

Το αρσενικούχο γάλλιο ( $GaAs$ ) είναι ένας ημιαγωγός με ενεργειακό διάκενο 1,43 eV. Όπως δείχτηκε στο σχήμα 23, η τιμή αυτή είναι στη βέλτιστη περιοχή για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, με θεωρητική απόδοση περίπου 25%. Επιπλέον, το ενεργειακό διάκενο είναι άμεσο. Επομένως το  $GaAs$  συνδυάζει καταρχήν ιδανικά τις προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθεί ως υλικό κατασκευής ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η ερευνητική προσπάθεια που έχει αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία είναι έντονη και πιστεύεται ότι σύντομα το αρσενικούχο γάλλιο θα βρει σημαντικές εφαρμογές, κυρίως στα ηλιακά στοιχεία συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, αν και το κόστος του είναι μεγαλύτερο από το πυρίτιο, περίπου πενταπλάσιο. Στα συγκεντρωτικά όμως φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ανά μονάδα επιφανείας ηλιακού στοιχείου είναι αρκετά μεγάλη, αφού δέχονται αυξημένη πυκνότητα ακτινοβολίας, και επομένως δεν έχει πολύ μεγάλη σημασία το κόστος του ηλιακού στοιχείου.

Το σχετικά μεγάλο ενεργειακό διάκενο του  $GaAs$  έχει σαν αποτέλεσμα την καλή του συμπεριφορά στις κάπως υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό είναι μια ιδιότητα με ιδιαίτερη επίσης σπουδαιότητα για τα συγκεντρωτικά συστήματα, όπου τα ηλιακά στοιχεία συχνά υπερθερμαίνονται από την ισχυρή ακτινοβολία που δέχονται. Συγκεκριμένα, η απόδοση των ηλιακών στοιχείων  $GaAs$  πέφτει στο μισό, σε σύγκριση με την απόδοση τους στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, όταν θερμανθούν στους 200° C. Η αντίστοιχη μείωση στα ηλιακά

στοιχεία Si παρατηρείται ήδη στους 120°C, ενώ για τα περισσότερο ευαίσθητα στοιχεία CdS στους 80° C.

Τις μεγαλύτερες αποδόσεις, από τα ηλιακά στοιχεία GaAs, έχουν δώσει τα στοιχεία ετεροενώσεων με ημιαγώγιμα κράματα του συστήματος  $Ga_{1-x}Al_xAs$ , όπου το x παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 (Σχήμα 28.). Σε πειραματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία της μορφής αυτής μετρήθηκαν αποδόσεις περίπου 24% που είναι πολύ



κοντά στο θεωρητικό τους μέγιστο (26-27%).

**Σχήμα 28.** Σχηματική απεικόνιση ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ . Χαρακτηρίζεται συνήθως ως στοιχείο ετεροένωσης, στην πραγματικότητα όμως πρόκειται για ομοένωση p-GaAs/n-GaAs, αφού και τα δύο τμήματα της ένωσης είναι από GaAs, με ετεροδομή  $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$  στο τμήμα p.

Εκτός από το GaAs, εξετάζονται και άλλες ημιαγώγιμες χημικές ενώσεις του τύπου III-V, δηλαδή χημικές ενώσεις τρισθενών και πεντασθενών ατόμων, ως υποψήφια υλικά κατασκευής ηλιακών στοιχείων. Πολύ ενδιαφέρον από την άποψη αυτή είναι το φωσφορούχο ίνδιο (InP). Έχει άμεσο ενεργειακό διάκενο 1,35eV, δηλαδή, όπως και στο GaAs, υπάρχει μικρή μόνον απόκλιση ως προς τη βέλτιστη τιμή του ενεργειακού διακένου. Η απόκλιση όμως αυτή δεν έχει μεγάλη σημασία για επίγειες φωτοβολταϊκές εφαρμογές, διότι έτσι και αλλιώς στην ενδιάμεση περιοχή (γύρω από το 0,91 -0,92μm) το σύνολο σχεδόν των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από την ατμοσφαιρική υγρασία και δεν φτάνει μέχρι την επιφάνεια του στοιχείου.

Επίσης, το InP έχει πολύ καλή προσαρμογή διαστάσεων στο κρυσταλλικό πλέγμα με το CdS, και πιστεύεται ότι μπορεί να υποκαταστήσει με επιτυχία τον θειούχο χαλκό στο στοιχείο ετεροένωσης  $Cu_x S/CdS$ . Ερευνητικά, έχουν ήδη κατασκευαστεί ηλιακά στοιχεία ετεροένωσης InP/CdS, μονοκρυσταλλικής δομής, με απόδοση 15% σε συνθήκες AM1, ενώ όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η απόδοση των στοιχείων  $Cu_xS/CdS$  φτάνει σήμερα μέχρι μόνον 10%, περίπου.

### **Συνδυασμένες Διατάξεις Ηλιακών Στοιχείων**

Όπως αναφέρθηκε από την αρχή, ένα βασικό μειονέκτημα της ηλιακής ακτινοβολίας, ως ενεργειακής πηγής, είναι η μικρή πυκνότητα της ισχύος της, που έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγάλες επιφάνειες από δαπανηρά ηλιακά στοιχεία για την παραγωγή μιας αξιόλογης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας. Μία μέθοδος για τη μερική αντιμετώπιση του προβλήματος, με αναπόφευκτη όμως αύξηση της πολυπλοκότητας της φωτοβολταϊκής διάταξης, είναι π.χ. η τοποθέτηση των ηλιακών στοιχείων σε κινητά πλαίσια που περιστρέφονται και παρακολουθούν συνεχώς την πορεία του ήλιου, ώστε να δέχονται κάθετα (και επομένως στην πυκνότερη μορφή της), τη δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας. Ριζικότερη λύση είναι η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα, και η εστίαση της πάνω στα ηλιακά στοιχεία. Στην περίπτωση αυτή, ιδίως εάν η συγκέντρωση είναι αρκετά μεγάλη, π.χ. περισσότερο από 10 ήλιους, μπορεί να απαιτείται τεχνητή ψύξη των ηλιακών στοιχείων, διότι όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αύξηση της θερμοκρασίας τους συνεπάγεται ανάλογη μείωση της απόδοσης τους. Πάντως, υπάρχει δυνατότητα να χρησιμοποιείται η απαγόμενη θερμότητα π.χ. για θέρμανση νερού ή χώρων ή σε βιομηχανικές εφαρμογές, και έτσι να γίνεται πληρέστερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Υπολογίζεται ότι  $\mu^1$  αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η παράλληλη μετατροπή του 10% της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και άλλου 40% σε χρήσιμη θερμική ενέργεια.

Μία άλλη πρόταση, ισπανικής επινοήσεως, είναι η υποδοχή της ακτινοβολίας και στις δύο όψεις του ηλιακού στοιχείου, έχοντας διαμορφώσει και τα δύο ηλεκτρόδια του σε σχήμα σχάρας. Η εμπρός όψη του στοιχείου αντικρύζει κατευθείαν τον ήλιο, ενώ η πίσω όψη του δέχεται το φως που ανακλάται σε

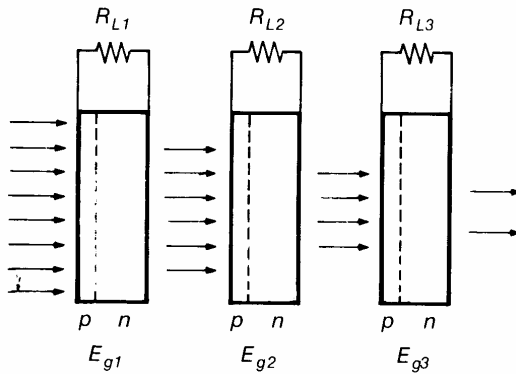
κάτοπτρο ή συνηθέστερα, που διαχέεται σε μία λευκή επιφάνεια κάτω από τη διάταξη. Σε ηλιακά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου δύο όψεων τύπου  $n^+ / p / p^+$  ή  $p^+ / n / n^+$ , μετρήθηκε ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι περίπου 50% μεγαλύτερη, σε σύγκριση με όμοια στοιχεία μιας όψης. Σε ένα φωτοβολταϊκό σταθμό κοντά στη Μαδρίτη λειτουργεί με επιτυχία από το 1985 μία διάταξη στοιχείων δύο όψεων συνολικής ισχύος 40kW<sub>p</sub>.

Είδαμε παραπάνω ότι η μέγιστη θεωρητική απόδοση ενός ηλιακού στοιχείου, κατασκευασμένου από ημιαγωγό με το βέλτιστο ενεργειακό διάκενο, δεν μπορεί να ξεπεράσει το 25% περίπου, ένα όριο που επιβάλλεται αναγκαστικά από την αντιστοιχία ανάμεσα στην ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας και στο ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Ο βαθμός της φωτοβολταϊκής αξιοποίησης όμως, της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη συνδυασμένη χρησιμοποίηση ηλιακών στοιχείων διαφορετικών ενεργειακών διακένων. Ο ένας τρόπος είναι να αναλύεται η ηλιακή ακτινοβολία με την βοήθεια πρισμάτων ή φίλτρων, και στη συνέχεια οι χωριστές φασματικές δέσμες να κατευθύνονται σε διαφορετικά φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευασμένα από ημιαγωγούς με το κατάλληλο ενεργειακό διάκενο για την κάθε δέσμη. Σε μία πειραματική διάταξη, η συγκεντρωμένη ακτινοβολία 165 ήλιων αναλύθηκε σε δύο δέσμες με ενέργειες φωτονίων κάτω και πάνω από 1,7eV, που κατευθύνθηκαν αντίστοιχα σε ένα στοιχείο πυριτίου ( $E_g = 1,1 \text{ eV}$ ) και σε ένα στοιχείο ετεροένωσης AlAs/GaAs ( $E_g = 1,7\text{eV}$ ). Η θεωρητική απόδοση της διάταξης υπολογίστηκε 31% και μετρήθηκε πειραματικά 28,5%. Από το ποσοστό αυτό, το 11% οφείλεται στο στοιχείο Si και το υπόλοιπο 17,4% στο στοιχείο της ετεροένωσης.

Ο άλλος τρόπος είναι η τοποθέτηση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων στη σειρά, το ένα πίσω από το άλλο, με βαθμιαία μειούμενο ενεργειακό διάκενο (Σχήμα 29.). Τα σχετικά μικρής ενέργειας φωτόνια, που διέρχονται άθικτα από το ένα στοιχείο, απορροφούνται στα επόμενα στοιχεία, περιορίζοντας τη θερμική μετατροπή στο ελάχιστο. Π.χ. με τη χρησιμοποίηση τριών στοιχείων, ενεργειακού διακένου 1,75 eV, 1,1 eV και 0,7 eV, υπολογίζεται ότι η απόδοση της διάταξης θα φθάσει το 35% σε συνθήκες AMO. Με πολυπλοκότερη διάταξη, π.χ. με τη χρησιμοποίηση 24 διαδοχικών στοιχείων με ενεργειακά διακένα από 0,8eV μέχρι 3,2eV, ανά 0,1 eV, η απόδοση μετατροπής συγκεντρωμένης ακτινοβολίας 1000



ήλιων φτάνει θεωρητικά το 65%. Οι συνδυασμένες αυτές φωτοβολταϊκές διατάξεις, που εκμεταλλεύονται ολόκληρο σχεδόν το χρωματικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, ονομάζονται χαρακτηριστικά «στοιχεία ουράνιου τόξου».



**Σχήμα 29.** Συνδυασμένη διάταξη 3 ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων, κατασκευασμένων από ημιαγωγούς διαφορετικού ενεργειακού διακένου ( $E_{g1} > E_{g2} > E_{g3}$ ), με διαδοχική διέλευση και βαθμιαία απορρόφηση της ακτινοβολίας.

## Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ

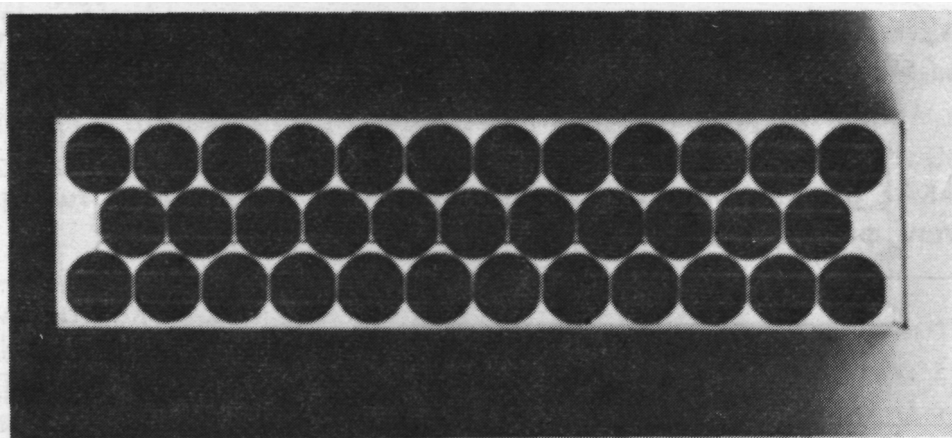
### ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

#### Το Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο

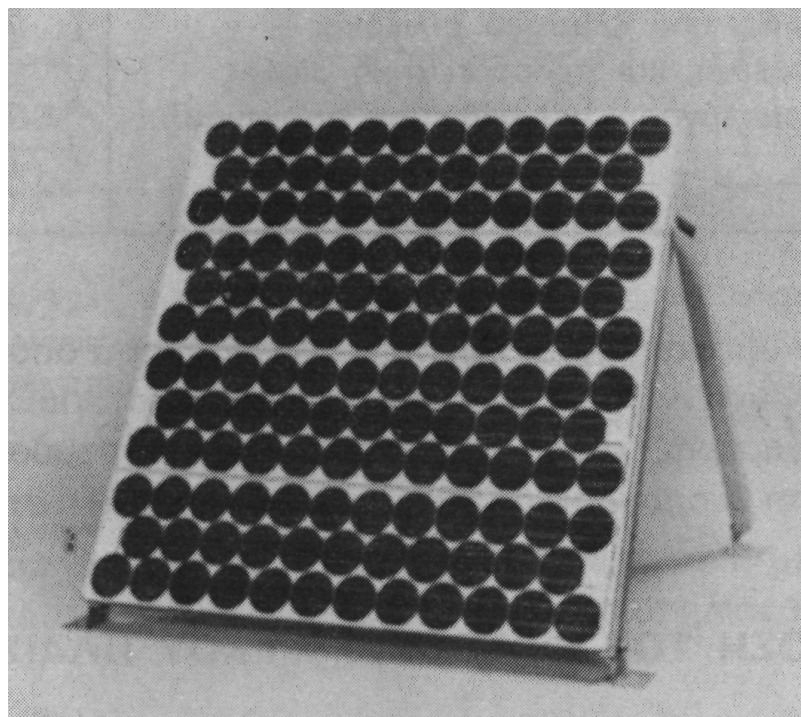
Το βασικό και χαρακτηριστικό συστατικό κάθε φωτοβολταϊκής (φ/β, για συντομογραφία) εγκατάστασης είναι η **φ/β γεννήτρια**, που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα φ/β ηλιακά στοιχεία. Και εδώ, όπως είδαμε ότι συμβαίνει γενικότερα στη φ/β ορολογία, χρησιμοποιούνται και άλλες ονομασίες, όπως ηλιακή μπαταρία, ηλιακή ηλεκτρογεννήτρια κλπ.

Η τάση 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, στο σχήμα 20 είδαμε ότι η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο φ/β στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις μέχρι 0,5 V περίπου και ότι η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μέχρι μόλις 0,4W περίπου. Γι' αυτό, τα φ/β στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση φ/β γεννητριών τοποθετούνται, ανά 10 ως 50 περίπου, σε ενιαίο 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 τάση περίπου 15-20V, που είναι κατάλληλη, αν αφαιρέσουμε τις διάφορες απώλειες, για τη φόρτιση των συνηθισμένων συσσωρευτών μολύβδου (Σχήμα 30). Τα πλαίσια είναι κατασκευασμένα σε 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 τη βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Διαμορφώνεται έτσι το **φ/β πλαίσιο** (module), 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 περιέχουν (πίνακας 9).



(α)



(β)

**Σχήμα 30.**

(α) Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο του εμπορίου, αποτελούμενο από 35 ηλιακά στοιχεία σε σύνδεση στη σειρά. Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά σε συμβατική ακτινοβολία 1000W/m και θερμοκρασία 20°C είναι: Ισχύς αιχμής  $P_a = 40W$  με τάση  $V_m = 17,3V$  και ένταση ρεύματος  $I_m = 2,31 A$ . Επίσης, ανοιχτοκυκλωμένη τάση  $V_{oc} = 21,0V$  και βραχυκυκλωμένη ένταση ρεύματος  $I_{sc} = 2,6A$ . Στη θερμοκρασία 20°C, ο συντελεστής απόδοσης του πλαισίου είναι  $\eta_m = 10,76\%$ . Έχει διαστάσεις 122 cm x 30,5 cm, εμβαδόν επιφάνειας  $S = 0,37 m^2$  περίπου, και βάρος 5,7 kg.

(β) Τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια, που είναι ενωμένα σε κοινή συσκευασία και σχηματίζουν ένα φωτοβολταϊκό πάνελ ισχύος αιχμής 160 W και διαστάσεων 122 cm x 122 cm.

Τα φ/β πλαίσια του εμπορίου δεν έχουν τυποποιημένες διαστάσεις και ισχείς. Σε συμβατικές συνθήκες αιχμής έχουν συνήθως, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή, τάση εξόδου από περίπου 4V μέχρι 22 V, και ένταση ρεύματος από περίπου 0,5 A μέχρι 2,5 A. 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 στεγανότητα τους.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 9** Παράδειγμα της διαμόρφωσης του κόστους των συνηθισμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων του εμπορίου.

<i>Υλικά και εργασίες</i>	<i>Κόστος ανά μονάδα επιφάνειας του φ/β πλαισίου</i>
Ηλιακά στοιχεία	40000 δρχ/m <sup>2</sup>
Εμπρός φύλλο από γυαλί	1000 δρχ/m <sup>2</sup>
Πλαστικό συγκολλητικό φύλλο του γυαλιού	700 δρχ/m <sup>2</sup>
Πλάτη και περιμετρική ταινία από αλουμίνιο	2000 δρχ/m <sup>2</sup>
Στεγανωτική ταινία από ελαστικό σιλικόνης	800 δρχ/m <sup>2</sup>
Ηλεκτρικές συνδέσεις και προστατευτική δίοδος	500 δρχ/m <sup>2</sup>
Εργατικά συναρμολόγησης, ελέγχου και συσκευασίας	5000 δρχ/m <sup>2</sup>
Σύνολο	50.000 δρχ/m <sup>2</sup>

## Η Απόδοση του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Το κάθε φ/β πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (απόδοση, τάση, ισχύ κλπ.), που προφανώς διαμορφώνονται από τα αντίστοιχα μεγέθη των χωριστών ηλιακών στοιχείων που περιέχει. Επομένως, όμοια με τη σχέση (17), ο συντελεστής απόδοσης του φ/β πλαισίου ( $\eta_{\pi}$ ) εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φ/β πλαίσιο ( $P_{\pi}$ ), προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του  $S$ . Προφανώς, την ίδια τιμή θα έχει και ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ενέργειας  $E$  που παράγει το φ/β πλαίσιο επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται επί το ίδιο χρονικό διάστημα. Δηλαδή:

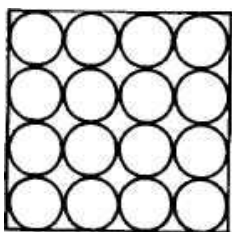
$$n_{\pi} = \frac{P_{\pi}(W)}{H(W/m^2) \times S(m^2)} = \frac{E(kWh)}{\Pi(kWh/m^2) \times S(m^2)} \quad (22)$$

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

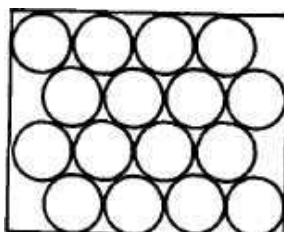
Η τιμή του  $\eta_{\pi}$  είναι φανερό ότι εξαρτάται όχι μόνον από τη μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων ( $\eta$ ), αλλά και από τον *συντελεστή κάλυψης* του πλαισίου ( $\sigma_{\kappa}$ ), που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του φ/β πλαισίου. Βρίσκουμε εύκολα ότι θα ισχύει Π σχέση:

$$n_{\pi} = n \times \sigma_{\kappa} \quad (23)$$

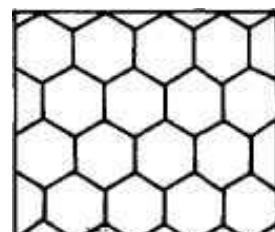
Η τιμή του  $\sigma_{\kappa}$  εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο φ/β πλαίσιο. Συνήθως κυμαίνεται από περίπου 0,78, για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλες στοιχισμένες σειρές, και φτάνει μέχρι σχεδόν 1,00 (πρακτικά μέχρι 0,98), για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία (Σχήμα 31).



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 31.** Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των ηλιακών στοιχείων στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης είναι περίπου 0,78 για την περίπτωση (α), **0,88** για την περίπτωση (β), και 0,98 για τα εξαγωνικά στοιχεία της περίπτωσης (γ).

### ***Η επίδραση της Θερμοκρασίας και της Ρύπανσης***

Όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η απόδοση των φ/β στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Όμως, ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα φ/β πλαίσια αντιστοιχεί σε μια συμβατική θερμοκρασία, συνήθως 20° C, που συχνά, ιδίως στους θερινούς μήνες, διαφέρει αξιόλογα από την πραγματική θερμοκρασία του στοιχείου. Έχει μετρηθεί ότι αφενός, και κυρίως, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα ηλιακά στοιχεία αποκτούν κατά τη λειτουργία τους θερμοκρασία - μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος κατά 25 ως 30° C, ανάλογα και με την ταχύτητα του ανέμου. Ως μέσο όρο, στους υπολογισμούς μας, παίρνουμε συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας κατά 30° C.

Είδαμε επίσης ότι για τη διόρθωση του παραπάνω σφάλματος χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής  $\sigma_{\theta}$  με τον οποίο πολλαπλασιάζουμε τον συντελεστή απόδοσης των ηλιακών στοιχείων. Το ίδιο εφαρμόζουμε και για τα φ/β πλαίσια. Δηλαδή, για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική, ως συντελεστή απόδοσης των φ/β πλαισίων παίρνουμε το γινόμενο  $\eta_{\pi} \times \sigma_{\theta}$ .

Στο ίδιο κεφάλαιο αναφέρθηκε ότι στη συμβατική θερμοκρασία ο  $\sigma_{\theta}$  είναι ίσος με τη μονάδα, και για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή. Π.χ. στην Αθήνα, τον μήνα Ιούλιο, που έχουμε μέση θερμοκρασία του αέρα, στις φωτεινές ώρες της ημέρας, σχεδόν 30°C, η μέση θερμοκρασία των ηλιακών στοιχείων του φ/β πλαισίου θα είναι περίπου 60°C και επομένως η τιμή του

συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης του φ/β πλαισίου θα είναι περίπου:

$$\sigma_{\theta} = 1,00 - (60 - 20) \times 0,005 = 0,8$$

Την ίδια περίπου τιμή βρίσκουμε και αν χρησιμοποιήσουμε το λογαριθμικό διάγραμμα του σχήματος 4.7.

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των φ/β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας τους από την επικάθηση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φ/β πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να τη ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των φ/β πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° (κάθετοι) για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη.

Όταν η φ/β γεννήτρια βρίσκεται σε μια περιοχή όπου εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φ/β πλαίσια, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου **συντελεστή καθαρότητας** ( $\sigma_{\rho}$ ), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο φ/β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που παράγει όταν η επιφάνεια του είναι εντελώς καθαρή. Η τιμή του  $\sigma_{\rho}$  είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του φ/β πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κλπ. Έτσι, όποτε είναι απαραίτητο, ως συντελεστή απόδοσης των φ/β πλαισίων για τους υπολογισμούς μας, παίρνουμε το γινόμενο του ενδεικτικού συντελεστή απόδοσης  $\eta_{\pi}$  που δίνεται για συμβατική θερμοκρασία και καθαρή επιφάνεια, επί τους συντελεστές διόρθωσης για τη θερμοκρασία  $\sigma_{\theta}$  και για τη ρύπανση  $\sigma_{\rho}$ .

