

**ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ**

**ΣΤΕφ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**Π Τ Υ Χ Ι Α Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α**

**ΦΩΤΙΣΜΟΣ ΠΛΑΤΕΙΑΣ ΜΕ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

**LIGHTING SQUARE WITH SOLAR ENERGY**

**ΓΟΥΝΑΡΙΔΗ ΕΙΡΗΝΗ**

**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: κ. ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΙΩΤΗΣ**

Ευχαριστούμε τον καθηγητή μας  
κ. Βυλιώτη για την βοήθειά του  
όσον αφορά την επιλογή του θέματος  
και την κατεύθυνση την οποία  
έπρεπε να ακολουθήσουμε

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>		
1.1	Εναλλακτικές πηγές ενέργειας	2
1.2	Φωτοβολταϊκή ενέργεια	2
1.3	Πλεονεκτήματα / μειονεκτήματα φωτοβολταϊκής ενέργειας	3
1.4	Προοπτικές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας	4
1.5	Οικονομική βιωσιμότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων	7
<b>2. Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ</b>		
2.1	Η σύσταση του ηλιακού φάσματος	11
2.2	Οι συμβατικές ηλιακές ακτινοβολίες	12
2.3	Η ακτινοβολία του «ενός ήλιου»	13
2.4	Η ηλιακή γεωμετρία	14
2.5	Ο προσανατολισμός του συλλέκτη	17
2.6	Η βέλτιστη κλίση	18
2.7	Η ροή και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας	20
2.8	Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας	21
<b>3. Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ</b>		
3.1	Το φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	25
3.2	Η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας στα φωτοβολταϊκά στοιχεία	26
3.3	Η δημιουργία του φωτορεύματος	28
3.4	Προσέγγιση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων και γεννητριών	29
3.5	Ο συντελεστής πλήρωσης	32
3.6	Η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σταθερές και μεταβλητές συνθήκες	35
3.7	Αξιολόγηση των ημιαγωγών για ηλιακές φωτοβολταϊκές εφαρμογές	38
3.8	Ηλιακά στοιχεία πυριτίου – Επιλογή και συμπεριφορά του πυριτίου	40
3.9	Παρασκευή ηλιακού στοιχείου πυριτίου	41
3.10	Ηλιακά στοιχεία Θειούχου Καδμίου	43
3.11	Ηλιακά στοιχεία Αρσενικού Γαλλίου	44
<b>4. ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</b>		
4.1	Αυτοτελή φωτοβολταϊκά συστήματα	46
4.2	Φωτοβολταϊκά συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο	51

<b>5.</b>	<b>ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b>	
5.1	Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια	
5.1.1	Φωτοβολταϊκά πλαίσια	55
5.1.2	Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων	57
5.1.3	Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου	61
5.1.4	Η επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης	62
5.1.5	Η ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου	63
5.1.6	Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες	64
5.1.7	Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων	70
5.1.8	Οι απώλειες στα φωτοβολταϊκά συστήματα	73
5.2	Αυτόνομα φωτοβολταϊκά πλαίσια	
5.2.1	Η συγκρότηση του συστήματος	74
5.2.2	Προκαταρκτικός και λεπτομερειακός σχεδιασμός	75
5.2.3	Βασικές προϋποθέσεις / επιλογές	76
5.2.4	Η ζήτηση: Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις	77
5.2.5	Η προσφορά: Η ηλιακή ενέργεια	78
5.2.6	Ο στόχος: το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων	80
5.3	Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας – συσσωρευτές	
5.3.1	Η ανάγκη αποθήκευσης	82
5.3.2	Χαρακτηριστικά συσσωρευτών μολύβδου	83
5.3.3	Τρόποι σύνδεσης συσσωρευτών	86
5.3.4	Δομή, διάρκεια και κόστος συσσωρευτών	88
5.4	Έλεγχος της τάσης εξόδου φωτοβολταϊκών συστημάτων με χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος	
5.4.1	Ρυθμιστές / μετατροπείς / αναστροφείς	89
5.4.2	Ρυθμιστές συνεχούς τάσης – χαρακτηριστικά ρυθμιστών	91
5.4.3	Αναστροφείς D.C. – A.C (Inverter)	94
5.4.4	Ρυθμιστές ισχύος	97
5.5	Καταναλωτές	
5.5.1	Οι καταναλώσεις γενικά	98
<b>6.</b>	<b>ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ / ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΠΛΑΤΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ</b>	<b>100</b>
<b>7.</b>	<b>ΧΡΟΝΟΔΙΑΚΟΠΤΕΣ / ΩΡΟΛΟΓΙΑΚΟΙ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ</b>	<b>114</b>
<b>8.</b>	<b>ΠΙΝΑΚΕΣ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ – ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΩΝ</b>	<b>120</b>
<b>9.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>133</b>

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΟΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

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 που χρησιμοποιούν υδατοπτώσεις. Όλες αυτές όμως οι ενεργειακές πηγές έχουν περιορισμένες σχετικά προοπτικές αφού τα συμβατικά και τα πυρηνικά καύσιμα εξαντλούνται βαθμιαία αλλά και 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 ακολούθησε με άλλες διαδοχικές αυξήσεις τα επόμενα χρόνια. Ο άλλος παράγοντας ήταν ένα πυρηνικό ατύχημα που έγινε το 1979 στον πυρηνικό σταθμό του Three Mile Island της Πενσυλβανίας, το οποίο έθεσε σε μεγάλο κίνδυνο τους κατοίκους της περιοχής και έθεσε σοβαρό ζήτημα ως προς την ασφάλεια λειτουργίας των πυρηνικών εργοστασίων. Σ' αυτά πρέπει να προσθέσουμε την επικείμενη άνιση κατανομή των γνωστών αποθεμάτων ενέργειας στις διάφορες χώρες του κόσμου και τους ενδεχόμενους περιορισμούς που θα επιβληθούν στην κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων, λόγω των μολύνσεων που προκαλούν στον πλανήτη (φαινόμενο θερμοκηπίου) μολύνσεις υπεδάφους κλπ). Έτσι άρχισε να δημιουργείται η ιδέα για την αναζήτηση και ανάπτυξη άλλων μορφών ενέργειας, κυρίως ανανεώσιμων.

Στις εναλλακτικές πηγές που εξετάστηκαν περιλαμβάνονται η ενέργεια των ανέμων, των κυμάτων, η γεωθερμία, η καύση βιομάζας, η ηλιακή ενέργεια και άλλες. Ορισμένες από αυτές αναπτύχθηκαν και άλλες βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Μέσα σε αυτές που αναπτύχθηκαν και που συνδυάζουν ιδανικά τις παραπάνω απαιτήσεις για νέες ενεργειακές πηγές και που παρουσιάζουν απεριόριστες μελλοντικές προοπτικές είναι η ηλιακή ενέργεια. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η ηλιακή ακτινοβολία για παραγωγή θερμότητας με σκοπό τη θέρμανση νερού, τη θέρμανση χώρων και για άλλες γεωργικές και βιομηχανικές εργασίες.

## 1.2 Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

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.

Ανάλογα με τον βαθμό πολυπλοκότητας στην κατασκευή και τη λειτουργία, μπορούμε να κατατάξουμε τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες σε τρεις 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 μέρας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει ένα ηλιακό στοιχείο μέχρι 50% περίπου, αφού δέχεται πυκνότερη ακτινοβολία ανά μονάδα εμβαδού της επιφάνειάς του.
3. Τις διατάξεις που με τη χρησιμοποίηση φακών ή κατόπτρων συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και τη 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.

### 1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ / ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όπως φαίνεται από τα ακόλουθα στοιχεία, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρικής έχει, αν εξαιρεθούν το υψηλό κόστος και η αδυναμία της γεννήτριας να παράγει συνεχώς ενέργεια λόγω των διακυμάνσεων της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του 24ώρου, μόνο πλεονεκτήματα.

#### *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 (20 με 30 χρόνια).
5. Τα ηλιακά στοιχεία δεν έχουν κινούμενα μέρη, επομένως είναι σχεδόν απαλλαγμένα από την ανάγκη επίβλεψης και συντήρησης. Αλλά και σε περίπτωση βλάβης η αποκατάσταση της λειτουργίας γίνεται εύκολα λόγω της σπονδυλωτής μορφής της φωτοβολταϊκής διάταξης.
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 W/kg, 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.

## 1.4 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Παρά το γεγονός ότι η φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχει φθάσει σε ψηλά επίπεδα ώστε να δίνει προϊόντα και πρακτικές εφαρμογές ευρείας εμπορικής κατανάλωσης, οι έρευνες στον τομέα αυτό συνεχίζονται, όπως συμβαίνει πάντα για οποιαδήποτε νέα τεχνολογία με μεγάλες προοπτικές.

Οι έρευνες που γίνονται έχουν σκοπό να οδηγήσουν στην πλήρη αντίληψη και κατανόηση όλων των λεπτομερειών κατασκευής των φωτοβολταϊκών στοιχείων και των ιδιοτήτων των υλικών που ήδη χρησιμοποιούνται σ' αυτήν. Τα συμπεράσματα θα βοηθήσουν στη δυνατότητα χρησιμοποίησης νέων υλικών με ακόμη καλύτερα αποτελέσματα. Ο στόχος είναι να ξεπεραστούν εμπόδια που περιορίζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων με αποτέλεσμα την αύξησή της. Μεγαλύτερη όμως απόδοση σημαίνει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια για ορισμένη ποσότητα ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Αυτό τελικά συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος της παραγόμενης kWh (κιλοβατώρας).

Το κόστος κατασκευής των φωτοβολταϊκών συστημάτων εξαρτάται από τη ποσότητα του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των ηλιακών στοιχείων και από τις εργασίες και τα πρόσθετα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Γι' αυτό, οι έρευνες που γίνονται στοχεύουν στην ανακάλυψη πιο φτηνών πρώτων υλών και γενικά λιγότερο δαπανηρών διαδικασιών κατασκευής.

Η τεχνολογία κατασκευής ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου είναι η πιο μελετημένη και προχωρημένη σε σχέση με την κατασκευή ηλιακών στοιχείων από άλλα υλικά. Οι παράγοντες που περιορίζουν την απόδοση των ηλιακών στοιχείων πυριτίου έχουν προσδιορισθεί και γίνονται προσπάθειες για να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση από το 22% που υπάρχει σήμερα. Κατά την αποκοπή του κρυσταλλικού πυριτίου σε λεπτές φέτες για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων ένα μεγάλο ποσοστό του αρχικού κρυστάλλου μετατρέπεται σε σκόνη που αχρηστεύεται. Κατασκευάστηκαν γι' αυτό φωτοβολταϊκά στοιχεία με τη χρησιμοποίηση του υδρογονωμένου πυριτίου (a-Si:H) με απόδοση που δεν ξεπερνά τα 12% αλλά οι έρευνες που γίνονται σ' αυτόν τον τομέα δημιουργούν πολύ καλές προοπτικές για βελτίωση της απόδοσης αυτής.

Επίσης έρευνες γίνονται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών ηλιακών στοιχείων από πολυκρυσταλλικούς ημιαγωγούς που έχουν την ίδια απόδοση με το άμορφο πυρίτιο αλλά η κατασκευή τους είναι πιο εύκολη και παρουσιάζουν μεγαλύτερη σταθερότητα σε ψηλές θερμοκρασίες.

Μεγάλες προοπτικές παρουσιάζει και η έρευνα που γίνεται με το κρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό – Αρσενιούχο GaAs, το οποίο μελετήθηκε από τις αρχές του 1970 από μεγάλη ομάδα στο πανεπιστήμιο του Sanford στην Αγγλία. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων από το υλικό αυτό είναι 19% αλλά φαίνεται ότι με τις προσπάθειες που γίνονται θα φθάσει και το 25%.

Ένας νέος ημιαγωγός που χρησιμοποιήθηκε τελευταία και έχει μεγάλες προοπτικές πλατείας κατανάλωσης είναι ο Δισεληνιούχο-Ινδίο-Χαλκός  $\text{CuInSe}_2$  (Copper Indium diselenide CIS). Με ελάχιστη ποσότητα από την ημιαγωγό αυτό είναι δυνατή η κατασκευή πολύ λεπτού φωτοβολταϊκού στοιχείου που όμως παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη απορροφητικότητα ηλιακής ακτινοβολίας από αυτή που παρουσιάζει το φωτοβολταϊκό στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου.



Μετά από μεγάλες προσπάθειες τα φωτοβολταϊκά στοιχεία CIS αποτελούν σήμερα ένα βασικό συμπλήρωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου άμορφου Πυριτίου.

Με συνδυασμό διαφόρων ημιαγωγών με το καθένα να έχει κατάλληλα χαρακτηριστικά, επιτυγχάνεται η κατασκευή διπλών φωτοβολταϊκών στοιχείων στα οποία ο ένας ημιαγωγός επικάθεται στον άλλο ώστε να αλληλοσυμπληρώνονται ως προς την απορροφητικότητα των διαφόρων χρωμάτων του ηλιακού φάσματος με αποτέλεσμα να αυξάνεται πολύ η απόδοσή τους. Δύο τέτοια υλικά που χρησιμοποιούνται τώρα και με μεγάλες προοπτικές για εμπορική κατανάλωση είναι το πυρίτιο και το CIS. Προβλέπεται ότι σε περίπτωση που η τιμή των διπλών φωτοβολταϊκών στοιχείων-πλασιών πέσει κάτω από τα 3 δολάρια για κάθε Wp, δεν θα συμφέρει πλέον η κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου. Με την εισαγωγή των στοιχείων αυτών και την πείρα που έχει αποκτηθεί μέχρι σήμερα, φαίνεται ότι ο στόχος της τιμής του ενός δολαρίου για κάθε βατ (Wp) του φωτοβολταϊκού πλαισίου δεν θα αργήσει να επιτευχθεί. Με την τιμή αυτή με ένα ισοδύναμο αριθμό ωρών, 4 ώρες την ημέρα και με χρόνο ζωής φωτοβολταϊκών συστημάτων 25 χρόνια, η kWh θα στοιχίζει 3 αμερικάνικα σεντς και έτσι θα βρίσκεται μέσα στα πλαίσια της τιμής της από το ηλεκτρικό δίκτυο και μάλιστα θα τη συναγωνίζεται.

Με τη χρησιμοποίηση υλικών που αντέχουν περισσότερο στις μεταβολές των καιρικών συνθηκών που συμβαίνουν συνεχώς στην ατμόσφαιρα, υπάρχει προοπτική να αυξηθεί ο χρόνος ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων από τα 25 χρόνια που είναι σήμερα στα 30 χρόνια.

Είναι γνωστό ότι για να είναι σε θέση τα φωτοβολταϊκά συστήματα να συναγωνισθούν τα υπάρχοντα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να έχουν φθηνά και αποδοτικά πλαίσια με μεγάλο χρόνο ζωής, να έχουν βοηθητικές συσκευές καλής κατασκευής και απόδοσης, ο δε σχεδιασμός του συστήματος να γίνεται με μεγάλη προσοχή.

Επιδίωξη των υποστηρικτών της χρησιμοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι η απόκτηση ανεξαρτησίας από πλευράς ηλεκτρικής ενέργειας και αν είναι δυνατό η αποκοπή ακόμη και της σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο και η τροφοδότηση από δικό τους ανεξάρτητο και αυτοτελές φωτοβολταϊκό σύστημα. Πολλοί όμως καταναλωτές θα προτιμήσουν να διατηρήσουν τη σύνδεσή τους με το δίκτυο και με την χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος, να αγοράζουν από το δίκτυο λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια. Σε περίπτωση μάλιστα που έχουν μεγάλο φωτοβολταϊκό σύστημα και υπάρχει συνεχής ηλιοφάνεια είναι δυνατό και να πωλούν ενέργεια στο δίκτυο.

Προϋπόθεση για μεγαλύτερη ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι να γίνουν προσπάθειες για την προσαρμογή των υπό κατασκευή φωτοβολταϊκών πηγών προς τα χαρακτηριστικά των διαφόρων ηλεκτρικών συσκευών που ήδη υπάρχουν.

Επίσης θα πρέπει να κατασκευάζονται νέες συσκευές με χαρακτηριστικά προσαρμοσμένα στις φωτοβολταϊκές πηγές ενέργειας. Αυτό ήδη γίνεται σε κάποιο βαθμό και έτσι μπορεί να βρει κανείς σήμερα τηλεοράσεις, ψυγεία, λαμπτήρες φθορισμού που λειτουργούν με την χαμηλή τάση που δίνουν οι φωτοβολταϊκές πηγές.

Γενικά η μέχρι τώρα στάση των διαφόρων αρχών ή εταιρειών ηλεκτρισμού στις ανεπτυγμένες χώρες ήταν πάντα θετική ως προς το θέμα της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων συνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο και αναμένεται ότι και η στάση της ΔΕΗ και ΑΗΚ (Αρχή

Ηλεκτρισμού Κύπρου) θα είναι παρόμοια. Είναι φανερό ότι τα συστήματα αυτά θα καλύπτουν βασικές ανάγκες διότι μπορούν να εγκατασταθούν γρήγορα και έτσι να αντιμετωπίσουν τυχόν μεγάλη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις περιόδους αιχμής.

Η λειτουργία τους είναι δυνατό να ελέγχεται με σήματα που θα στέλλονται σε αυτά δια μέσου του δικτύου ώστε να παράγουν ενέργεια χαμηλού κόστους κατά τις περιόδους αιχμής. Φυσικά τα συστήματα αυτά είναι δυνατό να λειτουργούν και σε περιόδους που δεν υπάρχει αιχμή, και η ενέργεια που θα παράγεται να χρησιμοποιείται για θέρμανση νερού σε καλά μονωμένα ντεπόζιτα ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν χρειαστεί. Επίσης η Αρχή ή Εταιρεία θα διοχετεύει δια μέσου του δικτύου της την ενέργεια που περισσεύει σε άλλους καταναλωτές που δεν έχουν φωτοβολταϊκά συστήματα.

Μεγάλα ποσά ενέργειας που θα παράγονται κατά τα Σαββατοκύριακα θα αποθηκεύονται σε μεγάλες μπαταρίες, που θα βρίσκονται κοντά στους χώρους κατανάλωσης, ώστε να αποφεύγονται μεγάλες απώλειες στα σύρματα μεταφοράς του δικτύου. Η μέθοδος αυτή τροφοδότησης του δικτύου με ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από φωτοβολταϊκά συστήματα δεν θα παρουσιάζει κανένα πρόβλημα σταθερότητας τάσης ή συχνότητας ακόμη και σε περίπτωση που προέρχεται από φωτοβολταϊκά συστήματα πολύ μεγάλης ισχύος που κατά βάση θα αποτελούν ηλιακούς ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς. Τελικοί σταθμοί είναι δυνατό να κατασκευασθούν σε διάφορες άγονες περιοχές κατά μήκος του δικτύου μεταφοράς από την ΔΕΗ ή ΑΚΗ όπως επίσης και μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα σε κτιριακά συγκροτήματα στα οποία οι ιδιοκτήτες δεν θα θέλουν ίσως να εγκαταστήσουν με δικά τους έξοδα.

Στις αναπτυσσόμενες χώρες η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε απομακρυσμένες περιοχές θα είναι μεγάλη εξυπηρέτηση διότι η κατασκευή μεγάλου θερμοηλεκτρικού σταθμού για την τροφοδότηση των περιοχών αυτών είναι δύσκολη και δαπανηρή. Αντιθέτως η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι γρήγορη και τα έξοδα είναι ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης.

Εξάλλου το φωτοβολταϊκό σύστημα στην αρχή μπορεί να είναι μικρό και να επεκτείνεται με την τοποθέτηση νέων φωτοβολταϊκών συστημάτων ανάλογα με την ζήτηση.

Η κατασκευή των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι δυνατό να αναληφθεί από την ίδια τη χώρα που πρόκειται να προωθήσει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων ώστε αυτά να στοιχίζουν λιγότερο. Έτσι η τιμή της kWh (κιλοβατώρα) που θα παράγεται από τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα είναι μικρότερη της αντίστοιχης από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Φυσικά όλες οι προοπτικές που αναφέραμε εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την περαιτέρω εξέλιξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας ως προς την οικονομική βιωσιμότητά της και τις θέσεις που θα πάρουν για τα φωτοβολταϊκά συστήματα οι κυβερνήσεις κατά κύριο λόγο, αλλά και τα άτομα που ανήκουν σε διαφορετικές ομάδες πληθυσμού.

## 1.5 Η ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες. Η μελέτη των παραγόντων αυτών θα βοηθήσει σε μια σωστή απόφαση για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκού συστήματος σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Παρά το γεγονός ότι πολλές φορές διάφοροι παράγοντες είναι αποτρεπτικοί, πρέπει να έχουμε υπόψη ότι, είναι δυνατό ένας μόνο τέτοιος παράγοντας, όπως για παράδειγμα είναι η μεγάλη απόσταση της περιοχής από το κεντρικό δίκτυο, να είναι καθοριστικός στη θετική απόφαση για την κατασκευή του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Οι πιο βασικοί παράγοντες για τη σχετική απόφαση, είναι η ηλιοφάνεια στη περιοχή, τα έξοδα της εγκατάστασης και η τιμή της kWh που παρέχεται στον ενδιαφερόμενο από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ο πιο απλός τρόπος για να βρει κανείς κατά πόσο συμφέρει σε μια περιοχή είναι ο ακόλουθος:

1. Να υπολογισθεί ο αριθμός  $n$  των kWh που θα παρέχει το φωτοβολταϊκό σύστημα κατά τη διάρκεια ενός έτους.
2. Να πολλαπλασιαστεί ο αριθμός αυτός με τα 25 χρόνια ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος για να βρεθεί το σύνολο των kWh που θα δώσει.
3. Να υπολογισθεί το συνολικό κόστος  $K$  στο οποίο να περιλαμβάνεται το δάνειο με τους τόκους του και τα έξοδα συντήρησης και να αφαιρεθούν οι τυχόν φορολογικές απαλλαγές ή άλλες διευκολύνσεις ή κίνητρα που παρέχει το κράτος για εισαγωγή και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων.
4. Να βρεθεί η τιμή της kWh που δίνει το φωτοβολταϊκό σύστημα, με τον υπολογισμό του λόγου  $K/25 \cdot n$  για να συγκριθεί με την τιμή  $a$  της kWh που παρέχει το ηλεκτρικό δίκτυο.

Παρατηρούμε ότι η τιμή  $K/25 \cdot n$  μπορεί να γίνει πιο μικρή και επομένως πιο συμφέρουσα, ή με την ελάττωση του κόστους  $K$  λόγω πτώσης των τιμών των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ή με την αύξηση του αριθμού  $n$  λόγω μεγαλύτερης ηλιοφάνειας στην περιοχή της εγκατάστασης. Επίσης η οικονομική πολιτική της κυβέρνησης σχετικά με φορολογικές απαλλαγές στα φωτοβολταϊκά πλαίσια ή άλλες συσκευές που έχουν σχέση με την παραγωγή ενέργειας από εναλλακτικές πηγές, θα επηρεάσει την τιμή της kWh από φωτοβολταϊκά συστήματα.

Σχετικά με το θέμα της χρησιμοποίησης φωτοβολταϊκών συστημάτων πρέπει να έχουμε υπόψη ότι η τιμή της kWh από το ηλεκτρικό δίκτυο έχει τάση αύξησης που γίνεται μάλιστα τελευταία πολύ μεγαλύτερη με την κρίση σταδιακής ελάττωσης των αποθεμάτων του πετρελαίου. Εξάλλου με την τελειοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων το κόστος κατασκευής είναι μικρότερο ενώ η απόδοση μεγαλύτερη με αποτέλεσμα η τιμή της kWh των φωτοβολταϊκών συστημάτων να φτάσει σε τόσο χαμηλά επίπεδα ώστε να αρχίσει η μαζική παραγωγή αυτών.

Εκτός από τη σχέση μεταξύ των δύο τιμών της kWh, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που καθορίζουν την οικονομική βιωσιμότητα του φωτοβολταϊκού συστήματος σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή. Πράγματι η πιο συμφέρουσα εφαρμογή φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι σε περιοχές που δεν εξυπηρετούνται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή είναι θέμα σύγκρισης της τιμής της kWh από το φωτοβολταϊκό σύστημα με την αντίστοιχη τιμή της kWh μιας γεννήτριας που τυχόν θα εγκατασταθεί στο σπίτι, ή την τιμή της από το δίκτυο αφού ληφθούν υπόψη τα έξοδα που θα

πληρωθούν από τον ενδιαφερόμενο στην Αρχή Ηλεκτρισμού για να επεκταθεί το δίκτυο μέχρι την περιοχή του σπιτιού.

Επίσης δεν πρέπει να μας διαφύγει ότι μια γεννήτρια είναι μια πολύ ακριβή συσκευή με περιορισμένο χρόνο ζωής. Γενικά η συντήρησή της και η αντικατάσταση των διαφόρων εξαρτημάτων της, όπως και η συνεχής κατανάλωση καυσίμων, δημιουργεί μεγάλα έξοδα. Ο χρόνος ζωής μιας γεννήτριας 8kW και 1800 Σ.Α.Λ. που λειτουργεί με ακάθαρτο πετρέλαιο ποικίλει ανάλογα με την ισχύ που αναπτύσσει. Όταν εργάζεται με πλήρη ισχύ ο χρόνος της είναι 5000 ώρες, ενώ όταν εργάζεται με ισχύ 4Kw ο χρόνος ζωής της είναι 7500 ώρες, δηλαδή 2-3 χρόνια. Ενώ, όπως ξέρουμε ο χρόνος ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι 25 χρόνια. Η κατανάλωση καυσίμων δεν είναι ανάλογη με την ισχύ που αναπτύσσει η γεννήτρια. Αν μια ηλεκτρική εγκατάσταση 800 W τροφοδοτείται από γεννήτρια ισχύος 8000 W, δεν σημαίνει ότι η κατανάλωση καυσίμων θα είναι το 1/10 εκείνων που χρειάζεται όταν λειτουργεί υπό 8kW αλλά πολύ μεγαλύτερη. Εξάλλου για τη χρησιμοποίηση της γεννήτριας πρέπει να ληφθούν υπόψη η ρύπανση της γύρω περιοχής από τη καύση του πετρελαίου όπως και η ηχορύπανση από το συνεχή θόρυβο κατά τη λειτουργία της.

Υπάρχει ακόμη ένα πλεονέκτημα που δε φαίνεται εκ πρώτης όψεως αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη στην απόφαση για εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος σε απομακρυσμένη περιοχή. Είναι η τιμή της γης στην απομακρυσμένη περιοχή που είναι συγκριτικά χαμηλή και έτσι τα χρήματα που θα εξοικονομηθούν από την αγορά της γης μπορεί να χρησιμοποιηθούν στην εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Μην ξεχνάμε ακόμη ότι με την εκλογή φωτοβολταϊκού συστήματος για την τροφοδότηση μιας εξοχικής κατοικίας σε απομακρυσμένη περιοχή, ο καθένας έχει μεγαλύτερη ελευθερία να αποφασίσει την περιοχή στην οποία θέλει να ζήσει.

Φυσικά, αν το κτίσιμο γίνει σε μια περιοχή με πολλές κατοικίες που τροφοδοτούνται από το ίδιο φωτοβολταϊκό σύστημα, τα έξοδα της εγκατάστασης θα κατανέμονται σε όλους τους ιδιώτες με αποτέλεσμα κάθε ιδιοκτήτης να πληρώνει λιγότερα για την ενεργειακή τροφοδότησή του.

Έχουν κτισθεί μέχρι τώρα σε διάφορες χώρες πολλά τέτοια συγκροτήματα κατοικιών και όπως φαίνεται, στο μέλλον πολλοί συνοικισμοί θα κτίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην έχουν ενεργειακή εξάρτηση από το δίκτυο αλλά να έχουν κοινό ηλιακό ηλεκτροπαραγωγό σταθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Συμπερασματικά για την οικονομική βιωσιμότητα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να έχουμε υπόψη τα εξής:

- ≈ Η τιμή της kWh από το φωτοβολταϊκό σύστημα πρέπει να είναι πολύ χαμηλή συγκρινόμενη με αυτή του από το ηλεκτρικό δίκτυο.
- ≈ Το κόστος της kWh από το φωτοβολταϊκό σύστημα πρέπει να υπολογίζεται για όλη τη διάρκεια της ζωής του δηλαδή για 28 χρόνια και όχι για τον πρώτο χρόνο της εγκατάστασής του.

Από την άλλη μεριά πρέπει να εξεταστεί αν υπάρχουν διευκολύνσεις από το κράτος. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν, πιστώσεις από το κράτος, ευκολία δανείου με χαμηλά επιτόκια, απαλλαγή του φωτοβολταϊκού συστήματος στον υπολογισμό των περιουσιακών στοιχείων για

επιβολή φόρου, απαλλαγή από το φόρο εισαγωγής του φωτοβολταϊκού συστήματος και τέλος αφαίρεση από το φορολογητέο εισόδημα των τόκων δανείου που μπορεί να χρησιμοποιήθηκε για την εγκατάστασή του.

Είναι φανερό ότι αυτές οι διευκολύνσεις από το κράτος αποτελούν κίνητρα για την επέκταση της χρησιμοποίησης φωτοβολταϊκών συστημάτων με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας και τον περιορισμό, σε μεγάλο βαθμό, της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα και του θειαφίου που προκαλούν καταστροφική ρύπανση στο περιβάλλον.

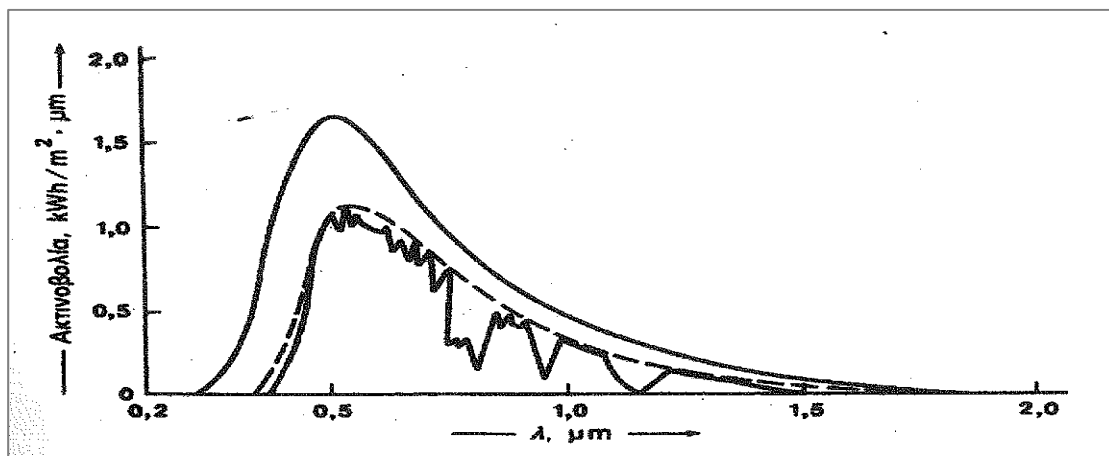
## 2. Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

## 2.1 Η ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

Η διαμόρφωση του φάσματος του φωτός που εκπέμπει ο ήλιος προσομοιάζεται με την ακτινοβολία ενός μελανού σώματος θερμοκρασίας περίπου 5800K, όση είναι, κατά μέσο όρο, η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ήλιου. Η προσέγγιση αυτή είναι επαρκής για τη μελέτη των θερμικών εφαρμογών της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως π.χ. οι ηλιακοί θερμοσίφωνες. Στις περιπτώσεις αυτές ενδιαφέρει συνήθως η συνολική θερμική ισχύ της ακτινοβολίας και ο μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας. Δεν είναι όμως το ίδιο και για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας αφού αυτή καθορίζεται από τη λεπτομερειακή φωτονική σύσταση της ακτινοβολίας. Άλλωστε τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι κατασκευασμένα από ημιαγωγούς των οποίων η δυνατότητα απορρόφησης των φωτονίων της ακτινοβολίας εξαρτάται ουσιαστικά από τη σύγκριση της τιμής της ενέργειάς 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. Η ουσία είναι πάντως πως αυτή η μορφή της ηλιακής ακτινοβολίας δεν παρουσιάζει κανένα ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής εκμετάλλευσης.

Η ανάγκη για τη λεπτομερειακή εξέταση της φασματικής σύστασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές γίνεται φανερό στο σχήμα 2.1, το οποίο δείχνει τη μεγάλη διαφοροποίηση του πραγματικού φάσματος του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της γης. Διαπιστώνουμε ότι το ηλιακό φως αποκτά τελικά μια πολύ ανώμαλη φασματική κατανομή, που οφείλεται σε εκλεκτικές απορροφήσεις και σκεδάσεις στα συστατικά της ατμόσφαιρας που διασχίζει.



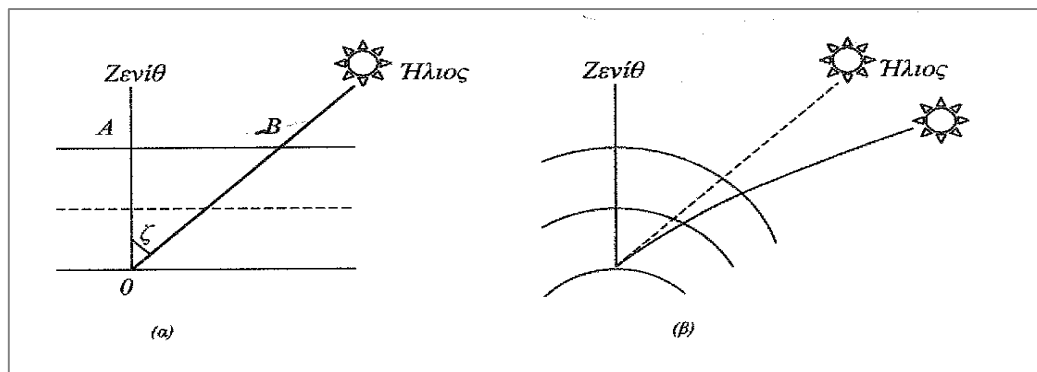
Σχήμα 2.1 Το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην εκπομπή μελανού σώματος θερμοκρασίας 5800K (εξωτερική συνεχής γραμμή), το φάσμα της ίδιας τιμής ύστερα από απορροφήσεις από το όζον και από σκεδάσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (ασυνεχής γραμμή), και το πραγματικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης σε συνθήκες τέτοιας υγρασίας (εσωτερική συνεχής γραμμή).

Ενδεικτική άλλωστε, της επίδρασης της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία είναι η εξάρτηση της έντασής 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 τα 900-1000 W/m<sup>2</sup>, η τιμή της αυξάνεται κατά 7 W/m<sup>2</sup> για κάθε 100m 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. Επίσης από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης συνήθως λιγότερο από το 60% είναι άμεση, σε μορφή δέσμης ακτίνων, που μπορούν π.χ. να εστιαστούν σε κάτοπτρα. Η υπόλοιπη είναι διάχυτη γιατί έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα ανάλογα με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας σ' αυτήν.

## 2.2 ΟΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΗΛΙΑΚΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

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 μια κλίμακα μάζας αέρα AM βαθμολογημένης με την τέμνουσα της ζενιθιακής απόστασης ζ, δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στη θέση του ήλιου και στην κατακόρυφο.



Σχήμα 2.2 Η εξάρτηση της κλίμακας μάζας αέρα από τη θέση του ήλιου.

(α) Απλοποιημένη απεικόνιση με την ατμόσφαιρα να έχει επίπεδη ανάπτυξη σε άπειρη έκταση.

$$\text{Εξ' ορισμού είναι } AM = OB/OA = 1/\sin\zeta$$

(β) Η πραγματική διαμόρφωση της γήινης ατμόσφαιρας με τα στρώματά της να ορίζονται από σφαιρικές επιφάνειες και η αντίστοιχη ατμοσφαιρική διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της μέσα από τα στρώματα αυτά.



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.

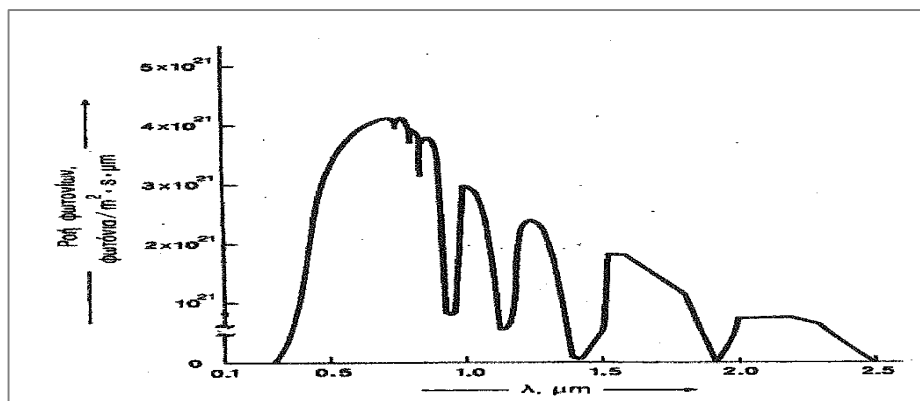
Συγκεκριμένα ως AM1 συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ, που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια ως AM1,5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία  $45^{\circ}$  από το ζενίθ, ως AM2 με τον ήλιο σε γωνία  $60^{\circ}$  κλπ. 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.

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

Πάντως το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας συγκεντρώνεται στη φασματική περιοχή του κυανού και του πράσινου, και ειδικότερα σε μήκη κύματος από 0,45 μέχρι 0,6μm, που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας περίπου 2,1-2,8eV. Για την αντιστοιχία μήκους κύματος και ενέργειας των φωτονίων, υπενθυμίζεται ότι από τη σχέση  $v=c/\lambda$ , που συνδέει τη συχνότητα  $v$  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 κύματος της ακτινοβολίας  $\lambda$ , σε μm, με τη σχέση  $h\nu=1,238/\lambda$ .

### 2.3 Η ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΤΟΥ «ΕΝΟΣ ΗΛΙΟΥ»

Στο ακόλουθο σχήμα 2.3 φαίνεται η 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 2.3 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 κλπ). Ένα μεγάλο μέρος από τις περισσότερες κατοικημένες και αναπτυγμένες περιοχές της γης. Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλεύεται στα  $1000 \text{ W/m}^2$ , ονομάζεται συμβατικά ακτινοβολία ενός ήλιου που 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  $100 \text{ Kw/m}^2$  ονομάζεται «100 ήλιου».

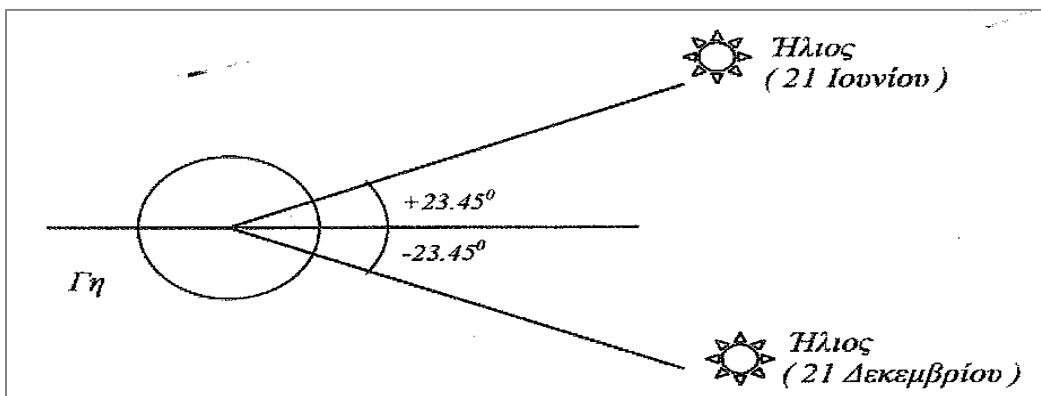
Οι συνθήκες AM0 και AM2 χρησιμοποιούνται συχνά ως πρότυπες για τον έλεγχο και την αξιολόγηση των ηλιακών στοιχείων που προορίζονται για διαστημικές και επίγειες εφαρμογές αντίστοιχα. Για αντικειμενικές συγκρίσεις είναι απαραίτητο να γίνεται σαφής αναφορά των συνθηκών διεξαγωγής των μετρήσεων, διότι οι ιδιότητες των ηλιακών στοιχείων, και γενικότερα η απόδοσή τους, επηρεάζονται σημαντικά από τη μορφή της ακτινοβολίας που δέχονται.

## 2.4 ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

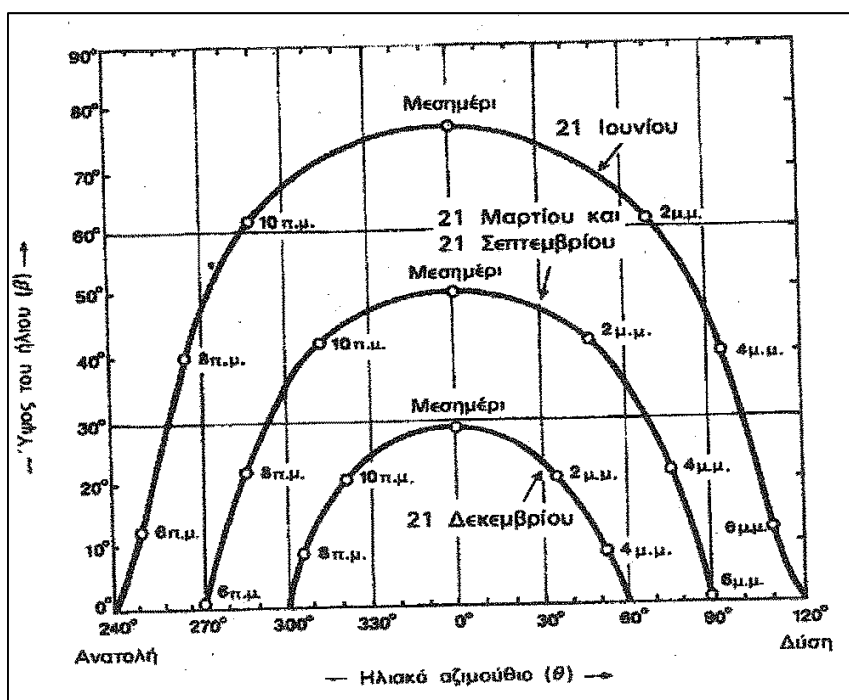
Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια μιας χρονιάς, η θέση του ήλιου παίρνει διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης δηλαδή της γωνίας που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

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 το 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 σ' έναν τόπο, είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, 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 του οποίου ο ήλιος δεν καλύπτεται καθόλου από σύννεφα, καθώς και των ανήλιων ημερών, που ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα σε ολόκληρο το διάστημα της ημέρας.



(α)



(β)

Σχήμα 2.4 Η μεταβολή της απόκλισης και η επίδρασή 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 και τις ισημερίες, σε τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος βόρειο  $38^\circ$ , όπως της Αθήνας

Για παράδειγμα, στον ακόλουθο πίνακα, δίνονται οι τιμές για τα χαρακτηριστικά ορισμένων εποχών στην Αθήνα, όπου γίνονται αισθητές οι μεγάλες διαφορές μεταξύ τους.

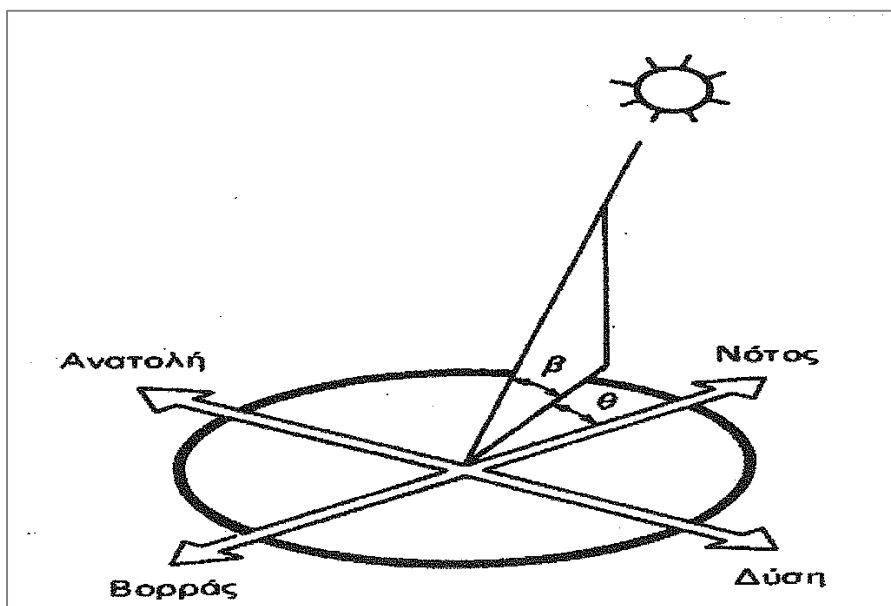
Α) ύψος του ήλιου, θεωρητική ηλιοφάνεια και μέση θερμοκρασία του αέρα στις φωτεινές ώρες της ημέρας			
Ημερομηνία	Ύψος του ήλιου το μεσημέρι	Θεωρητική ηλιοφάνεια	Μέση θερμοκρασία
21 Μαρτίου (εαρινή ισημερία)	51,08°	11,9 ώρες	13° C
21 Ιουλίου (θερινό ηλιοστάσιο)	75,25°	14,8 ώρες	25° C
21 Σεπτεμβρίου (φθινοπωρινή ισημερία)	51,08°	11,9 ώρες	23° C
21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο)	28,35°	9,5 ώρες	11° C

Β) μέσος όρος ηλιοφωγγών και ανήλιων ημερών και οι ώρες της μέσης πραγματικής ηλιοφάνειας στους διάφορους μήνες του έτους												
Είδος ημερών	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
Ηλιοφωγγείς	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	2,511	4,112
Ηλιοφάνεια (ώρες)	123	139	180	233	303	335	373	357	277	211	62	7

Πίνακας 2.1 Ενδεικτικά μετεωρολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά στην Αθήνα

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες: το ύψος και το αζιμουθίο. Το ύψος του ήλιου ( $\beta$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα.



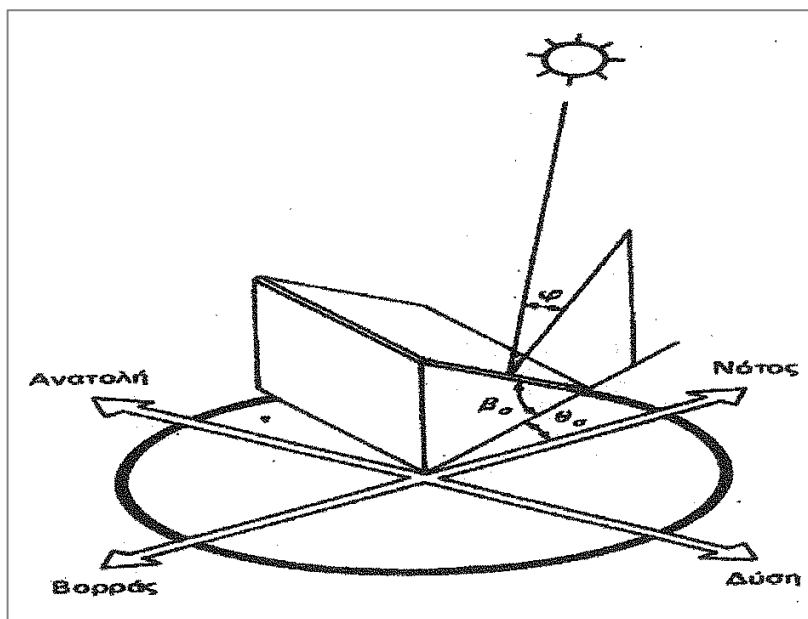
Σχήμα 2.5 Οι γωνίες του ύψους ( $\beta$ ) και του αζιμουθίου ( $\theta$ ) που περιγράφουν κάθε στιγμή τη θέση του ήλιου.

Αντί για το ύψος χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική της γωνία δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, η οποία καλείται ζενιθιακή απόσταση ή ζενιθιακή γωνία του ήλιου. Ζενίθ είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου.

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. 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.

## 2.5 Ο ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

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 2.6 Η κλίση ( $\beta$ ) και η αζιμούθια γωνία ( $\theta$ ) που χαρακτηρίζουν το προσανατολισμό ενός επιπέδου ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης.

Η κλίση του συλλέκτη ( $\beta$ ) είναι η διεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα. Δείχνει πόσο γέρνει ο συλλέκτης και μπορεί να πάρει τιμές από  $0^{\circ}$  έως  $180^{\circ}$ . Για γωνίες  $\beta > 90^{\circ}$  το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.

Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη ( $\theta$ ) 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  $-180^{\circ}$  ως  $+180^{\circ}$ . Η γωνία  $-180^{\circ}$  (που συμπίπτει με την  $+180^{\circ}$ ) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία  $-90^{\circ}$  προς την ανατολή, η γωνία  $0^{\circ}$  προς το νότο και η γωνία  $+90^{\circ}$  προς τη δύση.

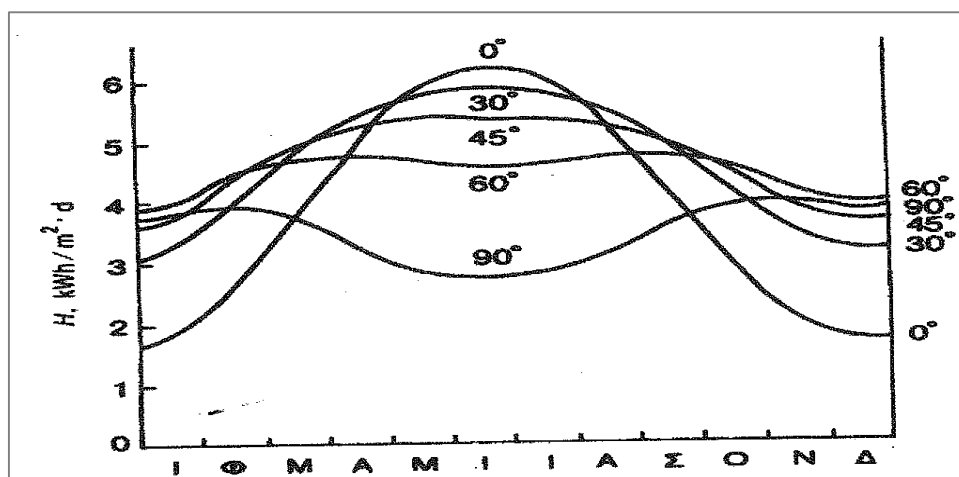
Προφανώς η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε έναν επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνειά του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης ( $\varphi$ ) είναι  $0^{\circ}$ . Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά την διάρκεια της ημέρας. Για τον σκοπό αυτό έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις, που με την βοήθεια υπολογιστικών συστημάτων ή φωτοκυττάρων, επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη ώστε η επιφάνειά του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο, με σοβαρό μειονέκτημα όμως την πολυπλοκότητά τους και το κόστος κατασκευής τους.

## 2.6 Η ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΛΙΣΗ

Στις περισσότερες 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 με τη σχέση:

$$\sin\varphi = \sin\beta \sin\beta_{\sigma} \cos(\beta_{\sigma} - \theta) + \sin\beta \cos\beta_{\sigma}$$

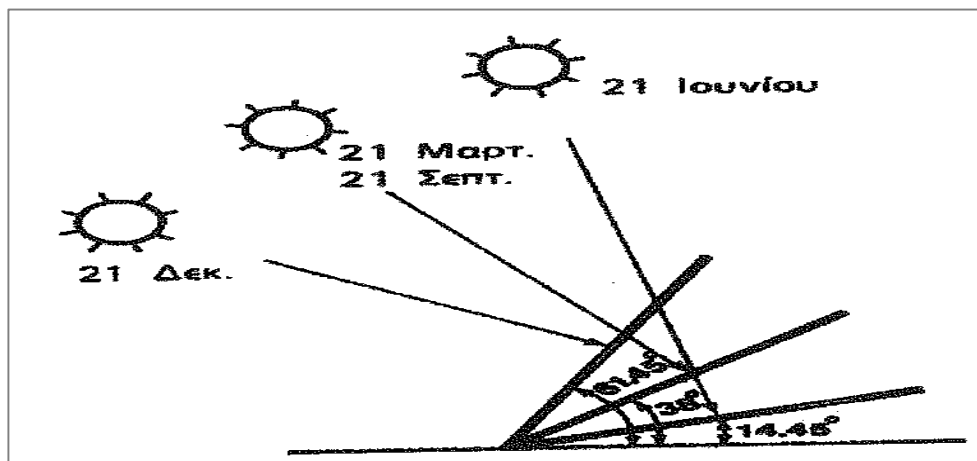
Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι  $0^{\circ}$ . Αλλά λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική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



Σχήμα 2.7 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.

Έτσι αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου  $10^{\circ}$  έως  $15^{\circ}$  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 2.8 φαίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικότερες ημερομηνίες του έτους:



Σχήμα 2.8 Η βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό και το χειμερινό ηλιοστάσιο καθώς και στην εαρινή και τη φθινοπωρινή ισημερία, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος ίδιο με αυτό της Αθήνας.

Στον πίνακα 2.2 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.

Πόλη ή περιοχή	Γεωγραφικό πλάτος
Σιδηρόκαστρο, Διδυμότειχο, Ορεστιάδα	$41^{\circ} 30'$
Φλώρινα, Έδεσσα, Γιαννιτσά, Κιλκίς, Σέρρες, Δράμα, Καβάλα, Ξάνθη,	$41^{\circ}$
Κομοτηνή, Αλεξανδρούπολη	$40^{\circ} 30'$
Καστοριά, Πτολεμαΐδα, Κοζάνη, Νάουσα, Βέροια, Κατερίνη, Θεσσαλονίκη,	$40^{\circ}$
Πολύγυρος, Σαμοθράκη	$40^{\circ}$
Κόνιτσα, Γρεβενά, Λιτόχωρο, Κασσάνδρα, Λήμνος	$39^{\circ} 31'$
Κέρκυρα, Ηγουμενίτσα, Ιωάννινα, Μέτσοβο, Τρίκαλα, Καρδίτσα, Λάρισα,	$39^{\circ}$
Βόλος	$39^{\circ}$
Λευκάδα, Πρέβεζα, Άρτα, Καρπενήσι, Λαμία, Σκόρος, Μυτιλήνη	$38^{\circ} 30'$
Κεφαλληνία, Ιθάκη, Αγρίνιο, Μεσολόγγι, Πάτρα, Αμφισσα, Λιβαδειά, Θήβα,	$38^{\circ}$
Χαλκίδα, Χίος	$38^{\circ}$
Ζάκυνθος, Αμαλιάδα, Καλάβρυτα, Κόρινθος, Μέγαρα, Ελευσίνα, Αθήνα,	$37^{\circ} 30'$
Ραφήνα, Κάρυστος, Άνδρος, Ικαρία, Σάμος	$37^{\circ}$
Πύργος, Μεγαλόπολη, Τρίπολη, Άργος, Ναύπλιο, Πάρος, Σύρος, Πάτιμος	$36^{\circ} 30'$
Πύλος, Καλαμάτα, Σπάρτη, Πάρος, Νάξος, Κάλυμνος, Κως	$36^{\circ}$
Γύθειο, Μύλος, Σαντορίνη, Ρόδος	$36^{\circ}$
Κύθηρα, Καστελόριζο	$35^{\circ} 30'$
Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο, Κάσος, Κάρπαθος	$35^{\circ}$
Χώρα Σφαικίων, Ιεράπετρα, Αγ. Νικόλαος Κρήτης, Κύπρος	$35^{\circ}$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2 Γεωγραφικό πλάτος διαφόρων ελληνικών πόλεων και περιοχών

Όλα αυτά 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 την 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 ακόλουθο πίνακα 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:

ΕΙΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ
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

Πίνακας 2.3 Παραδείγματα τιμών του συλλέκτη ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

## 2.7 ΡΟΗ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

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 πως 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. Σε αυστηρότερη ορολογία, το μέγεθος που χαρακτηρίζει την ποσότητα της ενέργειας, την οποία μεταφέρει σε ένα 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  $\text{kW/m}^2$ .

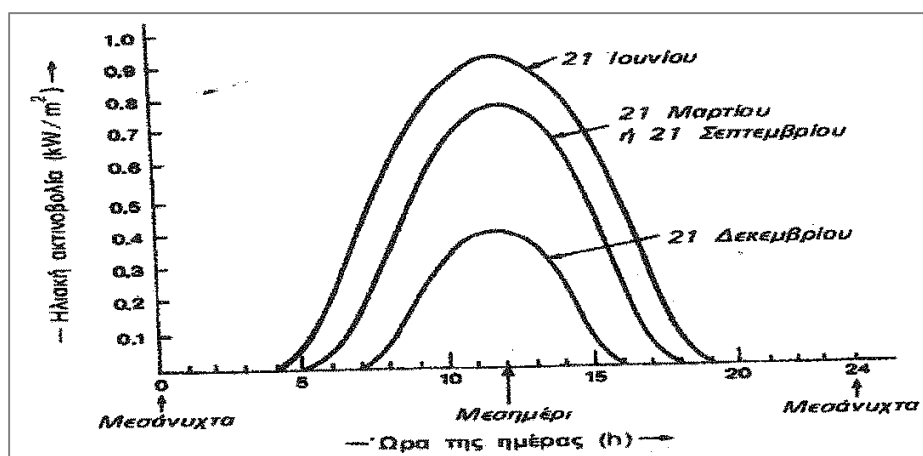
Παρατηρούμε πως ο όρος «ροή ακτινοβολίας» έχει έννοια όταν πρόκειται μόνο για ακτινοβολία που αποτελείται από δέσμη παράλληλων ακτινών. Όταν όμως η ακτινοβολία είναι διάχυτη και διαδίδεται προς διάφορες κατευθύνσεις, όπως συμβαίνει συχνά με ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, τότε ως μέτρο του 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.

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

## 2.8 Η ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

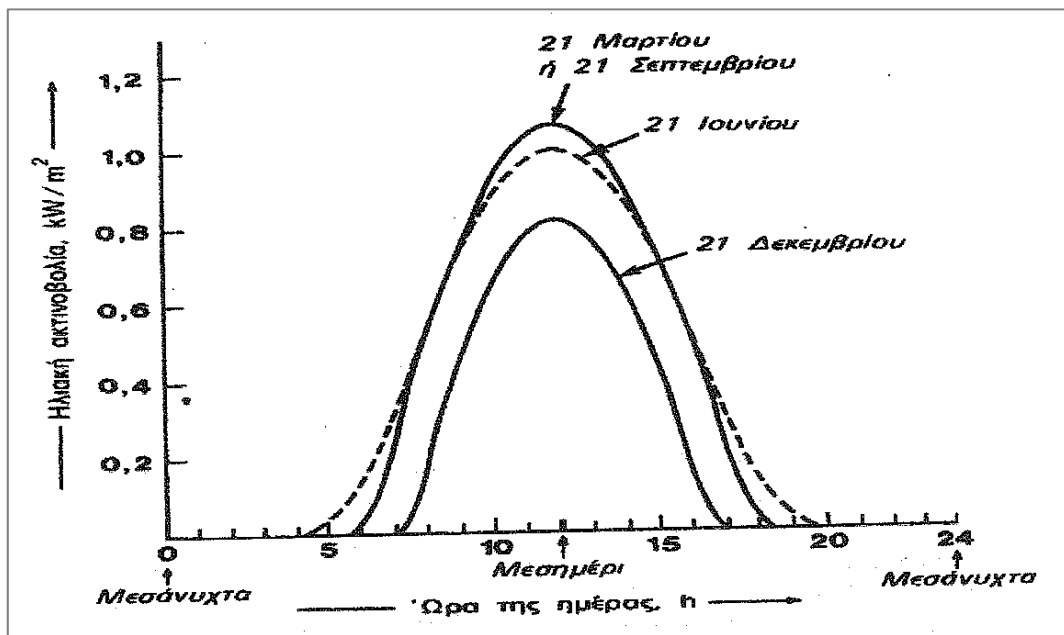
Γνωρίζουμε ότι η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Στο σχήμα 2.9 που ακολουθεί, δείχνονται παραδείγματα της ομαλής μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της μέρας για 3 ενδεικτικές ημερομηνίες σε συνθήκες ιδανικά καθαρού ουρανού.



Σχήμα 2.9 Παράδειγμα της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια των φωτεινών ωρών της ημέρας για 3 χαρακτηριστικές ημερομηνίες

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.

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 2.10 Η διακόμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις γεωγραφικές εποχικές και κλιματικές συνθήκες του παραδείγματος του σχήματος 2.9

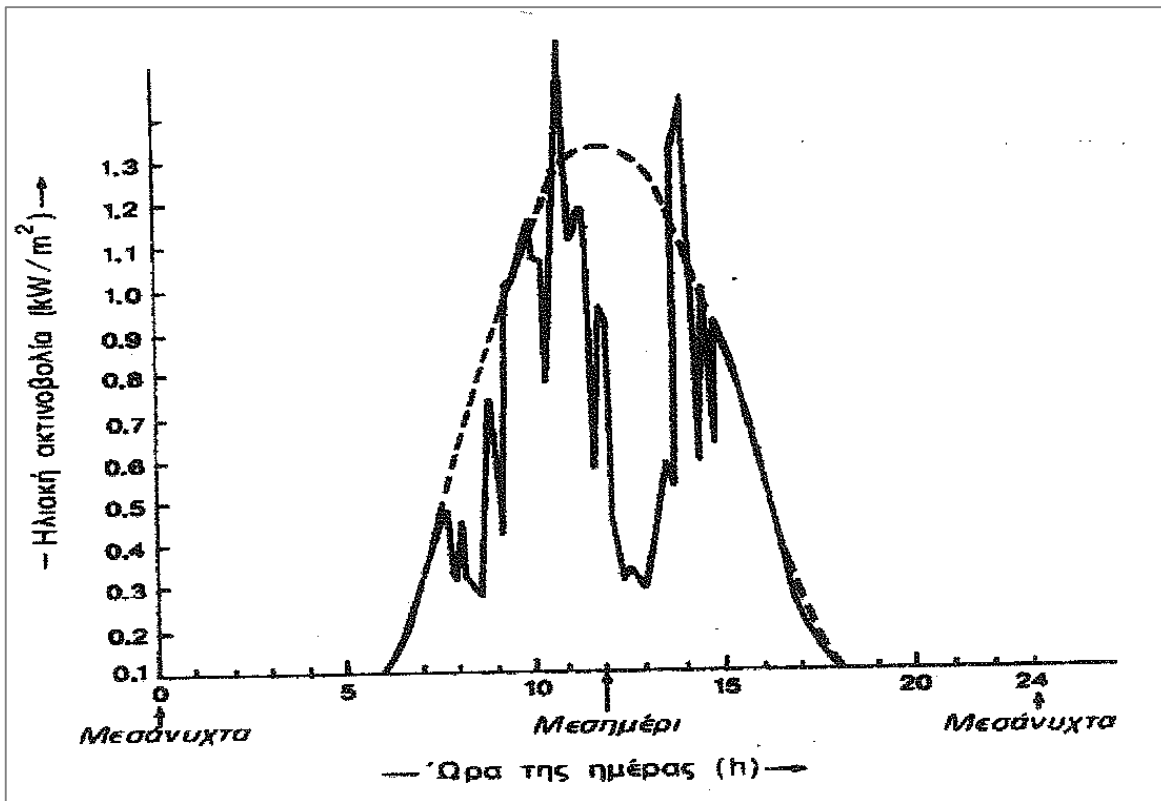
Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη ισχύς της ακτινοβολίας, το ηλιακό μεσημέρι στις ευνοϊκότερες ημέρες του έτους, δε διαφέρει πάρα πολύ από τόπο σε τόπο και η τιμή 1 αποτελεί μια πολύ χονδρική, αλλά πάντως γενικά αποδεκτή προσέγγιση.

Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης γίνεται ανώμαλη.

Οι παρατηρούμενες απότομες πτώσεις της έντασης οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος. Επίσης, το γρήγορο 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. Επίσης εμφανίζονται εξάρσεις που ξεπερνούν τις κανονικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Προφανώς στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα θα συμβαίνει αθροιστική επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας από τον ήλιο, μέσα από ένα άνοιγμα των νεφών, και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.

Στη διάρκεια του έτους, στο βόρειο ημισφαίριο, ο αριθμός των φωτεινών ωρών της μέρας, 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).

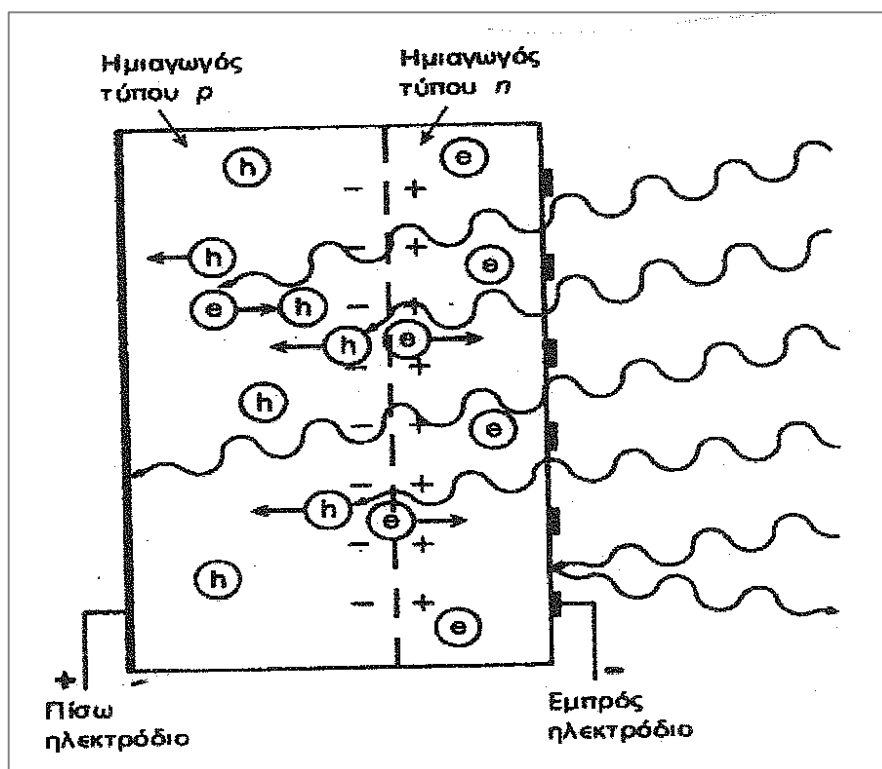


Σχήμα 2.11 Παράδειγμα της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια των φωτεινών ωρών μιας μέρας με μερική νέφωση. Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη διακύμανση με εντελώς καθαρό ουρανό

# 3. Η ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

### 3.1 ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου (δηλαδή η ένωση 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 ακτινοβολήση, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα απ' τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου) μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου.



Σχήμα 3.10 Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο

Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια 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  $p$  και  $n$  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.

### 3.2 Η ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

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 ημιαγωγό υλικό του στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του, με αποτέλεσμα να το θερμάνει. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται, σαν κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό, και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα. 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:

$$E = h\nu = hc / \lambda$$

όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck ( $h = 6.3 \cdot 10^{-34}$  Js) και  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s)

Επομένως αν το ενεργειακό διάκενο είναι σε μονάδες eV και το μήκος κύματος σε  $\mu\text{m}$  τότε το μέγιστο χρησιμοποιήσιμο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό, ενεργειακού διακένου  $E_g$ , θα είναι:

$$\lambda = 1,38 / E_g$$

Αν θεωρήσουμε ότι στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού διεισδύει μια μονοχρωματική δέσμη ακτινοβολίας από όμοια φωτόνια δέσμης  $h\nu$ , που έχει ροή 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:

$$\Phi = H / h\nu = H_\lambda / hc$$

Διαπιστώνουμε ότι για σταθερή ένταση  $H$ , η ροή  $\Phi$  είναι αντίστροφα ανάλογη με την ενέργεια των φωτονίων, και αυξάνει γραμμικά με το  $\lambda$ .

Αν συμβολίσουμε 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 επιφάνειά του, και με  $\Phi_{(x)}$  την τιμή της ροής των φωτονίων στο βάθος αυτό. Η ευκολία με την οποία πραγματοποιείται η απορρόφηση των φωτονίων θα δίνεται από το 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 την συγκεκριμένη τιμή της  $\Phi$  στο βάθος  $x$ , δηλαδή με τη  $\Phi_{(x)}$ . Θα ισχύει επομένως η σχέση:

$$-d\Phi / dx = \alpha \Phi_{(x)}$$

και η σταθερά της αναλογίας  $\alpha$  ονομάζεται συντελεστής απορρόφησης της υπόψη ακτινοβολίας.

Δοθέντος ότι για  $x=0$  η  $\Phi_{(x)}$  παίρνει την τιμή  $\Phi_0$  η λύση της προηγούμενης διαφορικής εξίσωσης είναι:

$$\Phi_{(x)} = \Phi_0 \exp. (-\alpha x)$$

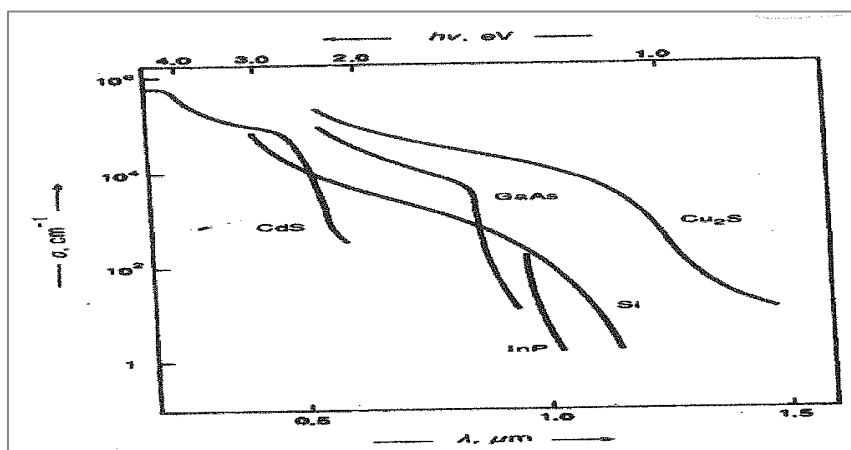
που ονομάζεται νόμος του Beer.

Στη συνέχεια έχουμε:

$$-d\Phi / dx = \alpha \Phi_0 \exp. (-\alpha x)$$

Δηλαδή ότι ο αριθμός 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.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.2 Η μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης  $\alpha$  σε συνάρτηση με το μήκος κύματος  $\lambda$  ή την ενέργεια των φωτονίων  $h\nu$  της ακτινοβολίας, για τους κυριότερους ημιαγωγούς των φωτοβολταϊκών διατάξεων

Συγκεκριμένα μηδενίζεται όταν το  $\lambda$  υπερβαίνει το  $\lambda_g$  του ημιαγωγού, αφού για αυτά τα μήκη κύματος δεν πραγματοποιείται καμία απορρόφηση φωτονίων. Αντίθετα παίρνει μεγάλες τιμές προς την πλευρά των μικρών μήκων κύματος, που σημαίνει ότι η απορρόφηση πρακτικά όλων των αντίστοιχων φωτονίων γίνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού.

### 3.3 Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ

Όταν ένα φωτοβολταϊκό 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. 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:

$$I_{\phi} = e g (L_n + L_p)$$

όπου  $e$  είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο,  $g$  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 μέση μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα.

Ένα χρήσιμο μέγεθος για τον υπολογισμό του φωτορεύματος είναι η φασματική απόκριση  $S$ , που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, σε σχέση με την 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:

$$S_{(\lambda)} = I_{\phi} (\lambda) / e \Phi_{(\lambda)}$$

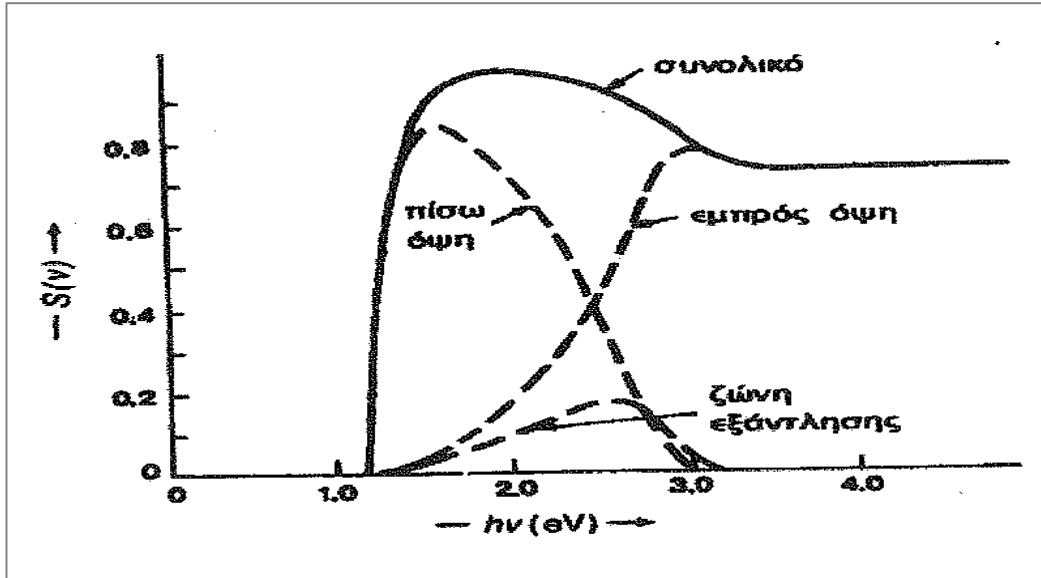
όπου  $\Phi_{(\lambda)}$  είναι το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από  $\lambda$  μέχρι  $\lambda + d\lambda$ , και επομένως το συνολικό φωτόρευμα του στοιχείου, όταν δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία, θα είναι:

$$I_{(\phi)} = e \Phi_{(\lambda)} S_{(\lambda)} d\lambda$$

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 ακόλουθο σχήμα φαίνεται η μεταβολή της φασματικής απόκρισης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου του εμπορίου, σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται.

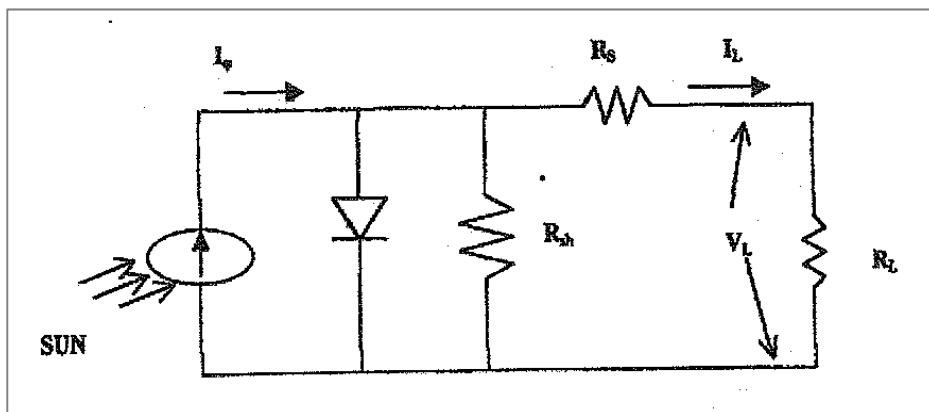




Σχήμα 3.3 Η μεταβολή της φασματικής απόκρισης  $S(\nu)$  σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας στις 3 περιοχές ενός φωτοβολταϊκού ηλιακού στοιχείου πυριτίου: εμπρός όψη τύπου  $n$ , ζώνη εξάντλησης και πίσω όψη τύπου  $p$ .

### 3.4 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Το ακόλουθο σχήμα θα μας βοηθήσει να προσεγγίσουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων:



Σχήμα 3.4 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι προσαρμόζεται με μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μια δίοδο. Περιέχεται η ωμική αντίσταση  $R_s$ , που

παρεμβάλλεται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό (κυρίως το εμπρός επιφανειακό στρώμα του) και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Ακόμα, επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού λόγω αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$ . Συνήθως στα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου η  $R_s$  είναι μικρότερη από 5 Ohm και η  $R_{sh}$  είναι μεγαλύτερη από 500 Ohm. Τα στοιχεία  $R_L$ ,  $V_L$ ,  $I_L$  αναφέρονται στο φορτίο.

Η πηγή εντάσεως παράγει το φωτορεύμα  $I_\phi$  το οποίο είναι ανάλογο της εντάσεως της ηλιακής ακτινοβολίας.

Όταν το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ανοιχτοκυκλωμένο (δεν συνδέεται φορτίο στα άκρα του), αναπτύσσεται μεταξύ των δύο όψεων ένα αντίθετο ρεύμα, που αντισταθμίζει το φωτόρευμα, ενώ στα άκρα του εμφανίζεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ . Για την κατάσταση αυτή ισχύει η εξίσωση:

$$I_{\phi 0} - I_0^* (e^{V_{oc}/\mu} - 1) - (V_{oc} / R_{sh}) = 0$$

όπου

$I_0$ : το ανάστροφο ρεύμα κόρου

$\mu = \Gamma kT/e$

$\gamma$ : συντελεστής ποιότητας της διόδου

$K$ : η σταθερή Boltzmann

$T$ : η απόλυτη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου

$e$ : το φορτίο του ηλεκτρονίου

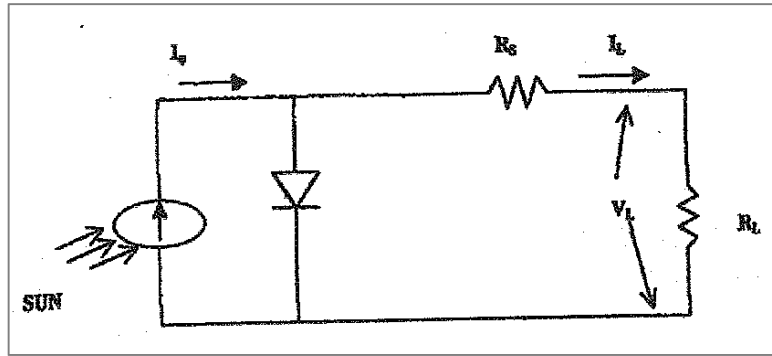
Όταν στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου συνδεθεί φορτίο θα ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$I_\phi - I_0 (e^{(V_L + R_s I_L)/\mu} - 1) - ((V_L + R_s I_L) / R_{sh}) = I_L$$

Όταν τα άκρα του στοιχείου βραχυκυκλωθούν εμφανίζεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  το οποίο υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_\phi - I_0^* (e^{R_s I_{sc}/\mu} - 1) - (R_s / R_{sh})^* I_{sc} = I_{sc}$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.4 μπορεί να απλοποιηθεί χωρίς σημαντικό σφάλμα αν ληφθεί υπόψη ότι οι απώλειες χωρίς φορτίο είναι πολύ μικρές, δηλαδή να αγνοηθεί η  $R_{sh}$ .

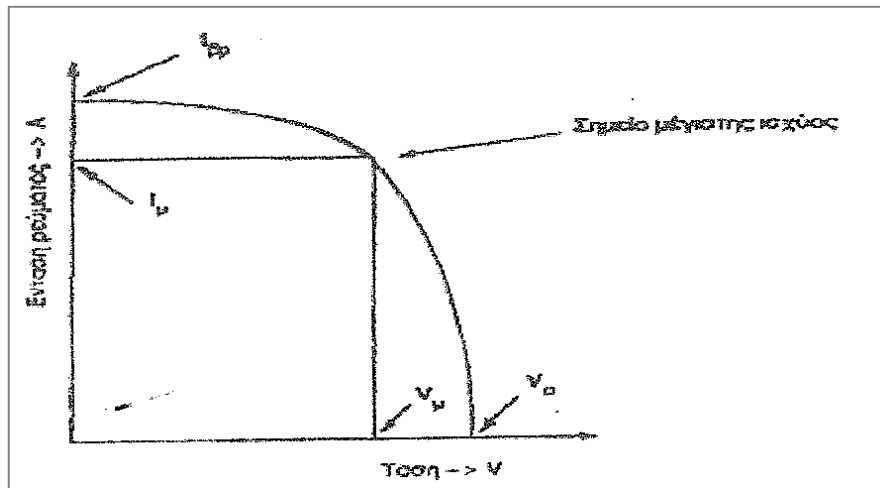


Σχήμα 3.5 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$I_{\phi} - I_0 * (e^{V_L + R_s I_L / \mu} - 1) = I_L$$

Η τελευταία σχέση εκφράζει την χαρακτηριστική φόρτισης του φωτοβολταϊκού στοιχείου  $I - V$  (σχήμα 3.6):



Σχήμα 3.6 Χαρακτηριστική  $I-V$  φωτοβολταϊκού στοιχείου

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες αποτελούνται από πολλά όμοια φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα. Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας θα είναι προφανώς όμοιο με των φωτοβολταϊκών στοιχείων, αλλά εάν  $I_{\phi}$  το φωτόρευμα και  $I_0$  το ανάστροφο ρεύμα κόρου ενός στοιχείου, τα αντίστοιχα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας θα είναι προφανώς:

$$I_{\phi} = N_p * I_{\phi} \quad \text{και} \quad I_0 = N_p * I_0$$

Όπου  $N_p$  είναι ο αριθμός των παράλληλων στοιχείων της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

Η ισοδύναμη αντίσταση σειράς  $R_S$  και η σταθερά  $\mu$  του κυκλώματος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, εάν  $R_S$  και  $\mu$ , του φωτοβολταϊκού στοιχείου προκύπτει ότι θα είναι:

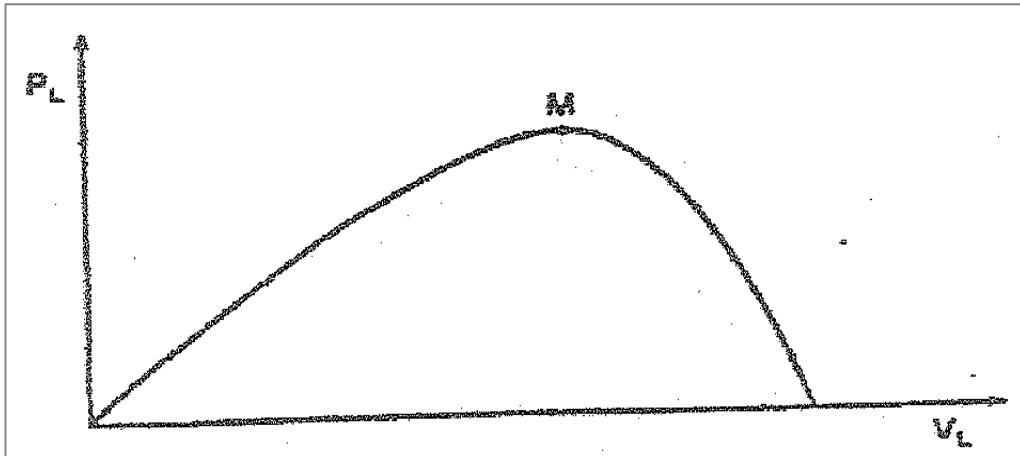
$$R_S = (N_S / N_P) * R_s \quad \text{και} \quad \mu = N_s * \mu$$

Επομένως το ισοδύναμο κύκλωμα και οι αντίστοιχες σχέσεις εντάσεως – τάσεως της φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι οι ίδιες με του φωτοβολταϊκού στοιχείου αλλά με προσαρμοσμένη τιμή των παραμέτρων.

Η παρεχόμενη στο φορτίο ισχύς θα είναι:

$$P_L = I_L * V_L = -R_L * I_L^2 + \mu * I_L * I_n * ((I_\phi - I_L + I_0) / I_0)$$

Με βάση αυτή τη σχέση μπορεί να χαραχθεί μια άλλη χαρακτηριστική καμπύλη της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, η οποία έχει την μορφή του σχήματος 3.7, για μια ορισμένη τιμή ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Το σημείο μέγιστης ισχύος  $M$  θα είναι προφανώς το ανώτερο μέγιστο της καμπύλης αυτής.



Σχήμα 3.7 Χαρακτηριστική P-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Είναι προφανές ότι το σημείο  $M$  είναι εκείνο στο οποίο επιδιώκεται να λειτουργεί η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απολαβή της διατιθέμενης ηλιακής ισχύος.

### 3.5 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

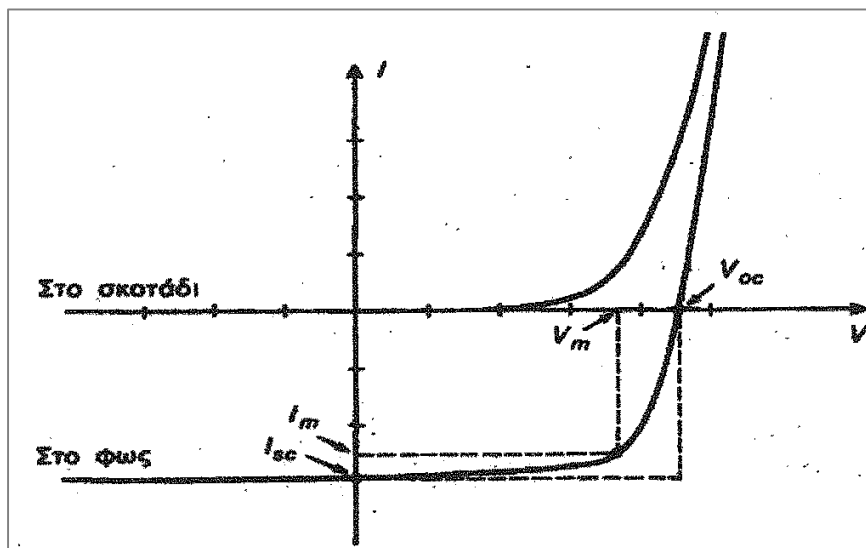
32

Ο λόγος της μέγιστης 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.

Δηλαδή:

$$FF = I_m \cdot V_m / I_{sc} \cdot V_{oc}$$

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.8, ο FF δίνεται από το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου, που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V του στοιχείου, σε συνθήκες ακτινοβολίας, προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ .



Σχήμα 3.8 Η χαρακτηριστική καμπύλη έντασης – τάσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως. Διακρίνονται τα δύο ορθογώνια που ο λόγος των εμβαδών τους καθορίζει την τιμή του συντελεστή πλήρωσης.

Τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθώς και εκείνα που καθορίζουν την απόδοσή τους είναι τα: ο FF, η  $I_{sc}$  και η  $V_{sc}$ .

Όσον αφορά τον συντελεστή απόδοσης των στοιχείων,  $\eta$ , ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\eta = P_m / (H \cdot A) = (I_m \cdot C_m) / (H \cdot A) = (FF \cdot I_{sc} \cdot V_{sc}) / (H \cdot A)$$

Όπου  $H$  είναι η ένταση (πυκνότητα της ισχύος) της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, εμβαδού  $A$ . για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων, επιδιώκεται οι τιμές των FF,  $I_{sc}$  και  $V_{sc}$ , να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

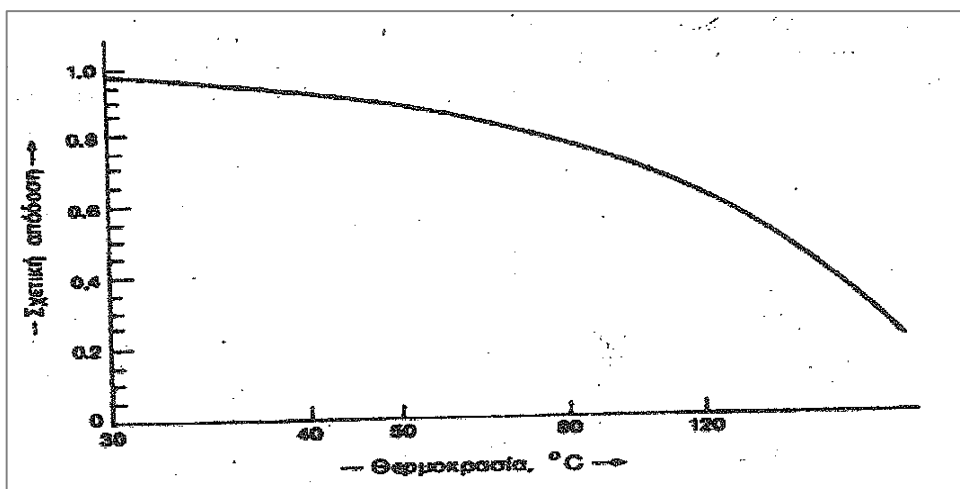
Προφανώς θα ισχύει και η σχέση:

$$\eta = \Phi \cdot (E_g) \cdot V_m / (\Phi \cdot E_\mu)$$

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.

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.

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. Παράλληλα μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 3.9 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, πχ 20°C, είναι  $n$ , η τιμή του σε μια διαφορετική θερμοκρασία  $\theta$  θα είναι:

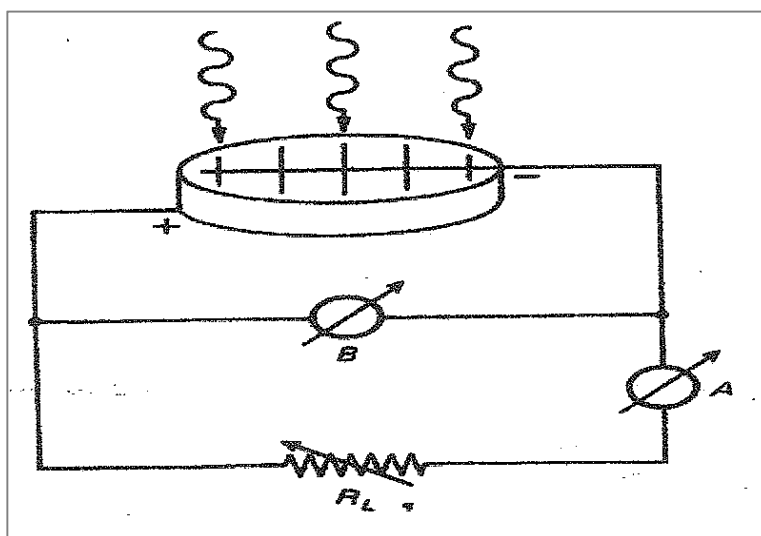
$$n_{\theta} = n \cdot \sigma_{\theta}$$

όπου  $\sigma_{\theta}$  είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης.

### 3.6 Η ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

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, ηλεκτροπαραγωγά 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.

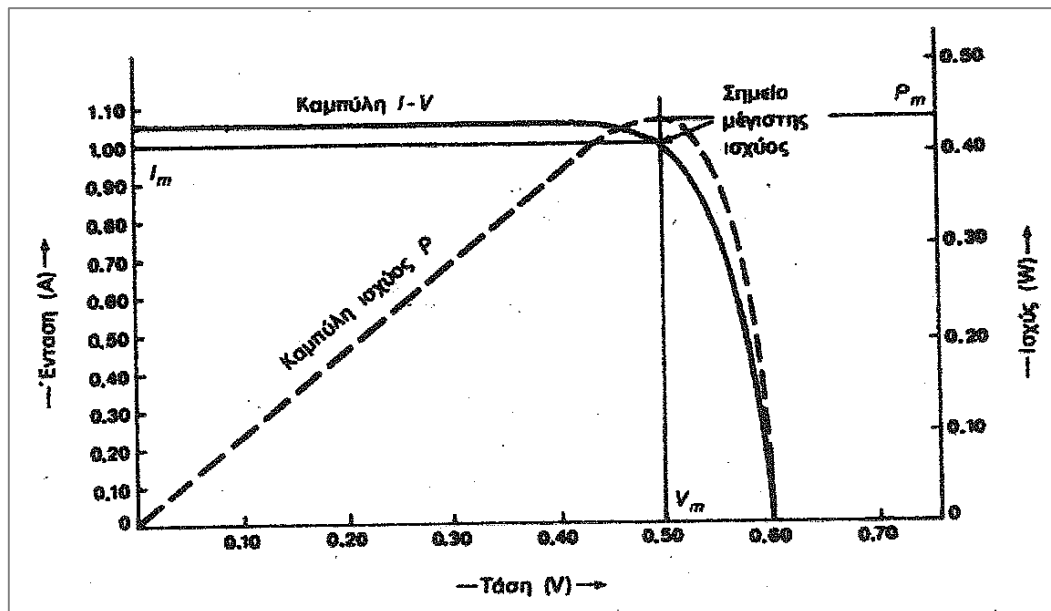
Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα εξετάσουμε τη συμπεριφορά του όταν οι πόλοι του συνδεθούν με ένα κύκλωμα που περιέχει μια μεταβλητή αντίσταση:



Σχήμα 3.10 Πειραματική διάταξη, με ένα βολτόμετρο, ένα αμπερόμετρο και μια μεταβλητή αντίσταση για τη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Παρατηρούμε πως όταν η τιμή της αντίστασης είναι μηδέν, δηλαδή στη βραχυκυκλωμένη κατάσταση, η ένταση του ρεύματος παίρνει τη μέγιστη τιμή  $I_{sc}$  ενώ τη 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 ( $P = I \cdot V$ ) 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 3.11. 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

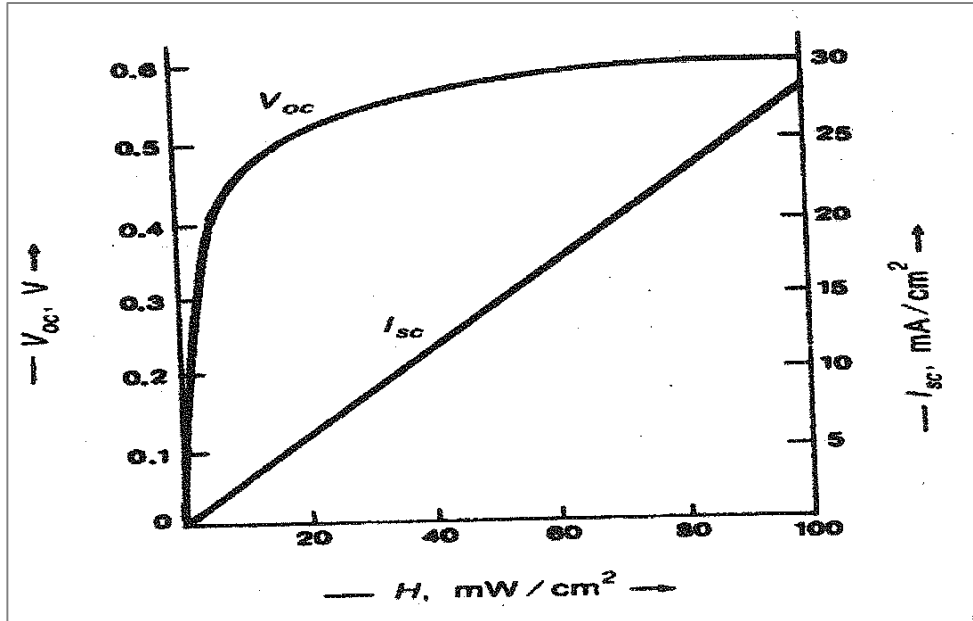
στοιχείου  $n$ . Επομένως από πρακτική άποψη, είναι πολύ σημαντικό η αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο να έχει κατάλληλη τιμή, ώστε στις συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας να παράγεται από το στοιχείο η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς.



Σχήμα 3.11 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  $P_m$ .

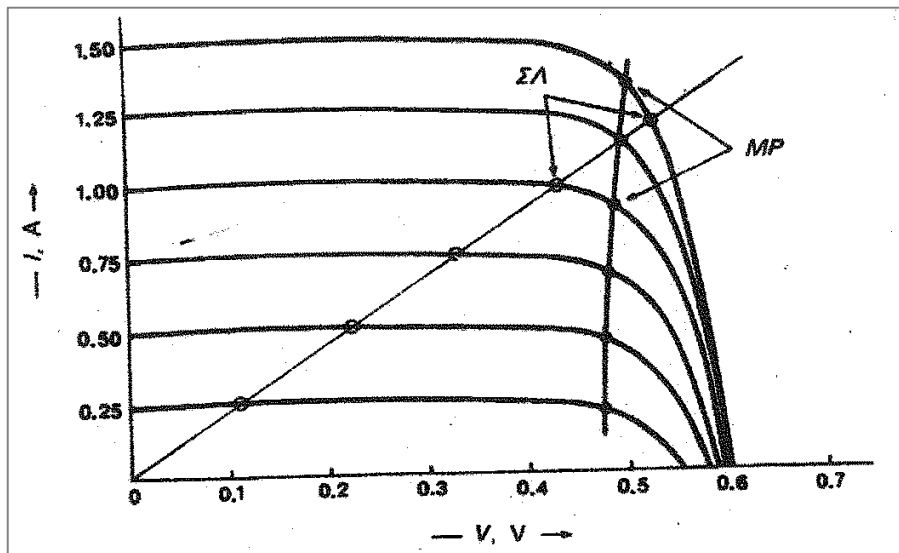
Τα παραπάνω αφορούν σε συνθήκες σταθερής ισχύος της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και σταθερής θερμοκρασίας του. Βλέπουμε όμως στο σχήμα 3.12, ότι η μεταβολή της πυκνότητας της ισχύος της ακτινοβολίας συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή της ανοιχτοκυκλωμένης τάσης και της βραχυκυκλωμένης 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. 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 3.12 Η μεταβολή της ανοιχτοκυκλωμένης 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 3.13 βλέπουμε ότι για διαφορετικές πυκνότητες της ακτινοβολίας, σχηματίζεται μια οικογένεια μετατοπισμένων καμπυλών έντασης – τάσης.



Σχήμα 3.13 Η μετατόπιση των σημείων λειτουργίας (ΣΑ) ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου και η απομάκρυνσή 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.

Είναι φανερό ότι πχ για την ακτινοβολία που δίνει  $I_{sc} = 1.25 \text{ A}$  έχουμε περίπου  $I_m = 1.1 \text{ A}$  και  $V_m = 0.5 \text{ V}$ , και επομένως η κατάλληλη αντίσταση του κυκλώματος για να παράγεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό στοιχείο του παραδείγματος είναι  $R_L = V_m / I_m = 0.5 / 1.1 = 0.455 \Omega$ . Η αντίσταση όμως αυτή βλέπουμε ότι είναι εντελώς ακατάλληλη για όλες τις άλλες συνθήκες ακτινοβολίας, αφού η ευθεία με κλίση  $0.455 \Omega$  τέμνει τις αντίστοιχες καμπύλες σε σημείο διαφορετικό από το σημείο της μέγιστης ισχύος.

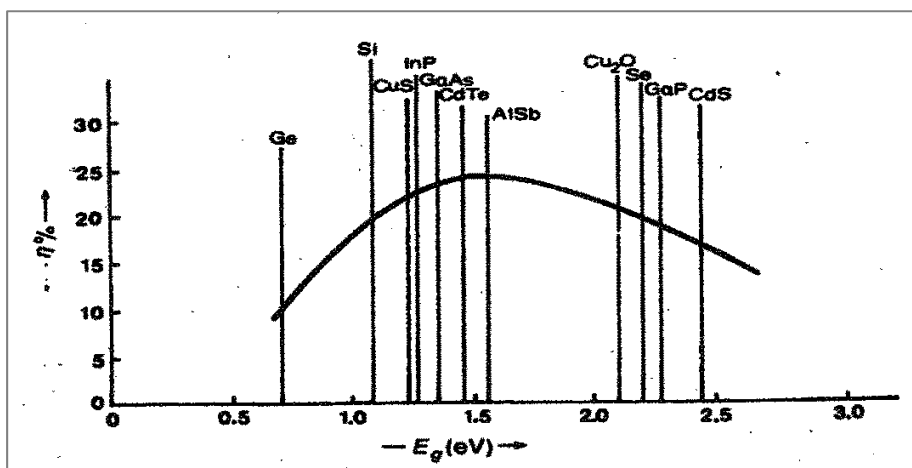
Πάντως σε κάθε περίπτωση, λόγω της πολύ μικρής τιμής του ανάστροφου ρεύματος κόρου  $I_0$ , η ένταση του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πρακτικά ανάλογη προς την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχεται, δηλαδή προς το γινόμενο της έντασης (της πυκνότητας της ισχύος) της ακτινοβολίας επί το εμβαδόν της επιφάνειάς 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 την 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.

### **3.7 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ ΓΙΑ ΗΛΙΑΚΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

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 ενέργειάς 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 καταλληλότητά τους για να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Στο σχήμα 3.14 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  $1.5 \text{ eV}$ .

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 3.14 Η θεωρητική απόδοση ( $\eta$ ) των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων σε συνάρτηση με το ενεργειακό διάκενο ( $E_g$ ) του ημιαγωγού από τον οποίο είναι κατασκευασμένα.

Πχ στο αρσενικούχο γάλλιο (GaAs), που είναι ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακενου, 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 $\mu$ m, ενώ αντίστοιχα στο πυρίτιο Si χρειάζεται στρώμα πάχους περίπου 100 $\mu$ m.

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

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 3.1). 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.

Πίνακας 3.1 Οι μεγαλύτερες αποδόσεις φωτοβολταϊκής μετατροπής που έχουν πραγματοποιηθεί με ηλιακά στοιχεία, σε εργαστηριακές συνθήκες

Υλικό	Τύπος στοιχείων	Μέγιστη απόδοση σε ακτινοβολία AM1
.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	Στόκυ	10 %
P - Cu <sub>2</sub> S / n - CdS	Ετεροένωση	10 %

### 3.8 ΗΛΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ / Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο 1.1 eV. Αν και οι δύο ιδιότητες (έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή διακένου) δεν είναι ιδεώδεις για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι 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 ιδιότητές του είναι καλά μελετημένες και τι 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 υλικά στοιχεία πυριτίου έχουν λειτουργήσει με απολύτως ικανοποιητική αξιοπιστία σε ακραίες συνθήκες, τόσο σε διαστημικές όσο και σε επίγειες εφαρμογές. Πχ σε διαστημόπλοια σε τροχιά προς τον πλανήτη Δία με ένταση ακτινοβολίας μόλις  $50 \text{ W/m}^2$  και θερμοκρασία  $-120^\circ\text{C}$ , ή σε άλλα διαστημόπλοια σε τροχιά προς τον Ερμή και την Αφροδίτη με ένταση ακτινοβολίας  $2.5 \text{ kW/m}^2$  και θερμοκρασία  $140^\circ\text{C}$ , 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  $100 \text{ km/h}$ , 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  $\text{kW}_p$ , και προορίζονται αποκλειστικά για τηλεπικοινωνιακούς, μετεωρολογικούς και ερευνητικούς δορυφόρους. Σήμερα η ετήσια παραγωγή τους έχει φτάσει τα  $10 \text{ MW}_p$  (αύξηση περίπου 1000 φορές) από τα οποία μόλις τα  $150 \text{ kW}_p$  προορίζονται για δορυφορικές ή άλλες διαστημικές εφαρμογές, ενώ το υπόλοιπο χρησιμοποιείται σε επίγειες φωτοβολταϊκές διατάξεις.

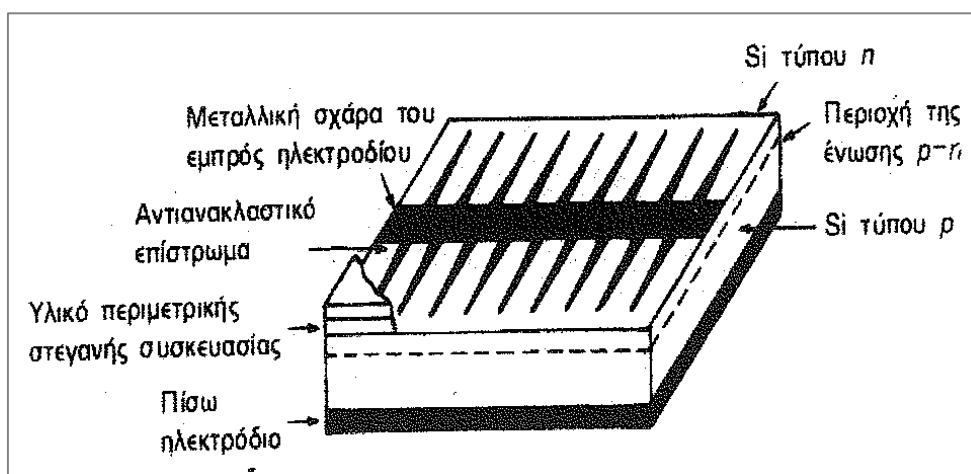
Σύμφωνα με έναν θεωρητικό υπολογισμό, η απόδοση των ηλιακών στοιχείων πυριτίου μπορεί να φθάσει μέχρι 23.92% για συνθήκες AM1. Ο υπολογισμός έχει γίνει για ηλιακό στοιχείο πάχους  $100\mu\text{m}$  με εμπρός τμήμα τύπου n πάχους  $0.2\mu\text{m}$  και ζώνη εξάντλησης πάχους  $0.15\mu\text{m}$ . Το μήκος 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  $V_{oc} = 0.7\text{V}$  και πυκνότητα βραχυκυκλωμένου φωτορεύματος  $I_{\phi} = 40\text{mA/cm}^2$ , περίπου.

Πειραματικά, η μεγαλύτερη απόδοση ηλιακού στοιχείου πυριτίου AM1 μετρήθηκε εργαστηριακά 19%, με απώλειες ανάκλασης 3% και συντελεστή 0.77. Στις πρακτικές εφαρμογές, τα ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου μεγάλης επιφάνειας έχουν απόδοση περίπου 10% - 12% ή λίγο μεγαλύτερη.

### 3.9 Η ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Για να έχει το πυρίτιο αλλά και κάθε άλλος κρυσταλλικός ημιαγωγός ικανοποιητικές ιδιότητες για φωτοβολταϊκές και γενικότερα για ηλεκτρονικές εφαρμογές (πχ μεγάλη κινητικότητα, μεγάλο μήκος διάχυσης και μεγάλο χρόνο ζωής των φορέων – κυρίως των φορέων μειονότητας – πριν από την επανασύνδεσή τους) πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό τους πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής. Η πρώτη φάση του 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 πχ της τάξης του 99.999999%, σε κυλινδρική μονοκρυσταλλική μορφή, διαμέτρου περίπου 10cm. 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 επιφάνειάς τους με ένα αντανακλαστικό επίστρωμα για τη μείωση της ανάκλασης του φωτός και η στεγανή συσκευασία σε πλαίσια.



Σχήμα 3.15 Σχηματική απεικόνιση της τομής ενός συσκευασμένου ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου πυριτίου τύπου p-n

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 15% 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.

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 αντανακλαστικά υλικά (πχ SiO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 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 μια 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 kW<sub>p</sub>, 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 διαμόρφωση της διόδου 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. Επίσης κατασκευάζονται στοιχεία με αντίθετη ένωση, δηλαδή εμπρός τύπου p και πίσω τύπου n, κύριο χαρακτηριστικό των οποίων είναι η αντοχή τους σε ισχυρές ακτινοβολίες.

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 (σχήμα 3.2). 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 για παράδειγμα, το εμπρός τμήμα του στοιχείου είναι τύπου n, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι οπές που δημιουργούνται από το φως να συναντήσουν αμέσως ελεύθερα ηλεκτρόνια 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 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 μεν 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.

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.

### 3.10 ΗΛΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΙΟΥΧΟΥ ΚΑΔΜΙΟΥ

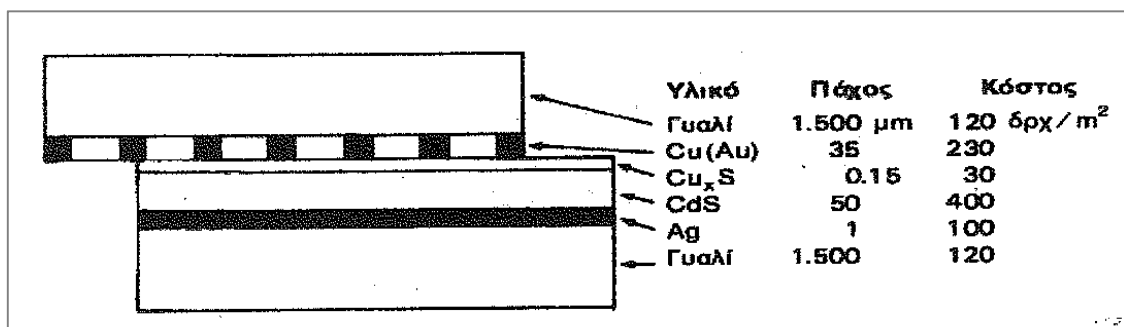
Το θειούχο κάδμιο (CdS) είναι ένας ημιαγωγός με άμεσο και σχετικά μεγάλο ενεργειακό διάκενο που έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές, με επιτυχία.

Το ενεργειακό διάκενο του CdS 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 στρώματός του πρέπει να είναι αντίστοιχα μικρό.

Το αποτέλεσμα του μεγάλου ενεργειακού διακένου του CdS είναι ότι η πυκνότητα του παραγόμενου φωτορεύματος στα στοιχεία αυτά, 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 θειούχου καδμίου είναι ακόμη μικρές, αλλά οι μελλοντικές προοπτικές χρησιμοποίησής τους είναι αρκετά υψηλές, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής τους.

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται μια διάταξη ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου CdS, με κόστος περί τις 1000 δρχ /m<sup>2</sup>, ποσό ασήμαντο σε σύγκριση με τα ηλιακά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου.



Σχήμα 3.16 Διαστάσεις και κόστος των συστατικών ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου CdS. Η σχάρα του εμπρός ηλεκτροδίου είναι από επιχάλκωμένο χρυσό. Το πίσω ηλεκτρόδιο είναι από άργυρο

Τα ηλιακά στοιχεία CdS έχουν αρκετά ικανοποιητική απόδοση περίπου 10% αλλά υπάρχουν κάποιες επιφυλάξεις για τη σταθερότητά του, ιδίως στην επίδραση της υγρασίας. Δεν πιστεύεται δηλαδή ότι εξασφαλίζουν την πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής που αναμένεται για τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου.

### 3.11 ΗΛΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΣΕΝΙΚΟΥΧΟΥ ΓΑΛΛΙΟΥ

Το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) είναι ένας ημιαγωγός, με ενεργειακό διάκενο 1.43 eV. Η τιμή αυτή του ενεργειακού διακένου, 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. Στα συγκεντρωτικά 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 σχεδόν πενταπλάσιο, σε σχέση με το πυρίτιο, κόστος του ηλιακού στοιχείου.

Το σχετικά μεγάλο ενεργειακό διάκενο του GaAs έχει σαν αποτέλεσμα την καλή του συμπεριφορά στις κάπως υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή η ιδιότητα είναι αρκετά σημαντική για τα συγκεντρωτικά συστήματα, όπου τα ηλιακά στοιχεία συχνά υπερθερμαίνονται από την ισχυρή ακτινοβολία που δέχονται. Συγκεκριμένα, η απόδοσή τους στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, όταν θερμανθούν στους 200°C. Η αντίστοιχη μείωση στα ηλιακά στοιχεία πυριτίου παρατηρείται ήδη στους 120°C, ενώ για τα περισσότερο ευαίσθητα στοιχεία CdS στους 80°C.

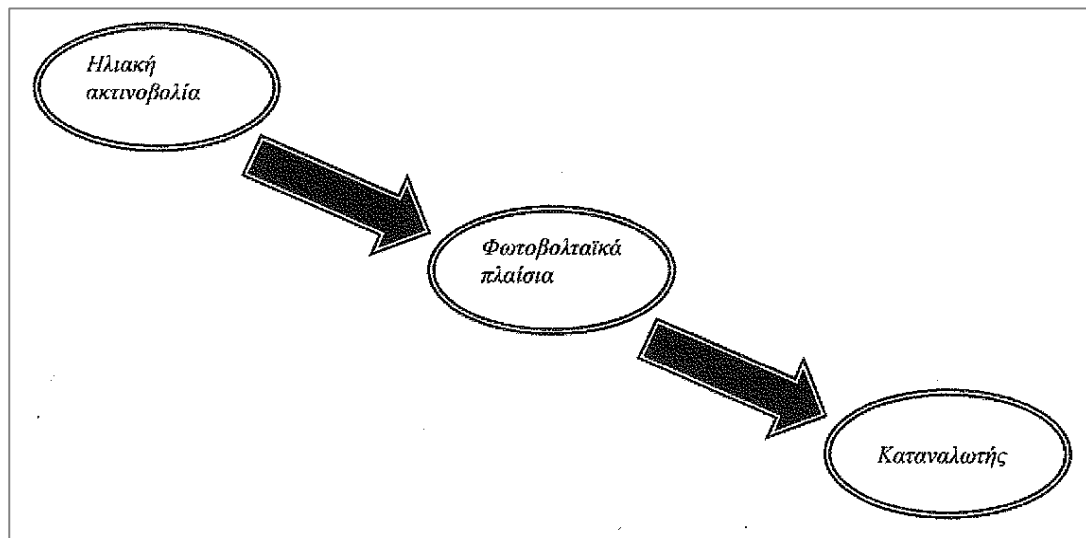


# 4. ΕΙΔΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

## 4.1 ΑΥΤΟΤΕΛΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

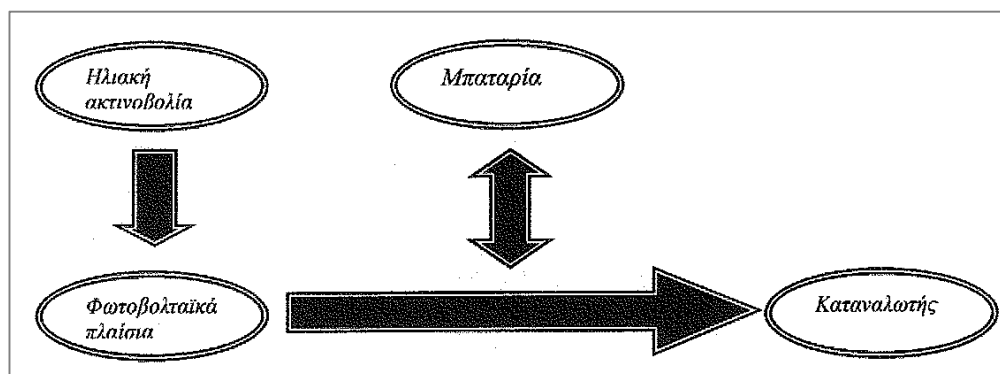
Το σύστημα αυτό μπορεί να είναι πολύ ή πολύπλοκο ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο κατασκευάζεται.

Το πιο απλό σύστημα είναι εκείνο που αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία τροφοδοτούν απ' ευθείας τον καταναλωτή χωρίς να γίνεται αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας ή ρύθμιση της τάσης (σχήμα 4.1). Το σύστημα αυτό τροφοδοτεί τον καταναλωτή μόνο όταν υπάρχει φωτισμός στα φ/β πλαίσια. Τέτοιο σύστημα χρησιμοποιείται στους μικρούς υπολογιστές τσέπης και σε αντλίες νερού που λειτουργούν με κινητήρα συνεχούς τάσης.



Σχήμα 4.1 Διάγραμμα αυτοτελούς φωτοβολταϊκού συστήματος που αποτελείται μόνο από τα πλαίσια και τον καταναλωτή

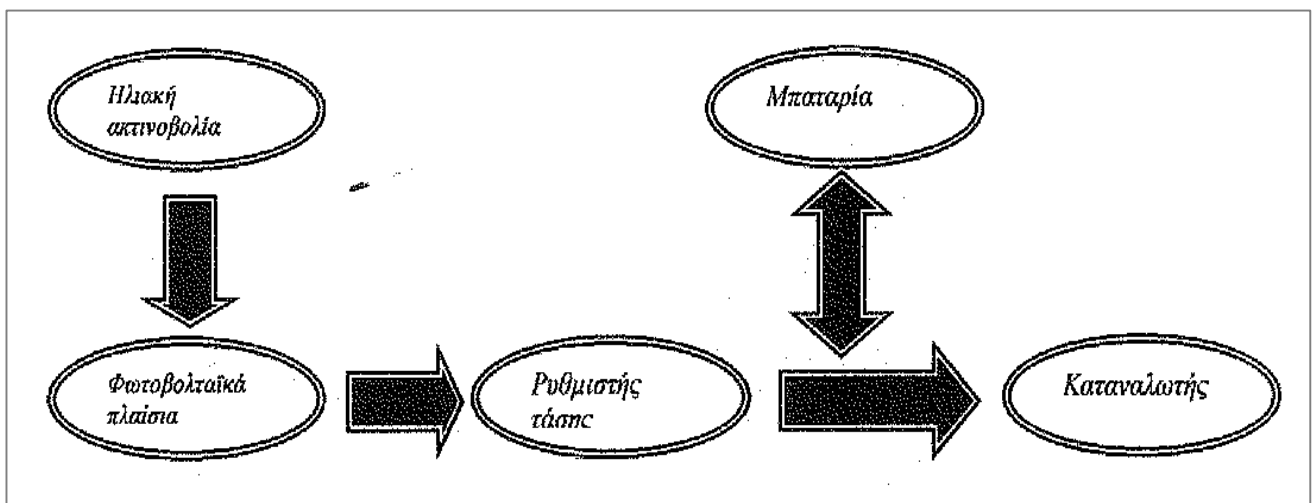
Ένα πιο σύνθετο σύστημα από το προηγούμενο περιλαμβάνει και μια μπαταρία για την αποθήκευση μέρους της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Στην περίπτωση αυτή η ενέργεια των πλαισίων μεταβιβάζεται στον καταναλωτή και αυτή που περισσεύει αποθηκεύεται στην μπαταρία (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα αυτοτελούς φωτοβολταϊκού συστήματος που περιλαμβάνει και μπαταρία

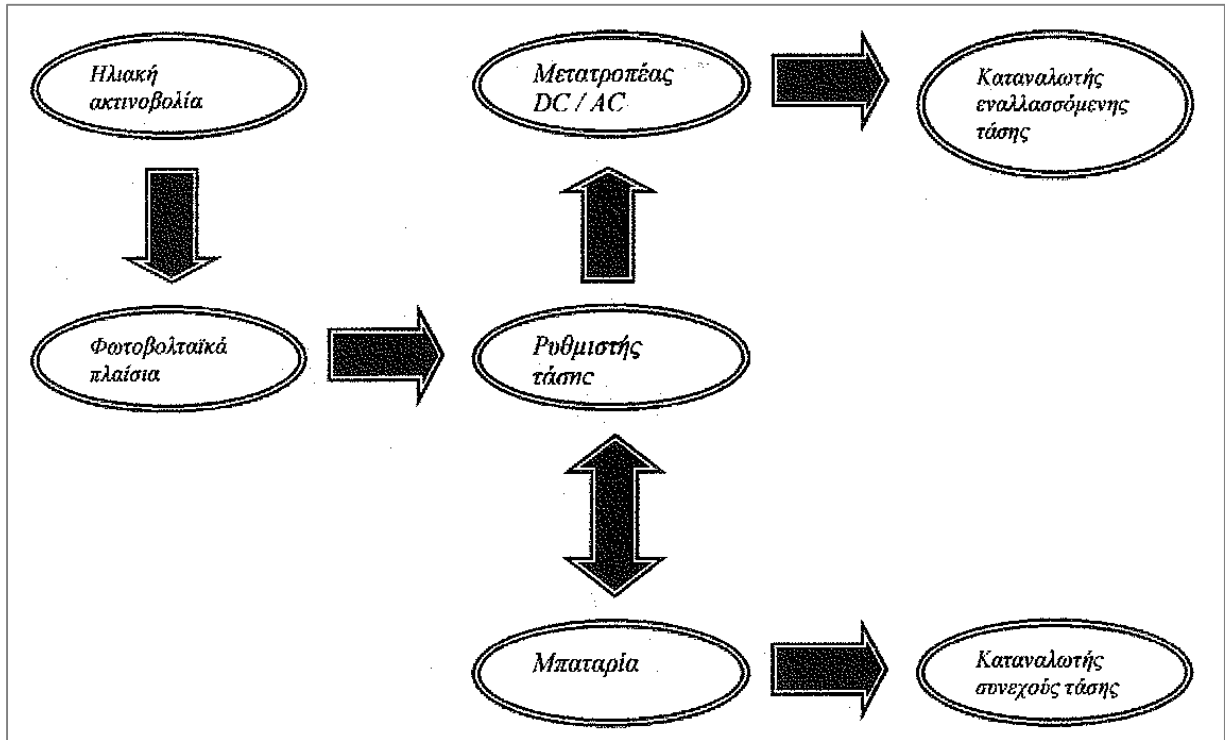
Φυσικά, στην περίπτωση αυτή το μέγεθος των πλαισίων πρέπει να υπολογισθεί κατάλληλα ώστε να γίνεται μια κανονική διοχέτευση ρεύματος στη μπαταρία. Επειδή όμως υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτισης ή πλήρους εκφόρτισης της μπαταρίας, πρέπει να γίνεται τακτική εξέταση της μπαταρίας γιατί και στις δύο περιπτώσεις λιγότευει ο χρόνος ζωής της.

Για να υπάρξει αυτόματη διατήρηση της τάσης της μπαταρίας και για καλύτερη λειτουργία του συστήματος επιβάλλεται η παρεμβολή του ρυθμιστή τάσης μεταξύ των πλαισίων και της μπαταρίας (σχήμα 4.3). Η συσκευή αυτή είναι απαραίτητη σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα που δεν παρακολουθείται τακτικά. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται σε σταθμούς αναμετάδοσης που κατασκευάζονται σε απομακρυσμένες περιοχές, αλλά και σε οικιακές εγκαταστάσεις στις οποίες δεν είναι δυνατή η συνεχής παρακολούθηση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας.



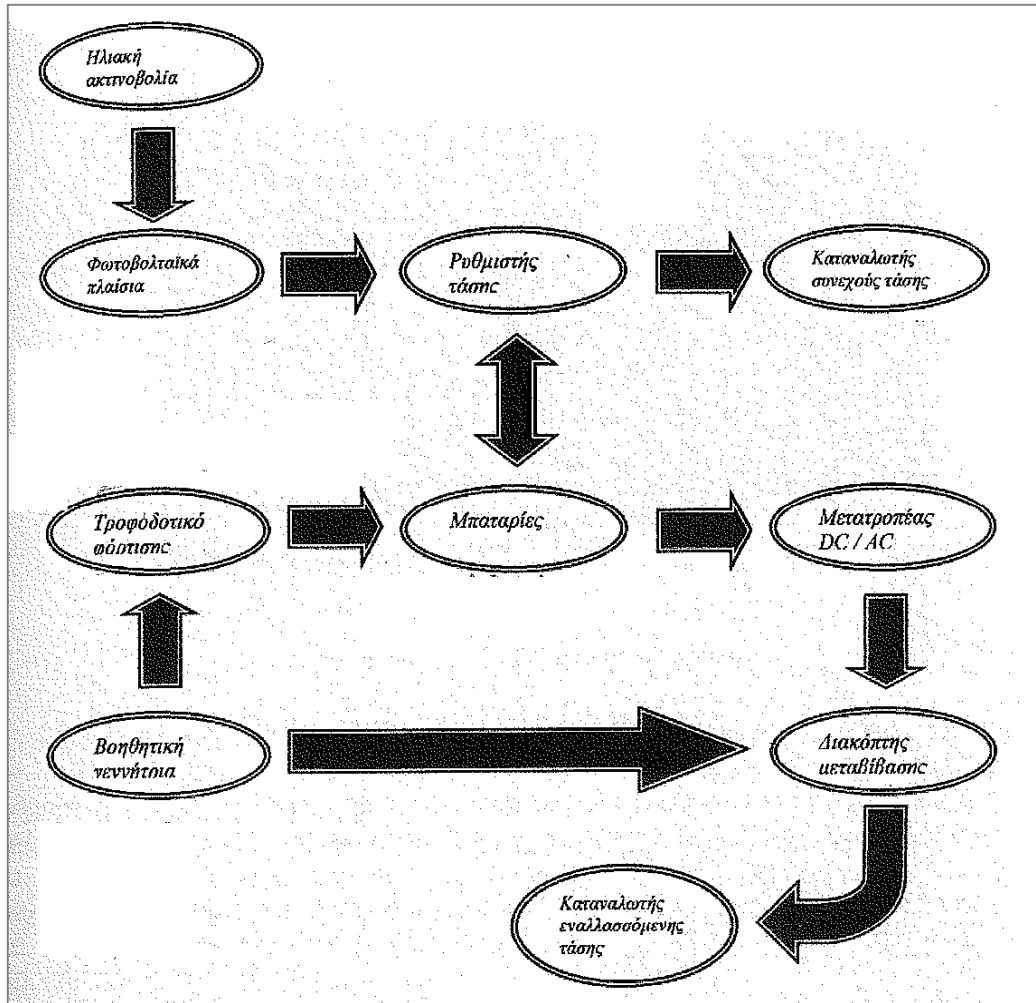
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα αυτοτελούς φωτοβολταϊκού συστήματος για αυτόματη διατήρηση της τάσης της μπαταρίας. Μεταξύ των πλαισίων και της μπαταρίας παρεμβάλλεται ο ρυθμιστής τάσης

Σε περίπτωση που χρειάζεται εναλλασσόμενη τάση είναι απαραίτητη για τον καταναλωτή η χρησιμοποίηση του μετατροπέα συνεχούς – εναλλασσόμενου ρεύματος. Η συσκευή αυτή παρεμβάλλεται μεταξύ της μπαταρίας και του καταναλωτή. Αν τυχόν υπάρχει και καταναλωτής συνεχούς τάσης, η τροφοδότησή του γίνεται απ' ευθείας από τη μπαταρία (σχήμα 4.4).



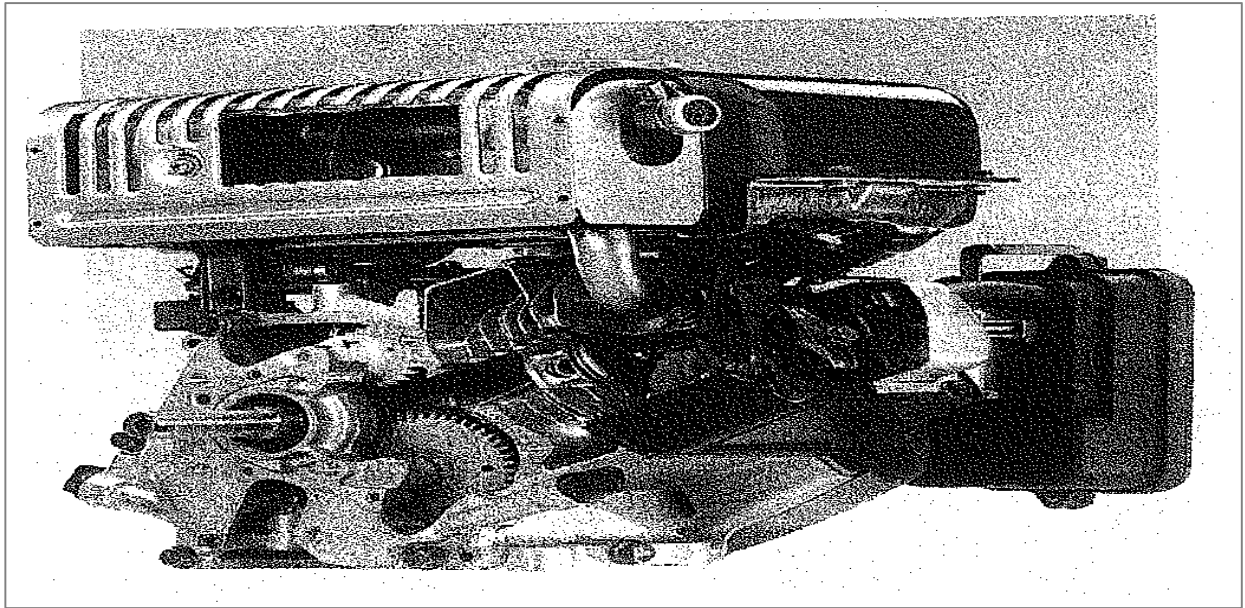
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα φωτοβολταϊκού συστήματος που περιλαμβάνει μετατροπέα για χρησιμοποίηση καταναλωτή εναλλασσόμενης τάσης. Ο καταναλωτής συνεχούς τάσης τροφοδοτείται απ' ευθείας από τη μπαταρία

Εάν η ισχύς που απαιτείται για την τροφοδότηση του καταναλωτή είναι πολύ μεγάλη, μπορεί τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και η αποθηκευμένη ενέργεια να μην έχουν τη δυνατότητα να ανταποκριθούν σε έκτακτες περιστάσεις που μπορεί να παρουσιασθούν. Τέτοιες έκτακτες περιστάσεις, όπως είναι μια απρόβλεπτα μεγάλη περίοδος συννεφιάς ή μια ξαφνική βλάβη του συστήματος, μπορεί να αντιμετωπισθούν με μια βοηθητική γεννήτρια πετρελαίου, (φωτογραφία 1), και ένα τροφοδοτικό μπαταρίας (σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα αυτοτελούς φωτοβολταϊκού συστήματος. Περιλαμβάνει βοηθητική γεννήτρια και τροφοδοτικό φόρτισης μπαταριών

Η προσθήκη βοηθητικής γεννήτριας στο σύστημα είναι ένας τρόπος για να αντιμετωπισθεί κάποια μεγάλη ζήτηση ενέργειας που μπορεί να εμφανιστεί ξαφνικά. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η χρησιμοποίηση μεγάλου αριθμού φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα ήταν απαραίτητα μόνο για εξαιρετικές περιπτώσεις χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας ή για προσωρινή χρησιμοποίηση στο σπίτι ηλεκτρικών συσκευών μεγάλης ισχύος. Γενικά, πρέπει να τονισθεί ότι η γεννήτρια είναι μια εφεδρική συσκευή του φωτοβολταϊκού συστήματος και χρησιμοποιείται πολύ για να φορτίσει τις μπαταρίες. Πάντοτε το μεγαλύτερο ή συνήθως όλο το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται ο καταναλωτής δίνεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Μόνο στην περίπτωση που η απαιτούμενη ισχύς ξεπερνά το 1 Kw θα χρειασθεί να χρησιμοποιηθεί η εφεδρική γεννήτρια.



*Φωτογραφία 1: Γεννήτρια πετρελαίου*

Όταν πρόκειται να εγκατασταθεί ένα αυτοτελές φωτοβολταϊκό σύστημα θα πρέπει να περιοριστεί η χρήση ηλεκτρονικών συσκευών που παράγουν θερμότητα, γιατί τέτοιες συσκευές προκαλούν μεγάλη αύξηση της τιμής του ρεύματος και γενικά της ηλεκτρικής ισχύος. Οι συσκευές που θα λειτουργούν με την ηλεκτρική ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να είναι πολύ καλής απόδοσης. Αν υπάρχουν παλιές αντιοικονομικές συσκευές, πρέπει να αντικατασταθούν με άλλες καλύτερης απόδοσης που φυσικά θα προσφέρουν την ίδια ή ακόμη και καλύτερη εξυπηρέτηση.

Πάντα υπάρχει το περιθώριο να ελαττωθεί η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς αυτό να προκαλέσει σοβαρή μεταβολή στο τρόπο ζωής μας ή να ελαττωθούν οι βασικές ευκολίες που μας προσφέρει το ηλεκτρικό ρεύμα. Γενικά πρέπει η κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος να είναι περιορισμένη για να αποφευχθεί έστω και η εφεδρική χρησιμοποίηση γεννήτριας που επιφέρει έξοδα, εκτός από την αγορά της, για την τροφοδότησή της με καύσιμα και για τη συντήρησή της ώστε να βρίσκεται συνεχώς σε καλή κατάσταση. Επι πλέον μια γεννήτρια προκαλεί δυνατό και συνεχές ενοχλητικό θόρυβο και δεν έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει τα τυχόν περισσεύματα ενέργειας που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Γι' αυτό κατά την σχεδίαση ενός αυτοτελούς φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να γίνουν πολύ ακριβείς υπολογισμοί κάτι που δεν είναι απαραίτητο για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα που πρόκειται να συνδεθεί με το ηλεκτρικό δίκτυο.

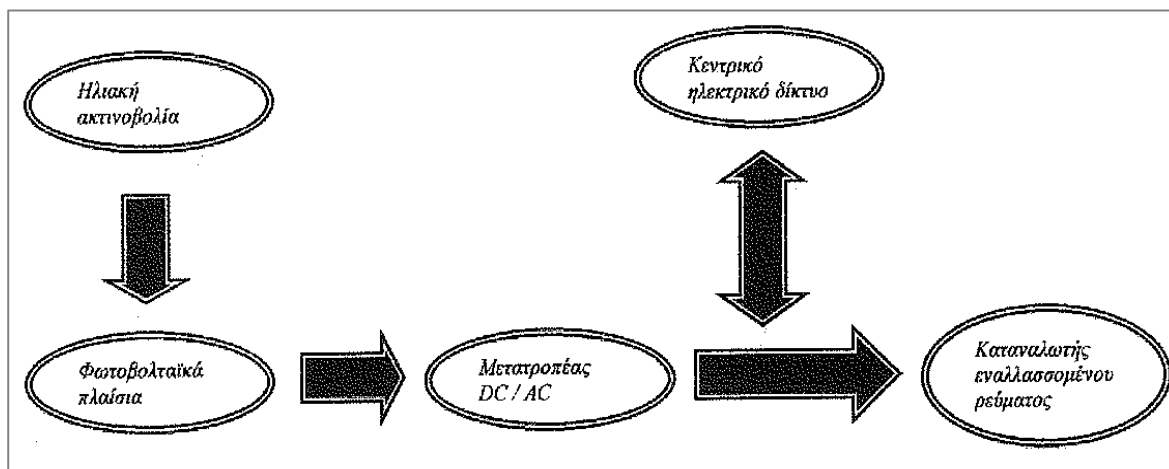
Το τελευταίο σύστημα μπορεί να κατασκευαστεί πολύ μεγαλύτερο από αυτό που χρειάζεται για το συγκεκριμένο καταναλωτή της κατοικίας γιατί η επί πλέον εργασία που θα παράγει θα παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να χρησιμοποιηθεί από πολλούς καταναλωτές. Γενικά το αυτοτελές φωτοβολταϊκό σύστημα πρέπει να παράγει τόση ηλεκτρική ενέργεια ώστε να δίνει ένα μέρος για την άμεση λειτουργία του καταναλωτή και το υπόλοιπο να αποθηκεύεται στις μπαταρίες για να καλύπτονται οι ανάγκες της νύχτας και γενικά οι ανάγκες που προέρχονται από μεγάλες περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας.

## 4.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Μια παραλλαγή του αυτοτελούς φωτοβολταϊκού συστήματος είναι εκείνη που στη θέση της βοηθητικής γεννήτριας υπάρχει η παροχή από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο διανομής. Στην περίπτωση αυτή, οι συσκευές του καταναλωτή που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα, τροφοδοτούνται και πάλι απ' ευθείας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και τη μπαταρία, ενώ οι συσκευές που λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα, τροφοδοτούνται από τον μετατροπέα που είναι ενωμένος με τη μπαταρία. Αν η ηλιοφάνεια είναι μικρή και το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών είναι χαμηλό, το ενωμένο με το σύστημα ηλεκτρικό δίκτυο δίνει στον καταναλωτή την ενέργεια που χρειάζεται. Η πλευρά του συστήματος που λειτουργεί με συνεχές ρεύμα τροφοδοτείται δια μέσου των μπαταριών που φορτίζονται με τροφοδοτικό εναλλασσομένου-συνεχούς. Η πλευρά όμως που λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα τροφοδοτείται απ' ευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο με τη χρησιμοποίηση ενός διακόπτη που αποσυνδέει τον μετατροπέα από το συνδέει με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Η σύνδεση αυτή ενός αυτοτελούς φωτοβολταϊκού συστήματος με το ηλεκτρικό δίκτυο έχει το πλεονέκτημα ότι αρχικά το σύστημα μπορεί να είναι μικρό, στη συνέχεια όμως να γίνεται ολοένα και πιο μεγάλο με την προσθήκη περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Έτσι η ηλεκτρική ενέργεια που παίρνει ο καταναλωτής από το ηλεκτρικό δίκτυο, σαν συμπληρωματική αυτής που παίρνει το σύστημα, στην αρχή θα είναι αρκετά μεγάλη, στη συνέχεια όμως θα ελαττώνεται όσο ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων του συστήματος αυξάνεται.

Το κλασσικό κανονικό φωτοβολταϊκό σύστημα που συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο (σχήμα 4.6) έχει βασικές διαφορές ως προς την κατασκευή και τη λειτουργία αν συγκριθεί με το αυτοτελές φωτοβολταϊκό σύστημα. Μια βασική διαφορά είναι ότι το σύστημα αυτό δεν έχει μπαταρίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Απλούστατα δεν τις χρειάζεται, γιατί σε περίπτωση που ο καταναλωτής χρειαστεί ηλεκτρική ενέργεια και δεν μπορεί να την πάρει από το σύστημα, επειδή πχ δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, τότε το συνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο θα δώσει την ενέργεια αυτή. Δηλαδή, αν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν είναι αρκετή για να καλύψει τις ανάγκες του καταναλωτή, τότε δίνεται αυτόματα στον καταναλωτή ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο.



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα φωτοβολταϊκού συστήματος που συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο

Σε περίπτωση που τα πλαίσια παράγουν περισσότερη ενέργεια από όση χρειάζεται ο καταναλωτής του συστήματος, τότε τα περισσεύματα ενέργειας τροφοδοτούνται δια μέσου του ηλεκτρικού δικτύου σε άλλους καταναλωτές.

**Αφού τα περισσεύματα ενέργειας τροφοδοτούν το ηλεκτρικό δίκτυο, φυσικό επακόλουθο θα είναι η μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από το θερμοηλεκτρικό σταθμό. Αυτό από ενεργειακής και περιβαλλοντικής πλευράς έχει αξία γιατί λιγότερη ζήτηση ενέργειας από το θερμοηλεκτρικό σταθμό συνεπάγεται την καύση λιγότερων καυσίμων και την ελάττωση των βλαβερών αερίων του διοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του θείου που παράγονται από την καύση.**

Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιούνται μόνο συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος και έτσι όλη η ηλεκτρική ενέργεια που δίνουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μετατρέπεται από συνεχή σε εναλλασσόμενη με τη βοήθεια κατάλληλου μετατροπέα.

Σε ένα τέτοιο σύστημα υπάρχουν δύο διαδρομές που μπορεί να ακολουθήσει το ηλεκτρικό ρεύμα για να φθάσει στον καταναλωτή. Η μια είναι από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και τον μετατροπέα και η άλλη απ' ευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Στην περίπτωση όμως αυτή δεν υπάρχει διακόπτης αποσύνδεσης της μίας διαδρομής από την άλλη, αλλά και οι δύο διαδρομές λειτουργούν συγχρόνως. Η τροφοδότηση από το ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να γίνει χωρίς καμία ενίσχυση από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, διότι οδηγείται κατευθείαν προς τον καταναλωτή χωρίς να περνά από τον μετατροπέα.

Η τροφοδότηση όμως του καταναλωτή από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν μπορεί να γίνει εντελώς ανεξάρτητα από το ηλεκτρικό δίκτυο. Κι αυτό γιατί σε περίπτωση διακοπής της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο λόγω κάποιας βλάβης στον ηλεκτροπαραγωγό ή σε κάποιο άλλο σημείο του δικτύου, δεν πρέπει αυτό να τροφοδοτείται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και να παρουσιάζει κινδύνους σε οποιαδήποτε προσπάθεια επιδιόρθωσής τους. **Έτσι μόλις υπάρξει διακοπή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος στο ηλεκτρικό δίκτυο, το φωτοβολταϊκό σύστημα αποσυνδέεται από το ηλεκτρικό δίκτυο.**

Ο μετατροπέας του συστήματος αυτού λειτουργεί με ρεύμα που έρχεται από το δίκτυο ώστε η λειτουργία του να εξαρτάται από αυτό. Για να μειωθούν οι απώλειες από τη λειτουργία του μετατροπέα υπάρχει μηχανισμός αυτόματης διακοπής της λειτουργίας του κατά τη διάρκεια της νύχτας ή ακόμη και κατά τη διάρκεια της ημέρας όταν η ηλιοφάνεια είναι τόσο χαμηλή ώστε το αποτέλεσμα της στα φωτοβολταϊκά πλαίσια να είναι αμελητέο.

Για τη μέτρηση της ηλεκτρικής ενέργειας τοποθετούνται δύο μετρητές. Ο ένας καταγράφει την ηλεκτρική ενέργεια που δίνει το ηλεκτρικό δίκτυο στην ηλεκτρική εγκατάσταση και ο άλλος καταγράφει την ενέργεια που παίρνει το ηλεκτρικό δίκτυο από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υπολογισθεί και το συνολικό κόστος, δεδομένου ότι η τιμή της κιλοβατώρας (kWh) που δίνει το ηλεκτρικό δίκτυο, μπορεί να είναι διαφορετική από την τιμή της κιλοβατώρας που παίρνει το ηλεκτρικό δίκτυο από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Φυσικά η σύνδεση των φωτοβολταϊκών συστημάτων με το ηλεκτρικό δίκτυο καθώς και η τιμή της κιλοβατώρας που θα αγοράζει και θα πουλά η Αρχή Ηλεκτρισμού θα διέπονται από κανονισμούς που θα πρέπει να θεσπιστούν ώστε να καλύπτονται οι σχέσεις μεταξύ της Αρχής Ηλεκτρισμού και των καταναλωτών.



Το μέγεθος τέτοιου φωτοβολταϊκού συστήματος ποικίλει διότι πάντοτε υπάρχει η εξασφάλιση τροφοδότησης ηλεκτρικής ενέργειας στον καταναλωτή από το ηλεκτρικό δίκτυο. Ενώ στο αυτοτελές φωτοβολταϊκό σύστημα το μέγεθος πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να καλύπτει τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια και σε περιόδους συνεχούς συννεφιάς για αρκετές μέρες.

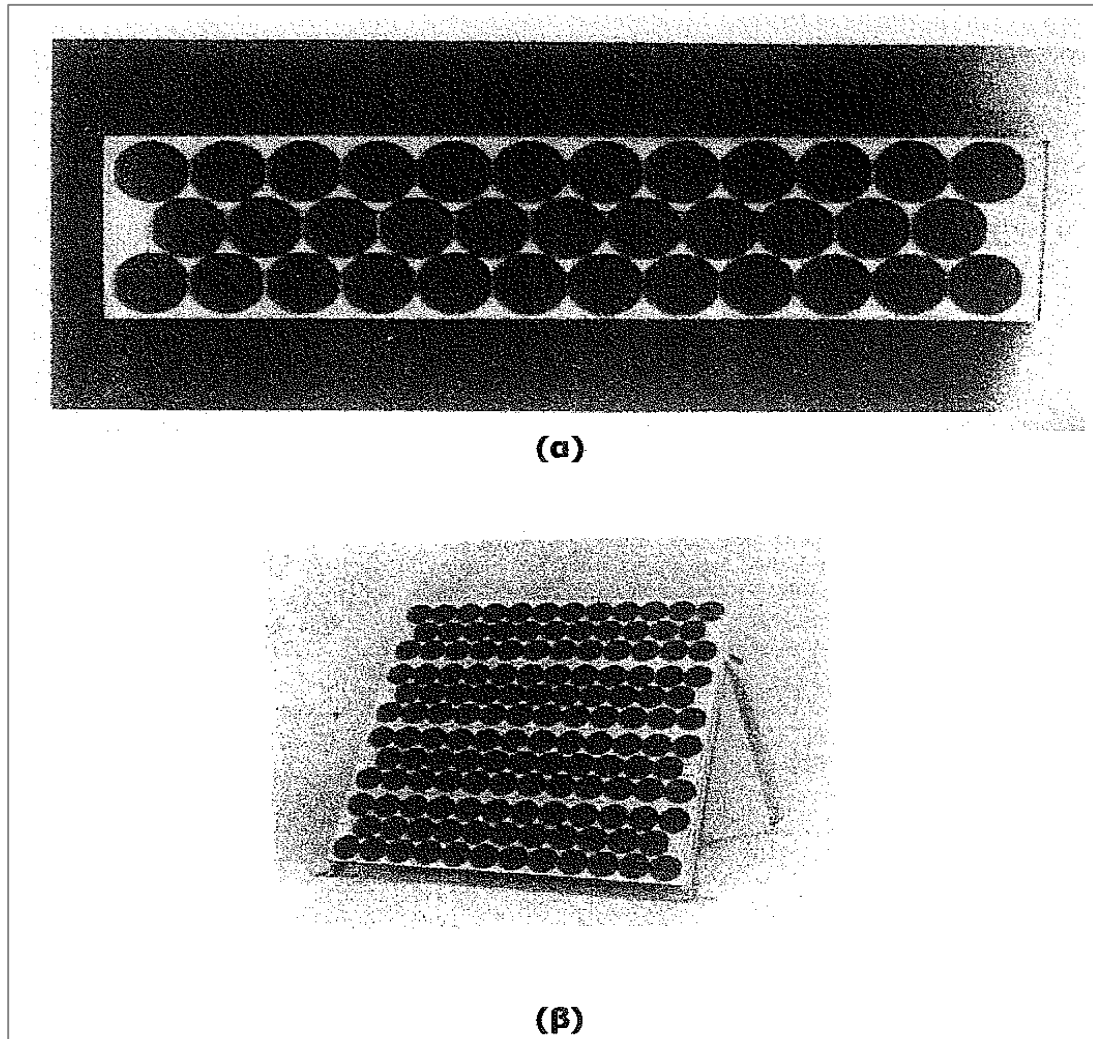
Παρά το γεγονός ότι με το σύστημα αυτό (μικρό ή μεγάλο) δεν κινδυνεύει ο καταναλωτής να μείνει χωρίς ηλεκτρική ενέργεια, εκτός από την περίπτωση της διακοπής στο ηλεκτρικό δίκτυο, θα πρέπει να έχει εκείνο το κατάλληλο μέγεθος ώστε να καλύπτει όλες τις ανάγκες της κατανάλωσης που γίνεται στην ηλεκτρική εγκατάσταση και μάλιστα εκείνης που γίνεται κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου.