Δηλαδή, η σχέση (23) παίρνει τη γενικότερη μορφή:

$$E = \Pi \times S \times n_{\pi} \times \sigma_{\theta} \times \sigma_{\rho} \quad (24)$$

Για παράδειγμα ας πάρουμε ένα φ/β πλαίσιο του εμπορίου, όπως του σχήματος 6.1, με επιφάνεια διαστάσεων  $S = 121,9\text{cm} \times 30,5\text{cm} = 0,37 \text{ m}^2$ , με ενδεικτικό συντελεστή απόδοσης  $\eta_p = 10,76\%$ , τοποθετημένο στην Αθήνα με κλίση  $20^\circ$ , και ας υποθέσουμε ότι η ρύπανση της επιφανείας του είναι ασήμαντη, δηλαδή  $\sigma_p = 1,00$ . Η μέση ηλεκτρική ενέργεια  $E$  που θα παράγει το φ/β πλαίσιο σε μια ημέρα π.χ. του Ιουλίου, που αντιστοιχεί μέση ηλιακή ακτινοβολία  $\Gamma = 6,70\text{kWh/m}^2 \cdot \text{d}$ , και μέση θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος  $30^\circ\text{C}$ , θα είναι, σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$\begin{aligned} E &= \Pi \times S \times n_p \times \sigma_\theta \times \sigma_p \\ &= 6,70 \times 0,37 + \frac{10,76}{100} \times 0,80 \times 1,00 = 0,20 \text{ kWh/d} \end{aligned}$$

## Η Ισχύς Αιχμής του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου

Συχνά, δεν είναι διαθέσιμα όλα τα λεπτομερειακά κατασκευαστικά δεδομένα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φ/β πλαισίων (διαστάσεις, συντελεστής κάλυψης, συντελεστής απόδοσης των ηλιακών στοιχείων κλπ.), αλλά δίνεται μόνο μια ενδεικτική **ισχύς αιχμής** ( $P_a$ ), που αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το φ/β πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 ηλίου, δηλαδή  $1 \text{ kW/m}^2$ .

Οι μονάδες ισχύος, που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός φ/β πλαισίου, μιας ολόκληρης φ/β εγκατάστασης ή και ενός ηλιακού στοιχείου, ονομάζονται συχνά βατ αιχμής ( $W_p$ , peak watts) και κιλοβάτ αιχμής ( $\text{kW}_p$ ). Δηλαδή, χρησιμοποιείται ο ίδιος όρος και συμβολισμός (άλλωστε ουσιαστικά είναι το ίδιο πράγμα), όπως για το μέτρο της επιφάνειας των φ/β στοιχείων που γνωρίσαμε προηγουμένως.

Από τη σχέση (6.1) είναι φανερό ότι:

$$P_a(\text{kW}_p) = 1(\text{kW/m}^2) \times S(\text{m}^2) \times \eta_p \quad (25)$$

και, επομένως, βρίσκουμε εύκολα ότι σωστά ο κατασκευαστής του φ/β πλαισίου του παραδείγματος μας το χαρακτηρίζει με ισχύ αιχμής  $40 W_p$ , κάνοντας και ένα ανεκτό στρογγύλεμα προς τα πάνω, για προφανείς εμπορικούς λόγους.

Στην περίπτωση, λοιπόν, που γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής  $P_a$ , για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του φ/β πλαισίου, αντί για την παραπάνω σχέση (6.3) χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη σχέση:

$$E(kWh/d) = \Pi(kWh/m^2 \cdot d) \times \frac{P_a(kW_p)}{1(kW/m^2)} \times \sigma_\theta \times \sigma_\rho \quad (26)$$

Πάντως, ανακεφαλαιώνοντας, μπορούμε να πούμε ότι για να έχουμε την πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς ενός φ/β πλαισίου, χρειάζονται οι τιμές των παρακάτω 9 τεχνικών χαρακτηριστικών του, όπως περίπου είχαμε δει και για τα ηλιακά στοιχεία:

1. Ισχύς αιχμής ( $P_a$ ), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
2. Ανοιχτοκυκλωμένη τάση ( $V_{oc}$ ), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
3. Βραχυκυκλωμένη ένταση ρεύματος ( $I_{sc}$ ), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
4. Τάση ( $V_m$ ), στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
5. Ένταση ρεύματος ( $I_m$ ), στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
6. Συντελεστής πλήρωσης ( $FF$ ), που ορίζεται ως ο λόγος του γινομένου  $V_m \times I_m$  προς το γινόμενο  $V_{oc} \times I_{sc}$ .
7. Συντελεστής απόδοσης ( $\eta_p$ ), σε συμβατική θερμοκρασία και συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης ( $\sigma_\theta$ ).
8. Συντελεστής κάλυψης ( $\sigma_k$ ).
9. Διηλεκτρική αντοχή, δηλαδή η ελάχιστη τάση που προκαλεί ηλεκτρική διάσπαση ανάμεσα στα ηλιακά στοιχεία και στο μεταλλικό περίβλημα του φ/β πλαισίου.

### **Φωτοβολταϊκά Πανέλα και Συστοιχίες**

Συνώνυμο σχεδόν με το φ/β πλαίσιο είναι το **φ/β πανέλο** (panel). Όπως και το πλαίσιο, έχει επίσης συναρμολογηθεί και προκατασκευαστεί στο εργοστάσιο και είναι έτοιμο για τοποθέτηση στη φ/β εγκατάσταση, αλλά με τη διαφορά ότι ένα πανέλο 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 πανέλου είναι τόσος, ώστε οι διαστάσεις και το βάρος του να μην είναι εμπόδιο για τη μεταφορά και την τοποθέτηση του στη φ/β εγκατάσταση. Π.χ. το πανέλο του σχήματος 6.1 αποτελείται από 4 φ/β πλαίσια και έχει συνολικές διαστάσεις 122 cm χ 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 πανέλα ή ανάμεσα στα γειτονικά πλαίσια και πανέλα, να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες. Έτσι, αν ένα φ/β στοιχείο σκιαστεί (π.χ. από ένα περαστικό πουλί ή από τις ακαθαρσίες που μπορεί να αφήσει) ή αν πάθει βλάβη (π.χ. μια διακοπή στους ηλεκτρικούς αγωγούς) δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το σύστημα, όπως θα συνέβαινε αν όλα τα φ/β στοιχεία ήταν σέ σύνδεση στη σειρά.

Η φ/β γεννήτρια μιας μικρής φ/β εγκατάστασης μπορεί να αποτελείται από 1 μόνο πλαίσιο ή πανέλο. Σε μεγαλύτερες όμως εγκαταστάσεις, ομάδες περισσότερων φ/β πλαισίων (ή πανέλων), 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 η 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



\* Η  
της

20kW<sub>p</sub>, πολλές φ/β συστοιχίες σχηματίζουν ένα **υποσυγκρότημα συστοιχιών** (array 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 (Σχήμα 32).

**Σχήμα 32.** Παράδειγμα τοποθέτησης μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας στη στέγη ενός σπιτιού με κλίση 32° και προσανατολισμό προς τον Νότο. Αποτελείται από 56 φωτοβολταϊκά πλαίσια κατανεμημένα σε 8 πάνελ των 7 πλαισίων, με συνολική ισχύ αιχμής 2,24 kW<sub>p</sub>. Το καλοκαίρι, η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση της φωτογραφίας έχει μηνιαία ηλεκτρική παραγωγή περίπου 260 kWh, που συνήθως επαρκεί για την κατανάλωση μιας μέσης οικογένειας.

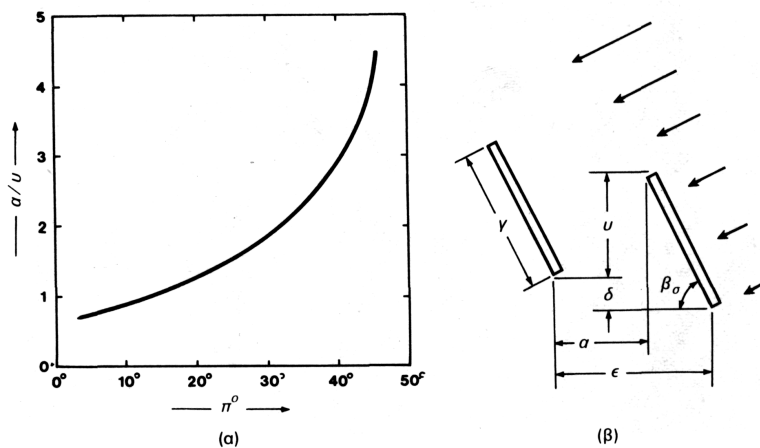
Βλέπουμε ότι κάθε φ/β εγκατάσταση έχει σπονδυλωτή συγκρότηση από φ/β πλαίσια, πανέλα ή συστοιχίες, που το πλήθος τους (και η συνολική επιφάνειά τους) καθορίζεται από την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που επιδιώκεται να παραχθεί. Η δομή αυτή επιτρέπει την εύκολη επέκταση των φ/β εγκαταστάσεων, με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

Η τοποθέτηση των φ/β πλαισίων και των φ/β πανέλων, μόνων τους ή σε συστοιχίες, γίνεται σε στέγες κτιρίων, σε στύλους και ικριώματα, σε γήπεδα και πλαγιές λόφων ή σε άλλους ελεύθερους χώρους, με τρόπο που να μη σκιάζονται από τα γύρω δέντρα, κτίρια, βουνά κλπ. Κάθε φ/β πλαίσιο πρέπει να έχει **ανοικτό ορίζοντα**. Σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $\pi^\circ$ , η προϋπόθεση του ανοικτού ορίζοντα θεωρείται ότι εξασφαλίζεται όταν η γωνία του ύψους  $\psi_\epsilon$  των γειτονικών συστοιχιών, δέντρων, κτιρίων ή άλλων εμποδίων, ικανοποιεί μέσα σε μια αζιμούθια γωνία από  $-60^\circ$  μέχρι  $+60^\circ$  προς το Νότο, τη σχέση:

$$\beta_\epsilon \leq 48^\circ - \pi^\circ \quad (27)$$

Π.χ. στην Αθήνα, που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος  $38^\circ$ , η γωνία του ύψους των διαφόρων εμποδίων δεν πρέπει να ξεπερνά τις  $10^\circ$ .

Ειδικότερα, το διάγραμμα του σχήματος 33 μας βοηθά στον προσδιορισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των ηλιακών συλλεκτών στις φ/β συστοιχίες, ώστε η μία σειρά να μη σκιάζει αισθητά την επόμενη.



**Σχήμα 33.** α) 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  $\pi^\circ$ , 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  $\beta_\alpha$  για τη διάταξη των ηλιακών συλλεκτών στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Το διάγραμμα είναι εμπειρικό και προέρχεται από την έκδοση «Stand -alon» Photovoltaic Systems» της εταιρίας Monegon (1980).

Συγκεκριμένα, το διάγραμμα δίνει, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του λόγου της ελεύθερης απόστασης ανάμεσα στις

δύο σειρές ( $a$ ) προς την επικάλυψη του ύψους της κατασκευής στήριξης του συλλέκτη ( $u$ ). Αν  $\gamma$  είναι το πλάτος του στηρίγματος (που συμπίπτει με το πλάτος του συλλέκτη, δηλαδή του φ/β πλαισίου ή του πανέλου),  $\beta_\sigma$  είναι η κλίση του, και  $\delta$  είναι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα των δύο σειρών, τότε το  $u$  δίνεται προφανώς από τη σχέση:

$$u = \gamma \eta \mu \beta_\sigma - \delta \quad (28)$$

Στη συνέχεια, βρίσκουμε με τη βοήθεια του διαγράμματος την αντίστοιχη τιμή του  $\sigma$ , και από τη σχέση:

$$\varepsilon = a + \gamma \sigma \nu \beta_\sigma \quad (29)$$

υπολογίζουμε το  $\varepsilon$ , δηλαδή την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση των σειρών.

### **Οι Απώλειες στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα**

Πέρα από τις διάφορες διορθώσεις, που αναφέραμε παραπάνω ότι παίρνουμε συνήθως υπόψη στον υπολογισμό της επιφάνειας των φ/β συλλεκτών (θερμοκρασίας, ρυπαρότητας), πρέπει επίσης να προνοήσουμε για τις μικρές ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φ/β πλαίσια στις φ/β συστοιχίες, καθώς και στις συνδέσεις τους με τα άλλα μέρη του φ/β συστήματος (διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές κλπ.). Πρόσθετες, και μάλιστα σημαντικότερες, απώλειες μπορεί να οφείλονται στη λειτουργία αυτών των άλλων μερών του συστήματος, και κυρίως στη φόρτιση και εκφόρτιση των συσσωρευτών\*.

Εξάλλου, όπως είδαμε, η τιμή του συντελεστή απόδοσης των φ/β πλαισίων που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς, αφορά στις συνθήκες τάσης-έντασης που αντιστοιχούν στη μέγιστη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι όμως πολύ πιθανό, ιδίως όταν το σύστημα δεν έχει αξιόπιστο ρυθμιστή ισχύος, ότι κατά τη λειτουργία του θα υπάρχει μια αξιόλογη απόκλιση από τις ιδανικές αυτές συνθήκες, με αποτέλεσμα την εμφάνιση αντίστοιχης απώλειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

---

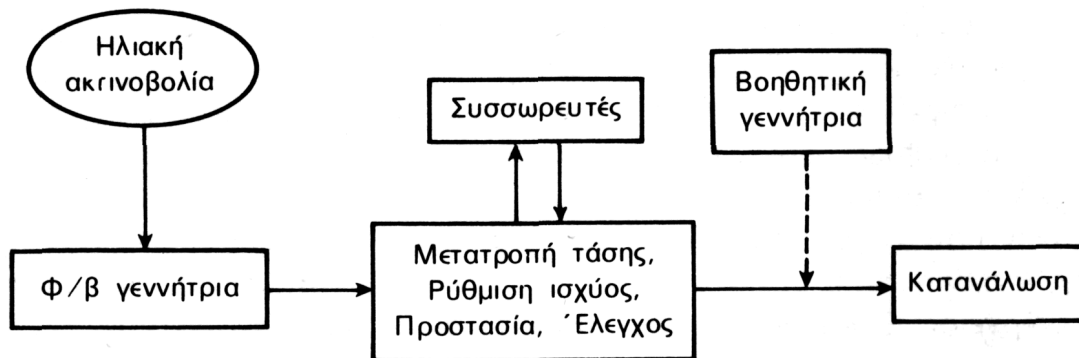
\* Στο τέλος (Διάγραμμα 3) δίνεται ένα ποσοτικό παράδειγμα της παραγωγής, της ροής και των απωλειών της ενέργειας σε μια φ/β εγκατάσταση.

Επομένως, κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φ/β συλλεκτών ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, ανάλογα με την περίπτωση, και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης π.χ. περίπου του 20% ως 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο. Τέλος, λόγω της φθοράς στα φ/β πλαίσια και στα άλλα μέρη του συστήματος, αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μια μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, που συνήθως υπολογίζεται στο 1% ως 2% για κάθε έτος.

## Η Συγκρότηση του Συστήματος

Η συνηθέστερη, αλλά και ίσως η πληρέστερη, εφαρμογή της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η κατασκευή **αυτόνομων φωτοβολταϊκών (φ / β) συστημάτων**. Δηλαδή εγκαταστάσεων που λειτουργούν αυτοδύναμα για την τροφοδότηση καθορισμένων καταναλώσεων, χωρίς να συνδέονται με μεγάλα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, από τα οποία θα μπορούσαν να αντλούν συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια ή να στέλνουν την ενδεχόμενη περίσσεια της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το βασικό συστατικό ενός αυτόνομου φ/β συστήματος, όπως άλλωστε κάθε φ/β εγκατάστασης, είναι η **φ/β γεννήτρια**, στους ηλιακούς συλλέκτες της οποίας γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθως, όπως δείχνει το σχήμα 34, το σύστημα περιλαμβάνει



**Σχήμα 34** Παράδειγμα γενικού διαγράμματος ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

επίσης, ανάλογα με το είδος της κατανάλωσης και τον βαθμό της απαιτούμενης αξιοπιστίας, **συσσωρευτές** για την αποθήκευση της περίσσειας της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανεπαρκής ή ανύπαρκτη, διατάξεις για τη **ρύθμιση** και τη **μετατροπή της τάσης** και τη **ρύθμιση της ισχύος** της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος, άλλες διατάξεις

**προστασίας** και **ελέγχου** και, συχνά, μια **βοηθητική γεννήτρια**, συνήθως ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος που να λειτουργεί με καύση βενζίνης ή πετρελαίου ντήζελ, για την αντιμετώπιση έκτακτων περιστάσεων (συντήρηση ή βλάβη του συστήματος, τροφοδότηση μη πρόσθετων φορτίων, επικουρική λειτουργία σε απρόβλεπτα μεγάλες περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας κλπ.)<sup>\*</sup>.

Ο συμπληρωματικός εξοπλισμός των φ/β συστημάτων, πέρα από τη φ/β γεννήτρια, ονομάζεται συνήθως BOS, από τα αρχικά της αγγλικής έκφρασης balance of the system (υπόλοιπα του συστήματος). Στον πίνακα 10 δείχνεται πώς περίπου συμβάλουν τα διάφορα μέρη που συγκροτούν ένα αυτόνομο φ/β σύστημα, στη

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1 Παράδειγμα της διαμόρφωσης του κόστους ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

<b>Παράγοντας κόστους</b>	<b>Συμβολή στο συνολικό κόστος</b>
φ/β πλαίσια ή πανέλα για τη φ/β γεννήτρια	65%
Στηρίγματα των φ/β συλλεκτών και ηλεκτρικές καλωδιώσεις των φ/β στοιχείων	5%
Συσσωρευτές αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας	15%
Διατάξεις ρυθμίσεων τάσης και ισχύος, μετατροπής τάσης, προστασίας, ελέγχου κλπ.	12%
Βοηθητική γεννήτρια	3%

συνολική διαμόρφωση του κόστους του. Δεν αναγράφονται οι δαπάνες για την αγορά και τη διαμόρφωση της απαιτούμενης εδαφικής έκτασης, και για την οικοδόμηση του κτιρίου τοποθέτησης των συσσωρευτών κλπ., καθώς και τα διάφορα μεταφορικά, εργατικά και χρηματοοικονομικά έξοδα, διότι κυμαίνονται πολύ, ανάλογα με την περίπτωση. Επίσης, δεν αναφέρεται η δαπάνη για την εκτέλεση της μελέτης. Σύμφωνα με τους κανονισμούς που ισχύουν, η αμοιβή για την προμελέτη, με τον προκαταρκτικό σχεδιασμό και την εκτίμηση του κόστους

<sup>\*</sup> Ένα λεπτομερέστερο γενικό διάγραμμα φ/β συστήματος δίνεται στο τέλος (Διάγραμμα 2), καθώς και ένα διάγραμμα ροής της ενέργειας ενός άλλου συστήματος (Διάγραμμα 3), όπου ένα μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας διοχετεύεται στην κατανάλωση, ενώ το υπόλοιπο αποθηκεύεται προηγουμένως σε συσσωρευτές.

της εγκατάστασης, είναι περίπου το 1,75% μέχρι 2,5% της συνολικής δαπάνης, ανάλογα και με το τελικό ύψος της. Ένα πρόσθετο ποσοστό περίπου 2,4% προβλέπεται για την αμοιβή της πλήρους μελέτης και του ελέγχου των προσφορών για την κατασκευή του έργου.

## **Ο Σχεδιασμός του Συστήματος**

Η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός αυτόνομου φ/β συστήματος στοχεύει στον βέλτιστο συσχετισμό των προβλέψεων για τα μεγέθη της ηλεκτρικής ζήτησης από το σύστημα και της ηλιακής ακτινοβολίας που θα δέχονται οι συλλέκτες του. Δηλαδή, επιδιώκεται η αποφυγή των υπερβολικών δαπανών που θα συνεπάγονταν ο υπερσχεδιασμός του συστήματος, π.χ. με συλλέκτες και συσσωρευτές μεγαλύτερου μεγέθους από το απολύτως απαραίτητο.

Για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό\* ενός αυτόνομου φ/β συστήματος απαιτείται, και συνήθως επαρκεί, η ύπαρξη μιας καλής εκτίμησης της ζήτησης που πρέπει να ικανοποιήσει (π.χ. η μέση ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση τους διάφορους μήνες του έτους, οι πιθανές αιχμές ισχύος κλπ.) και μιας αξιόπιστης πληροφόρησης σχετικά με την ένταση και τη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή (π.χ. η μέση ημερήσια ένταση της ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας, τα διαστήματα συνεχούς συννεφιάς κλπ). Ένα παράδειγμα-οδηγός του προκαταρκτικού σχεδιασμού, δίνεται στον πίνακα 11.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 11** Παράδειγμα υποδείγματος των διαδοχικών βημάτων για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

---

\* Στην ελληνική γλώσσα χρησιμοποιούνται περίπου ισότιμα οι όροι **σχεδιασμός** και **μελέτη** για την εργασία που περιγράφουμε (design στα αγγλικά, etude στα γαλλικά). Όμως, αν και τείνει να επικρατήσει ο «σχεδιασμός», δεν είναι ίσως αυτός ο σωστότερος όρος, αφού ο μηχανικός που εκπονεί την αντίστοιχη εργασία ονομάζεται γενικά **μελετητής**.



<ol style="list-style-type: none"><li><b>1.</b> Επιλογή της κρίσιμης χρονικής περιόδου για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.</li><li><b>2.</b> Εκτίμηση της μέσης ηλεκτρικής κατανάλωσης που ζητείται να ικανοποιεί το σύστημα.</li><li><b>3.</b> Υπολογισμός της μέσης διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας στην υπόψη τοποθεσία, στην επιλεγμένη χρονική περίοδο και για την βέλτιστη κλίση των συλλεκτών.</li></ol>
<ol style="list-style-type: none"><li><b>4.</b> Υπολογισμός της απαιτούμενης συνολικής επιφάνειας ή της συνολικής ισχύος αιχμής των φ/β συλλεκτών και εύρεση του αντίστοιχου πλήθους και της κατάλληλης συνδεσμολογίας των τυποποιημένων φ/β πλαισίων ή πανέλων.</li><li><b>5.</b> Καθορισμός των επιθυμητών ημερών αυτοδυναμίας του συστήματος και εύρεση της αντίστοιχης χωρητικότητας των συσσωρευτών αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας για την αντιμετώπιση της ζήτησης στο διάστημα των πιθανών ημερών συνεχούς συννεφιάς.</li><li><b>6.</b> Υπόδειξη των διαφόρων αναγκαίων διατάξεων ρύθμισης και ελέγχου, και της ισχύος της βοηθητικής ενεργειακής πηγής.</li></ol>

Για την πλήρη, όμως οικονομικοτεχνική μελέτη, με λεπτομερειακό σχεδιασμό του συστήματος και συγκριτική αξιολόγηση με άλλες εναλλακτικές ενεργειακές πηγές (δηλαδή, αντί για την εγκατάσταση φ/β γεννήτριας, την επιλογή ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους ή μιας ανεμογεννήτριας ή την τοποθέτηση εναέριας ή υποβρύχιας γραμμής μεταφοράς για τη σύνδεση με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας κλπ.), χρειάζονται πολλά άλλα τεχνικά και οικονομικά δεδομένα. Π.χ. η εκτίμηση για ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις της εγκατάστασης, η απαιτούμενη αξιοπιστία του συστήματος, ο λεπτομερής υπολογισμός των ηλεκτρικών απωλειών, το κόστος των φ/β πλαισίων και πανέλων και οι δαπάνες για την κατασκευή των στηριγμάτων τους στο έδαφος ή πάνω στη στέγη ενός σπιτιού, οι δαπάνες διαμόρφωσης του χώρου και προστασίας των συλλεκτών από ανέμους, χαλάζι, κεραυνούς ή και βανδαλισμούς. Επίσης, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, το μέγεθος και το κόστος των άλλων συστατικών του συστήματος (συσσωρευτές, διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, βοηθητική γεννήτρια) και ο καθορισμός των απαιτούμενων ανταλλακτικών. Για τη συγκριτική αξιολόγηση χρειάζεται το κόστος και η αξιοπιστία των εναλλακτικών

λύσεων, οι δαπάνες συντήρησης των εγκαταστάσεων, το κόστος προμήθειας και μεταφοράς πετρελαίου κλπ.

Εμείς, εδώ, θα ασχοληθούμε κυρίως με τον προκαταρκτικό σχεδιασμό των αυτόνομων φ/β συστημάτων, που μας εισάγει στον προβληματισμό και τη μελέτη των φ/β εγκαταστάσεων και δίνει μια καλή εικόνα των δυνατοτήτων τους.

## **Βασικές Επιλογές και Προϋποθέσεις**

Στον σχεδιασμό ενός αυτόνομου φ/β συστήματος πρέπει να έχουν γίνει από πριν ορισμένες βασικές επιλογές, όπως αν η φ/β γεννήτρια και οι συσσωρευτές θα πρέπει να καλύπτουν πλήρως τις αιχμές της ζήτησης ισχύος, αν θα υπάρχει ιεράρχηση στην ικανοποίηση των καταναλώσεων, αν το ρεύμα που θα παρέχει το σύστημα θα είναι συνεχές ή εναλλασσόμενο και σε ποια τάση κλπ. Κυρίως, θα πρέπει να έχει καθοριστεί η εποχή του έτους, στη ζήτηση της οποίας να ανταποκρίνεται αξιόπιστα το σύστημα\*. Δηλαδή, στο εμβαδόν της επιφάνειας των ηλιακών συλλεκτών και στα μεγέθη των άλλων συστατικών και διατάξεων του συστήματος (κυρίως στη χωρητικότητα των συσσωρευτών) δίνονται τέτοιες τιμές, ώστε σε συνδυασμό με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στη συγκεκριμένη εποχή, να καλύπτονται ικανοποιητικά οι αντίστοιχες ηλεκτρικές καταναλώσεις. Οι αιτίες για αναξιόπιστη συμπεριφορά του συστήματος μπορούν να έχουν φυσική προέλευση, όπως π.χ. το υπερβολικό πλήθος διαδοχικών συνεφιασμένων ημερών και η προσβολή της φ/β γεννήτριας από κεραυνό, ή να οφείλονται σε κακό σχεδιασμό, που π.χ. μπορεί να στηρίχτηκε σε εσφαλμένα μετεωρολογικά δεδομένα, κακή εκτίμηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης κλπ.

Στην περίπτωση, που το σύστημα σχεδιάζεται για να λειτουργεί ολόκληρη τη διάρκεια του έτους, τα μεγέθη των συλλεκτών και των άλλων συστατικών και διατάξεων προσαρμόζονται στις συνθήκες του μήνα με τη μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία (Δεκέμβριος ή Ιανουάριος) και ακολουθεί διερεύνηση για τον έλεγχο

---

\* Η αξιόπιστία ενός συστήματος μετράται με την πιθανότητα να λειτουργεί χωρίς προβλήματα επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Π.χ. στα μεγάλα ηλεκτρικά δίκτυα είναι συνήθως αποδεκτή η πιθανότητα να παρουσιάζουν αδυναμία τροφοδότησης της κατανάλωσης, για διάφορες αιτίες, επί 1 ή 2 ημέρες σε διάστημα 10 ετών.

της επάρκειας τους στους υπόλοιπους μήνες του έτους. Π.χ. αν πρόκειται να τροφοδοτηθεί μια κατοικία, θα πρέπει να εξεταστεί αν η αυξημένη φωτοβολταϊκή ηλεκτρική παραγωγή το καλοκαίρι, λόγω της ισχυρότερης ηλιακής ακτινοβολίας, καλύπτει την ενδεχομένως αυξημένη κατανάλωση, λόγω της συχνότερης λειτουργίας του ηλεκτρικού ψυγείου ή της πρόσθετης λειτουργίας ενός κλιματιστικού μηχανήματος.

Η εγκατάσταση των αυτόνομων φ/β συστημάτων γίνεται συνήθως σε απομονωμένες περιοχές, που δεν υπάρχει ιδιαίτερα ειδικευμένο τεχνικό προσωπικό για να τα λειτουργήσει και να τα συντηρήσει, ούτε εύκολη πρόσβαση σε οργανωμένα επισκευαστικά κέντρα με αποθέματα ανταλλακτικών, εξειδικευμένα μηχανουργεία κλπ., για την αντιμετώπιση ενδεχομένων βλαβών. Επομένως, στο σχεδιασμό πρέπει να έχει ληφθεί μέριμνα ώστε η λειτουργία των συστημάτων να είναι απλή ή εντελώς αυτοματοποιημένη και επίσης να έχουν εξασφαλιστεί τουλάχιστον οι παρακάτω προϋποθέσεις για την ελαχιστοποίηση του χρόνου μέχρι την επισκευή μιας βλάβης και την αποκατάσταση της καλής λειτουργίας του συστήματος.

1. Εύκολος εντοπισμός της αιτίας της ελαττωματικής λειτουργίας και του σημείου που έχει εκδηλωθεί η βλάβη.
2. Εύκολη και ασφαλής πρόσβαση στις θέσεις που πρέπει να γίνει επέμβαση για την επισκευή.
3. Τα ανταλλακτικά να είναι σε σχετικά μικρές διαστάσεις και βάρη (π.χ. μέχρι 40 kg), ώστε να μπορούν να μεταφερθούν και να τοποθετηθούν από έναν άνθρωπο, χωρίς άλλα τεχνικά μέσα.
4. Τα διάφορα εξαρτήματα να είναι τυποποιημένων μεγεθών, ώστε να βρίσκονται εύκολα στην αγορά.

## **Η ζήτηση: Οι Ηλεκτρικές Καταναλώσεις**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο σχεδιασμός ξεκινά με την εκτίμηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων του συστήματος. Ένα αυτόνομο φ/β σύστημα μπορεί να τροφοδοτεί μία μόνο κατανάλωση ή περισσότερες. Παραδείγματα της πρώτης περίπτωσης είναι ένας φάρος ή ένας τηλεπικοινωνιακός αναμεταδότης. Της δεύτερης, μια κατοικία ή ένας ολόκληρος οικισμός.

Ύστερα από προσεκτική έρευνα, απαριθμούνται οι διάφορες ενδεχόμενες χρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας και καταγράφονται όλες οι ηλεκτρικές συσκευές, η ισχύς τους και ο πιθανός χρόνος της λειτουργίας τους στη διάρκεια ενός 24ώρου (Πίνακας 12)\*. Επίσης, συχνά είναι χρήσιμο να καταγράφεται η πιθανότητα της ταυτόχρονης λειτουργίας περισσότερων συσκευών, ώστε να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι σκόπιμο να γίνεται προγραμματισμένη κατανομή και ιεράρχηση της ζήτησης από τις διάφορες συσκευές, για την αποφυγή υπερβολικών αιχμών.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 12.** Παράδειγμα των ημερήσιων ηλεκτρικών καταναλώσεων σε μια κατοικία με μία οικογένεια.

<i>Συσκευή</i>	<i>Ισχύς</i>	<i>Ωρες λειτουργίας</i>	<i>Ηλεκτρική κατανάλωση</i>
φώτα	1,0 kW	3,0 h	3,0 kWh
Ψυγείο	0,3 kW	9,0 h	2,7 kWh
Τηλεόραση	0,2 kW	4,0 h	0,8 kWh
Ηλεκτρική σκούπα	0,6 kW	0,5 h	0,3 kWh
Στεγνωτήρας μαλλιών	0,4 kW	0,5 h	0,2 kWh
φρυγανιέρα	1,5 kW	0,2 h	0,3 kWh
Πλυντήριο ρούχων	3,5 kW	0,2 h	0,7 kWh
	7,5 kW		8,0 kWh
Σύνολο			

Πάντως, η πείρα έχει δείξει ότι είναι παράλογη η χρησιμοποίηση φ/β γεννητριών για την τροφοδότηση ηλεκτρικών συσκευών με μεγάλη θερμική κατανάλωση. Έτσι αποφεύγεται π.χ. το μαγείρεμα με ηλεκτρικές κουζίνες, η θέρμανση χώρων με ηλεκτρικά καλοριφέρ ή αερόθερμα, η θέρμανση νερού με ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες κλπ. Για τις ανάγκες αυτές είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούνται άλλες συσκευές, όπως κουζίνες και θερμάστρες υγραερίου ή πετρελαίου, ηλιακοί θερμοσίφωνες κλπ.

\* Ως παραδείγματα εκτιμήσεων, στον πίνακα 5 (στο τέλος του βιβλίου) περιέχονται ενδεικτικές τιμές για τις ισχύεις και τις καταναλώσεις διάφορων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών, συνηθισμένης χρήσης.

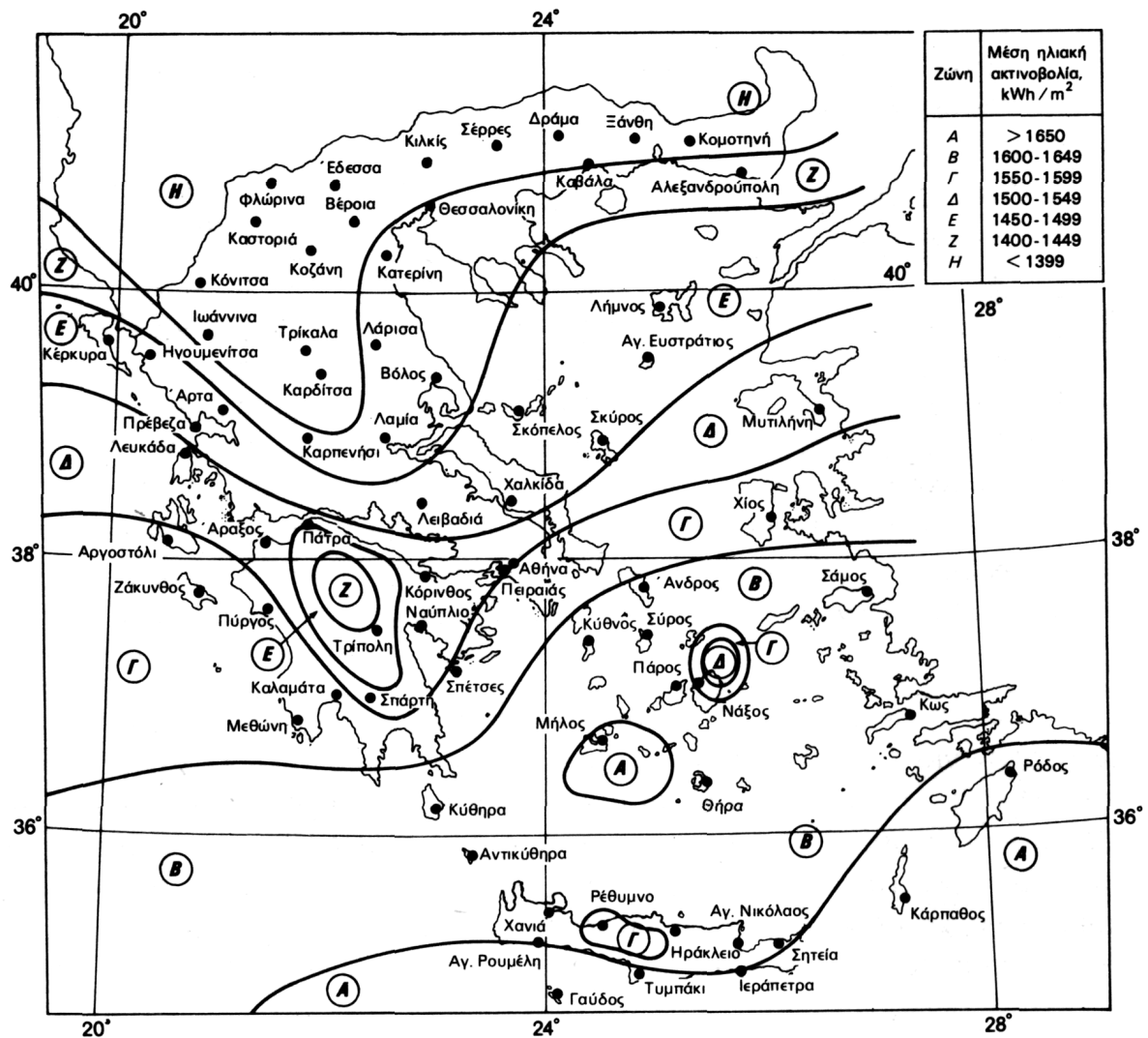
## **Η προσφορά: Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

Στη συνέχεια, βρίσκουμε σε πίνακες, χάρτες ή διαγράμματα, τη μέση ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας (οριζόντιας ή σε διάφορες κλίσεις), στη συγκεκριμένη τοποθεσία και στην επιλεγμένη χρονική περίοδο. Για παράδειγμα, στον χάρτη του σχήματος 35 δίνονται οι μέσες τιμές της ετήσιας έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για διάφορες περιοχές της Ελλάδας\*

Αν δεν υπάρχουν τιμές για την τοποθεσία ή τη χρονική περίοδο που μας ενδιαφέρει, καταφεύγουμε αναγκαστικά σε προσεγγιστικό υπολογισμό με τη βοήθεια των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας σε γειτονικές ή όμοιες τοποθεσίες. Επίσης, η σωστή κλίση του συλλέκτη μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της σχέσης (1), που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της Ηλιακής Γεωμετρίας, από πίνακες, ή από διαγράμματα όπως των σχημάτων 7 και 8.

---

\* Στους πίνακες 3α-3ε, στο τέλος του βιβλίου, δίνονται λεπτομερέστερες πληροφορίες για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες ελληνικές περιοχές.



**Σχήμα 7.2.** Κατανομή της μέσης συνολικής ετήσιας έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντιο επίπεδο, στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Όπως δείχνεται στον ένθετο πίνακα, η ζώνη A δέχεται πάνω από 1650 kWh / m, η ζώνη B από 1600 μέχρι 1649 kWh/m<sup>2</sup> κλπ.

Στην Ελλάδα, χονδρικά, η κλίση των συλλεκτών  $\beta_0$  είναι συνήθως περίπου 45°.

Όταν ενδιαφέρει περισσότερο η φ/β παραγωγή των θερινών μηνών, επιλέγεται μικρότερη

κλίση, μέχρι περίπου 20°. Αντίθετα, για τις χειμερινές εφαρμογές, η βέλτιστη κλίση των συλλεκτών μπορεί να φτάσει μέχρι περίπου 60°, αλλά το κέρδος σε σύγκριση με την κλίση 45° είναι μικρό.

**Το Ζητούμενο: το Πλήθος των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων**

Τώρα μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό του πιο καίριου μεγέθους, που αναζητάμε για τον σχεδιασμό ενός φ/β συστήματος. Δηλαδή το απαιτούμενο πλήθος των φ/β πλαισίων ή πανέλων.

Η πρώτη σκέψη θα ήταν να βρούμε το συνολικό εμβαδόν των ηλιακών στοιχείων, που θα μας δώσουν τη ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Είναι φανερό ότι η ηλεκτρική ενέργεια  $E$  που παράγει ένα πλήθος φ/β στοιχείων, με συντελεστή απόδοσης  $\eta$  και συνολική επιφάνεια  $A$   $m^2$ , όταν δεχτεί μια πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας  $\Pi$  kWh/ $m^2$ , είναι:

$$E = \Pi \times A \times \eta \quad (30)$$

και επομένως, όταν τα άλλα μεγέθη είναι γνωστά ή έχουν εκτιμηθεί, μπορούμε να βρούμε την απαιτούμενη συνολική επιφάνεια των φ/β στοιχείων:

$$A = \frac{E}{\Pi \times \eta} \quad (31)$$

Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ότι οι τιμές του πίνακα 12 αφορούν στη μέση ημερήσια χειμερινή ηλεκτρική κατανάλωση μιας αστικής κατοικίας στη Ρόδο. Για την περίπτωση συλλέκτη από φ/β στοιχεία πυριτίου του εμπορίου, με μέσο συντελεστή απόδοσης 12%, τοποθετημένα στη Ρόδο με κλίση 45°, όπου τον Ιανουάριο αντιστοιχεί μέση ημερήσια ηλεκτρική ακτινοβολία 3,32 kWh/ $m^2$ , βρίσκουμε ότι η επιφάνεια των φ/β στοιχείων που απαιτούνται για την κάλυψη της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης των 8kWh είναι:

$$A = \frac{8kWh/d}{3,32kWh/m^2 \cdot d \times 0,12} = 20,08m^2$$

Για μεγαλύτερη ακρίβεια, θα μπορούσαμε να είχαμε κάνει τη θερμοκρασιακή διόρθωση της απόδοσης. Στη Ρόδο, τον Ιανουάριο, η μέση θερμοκρασία του αέρα στη διάρκεια της ημέρας είναι 12,6°C, που αντιστοιχεί σε μέση θερμοκρασία των ηλιακών στοιχείων περίπου  $12,6 + 30 = 42,6^\circ C$ . Επομένως η τιμή του συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης είναι:

$$\sigma_\theta = 1,00 - (42,6 - 20) \times 0,005 = 0,89$$

και, υποθέτοντας ότι η ρύπανση είναι ασήμαντη ( $\sigma_p = 1,00$ ), βρίσκουμε αντίστοιχη επιφάνεια:

$$A = \frac{8}{3,32 \times 0,12 \times 0,89} = 22,56m^2$$

Τα αποτελέσματα όμως αυτά είναι, ουσιαστικά, χωρίς πρακτική αξία διότι όταν αναζητήσουμε στη βιομηχανία ή στο εμπόριο τα απαιτούμενα φ/β πλαίσια για τη συστοιχία της εγκατάστασης μας, βλέπουμε ότι συνήθως οι κατασκευαστές τους δεν επιθυμούν ή δεν ενδιαφέρονται να ανακοινώσουν αναλυτικά τον μέσο συντελεστή απόδοσης και τη συνολική επιφάνεια των ηλιακών στοιχείων του κάθε φ/β πλαισίου, ούτε τον συντελεστή κάλυψης του. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τις περισσότερες φορές τα μόνα χαρακτηριστικά που δίνονται είναι η επιφάνεια ( $S$ ) και η απόδοση ( $\eta_p$ ) του φ/β πλαισίου ή η ισχύς αιχμής ( $P_a$ ).

Έτσι, στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζουμε τη σχέση (24), και παίρνοντας σαν παράδειγμα διαθέσιμου φ/β πλαισίου εκείνο του σχήματος 30 ( $S=0,37m^2$ ,  $\eta_p=10,76\%$ ,  $P_o=40W_p$ ), βρίσκουμε την ιδανικά απαιτούμενη ολική επιφάνεια των φ/β πλαισίων:

$$S_{ολ} = \frac{E}{\Pi \times n_{\pi} \times \sigma_{\theta} \times \sigma_{\rho}} = \frac{8}{3,32 \times 0,1076 \times 0,89 \times 1,00} = 25,16m^2$$

Εδώ μπορούμε να κάνουμε μια διασταύρωση των αποτελεσμάτων. Αν οι παραπάνω τιμές είναι συμβιβαστές, θα πρέπει να καταλήγουν σε συντελεστή κάλυψης του φ/β πλαισίου που να επιβεβαιώνεται από όσα αναφέρονται στο σχήμα 31. Πράγματι, βρίσκουμε:

$$\sigma_{\kappa} = \frac{A}{S_{ολ}} = \frac{22,56}{25,16} = 0,9$$

που συμφωνεί ικανοποιητικά με την αναμενόμενη τιμή για πυκνή τοποθέτηση κυκλικών ηλιακών στοιχείων, τη διάταξη δηλαδή του φ/β πλαισίου του παραδείγματος μας.

Υποθέτοντας, στη συνέχεια, ότι οι πρόσθετες ηλεκτρικές απώλειες στο σύστημα (συσσωρευτές, μετατροπείς ισχύος και τάσης κλπ.) είναι περίπου το 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή ότι ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος από την έξοδο της φ/β γεννήτριας μέχρι την έξοδο προς την κατανάλωση είναι  $\alpha = 0,7$ , βρίσκουμε ότι η τελικά απαιτούμενη επιφάνεια φ/β πλαισίων είναι:

$$S'_{ολ} = \frac{S_{ολ}}{\alpha} = \frac{25,16}{0,7} = 35,94m^2$$



Το φ/β πλαίσιο του παραδείγματος μας έχει εμβαδόν επιφάνειας  $0,37\text{m}^2$ . Επομένως θα χρειαστούμε:

$$\frac{35,94}{0,37} \approx 98 \text{ φ/β πλαίσια.}$$

Στη δεύτερη περίπτωση, όταν γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής του φ/β πλαισίου (στο παράδειγμα  $P_0 = 40W_p$ ), εφαρμόζουμε τη σχέση (26) και βρίσκουμε ότι, υπολογίζοντας και τις πρόσθετες ηλεκτρικές απώλειες με  $\alpha=0,7$ , χρειαζόμαστε συνολική ισχύ αιχμής ίση με:

$$P'_\alpha = \frac{P_\alpha}{\alpha} = \frac{8}{3,32 \times 0,89 \times 1,00 \times 0,7} = 3,87kW_p = 3870W_p$$

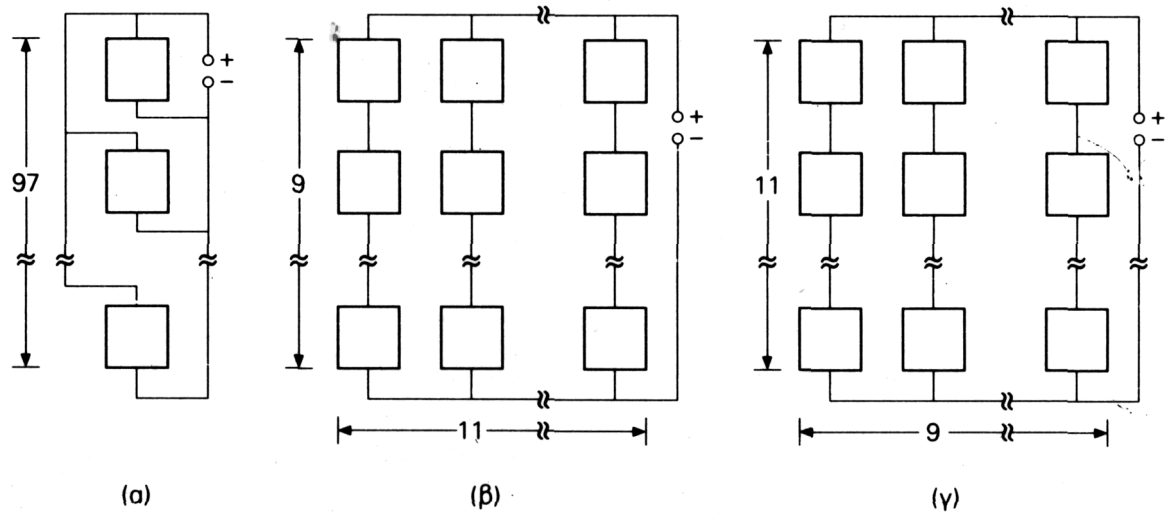
που αντιστοιχεί σε

$$\frac{3870}{40} \approx 97 \text{ φ/β πλαίσια}$$

δηλαδή περίπου καταλήγουμε πάλι σε 98 φ/β πλαίσια.

## Η Συνδεσμολογία των Συστοιχιών

Τα φ/β πλαίσια του παραδείγματος μας δίνουν τάση περίπου 17 V. Αν θέλουμε να φορτίζουν συνηθισμένους συσσωρευτές των 12 V, τότε όλα τα φ/β πλαίσια θα συνδεθούν παράλληλα ώστε η φ/β συστοιχία να δίνει επίσης τάση περίπου 17V, που είναι αρκετά κατάλληλη για τη φόρτιση συσσωρευτών ονομαστικής τάσης 12V. Έχουμε όμως τη δυνατότητα, με κατάλληλη διάταξη και σύνδεση, να παράγουμε υψηλότερη τάση για τη φόρτιση συσσωρευτών ή για την τροφοδότηση της κατανάλωσης. Π.χ. προσθέτουμε ένα ακόμα φ/β πλαίσιο στη συστοιχία, ώστε το σύνολο του να φτάσει τα 99, και τα μοιράζουμε σε 33 παράλληλους κλάδους με 3 πλαίσια στη σειρά σε κάθε κλάδο. Τότε, η συστοιχία θα δίνει τάση περίπου  $3 \times 17 = 51$  V. Επίσης μπορούμε να σχηματίσουμε 11 παράλληλους κλάδους με 9 πλαίσια στη σειρά σε κάθε κλάδο, και να πάρουμε τάση περίπου  $9 \times 17 = 153$  V, ή να σχηματίσουμε 9 παράλληλους κλάδους με 11 πλαίσια στη σειρά σε κάθε κλάδο και να πάρουμε τάση περίπου  $11 \times 17 = 187$  V (Σχήμα 36). Ακόμη, π.χ. μπορούμε με μικρή δαπάνη να αυξήσουμε τα φ/β πλαίσια σε 100, που είναι ένας περισσότερο εύχρηστος αριθμός για κατανομή σε ομάδες, ώστε να έχουμε μια μεγαλύτερη δυνατότητα επιλογής για την παραγόμενη τάση.



**Σχήμα 36.** Διαφορετικές συνδεσμολογίες των φωτοβολταϊκών πλαισίων για την παραγωγή συνεχούς ηλεκτρικής τάσης (α) 17 V, (β) 1 53 V, και (γ) 1 87 V.

## Η Αποθήκευση της Ηλεκτρικής Ενέργειας

### Η ανάγκη για αποθήκευση

Όπως είδαμε παραπάνω, ο καθορισμός του εμβαδού της επιφάνειας των φ/β συλλεκτών στηρίζεται στη μέση ηλεκτρική κατανάλωση του συστήματος και στη μέση ηλιακή ακτινοβολία που δέχονται οι συλλέκτες στην επιλεγμένη κρίσιμη περίοδο λειτουργίας του (π.χ. ένα θερινό ή χειμερινό μήνα, μια εποχή του έτους ή και ολόκληρο το έτος). Όμως οι μέσες τιμές είναι στατιστικά μεγέθη που μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από ενδεχόμενες πραγματικές συνθήκες. Επίσης, ένα αξιόπιστο σύστημα πρέπει να παρέχει επαρκή ηλεκτρική ενέργεια για την ικανοποίηση της ζήτησης και στα χρονικά διαστήματα που δεν υπάρχει αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία. Προφανώς, εννοούμε κυρίως τις νυχτερινές ώρες, τις συννεφιασμένες ημέρες και τις χρονικές αιχμές της κατανάλωσης.