# 5. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

## 5.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

### 5.1.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Το βασικό και χαρακτηριστικό συστατικό κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, που αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία. Και εδώ χρησιμοποιούνται και άλλες ονομασίες, όπως ηλιακή μπαταρία, ηλιακή ηλεκτρογεννήτρια κλπ. Η τάση όμως και η ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για την φόρτιση των συσσωρευτών. Είδαμε ότι η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις μέχρι 0,5 V περίπου και ότι η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μόλις 0,4 W περίπου. Για αυτό τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση φωτοβολταϊκών 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. Πχ. 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 5.1). Τα πλαίσια είναι κατασκευασμένα σε μορφή σάντουιτς. Δηλαδή, τα ηλιακά στοιχεία στερεώνονται σε κολλητική ουσία σε ένα ανθεκτικό ψύλλο από μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) ή από ενισχυμένο πλαστικό, που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου, ενώ η εμπρός όψη τους καλύπτεται από ένα προστατευτικό ψύλλο γυαλιού ή διάφανους πλαστικού. Το εμπρός και το πίσω φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους, στεγανά και μόνιμα, με την βοήθεια μιας ταινίας από φυσικό ή συνθετικό ελαστικό και συσφίγγονται με ένα περιμετρικό μεταλλικό περίβλημα. Διαμορφώνεται έτσι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module), που είναι η δομική μονάδα που κατασκευάζεται βιομηχανικά και κυκλοφορεί στο εμπόριο για να χρησιμοποιηθεί ως συλλέκτης στη συγκρότηση των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Λόγω των απαιτούμενων υλικών και εργασιών για την κατασκευή του, το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το κόστος των ηλιακών στοιχείων που περιέχουν.



Σχήμα 5.1 (α) Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο του εμπορίου, αποτελούμενο από 35 ηλιακά στοιχεία σε σύνδεση στη σειρά. Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά σε συμβατική ακτινοβολία  $1000W/m^2$  και θερμοκρασία  $20^{\circ}C$  είναι: Ισχύς αιχμής  $P_a=40W$  με τάση  $V_m=17.3V$  και ένταση ρεύματος  $I_m=2.13A$ . Επίσης ανοιχτοκυκλωμένη τάση  $V_{oc}=21V$  και βραχυκυκλωμένη ένταση ρεύματος  $I_{sc}=2.6A$ . Στην θερμοκρασία  $20^{\circ}C$ , ο συντελεστής απόδοσης του πλαισίου είναι  $\eta_n=12.76\%$ . Έχει διαστάσεις  $122cm * 30.5cm$ , εμβαδόν επιφανείας  $S=0.37m^2$  περίπου, και βάρος  $5,7 kg$

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

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του εμπορίου δεν έχουν τυποποιημένες διαστάσεις και ισχύεις. Σε συμβατικές συνθήκες αιχμής έχουν συνήθως, ανάλογα με τον τύπο και τον κατασκευαστή τάση εξόδου από περίπου  $4V$  μέχρι  $22V$  και ένταση ρεύματος από περίπου  $0,5A$  μέχρι  $2,5A$ . Πριν βγουν στο εμπόριο τα φωτοβολταϊκά 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 και θερμοκρασίας  $95^{\circ}C$  για να ελεγχθεί η στεγανότητά τους.

Πίνακας 5.1 Παράδειγμα της διαμόρφωσης του κόστους των συνηθισμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων του εμπορίου

Υλικά και εργασίες	Κόστος ανά μονάδα επιφάνειας του φ/β πλαισίου
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 σιλκόνης	800 δρχ / m <sup>2</sup>
Ηλεκτρικές συνδέσεις και προστατευτική διάδος	500 δρχ / m <sup>2</sup>
Εργατικά συναρμολόγησης, ελέγχου και συσκευασίας	5000 δρχ / m <sup>2</sup>
Σύνολο	50000 δρχ / m <sup>2</sup>

### 5.1.2 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι τα ακόλουθα:

≈ **Η μέγιστη ισχύς:**

Είναι η ισχύς που θα δώσει το πλαίσιο όταν φωτίζεται με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000W/m<sup>2</sup>, όταν η θερμοκρασία του πλαισίου είναι 25°C. Είναι φανερό ότι η ισχύς που θα δώσει ένα πλαίσιο εξαρτάται από το εμβαδόν του, το είδος του που καθορίζει την απόδοση και από την θερμοκρασία. Η μέγιστη ισχύς του πλαισίου δίνεται πάντοτε από τον κατασκευαστή.

Είναι φανερό ότι όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, η ισχύς που δίνει το πλαίσιο ελαττώνεται κατά 0,4% για κάθε βαθμό Κελσίου πάνω από τους 25°C. Για παράδειγμα ένα πλαίσιο με μέγιστη ισχύ 40W στους 25°C, θα δώσει μόνο 36,8W στους 45°C. Εάν μάλιστα η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 800W/m<sup>2</sup> που αποτελεί τη μέση ημερήσια πραγματική τιμή, τότε η ισχύς του πλαισίου πέφτει στα 28W.

≈ **Η τάση λειτουργίας:**

Τα περισσότερα πλαίσια που κυκλοφορούν στην αγορά είναι κατασκευασμένα ώστε να παρέχουν τάση λίγο μεγαλύτερη από 12V και έτσι να μπορούν να φορτίζουν μπαταρία των 12V. Για την κατασκευή των πλαισίων αυτών χρησιμοποιούνται 35 φωτοβολταϊκά στοιχεία για κάθε πλαίσιο. Εφόσον κάθε στοιχείο δίνει τάση 0,5V είναι επόμενο ότι η τάση του πλαισίου είναι γύρω στα 17V.

≈ **Το ρεύμα λειτουργίας του πλαισίου:**

Είναι το ρεύμα που καθορίζεται από τη μέγιστη ισχύ που παρέχει το πλαίσιο και την τάση που δημιουργείται στα άκρα του όταν η ένταση της ακτινοβολίας είναι 4000W/m<sup>2</sup>. Για ένα πλαίσιο με μέγιστη ισχύ 40W και τάση λειτουργίας 17V, το ρεύμα λειτουργίας θα είναι:

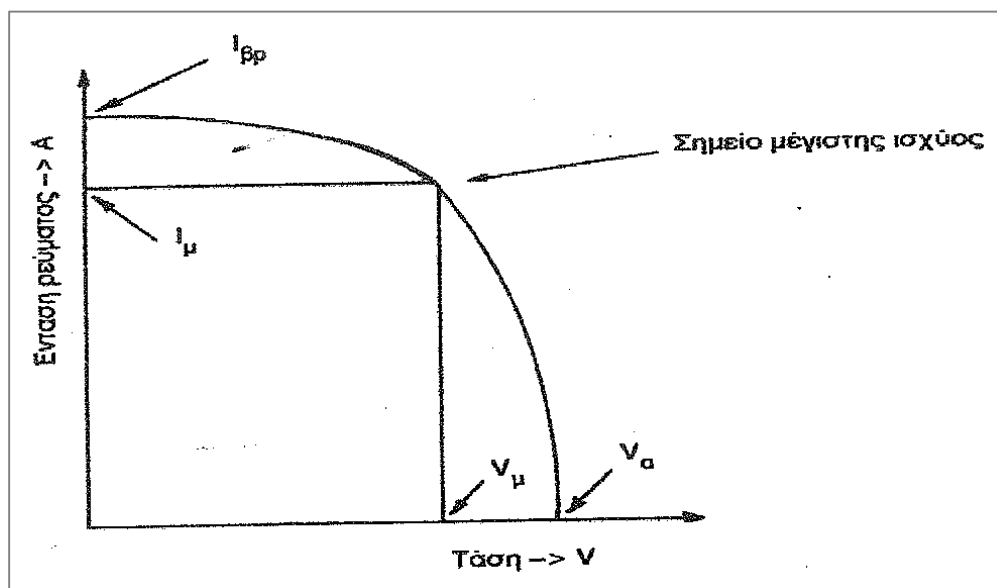
$$40W / 17V = 2.3A$$

Για πιο μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται πλαίσια με τάση λειτουργίας 24V ή και ακόμη 48V. ένα εμπορικό πλαίσιο έχει διαστάσεις 1,3m \* 2m και μπορεί να δώσει 12V ή 24V ή 48V ανάλογα με τον αριθμό των φωτοβολταϊκών στοιχείων και τον τρόπο σύνδεσής τους.

Στο πλαίσιο με κωδικό R<sub>a</sub>-39-2 υπάρχουν 72 στοιχεία από τα οποία 36 ενώνονται σε σειρά και οι δύο σειρές ενώνονται μεταξύ τους παράλληλα. Έτσι το πλαίσιο δίνει συνολικά τάση λειτουργίας 16,5V και μέγιστη ισχύ 39W. Στο πλαίσιο με κωδικό R<sub>a</sub>-220-24 υπάρχουν 432 στοιχεία με τα οποία δημιουργούνται 6 σειρές με 72 στοιχεία η κάθε σειρά. Οι 6 σειρές ενώνονται παράλληλα μεταξύ τους και έτσι το πλαίσιο δίνει τάση λειτουργίας 33,3V και ισχύ 220W. Το πλαίσιο με κωδικό R<sub>a</sub>-220-48 έχει και αυτό 432 στοιχεία με τα οποία δημιουργούνται 3 σειρές με 144 στοιχεία η κάθε σειρά. Οι 3 σειρές ενώνονται μεταξύ τους παράλληλα και το πλαίσιο αυτό δίνει τάση λειτουργίας 66,5V και μέγιστη ισχύ 220W.

Παρατηρούμε ότι και τα δύο πλαίσια δίνουν την ίδια μέγιστη ισχύ διότι έχουν τον ίδιο αριθμό στοιχείων αλλά διαφορετική τάση λειτουργίας διότι η σειρά του κάθε πλαισίου περιέχει διαφορετικό αριθμό στοιχείων.

Κάθε στοιχείο, πλαίσιο ή ακόμη και σειρά πλαισίων έχει τη **χαρακτηριστική καμπύλη** που δίνει τη σχέση μεταξύ τάσης και έντασης του ρεύματος, για ορισμένη ένταση ακτινοβολίας.



Σχήμα 5.2 Χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοβολταϊκού στοιχείου  $V_{\mu}$  και  $I_{\mu}$  είναι η τάση και ένταση που αντιστοιχεί στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ.  $I_{\beta\beta}$  είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και  $V_{\alpha}$  η τάση ανοιχτού κυκλώματος.

Στην καμπύλη αυτή φαίνονται δύο άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη που είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{\beta\beta}$  και η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{\alpha}$ . Ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το ρεύμα που δίνει το στοιχείο ή το πλαίσιο, όταν τα άκρα του βραχυκυκλώνονται, δηλαδή ενώνονται με σύρμα μηδαμινής αντίστασης.

Τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του στοιχείου ή του πλαισίου, όταν δεν ενώνονται μεταξύ τους ή ενώνονται με τη βοήθεια μιας πολύ μεγάλης αντίστασης.

Σε κάθε χαρακτηριστική καμπύλη υπάρχει ένα σημείο στο οποίο η τάση και η ένταση του ρεύματος έχουν τέτοιες τιμές ώστε το γινόμενό τους δηλαδή η ηλεκτρική ισχύς ( $P = V \cdot I$ ) να παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή. Είναι φανερό ότι για το σημείο αυτό, το ορθογώνιο που σχηματίζεται έχει το μεγαλύτερο εμβαδόν από όλα τα ορθογώνια που μπορούν να σχηματιστούν για άλλα σημεία. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος και ισχύει ο τύπος:

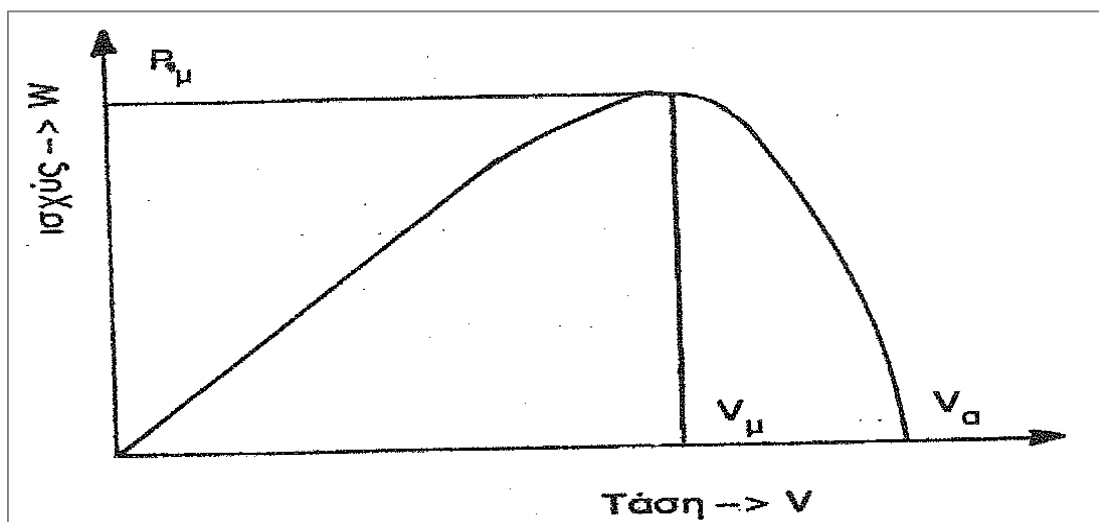
$$P_{\mu} = I_{\mu} \cdot V_{\mu}$$

όπου  $P_{\mu}$  η μέγιστη ισχύς και  $I_{\mu}$ ,  $V_{\mu}$  η ένταση ρεύματος και η τάση αντίστοιχα που δίνουν τη μέγιστη ισχύ.

Όταν τα άκρα του στοιχείου (ή πλαισίου) είναι βραχυκυκλωμένα ( $R=0$ ) ή όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό ( $R = \infty$ ), η ηλεκτρική ισχύς που παράγει το στοιχείο είναι μηδέν, αφού στην πρώτη περίπτωση η τάση είναι μηδέν και στη δεύτερη η ένταση του ρεύματος είναι μηδέν. Σε ενδιάμεσες καταστάσεις η ηλεκτρική ισχύς παίρνει τιμές που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Επομένως για δεδομένες συνθήκες ακτινοβολίας, η μεγαλύτερη ισχύς που μπορεί να δώσει το φωτοβολταϊκό στοιχείο εξαρτάται από την κατάλληλη εκλογή της αντίστασης του κυκλώματος του στοιχείου.

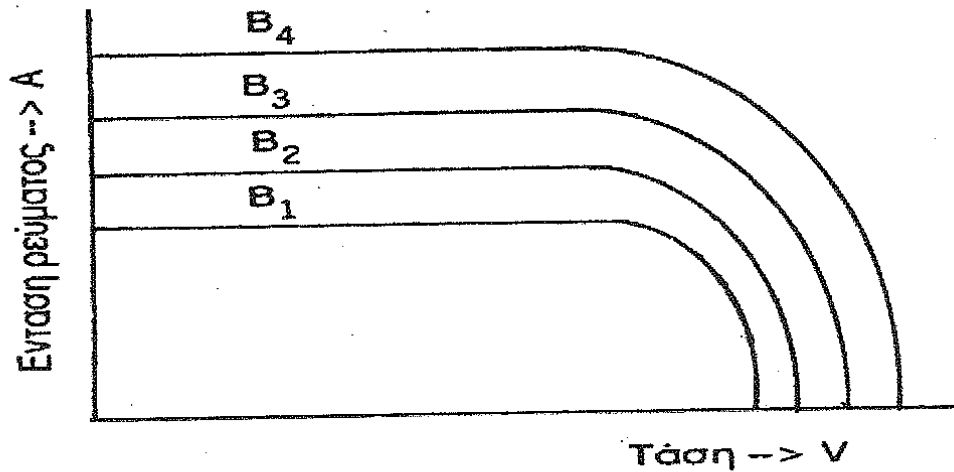
Τα πιο πάνω αναφέρονται σε σταθερή ένταση ακτινοβολίας ( $B$ ) και σταθερή θερμοκρασία.

Για διαφορετικές τιμές της έντασης ακτινοβολίας σχηματίζεται μια ομάδα από μετατοπισμένες χαρακτηριστικές καμπύλες όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (καμπύλες έντασης-τάσης). Φυσικά για τη μέγιστη ένταση ακτινοβολίας των  $1000\text{W/m}^2$ , το σημείο μέγιστης ισχύος δίνει τη μέγιστη ισχύ που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

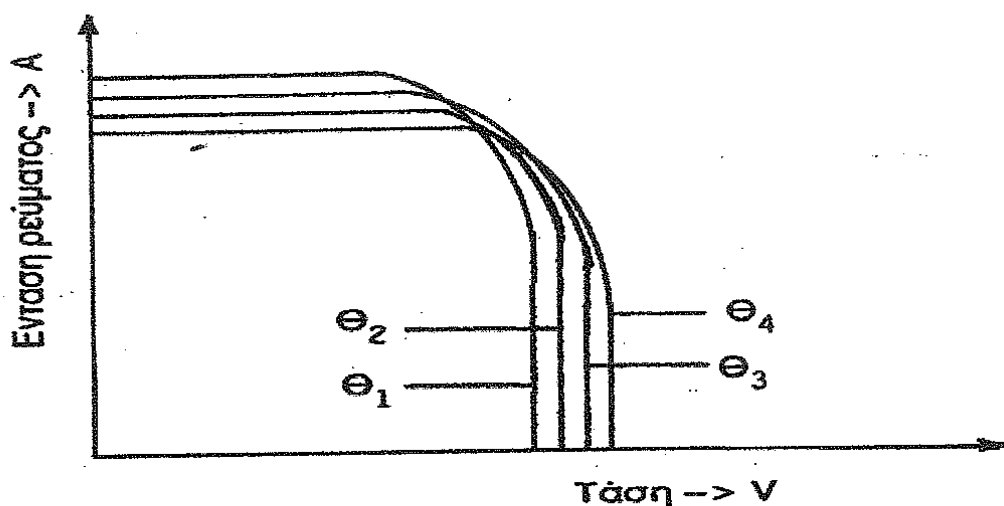


Σχήμα 5.3 Μεταβολή της ισχύος σε συνάρτηση με την τάση στα άκρα του στοιχείου. Στην βραχυκυκλωμένη ή ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση η ισχύς είναι μηδέν.

Αν για ορισμένη ένταση ακτινοβολίας κατασκευαστούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες για διαφορετικές θερμοκρασίες  $\theta$  (σχήμα 5.5) βρίσκεται ότι η μέγιστη ισχύς επηρεάζεται σε μικρό βαθμό όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Έτσι είναι δυνατό με κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου να ρυθμίζεται το πλαίσιο ή το σύστημα πλαισίων, ώστε να εργάζεται με τέτοιο τρόπο που να δίνει συνεχώς τη μέγιστη ισχύ χωρίς μεγάλες διαφορές όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία των πλαισίων.



Σχήμα 5.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκού στοιχείου για διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας με  $B_1 < B_2 < B_3 < B_4$



Σχήμα 5.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκού στοιχείου για διαφορετικές θερμοκρασίες  $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4$



### 5.1.3 Η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (απόδοση, τάση, ισχύ κλπ), που προφανώς διαμορφώνονται από τα αντίστοιχα μεγέθη των χωριστών ηλιακών στοιχείων που περιέχει. Επομένως ο συντελεστής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου ( $n_n$ ) εκφράζει το λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ( $P_n$ ) προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του ( $S$ ). Προφανώς, την ίδια τιμή θα έχει και ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ενέργειας  $E$  που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται επί το ίδιο χρονικό διάστημα. Δηλαδή:

$$n_n = P_n / H * S = E / \Pi * S$$

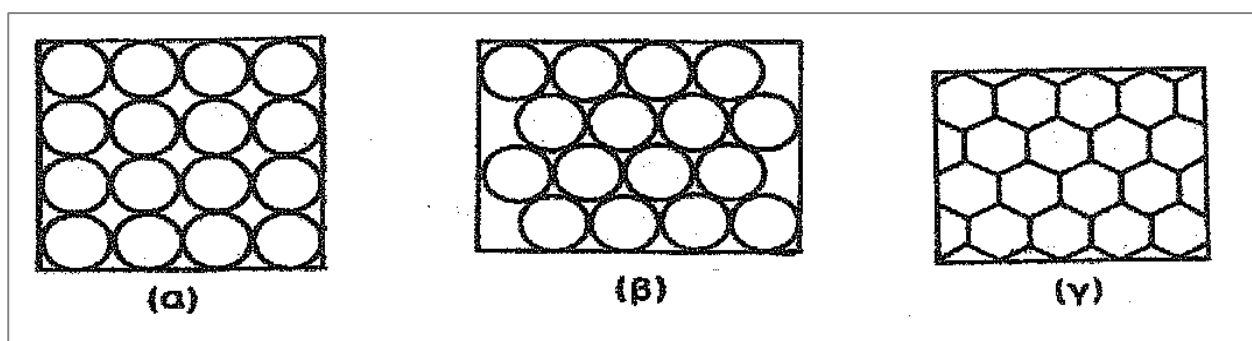
όπου  $\Pi$  είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η τιμή του  $n_n$  είναι φανερό ότι εξαρτάται όχι μόνο από τη μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων ( $n$ ), αλλά και από τον συντελεστή κάλυψης του πλαισίου ( $\sigma_k$ ) που ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας του ημιαγωγού όπου γίνεται η απορρόφηση και μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, προς τη συνολική επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Βρίσκουμε εύκολα ότι θα ισχύει η σχέση:

$$n_n = n * \sigma_k$$

**Η τιμή του  $\sigma_k$  εξαρτάται από το σχήμα και την πυκνότητα της τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων πάνω στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο.**

Συνήθως κυμαίνεται από περίπου 0,78, για κυκλικά στοιχεία σε παράλληλες στοιχισμένες σειρές, και φτάνει μέχρι σχεδόν 1,00 (πρακτικά μέχρι 0,8), για τα μεγαλύτερου κόστους τετραγωνικά ή εξαγωνικά ηλιακά στοιχεία (σχήμα 5,6).



Σχήμα 5.6 Τρεις συνηθισμένοι τρόποι παράθεσης των ηλιακών στοιχείων στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης είναι περίπου 0,78 για την πρώτη περίπτωση, 0,88 για την δεύτερη και 0,98 για τα εξαγωνικά στοιχεία της τρίτης περίπτωσης

### 5.1.4 Η επίδραση της θερμοκρασίας και της ρύπανσης

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από την θερμοκρασία. Όμως, ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για ηλιακά στοιχεία ή για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αντιστοιχεί σε μια συμβατική θερμοκρασία, συνήθως 20°C, που συχνά, ιδίως στους θερινούς μήνες διαφέρει αξιολογικά 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.** Επίσης για τη διόρθωση του παραπάνω σφάλματος χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής  $\sigma_0$  με τον οποίο πολλαπλασιάζουμε τον συντελεστή απόδοσης των ηλιακών στοιχείων. Το ίδιο εφαρμόζουμε και για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Δηλαδή, για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική, ως συντελεστή απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων παίρνουμε το γινόμενο  $n_n \cdot \sigma_0$ .

Στη συμβατική θερμοκρασία ο  $\sigma_0$  είναι ίσος με τη μονάδα, και για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάν από αυτή. Πχ στην Αθήνα τον μήνα Ιούλιο, που έχουμε μέση θερμοκρασία του αέρα, στις φωτεινές ώρες της ημέρας, σχεδόν 30°C η μέση θερμοκρασία των ηλιακών του φωτοβολταϊκού πλαισίου θα είναι περίπου 60°C και επομένως η τιμή του συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου θα είναι περίπου:

$$\sigma_0 = 1 - (60-20) \cdot 0.005 = 0.8$$

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ιδίως όταν έχουμε μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειάς τους από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, θαλασσινού αλατιού, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στην γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να τη ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται περιοδικός καθαρισμός των επιφανειών.

Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια βρίσκεται σε περιοχή όπου εκτιμάται ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας ( $\sigma_p$ ), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ που μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του φωτοβολταϊκού πλαισίου κλπ. Οπότε, όποτε είναι απαραίτητο, ως συντελεστής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων για τους ενδεχόμενους υπολογισμούς που θα κάνουμε, παίρνουμε το γινόμενο του ενδεικτικού συντελεστή απόδοσης  $n_p$ , που δίνεται για συμβατική θερμοκρασία και καθαρή επιφάνεια, επί τους συντελεστές διόρθωσης για τη θερμοκρασία  $\sigma_0$  και για τη ρύπανση  $\sigma_p$ .

### 5.1.5 Η ισχύς αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Συχνά, δεν είναι διαθέσιμα όλα τα λεπτομερειακά κατασκευαστικά δεδομένα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων, αλλά δίνεται μόνο μια ενδεικτική ισχύ αιχμής ( $P_a$ ), που αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος  $1 \text{ kW/m}^2$ .

Οι μονάδες ισχύος, που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, μιας ολόκληρης εγκατάστασης ή και ενός ηλιακού στοιχείου, ονομάζονται συχνά ως βατ και κιλοβάτ αιχμής. Δηλαδή χρησιμοποιείται ο ίδιος όρος και συμβολισμός, όπως για το μέτρο της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οπότε ισχύει η σχέση:

$$P_a \text{ (kWp)} = 1 \text{ (kW/m}^2) * S \text{ (m}^2) * n_n$$

Επομένως στην περίπτωση που γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής  $P_a$ , για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, χρησιμοποιούμε την ακόλουθη σχέση:

$$E \text{ (kWh / d)} = \Pi \text{ (kWh/m}^2 * \text{d)} * P_a \text{ (kWp)} / 1 \text{ (kW/m}^2) * \sigma_\theta * \sigma_p$$

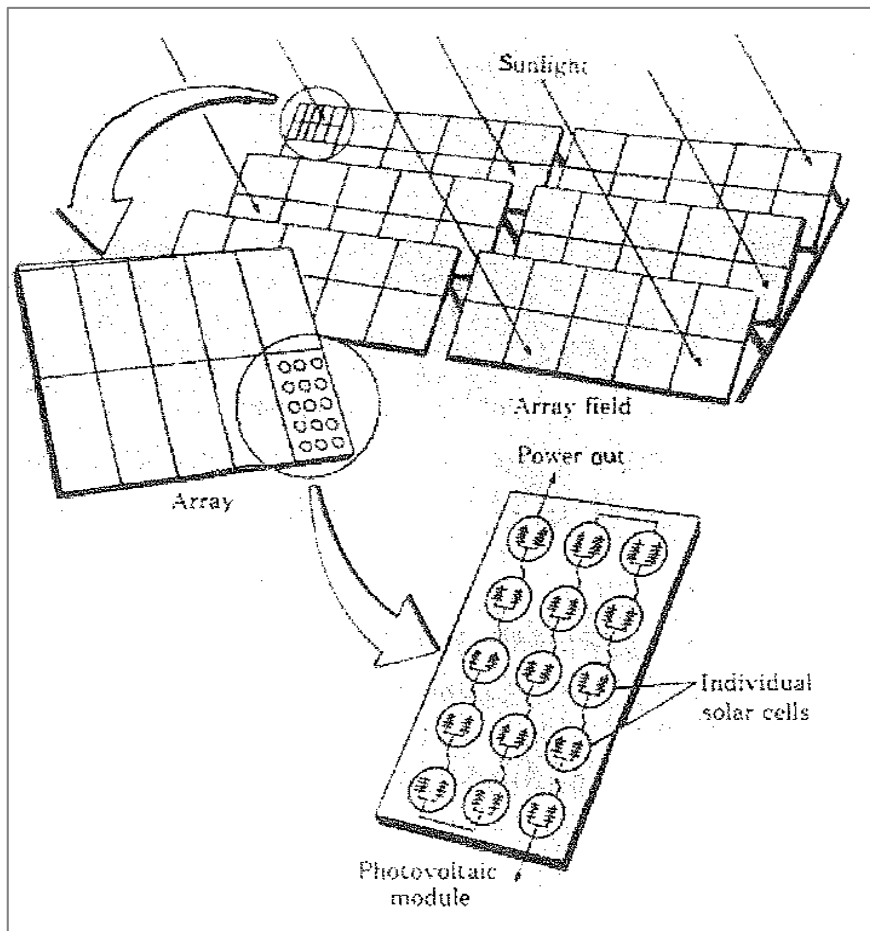
Ανακεφαλαιώνοντας μπορούμε να πούμε ότι για να έχουμε την πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, χρειάζονται οι τιμές των παρακάτω τεχνικών χαρακτηριστικών του:

- ≈ **ΙΣΧΥΣ ΑΙΧΜΗΣ ( $P_a$ )**, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
- ≈ **ΑΝΟΙΧΤΟΚΥΚΛΩΜΕΝΗ ΤΑΣΗ ( $V_{OC}$ )**, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
- ≈ **ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΗ ΕΝΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ( $I_{SC}$ )**, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
- ≈ **ΤΑΣΗ ( $V_m$ )**, στις συνθήκες της μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία
- ≈ **ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ (FF)**, που ορίζεται ως ο λόγος του γινομένου  $V_m * I_m$  προς το γινόμενο  $V_{OC} I_{SC}$
- ≈ **ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ( $\eta_n$ )**, σε συμβατική θερμοκρασία και συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης ( $\sigma_\theta$ ) και συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης ( $\sigma_p$ )
- ≈ **ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ( $\sigma_k$ )**
- ≈ **ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ**, δηλαδή η ελάχιστη τάση που προκαλεί ηλεκτρική διάσπαση ανάμεσα στα ηλιακά στοιχεία και στο ηλιακό περίβλημα του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

### 5.1.6 Φωτοβολταϊκές συστοιχίες

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια μιας μικρής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο πλαίσιο. Σε μεγαλύτερες όμως εγκαταστάσεις, ομάδες περισσότερων φωτοβολταϊκών πλαισίων τοποθετούνται σε κοινή κατασκευή στήριξης, και ονομάζονται φωτοβολταϊκές συστοιχίες (arrays). Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών 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 φωτοβολταϊκής 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 φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, πολλές φωτοβολταϊκές συστοιχίες σχηματίζουν ένα υποσυγκρότημα συστοιχιών (array subfield) και το σύνολο των υποσυγκροτημάτων αποτελεί το συγκρότημα συστοιχιών (array field) ή το φωτοβολταϊκό πάρκο του φωτοβολταϊκού σταθμού.



Σχήμα 5.7 Από το στοιχείο στη φωτοβολταϊκή – συστοιχία

Πέρα από τις συνηθισμένες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, που αποτελούνται από σταθερούς επίπεδους συλλέκτες και δέχονται φυσικό ηλιακό φως, υπάρχουν και βελτιωμένες κατασκευές που επιτυγχάνουν την μέγιστη δυνατή έκθεση των συστοιχιών στις ακτίνες του ήλιου. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με την χρήση μηχανισμών προσανατολισμού στόχευσης και παρακολούθησης

του ήλιου για την καλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, είτε με την χρήση φακών, ανακλαστήρων και πρισμάτων. Σε γενικές γραμμές έχουμε τριών ειδών φωτοβολταϊκές συστοιχίες:

## I. ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ

Ο απλούστερος τύπος μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι ο σταθερός, ο οποίος έχει το πλεονέκτημα των αμετακίνητων τμημάτων και το μειονέκτημα ότι δεν εκτίθεται 100% στις ηλιακές ακτίνες.

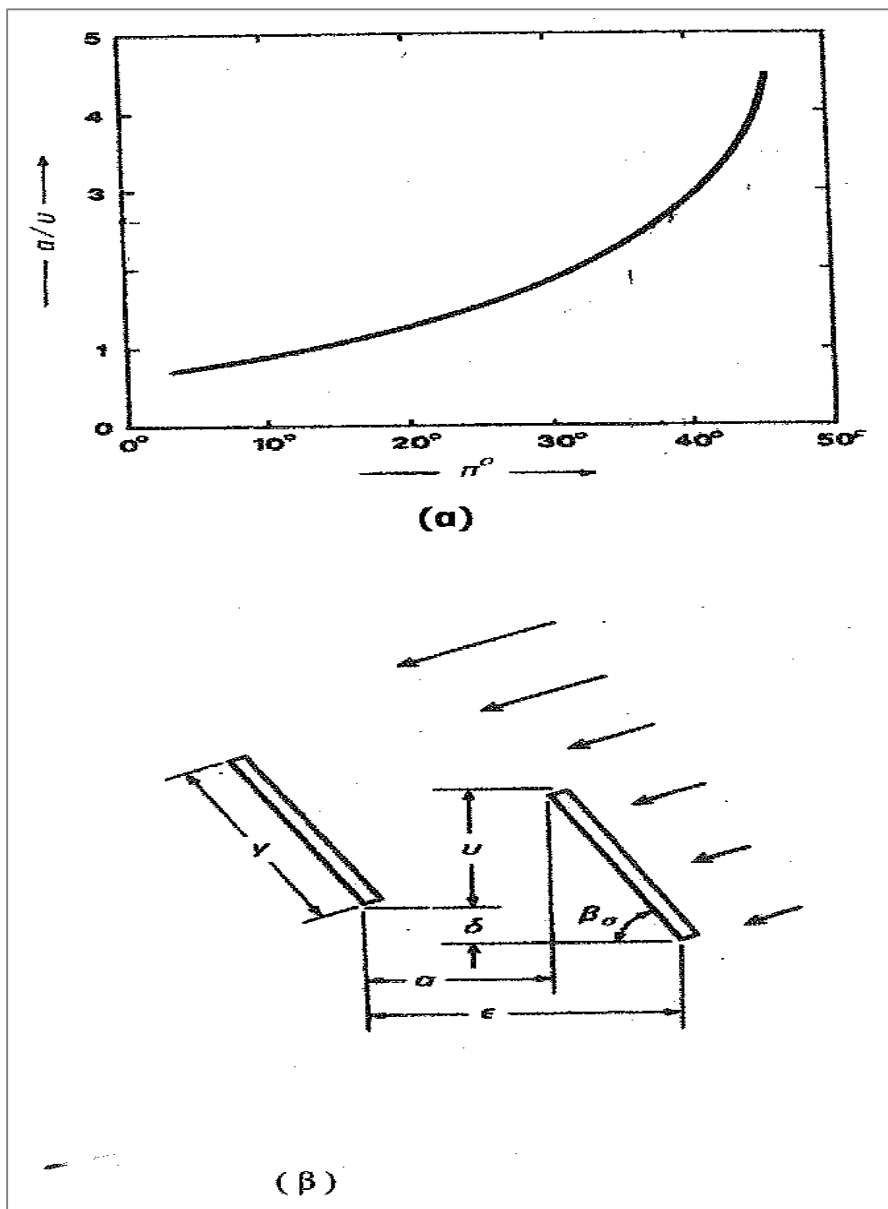
Βλέπουμε ότι κάθε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση έχει σπονδυλωτή συγκρότηση από φωτοβολταϊκά πλαίσια ή συστοιχίες που το πλήθος τους (και η συνολική επιφάνειά τους) καθορίζεται από την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που επιδιώκεται να παραχθεί. Η δομή αυτή επιτρέπει την εύκολη επέκταση των φωτοβολταϊκών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

Η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, μόνων τους ή σε συστοιχίες, γίνεται σε στέγες κτιρίων, σε στύλους και ικριώματα, σε γήπεδα και πλαγιές λόφων με τρόπο που να μην σκιάζονται από τα γύρω δέντρα, κτίρια, βουνά κλπ. Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο πρέπει να έχει ανοιχτό οριζόντα. Σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $\pi^0$ , η προϋπόθεση του ανοιχτού οριζόντα θεωρείται ότι εξασφαλίζεται όταν η γωνία του ύψους ( $\beta_\epsilon$ ) των γειτονικών συστοιχιών, δέντρων, κτιρίων ή άλλων εμποδίων, ικανοποιεί μέσα σε μια αζιμούθια γωνία από  $-60^0$  μέχρι  $+60^0$  προς το νότο, τη σχέση:

$$\beta_\epsilon < 48^0 - \pi^0$$

Για παράδειγμα στην Αθήνα που βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος  $38^0$  η γωνία του ύψους των διαφόρων εμποδίων δεν πρέπει να ξεπερνά τις  $10^0$ .

Το διάγραμμα του ακόλουθου σχήματος μας βοηθά στον προσδιορισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των ηλιακών συλλεκτών στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, ώστε η μια σειρά να μην σκιάζει αισθητά την επόμενη.



Σχήμα 5.8 α) Η καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης  $a$  ανάμεσα στις γειτονικές σειρές των ηλιακών συλλεκτών μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας, προς την επικάλυψη του ύψους  $v$ , 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  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$  και της γωνίας της κλίσης  $\beta_\sigma$ , για τη διάταξη των ηλιακών συλλεκτών στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες.

Συγκεκριμένα, το διάγραμμα δίνει, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του λόγου της ελεύθερης απόστασης ανάμεσα στις δύο σειρές ( $\alpha$ ) προς την επικάλυψη του ύψους της κατασκευής στήριξης του συλλέκτη ( $v$ ). Αν  $\gamma$  είναι το πλάτος του στηρίγματος (που συμπίπτει με το πλάτος του συλλέκτη),  $\beta$  είναι η κλίση του, και  $\delta$  είναι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα των δύο σειρών, τότε το  $v$  δίνεται από τη σχέση:

$$v = \gamma \eta \mu \beta_\sigma - \delta$$

Στη συνέχεια, βρίσκουμε με τη βοήθεια του διαγράμματος την αντίστοιχη τιμή του  $\alpha$ , και υπολογίζουμε την ελάχιστη απαιτούμενη απόσταση των σειρών,  $\epsilon$ , από την σχέση:

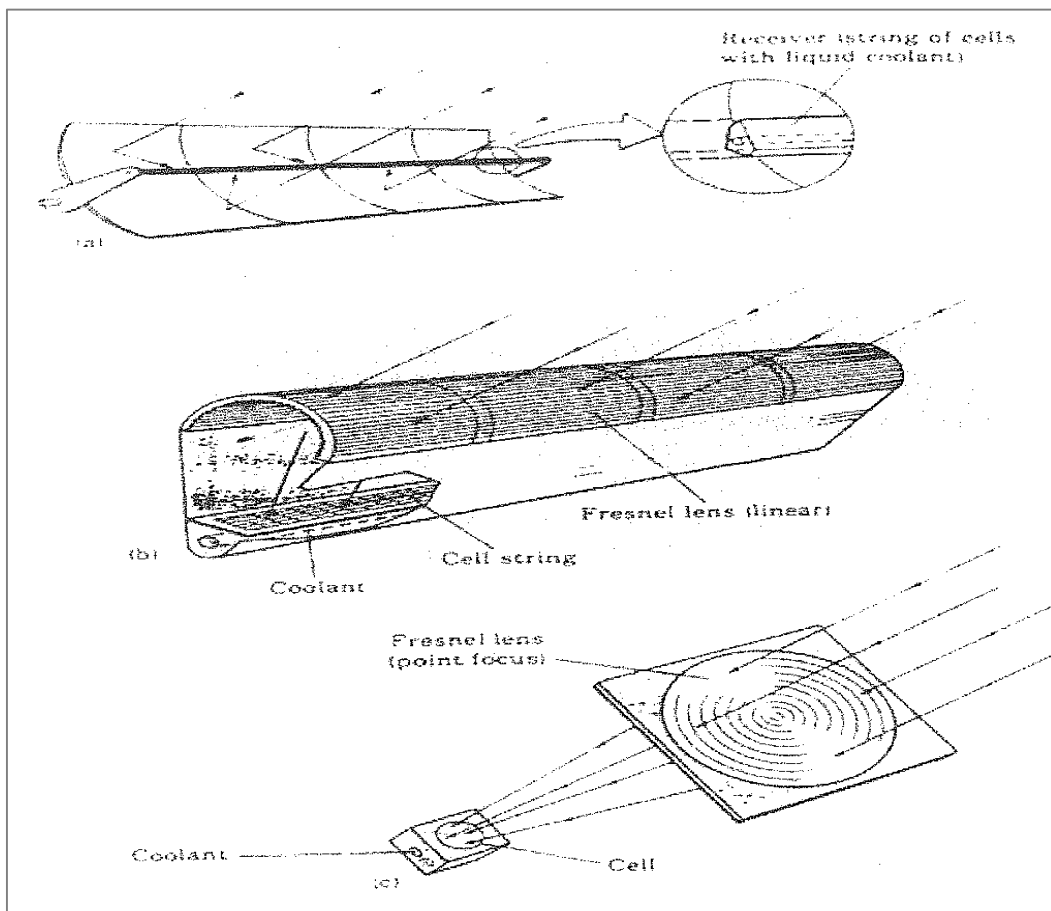
$$\epsilon = \alpha + \gamma \text{ συν}\beta_{\sigma}$$

## II. ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ ΜΕ ΑΝΑΚΛΑΣΤΗΡΕΣ

Ένας άλλος σχεδιασμός που βοηθά στην αύξηση της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος επιτυγχάνεται με την χρήση ανακλαστήρων / κατόπτρων.

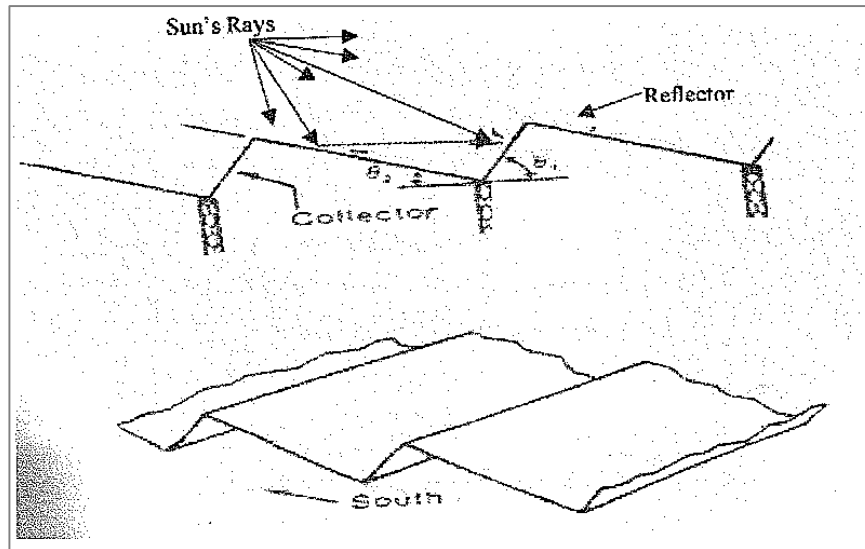
Κατασκευάζονται σε διάφορες μορφές (κοίλα, παραβολικά, ελλειπτικά, τριγωνικά κ.ά) και σκοπός τους είναι να ενισχύουν και να εστιάζουν το ποσό του ηλιακού φωτός προς τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, και ακόμη να αυξάνουν την ένταση του προσπιπτομένου φωτός κατά 1/3.

Ανήκουν στον τομέα των οπτικών συγκεντρωτικών διατάξεων και τις περισσότερες εφαρμογές έχουν βρει τα παραβολικά κάτοπτρα. Επειδή όμως το κόστος τους δεν τα κάνει πολύ ελκυστικά, πολλές φορές τη θέση τους παίρνουν οι φακοί Fresnel, που συνδυάζουν χαμηλό κόστος με ταυτόχρονη ικανοποιητική απόδοση οπτικής συγκέντρωσης.



Σχήμα 5.9 Εφαρμογή φακών Fresnel σε φωτοβολταϊκό συλλέκτη

Ακολουθως φαίνεται το σχεδιάγραμμα διάταξης ανακλαστήρα-συλλέκτη. Οι γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$  στις οποίες ο συλλέκτης και ο ανακλαστήρας είναι τοποθετημένοι αντιστοίχως, εξαρτώνται από την εποχή του χρόνου. Όσο ο ήλιος κατεβαίνει πιο χαμηλά, η γωνία  $\theta_1$  αυξάνεται και η  $\theta_2$  μειώνεται, ώστε να επιτρέπουν το μέγιστο φως να προσπίπτει στη διάταξη.



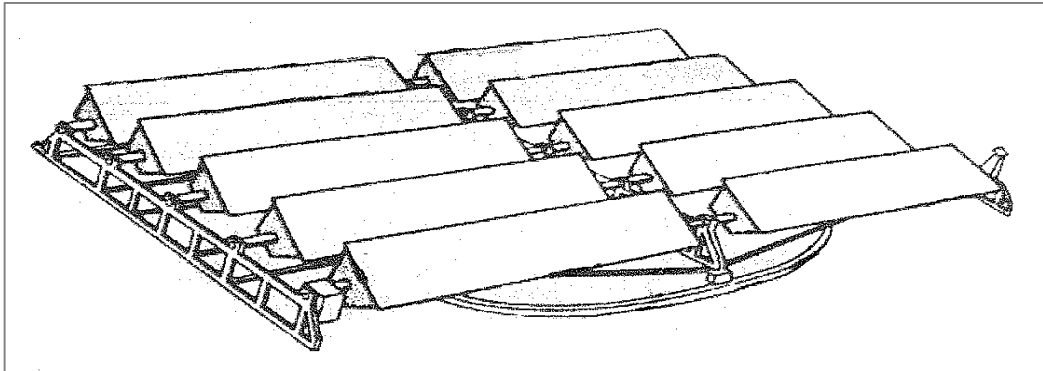
Σχήμα 5.10 Ανακλαστήρες και συλλέκτες

### III. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ

Οι συστοιχίες οι οποίες ακολουθούν τον ήλιο περιστρέφονται γύρω από άξονες και απαιτούν τη χρήση συστημάτων προσανατολισμού για τη στόχευση και παρακολούθηση του ήλιου, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τέτοιοι μηχανισμοί διαφέρουν ανάλογα με το είδος κίνησής τους. Οι περισσότεροι κατατάσσονται σε διπλού άξονα, όπου οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες στηρίζονται σε δύο ανεξάρτητους περιστρεφόμενους άξονες, έναν οριζόντιο (άξονα ανύψωσης) και έναν κάθετο (αζιμούθιος άξονας). Παρόμοιες κατασκευές προϋποθέτουν ότι ο ένας άξονας είναι παράλληλος (άξονας ανύψωσης) με τον άξονα περιστροφής της γης, ενώ ο δεύτερος είναι κάθετος (άξονας απόκλισης) προς τον πολικό άξονα. Σε όλα τα συστήματα προσανατολισμού η καθοδήγηση των μηχανισμών γίνεται με τη βοήθεια θερμοϋδραυλικών διατάξεων, μικροϋπολογιστών για την πρόβλεψη της αστρονομικής θέσης του ήλιου, και ηλιακών αισθητήρων, όπως φωτοαντιστάσεις και φωτοτρανζίστορ.



Ένας πλήρης μηχανισμός προσανατολισμού φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:

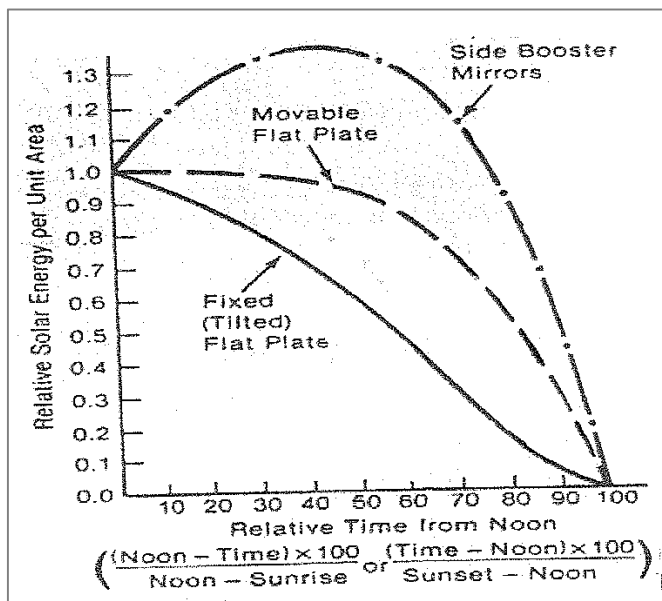


Σχήμα 5.11 Πλήρης μηχανισμός προσανατολισμού κατά μήκος δύο αξόνων

Η περιστροφή στις διευθύνσεις από Ανατολή προς Δύση και από Βορρά προς Νότο επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας περιστροφικής βάσης και συστήματος γραναζιών αντιστοίχως. Κατά συνέπεια η παρακολούθηση του ήλιου επιτυγχάνεται είτε περιστρέφοντας τη συστοιχία προς την κατεύθυνση των ηλιακών ακτίνων, είτε ανακλώντας τις ακτίνες με την χρήση περιστροφικών κατόπτρων προς το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν κινητά μέρη, ωστόσο το πλεονέκτημα της χρήσης κινητών κατόπτρων, αντί για κινητές συστοιχίες, είναι η καταπόνηση η οποία επιφέρεται στην συστοιχία που αποφεύγεται. Άλλο πλεονέκτημα είναι ότι οι ανακλαστήρες θα πρέπει να περιστρέφονται κατά το ήμισυ από ότι οι συστοιχίες την στιγμή κατά την οποία η ανάκλαση διπλασιάζει το φαινόμενο της κινήσεως του κατόπτρου.