Τα φ/β συστήματα που είναι συνδεδεμένα με κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, αντλούν από αυτά την απαιτούμενη συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης διοχετεύουν προς τα δίκτυα την ενδεχόμενη περίσσεια της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, όταν υπερβαίνει την κατανάλωση του συστήματος. Όμως, τα απομονωμένα αυτόνομα φ/β συστήματα

δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα ενεργειακής ανταλλαγής. Επομένως, χρειάζεται να αποθηκεύουν μια ποσότητα από την περίσσεια της ηλεκτρικής τους παραγωγής, ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή της φ/β γεννήτριας. Ως προς την άλλη απαίτηση, δηλαδή την απαλλαγή του συστήματος από την περίσσεια της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, πέρα από τη ζήτηση της κατανάλωσης και τη δυνατότητα της αποθήκευσης, αυτή αναγκαστικά αντιμετωπίζεται με τη διοχέτευση της στη γη ή σε ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να προνοείται να αποθηκεύεται, εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες και απαιτήσεις, και κυρίως το μέγιστο πλήθος των πιθανών συνεχών ημερών συννεφιάς, τις αιχμές της κατανάλωσης και τον βαθμό αξιοπιστίας που θα πρέπει να παρουσιάζει το σύστημα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ή όχι βοηθητικών ενεργειακών πηγών. Συνήθως, από τα αυτόνομα φ/β συστήματα ζητείται να εξασφαλίζουν μια αυτοδυναμία τουλάχιστον 3 ως 10 ημερών περίπου.

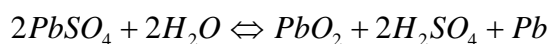
Σε ειδικές περιπτώσεις, η φωτοβολταϊκή ενέργεια μπορεί, με νέα μετατροπή, να αποθηκευθεί σε μη ηλεκτρική μορφή. Π.χ. να κινήσει ηλεκτρικές αντλίες που μεταφέρουν νερό σε υπερυψωμένες δεξαμενές, από όπου στη συνέχεια, με την πτώση του νερού, παράγεται πάλι ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών. Επίσης μπορεί να ηλεκτρολύσει νερό και να παράγει υδρογόνο, το οποίο αποθηκεύεται σε αεριοφυλάκια και χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως καύσιμο σε μικρούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Συνήθως, όμως, η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στα αυτόνομα φ/β συστήματα γίνεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

### **Οι συσσωρευτές μολύβδου**

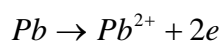
Υπάρχουν διαφόρων τύπων ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες), ανάλογα με το υλικό των ηλεκτροδίων τους. Π.χ. συσσωρευτές νικελίου-καδμίου ή αργύρου-ψευδαργύρου. Έχει όμως διαπιστωθεί ότι οικονομικότεροι για χρησιμοποίηση σε φ/β συστήματα είναι οι συσσωρευτές μολύβδου. Τα ηλεκτρόδια τους είναι πλάκες από κράματα μολύβδου, π.χ. Pb-Sb ή Pb-Ca, βυθισμένες σε

διάλυμα θειικού οξέος. Είναι δηλαδή όμοιοι με τους συνηθισμένους συσσωρευτές των αυτοκινήτων, αν και εκείνοι κατασκευάζονται από φτηνότερο κράμα μολύβδου και αυτοεκφορτίζονται σε σχετικά γρήγορο ρυθμό.

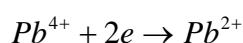
Υπενθυμίζεται ότι η λειτουργία των συσσωρευτών μολύβδου στηρίζεται σε μια αντιστρεπτή ηλεκτροχημική διαδικασία, που περιγράφεται από την αμφίδρομη αντίδραση:



Συγκεκριμένα, οι συσσωρευτές αποτελούνται από κυψελίδες, δηλαδή ζεύγη μονωμένων μεταξύ τους πλακών βυθισμένων στο ίδιο διάλυμα θειικού οξέος. Οι πλάκες του αφόρτιστου συσσωρευτή καλύπτονται από θειικό μολύβδο ( $PbSO_4$  ή ακριβέστερα  $Pb^{2+}SO_4^{2-}$ ). Κατά το στάδιο της φόρτισης, διασπάται ο θειικός μολύβδος και σχηματίζεται οξειδίο του μολύβδου ( $PbO_2$  ή ακριβέστερα  $Pb^{4+}SO_2^{2-}$ ) στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός Pb στις πλάκες των αρνητικών. Αντίστροφα, κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και 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 πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων 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 θειικά ιόντα ( $SO_4^{2-}$ ) από το διάλυμα και ξανασχηματίζουν τον θειικό μολύβδο πάνω στις πλάκες των κυψελίδων. Έτσι, καταναλώνεται θειικό οξύ και αραιώνεται το διάλυμα στις κυψελίδες. Με τη φόρτιση όμως που επακολουθεί, τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα, όπως δείχνει η αμφίδρομη αντίδραση, και η περιεκτικότητά του αποκαθίσταται στην κανονική τιμή.

Κάθε φορτισμένη κυψελίδα των συσσωρευτών μολύβδου, δηλαδή κάθε ζεύγος ηλεκτροδίων, δίνει τάση περίπου 2,0 V. Για την πλήρη, όμως, φόρτιση κάθε κυψελίδας χρειάζεται να γίνει τροφοδότηση με τάση περίπου 2,4V. Στη συνέχεια, η τροφοδότηση του συσσωρευτή πρέπει να διακοπεί, διότι η υπερφόρτιση των

κυψελίδων προκαλεί τη θέρμανση του διαλύματος του θειικού οξέος, την εξάτμιση του νερού του και τελικά την επιτάχυνση της φθοράς του συσσωρευτή. Επίσης προκαλεί την ηλεκτρόλυση του διαλύματος με έκλυση υδρογόνου και οξυγόνου. Αυτό, εκτός από την απώλεια του υγρού, δημιουργεί κινδύνους και για την ασφάλεια της εγκατάστασης. Αν ο χώρος που βρίσκεται ο συσσωρευτής δεν έχει καλό αερισμό, το υδρογόνο μπορεί να σχηματίσει εκρηκτικό μίγμα με τον αέρα, που με έναν τυχαίο σπινθήρα θα προξενήσει ατύχημα.

Συνήθως, οι συσσωρευτές περιέχουν πολλές κυψελίδες στη σειρά και δίνουν ανάλογα αυξημένη τάση. Π.χ. ένας συσσωρευτής μολύβδου με 6 κυψελίδες δίνει τάση περίπου 12V και για τη φόρτιση του χρειάζεται τάση  $6 \times 2,4 \text{ V}$  και επί πλέον 0,75 V για την πτώση τάσης στην προστατευτική δίοδο που υπάρχει συνήθως μεταξύ συσσωρευτού και φ/β γεννήτριας, ώστε να μη διοχετεύεται ρεύμα από τον συσσωρευτή προς τα ηλιακά στοιχεία. Δηλαδή απαιτείται συνολική τάση φόρτισης 15,15V. Πάντως, συχνά στα φ/β συστήματα χρησιμοποιούνται συσσωρευτές με πολλές δεκάδες κυψελίδες στη σειρά, ώστε να δίνουν αρκετά υψηλή τάση. Π.χ. συνηθισμένοι είναι οι συσσωρευτές με 100 ως 150 κυψελίδες, που δίνουν τάση συνεχούς ρεύματος 200 ως 300 V.

## **H χωρητικότητα των συσσωρευτών**

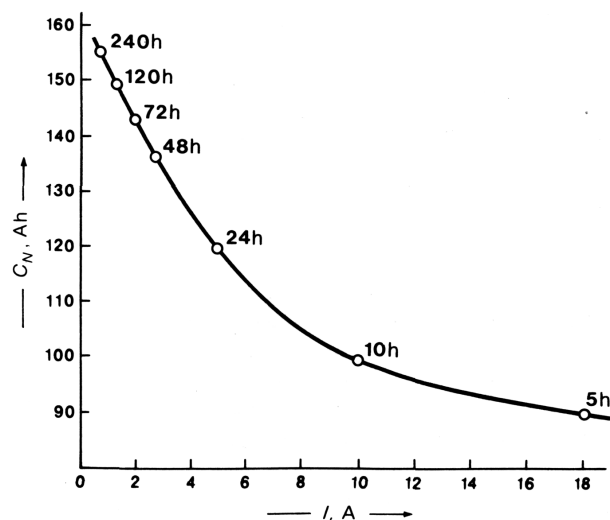
Το φορτίο που αποθηκεύει, δηλαδή η **χωρητικότητα** ενός συσσωρευτή, μετράται συνήθως σε αμπερώρια (Ah), που είναι, σε ιδανικές συνθήκες, το γινόμενο της μέσης έντασης του ρεύματος /, που δίνει ο συσσωρευτής, ανεξάρτητα από την τάση του, επί το πλήθος των ωρών μέχρι να εκφορτισθεί, ξεκινώντας από πλήρη φόρτιση. Προφανώς, πιο χρήσιμο μέγεθος είναι η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευθεί σε ένα συσσωρευτή, η οποία όμως εξαρτάται από την τάση που δίνει ο συσσωρευτής. Έτσι, ένας συσσωρευτής χωρητικότητας π.χ.  $C=100\text{Ah}$ , που δίνει μέση τάση π.χ.  $V=12\text{V}$ , έχει ονομαστική ικανότητα αποθήκευσης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας ίσης με:

$$100 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} = 1200 \text{ Wh} = 1,2 \text{ kWh}$$

Με τη χρήση, η χωρητικότητα των συσσωρευτών μειώνεται λόγω διάβρωσης των πλακών, σχηματισμού επικαθίσεων κλπ. Συνήθως, ένας συσσωρευτής θεωρείται άχρηστος όταν η χωρητικότητά του πέσει κάτω από το

80% περίπου της αρχικής τιμής. Επίσης, δεν πρέπει να παραβλέπεται ότι οι φορτισμένοι συσσωρευτές αυτοεκφορτίζονται με ρυθμό 2 ως 5% της χωρητικότητας τους τον μήνα. Ο ρυθμός της αυτοεκφόρτισης αυξάνει με την ηλικία του συσσωρευτή.

Η χωρητικότητα των συσσωρευτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ισχύ ( $P=VI$ ) με την οποία γίνεται η εκφόρτισή τους, δηλαδή από την ένταση του ρεύματος που δίνουν προς την κατανάλωση. Όπως δείχνεται στο παράδειγμα του σχήματος 37, ένας συσσωρευτής ονομαστικής χωρητικότητας 100 Ah θα εξαντληθεί σε 10 ώρες αν η ένταση του ρεύματος εκφόρτισης είναι 10A, ενώ αν η ένταση είναι π.χ. 18A ο ίδιος συσσωρευτής θα εξαντληθεί σε 5 ώρες και η χωρητικότητα του θα πέσει στα 90 Ah. Αντίθετα, με μικρότερους ρυθμούς εκφόρτισης, βλέπουμε ότι η χωρητικότητα του συσσωρευτή αυξάνει σημαντικά. Επίσης, η χωρητικότητα αυξάνει με τη θερμοκρασία του συσσωρευτή. Συγχρόνως, όμως, επιταχύνονται οι μηχανισμοί διάβρωσης και μειώνεται η διάρκεια της ζωής του.



**Σχήμα 37.** Η εξάρτηση της χωρητικότητας  $C_N$  ενός συσσωρευτή μολύβδου του εμπορίου, όχτο την ένταση του ρεύματος εκφόρτισης. Ο συσσωρευτής του παραδείγματος έχει ονομαστική χωρητικότητα 100 Ah για ένταση ρεύματος 10 A και εξάντληση σε 10 ώρες, που παίρνεται συνήθως ως συμβατικό χρονικό διάστημα εκφόρτισης των συσσωρευτών για τον χαρακτηρισμό της χωρητικότητας τους.

Εκτός από τη θερμοκρασία, η διάρκεια της χρήσιμης ζωής των συσσωρευτών εξαρτάται κυρίως από το πλήθος των διαδοχικών κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης και από το **βάθος** κάθε εκφόρτισης. Ανάλογα με τον τύπο τους, οι συσσωρευτές μολύβδου αντέχουν συνήθως μέχρι 500 ως 1500 κύκλους

φορτίσεων-εκφορτίσεων. Στους φτηνότερους τύπους, το βάθος εκφόρτισης δεν επιτρέπεται να ξεπερνά το 10%. Δηλαδή με την εκφόρτιση προσφέρεται μόνο το 10% της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ για το υπόλοιπο 90% δεν επιδιώκεται η ανάκτηση, ώστε να αποφευχθεί η πρόωρη καταστροφή του συσσωρευτή. Σε ειδικούς στεγανούς τύπους με ηλεκτρόδια από κράματα Pb-Ca, το βάθος εκφόρτισης μπορεί να φτάσει μέχρι 80%. Πάντως, στις μικρότερες και λιγότερο απαιτητικές από τις φ/β εγκαταστάσεις, χρησιμοποιούνται συχνά κοινοί συσσωρευτές αυτοκινήτων, με επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης μέχρι 10%.

Επομένως, σε ένα συσσωρευτή ονομαστικής χωρητικότητας  $C_N$ , η ενεργός, αξιοποιήσιμη χωρητικότητα  $C$  είναι:

$$C = \beta \times C_N \quad (32)$$

και η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αποταμιευτεί και να ανακτηθεί, σε ιδανικές συνθήκες, σε κάθε κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης είναι:

$$E = C \times V = \beta \times C_N \times V \quad (33)$$

όπου  $\beta$  είναι το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή σε δεκαδική μορφή. Για παράδειγμα, αν ο συσσωρευτής του διαγράμματος του σχήματος 37 έχει βάθος εκφόρτισης 60% και τάση 12V, βρίσκουμε ότι για χρόνο εκφόρτισης π.χ. 24 ωρών (που αντιστοιχεί ονομαστική χωρητικότητα 120 Ah), θα είναι:

$$E = \beta \times C_N \times V = 0,6 \times 120 \times 12 = 864Wh$$

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

$$E_\varphi = \frac{E}{\alpha} \quad (34)$$

και, σύμφωνα με τη σχέση (37), η ονομαστική του χωρητικότητα να είναι:

$$C_N = \frac{E_\varphi}{\beta \times V} = \frac{E}{\alpha \times \beta \times V} \quad (35)$$

Δηλαδή, για ανάκτηση ενέργειας 864 Wh, στο παραπάνω παράδειγμα, η ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή δεν αρκεί, στις πρακτικές συνθήκες, να είναι 120 Ah, αλλά πρέπει να γίνει:

$$C_N = \frac{864}{0,85 \times 0,6 \times 12} = 141,2Ah$$

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

$$C = \frac{24\mu \times P}{\alpha \times V} \quad (36)$$

## Δομή, διάρκεια ζωής και κόστος

Στις σχετικά μεγάλες φ/β εγκαταστάσεις, οι διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται να έχουν αρκετά σημαντική χωρητικότητα και σχηματίζονται από ομάδες μεγάλου πλήθους συσσωρευτών. Δηλαδή, η δομή τους είναι σπονδυλωτή, αφού οι ομάδες αυτές αποτελούνται συνήθως από ανεξάρτητους συσσωρευτές. Έτσι, η συνολική χωρητικότητα της διάταξης μπορεί αργότερα να προσαρμοστεί εύκολα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες, με την πάροδο του χρόνου και την ενδεχόμενη εξέλιξη της κατανάλωσης, αυξάνοντας ή μειώνοντας το πλήθος των συσσωρευτών. Όπως είδαμε, από σπονδυλωτή επίσης συγκρότηση χαρακτηρίζονται και οι φ/β γεννήτριες, με αντίστοιχη ελαστικότητα προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες ανάγκες, αυξάνοντας ή μειώνοντας το πλήθος των φ/β πλαισίων. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί επίσης να γίνει σχετικά εύκολα η διόρθωση σφαλμάτων σχεδιασμού, που θα οφείλονταν σε λαθεμένες εκτιμήσεις της ηλεκτρικής κατανάλωσης ή της ηλιακής ακτινοβολίας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι συσσωρευτές μολύβδου δεν ξεπερνούν συνήθως τους 500 ως 1500 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Βλέπουμε λοιπόν ότι αν υποθέσουμε ότι καθημερινά γίνεται ένας τουλάχιστον κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης για την αντιμετώπιση των νυκτερινών καταναλώσεων ενός φ/β συστήματος, θα πρέπει να γίνεται αντικατάσταση των συσσωρευτών αρκετά συχνά, περίπου κάθε 2 ως 5 χρόνια. Αντίθετα, η διάρκεια ζωής των φ/β

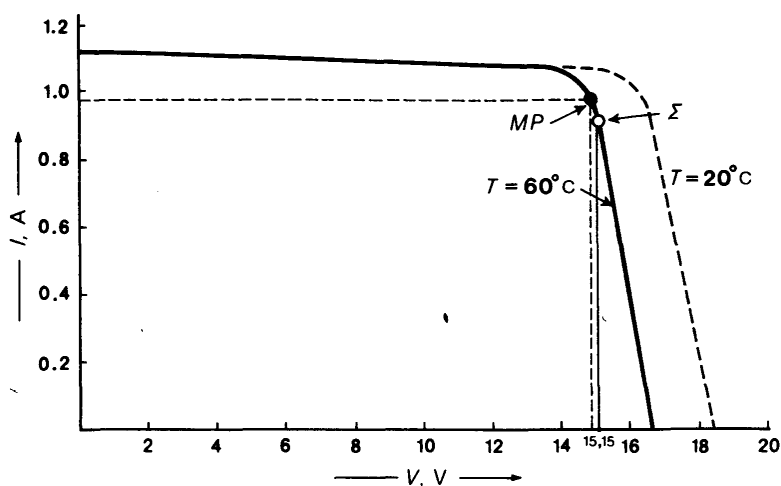


πλαισίων και των άλλων μερών του συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερη, πάνω από 20-30 χρόνια.

Λόγω της κατασκευής τους, οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλο βάρος και κόστος. Ανάλογα με τον τύπο τους, η χωρητικότητα ενέργειας των συσσωρευτών μολύβδου είναι περίπου 20 Wh ανά kg, και το κόστος τους είναι περίπου 20.000 δρχ. ανά kWh χωρητικότητας. Γι' αυτό, άλλωστε, είναι συχνά οικονομικότερο να μην επιδιώκεται η πλήρης ικανοποίηση των καταναλώσεων του συστήματος με αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας της φ/β γεννήτριας, αλλά να προτιμάται η τοποθέτηση μιας βοηθητικής ενεργειακής πηγής, συνήθως ενός μικρού ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους ντήζελ, για την αντιμετώπιση των αιχμών της ζήτησης. Έτσι, γίνεται σημαντική μείωση της απαιτούμενης χωρητικότητας των συσσωρευτών, αλλά επίσης και της ισχύος της φ/β γεννήτριας του συστήματος.

### Ρυθμιστές, Μετατροπείς και Αντιστροφείς

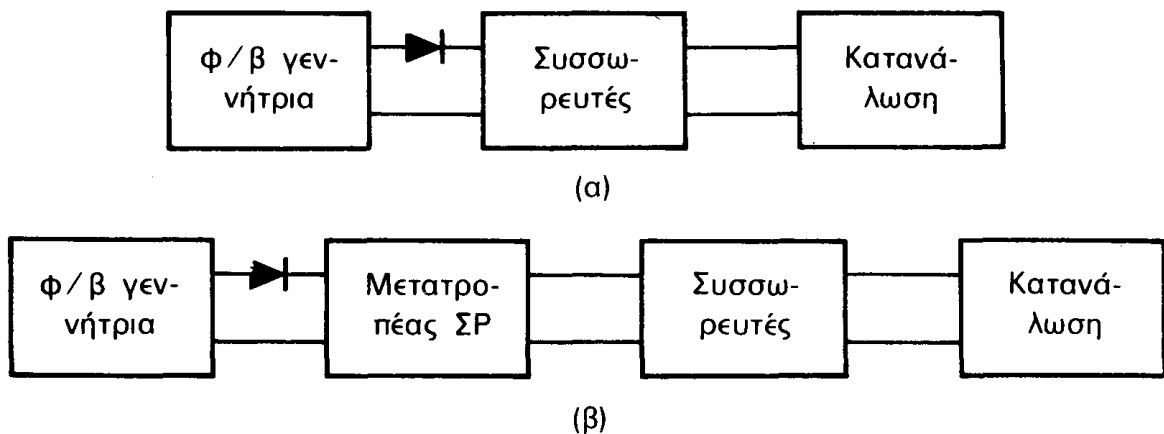
Η καλή λειτουργία και η αυξημένη απόδοση των φ/β συστημάτων υποβοηθείται συχνά με τη χρησιμοποίηση ειδικών διατάξεων, συνήθως ηλεκτρονικών ισχύος, που επεξεργάζονται την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η φ/β γεννήτρια. Π.χ. στο σχήμα 38 δείχνεται η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-έντασης ενός φ/β πλαισίου του εμπορίου, όταν τα ηλιακά στοιχεία του έχουν θερμοκρασία 60° C (δηλαδή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος περίπου 30° C). Για τη φόρτιση συσσωρευτών 12V, στους οποίους όπως είδαμε η κατάλληλη τάση φόρτισης είναι 15,15V, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, παράλληλα ή στη σειρά με το φ/β πλαίσιο, ένας ρυθμιστής τάσης, που να διατηρεί την τάση εξόδου του φ/β πλαισίου στην επιθυμητή τιμή.



**Σχήμα 38.** Παράδειγμα της καμπύλης τάσης (I)-έντασης (I) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου του εμπορίου στη θερμοκρασία 60°C (συνεχής γραμμή) και στη συμβατική θερμοκρασία 20°C (ασυνεχής γραμμή), και επιλογή του κατάλληλου σημείου της Σ για τη φόρτιση κοινών συσσωρευτών 12V, που είναι όμως διαφορετικό

από το σημείο της μέγιστης ισχύος *MP*.

Επίσης, η τάση φόρτισης των συσσωρευτών μπορεί να ανεξαρτοποιηθεί εντελώς από την τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας, με την παρεμβολή ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος. Ο μετατροπέας αυτός παραλαμβάνει την τάση που δίνει η φ/β γεννήτρια, που είναι αναγκαστικά ασταθής λόγω των διακυμάνσεων της ηλιακής ακτινοβολίας, τη μετατρέπει στην ευνοϊκή τάση για τη φόρτιση των συσσωρευτών και τη σταθεροποιεί, ώστε να εξασφαλίζονται οι



βέλτιστες συνθήκες φόρτισης (Σχήμα 39).

**Σχήμα 39.** Απλοποιημένα διαγράμματα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (α) χωρίς ρυθμιστή τάσης, (β) με ρυθμιστή για τη φόρτιση των συσσωρευτών στη βέλτιστη τάση. Και στις δύο περιπτώσεις προβλέπεται η τοποθέτηση μιας προστατευτικής διόδου για την αποφυγή της εκφόρτισης των συσσωρευτών διαμέσου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, αν μειωθεί σημαντικά η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όταν οι συσσωρευτές του συστήματος φορτισθούν πλήρως, η περίσσεια του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται στη φ/β γεννήτρια διοχετεύεται από τον ρυθμιστή προς κατάλληλες αντιστάσεις ή προς τη γη, και έτσι προστατεύονται οι συσσωρευτές από τους κινδύνους της υπερφόρτισης.

Εκτός από το ρυθμιστή τάσης, τα φ/β συστήματα μπορούν να περιέχουν και άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως είναι οι ρυθμιστές ισχύος, γνωστοί με τη συντομογραφία MPPT (από την αγγλική έκφραση maximum power point trackers, δηλαδή διατάξεις παρακολούθησης του σημείου της μέγιστης ισχύος). Ο προορισμός τους είναι να επιδιώκουν τη λειτουργία της φ/β γεννήτριας στο σημείο

της καμπύλης τάσης-έντασης που αντιστοιχεί στη μέγιστη απόδοση, όσο επιτρέπει ο συντελεστής πλήρωσης ( $FF$ ). Στη συνέχεια, με τον μετατροπέα τάσης, η τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας μετατρέπεται στην απαιτούμενη για τη φόρτιση των συσσωρευτών του συστήματος. Πάντως, το κόστος των διατάξεων αυτών είναι σημαντικό, και έτσι, συνήθως παραλείπονται στα σχετικά μικρής ισχύος φ/β συστήματα.

Τέλος, στην έξοδο των φ/β συστημάτων παρεμβάλλεται συχνά ένας αντιστροφέας, που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της φ/β γεννήτριας και των συσσωρευτών σε εναλλασσόμενο, αν αυτό εξυπηρετεί καλύτερα το δίκτυο της τοπικής κατανάλωσης. Κύρια κίνητρα για την προτίμηση της εναλλασσόμενης τάσης, και την τοποθέτηση μεταλλακτών και μετασχηματιστών, είναι ότι οι ηλεκτρικές συσκευές του εμπορίου είναι συνήθως κατασκευασμένες για εναλλασσόμενο ρεύμα και έχουν μικρότερο κόστος από τις αντίστοιχες του συνεχούς ρεύματος. Επίσης, η ανύψωση της τάσης, που γίνεται συγχρόνως με τη μετατροπή της από συνεχή σε εναλλασσόμενη, συνεπάγεται μείωση των απωλειών στους αγωγούς του δικτύου. Σημειώνεται, πάντως, ότι και η λειτουργία των παραπάνω διατάξεων συνοδεύεται με συχνά αξιόλογες απώλειες. Π.χ. ο συντελεστής απόδοσης των διαφόρων ηλεκτρονικών ισχύος που αναφέραμε είναι συνήθως περίπου 90-95%, εφόσον λειτουργούν κοντά στην ονομαστική τους ισχύ, αλλά γίνεται πολύ μικρότερος όταν η ισχύς είναι μειωμένη.

## **Ένα Παράδειγμα Σχεδιασμού**

### **Αντικείμενο**

Προκαταρκτικός σχεδιασμός ενός αυτόνομου φ/β συστήματος για την ηλεκτροδότηση και την ανάπτυξη των οικιακών, κοινοτικών, παραγωγικών και άλλων δραστηριοτήτων ενός υποθετικού απομονωμένου χωριού σε ένα νησί του Κεντρικού Αιγαίου, ανάμεσα στη Λέσβο, τη Λήμνο και τη Σκύρο, π.χ. στο νησί Αγ. Ευστράτιος.

### **Συμπληρωματικές πληροφορίες**

Το χωριό έχει 60 μόνιμους κατοίκους που μένουν σε 15 κατοικίες, και ασχολούνται, σε όλη τη διάρκεια του έτους, με γεωργικές καλλιέργειες, κτηνοτροφία και αλιεία. Για τον φωτισμό των δρόμων του χωριού και για τους

φανούς της προβλήτας χρειάζονται 20 λάμπες των 50 W. Για την ύδρευση των κατοικιών του χωριού, την άρδευση των χωραφιών και το πότισμα των ζώων χρειάζονται 2 αντλίες, ισχύος η καθεμιά 2,5 kW. Για τη συντήρηση των αλιευμάτων και των ευαίσθητων τροφίμων χρειάζεται ένας ψυκτικός θάλαμος χωρητικότητας 50 m<sup>3</sup>, με ψυκτικά μηχανήματα ισχύος 5kW.

Τους θερινούς μήνες (Ιούνιος-Σεπτέμβριος) υπάρχει μια μικρή τουριστική κίνηση, με αποτέλεσμα να διπλασιάζεται το πλήθος των σπιτιών που κατοικούνται.

Σε ένα ύψωμα, κοντά στο χωριό, θα εγκατασταθεί ένας τηλεπικοινωνιακός αναμεταδότης, που θα εξυπηρετεί τον γενικότερο θαλάσσιο και νησιωτικό χώρο της περιοχής. Η απορροφούμενη συνολική ισχύς προβλέπεται ότι θα είναι 1,5 kW από τα οποία τα 0,25 kW για τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις, 0,5 kW για 4 ραδιοφωνικά προγράμματα διαμόρφωσης συχνότητας (FM), και 0,75 kW για 2 τηλεοπτικά κανάλια.

Το δίκτυο διανομής για την τροφοδότηση όλων των καταναλώσεων (κατοικίες, κοινοτικός φωτισμός, αντλίες, ψυκτική εγκατάσταση, αναμεταδότης) είναι εναλλασσόμενο τριφασικό 220/380V, 50 Hz. Για τη φ/β γεννήτρια θα χρησιμοποιηθούν φ/β πλαίσια ισχύος αιχμής 40 W<sub>p</sub>, όπως του σχήματος 30. Η τοποθέτηση των φ/β συλλεκτών θα γίνει σε μια επίπεδη οριζόντια αγροτική περιοχή, στην οποία επικρατούν μέτριοι άνεμοι που μεταφέρουν αξιόλογη ποσότητα σκόνης.

Το σύστημα πρέπει να έχει υψηλή αξιοπιστία, κυρίως για να αποφεύγονται οι διακοπές παροχής ισχύος προς τον αναμεταδότη και τον ψυκτικό θάλαμο.

### **Γενική πορεία του σχεδιασμού**

Θα ακολουθήσουμε τα διαδοχικά βήματα του υποδείγματος του πίνακα 11. Δηλαδή, κατά σειρά, θα επιλέξουμε τη χρονική περίοδο της απαιτούμενης αξιοπιστής λειτουργίας του συστήματος, θα εκτιμήσουμε το μέγεθος της ηλεκτρικής κατανάλωσης, θα υπολογίσουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, θα βρούμε ποιο είναι το αναγκαίο πλήθος των φ/β πλαισίων για τη συγκρότηση της φ/β γεννήτριας, θα καθορίσουμε τη χωρητικότητα των συσσωρευτών και θα υποδείξουμε τις απαιτούμενες διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου του συστήματος, καθώς και την ισχύ της βοηθητικής ενεργειακής πηγής, για την ικανοποίηση της

αξιοπιστίας του συστήματος και την αντιμετώπιση ανώμαλων συνθηκών. Οι υπολογισμοί μας θα στηριχτούν στα τεχνικά στοιχεία που μας δόθηκαν και σε άλλες γνωστές πληροφορίες ή παραδοχές που δικαιολογούνται από την κοινή λογική. Στις περιπτώσεις που απαιτείται, θα κάνουμε διάκριση ανάμεσα στις χειμερινές και στις θερινές συνθήκες.

### **1. Η χρονική περίοδος**

Είναι φανερό ότι το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί αξιόπιστα σε όλη τη διάρκεια του έτους, ώστε να εξυπηρετούνται οι ανάγκες των μονίμων και των προσωρινών κατοίκων του χωριού, να αποφεύγονται οι ζημιές στην αλιευτική, κτηνοτροφική και γεωργική παραγωγή και να εξασφαλίζεται η συνεχής λειτουργία του αναμεταδότη.

### **2. Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις**

#### *α. Κατοικίες*

Θεωρούμε ότι η μέση ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση, ανά κατοικία, είναι 4 kWh. Δηλαδή, ότι είναι το μισό από την κατανάλωση του παραδείγματος του πίνακα 36 που αφορά σε αστική κατοικία, όπου η οικογένεια έχει συνήθως μεγαλύτερη διάρκεια νυκτερινής δραστηριότητας και χρησιμοποιεί περισσότερο ηλεκτρικό εξοπλισμό από όσο μια μέση οικογένεια αγροτών, ψαράδων ή κτηνοτρόφων, ανεξάρτητα από το ύψος του εισοδήματος της. Ως προς τις καταναλώσεις, ισχύει και εδώ η προϋπόθεση ότι δεν θα χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια για το μαγείρεμα, τη θέρμανση νερού και τη θέρμανση χώρων.

#### *β. Κοινοτικός φωτισμός*

Θεωρούμε ότι οι 20 λάμπες των 50 W του κοινοτικού και λιμενικού φωτισμού, συνολικής ισχύος  $20 \times 50 \text{ W} = 1000 \text{ W} = 1 \text{ kW}$ , θα λειτουργούν επί 14 ώρες τις νύχτες του χειμώνα και επί 10 ώρες τις νύχτες του καλοκαιριού.

#### *γ. Αντλίες*

Θεωρούμε ότι οι 2 ηλεκτρικές αντλίες νερού, συνολικής ισχύος  $2 \times 2,5 \text{ kW} = 5 \text{ kW}$ , θα λειτουργούν 2 ώρες τις ημέρες του χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι, λόγω των μεγαλύτερων καταναλώσεων νερού από τον αυξημένο

πληθυσμό και τα ποτίσματα στις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες, θα λειτουργούν 12 ώρες την ημέρα.

*δ. Ψυκτική εγκατάσταση*

Θεωρούμε ότι για τη διατήρηση της ψύξης του ψυκτικού θαλάμου, τα μηχανήματα ισχύος 5kW θα λειτουργούν το 10% του χρόνου τους χειμερινούς μήνες και το 50% τους θερινούς.

*ε. Αναμεταδότης*

Θεωρούμε ότι η ενίσχυση και αναμετάδοση των τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων με απορρόφηση ισχύος 0,25 kW θα γίνεται στη διάρκεια ολόκληρου του 24ωρου, των ραδιοφωνικών προγραμμάτων FM με απορρόφηση ισχύος 0,5 kW επί 16 ώρες την ημέρα και των τηλεοπτικών με απορρόφηση ισχύος 0,75 kW επί 8 ώρες την ημέρα.

Οι εκτιμήσεις των παραπάνω ημερήσιων χειμερινών και θερινών καταναλώσεων μεταφέρονται στον πίνακα 13 και αθροίζονται. Βρίσκουμε ότι η συνολική μέση ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση είναι 116kWh τον χειμώνα και 270 kWh το καλοκαίρι.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 13** Εκτίμηση των μέσων ημερήσιων ηλεκτρικών καταναλώσεων που θα τροφοδοτεί το σύστημα.

Κατανάλωση	<i>Χειμώνας</i>	<i>Καλοκαίρι</i>
α. Κατοικίες	15 x 4kWh = 60 kWh	30 x 4kWh = 120 kWh
β. Κοιν. φωτισμός	1kW x 14h = 14 kWh	1kW x 10h = 10 kWh
γ. Αντλίες	5kWh x 2 h = 10 kWh	5kWh x 12 h = 60 kWh
δ. Ψυκτική	0,1 x 5kW x 24h = 12 kWh	0,5 x 5kW x 24 h = 60 kWh
ε. Αναμεταδότης	0,25kWh x 24h + 0,5kW x 16h + 0,75kWx8h = 20 kWh	0,25kWh x 24h + 0,5kWx16h + 0,75kW x 8h = 20 kWh
Σύνολο	116kWh	270 kWh

Για την εκτίμηση της μέγιστης ισχύος που ενδέχεται να ζητηθεί να τροφοδοτήσει το σύστημα, θεωρούμε, όπως και για την κατανάλωση, ότι οι κατοικίες έχουν ηλεκτρικό εξοπλισμό με τη μισή ισχύ σε σχέση με της αστικής κατοικίας του πίνακα 12, δηλαδή συνολική ισχύ 3,75 kW. Στον πίνακα 14 συγκεντρώνουμε και αθροίζουμε τις επί μέρους ισχύεις και βρίσκουμε σύνολο 125 kW.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 14** Καταγραφή της μέγιστης ισχύος που απορροφούν οι διάφοροι καταναλωτές. Με αστερίσκο σημειώνονται οι καταναλώσεις πρώτης προτεραιότητας.

<i>Κατανάλωση</i>	<i>Μέγιστη ισχύς</i>
α. Κατοικίες	30 x 3,75 kW = 112,5 kW
β. Κοινοτικός φωτισμός	20 x 0,05 kW = 1,0 kW
γ. Αντλίες	2 x 2,5 kW = 5,0 kW
δ. Ψυκτική εγκατάσταση	5,0 kW
ε. Αναμεταδότης	1,5 kW
Σύνολο	<u>125,0 kW</u>

Προτεραιότητα θεωρείται ότι έχει ο αναμεταδότης, διότι εξυπηρετεί την ευρύτερη θαλάσσια και νησιωτική περιοχή, και ακολουθούν κατά σειρά η ψυκτική εγκατάσταση, οι κατοικίες, οι αντλίες και ο κοινοτικός φωτισμός. Λόγω της χαμηλής προτεραιότητας των αντλιών, υποτίθεται ότι θα γίνει ενημέρωση των κατοίκων ώστε να διατηρούν σε δεξαμενές την αναγκαία ποσότητα νερού της ημερήσιας κατανάλωσης.

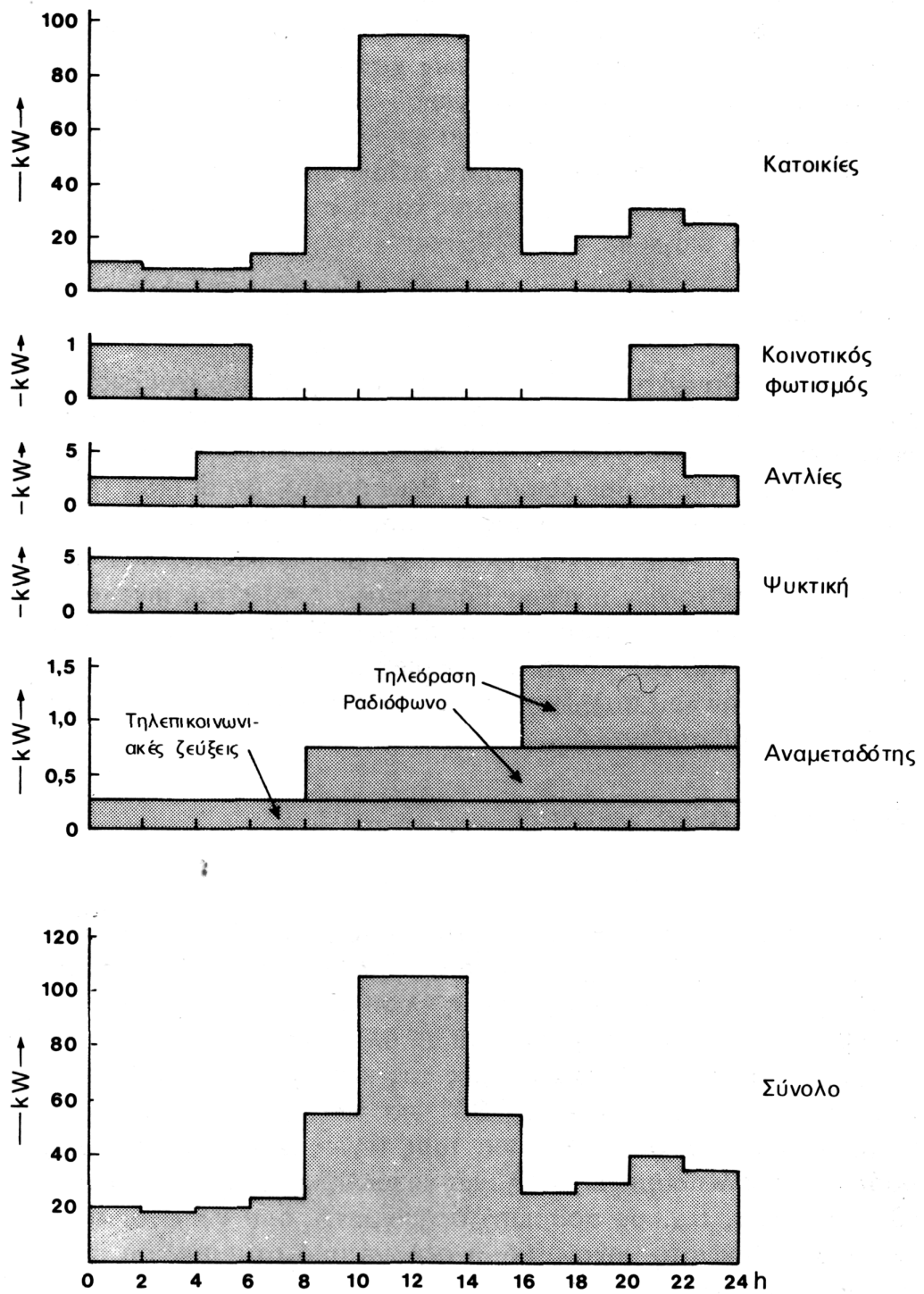
Συνήθως, για να αποκτήσουμε μια εικόνα της πιθανής κατανομής της μέγιστης ζήτησης ισχύος, σχεδιάζουμε ιστογράμματα (όπως π.χ. του σχήματος 40) για τις διάφορες ξεχωριστές και τις συνολικές καταναλώσεις του συστήματος στη διάρκεια ενός 24ώρου.

### **3. Η ηλιακή ενέργεια**

Το νησί που θα εγκατασταθεί το φ/β σύστημα βρίσκεται ανάμεσα σε 3 νησιωτικές, δηλαδή όμοιες, τοποθεσίες (Λέσβο, Λήμνο και Σκύρο) με γνωστά

μετεωρολογικά στοιχεία που περιέχονται στους πίνακες 3 στο τέλος του βιβλίου. Μπορούμε λοιπόν να θεωρήσουμε ότι οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στο υπόψη νησί θα είναι ο μέσος όρος των τιμών των 3 γειτονικών τοποθεσιών, που το περιβάλλουν, και με τη βοήθεια των αντίστοιχων πινάκων βρίσκουμε τις τιμές του πίνακα 15. Δεν θεωρούμε σκόπιμο να εξετάσουμε και να περιλάβουμε στον πίνακα και κλίσεις μικρότερες από  $30^\circ$ , διότι στις περιπτώσεις αυτές η συγκράτηση της σκόνης πάνω στην του συλλέκτη, και επομένως η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας, γίνεται σημαντική.





**Σχήμα 40.** Εκτίμηση της πιθανής μέγιστης ζήτησης ισχύος στις επιμέρους καταναλώσεις και στο σύνολο του συστήματος, κατά τη διάρκεια ενός θερινού 24ώρου. Προφανώς, η κλίμακα της ισχύος δεν είναι η ίδια σε όλα τα ιστογράμματα.

#### **4. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια**

##### *α. Η κλίση των συλλεκτών*

Παρατηρούμε στον πίνακα 15, ότι η κλίση  $30^\circ$  πλεονεκτεί επί 7 μήνες (Μάρτης μέχρι Σεπτέμβρης), η κλίση  $60^\circ$  πλεονεκτεί επί 3 μήνες (Ιανουάριος, Νοέμβρης και Δεκέμβρης), ενώ η κλίση  $45^\circ$  πλεονεκτεί επί 2 μόνο μήνες

(Φεβρουάριος και Οκτώβρης), και το πλεονέκτημα της είναι ασήμαντο σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές της κλίσης 60° τους ίδιους μήνες. Επομένως, επιλέγουμε την κλίση 30° για τους μήνες από Μάρτη μέχρι Σεπτέμβρη, και την κλίση 60° για τους μήνες από Οκτώβρη μέχρι Φεβρουάριο. Προβλέπουμε, δηλαδή, μια κατάλληλη κατασκευή στήριξης των φ/β συλλεκτών, π.χ. με αρθρωτά στηρίγματα, που να είναι εύκολη, με έναν απλό χειροκίνητο μηχανισμό, η αλλαγή από τη μια κλίση στην άλλη, δύο φορές τον χρόνο.

### *β. Η απαιτούμενη ισχύς αιχμής*

Από τον πίνακα 15 βλέπουμε ότι τη μικρότερη μέση τιμή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας έχει για τους χειμερινούς μήνες ο Ιανουάριος με 2,45 kWh, και για τους θερινούς μήνες με την αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση (Ιούνιος-Σεπτέμβρης) την έχει ο Σεπτέμβρης με 5,54kWh.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 15.** Η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/d), για διαφορετικές κλίσεις του συλλέκτη, και η μέση θερμοκρασία του αέρα (°C) στη διάρκεια των φωτεινών ωρών της ημέρας.

	<i>Ιαν.</i>	<i>Φεβρ.</i>	<i>Μάρτ.</i>	<i>Απρ.</i>	<i>Μάιος</i>	<i>Ιούν.</i>	<i>Ιούλ.</i>	<i>Αύγ.</i>	<i>Σεπτ.</i>	<i>Οκτ.</i>	<i>Νοέμ.</i>	<i>Δεκ.</i>
Κλίση 30°	2,22	2,94	3,74	4,82	5,74	6,19	6,42	6,37	5,54	4,12	3,00	2,30
Κλίση 45°	2,39	3,09	3,73	4,58	5,20	5,50	5,74	5,93	5,47	4,30	3,27	2,54
Κλίση 60°	2,45	3,07	3,56	4,11	4,45	4,59	4,82	5,20	5,10	4,26	3,36	2,65
Θερμοκρασία	10,1	10,8	12,1	17,0	20,7	25,0	27,3	27,0	23,5	19,2	15,4	11,9

Η μέση θερμοκρασία του αέρα στις φωτεινές ώρες της ημέρας είναι 10,1°C τον Ιανουάριο και 23,5° C τον Σεπτέμβρη. Δεχόμενοι ότι η θερμοκρασία των ηλιακών στοιχείων θα είναι περίπου 30° C περισσότερο, καταλήγουμε στους περίπου 40°C τον Ιανουάριο και 53,5° C τον Σεπτέμβρη, και από το διάγραμμα του σχήματος 18 βρίσκουμε τις αντίστοιχες τιμές του συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης 0,93 και 0,87 περίπου εκτιμάμε, πάντως, ότι είμαστε συντηρητικοί στις παραδοχές μας, διότι οι άνεμοι που επικρατούν στην περιοχή, θα εμποδίζουν κάπως την υπερθέρμανση των ηλιακών στοιχείων.

Ως προς τη ρύπανση των φ/β συλλεκτών, προβλέπουμε ότι, λόγω των ανέμων και της σκόνης, θα γίνεται περιοδική επιθεώρηση και ενδεχομένως

καθαρισμός της επιφάνειας τους, και δεχόμαστε για τον συντελεστή καθαρότητας την τιμή 0,9 όλες τις εποχές του έτους.

Εφαρμόζουμε τη σχέση (26) για να υπολογίσουμε την ιδανικά απαιτούμενη ισχύ αιχμής της φ/β εγκατάστασης:

$$P_{\alpha} (kW_p) = \frac{E(kWh/d) \times 1(kW/m^2)}{\Pi(kWh/m^2 \cdot d) \times \sigma_{\theta} \times \sigma_{\rho}}$$

και βρίσκουμε για τον Ιανουάριο, δηλαδή για τους χειμερινούς μήνες, την τιμή:

$$P_{\alpha\lambda} = \frac{116 \times 1}{2,45 \times 0,93 \times 0,9} = 56,6 kW_p$$

και για τον Σεπτέμβρη, δηλαδή για τους θερινούς μήνες, την τιμή:

$$P_{\alpha\theta} = \frac{270 \times 1}{5,54 \times 0,87 \times 0,9} = 62,2 kW_p$$

που την επιλέγουμε, ως μεγαλύτερη από τις δύο.

Παρατηρούμε ότι οι απαιτούμενες ισχύεις για τον χειμώνα και το καλοκαίρι περίπου συμπίπτουν. Άλλωστε, θα έπρεπε να το περιμένουμε ότι οι αυξημένες θερινές ηλεκτρικές καταναλώσεις θα αντισταθμιζόνταν κατά μεγάλο ποσοστό από την αυξημένη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, την ίδια εποχή. Η ικανοποιητική αυτή σύμπτωση δείχνει ότι η φ/β εγκατάσταση θα έχει μεγάλο βαθμό αξιοποίησης ολόκληρη τη διάρκεια του έτους.

Στη συνέχεια προχωράμε σε μια χονδρική εκτίμηση των απωλειών του συστήματος. Καταρχήν, επειδή η φ/β εγκατάσταση είναι αρκετά μεγάλης ισχύος και υψηλού βαθμού αξιοποίησης, δικαιολογείται να εξοπλιστεί με τις απαραίτητες διατάξεις ρύθμισης της ισχύος και της τάσης, που θα εξασφαλίσουν σταθερή λειτουργία και υψηλή τελική απόδοση του συστήματος. Έτσι, παίρνοντας ως συντελεστή απόδοσης 85% για τους συσσωρευτές, 90% για τον μετατροπέα συνεχούς ρεύματος και τη διάταξη MPPT, 90% για τον αναστροφέα Σ.Ρ./Ε.Ρ. και τον ενδεχόμενο μετασχηματιστή μαζί, και 5% για τις απώλειες στους αγωγούς του δικτύου, καταλήγουμε σε συνολικό συντελεστή απόδοσης:

$$a = 0,85 \times 0,9 \times 0,9 \times 0,95 = 0,65$$

Επομένως, η ελάχιστη ισχύς αιχμής της φ / β γεννήτριας πρέπει να είναι:

$$P' = \frac{P_{\alpha\theta}}{a} = \frac{62,6}{0,65} = 95,69 kW_p$$

γ. Το πλήθος και η οργάνωση των φ/β πλαισίων

Τα διαθέσιμα φ/β πλαίσια έχουν ισχύ αιχμής  $40W_p$  και παράγουν τάση 17,3 V. Το πλήθος τους, επομένως, για τη συγκρότηση της φ/β γεννήτριας, συνολικής ισχύος αιχμής  $95.690W_p$ , θα είναι:

$$\frac{95690}{40} \approx 2393 \text{ φ/β πλαίσια}$$

Αν ως τάση εξόδου της γεννήτριας θεωρήσουμε ότι θα έχουμε π.χ. 250 V, που είναι μια συνηθισμένη τιμή για τις φ/β εγκαταστάσεις, βλέπουμε ότι ο κάθε κλάδος στις φ/β συστοιχίες θα πρέπει να αποτελείται από:

$$\frac{250}{17,3} \approx 15 \text{ φ/β πλαίσια}$$

και επομένως η φ/β γεννήτρια θα αποτελείται από:

$$\frac{2393}{15} \approx 160 \text{ παράλληλους κλάδους}$$

Τελικά, λοιπόν, η φ /β γεννήτρια θα δίνει τάση:

$$15 \times 17,3V = 259,5V$$

και το συνολικό πλήθος των φ/β πλαισίων για τον σχηματισμό των 160 κλάδων θα είναι:

$$15 \times 160 = 2400 \text{ φ/β πλαίσια}$$

που ανεβάζει την ονομαστική αιχμή της φ/β γεννήτριας σε:

$$40 \times 2400 = 96000W_p = 96kW_p$$

Ο σχετικά μεγάλος αριθμός των φ/β πλαισίων, που βρήκαμε, θα πρέπει για τον καλύτερο έλεγχο της λειτουργίας τους, να κατανεμηθεί σε υποσυγκροτήματα συστοιχιών, π.χ. με 300 φ/β πλαίσια (20 κλάδους) στο καθένα.