Σύγκριση των σχετικών παραγόμενων αποτελεσμάτων των τριών διαφορετικών τρόπων σχεδιασμού συστοιχιών φαίνεται στο σχήμα 5.12, όπου καθίσταται προφανές ότι η μέθοδος των ανακλαστήρων είναι η πιο αποτελεσματική.



Σχήμα 5.12 Σχετικά αποτελέσματα των τριών τύπων συστοιχιών σε διαφορετικές ώρες

### 5.17 Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στις περισσότερες περιπτώσεις ηλεκτροδότησης με τη χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων, η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται παρέχεται από περισσότερα του ενός πλαίσιο κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους.

Οι τρόποι που μπορούν να συνδεθούν είναι:

- (α) Σύνδεση με σειρά
- (β) Παράλληλη σύνδεση
- (γ) Μικτή σύνδεση

#### ≈ Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά:

Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που θέλουμε να επιτύχουμε τάση μεγαλύτερη από την τάση που παρέχει κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο χωριστά. Η σύνδεση γίνεται ως εξής:

Ο θετικός πόλος του ενός στοιχείου συνδέεται με τον αρνητικό πόλο του επομένου και η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να συνδεθούν μεταξύ τους όλα. Έτσι προκύπτει μια συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά.

**Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα συνδεθούν σε σειρά πρέπει να έχουν το ίδιο ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{βρ}$ ) και το ίδιο ρεύμα ισχύος ( $I_m$ )**

Η συνολική τάση της συστοιχίας είναι το άθροισμα των τάσεων του κάθε φωτοβολταϊκού χωριστά.

Για “ $n$ ” φωτοβολταϊκά πλαίσια, έχουμε:

Τάση ανοικτού κυκλώματος:

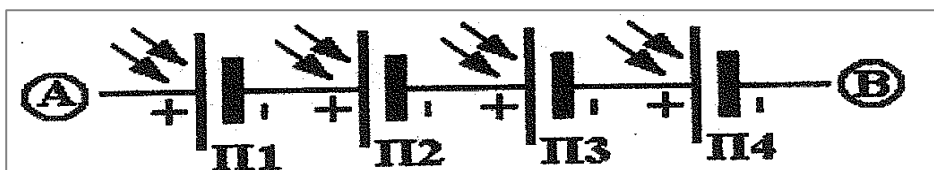
$$V_{OC} = V_{OC1} + V_{OC2} + V_{OC3} + \dots + V_{OCn}$$

Τάση μέγιστης ισχύος:

$$V_m = V_{m1} + V_{m2} + V_{m3} + \dots + V_{mn}$$

Στο σχήμα 5.13 φαίνεται η σύνδεση τεσσάρων φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά. Οι ακροδέκτες της συστοιχίας που προκύπτει είναι οι A και B. Ο θετικός ακροδέκτης της συστοιχίας είναι ο A και ο αρνητικός ο B.

Από το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο κυκλοφορεί το ίδιο ρεύμα



Σχήμα 5.13

≈ **Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων παράλληλα:**

Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που θέλουμε να επιτύχουμε ρεύμα μεγαλύτερο από το ρεύμα που παρέχει το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο χωριστά.

Η σύνδεση αυτή γίνεται ως εξής:

Ο θετικό πόλος του ενός στοιχείου συνδέεται με τον θετικό πόλο του άλλου και ο αρνητικός πόλος με τον αρνητικό του άλλου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να συνδεθούν όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μεταξύ τους. Έτσι προκύπτει μια συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένων παράλληλα.

**Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα συνδεθούν παράλληλα πρέπει να έχουν την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ).**

Το συνολικό ρεύμα της συστοιχίας είναι το άθροισμα των ρευμάτων του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Για “ $v$ ” φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουμε:

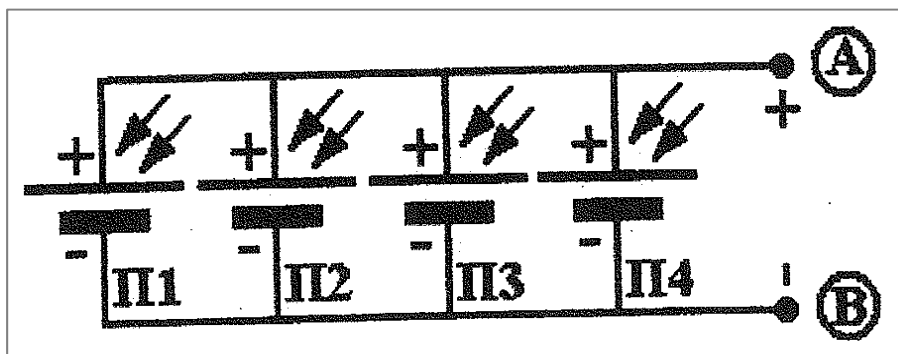
Ένταση βραχυκυκλώματος:

$$I_{sc} = I_{sc1} + I_{sc2} + I_{sc3} + \dots + I_{scv}$$

Ένταση μέγιστης ισχύος:

$$I_m = I_{m1} + I_{m2} + I_{m3} + \dots + I_{mv}$$

Στο σχήμα 5.14 φαίνεται η σύνδεση τεσσάρων φωτοβολταϊκών πλαισίων παράλληλα. Οι ακροδέκτες της συστοιχίας που προκύπτει είναι οι A και B. Ο θετικός ακροδέκτης της συστοιχίας είναι ο A και ο αρνητικός ο B.



Σχήμα 5.14

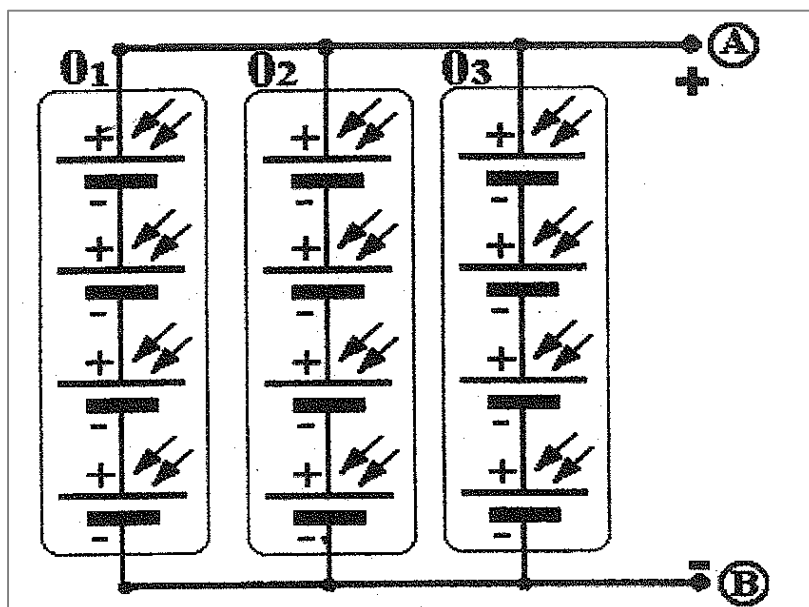
≈ **Μικτή σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων:**

Με αυτή τη σύνδεση πετυχαίνουμε να αυξήσουμε την τάση και το ρεύμα ταυτόχρονα, σε τιμές που δεν είναι διαθέσιμες από απλά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Από τεχνικής άποψης η μικτή σύνδεση είναι συνδυασμός της σύνδεσης σε σειρά και της παράλληλης σύνδεσης και κατά συνέπεια ισχύει ότι ισχύει σε αυτές τις συνδέσεις.

Η τάση της συστοιχίας αυτής καθορίζεται από τα στοιχεία που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ενώ το συνολικό ρεύμα από τις παράλληλες ομάδες.

Στο σχήμα 5.15 φαίνεται μια μικρή σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι ακροδέκτες της συστοιχίας που προκύπτει είναι οι A και B. Ο θετικός ακροδέκτης της συστοιχίας είναι ο A και ο αρνητικός ο B.



Σχήμα 5.15

Παρατηρούμε ότι αποτελείται από τρεις ομάδες ( $O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ) φωτοβολταϊκών πλαισίων συνδεδεμένα μεταξύ τους παράλληλα.

Κάθε ομάδα περιέχει τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά.

Συνολικά λοιπόν, σ' αυτό το παράδειγμα χρησιμοποιούνται δώδεκα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Αν για παράδειγμα κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο είχε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Ρεύμα μέγιστης ισχύος:	$I_m = 0,32 \text{ Amps}$
Τάση μέγιστης ισχύος:	$V_m = 16,9 \text{ Volts}$
Ρεύμα βραχυκύκλωσης:	$I_{sc} = 3.25 \text{ Amps}$
Τάση ανοικτού κυκλώματος:	$V_{oc} = 21.2 \text{ Volts}$

Από αυτά τα στοιχεία προκύπτει ότι η ισχύς του κάθε πλαισίου είναι:

Ρεύμα μέγιστης ισχύος συστοιχίας:	$I_m = 3,02 * 3 = 9,06 \text{ Amps}$
Τάση μέγιστης ισχύος συστοιχίας:	$V_m = 16.9 * 4 = 67.6 \text{ Volts}$
Ρεύμα βραχυκυκλώματος συστοιχίας:	$I_{sc} = 3.25 * 3 = 9.75 \text{ Amps}$
Τάση ανοικτού κυκλώματος συστοιχίας:	$V_m = 21.2 * 4 = 84.8 \text{ Volts}$
Ισχύς συστοιχίας:	$P_m = 67.6 * 9.06 = 612.456 \text{ Watts}$

**Η συνολική ισχύς που προκύπτει από μια σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων, ανεξάρτητα του τύπου της, είναι το άθροισμα της ισχύς κάθε φωτοβολταϊκού χωριστά.**

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που αποτελούν μια συστοιχία πρέπει να εργάζονται όλα κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

### **5.1.8 Οι απώλειες στα φωτοβολταϊκά συστήματα**

Πέρα από τις διάφορες διορθώσεις (θερμοκρασίας και ρυπαρότητας) που παίρνουμε υπόψη στον υπολογισμό της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, πρέπει επίσης να προνοήσουμε για τις μικρές ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, καθώς και στις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος, όπως οι διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου. Επιπλέον απώλειες μπορεί να εμφανίζουν οι συσσωρευτές κατά τη διάρκεια φόρτισης και εκφόρτισής τους.

Εξάλλου η τιμή του συντελεστή απόδοσης των φωτοβολταϊκών 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.

Οπότε κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φωτοβολταϊκών συλλεκτών ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη ανάλογα με την περίπτωση, και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών.

Τέλος λόγω της φθοράς στα φωτοβολταϊκά 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.

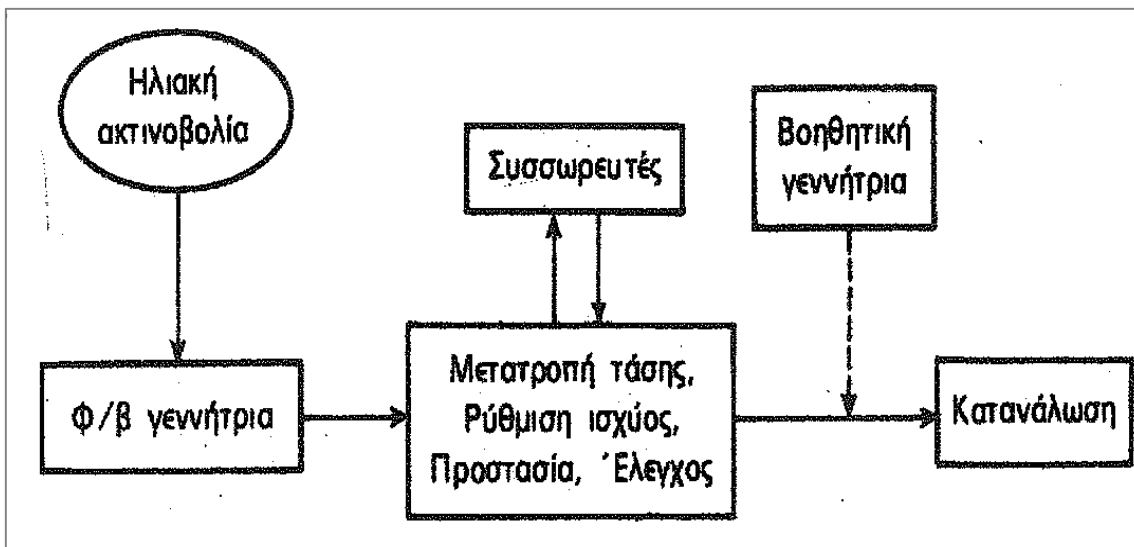
## 5.2 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 5.2.1 Η συγκρότηση του συστήματος

Η συνηθέστερη εφαρμογή φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η κατασκευή αυτόνομων φωτοβολταϊκών 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 φωτοβολταϊκού συστήματος, όπως και κάθε φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, στους ηλιακούς συλλέκτες της οποίας γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων το σύστημα περιλαμβάνει ακόμα, 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, για την αντιμετώπιση έκτακτων περιστάσεων όπως συντήρηση ή βλάβη του συστήματος, τροφοδότηση πρόσθετων φορτίων κλπ.



Σχήμα 5.16 Παράδειγμα γενικού διαγράμματος ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

Ο συμπληρωματικός εξοπλισμός των φωτοβολταϊκών συστημάτων, πέρα από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια, ονομάζεται BOS (balance of the system)

### 5.2.2 Ο προκαταρκτικός και λεπτομερειακός σχεδιασμός

Η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος στοχεύει στο 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, πχ, με συλλέκτες και συσσωρευτές μεγαλύτερου μεγέθους από το απολύτως απαραίτητο.

Για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτείται η ύπαρξη μιας καλής εκτίμησης της ζήτησης που πρέπει να ικανοποιήσει (πχ η μέση ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση τους διάφορους μήνες του έτους) και μιας αξιόπιστης πληροφόρησης σχετικά με την ένταση και τη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή (πχ η μέση ημερήσια ένταση της ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας).

Ένα παράδειγμα-οδηγός του προκαταρκτικού σχεδιασμού δίνεται στον πίνακα 5.2:

*Πίνακας 5.2 Παράδειγμα υποδείγματος των διαδοχικών βημάτων για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος*

- 1. Επιλογή της κρίσιμης χρονικής περιόδου για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.**
- 2. Εκτίμηση της μέσης ηλεκτρικής κατανάλωσης που ζητείται να ικανοποιεί το σύστημα.**
- 3. Υπολογισμός της μέσης διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας στην υπόψη τοποθεσία, στην επιλεγμένη χρονική περίοδο και για τη βέλτιστη κλίση των συλλεκτών.**
- 4. Υπολογισμός της απαιτούμενης συνολικής επιφάνειας ή της συνολικής ισχύος αιχμής των φωτοβολταϊκών συλλεκτών και εύρεση του αντίστοιχου πλήθους και της κατάλληλης συνδεσμολογίας των τυποποιημένων φωτοβολταϊκών πλαισίων.**
- 5. 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.**
- 6. Υπόδειξη των διαφόρων αναγκαίων διατάξεων ρύθμισης και ελέγχου, και της ισχύος της βοηθητικής ενεργειακής πηγής.**

Για την πλήρη όμως οικονομικοτεχνική μελέτη, με λεπτομερειακό σχεδιασμό του συστήματος και συγκριτική αξιολόγηση με άλλες εναλλακτικές ενεργειακές πηγές (δηλαδή αντί για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκής γεννήτριας, την επιλογή ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους ή μιας ανεμογεννήτριας κλπ), χρειάζονται πολλά άλλα τεχνικά και οικονομικά δεδομένα, όπως η εκτίμηση για ενδεχόμενες μελλοντικές επεκτάσεις της εγκατάστασης, η απαιτούμενη αξιοπιστία του συστήματος, ο λεπτομερειακός υπολογισμός των ηλεκτρικών απωλειών, το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων και οι δαπάνες για την κατασκευή των στηριγμάτων τους στο έδαφος ή πάνω στη στέγη ενός σπιτιού, 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.

### 5.2.3 Βασικές επιλογές και προϋποθέσεις

Στον σχεδιασμό ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να έχουν προηγηθεί ορισμένες βασικές επιλογές, όπως: αν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια και οι συσσωρευτές θα πρέπει να καλύπτουν πλήρως τις αιχμές της ζήτησης ισχύος, 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 (η αξιοπιστία ενός συστήματος μετράται με την πιθανότητα να λειτουργεί χωρίς προβλήματα επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα). 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 λειτουργία του συστήματος μπορούν να έχουν φυσική προέλευση, ή να οφείλονται σε κακό σχεδιασμό, που μπορεί να στηρίχτηκε σε λάθος 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 την μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία (Δεκέμβριος ή Ιανουάριος) και ακολουθεί διερεύνηση για τον έλεγχο της ανεπάρκειάς τους στους υπόλοιπους μήνες του έτους.** Για παράδειγμα, 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 των ηλεκτρικών συσκευών.

Η εγκατάσταση των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων γίνεται συνήθως σε απομονωμένες περιοχές, που η παρουσία ειδικευμένου προσωπικού για τη λειτουργία και τη συντήρησή τους είναι σχεδόν ανύπαρκτη καθώς επίσης και η πρόσβαση σε οργανωμένα συνεργεία για την αντιμετώπιση ενδεχομένων βλαβών είναι ουσιαστικά αδύνατη. 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 αποκατάστασης της λειτουργίας του συστήματος ύστερα από ενδεχόμενη βλάβη:

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, ώστε η μεταφορά και η τοποθέτησή τους να είναι πραγματοποιήσιμη από έναν άνθρωπο, χωρίς τεχνικά μέσα.
4. Τα διάφορα εξαρτήματα να είναι τυποποιημένων μεγεθών, ώστε να είναι εύκολη η προμήθειά τους στην αγορά.

#### 5.2.4 Η ζήτηση: Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις

Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να τροφοδοτήσει μια μόνο κατανάλωση (πχ ένας φάρος ή ένα τηλεοπτικό αναμεταδότη) ή περισσότερες (πχ ένα ολόκληρο οικισμό).

Ύστερα από έρευνες έχουν δημιουργηθεί πίνακες όπου καταγράφονται όλες οι ηλεκτρικές συσκευές, η ισχύς τους και ο πιθανός χρόνος της λειτουργίας τους στη διάρκεια του 24ώρου. Ένας ενδεικτικός πίνακας με παραδείγματα εκτιμήσεων της ισχύος και της κατανάλωσης διαφόρων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών είναι ο ακόλουθος πίνακας 5.3:

Πίνακας 5.3 Παράδειγμα των ημερήσιων ηλεκτρικών καταναλώσεων σε μια κατοικία με μια οικογένεια

Συσκευή	Ισχύς	Ώρες λειτουργίας	Ηλεκτρική κατανάλωση
Φώτα	1.0 kw	3.0 h	3.0 kwh
Ψυγείου	0.3 kw	9.0 h	2.7 kwh
Τηλεόραση	0.2 kw	4.0 h	0.8 kwh
Ηλ. 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
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>7.5 kw</b>	<b>17.4 h</b>	<b>8.0 kwh</b>

Επίσης είναι χρήσιμη και η καταγραφή της πιθανότητας της ταυτόχρονης λειτουργίας περισσότερων συσκευών ώστε να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος θα πρέπει να θεωρείται «παράλογη» η χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών γεννητριών για την τροφοδότηση ηλεκτρικών συσκευών μεγάλης θερμικής κατανάλωσης, όπως οι ηλεκτρικές κουζίνες, τα καλοριφέρ και οι θερμοσίφωνες, από τη στιγμή που για την κάλυψη των αναγκών αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν κουζίνες και θερμάστρες υγραερίου, ηλιακοί θερμοσίφωνες κλπ.

\* Στον πίνακα Α στο τέλος των σημειώσεων περιέχονται ενδεικτικές τιμές για τις ισχύεις και τις καταναλώσεις διαφόρων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών, συνηθισμένης χρήσης.

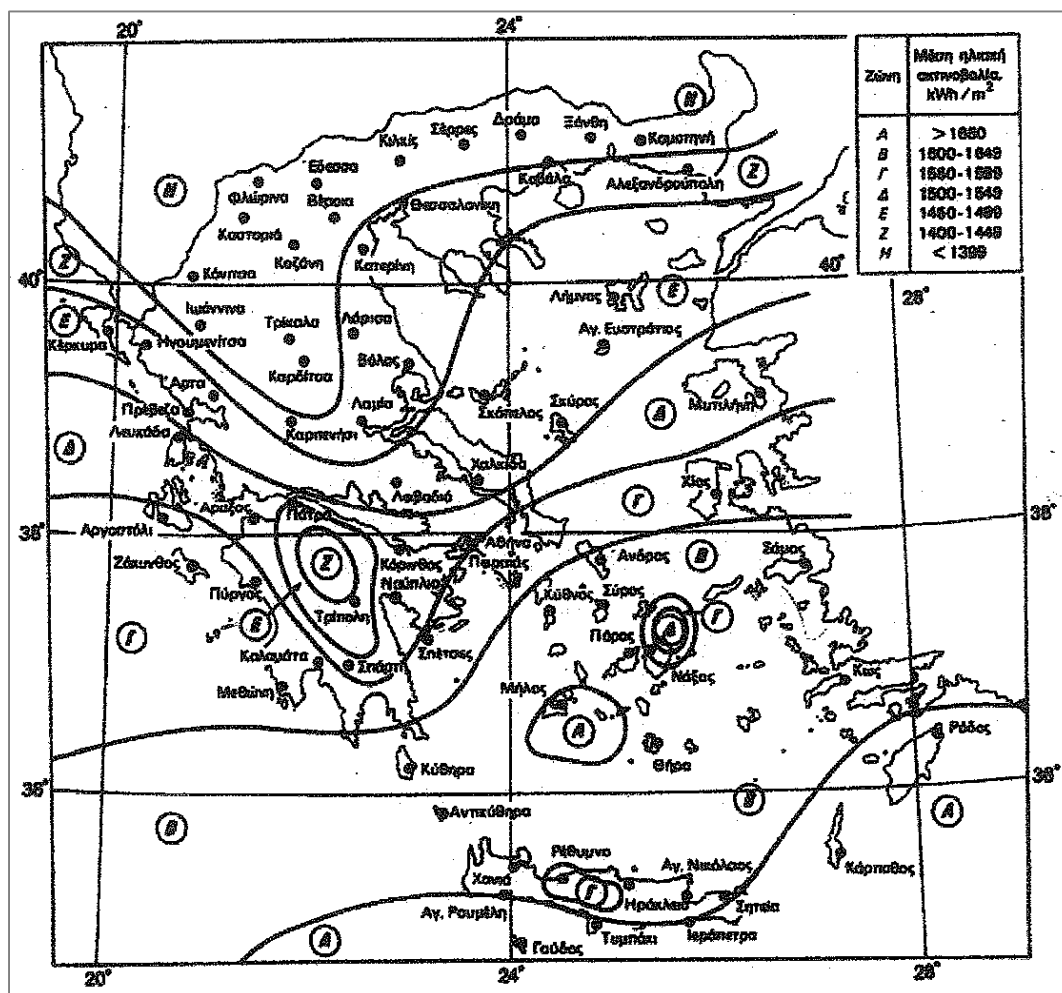
### 5.2.5 Η προσφορά: Η ηλιακή ενέργεια

Από πίνακες, χάρτες ή διαγράμματα, βρίσκουμε τη μέση ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ανά μονάδα επιφάνειας (οριζόντιας ή σε διάφορες κλίσεις), στη συγκεκριμένη τοποθεσία και στην επιλεγμένη χρονική περίοδο.

Για παράδειγμα στο χάρτη του σχήματος 5.17 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:  $\text{συν}\phi = \text{συν}\beta \cdot \eta\mu\beta_{\sigma} \text{ συν}(\beta_{\sigma} - \theta) + \eta\mu\beta \cdot \text{συν}\beta_{\sigma}$ , από πίνακες, ή από διαγράμματα όπως των σχημάτων 2.7 και 2.8.

Στην Ελλάδα, χονδρικά, η κλίση των συντελεστών  $\beta_{\sigma}$  είναι συνήθως περίπου  $45^{\circ}$ .



Σχήμα 5.17 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  $1650 \text{ kWh/m}^2$ , η ζώνη B από  $1600$  έως  $1649 \text{ kWh/m}^2$  κλπ.

*\*\* Στους πίνακες B1-B5 στο τέλος των σημειώσεων δίνονται λεπτομερέστερες πληροφορίες για την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στις διάφορες ελληνικές περιοχές*

Όταν ενδιαφέρει περισσότερο η φωτοβολταϊκή 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.

### 5.2.6 Το πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Αφού έχουμε συγκεντρώσει τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε, μπορούμε να υπολογίσουμε το κυριότερο μέγεθος για το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, το απαιτούμενο πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Η πρώτη σκέψη είναι 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 φωτοβολταϊκών στοιχείων, με συντελεστή απόδοσης  $\eta$  και συνολική επιφάνεια  $A$  ( $m^2$ ), όταν δεχτεί μια ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας  $\Pi$  ( $kWh/m^2$ ), είναι:

$$E = \Pi * A * \eta \text{ (kWh/m}^2\text{)}$$

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

$$A = E / \Pi * \eta \text{ (m}^2\text{)}$$

Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ότι οι τιμές του πίνακα 5.3 αφορούν στη μέση ημερήσια χειμερινή ηλεκτρική κατανάλωση μιας κατοικίας στη Ρόδο. Χρησιμοποιώντας συλλέκτη από φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου, με μέσο συντελεστή απόδοσης 12%, τοποθετημένα στη Ρόδο με κλίση 45°, όπου τον Ιανουάριο αντιστοιχεί μέση ημερήσια ηλεκτρική ακτινοβολία  $3,32kWh/m^2$  βρίσκουμε ότι η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων που απαιτούνται για την κάλυψη της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης των  $8kWh$  είναι:

$$A = 8 \text{ (kWh/d)} / 3.32 \text{ (kWh/m}^2\text{)} * \eta = 20.08m^2$$

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

$$\sigma_0 = 1 - (42,6 - 20) * 0,005 = 0,89$$

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

$$A = 8 / (3,32 * 0,12 * 0,89) = 22,56m^2$$

Τα αποτελέσματα όμως αυτά είναι ουσιαστικά χωρίς πρακτική αξία, διότι όταν αναζητήσουμε στη βιομηχανία ή στο εμπόριο τα απαιτούμενα φωτοβολταϊκά πλαίσια για τη συστοιχία της εγκατάστασής μας, βλέπουμε ότι συνήθως οι κατασκευαστές τους δεν επιθυμούν ή δεν ενδιαφέρονται να ανακοινώσουν αναλυτικά το μέσο συντελεστή απόδοσης και τη συνολική επιφάνεια των ηλιακών στοιχείων του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου, ούτε τον συντελεστή κάλυψής τους. Έτσι τα μόνα χαρακτηριστικά που αναφέρονται είναι η επιφάνεια (S) και η απόδοση ( $\eta_{\pi}$ ) του φωτοβολταϊκού πλαισίου ή η ισχύς αιχμής ( $P_{\alpha}$ ).

**Έστω ότι το διαθέσιμο φωτοβολταϊκό πλαίσιο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:  $S = 0.37\text{m}^2$ ,  $\eta_{\pi} = 10,76\%$ ,  $P_{\alpha} = 40\text{W}_p$**

❖ **Στη πρώτη περίπτωση γνωρίζουμε μόνο την επιφάνεια (S) και την απόδοση  $\eta_{\pi}$  του φωτοβολταϊκού πλαισίου.**

Η ιδανικά απαιτούμενη ολική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι:

$$S_{ολ} = E / (\Pi * \eta_{\pi} * \sigma_{\theta} * \sigma_p) = 8 / (3,32 * 0,1076 * 0,89 * 1) = 25,16\text{m}^2$$

Αν οι παραπάνω τιμές είναι συμβιβαστικές, θα πρέπει να καταλήγουν σε συντελεστή κάλυψης του φωτοβολταϊκού πλαισίου που να επιβεβαιώνεται από όσα αναφέρονται στο σχήμα 5.6. Οπότε έχουμε:

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

που συμφωνεί ικανοποιητικά με την αναμενόμενη τιμή για πυκνή τοποθέτηση κυκλικών ηλιακών στοιχείων.

Υποθέτοντας 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 φωτοβολταϊκής γεννήτριας μέχρι την έξοδο προς την κατανάλωση είναι  $\alpha = 0.7$ , βρίσκουμε ότι η τελικά απαιτούμενη επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι:

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

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο του παραδείγματος έχει εμβαδόν επιφάνειας  $0.37\text{m}^2$ . Επομένως θα χρειαστούμε:

$$S'_{ολ} = S = 35,94 / 0,37 = 97,14 = 98 \Phi / B \text{ πλαίσια}$$

❖ **Στη δεύτερη περίπτωση γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής του φωτοβολταϊκού πλαισίου.**

Υποθέτοντας ότι οι πρόσθετες ηλεκτρικές απώλειες είναι  $\alpha = 0.8$ , υπολογίζουμε τη συνολική ισχύ αιχμής η οποία είναι ίση με:

$$P'_{\alpha} = P_{\alpha} (\Pi * \sigma_{\theta} * \sigma_p * \alpha) = 8 / (3,32 * 0,89 * 1 * 0,7) = 3870 \text{ Wp}$$

Που αντιστοιχεί σε:

$$P'a / Pa = 3870 / 40 = 96.75 = 97 \text{ Φ/B πλαίσια}$$

Δηλαδή περίπου καταλήγουμε πάλι σε 98 φωτοβολταϊκά πλαίσια.

## 5.3 Η ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

### 5.3.1 Η ανάγκη για αποθήκευση

Ένα αξιόπιστο φωτοβολταϊκό σύστημα πρέπει να παρέχει επαρκή ηλεκτρική ενέργεια για την ικανοποίηση της ζήτησης ακόμα και στα χρονικά διαστήματα που δεν υπάρχει αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία, όπως συμβαίνει κυρίως στις νυχτερινές ώρες, στις συνεφιασμένες ημέρες και στις χρονικές αιχμές της κατανάλωσης.

Τα φωτοβολταϊκά 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. Αντίθετα τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά 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 φωτοβολταϊκής 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 διοχέτευσή της στη γη ή σε ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να προνοείται να αποθηκεύεται (συνήθως από τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα ζητείται να εξασφαλίζουν μια αυτοδυναμία τουλάχιστον 3-10 ημερών), εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες και απαιτήσεις, και κυρίως το μέγιστο πλήθος των πιθανών συνεχών ημερών συνεφιάς, τις αιχμές της κατανάλωσης και το βαθμό αξιοπιστίας που θα πρέπει να παρουσιάζει το σύστημα, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ή όχι βοηθητικών ενεργειακών πηγών.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συσσωρευτών και ανάλογα με τον τύπο των ηλεκτροδίων παίρνουν το όνομά τους. Έτσι για παράδειγμα, έχουμε συσσωρευτές **νικελίου-καδμίου, αργύρου-ψευδαργύρου και μολύβδου.**

Ο περισσότερος χρησιμοποιούμενος τύπος συσσωρευτών στα φωτοβολταϊκά συστήματα, είναι οι συσσωρευτές μολύβδου. Αυτό συμβαίνει διότι έχουν μια σειρά από πλεονεκτήματα και μικρό σχετικά κόστος.

### 5.3.2 Χαρακτηριστικά συσσωρευτών μολύβδου

Οι συσσωρευτές μολύβδου αποτελούνται από ένα πλήθος κυψελίδων συνδεδεμένων μεταξύ του σε σειρά. Οι κυψελίδες είναι εμβαπτισμένες σε ηλεκτρολύτη και συσκευασμένες σε μια μονωτική θήκη, αποτελώντας ένα ενιαίο σύνολο που αποκαλείται «συσσωρευτής».

Ο αριθμός και τα χαρακτηριστικά των κυψελίδων, καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών, είναι:

≈ **Ονομαστική τάση συσσωρευτή:**

Τάση που παρέχεται στα άκρα του συσσωρευτή κατά το μεγαλύτερο μέρος της 24ωρης λειτουργίας με ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης. Ανάλογα με τις κυψελίδες που περιέχει, έχουμε συσσωρευτές με ονομαστικές τάσεις ( $V_{\sigma}$ ): 6, 12, 24, 48 Volt.

Οι συσσωρευτές αυτοί αποτελούν τους περισσότερο συνηθισμένους τύπους. Έχουμε όμως τη δυνατότητα να συνδέσουμε μεταξύ τους, σειρά συσσωρευτών και να πάρουμε όποιες ονομαστικές τάσεις επιθυμούμε. Έτσι, αν θέλουμε μια διάταξη συσσωρευτών με ονομαστική τάση  $V_{\sigma} = 120$  Volt, έχουμε τη δυνατότητα να την υλοποιήσουμε συνδέοντας σε σειρά 10 συσσωρευτές των 12 Volt ( $10 \cdot 12 = 120$  Volt) ή 5 συσσωρευτές των 24 Volt ( $5 \cdot 24 = 120$  Volt).

Ελέγχοντας την ονομαστική τάση του συσσωρευτή, καταλαβαίνουμε αν αυτός είναι φορτισμένος, έχει εκφορτισθεί ή είναι υπερφορτισμένος.

≈ **Μέγιστη τάση φόρτισης:**

Είναι η τάση με την οποία επιτρέπεται να φορτιστεί ο συσσωρευτής χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να δημιουργηθούν αέρια που θα τον καταστρέψουν.

Τα στοιχεία αυτά δίνονται από τον κατασκευαστή των συσσωρευτών και αναγράφονται στο έντυπο με τις τεχνικές οδηγίες που τους συνοδεύει.

≈ **Τάση συντήρησης:**

Είναι η τάση που πρέπει να εφαρμόσουμε στα άκρα του συσσωρευτή προκειμένου αυτός να παραμείνει φορτισμένος.

≈ **Τελική τάση εκφόρτισης ( $U_T$ ):**

Είναι η μικρότερη τιμή της τάσης που πρέπει να υπάρχει στα άκρα του συσσωρευτή, χωρίς αυτός να κινδυνεύει να καταστραφεί.

Η τιμή της τάσης αυτής είναι πολύ σημαντική διότι αφ' ενός καθορίζει το ποσοστό της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούμε να ανακτήσουμε και αφ' ετέρου χρησιμεύει στη ρύθμιση των αυτοματισμών του φωτοβολταϊκού σταθμού. Αν η τιμή της τάσης κατέβει κάτω από την τάση εκφόρτισης, τότε ενεργοποιούνται οι κατάλληλοι αυτοματισμοί και αποσυνδέουν τα φορτία από τις συστοιχίες των συσσωρευτών.

≈ **Ρεύμα φόρτισης:**

Το ρεύμα με το οποίο συνίσταται να φορτίζεται ο συσσωρευτής για μέγιστη διάρκεια ζωής.

Η τιμή του δίνεται από τον κατασκευαστή και συνήθως ισούται (αριθμητικά) με το 1/10 της ονομαστικής χωρητικότητάς του (σε Αμερώρια, Ah). Αν για παράδειγμα, έχουμε έναν συσσωρευτή με ονομαστική χωρητικότητα 140 Ah και δεν ξέρουμε περισσότερα στοιχεία σχετικά για το μέγιστο ρεύμα φόρτισής του, τότε μπορούμε να επιλέξουμε ένα ρεύμα φόρτισης 14Α.

≈ **Ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης:**

Το ρεύμα μέσω του καταναλωτή που εξαντλεί τη χωρητικότητα του συσσωρευτή σε 20 ώρες. Συνεπώς το ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης, ισούται με το 1/20 της ονομαστικής χωρητικότητας Q.

≈ **Ονομαστική χωρητικότητα συσσωρευτή:**

Προσδιορίζει την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο συσσωρευτή. Μετράται συνήθως σε Αμερώρια (Ah).

Για ιδανικές συνθήκες αυτό εκφράζεται σαν το γινόμενο της μέσης έντασης του ρεύματος I, που δίνει ο συσσωρευτής ανεξάρτητα από την τάση του, επί το πλήθος των ωρών μέχρι να εκφορτισθεί.

Έτσι, για παράδειγμα, αν ένας συσσωρευτής τροφοδοτεί μια κατανάλωση με ρεύμα 12 Α για διάστημα 10 ωρών μέχρι να εξαντληθεί, τότε η χωρητικότητά του είναι:

$$Q = 12 \text{ (A)} * 10 \text{ (h)} = 120 \text{ (Ah)}$$

Θεωρητικά, η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον συσσωρευτή, δίνεται από το γινόμενο της τάσης επί τη χωρητικότητά του.

Στην πράξη όμως δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$E_{\sigma} = Q * V * \beta * n_{\sigma}$$

Όπου:

$E_{\sigma}$  = Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη (ή που θέλουμε να αποθηκεύσουμε) στον συσσωρευτή και η οποία θα καλύψει τις ενεργειακές μας ανάγκες κατά τις ημέρες της αυτοδυναμίας ( $S_p$ ). Μετράται σε Wh.

Q= Η χωρητικότητα του συσσωρευτή. Μετράται σε Ah.

$V_{\sigma}$ = Η ονομαστική τάση του συσσωρευτή. Μετράται σε Volt.

$\beta$ = Αδιάστατος συντελεστής που δηλώνει το βάθος εκφόρτισης του συσσωρευτή.

$n_{\sigma}$  = Ο συντελεστής απόδοσης του συσσωρευτή. Κυμαίνεται μεταξύ του 0,8 και 0,9

Ο συντελεστής  $\beta$  ορίζει το ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειας στον συσσωρευτή, που μπορούμε να ανακτήσουμε. Αποκαλείται δε και βάθος κάθε εκφόρτισης.

Η τιμή του συντελεστή  $\beta$ , κυμαίνεται μεταξύ του 0,1 για τους φθηνούς συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται στο αυτοκίνητο και 0,8 για ειδικού συσσωρευτές κλειστού τύπου.

Πάντως, στις εγκαταστάσεις με λίγες απαιτήσεις, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε κοινούς συσσωρευτές αυτοκινήτου.

Η μέση ισχύς ( $P_{\phi}$ ) που καλείται να παράσχει ο συσσωρευτής για να καλύψει απαιτήσεις φορτίου  $S_p$  ημερών, συνδέεται με τη χωρητικότητά του σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$P_{\phi} = (Q * n_{\sigma} * V_{\sigma}) / (24 * S_p)$$

$P_{\phi}$  = Η μέση ισχύς του φορτίου που εξυπηρετείται από το συσσωρευτή. Μετράται σε Watt.

$S_p$  = Οι ημέρες κάλυψης του φορτίου από το συσσωρευτή. Δίνεται από τη σχέση που ακολουθεί:

$$S_p = (5 / 17) * [(N_s * d_{om} - N_{so}) / N_s] + (12 / 17)$$

$N_s$  = Ο ημερήσιος αριθμός των ωρών ηλιοφάνειας για τελείως ανέφελο ουρανό της 15<sup>ης</sup> ημέρας του μήνα.

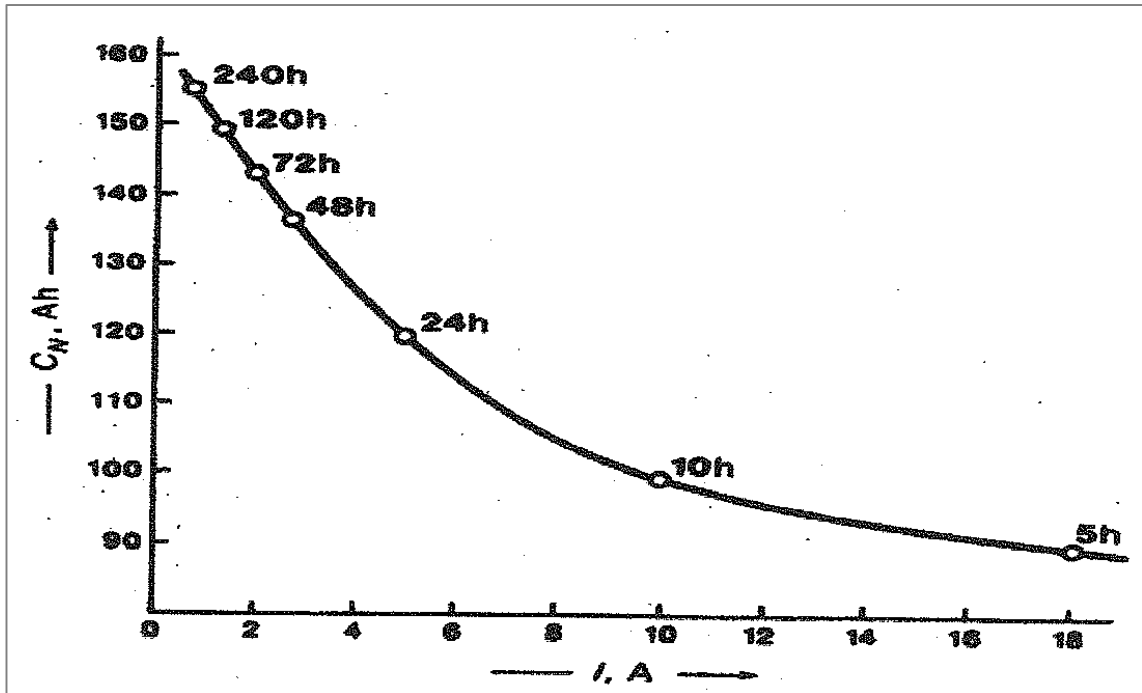
$N_{so}$  = Ο πραγματικός αριθμός των ωρών ηλιοφάνειας του μήνα.

$d_{om}$  = Οι ημέρες που έχει ο αντίστοιχος μήνας.

Με τη χρήση, η χωρητικότητα των συσσωρευτών μειώνεται λόγω διάβρωσης των πλακών, σχηματισμού επικαθήσεων κλπ. Συνήθως ένας συσσωρευτής θεωρείται άχρηστος όταν η χωρητικότητά του πέσει κάτω από 80% περίπου της αρχικής τιμής. Επίσης δεν πρέπει να παραβλέπεται ότι οι φορτισμένοι συσσωρευτές αυτοεκφορτίζονται με ρυθμό 2 έως 5% της χωρητικότητάς τους τον μήνα. Ο ρυθμός της αυτοεκφόρτισης αυξάνει με την ηλικία του συσσωρευτή.

Η χωρητικότητα των συσσωρευτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ισχύ ( $P = V * I$ ) με την οποία γίνεται η εκφόρτισή τους, δηλαδή από την ένταση του ρεύματος που δίνουν προς την κατανάλωση. Όπως φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 5.18 ένας συσσωρευτής ονομαστικής χωρητικότητας 100 Ah θα εξαντληθεί σε 10 ώρες αν η ένταση του ρεύματος εκφόρτισης είναι 10 A, ενώ αν η ένταση είναι πχ 18 A ο ίδιος συσσωρευτής θα εξαντληθεί σε 5 ώρες και η χωρητικότητά 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 5.18 Η εξάρτηση της χωρητικότητας  $C_N$  ενός συσσωρευτή μολύβδου του εμπορίου, από την ένταση του ρεύματος εκφόρτισης  $I$ . 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 χωρητικότητάς τους.

Εκτός από τη θερμοκρασία, 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 φθηνότερους 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. Πάντως στις μικρότερες και λιγότερο απαιτητικές από τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, χρησιμοποιούνται συχνά κοινοί συσσωρευτές αυτοκινήτων, με επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης μέχρι 10%.

### 5.3.3 Τρόποι σύνδεσης συσσωρευτών

Στις μεγάλες εγκαταστάσεις, η συνολική χωρητικότητα των συσσωρευτών που απαιτείται, δεν είναι δυνατόν να καλυφθεί με ένα και μόνο συσσωρευτή.

Γι' αυτό, συνδέονται μεταξύ τους περισσότεροι σχηματίζοντας μια συστοιχία που καλύπτει τις απαιτήσεις μας.

Παρατηρώντας εξωτερικά τους συσσωρευτές, θα δούμε ότι ο καθένας απ' αυτούς έχει δύο ηλεκτρόδια που ονομάζονται πόλοι. Έχουμε πάντα τον θετικό πόλο και τον αρνητικό πόλο. Ο θετικός συμβολίζεται με (+) και ο αρνητικός με (-).

Οι συσσωρευτές, μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με 3 τρόπους:

**I. Σύνδεση σε σειρά:**

Η διάταξη αυτή υλοποιείται, συνδέοντας τον θετικό πόλο του ενός συσσωρευτή με τον αρνητικό του άλλου.

Η συνολική ονομαστική τάση της συστοιχίας ισούται με το άθροισμα των ονομαστικών τάσεων του κάθε συσσωρευτή που την απαρτίζει. **Οι ονομαστικές χωρητικότητες (Q) του κάθε συσσωρευτή πρέπει να είναι ίσες.**

**II. Παράλληλη σύνδεση:**

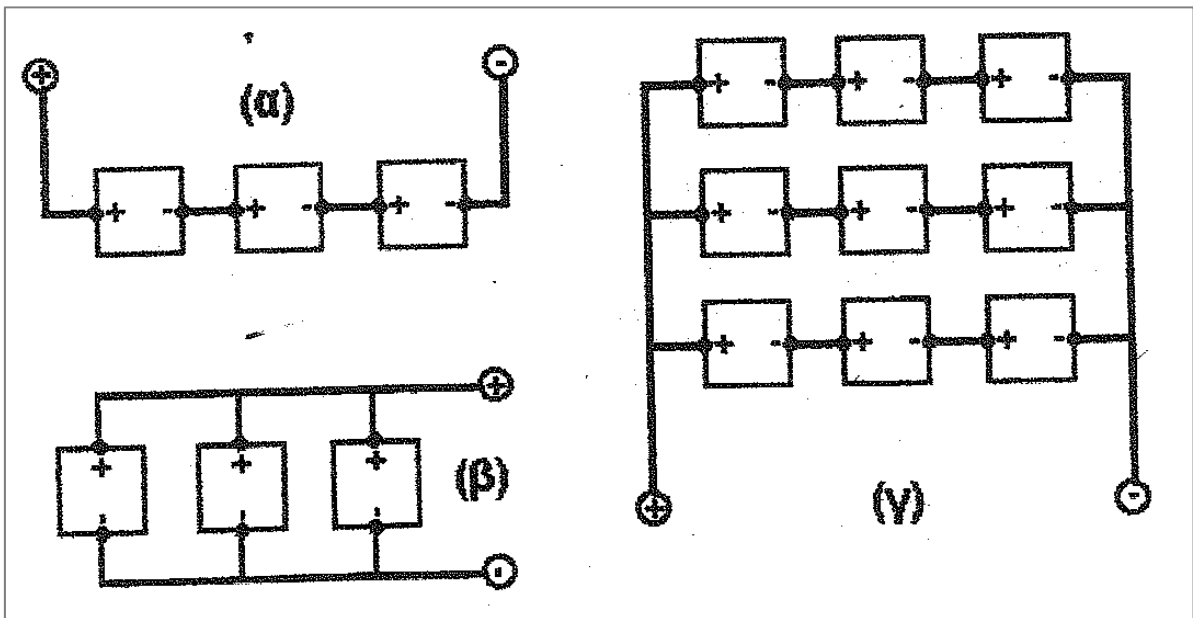
Η διάταξη αυτή υλοποιείται, συνδέοντας μεταξύ τους όλους τους θετικούς πόλους σε έναν κοινό θετικό πόλο και όλους τους αρνητικούς πόλους σε έναν κοινό αρνητικό πόλο.

Η συνολική χωρητικότητα ( $Q_{ολ}$ ) της συστοιχίας ισούται με το άθροισμα των επιμέρους χωρητικοτήτων του κάθε συσσωρευτή που την απαρτίζει. **Οι ονομαστικές τάσεις του κάθε συσσωρευτή πρέπει να είναι ίσες.**

**III. Μικτή σύνδεση**

Η διάταξη αυτή υλοποιείται, συνδυάζοντας τις δύο προηγούμενες διατάξεις.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραπάνω διατάξεις:



Σχήμα 5.18 (α) συνδεσμολογία τριών συσσωρευτών σε σειρά, (β) συνδεσμολογία τριών συσσωρευτών παράλληλα και σύνδεση συσσωρευτών, που αποτελείται από τρεις κλάδους συνδεδεμένους παράλληλα.

Ο κάθε κλάδος έχει τρεις συσσωρευτές συνδεδεμένους μεταξύ τους σε σειρά.