δ. Η έκταση του φ/β πάρκου

Στη συνέχεια προχωράμε στον υπολογισμό του απαιτούμενου εμβαδού για την έκταση της γης που θα τοποθετηθούν οι ηλιακοί συλλέκτες.

Όπως δείχνει η φωτογραφία του σχήματος 30, τα φ/β πανέλα που θα χρησιμοποιηθούν αποτελούνται από 4 φ/β πλαίσια και το πλάτος τους είναι  $\gamma = 122$  cm. Το ίδιο πλάτος θα έχουν και τα στηρίγματα τους. Εξάλλου, η δυσμενέστερη περίπτωση κλίσης των συλλεκτών, από την άποψη της αλληλοσκίασής τους, είναι η περισσότερο όρθια τοποθέτηση, δηλαδή η γωνία  $\theta_\sigma = 60^\circ$ .

Το ύψος της κατασκευής στήριξης στο οριζόντιο φ/β πάρκο, όπου το  $\delta$  της σχέσης (28) έχει μηδενική τιμή, θα είναι:

$$v = \gamma \eta \mu \beta_\sigma = 122 \eta \mu 60^\circ = 105,7 \text{ cm}$$

Στον χάρτη του σχήματος 35 βρίσκουμε ότι το γεωγραφικό πλάτος του Αγ. Ευστράτιου είναι περίπου  $39,5^\circ$ , για το οποίο το διάγραμμα του σχήματος 25 δίνει αντίστοιχη τιμή του λόγου της ελεύθερης απόστασης προς το ύψος της στήριξης περίπου  $a/v = 2,8$ . Δηλαδή:

$$a = 2,8v = 2,8 \times 105,7 = 296 \text{ cm}$$

και σύμφωνα με τη σχέση (6.8) η ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση ανάμεσα από τις σειρές των φ/β συστοιχιών είναι:

$$\varepsilon = a + \gamma \sigma \nu \beta_\sigma = 296 + 122 \sigma \nu 60^\circ = 357 \text{ cm}$$

Αφού το κάθε φ/β πανέλο των 4 πλαισίων έχει διαστάσεις 122cm x 122cm και η φ/β γεννήτρια αποτελείται από:

$$\frac{2400}{4} = 600 \text{ φ / β πανέλα}$$

η συνολική τους επιφάνεια θα είναι:

$$600 \times 1,22 \times 1,22 \approx 900 \text{ m}^2$$

και η οριζόντια προβολή τους  $S_0$  θα είναι:

$$S_0 = 900 \text{ m}^2 \times \sigma \nu 60^\circ = 450 \text{ m}^2$$

Επομένως, το εμβαδόν της οριζόντιας έκτασης  $S_\varepsilon$  που θα χρειαστεί για την ανάπτυξη των φ/β συλλεκτών θα ισούται με:

$$S_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\gamma \sigma \nu \beta_\sigma} \times 450 = \frac{357}{122 \sigma \nu 60^\circ} \times 450 = 2633,6 \text{ m}^2$$

που το στρογγυλεύουμε σε περίπου  $3000 \text{ m}^2$ , ώστε να υπάρχει μια περιμετρική ελεύθερη ζώνη, καθώς και αρκετές οδοί πρόσβασης προς τους φ/β συλλέκτες, ανάμεσα στις σειρές των συστοιχιών, για την άνετη επιθεώρηση και συντήρηση τους.

### 5. Οι συσσωρευτές

Θεωρούμε ότι οι συσσωρευτές του συστήματος θα έχουν τάση  $V = 200\text{ V}$ , που συνδυάζεται ικανοποιητικά με την τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας, παίρνοντας υπόψη τις απώλειες και την απαιτούμενη αυξημένη τάση φόρτισης. Επίσης, θεωρούμε ότι το βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών θα είναι  $\beta = 80\%$ , ο συντελεστής απόδοσης  $\alpha = 85\%$ , και ότι θα πρέπει να αποθηκεύουν επαρκή ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψουν τις μέσες καταναλώσεις τουλάχιστον 6 διαδοχικών χειμερινών ή 3 διαδοχικών θερινών ημερών. Δηλαδή, στην πρώτη περίπτωση να έχουν ικανότητα αποθήκευσης:

$$E_{\chi} = 6 \times 116\text{kWh} = 696\text{kWh}$$

και στη δεύτερη περίπτωση:

$$E_{\theta} = 3 \times 270\text{kWh} = 810\text{kWh}$$

Επιλέγουμε τη μεγαλύτερη από τις παραπάνω τιμές και από τη σχέση (7.6) βρίσκουμε ότι η ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών θα πρέπει να είναι:

$$C_N = \frac{E}{\alpha \times \beta \times V} = \frac{810 \times 10^3 \text{Wh}}{0,85 \times 0,8 \times 200\text{V}} = 5956\text{Ah}$$

Στη συνέχεια, από τη σχέση (36) βρίσκουμε ότι η ισχύς που μπορούν να δίνουν οι συσσωρευτές μας επί το παραπάνω μέγιστο διάστημα των 6 διαδοχικών ημερών είναι περίπου:

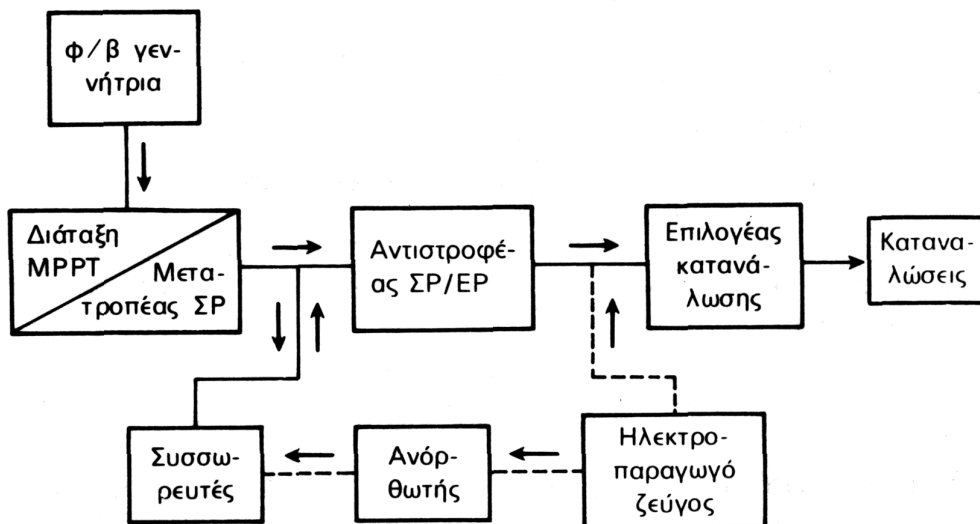
$$P = \frac{\beta \times C_N \times V}{24 \times \mu} = \frac{0,8 \times 5956 \times 200}{24 \times 6} \approx 6,6\text{kW}$$

Όπως βλέπουμε στον πίνακα 38, σε περίπτωση ταυτόχρονης ζήτησης, η διαθέσιμη ισχύς των 6,6kW επαρκεί για την τροφοδότηση του αναμεταδότη και της ψυκτικής εγκατάστασης, που χαρακτηρίστηκαν ως καταναλώσεις πρώτης προτεραιότητας.

### 6. Διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σύστημα θα έχει μετατροπέα συνεχούς ρεύματος, διάταξη MRPT, αναστροφέα Σ.Ρ./Ε.Ρ. και ενδεχομένως μετασχηματιστή, αν ο αναστροφέας δεν δίνει το απαιτούμενο τριφασικό ρεύμα 220/380V, 50 Hz. Επίσης, θα έχει έναν αυτόματο επιλογέα της κατανομής του φορτίου, ώστε αν χρειαστεί, να επιβάλλεται μια ιεράρχηση της τροφοδότησης των καταναλώσεων με την προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας: (1) Αναμεταδότης, (2) Ψυκτική εγκατάσταση, (3) Κατοικίες, (4) Αντλίες νερού, (5) Κοινοτικός φωτισμός. Οι συνολικές ισχύεις των παραπάνω διατάξεων θα είναι αντίστοιχες με τη μέγιστη ισχύ του συστήματος, που όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ουσιαστικά συμπίπτει με την ισχύ αιχμής του (96 kW). Θα είναι όμως κατανεμημένες σε περισσότερα μικρότερα μεγέθη, ώστε να συνδέεται κάθε φορά ο απαιτούμενος αριθμός τους για την κάλυψη της εκάστοτε πραγματικής ισχύος, και έτσι να λειτουργούν όσο το δυνατό πιο κοντά στην ονομαστική τους ισχύ και να έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης. Π.χ. θα χρησιμοποιηθούν 4 μετατροπείς συνεχούς ρεύματος των 25kW και 2 αναστροφείς Σ.Ρ./Ε.Ρ. των 50 kW, που είναι συνηθισμένα μεγέθη των κατασκευών σειράς. Το σχήμα 41 δείχνει ένα γενικό διάγραμμα του συστήματος από τη φ/β γεννήτρια μέχρι την έξοδο προς τις

κατα  
ναλώ  
σεις.





**Σχήμα 41.** Γενικό διάγραμμα και ροή της ενέργειας στο φωτοβολταϊκό σύστημα του παραδείγματος σχεδιασμού

### 7. Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος

Το σύστημα συμπληρώνεται με μια βοηθητική πηγή ηλεκτροπαραγωγής, για την αντιμετώπιση ανώμαλων καταστάσεων, όπως μια σοβαρή βλάβη του συστήματος, ένα υπερβολικά παρατεταμένο διάστημα συνεχούς συννεφιάς κλπ. Συνήθως, για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ηλεκτροπαραγωγό ζεύγη που καίνε πετρέλαιο ντήζελ ή βενζίνη και μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα ή και παράλληλα με τη φ/β γεννήτρια.

Η ισχύς του ζεύγους πρέπει να επαρκεί για την ηλεκτροδότηση των καταναλώσεων πρώτης προτεραιότητας, καθώς και για τη φόρτιση των συσσωρευτών του συστήματος, διαμέσου ενός ανορθωτή, μέσα σε ένα σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, π.χ. σε δύο 24ωρα. Για την ικανοποίηση της πρώτης απαίτησης, χρειάζεται ισχύς 1,5kW για τον αναμεταδότη και 5,0 kW για τη ψυκτική εγκατάσταση. Για τη δεύτερη απαίτηση βρίσκουμε πάλι από τη σχέση (36) την τιμή:

$$P = \frac{\beta \times C_N \times V}{24 \times \mu} = \frac{0,8 \times 5956 \times 200}{24 \times 2} \approx 20kW$$

Επομένως, το βοηθητικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος θα πρέπει να έχει τουλάχιστον ισχύ:

$$1,5 + 5,0 + 20 = 26,5 kW$$

που τη στρογγυλεύουμε στα 30 kW.

### 8. Συγκέντρωση των αποτελεσμάτων

Με την επιλογή της ισχύος του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους συμπληρώθηκαν οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό του αυτόνομου φ/β συστήματος, τα κυριότερα αποτελέσματα του οποίου συγκεντρώθηκαν στον πίνακα 16.

Θα ήταν, πάντως, χρήσιμη η διεξαγωγή μιας παραπέρα διερεύνησης σχετικά με τις αντιστοιχίες ηλεκτρικής κατανάλωσης - ηλιακής ακτινοβολίας σε ολόκληρη τη διάρκεια του έτους. Δηλαδή να εξεταστεί μήπως, εκτός από τους μήνες Ιανουάριο και Σεπτέμβρη που πάρθηκαν σαν υπόδειγμα, υπάρχουν άλλοι μήνες

όπου ενδεχομένως η ηλιακή ακτινοβολία, με τη δοσμένη επιφάνεια συλλεκτών, δεν καλύπτει την κατανάλωση. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να αυξηθεί κατάλληλα το πλήθος των φ/β πλαισίων. Επίσης, θα ήταν ίσως σκόπιμη μια λεπτομερέστερη εκτίμηση των διαφόρων απωλειών του συστήματος, από τη φ/β γεννήτρια μέχρι τους καταναλωτές.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 16.** Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος.

<i>Χαρακτηριστικό</i>	<i>Τιμή</i>
Ισχύς αιχμής της φ/β γεννήτριας	96 kW <sub>D</sub>
Πλήθος φ/β πλαισίων, ισχύος αιχμής 40kW <sub>p</sub>	2400
Κλίση των συλλεκτών	30°/60°
Τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας	259,5 V
Χωρητικότητα αποθήκευσης των συσσωρευτών	810 kWh
Ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών	5956 Ah
Τάση εξόδου των συσσωρευτών	200 V
Ισχύς των μετατροπέων Σ.Ρ.	4x25 kW
Ισχύς των αντιστροφών Σ.Ρ./Ε.Ρ.	2x50 kW
Ισχύς του βοηθητικού ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους	30 kW
Εδαφική έκταση για τις φ/β συστοιχίες	30007 6000 m <sup>2</sup>

Ως προς τις μελλοντικές εξελίξεις, μπορούμε να προβλέψουμε ότι η ηλεκτροδότηση του χωριού θα οδηγήσει σύντομα στη βελτίωση των όρων ζωής των κατοίκων, την αύξηση του πληθυσμού και την ενεργοποίηση των διαφόρων δραστηριοτήτων, που συνεπάγονται αντίστοιχη αύξηση της ηλεκτρικής ζήτησης. Αν θεωρήσουμε ως ενδεχόμενο τον διπλασιασμό της ισχύος της φ/β εγκατάστασης, θα υποδείξουμε να κρατηθεί ελεύθερος χώρος γης, δίπλα στις φ/β συστοιχίες, όμοιας έκτασης (δηλαδή 3000 m<sup>2</sup>), για τη μελλοντική επέκταση της φ/β γεννήτριας. Επίσης, ανάλογοι χώροι θα πρέπει να υπάρχουν και στο κτίριο της φ/β εγκατάστασης, για την τοποθέτηση των πρόσθετων συσσωρευτών, των διατάξεων ρύθμισης της ισχύος κλπ.

#### *9. Οδηγίες λειτουργίας και συντήρησης*

Από τις παραδοχές που κάναμε για τους υπολογισμούς μας, αλλά και από την απλή λογική, μπορούμε να διατυπώσουμε τις παρακάτω στοιχειώδεις οδηγίες λειτουργίας και συντήρησης για την καλή και αποδοτική λειτουργία του συστήματος:

- α. Καθαρισμός των επιφανειών των συλλεκτών μια φορά το μήνα.
- β. Αναπροσαρμογή της κλίσης των συλλεκτών δύο φορές τον χρόνο (Μάρτη και Οκτώβριο).
- γ. Έλεγχος και ενδεχόμενη συμπλήρωση της στάθμης του ηλεκτρολύτη (θειικό οξύ) στους συσσωρευτές κάθε 3 μήνες.
- δ. Δοκιμαστική λειτουργία του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, κάθε βδομάδα.

#### *10. Συγκρίσεις*

Συνήθως, όταν φτάνουμε στο αριθμητικό αποτέλεσμα μιας μελέτης ή ενός τεχνικού σχεδιασμού, εξετάζουμε αν αυτό είναι ρεαλιστικό και πραγματοποιήσιμο, ώστε να ελέγξουμε έμμεσα αν έχουμε κάνει κάποιο χοντρό λάθος, ή και να αποφύγουμε να προχωρήσουμε στη διατύπωση μιας παράλογης πρότασης. Η κριτική αυτή των αποτελεσμάτων μας στηρίζεται στην εμπειρία και στην πληροφόρηση σχετικά με άλλες ανάλογες περιπτώσεις.

Έτσι, στον πίνακα 17 έχουμε συγκεντρώσει τα κύρια γνωστά χαρακτηριστικά 7 φ/β εγκαταστάσεων, περίπου όμοιων με το σύστημα που μελετάμε. Συγκεκριμένα, κατά σειρά μεγέθους, η καθεμιά από τις φ/β εγκαταστάσεις του πίνακα έχει το παρακάτω αντικείμενο:

- 1) Ηλεκτροδότηση του μικρού χωριού Vester στη Δανία, με μεταβαλλόμενο πληθυσμό σε αγροικίες και παραθεριστικές κατοικίες.
- 2) Συμμετοχή κατά περίπου 17% στην ηλεκτροδότηση της Κύθνου στις Κυκλάδες, (2000 κάτοικοι), σε συνδυασμό με ένα τοπικό ηλεκτροπαραγωγό σταθμό ντήζελ ισχύος 650 kW, και 5 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 100kW. Δηλαδή το φ/β σύστημα της Κύθνου δεν είναι αυτόνομο.
- 3) Ηλεκτροδότηση ενός μικρού οικισμού στην πολιτεία Γιούτα των Η.Π.Α., με 5 κατοικίες και έναν ξενώνα.
- 4) Ηλεκτροδότηση του μικρού νησιού Alicudi, κοντά στη Σικελία, με 120 μόνιμους κατοίκους σε 50 κατοικίες, και μερικές εκατοντάδες παραθεριστές το καλοκαίρι.

- 5) Ηλεκτροδότηση του χωριού Αγία Ρούμελη στη Νότια Κρήτη, με 34 κατοικίες, 7 μικρά ξενοδοχεία και 8 μικρά καταστήματα.
- 6) Ηλεκτροδότηση του μικρού χωριού Rondulinu στην Κορσική, με 7 κατοικίες τον χειμώνα και 16 το καλοκαίρι, μια στάνη με αιγοπρόβατα, ένα μικρό μηχανουργείο και μια αντλία νερού.

Συγκρινόμενα μεγέθη	(1) Δανία	(2) Κύθνος	(3) Γιούτα	(4) Σικελία	(5) Κρήτη	(6) Κορσική	(7) Γουιάνα	(8) Το σύνολό μας
Ισχύς αιχμής της φ/β γεννήτριας, kW <sub>p</sub>	100	100	100	76	50	44	35	96
Συσσωρευτές								
Ονομαστική χωρητικότητα, Ah	4000	2400	3500	600	1500	3000	1500	5956
Χωρητικότητα αποθήκευσης, kWh	1000	600	750	600	360	540	410	810
Μέση ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση								
Χειμερινή, kWh/d	—	—	—	—	64	53	46	116
Θερινή, kWh/d	—	—	—	—	179	108	108	270
Μέση ετήσια, kWh/d	410	472	394	278	—	—	—	—
Αναγωγές ανά μονάδα ημερήσιας ηλεκτρικής κατανάλωσης (kWh/d)								
α) Της ισχύος αιχμής, $\frac{kW_p}{kWh/d}$	0,24	0,21	0,25	0,27	0,28	0,41	0,32	0,36
β) Της χωρητ. των συσσωρευτών, $\frac{kWh}{kWh/d}$	2,4	1,3	1,9	2,2	2,0	5,0	3,8	3,0

**ΠΙΝΑΚΑΣ 17.** Σύγκριση της ισχύος αιχμής της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, της χωρητικότητας αποθήκευσης των συσσωρευτών, και της αναγωγής τους ως προς την ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση του υπό μελέτη συστήματος, με τα αντίστοιχα μεγέθη 7 άλλων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων.

7) Ηλεκτροδότηση του εντελώς απομονωμένου χωριού Kaw στη Γαλλική Γουιάνα (Νότια Αμερική), με 70 κατοίκους που ασχολούνται με τη γεωργία, το ψάρεμα και

το κυνήγι.

Παρατηρώντας τις τιμές του πίνακα, διαπιστώνουμε με αρκετή ικανοποίηση ότι, ανάλογα με τις ηλεκτρικές καταναλώσεις της κάθε περίπτωσης, τα αποτελέσματα μας που αναγράφονται στη στήλη (8), είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τα συγκρινόμενα συστήματα.

### *11. Προϋπολογισμός κόστους*

Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός του φ/β συστήματος μας δίνει τα αναγκαία τεχνικά στοιχεία για να προχωρήσουμε σε έναν χονδρικό προϋπολογισμό κόστους, ώστε να έχουμε μια πρώτη εικόνα της απαιτούμενης δαπάνης για την πραγματοποίηση της υπόψη φ/β εγκατάστασης. Θεωρούμε, καταρχήν, ότι ισχύουν οι παρακάτω τιμές μονάδας για τον κάθε παράγοντα κόστους της εγκατάστασης.

1. φ/β πανέλα με συντελεστή κάλυψης  $\sigma_k \ll 0,9:146,74 \text{ €/m}^2$ . Επομένως το κόστος του κάθε χρησιμοποιούμενου πάνελου, στην περίπτωση μας, είναι  $1,22 \text{ m} \times 1,22 \text{ m} \times 146,74 \text{ €/m}^2 \times 220,10 \text{ €}$ .
2. Αρθρωτή κατασκευή στήριξης των πανέλων, μαζί με τις καλωδιώσεις των συστοιχιών και την αντικεραυνική προστασία:  $14,67 \text{ €/m}^2$ .
3. Συσσωρευτές:  $58,69 \text{ €/kWh}$  χωρητικότητας.
4. Ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος (μετατροπείς, MPPT, αντιστροφείς κ.λ.π.) συνολικά, για τα υπόψη μεγέθη:  $293,47 \text{ €/kW}$ .
5. Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ντήζελ, για τα υπόψη μεγέθη:  $146,74 \text{ €/kW}$ .
6. Εδαφική έκταση:  $586,94 \text{ €/στρέμα}$ , δηλαδή  $0,59 \text{ €/m}^2$ .
7. Κτίριο για τη στέγαση των συσσωρευτών και των ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος, δαπάνες διαμόρφωσης και περίφραξης της έκτασης, και συμπληρωματικός εξοπλισμός (πίνακες χειρισμών, όργανα μετρήσεων, συνεργείο συντήρησης κλπ.), συνολικά:  $35.216,43 \text{ €}$ .

Μεταφέρουμε τις τιμές μονάδας και τα αντίστοιχα μεγέθη στον πίνακα 18 και βρίσκουμε το συνολικό προϋπολογιζόμενο κόστος της εγκατάστασης.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 18.** Προϋπολογισμός του κόστους της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

<i>Παράγοντας κόστους</i>	<i>Κόστος</i>
φ/β πάνελα: 600 x 220,10 € =	132.061,62 €
Κατασκευή στήριξης κλπ.: 900m <sup>2</sup> x 14,67 €/m <sup>2</sup> =	13.206,16 €
Συσσωρευτές: 810kWh x 58,69 €/kWh =	47.542,19 €
Ηλεκτρονικά ισχύος: 96kW x 293,47 €/kW =	28.173,15 €
Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος: 30kW x 146,74 €/kW =	4.402,05 €
Εδαφική έκταση: 6000m <sup>2</sup> x 0,59 €/m <sup>2</sup> =	3.521,64 €
Κτίριο κλπ.:	35.216,43 €
Σύνολο	264.123,25 €

# ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

## Τα Βασικά Ερωτήματα

Για τη λήψη των αποφάσεων που θα οδηγήσουν και θα εξασφαλίσουν την ορθολογική πραγματοποίηση οποιουδήποτε σημαντικού τεχνικού έργου, επομένως και ενός φ/β συστήματος, αναζητούμε τις θεμελιωμένες απαντήσεις σε ορισμένα βασικά ερωτήματα. Στη γενικότερη μορφή, θα πρέπει να πεισθούμε, αλλά να πείσουμε και τους άλλους, **γιατί** θα κάνουμε το έργο, **πώς** και **με τι** θα το κάνουμε. Η διατύπωση των ερωτήσεων και των αντίστοιχων απαντήσεων αποτελεί το αντικείμενο της ολοκληρωμένης μελέτης\* του έργου.

Ειδικότερα, στην περίπτωση ενός φ/β συστήματος, τα παραπάνω ερωτήματα και οι απαντήσεις τους παίρνουν την εξής μορφή:

### ***1. Ποιος είναι ο στόχος του συστήματος;***

Ξεκινάμε με τη διατύπωση του προβλήματος. Δηλαδή, καταγράφουμε τις ηλεκτρικές ανάγκες που ζητάμε να ικανοποιήσει το σύστημα, την απαιτούμενη αξιοπιστία και αυτοδυναμία κλπ, σε σχέση με τις τοπικές συνθήκες και τα κλιματολογικά δεδομένα.

### ***2. Πώς θα πραγματοποιηθεί ο στόχος του συστήματος;***

Αναζητούμε τη βέλτιστη τεχνικά και οικονομικά λύση του προβλήματος, καθορίζουμε τα βασικά μεγέθη του συστήματος (ισχύς αιχμής και συγκρότηση της φ/β γεννήτριας, χωρητικότητα των συσσωρευτών, ισχύς της βοηθητικής πηγής κλπ.) και συγκρίνουμε με εναλλακτικές λύσεις.

### ***3. Ποια θα είναι τα κατασκευαστικά μέρη του συστήματος;***

Ύστερα από έρευνα στην αγορά και έλεγχο των προσφορών, συντάσσουμε τις ποσοτικές και ποιοτικές προδιαγραφές του εξοπλισμού για τα διάφορα μέρη του συστήματος και ετοιμάζουμε τα λεπτομερειακά σχέδια της εγκατάστασης. Επίσης διατυπώνονται οι όροι της σύμβασης για την προμήθεια του εξοπλισμού, για την εκτέλεση των κατασκευών και για την παραλαβή του έργου. Ακόμη, θα πρέπει να

---

\* Υπενθυμίζουμε ότι οι όροι μελέτη και σχεδιασμός έχουν πάρει ουσιαστικά ταυτόσημη έννοια, και επομένως θα τις χρησιμοποιούμε εδώ αδιακρίτως.

προβλεφθούν οι ποινικές ρήτρες και αποζημιώσεις για την περίπτωση που δεν ανταποκριθεί ο εξοπλισμός στις προδιαγραφές ή που δεν τηρηθούν οι όροι της σύμβασης.

Ένα από τα πιο σημαντικά συμπεράσματα που θα προκύψουν από τη μελέτη μας, θα αφορά στην επιλογή της κατηγορίας που θα ανήκει το φ/β σύστημα. Ανάλογα με τον βαθμό αυτοδυναμίας των φ/β γεννητριών και τη συνεργασία τους με άλλες τοπικές ή κεντρικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Αυτόνομα φ/β συστήματα, που τροφοδοτούν ορισμένες ηλεκτρικές καταναλώσεις αυτοδύναμα, χωρίς να στηρίζονται ουσιαστικά και σε άλλες ηλεκτρικές πηγές ούτε να αντλούν συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια από ηλεκτρικά δίκτυα.
2. Αυτόνομα υβριδικά συστήματα, όπου η παραγόμενη φ/β ενέργεια αλληλοσυμπληρώνεται με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες πηγές, ανανεώσιμες ή όχι, όπως οι ανεμογεννήτριες και τα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγη.
3. Φ/β συστήματα σε σύνδεση και συνεργασία με το τοπικό ή με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο.

Στη συνέχεια δίνεται μια περιγραφή από χρήσιμα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία για

τη μελέτη των φ/β συστημάτων που ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες.

## **Το Αυτόνομο Σύστημα**

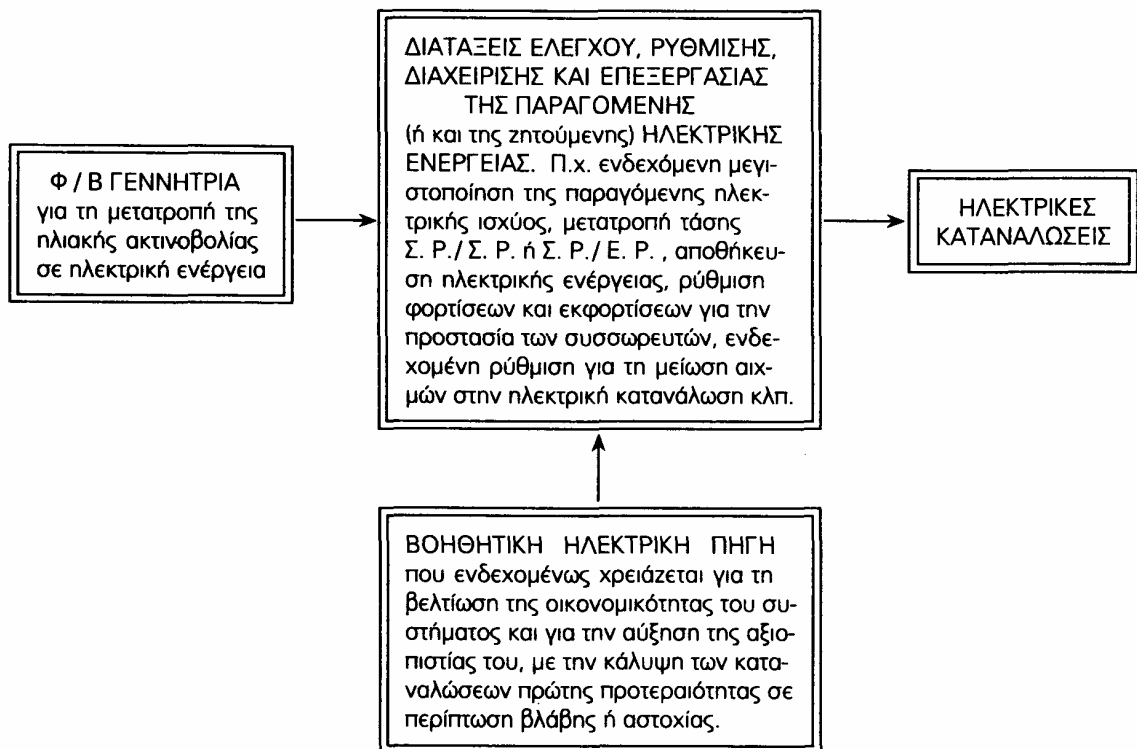
### **Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός**

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά τώρα θα επαναλάβουμε με περισσότερες λεπτομέρειες και πρακτικές υποδείξεις, και θα επιδιώξουμε να δώσουμε αφορμές για πρόσθετους δημιουργικούς προβληματισμούς, σε ένα αυτόνομο φ/β σύστημα, η φ/β γεννήτρια και οι ηλεκτρικές καταναλώσεις αλληλοσυνδέονται διαμέσου διατάξεων ελέγχου και διαχείρισης της ενέργειας. Συχνά, το σύστημα συμπληρώνεται με βοηθητική ηλεκτρική πηγή για την αύξηση της αξιοπιστίας του και την αντιμετώπιση ακραίων καταστάσεων, όπως η ασυνήθης και διαρκής χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία και η



περιπτώσιακά υψηλή ηλεκτρική κατανάλωση. Επομένως, το γενικό διάγραμμα ενός αυτόνομου φ/β συστήματος έχει τη μορφή του σχήματος 41, που είναι αντίστοιχο προς το σχήμα 34 του προηγούμενου κεφαλαίου.

Αναφέρθηκε ήδη ότι το πρώτο βήμα στην εκπόνηση της μελέτης μιας φ/β εγκατάστασης είναι ο προκαταρκτικός σχεδιασμός του συστήματος, που θα καταλήξει καταρχήν στην εκτίμηση της απαιτούμενης ισχύος αιχμής της φ/β γεννήτριας και σε ορισμένα άλλα μεγέθη, όπως η χωρητικότητα των συσσωρευτών, τα οποία χρειάζονται για τη σύνταξη μιας μελέτης σκοπιμότητας για την εγκατάσταση. Προηγουμένως, θα πρέπει να έχει εξαντληθεί κάθε περιθώριο δυνατότητας εξοικονόμησης στις ηλεκτρικές καταναλώσεις του συστήματος, με τη χρησιμοποίηση θερμικής ενέργειας, όπου τούτο είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτό. Έτσι, π.χ. σε ένα οικιακό σύστημα, πέρα από την αποφυγή του μαγειρέματος και της θέρμανσης χώρων με ηλεκτρικές συσκευές, θα εξετάζεται κάθε άλλη περίπτωση εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η δυνατότητα για το ηλεκτρικό πλυντήριο να χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια μόνον για τον κινητήρα, την αντλία και τον αυτοματισμό του, ενώ η θέρμανση του νερού του πλυντηρίου να γίνεται από χωριστή θερμική πηγή, π.χ. από έναν ηλιακό



θερμοσίφωνα.

**Σχήμα 41.** Γενικό διάγραμμα ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος και συνοπτική περιγραφή του προορισμού και της σκοπιμότητας των διαφόρων τμημάτων του.

Τα ζητούμενα μεγέθη στην προκαταρκτική μελέτη είναι κυρίως το πλήθος και ο τύπος των φ/β πλαισίων, η χωρητικότητα των συσσωρευτών, η ισχύς της βοηθητικής πηγής, το μέγεθος των διατάξεων ελέγχου, η έκταση του φ/β πεδίου και η χονδρική εκτίμηση του κόστους του συστήματος με σύγκριση προς τις αντίστοιχες εναλλακτικές λύσεις. Πέρα από τα συμπεράσματα για τη μελέτη σκοπιμότητας που θα προέλθουν από τα παραπάνω τεχνικά και οικονομικά μεγέθη, θα αξιολογηθεί παράλληλα η βαρύτητα των περιβαλλοντικών και άλλων κοινωνικών κριτηρίων και επιπτώσεων, που συνδέονται με την εξεταζόμενη εγκατάσταση.

Τα αναγκαία ελάχιστα στοιχεία και δεδομένα για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό του συστήματος αφορούν στους εξής τομείς:

1. Στις ηλεκτρικές καταναλώσεις του συστήματος και στον βαθμό της απαιτούμενης αξιοπιστίας για την κάλυψη τους.
2. Στην ηλιακή ακτινοβολία και στις γενικές κλιματικές συνθήκες στην τοποθεσία της φ/β γεννήτριας.
3. Στο κόστος προμηθείας και λειτουργίας των τμημάτων του συστήματος και για λόγους σύγκρισης, στο αντίστοιχο κόστος εναλλακτικών ανταγωνιστικών συστημάτων.

Έτσι, θα πρέπει να αναζητηθούν και να αξιολογηθούν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, πληροφορίες και εκτιμήσεις που απαντούν σε ερωτήματα σχετικά με την εξεταζόμενη ηλεκτροδότηση ή, γενικότερα, σχετικά με την περιοχή της εγκατάστασης του συστήματος. Ειδικότερα, για τα στοιχεία των τριών τομέων στοιχείων που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα ερωτήματα που διατυπώνονται στοχεύουν σε πληροφορίες όπως:

- 1α. Η μέση ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση στις διάφορες εποχές του έτους.
- 1β. Οι αιχμές ισχύος στη ζήτηση.
- 1γ. Οι μελλοντικές ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύος.
- 1δ. Η απαιτούμενη αξιοπιστία στη λειτουργία του συστήματος.

- 2α. Η μέση ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας (για διάφορες κλίσεις του συλλέκτη) και η μέση θερμοκρασία στις φωτεινές ώρες της ημέρας, στις διάφορες εποχές του έτους.
- 2β. Οι τοπικές κλιματικές συνθήκες και κυρίως το πιθανό διάστημα των περιόδων με συνεχείς ημέρες νέφωσης, για τον καθορισμό της αναγκαίας αυτοδυναμίας, που θα εξασφαλιστεί με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στους συσσωρευτές.
- 2γ. Η θέση, η διαμόρφωση και οι ιδιομορφίες του χώρου του φ/β πεδίου και της ευρύτερης περιοχής. Π.χ. απόσταση από το εθνικό ή το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, ύπαρξη οδού προσπέλασης ή μεταφορά των υλικών με πλωτό μέσο (και τι είδους), με ζώα, με ελικόπτερο κλπ., επίπεδο τεχνικής ανάπτυξης και περιβαλλοντική ευαισθησία της περιοχής.
- 3α. Η διαθεσιμότητα στην αγορά και το κόστος του εξοπλισμού του συστήματος (φ/β πλαίσια, συσσωρευτές, διατάξεις και όργανα ελέγχου κλπ.) καθώς και το κόστος των απαιτούμενων κτιριακών και λοιπών κατασκευών (κτίριο συσσωρευτών, στηρίγματα φ/β πλαισίων, οδοί, περίφραξη).
- 3β. Η διάρκεια της ζωής και οι ετήσιες δαπάνες συντήρησης του εξοπλισμού του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη και την ανάγκη μετάβασης ειδικευμένων τεχνικών και μεταφοράς εξαρτημάτων σε περίπτωση βλάβης.
- 3γ. Το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας των εναλλακτικών ανταγωνιστικών λύσεων για τη συγκεκριμένη ηλεκτροδότηση.

## **Οικονομικά Στοιχεία**

Ανεξάρτητα από τα περιβαλλοντικά και άλλα πλεονεκτήματα, η απόφαση για την επιλογή της φ/β ενέργειας για την αντιμετώπιση μιας ηλεκτροδότησης προφανώς δεν θα πρέπει καθόλου να αγνοεί την οικονομική αξιολόγηση της πρότασης και τη σύγκριση με άλλες εφικτές λύσεις. Ειδικότερα, η ηλεκτροδότηση καταναλώσεων μικρής ή σχετικά μέτριας ισχύος, πέρα από τη σύνδεση με το ενδεχομένως υπάρχον δίκτυο, μπορεί να στηριχθεί σε μια πολύ μεγάλη ποικιλία διατάξεων και συστημάτων παραγωγής ή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

Για μια στοιχειώδη εποπτεία της τεχνολογικής αυτής περιοχής και για την παροχή μιας δυνατότητας σύγκρισης, αναγράφονται παρακάτω ορισμένα χρήσιμα

οικονομικά στοιχεία για εναλλακτικές λύσεις σε εφαρμογές όπως η ηλεκτροδότηση τηλεπικοινωνιακών αναμεταδοτών, φάρων, αγροτικών αντλητικών συγκροτημάτων, απομονωμένων κατοικιών, στρατιωτικών μονάδων, μικρών οικισμών κλπ. Είναι αυτονόητο ότι για όλα τα αναγραφόμενα μεγέθη (κόστος, παραγωγή, διάρκεια ζωής κλπ.) οι αντίστοιχες τιμές είναι ενδεικτικές και μπορεί να κυμαίνονται κατά περίπτωση σε μεγάλα όρια.

1. **Φ/β γεννήτριες.** Κόστος αγοράς (χωρίς συσσωρευτές και συστήματα ελέγχου): 1467,35 € ανά kW<sub>p</sub>. Ετήσια παραγωγή σε περιοχή μέτριας ηλιοφάνειας: 1000kWh ανά εγκατεστημένο kW<sub>p</sub>. Ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης: 1 % του κόστους αγοράς. Διάρκεια ζωής: 30 έτη.

2. **Ανεμογεννήτριες.** Κόστος αγοράς 1.467,35 € ανά kW. Ετήσια παραγωγή σε σχετικά ευνοϊκό αιολικό πεδίο (μέση ταχύτητα ανέμου περίπου 8 m/s): 3.000 kWh ανά εγκατεστημένο kW. Ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης: 2% του κόστους αγοράς. Διάρκεια ζωής: 20 έτη.

3. **Συσσωρευτές μολύβδου** (για ανεξάρτητη ηλεκτροδότηση ή για τη συμπλήρωση φ/β και αιολικών σταθμών). Κόστος αγοράς: 58,69 € ανά αποθηκευμένο kWh. Ετήσιες δαπάνες συντήρησης: 2% του κόστους αγοράς. Διάρκεια ζωής: 1.500 κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης ή περίπου 4 έτη (σε ειδικές περιπτώσεις μέχρι 20 έτη).

4. **Ηλεκτροπαραγωγό ζεύξη (H/Z)**, με καύσιμο πετρέλαιο, ντίζελ ή μαζούτ, ισχύος περίπου από 3 μέχρι 1.000 KW. ή και μεγαλύτερα μέχρι 40 MW. Κόστος αγοράς: 146,74 €/kW. Διάρκεια ζωής: 15 έτη. Κόστος καυσίμου: 0,28 € ανά λίτρο. Κατανάλωση καυσίμου για λειτουργία κοντά στην ονομαστική ισχύ και απόδοση 25%: 0,15 λίτρα/kWh. Το κόστος μεταφοράς του καυσίμου εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες και σε ακραίες περιπτώσεις (π.χ. μεταφορά με ελικόπτερο) μπορεί να φθάσει σε πολύ μεγάλες τιμές. Για μικρές ισχύεις, μέχρι 100kW, χρησιμοποιούνται επίσης H/Z που αντί για μηχανές ντίζελ έχουν βενζινοκινητήρες και καίνε ως καύσιμο βενζίνη, ενώ για μεγαλύτερες ισχύεις, μέχρι περίπου 250 MW, χρησιμοποιούνται H/Z με αεριοστροβίλους.

5. **Επαναφορτιζόμενες μπαταρίες νικελίου/καδμίου.** Κόστος αγοράς: 293,47 €/kWh. Διάρκεια ζωής: 5.000 κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης ή περίπου 5 έτη.

6. **Μεγάλες μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες** κοινού τύπου (ψευδαργύρου) και μιας χρήσης. Κόστος αγοράς: 5,87 €/kWh. Παροχή ενέργειας μέχρι περίπου 100 kWh. Είναι βαριές και ογκώδεις (περίπου 30kg και 5 λίτρα ανά kWh).

Συμπληρωματικά θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες συμβατικές μονάδες είναι, πολύ χονδρικά, περίπου 0,009 €/kWh στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, περίπου 0,012 €, 0,015 € ή 0,023 €/kWh στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς που καίνε λιγνίτη, άνθρακα ή πετρέλαιο, αντίστοιχα, και περίπου 0,044 €/kWh στους σταθμούς με αεριοστροβίλους. Στους πυρηνικούς σταθμούς το κόστος είναι περίπου 0,015 €/kWh.

Για τις μικρότερης ισχύος ηλεκτροπαραγωγές μονάδες, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται συνήθως στα ελληνικά νησιά, το κόστος παραγωγής είναι περίπου 0,029 €/kWh για καύσιμο μαζούτ και περίπου 0,044 €/kWh για καύσιμο ντήζελ.

Σημειώνεται επίσης ότι το κόστος κατασκευής εναέριας γραμμής μέσης τάσης (15 kV ή 20 kV), σε περιοχή με καλή οδική πρόσβαση, είναι περίπου 14.673,51 €/km. Όμοιο είναι το κόστος κατασκευής και εναέριας γραμμής χαμηλής τάσης (220/380 V). Το κόστος ενός εναέριου υποσταθμού, για μεγέθη ισχύος περίπου 50 kW, είναι 58,69 €/kW.

## **Ο Λεπτομερειακός Σχεδιασμός**

Ύστερα από τη θετική κατάληξη της προκαταρκτικής μελέτης θα ακολουθήσει ο λεπτομερειακός σχεδιασμός του συστήματος και η σύνταξη των κατασκευαστικών σχεδίων. Στην τελική αυτή φάση της μελέτης θα απαιτηθούν, πέρα από τις πληροφορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, και άλλα πρόσθετα στοιχεία όπως:

1. Η εδαφολογική εξέταση της περιοχής, για τον υπολογισμό της θεμελίωσης των διαφόρων κατασκευών, όπως του κτιρίου τοποθέτησης των συσσωρευτών.

2. Ο καθορισμός της εδαφικής έκτασης και της διαμόρφωσης του φ/β πεδίου, λαμβάνοντας υπόψη τις ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις και την αποφυγή σκίασμού των φ/β πλαισίων από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια.
3. Ο καθορισμός της ηλεκτρικής συνδεσμολογίας, της βέλτιστης κλίσης και του ενδεχόμενου περιοδικού αναπροσανατολισμού των φ/β πλαισίων στη διάρκεια του έτους.
4. Η επιλογή των υλικών στήριξης των φ/β πλαισίων και η πρόβλεψη για την αντιμετώπιση ισχυρών ανέμων, χιονιού, κεραυνών, υγρασίας κλπ. σύμφωνα με τις τοπικές συνθήκες. Επίσης εξέταση της ανάγκης προστασίας των μεταλλικών μερών από διάβρωση καθώς και γενικότερης προστασίας της εγκατάστασης από κλοπές, από βανδαλισμούς και από φθορές από τρωκτικά, έντομα, πουλιά κλπ.
5. Η σκοπιμότητα ενσωμάτωσης μιας διάταξης για την εξαγωγή της μέγιστης ισχύος από τη φ/β γεννήτρια (MPPT).
6. Η επιλογή του είδους και του πλήθους των συσσωρευτών, καθώς και της συνδεσμολογίας τους. Επίσης ο σχεδιασμός του κτιρίου της τοποθέτησης των συσσωρευτών και των διατάξεων ελέγχου του συστήματος.
7. Η ιεράρχηση της προτεραιότητας στις ηλεκτρικές καταναλώσεις και ο χαρακτηρισμός ως «κρίσιμων» εκείνων όπου η απώλεια ισχύος μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τη ζωή ή την υγεία ανθρώπων ή να συνεπάγεται εξαιρετικά σοβαρές ζημιές.
8. Η επιλογή της βοηθητικής ηλεκτρικής πηγής για την ενδεχόμενη αντιμετώπιση των καταναλώσεων πρώτης προτεραιότητας σε περίπτωση βλάβης ή στις περιόδους κανονικής συντήρησης του φ/β συστήματος και για τη μείωση του συνολικού κόστους της εγκατάστασης, με τον περιορισμό του πλήθους των απαιτούμενων φ/β πλαισίων και συσσωρευτών.
9. Ο καθορισμός των αναγκαίων διατάξεων διαχείρισης και επεξεργασίας της ηλεκτρικής ισχύος για τη ρύθμιση της τάσης, για τη μείωση των αιχμών στη ζήτηση κλπ.
10. Η εκτίμηση της έντασης των ηλεκτρικών ρευμάτων στους αγωγούς του συστήματος και ο καθορισμός των λεπτομερειών των κυκλωμάτων (ηλεκτρικοί

πίνακες, όργανα μετρήσεων, αυτοματισμοί, προστατευτικές δίοδοι, διατάξεις συναερμού, διατομές αγωγών κλπ.).

11. Ο υπολογισμός των απωλειών του συστήματος και ο σχεδιασμός της διάταξης της απόρριψης της περίσσειας της ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.
12. Η σύνταξη του καταλόγου των αναγκαίων ανταλλακτικών και εργαλείων.
13. Η σύνταξη οδηγιών λειτουργίας και συντήρησης της εγκατάστασης και η διατύπωση κανονισμού προστασίας του προσωπικού από ηλεκτροπληξία (αν η τάση του συστήματος είναι πάνω από 60 V) και κανονισμού τήρησης συνθηκών ασφαλείας στον χώρο των συσσωρευτών για αποφυγή έκρηξης από ενδεχόμενη παραγωγή και διαφυγή υδρογόνου και για προστασία του προσωπικού από τα διαβρωτικά υγρά των συσσωρευτών.
14. Η τελική εκτίμηση του συνολικού κόστους για την προμήθεια και εγκατάσταση του συστήματος και για τις ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης.

## **Οι Βλάβες του Συστήματος**

Οι βλάβες και οι αστοχίες στη λειτουργία ενός αυτόνομου φ/β συστήματος έχουν συνήθως προέλευση της εξής μορφής:

1. **Φυσική αιτία.** Π.χ. ασυνήθιστα μεγάλη διάρκεια ημερών με συνεχή νέφωση, βλάβες από πτώση κεραυνών κλπ. Επίσης από την επίδραση πολύ χαμηλών θερμοκρασιών στη λειτουργία των συσσωρευτών, που μπορεί να αντιμετωπισθεί με τη θέρμανση του χώρου.
2. **Κακός σχεδιασμός του συστήματος.** Π.χ. μικρότερη μέση ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας από όση είχε αρχικά θεωρηθεί, μεγαλύτερη ηλεκτρική κατανάλωση από όση είχε προβλεφθεί, μεγαλύτερες περίοδοι διακοπής της λειτουργίας για συντήρηση από όσο είχε προδιαγραφεί. Ο σχεδιασμός μπορεί να βελτιωθεί εκ των υστέρων με την προσθήκη φ/β πλαισίων, συσσωρευτών κλπ.
3. **Βλάβες του εξοπλισμού.** Π.χ. διακοπή του κυκλώματος στα φ/β πλαίσια, βλάβες στις ηλεκτρονικές διατάξεις, φθορά των συσσωρευτών. Η πιθανότητα εκδήλωσης βλαβών καθώς και ο χρόνος για την εκτέλεση των επισκευών και την αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος, μπορούν να μειωθούν σημαντικά με την προσεκτική προληπτική συντήρηση του εξοπλισμού, με τη

σύνταξη κατατοπιστικών οδηγιών εντοπισμού και επισκευής των βλαβών, με τη συντήρηση του αναγκαίου αποθέματος ανταλλακτικών και εργαλείων και με την εκπαίδευση του προσωπικού.

## **Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα**

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτόνομους σταθμούς, μπορεί να στηρίζεται στη συνεργασία ηλεκτρικών πηγών διαφόρου είδους, όπου η μια πηγή να δρα συμπληρωματικά προς την άλλη, ώστε να μειώνεται το συνολικό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος. Οι σταθμοί αυτού του τύπου ονομάζονται «υβριδικοί», αφού αποτελούνται από τμήματα διαφορετικών τεχνολογιών. Ειδικότερα, στα αυτόνομα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα, η συνεργασία της φ/β γεννήτριας γίνεται συνήθως με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγη ντήζελ ή με ανεμογεννήτριες ή και με τα δύο.