### 5.3.4 Δομή, Διάρκεια ζωής και κόστος

Στις σχετικά μεγάλες φωτοβολταϊκές 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.

Λόγω της επίσης σπονδυλωτής δομής των φωτοβολταϊκών γεννητριών μπορεί σχετικά εύκολα να γίνει κάποια διόρθωση σφαλμάτων σχεδιασμού, που θα οφείλονταν σε λανθασμένες εκτιμήσεις της ηλεκτρικής κατανάλωσης ή της ηλιακής ακτινοβολίας.

Αν υποθέσουμε ότι καθημερινά γίνεται ένας τουλάχιστον κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης για την αντιμετώπιση των νυχτερινών καταναλώσεων ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, δεδομένου ότι οι συσσωρευτές μολύβδου δεν ξεπερνούν τους 500-1500 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, θα πρέπει να γίνεται αντικατάσταση των συσσωρευτών αρκετά συχνά, περίπου κάθε 2 με 5 χρόνια.

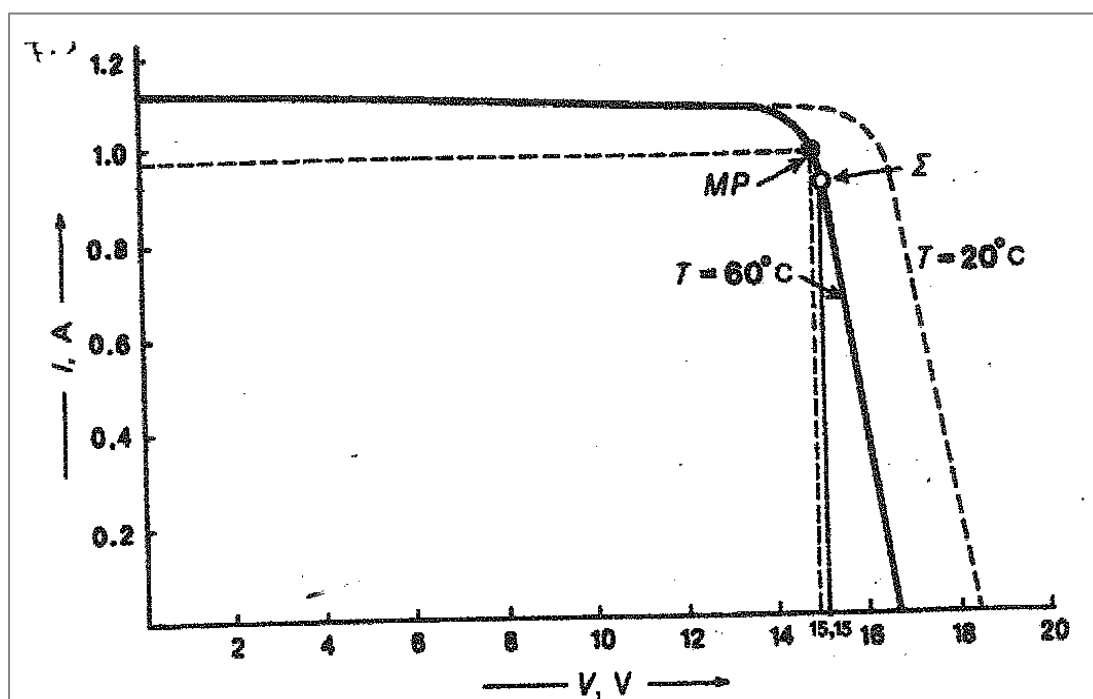
Λόγω της κατασκευής τους οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλο βάρος και κόστος. Ανάλογα με τον τύπο τους η χωρητικότητα ενέργειας των συσσωρευτών μολύβδου είναι περίπου  $20\text{m}^3$  και το κόστος τους είναι περίπου 20000 δρχ ανά χωρητικότητα. Γι' αυτό είναι συχνά οικονομικότερο να μην επιδιώκεται η πλήρης ικανοποίηση των καταναλώσεων του συστήματος με αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, αλλά να προτιμάται η τοποθέτηση μιας βοηθητικής ενεργειακής πηγής, συνήθως ενός μικρού ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους ντήζελ για την αντιμετώπιση των αιχμών της ζήτησης. Έτσι επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της απαιτούμενης χωρητικότητας των συσσωρευτών, αλλά επίσης και της ισχύος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας του συστήματος.

## 5.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

### 5.4.1 Ρυθμιστές / Μετατροπείς / Αναστροφείς γενικά

Η καλή λειτουργία και η αυξημένη απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων υποβοηθείται συχνά με τη χρησιμοποίηση ειδικών διατάξεων, συνήθως ηλεκτρονικών ισχύος, που επεξεργάζονται την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η φωτοβολταϊκή γεννήτρια.

Για παράδειγμα στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-έντασης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου του εμπορίου.

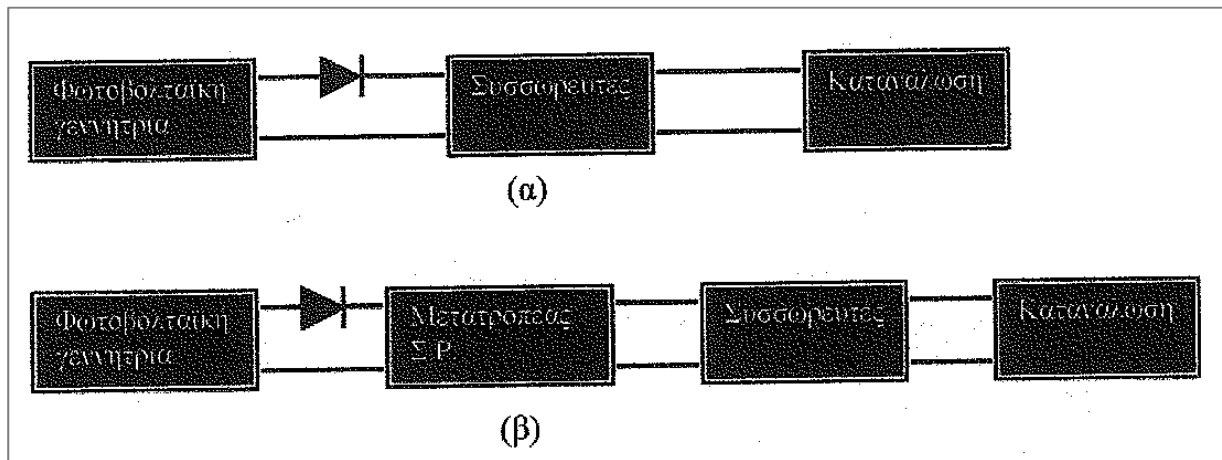


Σχήμα 5.19 Παράδειγμα της καμπύλης τάσης-έντασης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου στη θερμοκρασία  $60^{\circ}\text{C}$  (ασυνεχής γραμμή) και στη συμβατική θερμοκρασία  $20^{\circ}\text{C}$  (ασυνεχής γραμμή) και επιλογή του κατάλληλου σημείου της  $\Sigma$  για τη φόρτιση κοινών συσσωρευτών  $12\text{V}$ , που είναι όμως διαφορετικό από το σημείο της μέγιστης ισχύος  $MP$ .

Για τη φόρτιση συσσωρευτών  $12\text{V}$  στους οποίους η κατάλληλη τάση φόρτισης είναι  $15.15\text{V}$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί, παράλληλα ή στη σειρά με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ένας ρυθμιστής τάσης, που να διατηρεί την τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου στην επιθυμητή τιμή.

Επίσης η τάση φόρτισης των συσσωρευτών μπορεί να ανεξαρτητοποιηθεί εντελώς, από την τάση εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, με την παρεμβολή ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος. Ο μετατροπέας αυτός παραλαμβάνει την τάση που δίνει η φωτοβολταϊκή 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 5.20 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 τοποθέτηση μιας προστατευτικής διόδου για την αποφυγή της εκφόρτισης των συσσωρευτών διαμέσου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, αν μειωθεί σημαντικά η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Όταν οι συσσωρευτές του συστήματος φορτιστούν πλήρως, η περίσσια του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται στη φωτοβολταϊκή 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 φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να περιέχουν και άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως είναι οι ρυθμιστές ισχύος, δηλαδή διατάξεις παρακολούθησης του σημείου της μέγιστης ισχύος, γνωστοί με τη συντομογραφία MPT (maximum power trackers). Ο προορισμός τους είναι να επιδιώκουν τη λειτουργία της φωτοβολταϊκής 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 φωτοβολταϊκής 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 φωτοβολταϊκά συστήματα.**

Τέλος στην έξοδο των φωτοβολταϊκών συστημάτων παρεμβάλλεται συχνά ένας αναστροφέας, που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της φωτοβολταϊκής 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 αντίστοιχες του συνεχούς ρεύματος. Επίσης η ανύψωση της τάσης που γίνεται συγχρόνως με την μετατροπή της από συνεχή σε εναλλασσόμενη, συνεπάγεται μείωση των απωλειών στους αγωγούς του δικτύου. Πάντως η

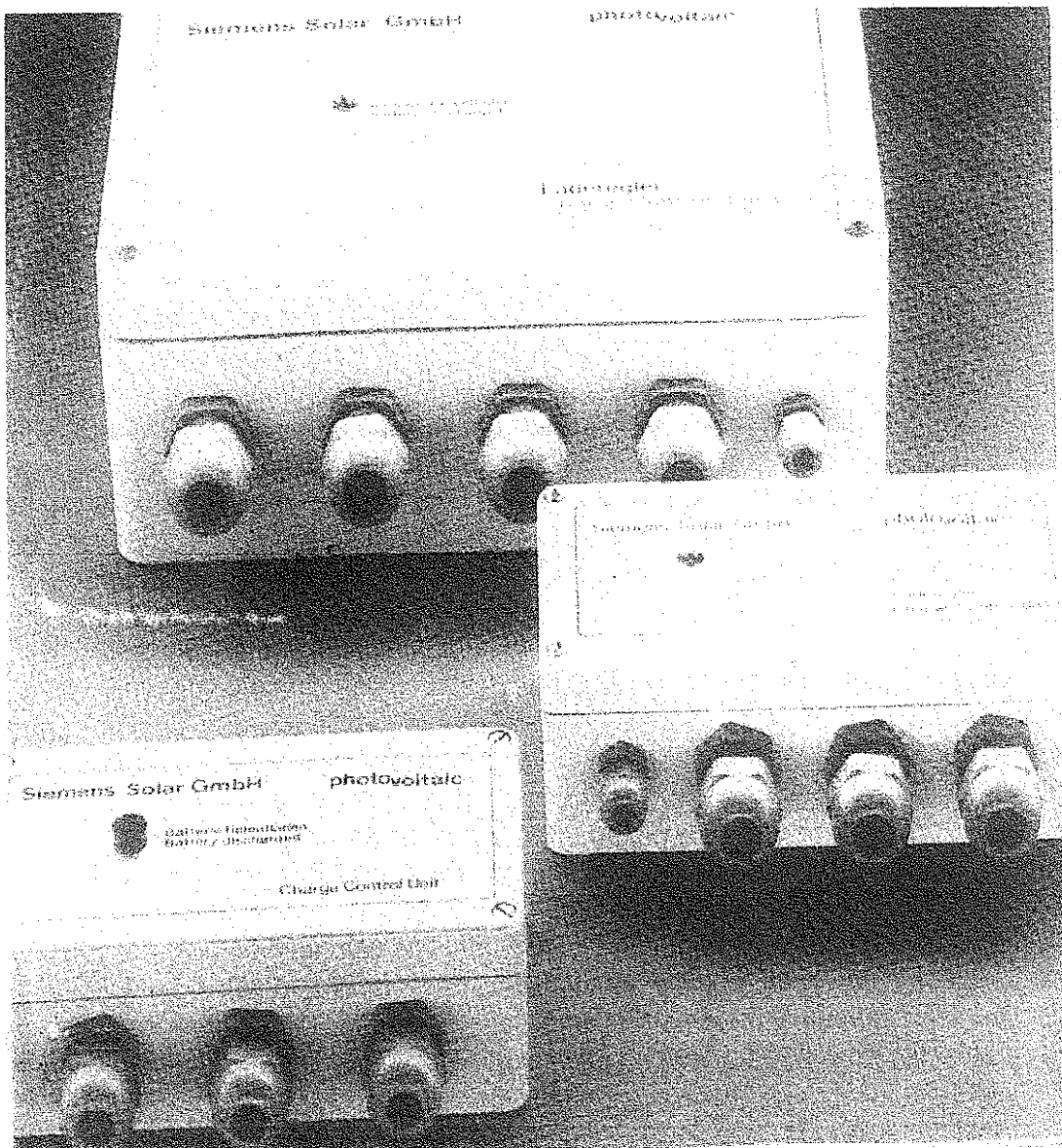
λειτουργία και των παραπάνω διατάξεων συνοδεύεται με αξιόλογες απώλειες. Πχ ο συντελεστής απόδοσης των διάφορων ηλεκτρονικών ισχύος που αναφέρθηκαν είναι περίπου 90-95%, εφόσον λειτουργούν κοντά στην ονομαστική τους ισχύ, αλλά γίνεται πολύ μικρότερος όταν η ισχύς είναι μειωμένη.

#### **5.4.2 Ρυθμιστές συνεχούς τάσης – Χαρακτηριστικά**

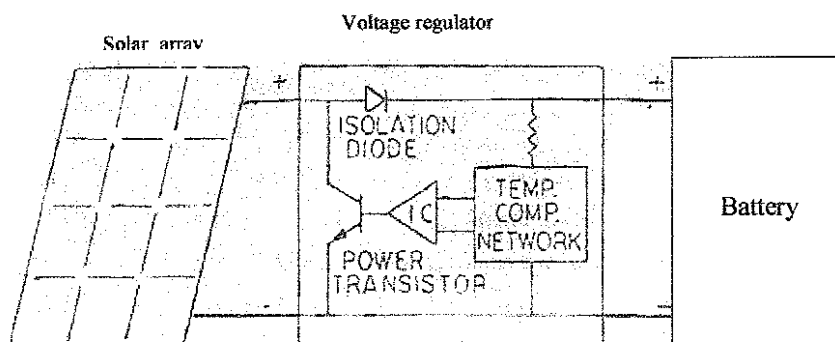
Ο ρυθμιστής τάσης είναι μια διάταξη, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και των συσσωρευτών<sup>\*\*</sup>, και επιτυγχάνει την ιδανική μεταφορά ενέργειας, ρυθμίζοντας τη ροή του ρεύματος, από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια προς τις μπαταρίες αποθήκευσης, διατηρώντας την κανονική κατάσταση φόρτισης των μπαταριών, ενώ ταυτόχρονα επιλέγει και τον κατάλληλο ρυθμό φόρτισής τους.

Για παράδειγμα όσο η μπαταρία πλησιάζει την πλήρη φόρτισή της ο ρυθμιστής ελαττώνει το ρεύμα που δίνουν τα πλαίσια προς την μπαταρία και εμποδίζει την υπερφόρτισή τους. Είναι γνωστό ότι η υπερφόρτιση μιας μπαταρίας ελαττώνει το χρόνο ζωής της. Επίσης αποτρέπει την αποφόρτιση πίσω στο σύστημα, ή τη συστοιχία, κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων χωρίς ήλιο, με την χρήση διόδων στερεάς κατάστασης.

\*Η εταιρεία SES Inc. παρέχει ένα ρυθμιστή τάσεως ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, οπότε λειτουργεί σαν ανεξάρτητη πηγή ενέργειας



Σχήμα 5.21 Διάφορες συσκευές ρύθμισης της συνεχούς τάσης που παράγει η φωτοβολταϊκή γεννήτρια



Σχήμα 5.22 Κύκλωμα ρυθμιστή τάσεως

Η ρύθμιση επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας τον κύκλο εργασίας (duty cycle) ο οποίος ελέγχει το μέσο ρεύμα που μεταφέρεται στο φορτίο του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Ο ρυθμιστής τάσης για να έχει μεγάλη απόδοση είναι προτιμητέο να είναι διακοπτικού τύπου (switching mode).

**Για την εκλογή του κατάλληλου ρυθμιστή τάσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, λαμβάνονται υπόψη τα πιο κάτω χαρακτηριστικά:**

*I. Ισχύς:*

Αυτή καθορίζεται από την τάση που δίνουν τα πλαίσια και την ένταση του ρεύματος στον καταναλωτή.

Η ισχύς του ρυθμιστή πρέπει να ξεπερνά την ισχύ που δίνουν τα πλαίσια και την ισχύ που καταναλώνει το φορτίο. Γενικά ο ρυθμιστής πρέπει να έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να μπορεί να δεχθεί ρεύμα τουλάχιστον 1.25 φορές μεγαλύτερο του ρεύματος βραχυκυκλώσεως των πλαισίων και η τάση λειτουργίας του να είναι περίπου ίση με την τάση που δίνουν τα πλαίσια.

*II. Χαμηλή τάση αποκοπής:*

Όταν η τάση της μπαταρίας πέσει αρκετά κάτω από την κανονική της τιμή, τότε ο ρυθμιστής αποσυνδέει τη μπαταρία από το φορτίο ώστε να διατηρηθεί η καλή κατάσταση της μπαταρίας και να προληφθεί οποιαδήποτε βλάβη συμβεί στον καταναλωτή όταν στα άκρα του εφαρμοστεί τάση μικρότερη από την τάση λειτουργίας του. Σε μια μπαταρία 12V, η χαμηλή τάση αποκοπής του συνδεδεμένου ρυθμιστή είναι μεταξύ 11 και 12 V.

*III. Υψηλή τάση αποκοπής:*

Όταν η τάση της μπαταρίας μεγαλώσει αρκετά, τότε ο ρυθμιστής την αποσυνδέει από τα πλαίσια και έτσι εμποδίζει την υπερφόρτισή της. Σε μια μπαταρία των 12V η υψηλή τάση αποκοπής είναι μεταξύ των 14.5 και 15V.

*IV. Ρύθμιση της φόρτισης της μπαταρίας ανάλογα με τη θερμοκρασία της:*

Ο ρυθμιστής προσαρμόζει αυτόματα το σημείο τερματισμού της μπαταρίας ώστε το φορτίο που θα διοχετευθεί στη μπαταρία να είναι μέγιστο σε σχέση με τη θερμοκρασία της.

*V. Προστασία πλαισίων από αντίθετο ρεύμα:*

Ο ρυθμιστής περιέχει μηχανισμό που εμποδίζει κάποιο ρεύμα να κινηθεί από τη μπαταρία προς τα πλαίσια όταν δεν φωτίζονται ή κατά τη διάρκεια της νύχτας.

*VI. Μέγεθος ρυθμιστή:*

Το μέγεθος του ρυθμιστή έχει επίσης σημασία ιδίως στην περίπτωση που θα τοποθετηθεί στον ίδιο κλειστό χώρο με τις μπαταρίες.



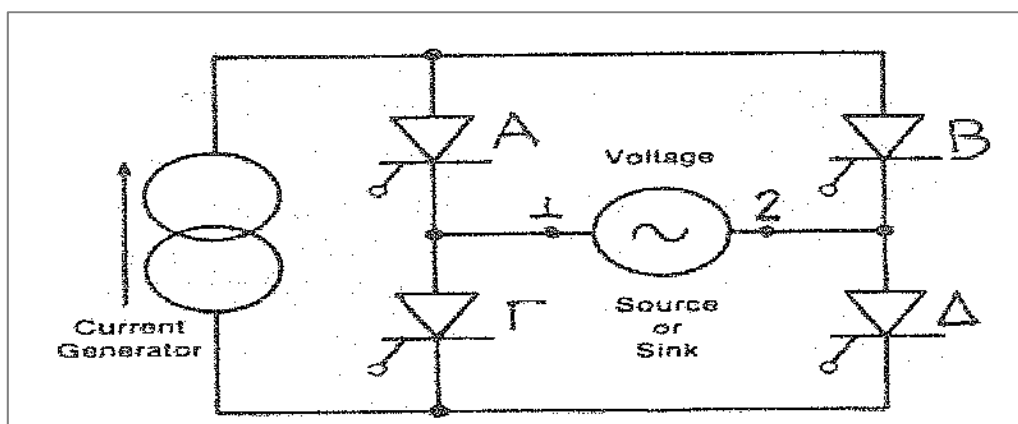
### 5.4.3 Αναστροφείς D.C. – A.C. (Inverter)

Η συσκευή αυτή είναι απαραίτητη για τη μετατροπή του συνεχούς (D.C.) ρεύματος σε εναλλασσόμενο (A.C.) για να μπορούν να λειτουργούν οι διάφορες συσκευές που κυκλοφορούν στην αγορά.

Ένας τέτοιος μετατροπέας είναι ο περιστρεφόμενος, στον οποίο το συνεχές ρεύμα προκαλεί περιστροφή ενός κινητήρα που με τη σειρά του μεταδίδει την κίνηση σε μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Η συσκευή αυτή δεν χρησιμοποιείται σήμερα διότι με την ανάπτυξη της τεχνολογίας έχουν κατασκευαστεί παρόμοιες συσκευές με ημιαγωγούς και χωρίς κινητά μέρη. Η απόδοση των τελευταίων είναι πολύ μεγαλύτερη, η συντήρησή τους πολύ πιο εύκολη και η ανάγκη για επιδιόρθωση πολύ σπάνια.

Ανάλογα με το είδος του φωτοβολταϊκού συστήματος χρησιμοποιείται και ο κατάλληλος μετατροπέας. Σε ένα αυτοτελές φωτοβολταϊκό σύστημα συνδέεται μετατροπέας που έχει τέτοια κατασκευή ώστε να λειτουργεί με την ηλεκτρική ενέργεια που δίνουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και να μετατρέπει τη συνεχή μορφή της ενέργειας αυτής σε εναλλασσόμενη. Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα ενωμένο με το κεντρικό δίκτυο, συνδέεται μετατροπέας που λειτουργεί με την τάση του κεντρικού και καθίσταται ικανός να μετατρέπει την συνεχή τάση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε εναλλασσόμενη ώστε να τροφοδοτούνται οι ηλεκτρικές συσκευές ή ακόμη και το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ένα βασικό κύκλωμα αντιστροφέα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5.23 Βασικό κύκλωμα αντιστροφέα

Ανάλογα με το αν το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι αυτόνομο ή συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο υπάρχουν και αντίστοιχοι μετατροπέες:

#### I. Μετατροπέας αυτοτελούς φωτοβολταϊκού συστήματος:

Τα κύρια χαρακτηριστικά μετατροπέα αυτοτελούς φωτοβολταϊκού συστήματος είναι τα εξής:

- ≈ Η τάση εισόδου, είναι η τάση των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- ≈ Η ισχύς του, που καθορίζεται από το μέγεθος του φωτοβολταϊκού συστήματος
- ≈ Η απόδοσή του, που κυμαίνεται μεταξύ του 80% και του 90%

≈ Η ικανότητά του να μετατρέπει όσο το δυνατόν καλύτερα τη συνεχή τάση εισόδου σε εναλλασσόμενη, χωρίς να εμφανίζονται σήματα παραμόρφωσης και να διατηρεί μια σχετική σταθερότητα στη συχνότητα.

Βασικό κριτήριο στην εκλογή κατάλληλου μετατροπέα που θα τοποθετηθεί σε αυτοτελές φωτοβολταϊκό σύστημα είναι το είδος της εναλλασσόμενης τάσης που χρειάζεται για να λειτουργήσει ο καταναλωτής. Πολλές συσκευές λειτουργούν και με εναλλασσόμενη τάση διαφορετική της ημιτονοειδούς, υπάρχουν όμως συσκευές, που χρειάζονται τέλεια ημιτονοειδή τάση για να λειτουργήσουν κανονικά. Άλλες συσκευές που έχουν κίνητρα χρειάζονται σταθερότητα στη συχνότητα γι' αυτό και ο μετατροπέας πρέπει να δίνει εναλλασσόμενη τάση σταθερής συχνότητας.

Η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόδοση αποτελεί βασικό κριτήριο για την εκλογή του μετατροπέα. Αν ένας μετατροπέας έχει 90% απόδοση τότε στην είσοδό του θα χρειαστεί ισχύς 3.3Kw για να δώσει στην έξοδό του ισχύ 3Kw. Συνήθως η απόδοση είναι μικρότερη αν η ισχύς που του δίνεται είναι μικρότερη από την τιμή για την οποία κατασκευάστηκε. Φυσικά είναι πλεονέκτημα για ένα μετατροπέα να έχει σταθερή απόδοση για μεγάλη περιοχή διαφορετικών τιμών ισχύος.

Ένα άλλο πλεονέκτημα που πρέπει να έχει ένας μετατροπέας είναι η αυτόματη διακοπή της λειτουργίας του όταν δεν είναι συνδεδεμένος με καταναλωτή σε λειτουργία. Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται ενέργεια γιατί δεν θα υπάρχουν απώλειες στον ίδιο τον μετατροπέα όταν δεν περνά ρεύμα από αυτόν.

Επίσης, σε περίπτωση που ο μετατροπέας χρειαστεί να τροφοδοτήσει μεγάλο κινητήρα, σαν αυτόν που βρίσκεται σε ηλεκτρική αντλία νερού ή σε συμπιεστή ψυγείου, πρέπει να είναι σε θέση να δώσει στην αρχή την απαραίτητη ισχύ που χρειάζεται ο κινητήρας για να ξεκινήσει, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

Για παράδειγμα ένας κινητήρας ισχύος ενός ίππου (HP), ανάλογα με την απόδοσή του, χρειάζεται από 1 μέχρι 1,5Kw για να λειτουργήσει κανονικά. Για να ξεκινήσει όμως είναι δυνατόν να χρειαστεί 5Kw ή ακόμα και περισσότερη ισχύ. Κάθε μετατροπέας έχει ως χαρακτηριστικά την μέγιστη στιγμιαία ισχύ που μπορεί να δώσει σε ένα κινητήρα για να τον ξεκινήσει και τη συνεχή ισχύ που δίνει στον ίδιο κινητήρα για να λειτουργήσει κανονικά.

Άλλο χαρακτηριστικό μετατροπέα αυτοτελούς φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι η σταθερότητα τάσης που δίνει στον καταναλωτή. Επειδή η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας δεν είναι πάντοτε η ίδια, υπάρχουν αυξομειώσεις στη τάση που δέχεται ο μετατροπέας. Σήμερα έχουν κατασκευαστεί εξαιρετικοί από πλευράς ποιότητας μετατροπέες που έχουν τη δυνατότητα να δίνουν ημιτονοειδή εναλλασσόμενη τάση με 1-2% αυξομείωση στην τάση εξόδου. Οι περισσότερες οικιακές συσκευές λειτουργούν κανονικά με αυξομειώσεις της τάσης γύρω στο 5-10%. Αυτές είναι συνήθως μικρότερες των αυξομειώσεων της τάσης που δίνει το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο στο σπίτι. Για προστασία τόσο του ίδιου του μετατροπέα, της μπαταρίας αλλά και του καταναλωτή, ένας καλής ποιότητας μετατροπέας έχει μηχανισμό διακοπής της λειτουργίας του εφόσον η τάση στην είσοδό του έχει αστάθεια.

Ο συντελεστής ισχύος είναι ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος που χρησιμοποιεί ο καταναλωτής προς την ισχύ που δίνεται στον καταναλωτή. Η τιμή του συντελεστή ισχύος εξαρτάται από την εκλογή

του μετατροπέα και το είδος του καταναλωτή. Ένας καλής ποιότητας μετατροπέας παρουσιάζει συντελεστή ισχύος 0,7 κατά τη σύνδεσή του με τους διάφορους καταναλωτές. Είναι γεγονός όμως ότι πολλοί μετατροπείς παρουσιάζουν προβλήματα στη διατήρηση σταθερότητας μιας αποδεκτής τιμής του συντελεστή ισχύος κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Για παράδειγμα αν στο κύκλωμα του καταναλωτή υπάρχουν φώτα και πλυντήριο, είναι δυνατόν να χαμηλώσουν τα φώτα λόγω μικρότερης ισχύος που δέχονται αν λειτουργήσει συγχρόνως και το πλυντήριο.

Πολλοί μετατροπείς, όταν λειτουργούν, προκαλούν ηλεκτρομαγνητική ενόχληση σε ηλεκτρομαγνητικές συσκευές. Για να αποφευχθεί το άσχημο αυτό επακόλουθο πρέπει να γίνει καλή εκλογή του μετατροπέα ώστε το βασικό εσωτερικό κύκλωμα να μην προκαλεί ηλεκτρομαγνητική εκπομπή.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει ένας μετατροπέας είναι να μην προκαλεί θόρυβο κατά τη λειτουργία του. Στην περίπτωση που προκαλεί κάποιο μικρό θόρυβο, πρέπει να τοποθετείται μακριά από χώρους στους οποίους ο θόρυβος θα είναι ενοχλητικός.

Είναι πολύ σημαντικό επίσης για το μετατροπέα να λειτουργήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να υποστεί βλάβη αλλά και σε περίπτωση βλάβης ο αντιπρόσωπος να είναι σε θέση να τον επιδιορθώσει.

## **II. Μετατροπέας φωτοβολταϊκού συστήματος ενωμένου με το δίκτυο:**

Τα κύρια χαρακτηριστικά του μετατροπέα αυτού είναι δύο. Πρώτον έχει απόδοση που είναι γύρω στο 90-95% και δεύτερο μπορεί να μετατρέψει πλήρως τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη, γιατί λειτουργεί με βάση το σήμα που παίρνει από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Θα πρέπει να έχει μεγάλη ισχύ για να μπορεί να μετατρέπει σε εναλλασσόμενη όλη την ισχύ που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Θα πρέπει ακόμη να είναι σε θέση να αντεπεξέλθει και σε περιπτώσεις πολύ μεγαλύτερων ισχύων που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια ειδικών καιρικών συνθηκών. Για παράδειγμα, μεγάλη ισχύς μπορεί να δημιουργηθεί όταν ορισμένα σύννεφα που, λειτουργώντας σαν φακός, προκαλούν μεγαλύτερη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια από την κανονική.

Ένα πλεονέκτημα του μετατροπέα που συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο είναι ότι δεν χρειάζεται να αντιμετωπίσει τις μεγάλες τιμές ρεύματος που απαιτούνται για το ξεκίνημα ενός κινητήρα. Σε τέτοιες περιπτώσεις υπάρχει η δυνατότητα τα υψηλά ρεύματα να παρέχονται από το δίκτυο.

Και σε αυτή την περίπτωση όμως ο μετατροπέας πρέπει να έχει σταθερή απόδοση σε πολύ μεγάλη περιοχή τιμών ισχύος. Άλλο χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει ένας τέτοιος μετατροπέας είναι η ικανότητα να προσαρμόζει τη λειτουργία του υπό τέτοια τάση, ώστε με οποιεσδήποτε συνθήκες, η ισχύς εξόδου να είναι πάντα η μέγιστη. Γενικά, η καλή απόδοση και η ικανότητα του μετατροπέα να χρησιμοποιεί τη μέγιστη ισχύ που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχει πολύ μεγάλη σημασία γιατί έχει σχέση με το οικονομικό όφελος του ιδιοκτήτη του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Επειδή η ηλεκτρική ενέργεια είναι δυνατό να διατεθεί δια μέσου του ηλεκτρικού δικτύου, η μορφή του ηλεκτρικού ρεύματος που δίνει ο μετατροπέας πρέπει να είναι ημιτονοειδής όπως ακριβώς το ρεύμα που κυκλοφορεί στο ηλεκτρικό δίκτυο. Πραγματικά, με την αλματώδη ανάπτυξη της φυσικής της στερεάς κατάστασης της ύλης, έχουν κατασκευαστεί μετατροπείς που δίνουν

σχεδόν τέλεια ημιτονοειδή τάση με ελάχιστα αρμονικά σήματα που την παραμορφώνουν. Το αποτέλεσμα είναι ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με αυτόν τον τρόπο δεν προκαλεί προβλήματα στη λειτουργία των κινητήρων και είναι πλήρως δεκτή από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ένας άλλος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη είναι ο συντελεστής ισχύος. Στην ιδανική περίπτωση ο συντελεστής αυτός πρέπει να είναι ίσος με τη μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι η τάση και το ρεύμα παίρνουν συγχρόνως τη μέγιστή τους τιμή και ότι όλη η ισχύς εξόδου του μετατροπέα είναι ίση με την ισχύ που καταναλώνει το φορτίο. Τελευταία έχουν κατασκευαστεί μετατροπείς που έχουν συντελεστή ισχύος 95% που είναι ίσος με αυτόν που έχει το ηλεκτρικό δίκτυο.

Για την εκλογή του μετατροπέα θα πρέπει να προσεχθεί ώστε κατά την λειτουργία του να μην προκαλεί εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αυτά είναι δυνατόν να επηρεάσουν τη λειτουργία συσκευών όπως είναι οι τηλεοράσεις, τα ραδιόφωνα, τα τηλέφωνα και οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές.

Υπάρχει ακόμη και η περίπτωση ο μετατροπέας κατά τη λειτουργία του να προκαλεί θόρυβο που αυξάνεται μάλιστα με το φορτίο. Γι' αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται πρόνοια ώστε ο τύπος του μετατροπέα που θα χρησιμοποιηθεί να είναι όσο το δυνατόν πιο αθόρυβος.

Σοβαρό κίνητρο για την εκλογή του μετατροπέα είναι η ασφάλεια που πρέπει να παρέχει προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Δηλαδή σε περίπτωση βλάβης στο κεντρικό ηλεκτροπαραγωγικό σταθμό ή σε κάποιο σημείο του δικτύου, με συνέπεια τη διακοπή της παροχής του ηλεκτρικού ρεύματος, θα πρέπει οι γραμμές του ηλεκτρικού δικτύου να διατηρούνται ηλεκτρικά νεκρές μέχρι να διορθωθεί η βλάβη από το προσωπικό της αρχής ηλεκτρισμού.

Η παρουσία όμως του φωτοβολταϊκού συστήματος που βρίσκεται σε λειτουργία και είναι ενωμένο με το δίκτυο, θέτει τις γραμμές υπό τάση και μάλιστα υψηλή σε περίπτωση που μεταξύ του φωτοβολταϊκού συστήματος και του δικτύου παρεμβάλλεται μετασχηματιστής υψηλής τάσης. Γι' αυτό ο μετατροπέας θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε μόλις συμβεί βλάβη στο ηλεκτρικό δίκτυο, να σταματά τη λειτουργία του και να διακόπτεται η παροχή του ρεύματος προς το δίκτυο. Στην κατάσταση αυτή θα πρέπει να παραμείνει για όλη τη διάρκεια που οι γραμμές του δικτύου είναι ηλεκτρικά νεκρές.

Επίσης για λόγους ασφαλείας θα πρέπει η εναλλασσόμενη τάση εξόδου του μετατροπέα να τροφοδοτείται στο ηλεκτρικό δίκτυο δια μέσου ενός μετασχηματιστή. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η ηλεκτρική επαφή μεταξύ της συνεχούς τάσης και του ηλεκτρικού δικτύου ώστε σε περίπτωση βλάβης να μπορεί να απομονωθεί η πλευρά της συνεχούς τάσης.

Σήμερα οι περισσότεροι μετατροπείς του είδους αυτού περιέχουν τέτοιο μετασχηματιστή απομόνωσης και οι σχεδιαστές φωτοβολταϊκών συστημάτων πρέπει να διαλέγουν μετατροπέα που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες του συστήματος.

#### **5.4.4 Ρυθμιστές ισχύος**

Ένα άλλο χαρακτηριστικό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το σύστημα ανίχνευσης του σημείου της μέγιστης ισχύος. Είναι ένα αρκετά πολύπλοκο κύκλωμα, του οποίου δεν θα γίνει λεπτομερή ανάλυση, ωστόσο θα πρέπει να είναι γνωστή η λειτουργία του στο σχεδιαστή μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης όταν στοχεύει τη μέγιστη ισχύ εξόδου της συστοιχίας. Σκοπός του είναι η ανίχνευση του μέγιστου σημείου της καμπύλης V-I ώστε να λειτουργήσει η φωτοβολταϊκή γεννήτρια σε αυτό ακριβώς το σημείο, ώστε να έχουμε τη μέγιστη δυνατή απόδοση της γεννήτριας.

Λόγω του αυξημένου κόστους των ρυθμιστών ισχύος, ορισμένες εταιρείες, όπως η STECA και η RESPECT, έχουν ενσωματώσει τις λειτουργίες των ρυθμιστών ισχύος στους ρυθμιστές τάσης, προσφέροντας έτσι μια λύση που συνδυάζει τα χαρακτηριστικά και των δύο ρυθμιστών, ενώ παράλληλα είναι σημαντικά φθηνότεροι.

## 5.5 ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ

### 5.5.1. Οι καταναλώσεις γενικά

Ο όρος καταναλωτής ή φορτίο περιλαμβάνει όλες τις ηλεκτρικές συσκευές του συστήματος που πρέπει να λειτουργήσουν με την ηλεκτρική ενέργεια που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Για να είναι σωστά σχεδιασμένο ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, θα πρέπει η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν όλες οι συσκευές του σε ένα μήνα, να είναι ίση ή μικρότερη από την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχει το φωτοβολταϊκό σύστημα στην ίδια χρονική περίοδο. Ο σωστός σχεδιασμός προϋποθέτει τη γνώση των πιο κάτω χαρακτηριστικών κάθε ηλεκτρικής συσκευής:

#### I. Το είδος της τάσης λειτουργίας της

Αν είναι δηλαδή συνεχής ή εναλλασσόμενη και σε περίπτωση εναλλασσόμενης να είναι γνωστή η συχνότητα για την κανονική λειτουργία της.

#### II. Η τιμή κανονικής τάσης λειτουργίας της

#### III. Η ισχύς που καταναλώνει υπό την κανονική τάση λειτουργίας της

Επειδή τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και η μπαταρία δίνουν συνεχή τάση, για να αποφεύγονται οι απώλειες κατά τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, θα ήταν καλύτερα να χρησιμοποιούν ηλεκτρικές συσκευές που λειτουργούν με συνεχή τάση.

Δυστυχώς με τη μακροχρόνια χρήση του εναλλασσόμενου ρεύματος που δίνουν οι γεννήτριες των συμβατικών ηλεκτροπαραγωγών σταθμών, οι ηλεκτρικές συσκευές που κυκλοφορούν στην αγορά είναι κατασκευασμένες για να λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα. Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται ηλεκτρικές συσκευές όλων των ειδών που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα. Επειδή όμως η ζήτηση είναι μικρή και η χρήση τους περιορισμένη, είναι προς το παρόν πιο ακριβές από τις αντίστοιχες που λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Οι συσκευές που λειτουργούν με χαμηλή τάση είναι μικρότερης απόδοσης από εκείνες που λειτουργούν με υψηλότερη συνεχή τάση. Αυτό συμβαίνει διότι οι πρώτες, για την ίδια ισχύ που καταναλώνουν δίνουν μεγαλύτερο ρεύμα. Αυτό συμβαίνει γιατί η ένταση του ρεύματος είναι ανάλογη της ισχύος και αντιστρόφως ανάλογη της τάσης. Έτσι λόγω της

μεγάλης τιμής του ρεύματος δημιουργούνται και μεγαλύτερες απώλειες στα σύρματα μεταφοράς.

Εάν η ισχύς της συσκευής χαμηλής τάσης είναι μικρή, τα σύρματα σύνδεσης και μεταφοράς του ρεύματος προς τη συσκευή θα είναι κανονικά. Σε περίπτωση όμως που η ισχύς είναι αρκετά μεγάλη και μάλιστα πάνω από 1000 W, τότε το ρεύμα τροφοδότησης γίνεται αρκετά μεγάλο και χρειάζονται πολύ πιο χοντρά σύρματα για να ελαττωθούν οι απώλειες. Με δεδομένη ισχύ όσο μικρότερη είναι η τάση λειτουργίας της συσκευής τόσο μεγαλύτερο θα είναι το ρεύμα που θα περάσει και τόσο πιο χοντρά σύρματα τροφοδότησης θα χρειαστούν.

Η εναλλασσόμενη τάση έχει το πλεονέκτημα ότι, με τη βοήθεια των μετασχηματιστών, μπορεί να αυξηθεί, με συνέπεια να ελαττωθεί το ρεύμα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και έτσι να περιοριστεί και το πάχος των χάλκινων συρμάτων. Ελάττωση του πάχους όμως των συρμάτων σημαίνει μικρές απώλειες καθώς και μεγάλη εξοικονόμηση σε χαλκό.

Φυσικά ο μετατροπέας συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο που παρεμβάλλεται, έχει τις δικές του απώλειες που και αυτές περιορίζονται όσο μεγαλύτερη είναι η συνεχής τάση που δίνουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και η μπαταρία.

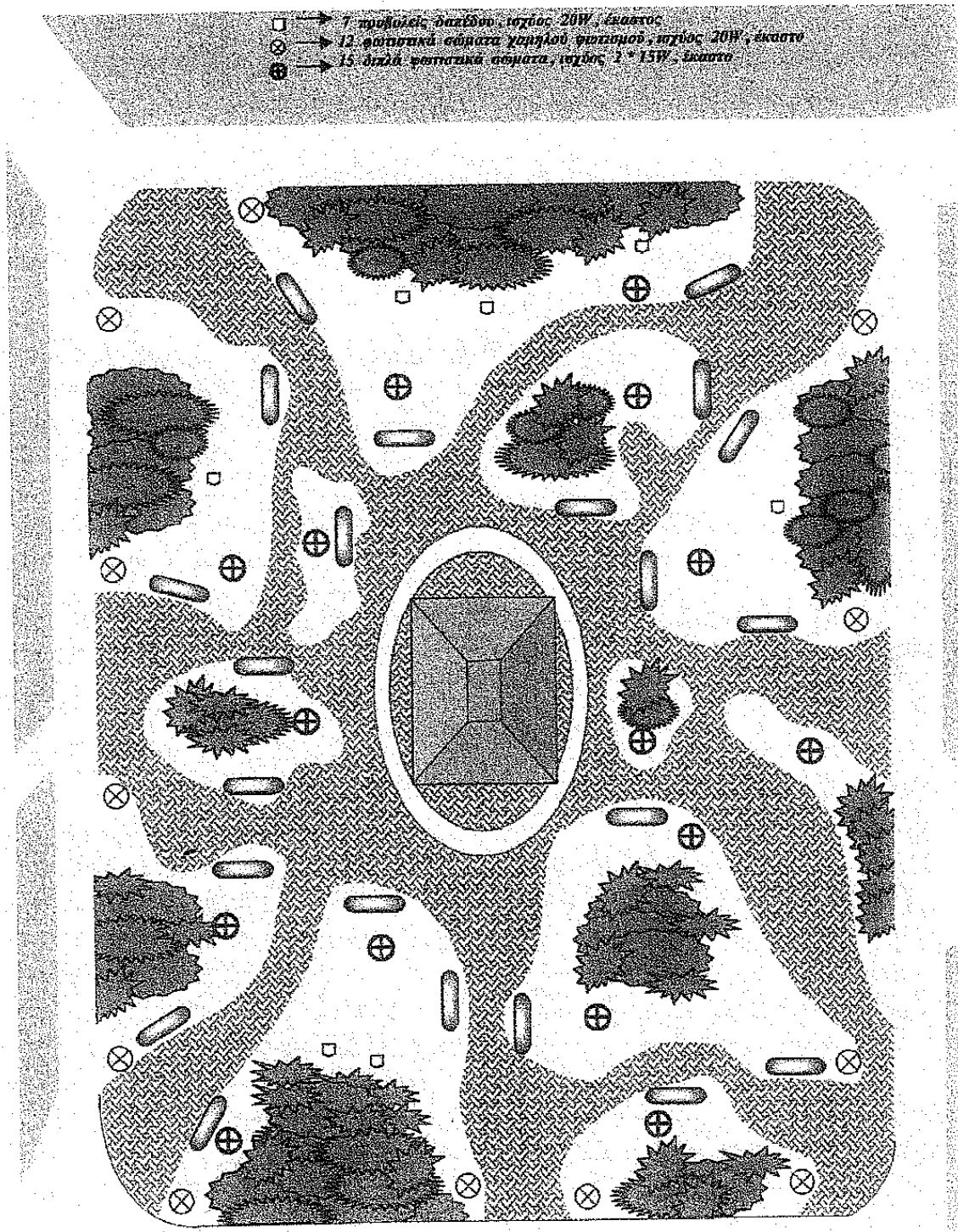
Για να υπολογισθεί η μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε μια οικιακή ηλεκτρική εγκατάσταση, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ισχύς κάθε συσκευής και οι ώρες λειτουργίας της κατά τη διάρκεια του μήνα.

6. ΜΕΛΤΗ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΠΛΑΤΕΙΑΣ

ΜΕ ΧΡΗΣΗ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η μελέτη σχεδιασμού ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προς ικανοποίηση των αναγκών φωτισμού μιας πλατείας, που θα αναπτυχθεί παρακάτω, αναφέρεται για την κεντρική πλατεία του δήμου Ιλίου Αττικής.

Το σχεδιάγραμμα της πλατείας, με προσημειωμένες τις θέσεις των φωτιστικών σωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν, φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:





Η μελέτη θα βασιστεί, κατά σειρά, στα εξής βήματα:

1. Επιλογή της κρίσιμης χρονικής περιόδου για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.
2. Εκτίμηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης που καλείται να ικανοποιήσει το σύστημα.
3. Υπολογισμός της μέσης διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας στην υπόψη τοποθεσία, στην επιλεγμένη χρονική περίοδο και για την βέλτιστη κλίση των συλλεκτών.
4. Υπολογισμός της απαιτούμενης συνολικής επιφάνειας ή της συνολικής ισχύος αιχμής των φωτοβολταϊκών συλλεκτών και εύρεση του αντίστοιχου πλήθους και της κατάλληλης συνδεσμολογίας των τυποποιημένων φωτοβολταϊκών πλαισίων.
5. 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.
6. Υπόδειξη των διαφόρων αναγκαίων διατάξεων ρύθμισης και ελέγχου.
7. Υπόδειξη της ισχύος της βοηθητικής ενεργειακής πηγής, για την ικανοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος και την αντιμετώπιση ανώμαλων συνθηκών.

Οπότε έχουμε:

### 1. Η χρονική περίοδος

Το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί αξιόπιστα σε όλη τη διάρκεια του έτους, ώστε ο χώρος της πλατείας να φωτίζεται επαρκώς, εξυπηρετώντας έτσι τις ανάγκες των κατοίκων της περιοχής.

Σαν δεδομένο παίρνουμε ότι τα φωτιστικά σώματα της πλατείας θα πρέπει να λειτουργούν για 10 ώρες, κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα μεταξύ των μηνών Απριλίου και Σεπτεμβρίου.

Επίσης θα πρέπει να λειτουργούν για χρονικό διάστημα 14 ωρών, κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου, που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα μεταξύ των μηνών Οκτωβρίου και Μαρτίου.

### 2. Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις

Από το σχεδιάγραμμα της πλατείας παρατηρούμε πως ο φωτισμός της γίνεται από τριών ειδών φωτιστικά σώματα, 15 φωτιστικά σώματα, 12 φωτιστικά σώματα χαμηλού φωτισμού και 7 προβολείς δαπέδου.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών λαμπτήρων φθορισμού, (έχουν την ίδια φωτεινότητα με τους κοινούς λαμπτήρες πυρακτώσεως, μεγάλη οικονομία ενέργειας και οχταπλάσια διάρκεια ζωής ενώ διατίθενται και για να λειτουργήσουν στο συνεχές ρεύμα), εκλέγουμε ηλεκτρονικούς λαμπτήρες φθορισμού, τάσεως λειτουργίας 220V, των 15W, για κάθε φωτιστικό σώμα του πρώτου τύπου, και 20W για κάθε φωτιστικό του δεύτερου και του τρίτου τύπου, αντίστοιχα.

Οπότε συνολική ισχύς των φωτιστικών σωμάτων της πλατείας είναι:

$$P_{ολ} = P_1 + P_2 + P_3 = 450 + 240 + 140 = 830 \text{ W} = 0.83 \text{ kW}$$

Όπου:

$$P_1 = 15 * 2 * 15 = 450 \text{ W}$$

$$P_2 = 12 * 20 = 240 \text{ W}$$

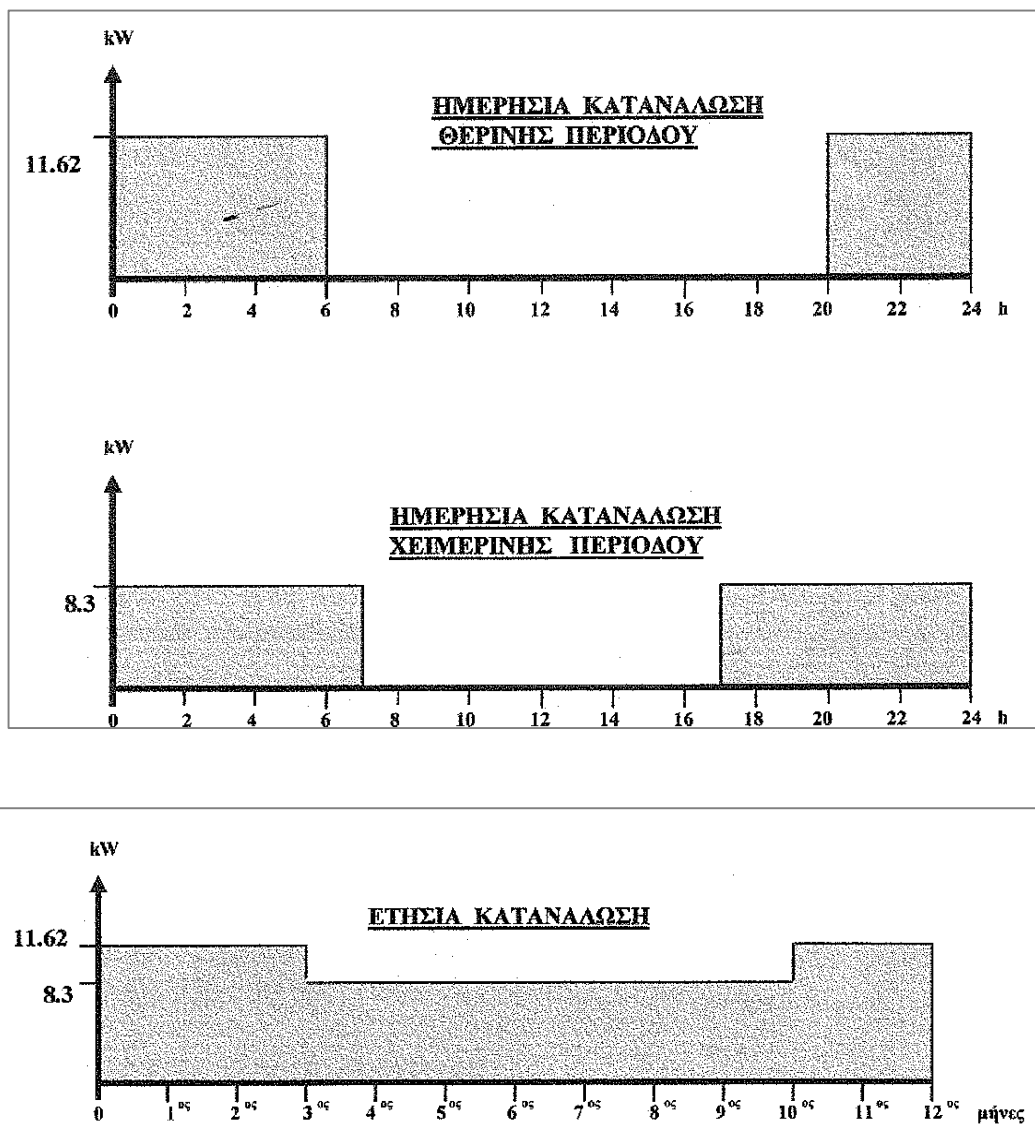
$$P_3 = 7 * 20 = 140 \text{ W}$$

Επειδή ο φωτισμός της πλατείας θα γίνεται για 10 ώρες τη θερινή περίοδο και για 14 ώρες τη χειμερινή, η μέση ημερήσια κατανάλωση για τις δύο αυτές χρονικές περιόδους θα είναι:

$$\approx \text{Χειμερινή περίοδος: } 0.83 \text{ kW} * 14\text{h} = 11.62 \text{ kWh}$$

$$\approx \text{Θερινή περίοδος: } 0.83 \text{ kW} * 10\text{h} = 8.3 \text{ kWh}$$

Η απεικόνιση της ηλεκτρικής κατανάλωσης που καλείται να καλύψει το σύστημα φαίνεται στα ακόλουθα ιστογράμματα:



### 3. Η ηλιακή ενέργεια

Η πλατεία που θα εγκατασταθεί το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι στο δήμο Ιλίου, στην Αθήνα. Γνωρίζοντας τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, βάσει των μετεωρολογικών στοιχείων που περιέχονται στους πίνακες Β\*, που επικρατούν στην Αθήνα, υπολογίζουμε την μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/d), για διαφορετικές κλίσεις του συλλέκτη και τη μέση θερμοκρασία του αέρα (°C) στη διάρκεια των φωτεινών ωρών της ημέρας\*\*. Τα στοιχεία αυτά φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα 6.1:

Πίνακας 6.1 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

	Κλίση 30 <sup>0</sup>	Κλίση 45 <sup>0</sup>	Κλίση 60 <sup>0</sup>	Θερμοκρασία
Ιανουάριος	2.8	3.07	3.13	10.5
Φεβρουάριος	3.19	3.36	3.32	11.6
Μάρτιος	4.16	4.13	3.94	12.9
Απρίλιος	4.9	4.65	4.16	17.1
Μάιος	5.77	5.23	4.45	21.9
Ιούνιος	5.94	5.26	4.36	26.6
Ιούλιος	6.52	5.77	4.84	29.3
Αύγουστος	6.55	6.07	5.29	29.2
Σεπτέμβριος	5.48	5.39	5	25.3
Οκτώβριος	4.39	4.58	4.52	20
Νοέμβριος	3.39	3.71	3.81	16.3
Δεκέμβριος	2.74	3.03	3.13	12.5

Δεν θεωρείται σκόπιμο να εξεταστούν και εμπεριέχονται στον πίνακα και κλίσεις μικρότερες από 30<sup>0</sup>, διότι στις περιπτώσεις αυτές η συγκράτηση της σκόνης πάνω στον συλλέκτη είναι σημαντική, με αποτέλεσμα την μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τους συλλέκτες.

### 4. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια

#### 4.1 Η κλίση των συλλεκτών

Παρατηρούμε στον πίνακα 6.1, ότι η κλίση των 30<sup>0</sup> πλεονεκτεί επί 7 μήνες (Μάρτιος, Απρίλιος, Μάιος, Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος και Σεπτέμβριος), η κλίση των 60<sup>0</sup> πλεονεκτεί επί 3 μήνες (Ιανουάριος, Νοέμβριος και Δεκέμβριος), ενώ η κλίση των 45<sup>0</sup> πλεονεκτεί επί 2 μόνο μήνες (Φεβρουάριος και Οκτώβρης), και το πλεονέκτημά του είναι ασήμαντο σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές της κλίσης των 60<sup>0</sup> τους ίδιους μήνες.

Οι τιμές στους πίνακες Β1-Β5, αναφέρονται σε μηνιαία και ετήσια ηλιακή ακτινοβολία οπότε για τη συμπλήρωση του πίνακα 6.1 θα πρέπει οι τιμές αυτές να μετατραπούν σε ημερήσιες.

\*\* Οι τιμές για τη μέση θερμοκρασία του αέρα (°C) στη διάρκεια των φωτεινών ωρών της ημέρας βρίσκονται από τον πίνακα Γ, στο τέλος των σημειώσεων

Επίσης, με την ίδια λογική, το πλεονέκτημα των κλίσεων των  $30^0$  και  $60^0$  σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της κλίσης των  $45^0$  μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντο.

Οπότε, λόγω των μικρών αυτών διαφορών στις τιμές μεταξύ των τριών κλίσεων, δημιουργούνται δύο εκδοχές:

✓ **Εκδοχή πρώτη:**

**Επιλέγουμε την κλίση των  $30^0$  για τους μήνες από Μάρτιο έως Σεπτέμβριο, και την κλίση των  $60^0$  για τους μήνες Οκτώβρη μέχρι Φεβρουάριο.**

Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη μιας κατάλληλης κατασκευής στήριξης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, πχ με αρθρωτά στηρίγματα, που να είναι εύκολη, με έναν απλό χειροκίνητο μηχανισμό, η αλλαγή από την μια κλίση στην άλλη, δύο φορές τον χρόνο.

Επίσης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε φακούς Fresnel, είτε ακόμα περιστροφικές συστοιχίες.

✓ **Εκδοχή δεύτερη:**

**Επιλέγουμε μια κλίση, αυτή των  $45^0$  για όλο το έτος.**

Η εκδοχή αυτή δεν χρειάζεται ιδιαίτερες κατασκευές καθώς οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες θα παραμένουν σταθεροί.

**Τα κυριότερα κριτήρια για την επιλογή μιας εκ των δύο εκδοχών θα πρέπει να είναι το κόστος, η έκταση που θα καταλαμβάνουν οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες σε κάθε περίπτωση και κατ' επέκταση η απόδοση του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη ότι το σύστημα θα χρησιμοποιηθεί μόνο για την τροφοδότηση των φωτιστικών σωμάτων της πλατείας, η ποιότητα φωτισμού της οποίας δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένη.**

Συνοψίζοντας, οι σταθερές συστοιχίες, οι οποίες ικανοποιούν την δεύτερη εκδοχή, έχουν το πλεονέκτημα των αμετακίνητων τμημάτων, με ότι αυτό συνεπάγεται από πλευράς καλής λειτουργίας λόγω απουσίας κινητών μερών, συντήρησης κλπ, και του χαμηλού βάρους, και το μειονέκτημα ότι δεν εκτίθεται 100% στις ηλιακές ακτίνες. Ωστόσο το πλεονέκτημα των σταθερών συστοιχιών δεν τις κάνει λιγότερο δαπανηρές, την στιγμή κατά την οποία χρειάζονται περισσότερα στοιχεία για να παράγουν το ίδιο ρεύμα με κάποιο άλλο σύστημα, το οποίο ακολουθεί πάντα τον ήλιο.

Χαμηλό, για τις επιδόσεις τους, κόστος με ταυτόχρονη ικανοποιητική απόδοση οπτικής συγκέντρωσης (85-90%), η οποία βοηθά στην αύξηση της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, συνδυάζουν οι φακοί Fresnel, οι οποίοι μαζί με τις περιστροφικές συστοιχίες (αυξημένο κόστος αλλά και απόδοση) ικανοποιούν την πρώτη εκδοχή.

Από άποψη απαιτούμενης έκτασης για την τοποθέτησή τους, λογικά, οι σταθερές συστοιχίες θα καταλαμβάνουν λιγότερη έκταση, ενώ η δημιουργία μιας κατάλληλης συσκευής στήριξης των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, πχ με αρθρωτά στηρίγματα, που να είναι εύκολη, με έναν απλό χειροκίνητο μηχανισμό, η αλλαγή από την μία κλίση στην άλλη, δύο φορές τον χρόνο, είναι εκτός από αρκετά πολύπλοκη, και

ιδιαίτερα δαπανηρή και συνίσταται κυρίως για επαγγελματικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων.

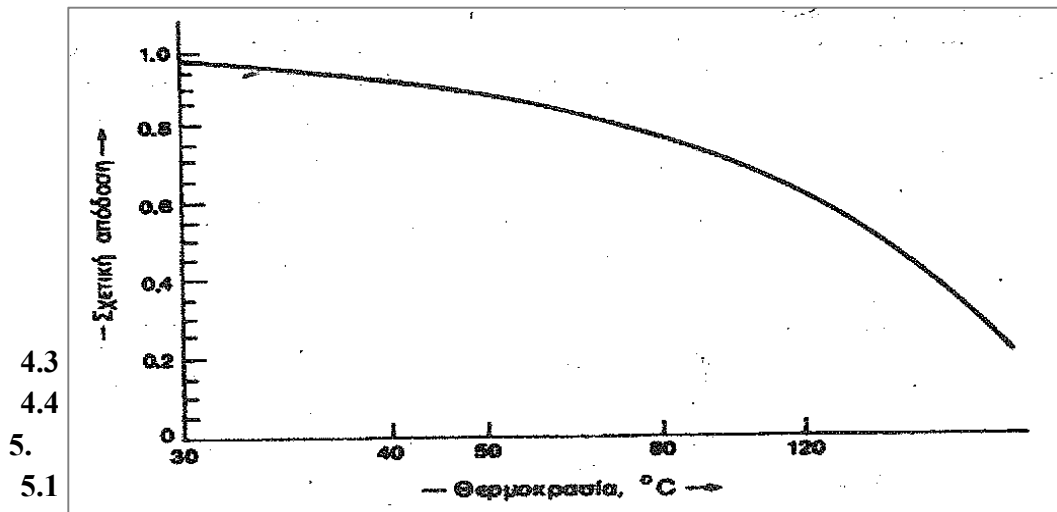
Λαμβάνοντας υπόψη όλες αυτές τις παραμέτρους **επιλέγουμε την εκδοχή της μιας κλίσης το χρόνο, χρησιμοποιώντας σταθερές συστοιχίες οι οποίες θα τοποθετηθούν σε κλίση 45°.**

#### 4.2 Η απαιτούμενη ισχύς αιχμής:

Από τον πίνακα 6.1, παρατηρούμε ότι η μικρότερη μέση τιμή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας έχει για τους χειμερινούς μήνες (Οκτώβριος-Μάρτιος), ο Δεκέμβριος με 3.03kWh και για τους θερινούς μήνες (Απρίλιος-Σεπτέμβριος), ο Απρίλιος με 4.65kWh.

Η μέση θερμοκρασία του αέρα στις φωτεινές ώρες της ημέρας είναι 12.5°C για τον Δεκέμβριο, και 17.1°C τον Απρίλιο. **Δεχόμενοι ότι η θερμοκρασία των ηλιακών στοιχείων θα είναι περίπου 30°C περισσότερο καταλήγουμε στους 42.5°C για τον Δεκέμβριο, και στους 47°C για τον Απρίλιο.**

Από το διάγραμμα του σχήματος 6.2 βρίσκουμε τις αντίστοιχες τιμές του συντελεστή θερμοκρασιακής διόρθωσης 0.9 και 0.88 για Δεκέμβριο και Απρίλιο αντίστοιχα.



Σχήμα 6.2 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.

Ως προς τη ρύπανση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, προβλέπουμε ότι λόγω του νέφους και της σκόνη, θα γίνεται περιοδική επιθεώρηση και καθαρισμός της επιφάνειάς τους, και παίρνουμε ως δεδομένο ότι **ο συντελεστής καθαρότητας θα είναι  $\sigma_c = 0.9$** , για όλες τις εποχές.

Χρησιμοποιώντας όλα αυτά τα δεδομένα υπολογίζουμε την ιδανικά απαιτούμενη ισχύ αιχμής της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης:

$$P_a \text{ (kW}_p\text{)} = [E \text{ (kWh/d)} * 1 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{**}] / \Pi \text{ (kWh/m}^2 \text{ d)} * \sigma_\theta * \sigma_p$$

η οποία είναι για τον Απρίλιο, δηλαδή για τους θερινούς μήνες:

$$P_{a\theta} = 8.3 * 1 (4.65 * 0.88 * 0.9) = 2.25 \text{ kW}_p$$

και για το Δεκέμβριο, δηλαδή για τους χειμερινούς μήνες, είναι:

$$P_{ax} = 11.62 * 1 (3.03 * 0.9 * 0.9) = 4.74 \text{ kW}_p$$

που την επιλέγουμε ως μεγαλύτερη απ'όλες.

Επιλέγουμε συσσωρευτές<sup>##</sup> (ERGON) με συντελεστή απόδοσης 90% μετατροπέα D.C./A.C. <sup>§§</sup> (TRACE, τύπος SW3048E) με συντελεστή απόδοσης 90%, και υποθέτοντας ότι από τους αγωγούς έχουμε απώλειες της τάξεως των 5%, οπότε καταλήγουμε σε συνολικό συντελεστή απόδοσης:

$$A = 0.9 * 0.9 * 0.95 = 0.77$$

Επομένως η ελάχιστη ισχύς της φωτοβολταϊκής γεννήτριας πρέπει να είναι:

$$P' = P_{ax} / a = 4.74 / 0.77 = 6.16 \text{ kW}_p = 6.2 \text{ kW}_p$$

#### 4.3 Το πλήθος και η οργάνωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων:

Τα διαθέσιμα φωτοβολταϊκά πλαίσια<sup>\*\*\*</sup> (KYOCERA KC 120) έχουν ισχύ αιχμής 120W<sub>p</sub> και παράγουν ονομαστική τάση 12V. Το πλήθος τους για την συγκρότηση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, συνολικής ισχύος αιχμής 6200 W<sub>p</sub>, θα είναι:

$$6200 / 120 = 51.6 = 52 \Phi / B \text{ πλαίσια}$$

\*\* (1kW/m<sup>2</sup>): Είναι η ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος ενός ηλίου την οποία απορροφά το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ώστε να παραχθεί η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς, που αντιστοιχεί στην P<sub>a</sub>.

## Στο τέλος των σημειώσεων υπάρχουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιήσουμε.

§§ Στο τέλος των σημειώσεων υπάρχουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα DC-AC, ο οποίος περιλαμβάνει και τις ιδιότητες ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος, δηλαδή την σταθεροποίηση και μετατροπή της ασταθούς τάσης της γεννήτριας, σε ευνοϊκή για την φόρτιση των συσσωρευτών τάσης, που θα χρησιμοποιήσουμε.

\*\*\* Στο τέλος των σημειώσεων υπάρχουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά (ηλεκτρικά και γεωμετρικά) των φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα χρησιμοποιήσουμε

Αν ως τάση εξόδου της γεννήτριας θεωρήσουμε ότι θα έχουμε 48V, βλέπουμε ότι ο κάθε κλάδος στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες θα πρέπει να αποτελείται από:

$$52 / 4 = 13 \text{ παράλληλους κλάδους}$$

Οπότε η φωτοβολταϊκή γεννήτρια θα δίνει τάση:

$$4 * 12 = 48 \text{ V}$$

και το συνολικό πλήθος των φωτοβολταϊκών πλαισίων για τον σχηματισμό των 13 παράλληλων κλάδων θα είναι:

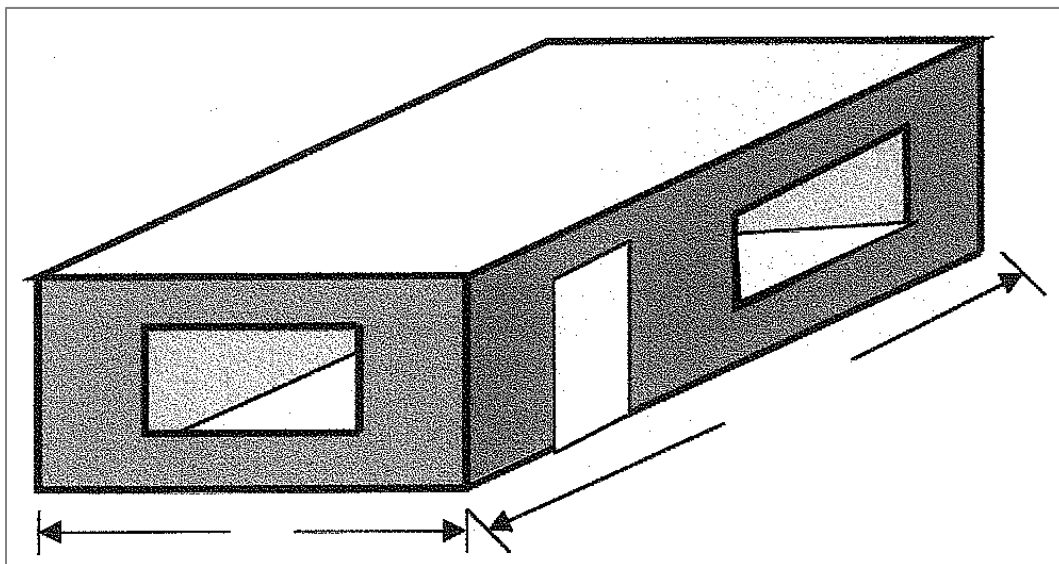
$$13 * 4 = 52 \Phi / \text{B πλαίσια}$$

που ανεβάσει την ονομαστική αιχμή της φωτοβολταϊκής γεννήτριας σε:

$$P' = 52 * 120 = 6240 \text{ W}_p = 6.24 \text{ kW}_p$$

#### 4.4 Η έκταση του φωτοβολταϊκού πάρκου:

Δεδομένου ότι το κτίριο, στην στέγη του οποίου θα τοποθετηθούν οι συλλέκτες είναι διαστάσεων 13m \* 7m, θα πρέπει να διερευνηθεί εάν τα 54 παράλληλα συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία, μπορούν να τοποθετηθούν πάνω στην επιφάνεια των 91m<sup>2</sup> που σχηματίζει η στέγη του κτιρίου.



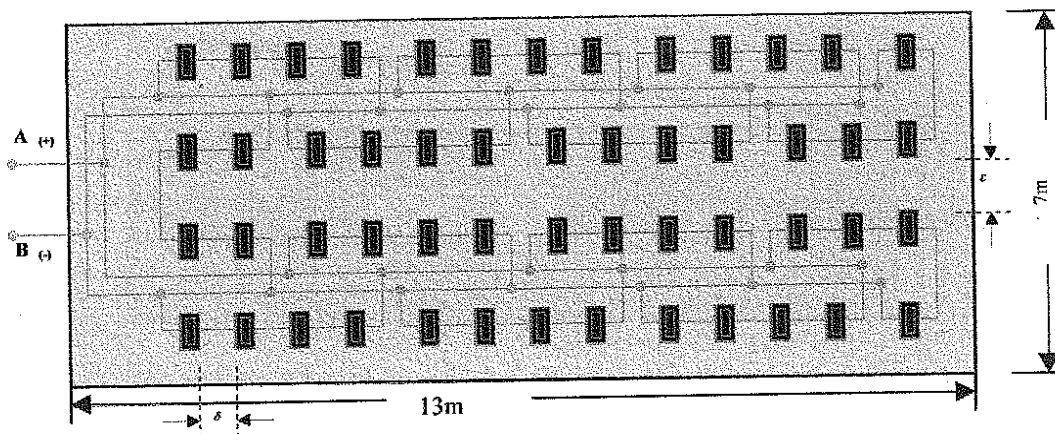
Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα χρησιμοποιήσουμε έχουν πλάτος  $y = 65,2\text{cm}$  (το ίδιο πλάτος θα έχουν και τα στηρίγματά τους) και μήκος  $x = 142,5\text{cm}$ .

Εάν τοποθετούσαμε τα 52 φωτοβολταϊκά στοιχεία το ένα δίπλα στο άλλο το πλάτος της έκτασης που θα καταλάμβαναν θα ισούταν με:  $Y_{ολ} = 0.652 * 52 = 33.9\text{m} (>> 3\text{m})$ .

Οπότε προφανώς χρειάζεται να γίνει μια ανακατανομή της διάταξης των 52 φωτοβολταϊκών πλαισίων, ώστε να «χωρέσουν» στην επιφάνεια του κτιρίου.

Έτσι η κατανομή των 52 φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνεται ως εξής:

Χωρίζουμε τους 13 παράλληλους κλάδους των 4 φωτοβολταϊκών πλαισίων, έκαστος, σε τέσσερις σειρές αποτελούμενες από 14 φωτοβολταϊκά πλαίσια η πρώτη και η τελευταία σειρά και από 13 οι δύο ενδιάμεσες σειρές. Η μεταξύ των πλαισίων σύνδεση ώστε να δημιουργηθούν οι 18 παράλληλοι κλάδοι των 3 πλαισίων, έκαστος, θα γίνει όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Με αυτή την κατανομή το ολικό πλάτος της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι:

$$Y_{ολ} = 0.652 * 13 = 8,5m (<13 m)$$

Οπότε έχουμε τη δυνατότητα να αφήσουμε ένα κενό δ της τάξης των 32cm μεταξύ των πλαισίων ( $14 * 0.32 = 4.48m + 8.5m = 12.98m$ ).

Το αντίστοιχο ολικό μήκος της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι:

$$X_{ολ} = 1.425 * 4 = 5.7m (<7m)$$

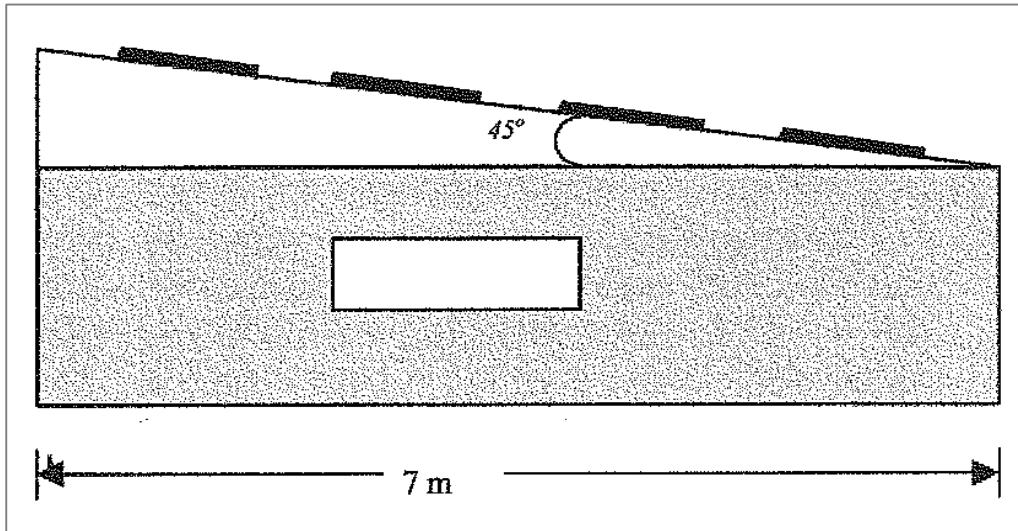
Οπότε και εδώ έχουμε την δυνατότητα να αφήσουμε ένα κενό ε της τάξης των 25cm μεταξύ των πλαισίων ( $5 * 0.25 = 1.25m + 5.7m = 6.95m = 7m$ ).

Με αυτόν τον τρόπο εκμεταλλευόμαστε το 100% της επιφάνειας της στέγης του κτιρίου και δημιουργούμε διαδρόμους για καλύτερη πρόσβαση στα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε περίπτωση βλάβης, αντικατάστασης ή συντήρησης.

Σε περίπτωση που δεν θέλουμε να εκμεταλλευτούμε το 100% της επιφάνειας, μηδενίζουμε τις μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων αποστάσεις, οπότε η επιφάνεια που θα καλύπτουν τα πλαίσια θα είναι  $8.5 * 5.7 = 48.45m^2$  που αντιστοιχεί στο 40% της επιφάνειας της στέγης του κτιρίου.

Η εξασφάλιση της κλίσης των  $45^\circ$  των συλλεκτών, δεδομένου ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα τοποθετηθούν στην στέγη του κτιρίου, προϋποθέτει την ύπαρξη μιας ανάλογης κλίσης επιφάνειας, η οποία λογικά θα είναι μια κεραμοσκεπή με κλίση  $45^\circ$ .





Σχήμα 6.5 Πλάγια όψη του κτιρίου. Η κλίση της σκεπής, πάνω στην οποία θα τοποθετηθούν οι συλλέκτες, θα πρέπει, για να εξασφαλιστεί η μέγιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, να είναι υπό κλίση  $45^\circ$ .

## 5. Οι συσσωρευτές:

Οι συσσωρευτές που θα χρησιμοποιήσουμε, θα έχουν τα εξής ηλεκτρικά χαρακτηριστικά:

- ≈ Τάση εξόδου 2V (τάση εξόδου συστοιχίας 48V).
- ≈ Μέγιστο βαθμό εκφόρτισης 80%
- ≈ Συντελεστής απόδοσης 90-95%

Θεωρούμε ότι οι συσσωρευτές θα πρέπει να μπορούν να αποθηκεύσουν επαρκή ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψουν την κατανάλωση 3 διαδοχικών χειμερινών ή 3 διαδοχικών θερινών ημερών, το οποίο αντιστοιχεί σε:

$$E_{\gamma} = 3 * 11.62 = 34.86 \text{ kWh}$$

Και

$$E_0 = 3 * 8.3 = 24.9 \text{ kWh}$$

λαμβάνοντας υπόψη, όλες αυτές τις παραμέτρους, και δεδομένου ότι η ισχύς της κατανάλωσής μας είναι 830W, η ελάχιστη απαιτούμενη χωρητικότητα των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιήσουμε, θα πρέπει να είναι:

$$Q = \frac{P * 24 * \mu}{\beta * V} = \frac{830 * 24 * 3}{0.8 * 48} = 1556.25 \text{ Ah} = 1600 \text{ Ah}$$

Η ισχύς που μπορούν να δώσουν οι συσσωρευτές, επί το παραπάνω μέγιστο διάστημα των 3 διαδοχικών ημερών, θα είναι:

$$P = \frac{\beta * Q * V}{24 * \mu} = \frac{0.8 * 1600 * 48}{24 * 3} = 853.3 \text{ W}$$

Το οποίο αντιστοιχεί σε ημερήσια κατανάλωση:

$$E = \frac{Q * \alpha * \beta * V}{\mu} = \frac{1600 * 0.9 * 0.8 * 48}{24 * 3} = 18.4 \text{ kWh}$$

Οπότε, χρησιμοποιώντας συσσωρευτές συνολικής χωρητικότητας 1600 Ah, εξασφαλίζουμε 853.3 W ισχύ και 55 kWh ημερήσιας κατανάλωσης, για την τροφοδότηση του συστήματος επί 3 διαδοχικές ημέρες. Οι τιμές αυτές καλύπτουν τις ελάχιστες απαιτήσεις του συστήματος (830 W και 36.86 kWh).

Οι συσσωρευτές που θα χρησιμοποιήσουμε, είναι της εταιρείας ERGON, τύπος 16 OPzS 1600, θα έχουν τάξη εξόδου 2V και χωρητικότητα 1600 Ah. Για να εξασφαλίσουμε την επιθυμητή τάση εξόδου των 48V, θα συνδέσουμε παράλληλα 24, ίδιας χωρητικότητας, συσσωρευτές ( $24 * 2 = 48V$ ).

Λαμβάνοντας υπόψη, ότι η έκταση που καταλαμβάνει ο κάθε συσσωρευτής  $0,36 * 0,21 = 0,075m^2$ , η απαραίτητη για την τοποθέτηση των 24 συσσωρευτών ελάχιστη έκταση είναι  $24 * 0,075 = 18m^2$ .

## 6. Διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου

Για την ορθή φόρτιση και έλεγχο των συσσωρευτών καθώς και για την προστασία τους από το φαινόμενο της υπερφόρτισης και της βαθιάς εκφόρτισης, το σύστημα θα έχει ρυθμιστές τάσης γης γερμανικής εταιρείας RESPECT<sup>###</sup> (μοντέλο RS120), οι οποίοι περιλαμβάνουν και τις ιδιότητες ενός ρυθμιστή ισχύος. Σκοπός των ρυθμιστών είναι ο καθορισμός του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας, ο έλεγχος της διαδικασίας φόρτισης καθώς και το άνοιγμα και κλείσιμο του συστήματος με αποτέλεσμα την παράταση ζωής της μπαταρίας. Τέλος έχει την δυνατότητα να αποσυνδέει το φορτίο κατά τη διάρκεια της ημέρας και να το συνδέει κατά τη διάρκεια της νύχτας.

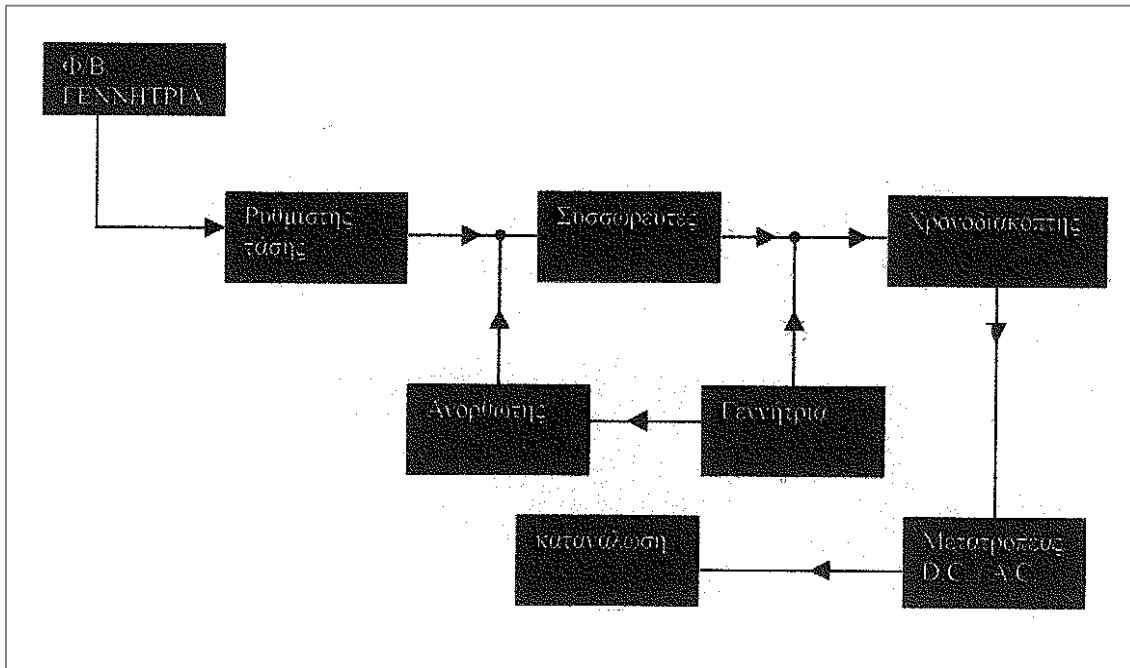
Ο ρυθμιστής που θα χρησιμοποιήσουμε έχει τάση εισόδου και εξόδου 48V, ενώ η αντίστοιχη τιμή της έντασης του ρεύματος εισόδου και εξόδου είναι 120A. Επίσης το σύστημα περιλαμβάνει και μετατροπέα D.C./A.C.<sup>\$\$\$</sup> της εταιρείας TRACE, τύπος SW3048E (ονομαστικής ισχύος εξόδου 3000W, ονομαστικής τάσης εισόδου 48V και εξόδου 220V, 50HZ), σκοπός του οποίου σε γενικές γραμμές είναι να περιλαμβάνει την ασταθή τάση της μπαταρίας, να την σταθεροποιεί και να την μετατρέπει στην επιθυμητή εναλλασσόμενη τάση των 220V. Άλλες λειτουργίες του μετατροπέα είναι η προστασία από υπερφόρτωση και βραχυκύκλωμα στην έξοδο καθώς και η προστασία από υψηλή και χαμηλή τάση μπαταρίας ρυθμιζόμενης ευαισθησίας.

<sup>###</sup> Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ρυθμιστή φαίνονται στο τέλος των σημειώσεων

<sup>\$\$\$</sup> Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετατροπέα φαίνονται στο τέλος των σημειώσεων

Τέλος θα χρησιμοποιήσουμε έναν χρονοδιακόπτη-φωτοδιακόπτη, ρυθμιζόμενο ανά τέταρτο, για την αυτόματη ενεργοποίηση-απενεργοποίηση των φωτιστικών σωμάτων.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η διάταξη των ηλεκτρονικών ισχύος του συστήματος:



## 7. Βοηθητική πηγή ενέργειας

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.

Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε μια γεννήτρια πετρελαίου, η οποία θα μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα και παράλληλα με τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια.

Η ισχύς της ηλεκτρογεννήτριας, θα πρέπει να επαρκεί για την ηλεκτροδότηση των καταναλώσεων, καθώς και για τη φόρτιση των συσσωρευτών του συστήματος, διαμέσου ενός ανορθωτή, μέσα σε ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, πχ σε 24 ώρες.

Για την ικανοποίηση της δεύτερης απαίτησης χρειάζεται:

$$P = \frac{\beta}{24} \cdot \frac{Q}{24} \cdot V = \frac{0.8}{24} \cdot \frac{1557}{24} \cdot 48 = 2491 \text{ W} = 2.49 \text{ kW}$$

Οπότε, η βοηθητική γεννήτρια θα πρέπει να έχει τουλάχιστον ισχύ:

$$0.83 + 2.49 = 3.3212 \text{ Kw}$$

Την οποία στρογγυλεύουμε στα 3.5 kW

## 8. Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος

Στον πίνακα που ακολουθεί έχουν συγκεντρωθεί τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος:

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ισχύς αιχμής της Φ / Β γεννήτριας	6.24 kWp
Πλήθος Φ / Β πλαίσίων , ισχύος αιχμής 120 kWp	52
Κλίση των συλλεκτών	45°
Τάση εξόδου της Φ/Β γεννήτριας	48 V
Χωρητικότητα αποθήκευσης των συσσωρευτών	34.86 kWh
Ονομαστική χωρητικότητα συσσωρευτών	1600 Ah
Τάση εξόδου των συσσωρευτών	48 V
Ισχύς των ρυθμιστών τάσης	6000 W
Ισχύς των μετατροπέων D.C. / A.C.	3000 W
Ισχύς της βοηθητικής γεννήτριας	3500 W
Εμβαδόν της επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι Φ / Β συστοιχίες	48.45 m <sup>2</sup>

Τέλος από τις παραδοχές που κάναμε για τους υπολογισμούς που προηγήθηκαν, μπορούμε να διατυπώσουμε ορισμένες οδηγίες λειτουργίας και συντήρησης για την καλή και αποδοτική λειτουργία του συστήματος:

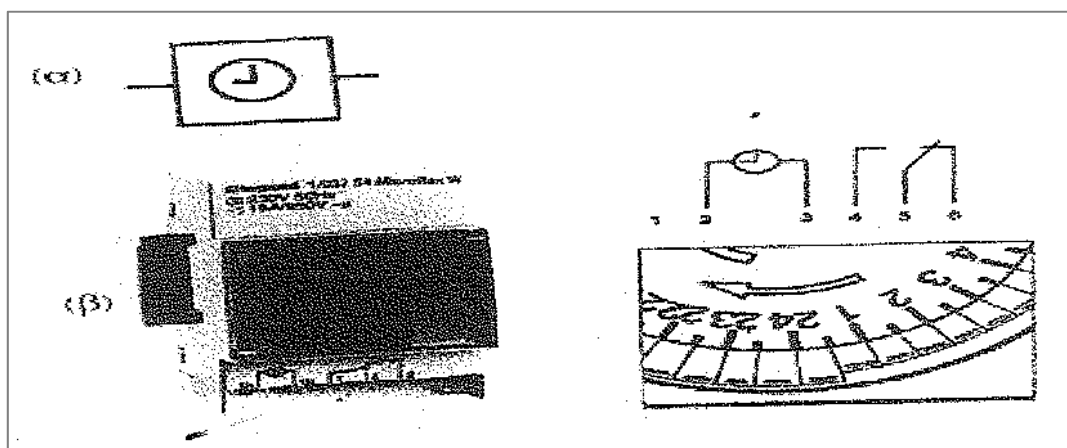
- ≈ Καθαρισμός των επιφανειών των συλλεκτών ανά δίμηνο
- ≈ Έλεγχος και ενδεχόμενη συμπλήρωση της στάθμης του ηλεκτρολύτη στους συσσωρευτές κάθε τρίμηνο
- ≈ Δοκιμαστική λειτουργία της βοηθητικής γεννήτριας κάθε δεκαπενθήμερο

7. ΧΡΟΝΟΔΙΑΚΟΠΤΕΣ /

ΩΡΟΛΟΓΙΑΚΟΙ ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ

Ένα από τους πιο λειτουργικούς και παράλληλα ιδανικός για χρήση φωτισμού αυτοματισμός είναι ο χρονοδιακόπτης. Την δυνατότητα που μας παρέχει για προγραμματισμό, είτε αυτός είναι ο πιο απλός 24ωρος, είτε είναι πιο σύνθετος, εκμεταλλευόμαστε ώστε η διαδικασία λειτουργίας-διακοπής λειτουργίας του συστήματός μας να γίνεται αυτόματα, σύμφωνα με τις επιλογές μας. Ουσιαστικά οι χρονοδιακόπτες χρησιμεύουν για να δίνουν αυτόματα εντολή λειτουργίας ή διακοπής του συστήματός μας, σε ορισμένες χρονικές στιγμές, που εμείς καθορίζουμε.

Η λειτουργία τους βασίζεται στην ιδιότητα των σύγχρονων κινητήρων να περιστρέφονται με σταθερό αριθμό στροφών, όταν η συχνότητα του δικτύου παραμένει σταθερή. Οι χρονοδιακόπτες λειτουργούν ένα μικρό σύγχρονο κινητήρα. Έχουν ένα περιστρεφόμενο δίσκο με χρονικές υποδιαιρέσεις. Ο χρόνος μιας ολόκληρης περιστροφής του δίσκου είναι σταθερός και αποτελεί τη διάρκεια του χρονικού προγράμματος. Το πρόγραμμα επαναλαμβάνεται συνεχώς. Επάνω στον δίσκο τοποθετούνται ακίδες (ή καβαλάρηδες) στις επιθυμητές θέσεις, ώστε να αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές ανάματος και σβήσιματος. Οι ακίδες στερεώνονται επάνω στο δίσκο με μικρές βίδες. Οι ακίδες χρησιμοποιούνται κατά ζεύγη. Η μια δηλαδή καθορίζει το άναμμα (λειτουργία) και η άλλη το σβήσιμο (διακοπή). Στους σύγχρονους κατασκευής χρονοδιακόπτες δεν έχουμε ακίδες αλλά ρυθμιζόμενες εσοχές-εξοχές (δείκτες) ενεργοποίησης και απενεργοποίησης.



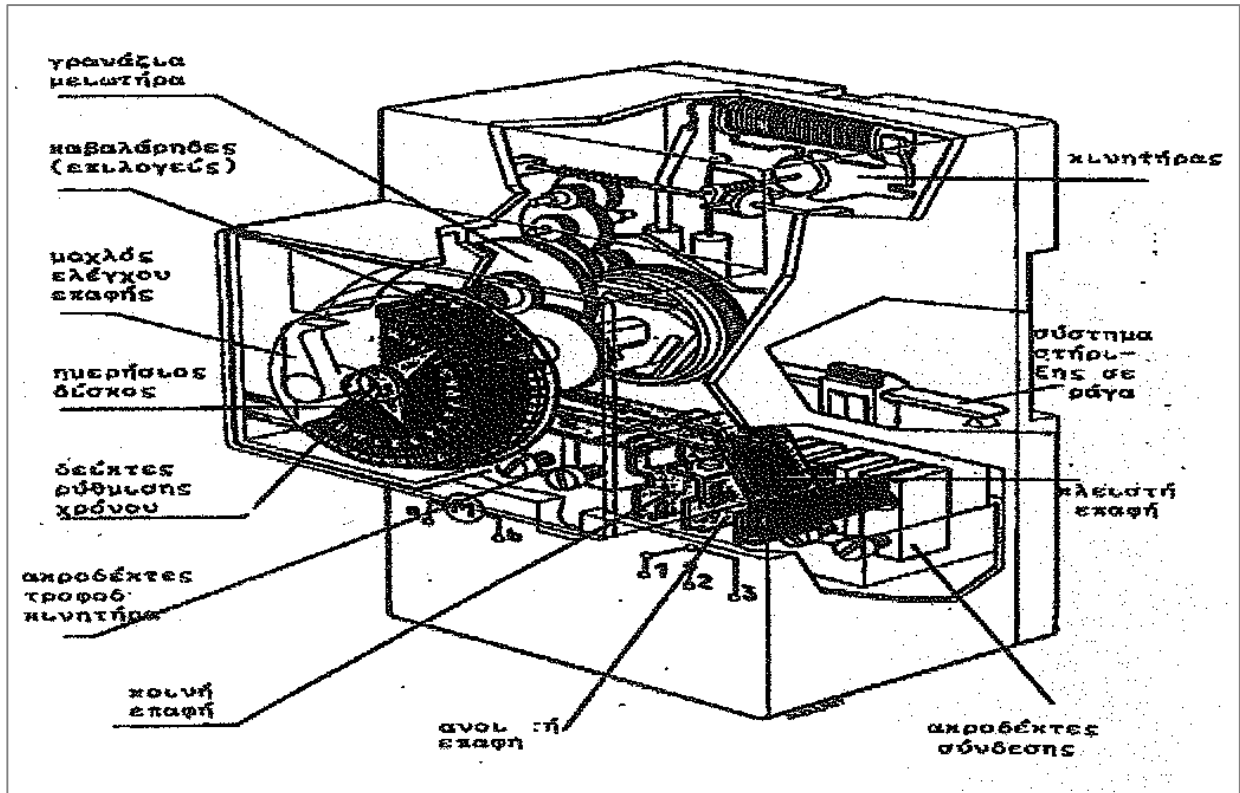
(α) Ηλεκτρολογικός συμβολισμός και  
(β) πραγματική μορφή χρονοδιακόπτη και μορφή ακίδων του

### Η ρύθμιση ενός χρονοδιακόπτη, γενικά, γίνεται ως εξής:


- ≈ Πρώτα τοποθετούνται οι ακίδες, για τη λειτουργία ή τη διακοπή, στις επιθυμητές θέσεις.
  - ≈ Μετά περιστρέφεται ολόκληρος ο δίσκος έτσι ώστε εμπρός από τον σταθερό δείκτη (ή το σημάδι) που έχει ο χρονοδιακόπτης να έλθει η πραγματική ώρα, η ώρα δηλαδή που δείχνει το ρολόι μας τη στιγμή της ρύθμισης.
- Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον τρόπο περιστροφής του δίσκου, η οποία πρέπει να γίνεται πάντα όπως ορίζει το βέλος, που υπάρχει επάνω στον δίσκο του χρονοδιακόπτη και ποτέ ανάποδα, προς αποφυγή βλάβης του χρονοδιακόπτη.

### **Τα είδη των χρονοδιακοπών είναι τα εξής:**

- ≈ Ανάλογα με το χρόνο περιστροφής του δίσκου διακρίνουμε χρονοδιακόπτες με εβδομαδιαίο, 24ωρο ή ωριαίο πρόγραμμα. Οι χρονοδιακόπτες με 24ωρο πρόγραμμα είναι οι πλέον συνήθεις.
  
- ≈ Ανάλογα με το φορτίο που μπορούν να διακόψουν οι χρονοδιακόπτες χαρακτηρίζονται των 10.16 ή 25A. Οι χρονοδιακόπτες είναι συνήθως μονοφασικοί. Σε περίπτωση φορτίου μεγαλύτερης έντασης ή φορτίου τριφασικού παρεμβάλλεται στο κύκλωμα ένα ρελέ, το πηνίο του οποίου δέχεται εντολή λειτουργίας ή διακοπής από τον χρονοδιακόπτη, και ανάλογα την εντολή συνδέει ή αποσυνδέει το φορτίο.
  
- ≈ Ανάλογα με τον τρόπο στήριξής τους οι χρονοδιακόπτες διακρίνονται σε αυτούς που είναι κατάλληλοι για στήριξη, είτε επάνω σε τυποποιημένη ράγα είτε με βίδες, και σε αυτούς που είναι κατάλληλοι για στήριξη μόνο με βίδες.
  
- ≈ Ανάλογα με το αν έχουν ή όχι εφεδρική πορεία λειτουργίας, διακρίνονται στις αντίστοιχες δύο κατηγορίες. Η εφεδρική πορεία επιτυγχάνεται με ένα ειδικό ελατήριο που φορτίζεται αυτόματα και εξασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία του χρονοδιακόπτη, σε περίπτωση διακοπής ρεύματος. Οι χρονοδιακόπτες που δεν έχουν εφεδρική πορεία σταματούν για όση ώρα υπάρχει διακοπή ρεύματος και επομένως απορυθμίζονται. Μετά την επιστροφή του ρεύματος χρειάζονται νέα ρύθμιση στη σωστή ώρα. Η διάρκεια της εφεδρικής πορείας διαφέρει και εξαρτάται από το εργοστάσιο κατασκευής (συνήθως κυμαίνεται από 12 μέχρι 50 ώρες).
  
- ≈ Ανάλογα με την ελάχιστη δυνατή ρύθμιση της χρονικής απόστασης μεταξύ εντολής λειτουργίας και εντολής διακοπής (δηλαδή η μικρότερη δυνατή απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών ακίδων).