Σαν παράδειγμα για να δείξουμε τα οικονομικά πλεονεκτήματα των υβριδικών συστημάτων, παίρνουμε την περίπτωση ενός συστήματος σε περιοχή με αρκετά καλή ηλιακή ακτινοβολία και με μέση ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση από 5 μέχρι 10 kWh. Αν προτιμηθεί η εγκατάσταση ενός αυτόνομου φ/β συστήματος, θα απαιτηθεί μια φ/β γεννήτρια με ισχύ αιχμής π.χ. 4 kW<sub>p</sub> και κόστος περίπου 5.869,40 € Επιπλέον, αν το σύστημα προβλέπει π.χ. 8 ημέρες αυτοδυναμίας, θα απαιτηθούν συσσωρευτές με αποθηκευτική ικανότητα 80 kWh και αντίστοιχο κόστος 4.695,52 € περίπου.

Αν αντίθετα, προτιμηθεί να γίνει το σύστημα υβριδικό με την ενσωμάτωση ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους ντήζελ, που δεν προορίζεται να λειτουργεί μόνο βοηθητικά αλλά πρόκειται να συμμετέχει ουσιαστικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τότε οι απαιτήσεις μας από το φ/β μέρος του συστήματος περιορίζονται. Δηλαδή, αφού οι ανάγκες του συστήματος σε περιόδους συνεχούς νέφωσης μπορούν να καλυφθούν από το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ντήζελ, ενδεχομένως μας ικανοποιεί να επαρκεί η αποθηκευτική ικανότητα των συσσωρευτών για την ποσότητα μιας ημερήσιας παραγωγής της φ/β γεννήτριας, που είναι μέχρι 10kWh. Επομένως, το κόστος των συσσωρευτών θα μειωθεί από 4.695,52 € σε 586,94 €. Παράλληλα, στο υβριδικό σύστημα ο υπολογισμός της φ/β γεννήτριας θα υπάρξει η άνεση να στηριχθεί σε συντηρητικότερες εκτιμήσεις ως προς την αναμενόμενη

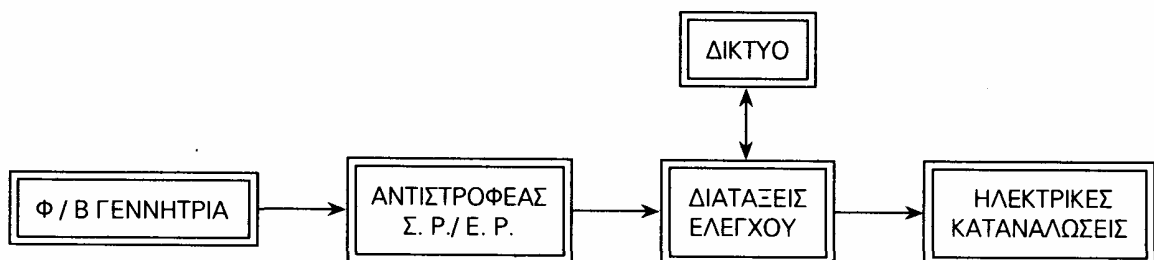


ηλεκτρική κατανάλωση, με αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης ισχύος αιχμής σε π.χ. 2 kW<sub>p</sub> αντί για τα 4 kW<sub>p</sub> του αυτόνομου φ/β συστήματος, και επομένως την αντίστοιχη εξοικονόμηση του μισού κόστους της.

Συχνά, η ολική οικονομική σύγκριση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας ενός υβριδικού σε σχέση με το αντίστοιχο καθαρά φωτοβολταϊκό σύστημα ή την αποκλειστική τροφοδότηση με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ντήζελ, είναι θετική υπέρ του υβριδικού συστήματος, ιδίως όταν το κόστος μεταφοράς του καυσίμου είναι αρκετά υψηλό. Σε πολλές περιπτώσεις, π.χ. σε απομονωμένες κατοικίες ή τηλεπικοινωνιακούς αναμεταδότες, αποδείχτηκε ότι υβριδικά συστήματα με φ/β γεννήτρια ισχύος αιχμής περίπου 2,5 kW<sub>p</sub> και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγη ντήζελ ισχύος περίπου 5 kW, αποτελούν ένα αρκετά αξιόπιστο και οικονομικό συνδυασμό.

### **Φωτοβολταϊκά Συστήματα σε Σύνδεση με το Δίκτυο**

Όταν το τοπικό ή το εθνικό δίκτυο είναι σε απόσταση αρκετά προσιτή προς την τοποθεσία της φ/β εγκατάστασης, είναι συχνά σκόπιμη και συμφέρουσα η σύνδεση μεταξύ τους και η συνεργασία τους. Δηλαδή, η περίσσεια της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στο φ/β σύστημα, διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο, ενώ από την άλλη μεριά, το δίκτυο συμπληρώνει τις ανάγκες του συστήματος όταν δεν επαρκεί η παραγωγή της φ/β γεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή ο αντιστροφέας του συστήματος πρέπει να είναι ειδικού τύπου, ώστε η παρεχόμενη στο δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια να είναι συμβατή με τις προδιαγραφές του δικτύου. Τα συστήματα της κατηγορίας αυτής είναι αναγκαστικά σχετικά μεγάλου μεγέθους, ώστε να υπάρχει αξιόλογο οικονομικό ενδιαφέρον αλλά και διότι οι ειδικοί αντιστροφείς κατασκευάζονται συνήθως για ισχείς πάνω από 1 kW.



**Σχήμα 42.** Γενικό διάγραμμα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής.

Στο σχήμα 42 δίνεται μια απλοποιημένη μορφή του γενικού διαγράμματος ενός συνδεδεμένου συστήματος. Εκτός από τα άλλα προφανή πλεονεκτήματα, το κόστος του συστήματος μειώνεται περίπου στο μισό, σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο αυτόνομο φ/β σύστημα, διότι τώρα δεν περιλαμβάνονται συσσωρευτές, ρυθμιστές φόρτισης και βοηθητική ηλεκτρική πηγή.

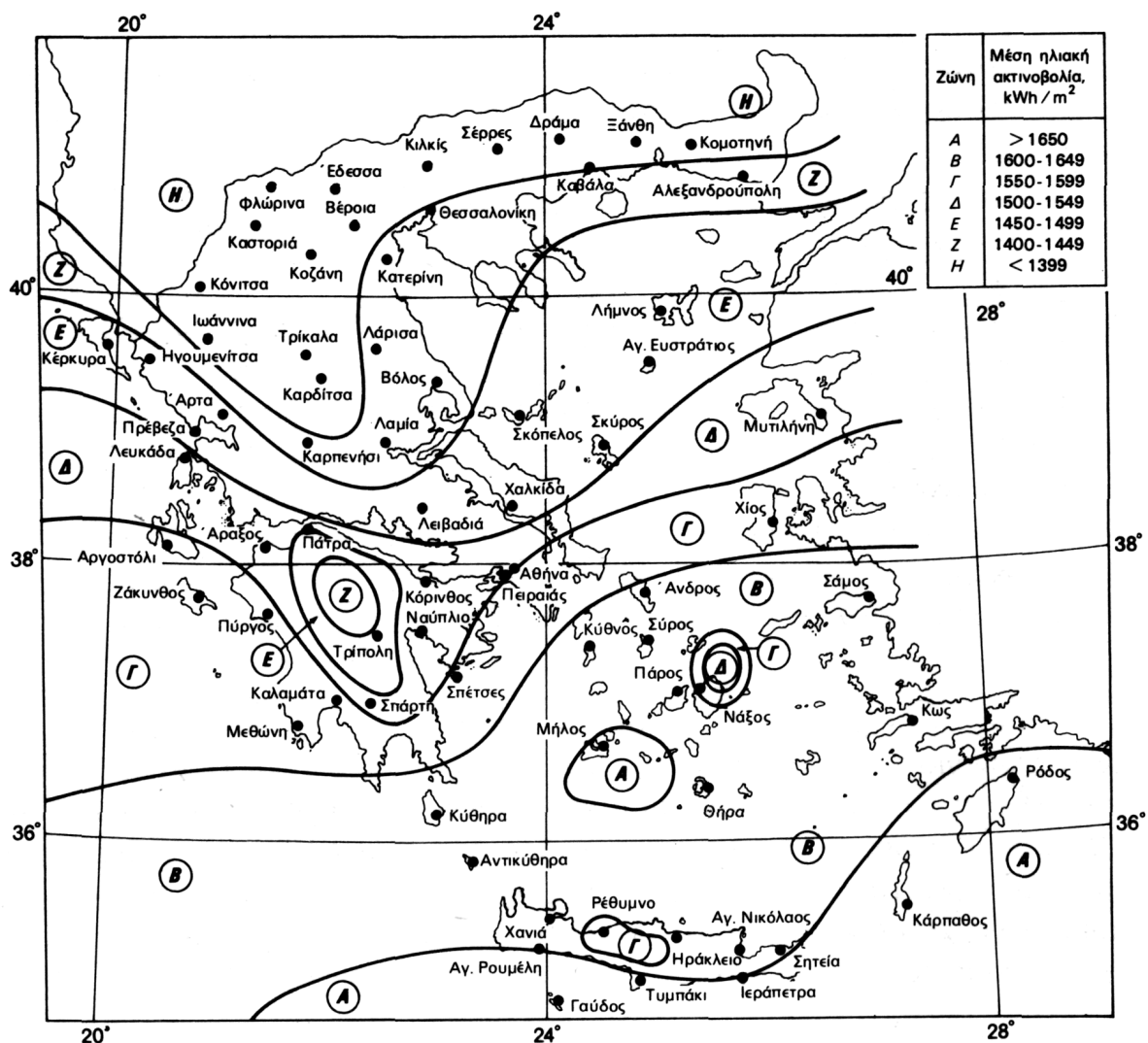
## Οικονομικοτεχνική μελέτη οικίας 72 τμ στη περιοχή των χανίων σε προάστιο (πχ περιβόλια).

Αρχικά ξεκινάμε με τη μελέτη των καταναλώσεων

<i>Συσκευή</i>	<i>Ισχύς</i>	<i>Ωρες λειτουργίας</i>	<i>Ηλεκτρική κατανάλωση</i>
φώτα	1,0 kW	3,0 h	3,0 kWh
Ψυγείο	0,3 kW	9,0 h	2,7 kWh
Τηλεόραση	0,2 kW	4,0 h	0,8 kWh
Ηλεκτρική σκούπα	0,6 kW	0,5 h	0,3 kWh
Στεγνωτήρας μαλλιών	0,4 kW	0,5 h	0,2 kWh
φρυγανιέρα	1,5 kW	0,2 h	0,3 kWh
θερμοσίφωνας	4,0 kW	0,5 h	2,0 kWh
ηλεκτρική κουζίνα	5,0 kW	1,5 h	7,5 kWh
Πλυντήριο ρούχων	3,5 kW	0,2 h	0,7 kWh
Σύνολο	16,5 kW		17,5 kWh

Στη συνέχεια βρίσκουμε από τον παρακάτω χάρτη την μέση ένταση της ακτινοβολίας ανα μονάδα επιφάνειας στη συγκεκριμένη περιοχή που βρίσκεται η οικία η οποία είναι περίπου 1625 kwh/m<sup>2</sup> .

Ο συγκεκριμένος πίνακας μας δείχνει και τη μέση συνολική ετήσια ηλιοφάνεια στις διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Όπως δείχνεται στον ένθετο πίνακα, η ζώνη Α δέχεται πάνω



από 1650 kWh / m, η ζώνη B από 1600 μέχρι 1649 kWh/m<sup>2</sup> κλπ

Έπειτα από τα παρακάτω σχήματα υπολογίζουμε τη κλίση που πρέπει να έχουν οι ηλιακοί συλλέκτες. Στη περιοχή που εξετάζουμε (περιβόλια χανίων) η κλίση των συλλεκτών πρέπει να είναι 45°. Όταν μας ενδιαφέρει η φωτοβολταϊκή παραγωγή περισσότερο τους θερινούς μήνες η κλίση μπορεί να μειωθεί στις 20°. Ενώ για τους χειμερινούς μήνες η κλίση θα πρέπει να αυξηθεί στις 60°. Επίσης η οριζόντια κλίση των συλλεκτών πρέπει να είναι με διεύθυνση προς το νότιο πόλο.

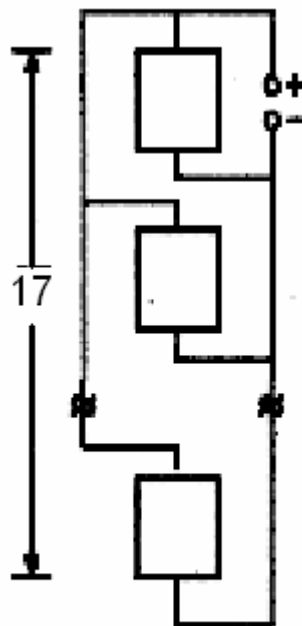
Στη συνέχεια από τη σχέση  $A = \frac{E}{\Pi \times n} (m^2)$  υπολογίζουμε το συνολικό εμβαδόν των ηλιακών στοιχείων που θα μας δώσουν

την ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Όπου  $E$  η ηλεκτρική ενέργεια που χρειαζόμαστε (17,5 kWh) ,  $\eta$  η απόδοση των φωτοβολταϊκών πανελών (τα συγκεκριμένα θα είναι πυρητίου λόγω χαμηλού κόστους με απόδοση 0,25), και  $\Pi$  η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας (όπου για τα περιβόλια Χανίων είναι  $1625 \text{ kWh/m}^2$  .

Έτσι έχουμε  $43\text{m}^2$  φωτοβολταϊκών πανελών σε συστοιχίες.

Έπειτα θα ασχοληθούμε με τη συνδεσμολογία των συστοιχιών.

Τα φ/β πλαίσια θα συνδεθούν παράλληλα ώστε η φ/β συστοιχία να δίνει επίσης τάση περίπου 17V, που είναι αρκετά κατάλληλη για τη φόρτιση συσσωρευτών ονομαστικής τάσης 12V που θα τοποθετήσουμε.



Στη συνέχεια έχουμε τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Θα χρησιμοποιήσουμε συσσωρευτές μολύβδου διότι είναι οι οικονομικότεροι για χρησιμοποίηση Φ/Β συστημάτων.

Θεωρούμε ότι οι συσσωρευτές του συστήματος θα έχουν τάση  $V = 12 \text{ V}$ , που συνδυάζεται ικανοποιητικά με την τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας (17V) , παίρνοντας υπόψη τις απώλειες και την απαιτούμενη αυξημένη τάση φόρτισης. Επίσης, θεωρούμε ότι το βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών θα είναι  $\beta = 80\%$ , ο συντελεστής απόδοσης  $\alpha = 85\%$ , και ότι θα πρέπει να αποθηκεύουν επαρκή ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψουν τις μέσες καταναλώσεις τουλάχιστον 6 διαδοχικών χειμερινών ή 3 διαδοχικών θερινών ημερών. Δηλαδή, στην πρώτη περίπτωση να έχουν ικανότητα αποθήκευσης:

$$E = 6 * 17,5 = 105 \text{ kWh}$$

και στη δεύτερη περίπτωση:

$$E = 3 * 17,5 = 52,5 \text{ kWh}$$

Επιλέγουμε τη μεγαλύτερη από τις παραπάνω τιμές και βρίσκουμε ότι η ονομαστική χωρητικότητα των συσσωρευτών θα πρέπει να είναι:

$$C_N = \frac{E}{\alpha \times \beta \times V} = 12,860 \text{ kWh}$$

Στη συνέχεια, από την παρακάτω σχέση βρίσκουμε ότι η ισχύς που μπορούν να δίνουν οι συσσωρευτές μας επί το παραπάνω μέγιστο διάστημα των 6 διαδοχικών ημερών είναι περίπου:

$$P = \frac{\beta \times C_M \times V}{24 \times \mu} = 0,850 \text{ kW}$$

Η καλή λειτουργία και η αυξημένη απόδοση των φ/β συστημάτων υποβοηθείται συχνά με τη χρησιμοποίηση ειδικών διατάξεων, συνήθως ηλεκτρονικών ισχύος, που επεξεργάζονται την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η φ/β γεννήτρια. Δείχνεται η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-έντασης ενός φ/β πλαισίου του εμπορίου, όταν τα ηλιακά στοιχεία του έχουν θερμοκρασία 60° C (δηλαδή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος περίπου 30° C). Για τη φόρτιση συσσωρευτών 12V, στους οποίους όπως είδαμε η κατάλληλη τάση φόρτισης είναι 15,15V, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, παράλληλα ή στη σειρά με το φ/β πλαίσιο, ένας ρυθμιστής τάσης, που να διατηρεί την τάση εξόδου του φ/β πλαισίου στην επιθυμητή τιμή. Αυτός ο ρυθμιστής ονομάζεται controller. Τέλος, στην έξοδο των φ/β συστημάτων παρεμβάλλεται συχνά ένας αντιστροφέας, που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της φ/β γεννήτριας και των συσσωρευτών σε εναλλασσόμενο.

Κατάλογος υλικών

Χρειαζόμαστε 30 ηλιακά στοιχεία :

**Kyocera KC125G**  
with MC connectors

<b>125 Watts</b> 17.4 Volts 7.2 Amps 21.7 Voc 8 Isc 56.1" Length 25.7" Width 2" Depth 26.2 lbs <b>UL Listed</b> 25Year Warranty	
<b>KC125G 400 euro το καθένα</b>	

Συνολικό κόστος

$30 \times 400 = 12000$  euro

Έπειτα χρειαζόμαστε 30 βάσεις για πανέλες



6 βάσεις των 5 πανελών η καθεμία συνολικού κόστους

$6 \times 350 = 2100$  euro

Οι συγκεκριμένες είναι από αλουμίνιο.

Συσσωρευτές :





Οι ανάγκες μας είναι 105 kWh και ο τύπος των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιήσουμε θα είναι ο :

GO SOLAR CO Part Number	Group	Overall Dimensions Inches			AMP 24 Hour Rate	Wt. LBS	Our Price
		L	W	H			
<b>PVX-1040T</b>	27	12.03	6.77	8.93	<b>104</b>	<b>68</b>	euro137.95

Χρειαζόμαστε 10 συστοιχίες μπαταριών όπως την παραπάνω Έτσι θα έχουμε  $27 \times 10 = 270$  μπαταρίες συνολικού κόστους  $138 \times 10 = 1380$  euro οι οποίες θα μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες της οικείας μέχρι και για 6 ημέρες ανηλίας κρατώντας

πάντα το ικανοποιητικό βάθος εκφόρτισης στους συσσωρευτές μας.

Συνεχίζουμε με τον ρυθμιστή φόρτισης των συσσωρευτών και την κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αυτού.



PSTAR-15	ProStar 15 Amp	euro111.00
----------	----------------	------------



**Trace SW Sine Wave Inverters**  
**Αντιστροφέας**

<b>DR Models</b> DC In - AC Out Continuous Power Maximum Surge Peak Efficiency DC Charge Rate Dimensions Weight <b>τιμή</b>	<b>DR1512</b> 12 V - 240 V 1500 VA 18 Amps 94% to 70 Amps 8.5"x7.25"x21" 34 lbs <b>800 euro</b>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Επίσης θα χρειαστούν :

150 μέτρα καλώδιο 1,5m

60 euro

170 μέτρα καλώδιο 2,5m	75 euro
2 ημέρες εργάσιμες από 2 άτομα	
για την εγκατάσταση του συστήματος	300 euro
αξία μελέτης και υπεύθυνος έργου	600 euro
λοιπά υλικά (βίδες στερέωσης,σιλικόνη, μεταφορικά,κτλ)	100
euro	
	μερικό σύνολο :
	1135
euro	

Μερικό συνολικό κόστος	
Είδος	τιμή σε euro
Πανέλες	12000
Βάσεις πανελών	2100
Μπαταρίες	1380
Controller	111
Inverter	800
Μερικό σύνολο	1135

Τελικό κόστος

17526 euro

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΕΝΟΤΗΤΑ 1

### ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

- Οι Εναλλακτικές Ενεργειακές Πηγές
- Η Φωτοβολταϊκή Ενέργεια
- Οι Πρώτες Φωτοβολταϊκές Εφαρμογές
- Η Εξέλιξη της Απόδοσης και του Κόστους των Ηλιακών Στοιχείων
- Το Παρόν και το Μέλλον της Φωτοβολταϊκής Τεχνολογίας
- Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
- Η Σύσταση του Ηλιακού Φάσματος
- Οι Συμβατικές Ηλιακές Ακτινοβολίες
- Η Ακτινοβολία του «ΕΝΟΣ ΗΛΙΟΥ»
- Ηλιακή Γεωμετρία
- Ο Προσανατολισμός του Συλλέκτη
- Η Βέλτιστη Κλίση
- Ροή και Ένταση της Ακτινοβολίας
- *Η Διακύμανση της Ηλιακής Ακτινοβολίας*
- Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ
- Η Απορρόφηση της Ακτινοβολίας στα Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

- Η Δημιουργία του Φωτορεύματος
- Τα Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων - Πρώτη Προσέγγιση
- *Ο Συντελεστής Πλήρωσης*
- Τα Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων - Δεύτερη Προσέγγιση
- Η Αποδοτική Λειτουργία των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων - Σταθερές Συνθήκες
- Η Αποδοτική Λειτουργία των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων - Μεταβαλλόμενες Συνθήκες
- Αξιολόγηση των Ημιαγωγών για Ηλιακές Φωτοβολταϊκές Εφαρμογές

## **ΕΝΟΤΗΤΑ 2**

- **ΤΑ ΗΛΙΑΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**
- Ηλιακά Στοιχεία Πυριτίου
- Η Επιλογή και η συμπεριφορά του πυριτίου
- *Η παρασκευή του ηλιακού στοιχείου*
- *Η διαμόρφωση της διόδου*
- *Ανταγωνιστικά μεγέθη*

- Άμορφο πυρίτιο
- *Ηλιακά Στοιχεία Θείουχου Καδμίου*
- *Ηλιακά Στοιχεία Αρσενικούχου Γαλλίου*
- Συνδυασμένες Διατάξεις Ηλιακών Στοιχείων
- Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ
- Το Φωτοβολταϊκό Πλαίσιο
- Η Απόδοση του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου
- *Η επίδραση της Θερμοκρασίας και της Ρύπανσης*
- Η Ισχύς Αιχμής του Φωτοβολταϊκού Πλαισίου
- *Φωτοβολταϊκά Πανέλα και Συστοιχίες*
- Οι Απώλειες στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

## **ΕΝΟΤΗΤΑ 3**

- **ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**
- Η Συγκρότηση του Συστήματος
- Ο Σχεδιασμός του Συστήματος
- Βασικές Επιλογές και Προϋποθέσεις
- Η ζήτηση: Οι Ηλεκτρικές Καταναλώσεις
- Η προσφορά: Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ
- Το Ζητούμενο: το Πλήθος των Φωτοβολταϊκών Πλαισίων
- Η Συνδεσμολογία των Συστοιχιών
- Η Αποθήκευση της Ηλεκτρικής Ενέργειας

- Η ανάγκη για αποθήκευση
- Οι συσσωρευτές μολύβδου
- Η χωρητικότητα των συσσωρευτών
- Δομή, διάρκεια ζωής και κόστος
- Ρυθμιστές, Μετατροπείς και Αντιστροφείς
- Ένα Παράδειγμα Σχεδιασμού
- Αντικείμενο
- Συμπληρωματικές πληροφορίες
- Γενική πορεία του σχεδιασμού
- Η χρονική περίοδος
- Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις
- Η ηλιακή ενέργεια
- Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια
- Η κλίση των συλλεκτών
- Η απαιτούμενη ισχύς αιχμής
- Το πλήθος και η οργάνωση των φ/β πλαισίων
- Η έκταση του φ/β πάρκου
- Οι συσσωρευτές
- Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος
- Συγκέντρωση των αποτελεσμάτων
- Οδηγίες λειτουργίας και συντήρησης
- Συγκρίσεις
- Προϋπολογισμός κόστους
- ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ
- ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
- Τα Βασικά Ερωτήματα
- Ποιος είναι ο στόχος του συστήματος;
- Πώς θα πραγματοποιηθεί ο στόχος του συστήματος;
- Ποια θα είναι τα κατασκευαστικά μέρη του συστήματος;
- Το Αυτόνομο Σύστημα

- Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός
- Οικονομικά Στοιχεία
- Ο Λεπτομερειακός Σχεδιασμός
  
- Οι Βλάβες του Συστήματος
  
- Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα
  
- Φωτοβολταϊκά Συστήματα σε Σύνδεση με το Δίκτυο

## ΕΝΟΤΗΤΑ 4

- Φωτοβολταϊκά πλαίσια  
Τιμές  
Τεχνικά χαρακτηριστικά  
Εικόνες
  
- Βάσεις πλαισίων  
Τιμές  
Τεχνικά χαρακτηριστικά  
Εικόνες
  
- Συσσωρευτές  
Τιμές  
Τεχνικά χαρακτηριστικά  
Εικόνες
  
- Αναστροφείς  
Τιμές  
Τεχνικά χαρακτηριστικά  
Εικόνες
  
- Γενικές απόψεις για τα φωτοβολταϊκά
- Πρακτικός οδηγός για τα φωτοβολταϊκά
- Φωτοβολταϊκό σύστημα στον Πρασέ
  
- λεξιλόγιο