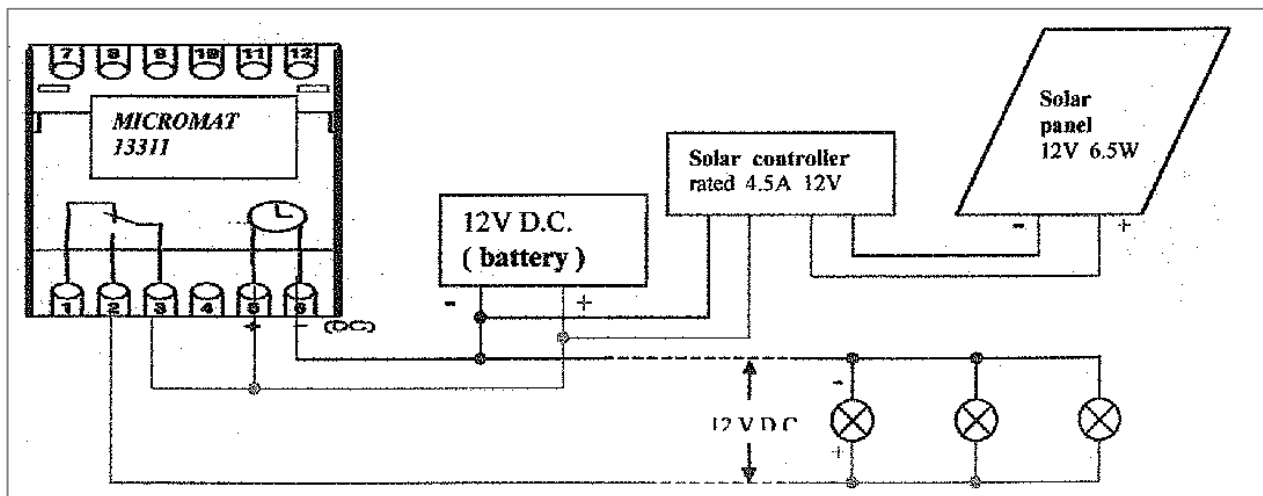


Το μοντέλο Micromat 13311 της γαλλικής εταιρείας Flash ελέγχει τη λειτουργία των ηλεκτρικών λαμπτήρων, μέσω φωτοβολταϊκής ενέργειας, με ημερήσιο προγραμματισμό. Έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί με συνεχές ρεύμα, οπότε και η τροφοδοσία του γίνεται απευθείας από την μπαταρία, δίνοντάς μας τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας λόγω μη ύπαρξης μετατροπέα D.C./A.C.

<b>ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΧΡΟΝΟΔΙΑΚΟΠΤΗ</b>	
■	Διαθέτει μηχανισμό Quartz
■	Δεν διαθέτει εφεδρική πορεία λειτουργίας
■	Τάση λειτουργίας 6 – 12 V A.C. / D.C.
■	Μέγιστο ρεύμα φορτίου 16 A
■	Μεγιστη τάση φορτίου 250V A.C.
■	Συχνότητα λειτουργίας 50 Hz
■	Διαθέτει διακόπτη τριών θέσεων (χρονοδιακόπτης, OFF, ON)
0	= OFF permanently $\frac{1}{2} \rightarrow 3$
	= automatic programmed operation
1	= ON permanently $\frac{1}{2} \rightarrow 3$



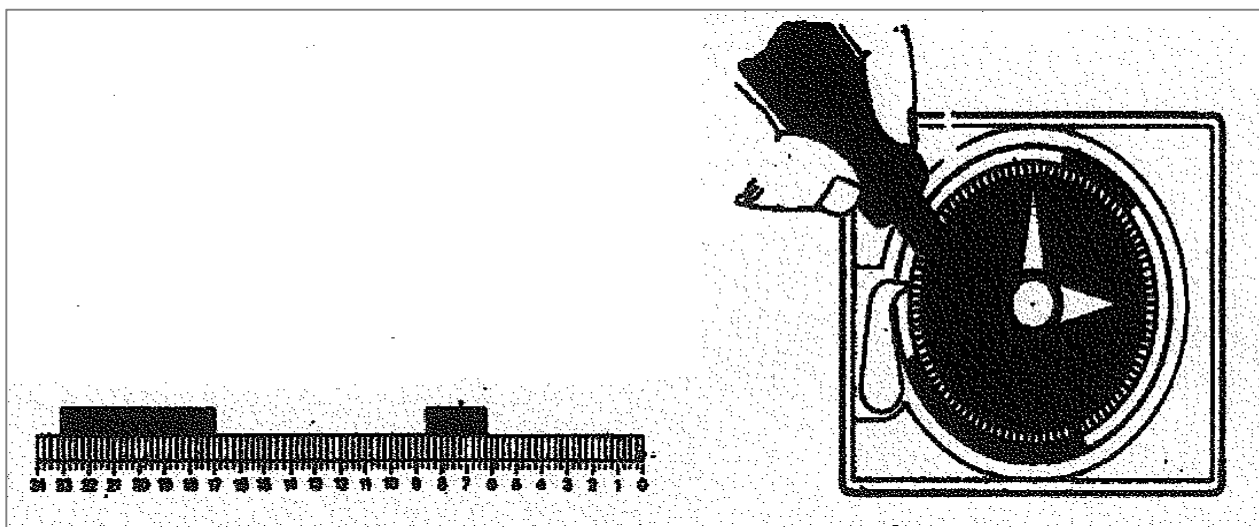
**A) Συνδεσμολογία χρονοδιακόπτη στο μοντέλο:**



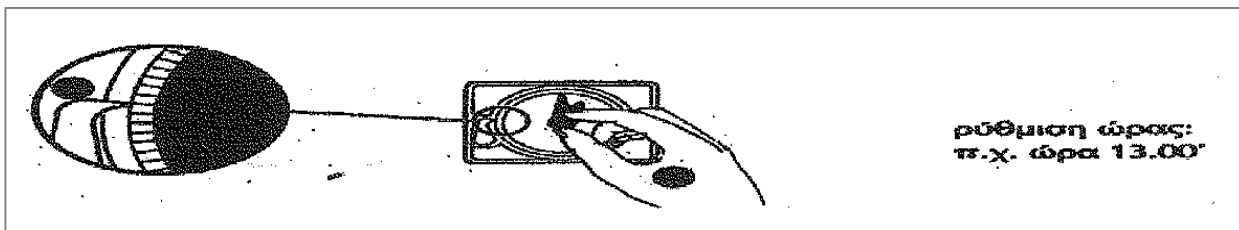
**B) Προγραμματισμός του χρονοδιακόπτη:**

Η ρύθμιση του συγκεκριμένου χρονοδιακόπτη, για πχ λειτουργία από 06:15 μέχρι 08:30 και από 17:00 μέχρι 23:00, αν η ώρα που δείχνει το ρολόι μας τη στιγμή της ρύθμισης είναι 13:00 γίνεται ως εξής:

≈ Πρώτα ρυθμίζουμε στις δύο περιόδους λειτουργίας, του παραδείγματος σπρώχνοντας προς τα μέσα, με τη βοήθεια ενός κατσαβιδιού, τους πλαστικούς δείκτες, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα:



≈ Μετά περιστρέφεται ολόκληρος ο δίσκος έτσι ώστε εμπρός από τον σταθερό δείκτη (ή το σημάδι) που έχει ο χρονοδιακόπτης να έλθει η ώρα 13:00.



Έτσι όταν το ρολόι του χρονοδιακόπτη δείξει 06:15 αλλάζει η θέση της επαφής του χρονοδιακόπτη (από την θέση 1 στη θέση 2), επιτρέποντας την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος της πηγής μέσω της επαφής 2, με αποτέλεσμα τη λειτουργία των καταναλώσεών μας. Η κατάσταση αυτή παραμένει ως έχει μέχρι το ρολόι να δείξει 08:30, οπότε η επαφή του χρονοδιακόπτη επανέρχεται στη θέση 1, αποσυνδέοντας τις καταναλώσεις από το κύκλωμα. Η αντίστοιχη διαδικασία επαναλαμβάνεται και κατά την 17:00 – 23:00.

8. ΠΙΝΑΚΕΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ -

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

**ΠΙΝΑΚΑΣ Α. Ενδεικτικές τιμές για την ισχύ και την περίπου μέση μηνιαία κατανάλωση διαφόρων συνηθισμένων οικιακών ηλεκτρικών συσκευών**

Ηλεκτρική συσκευή	Ισχύς	Μηνιαία ηλεκτρική κατανάλωση
Αναμικτήρας τροφών	150 W	1.0 kWh
Ανεμιστήρας	100 W	4.0 kWh
Απορροφητήρας κουζίνας	250 W	8.0 kWh
Βίντεο	30 W	1.0 kWh
Γραφομηχανή	50 W	5.0 kWh
Καταψύκτης τροφών	400 W	100.0 kWh
Καυστήρας πετρελαίου	250 W	15.0 kWh
Κλιματιστικό	1500 W	100.0 kWh
Κολλητήρι	50 W	1.0 kWh
Κουβέρτα	150 W	10.0 kWh
Κουζίνα	6000 W	120.0 kWh
Λάμπα φωτισμού	75 W	9.0 kWh
Μαγνητόφωνο	100 W	1.0 kWh
Μάτι κουζίνας	500 W	15.0 kWh
Μαχαίρι κουζίνας	90 W	0.5 kWh
Ξυριστική μηχανή	15 W	0.1 kWh
Οδοντόβουρτσα	10 W	0.1 kWh
Παρκετέζα	300 W	1.0 kWh
Στερεοφωνικό συγκρότημα	150 W	15.0 kWh
Πλυντήριο πιάτων	1000 W	30.0 kWh
Πλυντήριο ρούχων	600 W	9.0 kWh
H / Y	70 W	5.0 kWh
Ραπτομηχανή	75 W	1.0 kWh
Ρολόι	2 W	1.0 kWh
Ηλεκτρικό σίδερο	1000 W	5.0 kWh
Σκούπα	600 W	5.0 kWh
Σκουπιδοφάγος	450 W	2.5 kWh
Σόμπα	12000 W	100.0 kWh
Στεγνωτήρας μαλλιών	400 W	1.0 kWh
Στεγνωτήρας ρούχων	5000 W	90.0 kWh
Τηλεόραση	100 W	20.0 kWh
Ταστιέρα	1000 W	5.0 kWh
Δράπανο	250 W	4.0 kWh
Φούρνος μικροκυμάτων	1500 W	15.0 kWh
Φριτέζα	1500 W	6.0 kWh
Φρυγανιέρα	1500 W	9.0 kWh
Ψυγείο	350 W	180.0 kWh

**ΠΙΝΑΚΑΣ Β<sub>1</sub> Συνολική μηνιαία και ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m<sup>2</sup>) σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, σε οριζόντιο επίπεδο (κλίση 0°).**

	Περιοχή	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Μέσος όρος	Συνολική
1	Αθήνα	58	74	110	147	190	204	219	202	149	104	70	54	132	1581
2	Αίλαρος	48	64	102	139	182	197	205	210	138	91	61	47	124	1483
3	Αραξος	59	71	111	143	181	189	207	195	147	103	68	52	127	1527
4	Αργοςτόμι	61	72	111	137	190	207	217	198	146	102	67	52	130	1559
5	Αρτα	60	68	109	130	178	193	208	192	141	100	65	52	125	1497
6	Ηράκλειο	59	75	110	151	196	214	226	205	157	105	75	58	136	1631
7	Θεσσαλονίκη	49	64	96	165	174	186	205	178	131	87	55	44	117	1403
8	Ιεράπετρα	72	85	127	155	195	216	227	211	164	120	87	69	144	1728
9	Ιωάννινα	48	59	95	124	165	177	196	177	127	91	56	42	113	1357
10	Καλαμάτα	66	76	116	135	192	209	217	198	149	106	75	55	133	1596
11	Κέρκυρα	54	65	103	137	178	201	217	193	140	97	60	48	124	1493
12	Κομοτηνή	50	61	92	128	165	183	194	177	130	91	55	45	114	1368
13	Κόνιτσα	52	61	100	118	163	174	193	176	126	89	59	49	113	1361
14	Κόρινθος	54	69	110	139	185	199	208	194	145	101	69	54	127	1526
15	Κύθηρα	67	77	114	143	190	212	218	200	153	109	74	59	135	1615
16	Λαμία	51	62	105	137	180	198	204	187	135	92	63	52	122	1466
17	Λάρισα	47	62	100	138	179	189	202	186	135	91	61	44	119	1433
18	Λήμνος	45	62	101	140	184	200	206	192	142	96	58	44	123	1469
19	Μεθόνη	59	73	113	136	186	202	213	194	147	107	73	55	130	1556
20	Μήλος	53	60	107	159	200	227	241	220	168	102	72	49	138	1660
21	Μυτιλήνη	51	65	102	138	189	207	222	200	150	101	64	49	128	1539
22	Νάξος	54	69	107	142	183	199	207	192	150	105	70	54	128	1531
23	Πάρος	58	75	114	151	198	216	223	202	155	108	72	56	136	1629
24	Πάτρα	53	67	113	129	177	199	203	185	141	99	62	51	123	1479
25	Πόργος	64	73	117	138	191	206	216	198	149	106	74	59	133	1592
26	Ρέθυμνο	59	76	106	145	194	206	222	203	149	95	76	56	132	1587
27	Ρόδος	64	77	122	155	196	214	227	211	166	117	79	61	141	1686
28	Σάμος	60	74	111	144	188	210	221	202	158	111	72	54	134	1606
29	Σέρρες	47	60	97	130	170	185	196	178	129	87	56	45	115	1380
30	Σητεία	60	75	115	149	195	212	224	202	156	107	77	58	136	1630
31	Σκόρος	45	61	95	139	187	205	215	194	142	93	59	45	123	1480
32	Σούδα Κρήτης	59	75	112	149	196	206	221	208	156	102	74	57	135	1616
33	Σόρος	56	75	109	154	198	208	226	204	155	112	70	55	135	1621
34	Τυμπάκι	69	83	128	152	193	213	223	213	162	118	83	66	142	1703
35	Χανιά	59	75	112	149	196	215	229	210	154	101	74	56	136	1630
36	Χίος	53	67	108	144	195	214	226	205	155	107	67	52	133	1594

**ΠΙΝΑΚΑΣ Β<sub>2</sub> Συνολική μηνιαία και ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m<sup>2</sup>) σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, σε οριζόντιο επίπεδο (κλίση 30°).**

	Περιοχή	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Μέσος όρος	Συνολική
1	Αθήνα	87	99	129	152	179	184	202	203	170	136	105	85	144	1730
2	Αίλαρος	69	83	119	144	172	179	189	211	156	117	89	71	133	1600
3	Αραΰος	89	94	130	148	171	171	191	196	167	135	102	81	140	1677
4	Αργοστόλι	93	96	130	142	180	187	200	199	166	134	100	81	142	1707
5	Αρτα	94	91	129	135	169	176	193	194	161	132	99	84	138	1656
6	Εράκλειο	83	97	126	154	183	190	205	202	176	133	108	87	145	1744
7	Θεσσαλονίκη	75	87	113	142	167	171	192	181	151	115	83	70	129	1544
8	Ιεράπετρα	106	111	147	158	181	192	205	208	184	155	129	107	157	1882
9	Ιωάννινα	71	77	111	129	157	162	182	179	144	119	83	64	123	1478
10	Καλαμάτα	100	101	135	138	180	188	199	197	168	138	112	84	145	1741
11	Κέρκυρα	83	87	121	148	170	183	202	195	161	129	90	76	137	1640
12	Κομοτηνή	78	83	108	134	158	168	182	180	150	132	84	74	127	1522
13	Κόνιτσα	80	81	118	123	156	160	180	178	144	117	89	80	125	1503
14	Κόρινθος	79	91	129	144	175	180	192	194	165	132	103	85	139	1666
15	Κόθηρα	100	101	132	146	178	189	199	198	172	140	108	90	146	1753
16	Λαμία	75	81	123	142	171	180	189	188	153	120	94	83	133	1600
17	Λάρισα	69	82	117	144	171	173	188	188	154	119	92	68	130	1565
18	Λήμνος	66	82	119	147	176	183	192	195	164	128	87	69	134	1606
19	Μεθώνη	86	96	131	139	175	181	195	193	165	139	108	84	141	1692
20	Μήλος	75	75	123	164	188	203	220	219	192	131	106	72	147	1767
21	Μυτιλήνη	76	86	119	143	180	188	206	202	173	134	96	77	140	1680
22	Νάξος	77	90	124	146	172	179	190	191	170	136	103	83	138	1660
23	Πάρος	83	98	132	155	185	193	203	200	174	140	104	84	146	1751
24	Πάτρα	78	88	133	133	167	180	187	185	160	125	91	79	134	1611
25	Πέργος	98	97	138	142	180	186	199	198	169	139	112	94	146	1751
26	Ρέθυμνο	83	98	120	148	181	183	201	200	166	118	110	83	141	1691
27	Ρόδος	95	101	142	159	184	191	207	210	188	153	118	95	153	1843
28	Σάμος	90	99	130	149	177	189	203	202	181	147	108	84	147	1759
29	Σέρρες	72	81	115	136	163	170	184	181	149	116	86	74	127	1526
30	Σητεία	85	96	132	152	181	188	203	199	174	136	111	86	146	1743
31	Σκύρος	64	79	110	144	178	186	199	195	162	121	87	68	133	1594
32	Σούδα Κρήτης	84	97	129	152	183	184	201	206	175	129	107	85	144	1731
33	Σύρος	82	100	127	159	187	187	204	204	176	148	104	85	147	1766
34	Τομπάκι	101	108	148	155	179	189	202	210	181	152	122	101	154	1847
35	Χανιά	83	97	128	152	188	191	208	207	172	127	107	83	145	1738
36	Χίος	78	88	127	149	185	194	208	206	178	142	100	82	145	1737

**ΠΙΝΑΚΑΣ Β<sub>3</sub>** Συνολική μηνιαία και ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m<sup>2</sup>) σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, σε οριζόντιο επίπεδο (κλίση 45°).

	Περιοχή	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοεμβριος	Δεκέμβριος	Μέσος όρος	Ετήσια
1	Αθήνα	95	104	128	144	162	163	179	188	167	142	115	94	140	1680
2	Αλιανός	74	87	118	136	156	158	169	196	154	121	97	78	129	1545
3	Αραξός	98	99	130	140	155	152	170	181	165	141	111	90	136	1631
4	Αργαστόλι	102	101	130	134	162	165	178	184	163	139	109	90	138	1658
5	Άρτα	103	96	129	128	154	156	173	180	159	139	108	93	135	1617
6	Ηράκλειο	90	100	124	145	164	166	181	186	171	137	117	95	140	1675
7	Θεσσαλονίκη	82	92	113	135	152	153	172	169	149	120	90	78	125	1505
8	Ιεράπετρα	115	116	146	148	162	167	180	190	179	160	139	117	152	1821
9	Ιωάννινα	77	81	111	122	143	145	164	166	142	125	90	70	120	1436
10	Καλαμάτα	109	105	135	130	163	165	176	182	165	143	122	93	141	1689
11	Κέρκυρα	91	91	122	136	154	163	181	182	159	135	98	85	133	1596
12	Κομοτηνή	87	87	109	128	145	151	164	169	149	128	92	83	124	1491
13	Κόνιτσα	88	85	118	116	142	143	162	166	142	122	98	89	122	1469
14	Κόρινθος	86	95	128	136	158	159	171	180	162	137	112	93	135	1617
15	Κόθηρα	108	105	131	137	160	166	176	182	168	145	117	99	141	1694
16	Λαμία	82	85	123	135	155	160	169	175	151	124	103	92	129	1553
17	Λάρισα	75	86	118	137	155	154	169	175	152	125	101	75	127	1520
18	Λήμνος	71	87	119	139	160	163	172	182	162	134	95	76	130	1559
19	Μεθάνη	93	100	131	131	157	160	173	178	162	144	117	92	136	1638
20	Μήλιος	80	77	122	155	169	178	194	202	188	135	115	78	141	1694
21	Μοτιλίνη	82	90	119	136	163	167	184	188	170	140	105	85	136	1630
22	Νάξος	83	93	123	138	155	158	169	177	166	141	112	91	134	1605
23	Πάρος	89	102	131	146	166	169	179	184	170	145	113	92	140	1685
24	Πάτρα	84	92	133	126	152	160	167	172	157	134	98	87	130	1563
25	Πύργος	107	102	138	134	163	164	177	183	166	145	122	105	142	1705
26	Ρέθυμνο	89	102	119	139	162	160	177	184	161	121	118	90	135	1622
27	Ρόδος	103	106	142	150	165	168	183	193	185	159	128	104	148	1785
28	Σάμος	98	103	129	141	160	167	181	187	178	153	118	93	142	1708
29	Σέρρες	79	85	116	130	149	152	166	170	147	121	94	83	125	1492
30	Σητεία	91	100	130	142	162	164	179	183	170	140	120	94	140	1674
31	Σκύρος	69	83	109	137	161	165	178	182	160	126	94	75	128	1538
32	Σούδα Κρήτης	90	101	127	143	164	161	177	189	171	133	115	93	138	1664
33	Σόρος	89	105	126	151	168	165	184	189	173	154	113	94	142	1710
34	Τομπάκι	109	113	147	145	160	165	177	192	176	157	131	111	149	1784
35	Χανιά	90	100	127	143	164	167	183	190	168	131	115	90	139	1667
36	Χίος	85	92	126	141	167	171	186	191	175	148	109	90	140	1683

**ΠΙΝΑΚΑΣ Β<sub>4</sub> Συνολική μηνιαία και ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m<sup>2</sup>) σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, σε οριζόντιο επίπεδο (κλίση 60°).**

	Περιοχή	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Μέσος όρος	Συνολικά
1	Αθήνα	97	103	122	129	138	135	150	164	155	140	118	97	129	1549
2	Αλιάρτος	75	86	112	122	133	132	142	171	143	119	99	81	118	1417
3	Αραξός	101	99	124	125	132	127	143	159	153	139	114	93	126	1508
4	Αργαστόλι	105	100	124	120	139	137	149	161	152	137	112	93	127	1529
5	Αρτα	107	96	123	115	132	131	145	158	148	137	111	97	125	1500
6	Ηράκλειο	91	99	117	128	138	136	149	161	158	134	119	97	127	1526
7	Θεσσαλονίκη	85	92	108	122	131	129	146	149	139	119	93	82	116	1395
8	Ιεράπετρα	118	115	137	131	136	136	148	164	165	156	142	121	139	1670
9	Ιωάννινα	80	80	105	110	123	122	139	147	133	123	92	73	111	1326
10	Καλαμάτα	118	105	128	116	138	136	147	159	153	140	125	96	130	1556
11	Κέρκυρα	94	91	116	122	133	136	152	160	148	133	101	89	123	1476
12	Κομοτηνή	90	87	104	116	125	128	140	149	140	128	95	87	116	1388
13	Κόνιτσα	91	85	113	105	122	121	137	146	132	121	100	93	114	1366
14	Κόρινθος	88	94	122	121	135	132	143	157	150	135	115	97	124	1490
15	Κόθηρα	111	104	123	122	135	136	146	158	155	142	119	102	130	1554
16	Λαμία	84	84	117	121	133	133	142	153	141	123	105	96	119	1433
17	Λάρισα	77	89	112	123	133	129	143	154	142	123	104	78	117	1403
18	Λήμνος	73	86	114	125	137	136	146	160	151	133	98	79	120	1438
19	Μεθώνη	95	99	123	117	134	132	144	155	150	141	120	95	125	1505
20	Μήλος	82	76	115	138	143	146	160	175	174	133	117	80	128	1538
21	Μυτιλήνη	85	90	113	122	139	139	154	165	159	139	108	89	125	1502
22	Νάξος	85	92	116	123	132	131	141	154	154	139	114	94	123	1474
23	Πάρος	91	100	123	129	140	138	148	160	157	142	114	95	128	1538
24	Πάτρα	87	91	126	113	130	133	141	150	146	132	101	91	120	1441
25	Πύργος	111	101	131	120	138	136	148	160	154	142	125	109	131	1575
26	Ρέθυμνο	91	100	112	123	136	132	146	159	149	118	120	92	123	1477
27	Ρόδος	105	105	134	133	139	138	151	167	171	156	131	108	137	1639
28	Σάμος	101	103	123	126	136	138	151	163	165	151	121	96	131	1575
29	Σέρρες	82	85	111	117	129	129	141	150	138	120	97	87	116	1387
30	Σητεία	92	98	123	126	137	135	147	158	156	136	122	96	127	1525
31	Σκύρος	70	82	104	123	138	138	149	159	14	124	96	78	117	1410
32	Σούδα Κρήτης	92	99	120	127	138	132	147	163	157	130	117	96	126	1518
33	Σύρος	91	104	119	134	143	137	153	164	161	152	115	98	131	1571
34	Τομπάκι	111	11	139	128	135	135	146	166	162	153	134	114	136	1634
35	Χανιά	91	99	119	127	138	137	151	164	155	128	117	93	126	1517
36	Χίος	87	92	120	127	142	142	155	167	163	146	112	94	129	1548

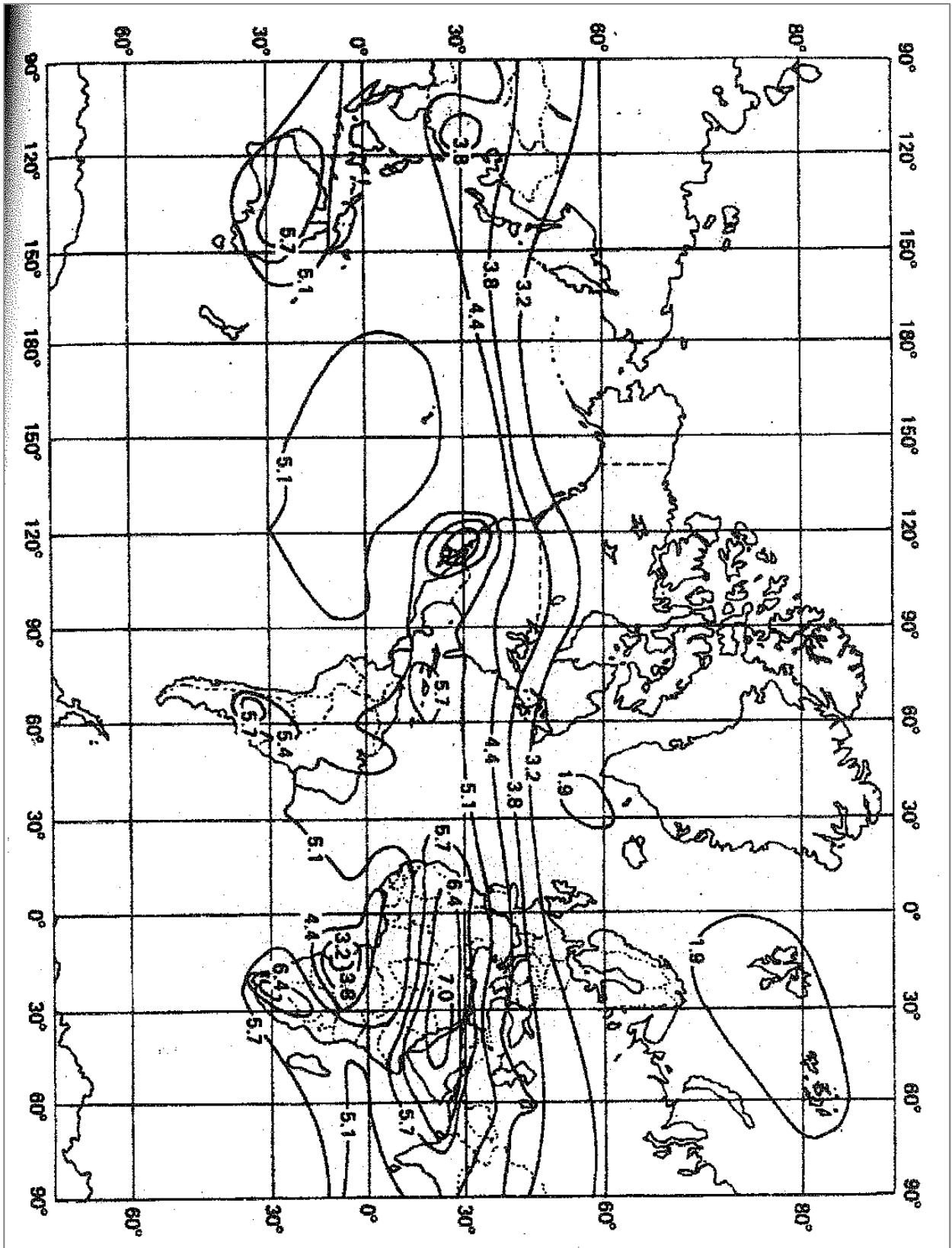


**ΠΙΝΑΚΑΣ Β<sub>5</sub> Συνολική μηνιαία και ετήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m<sup>2</sup>) σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, σε οριζόντιο επίπεδο (κλίση 90°).**

	Περιοχή	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Μέσος όρος	Συνολική
1	Αθήνα	87	86	91	83	78	72	80	97	109	114	104	89	91	1090
2	Αλιάρτος	67	72	84	79	77	71	78	101	101	97	87	73	82	987
3	Αραξός	90	82	93	81	76	69	78	95	108	113	101	85	89	1070
4	Αργοςστόλι	94	84	93	78	79	73	80	96	107	112	99	85	90	1078
5	Αρτα	97	80	93	75	77	72	80	96	105	112	99	89	90	1075
6	Ηράκλειο	79	81	86	81	75	69	76	92	108	107	103	87	87	1043
7	Θεσσαλονίκη	77	78	83	81	78	72	82	92	101	98	83	75	83	1000
8	Ιεράπετρα	104	94	100	82	74	68	75	93	112	124	124	109	97	1159
9	Ιωάννινα	71	67	80	73	73	69	78	90	95	101	82	66	79	946
10	Καλαμάτα	100	87	95	75	77	71	78	93	106	113	110	87	91	1093
11	Κέρκυρα	85	77	88	80	77	74	83	97	106	110	90	81	87	1049
12	Κοματηνή	82	74	80	77	75	72	80	93	101	106	85	81	84	1008
13	Κόνιτσα	82	71	86	70	73	68	78	90	95	99	90	86	82	989
14	Κόρινθος	78	79	91	79	77	71	77	94	106	109	102	88	87	1050
15	Κόθηρα	98	86	91	78	75	70	76	92	107	114	104	92	90	1082
16	Λαμία	75	70	88	79	77	72	78	93	100	100	93	88	85	1014
17	Λάρισα	69	72	85	81	78	72	79	94	102	101	92	71	83	995
18	Λήμνος	65	73	87	83	80	75	81	97	108	109	87	72	85	1017
19	Μεθώνη	84	82	92	75	75	69	76	91	104	114	105	86	88	1054
20	Μήλος	72	62	86	87	79	73	81	100	120	107	103	72	87	1041
21	Μυτιλήνη	76	75	86	80	80	75	83	99	113	114	96	81	88	1057
22	Νάξος	75	76	87	79	75	69	76	91	107	112	100	85	86	1031
23	Πάρος	80	83	91	82	77	70	77	92	108	114	100	85	88	1058
24	Πάτρα	77	76	95	74	75	71	77	91	103	108	899	83	85	1018
25	Πέργος	99	84	98	78	78	72	79	95	108	116	111	99	93	1116
26	Ρέθυμνο	79	82	82	77	75	67	75	91	102	94	104	82	84	1010
27	Ρόδος	93	86	99	84	77	71	78	96	118	126	115	98	95	1141
28	Σάμος	90	86	92	81	77	73	80	96	115	123	107	87	92	1108
29	Σέρρες	75	72	85	78	77	73	80	94	100	100	87	80	83	1002
30	Σητεία	80	80	90	79	74	68	75	90	107	108	106	86	87	1043
31	Σκάρρος	62	82	78	80	79	74	81	96	106	101	85	71	82	981
32	Σούδα Κρήτης	80	82	88	80	76	68	75	93	108	104	102	85	87	1042
33	Σόρος	80	86	89	86	80	72	80	96	112	123	102	89	91	1095
34	Τυμπάκι	98	91	101	80	74	68	74	93	110	122	116	102	94	1130
35	Χανιά	79	81	88	80	75	69	76	94	106	102	101	82	86	1033
36	Χίος	78	77	90	82	80	75	82	99	115	120	100	86	90	1082

**ΠΙΝΑΚΑΣ Γ. Μέση θερμοκρασία του αέρα (ο C) στη διάρκεια των φωτεινών ωρών της ημέρας, κατά τους διαδοχικούς μήνες του έτους, και μέση συνολική ετήσια ηλιοφάνεια, σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας.**

	Περιοχή	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Μέσος έτος	Ηλιοφάνεια
1	Αθήνα	10.5	11.6	12.9	17.1	21.9	26.6	29.3	29.2	25.3	20.0	16.3	12.5	19.4	2818
2	Αλιάρτος	7.1	9.7	11.4	15.8	21.3	25.8	27.3	26.3	23.2	17.9	13.3	9.3	17.4	2526
3	Άραξος	11.4	11.8	13.3	16.7	21.2	25.5	28.1	28.5	25.2	20.5	16.3	13.0	19.3	2686
4	Αργοστόλι	12.4	12.6	14.1	17.0	21.0	25.2	27.8	27.8	24.9	21.1	17.3	14.1	19.6	2766
5	Άρτα	10.3	11.4	13.7	17.3	21.8	26.3	29.3	28.9	25.2	20.7	15.9	11.6	19.4	2658
6	Ηράκλειο	13.4	13.6	14.9	17.8	21.4	25.3	27.3	27.2	24.5	21.4	18.3	16.4	20.1	2816
7	Θεσσαλονίκη	6.7	8.3	11.3	16.1	21.2	25.7	28.4	28.3	23.8	18.3	13.3	8.6	17.5	2429
8	Ιεράπετρα	14.0	14.3	15.7	18.3	22.1	26.9	29.5	29.3	26.2	22.8	19.4	15.8	21.2	3108
9	Ιωάννινα	6.5	7.6	10.4	14.5	19.1	23.9	27.2	26.9	22.5	17.0	11.8	7.9	16.3	2252
10	Καλαμάτα	12.8	13.2	14.6	17.5	21.3	25.6	28.4	28.5	25.7	21.8	18.1	14.4	20.1	2827
11	Κέρκυρα	11.2	11.6	13.2	16.5	20.9	25.2	27.9	27.9	24.4	20.1	16.2	12.4	18.9	2642
12	Κομοτηνή	6.4	7.3	9.5	14.6	20.0	24.5	27.5	27.3	22.8	17.2	12.4	8.5	16.5	2372
13	Κόνιτσα	6.5	7.7	10.3	14.4	15.6	23.1	26.4	26.4	22.3	17.1	12.5	8.3	15.9	2315
14	Κόρινθος	11.1	11.9	13.2	17.0	21.8	26.2	29.0	29.1	25.5	20.5	16.3	12.9	19.5	2661
15	Κύθηρα	12.0	12.1	12.9	15.7	19.7	24.2	27.0	27.0	24.0	20.3	17.1	13.6	18.8	2831
16	Λαμία	8.9	10.1	12.5	17.2	22.1	26.7	29.3	29.0	24.5	19.4	15.0	10.4	18.8	2532
17	Λάρισα	6.6	8.7	11.1	16.2	21.7	27.0	29.7	29.3	24.5	18.6	13.2	8.2	17.9	2463
18	Λήμνος	9.2	10.0	11.4	18.3	20.3	24.7	27.3	27.3	23.6	18.7	14.9	11.3	18.1	2697
19	Μεθώνη	12.7	13.1	14.1	17.0	20.5	24.1	26.3	27.3	25.2	21.4	17.7	14.3	19.5	2921
20	Μήλος	11.8	12.1	13.2	16.5	20.7	24.6	26.4	26.4	23.6	20.2	16.9	13.5	18.8	2732
21	Μοτιλίνη	10.4	11.2	12.6	16.8	21.5	26.0	28.3	27.8	24.2	19.8	15.6	12.1	18.8	2630
22	Νάξος	13.1	13.3	14.2	17.1	20.4	24.0	25.5	25.6	23.4	20.6	17.7	14.8	19.1	2841
23	Πάρος	12.5	13.2	14.2	17.5	21.4	25.1	26.4	26.6	24.0	20.3	17.7	14.4	19.4	2539
24	Πάτρα	11.2	11.8	13.5	17.0	21.1	25.0	27.6	28.0	24.9	20.6	16.3	12.7	19.1	2857
25	Πύργος	11.9	12.5	14.1	17.3	21.5	25.7	28.6	28.9	25.8	21.4	17.1	13.4	19.8	2694
26	Ρέθυμνο	13.7	14.0	15.3	18.0	21.8	25.9	27.7	27.9	25.3	21.8	18.9	15.7	20.5	3041
27	Ρόδος	12.6	13.1	14.5	17.7	21.9	26.3	28.6	28.9	26.2	21.8	17.6	14.2	20.3	2880
28	Σάμος	11.7	12.1	13.8	17.3	21.5	25.4	27.6	27.5	24.8	20.6	17.1	13.6	19.4	2396
29	Σέρρες	5.4	7.8	11.0	16.2	21.4	25.8	28.7	27.0	23.8	18.2	12.2	7.0	17.0	2806
30	Σητεία	13.8	14.1	15.1	18.2	22.0	25.5	27.2	27.4	25.1	22.0	18.9	15.6	20.4	2534
31	Σκύρος	10.6	11.1	12.2	15.8	20.2	24.2	26.3	26.0	22.7	19.2	15.7	12.3	18.0	2791
32	Σούδα Κρήτης	11.9	12.3	13.9	17.0	21.4	25.6	27.5	27.3	24.2	20.3	17.3	14.0	19.4	2895
33	Σύρος	12.2	12.7	13.6	16.8	20.6	25.1	27.3	27.0	24.2	20.8	17.2	13.9	19.3	3029
34	Τομαράκι	13.2	13.5	15.0	17.8	21.8	26.2	28.8	28.6	25.7	21.5	18.1	14.8	20.4	2809
35	Χανιά	13.0	13.3	14.6	17.6	21.6	25.8	27.9	27.8	24.7	21.2	18.0	14.6	20.0	2854
36	Χίος	11.4	11.6	13.1	17.0	21.9	26.5	28.3	28.1	24.3	19.9	16.4	12.2	19.3	2566



Διάγραμμα 1 Η μέση ημερήσια ηλιακή ενέργεια που δέχονται, σε οριζόντιο επίπεδο, οι διάφορες περιοχές της γης. Οι τιμές είναι σε kWh/m<sup>2</sup>.

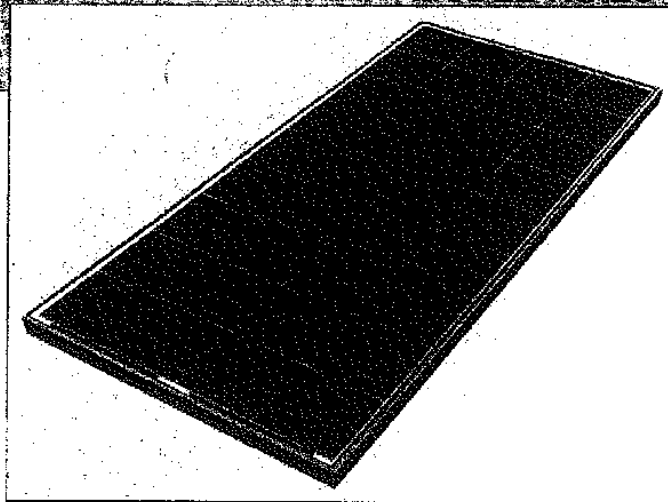


MODEL KC120-1

# KC120-1

## HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE

TYPICAL OUTPUT 120 Wp



### HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities have produced a highly efficient multicrystal photovoltaic modules.

The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 14%.

These cells are encapsulated between a tempered glass cover and an EVA pottant with PVF back sheet to provide maximum protection from the severest environmental conditions.

The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.

### APPLICATIONS

- Microwave/Radio repeater stations
- Electrification of villages in remote areas
- Medical facilities in rural areas
- Power source for summer vacation homes
- Emergency communication systems
- Water quality and environmental data monitoring systems
- Navigation lighthouses, and ocean buoys
- Pumping systems for irrigation, rural water supplies and livestock watering
- Aviation obstruction lights
- Cathodic protection systems
- Desalination systems
- Recreational vehicles
- Railroad signals
- Sailboat charging systems

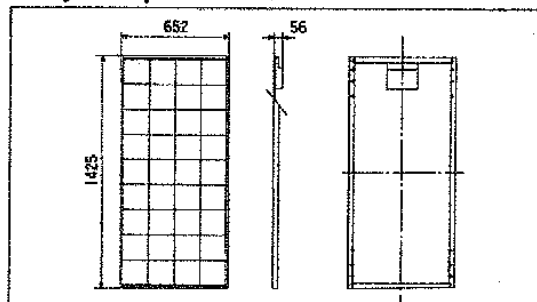
### SPECIFICATIONS

#### ■ Electrical Specifications

MODEL	KC120-1
Maximum Power	120 Watts
Maximum Power Voltage	16.9 Volts
Maximum Power Current	7.10 Amps
Open Circuit Voltage	21.5 Volts
Short-Circuit Current	7.45 Amps
Length	1425mm (56.1in.)
Width	652mm (25.7in.)
Depth	52mm (2.0in.)
Weight	11.9kg (26.3lbs.)

#### ■ Physical Specifications

(Unit: mm)

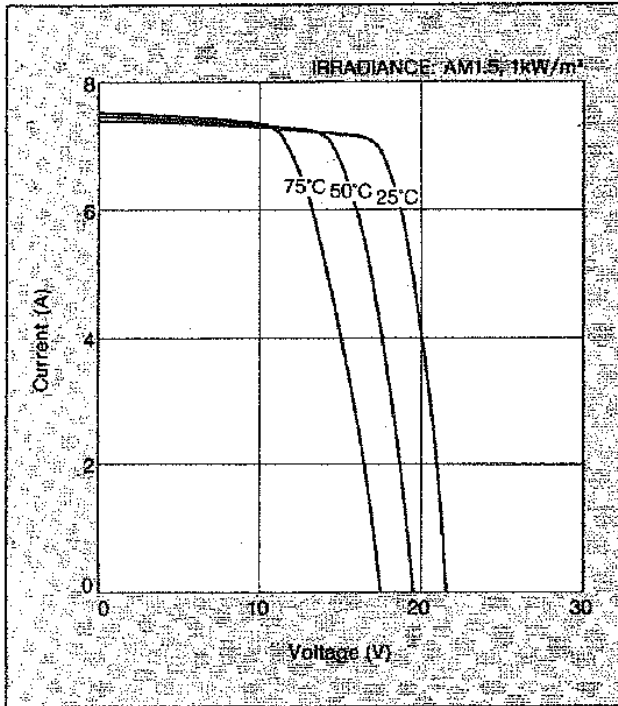


Note: The electrical specifications are under test conditions of irradiance of 1kW/m<sup>2</sup>, Spectrum of 1.5 air mass and cell temperature of 25°C

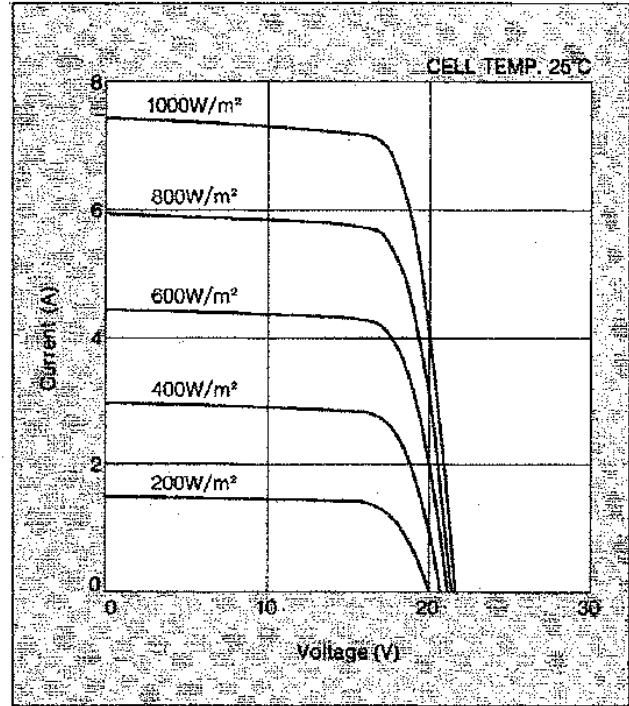
Kyocera reserves the right to modify these specifications without notice.

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC120-1 at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC120-1 at various irradiance levels



## QUALITY ASSURANCE

Kyocera multicrystal photovoltaic modules exceed government specifications for the following tests.

- Thermal cycling test
- Thermal shock test
- Thermal/Freezing and high humidity cycling test
- Electrical isolation test
- Hail impact test
- Mechanical, wind and twist loading test
- Salt mist test
- Light and water-exposure test
- Field exposure test

### Ρυθμιστές Φόρτισης Φωτοβολταϊκών Μονάδων

Μοντέλο	RESPECT – 120
Μέγιστο ρεύμα γεννήτριας	120 A
Μέγιστο ρεύμα κατανάλωσης	120 A
Τύπος ακροδεκτών	16 / 25 mm <sup>2</sup>
Βάρος	420g
Διαστάσεις	188 * 106 * 49
Προστασία	IP 55

### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

	ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ (SOC)	ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ
Προθέρμανση	SOC < 40 %	46.8 V
Αποσύνδεση	SOC < 30 %	44.4 V
Επανασύνδεση	SOC > 50 %	50.4 V
Φόρτιση εξισορρόπησης	SOC < 40 %	46.8 V
Φόρτιση κύκλου	SOC < 70 %	49.6 V
Τελική τάση φόρτισης	54.8 V	54.8 V
Θερμοκρασιακή αντιστάθμιση	- 16mV / K / Cell	- 16mV / K / Cell

### ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

	Περιγραφή σφάλματος	Αυτόματα μέτρα προστασίας	Φωταινές ενδείξεις	Ενδείξεις επί της οθόνης	Ανάταξη
Φυσιολογική λειτουργία	Κανένα	Κανένα	Πράσινο αναλάμπων LED		Δεν διατίθεται
Υπερένταση λόγω υψηλού φορτίου	Υψηλό ρεύμα στον κλάδο του φορτίου	Αποσύνδεση φορτίου	Πράσινο – κόκκινο αναλάμπων LED	LOAD CURRENT	Αποσυνδέστε τον κλάδο κατανάλωσης, διορθώστε το πρόβλημα και επανασυνδέστε τον
Υπερένταση από τη Φ/Β γεννήτρια	Υψηλό ρεύμα στον κλάδο της γεννήτριας	Αποσύνδεση φορτίου	Ένδειξη της έντασης ρεύματος της Φ/Β γεννήτριας	MODULE CURRENT	Αυτόματη ανάταξη όταν η υπερένταση δεν υφίσταται πλέον
Υπερθέρμανση	Υπερθέρμανση του ρυθμιστή	Αποσύνδεση φορτίου	Σταθερό κόκκινο LED	OVERTEMPERATURE	Αυτόματη ανάταξη όταν η υπερθέρμανση δεν υφίσταται πλέον
Υπέρταση συσσωρευτή	Η τάση του συσσωρευτή είναι πολύ υψηλή	Αποσύνδεση φορτίου, βραχυκύκλωση γεννήτριας		OVERVOLTAGE	Αυτόματη ανάταξη όταν η υπέρταση δεν υφίσταται πλέον
Υπόταση συσσωρευτή	Η τάση του συσσωρευτή είναι πολύ χαμηλή	Αποσύνδεση φορτίου	Κόκκινο αναλάμπων LED	UNDERVOLTAGE	Αυτόματη ανάταξη όταν η υπόταση δεν υφίσταται πλέον

### Μετατροπείς D.C. / A.C. Φωτοβολταϊκών Μονάδων

Μοντέλο	TRACE – SW3048E
Ρεύμα εισόδου	67 A
Τάση εισόδου	48 V =
Τάση εξόδου	220 V ~
Συχνότητα εξόδου	50 Hz

## ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ERGON

Είδος συσσωρευτών	OP.zS κατά DIN 40736 / part 1
Τεχνολογία	Μολύβδου - θειικού οξέος, με υγρό ηλεκτρολύτη
Θετικές πλάκες	Σωληνωτού τύπου, με σκελετό χαμηλού αντιμονίου, πάχος σκελετού 6 mm, ενεργός ύλη διοξείδιο του μολύβδου που σχηματίζεται ηλεκτροχημικά από οξείδιο του μολύβδου κατά τη διαδικασία ξηράς φόρτισης της πλάκας
Αρνητικές πλάκες	Επίπεδου τύπου, ενεργός ύλη σπογγώδης μολύβδου που σχηματίζεται ηλεκτροχημικά από οξείδιο του μολύβδου κατά τη διαδικασία ξηράς φόρτισης της πλάκας
Χωρισιότητες	Μικροπορώδεις, Διάρκεια ζωής ανάλογη των πλακών
Ηλεκτρολύτης	Διάλυμα θειικού οξέος πυκνότητας 1.24 + 0.01 kg / li στους 20° C
Δοχείο	Διαφανές, ιδιαίτερα ανθεκτικό
Καπάκι	Από γκρί S.A.N.
Συνδέσμοι στοιχείων	Μολύβδινοι ανάμεσα στα στοιχεία και επενδεδυμένα καλώδια ανάμεσα στις σειρές των συσσωρευτών
Τύπος πόλων	Μολύβδινοι, με εξάρτημα για το βίδωμα των ακραίων συνδέσμων
Στεγανοποίηση	Σφράγισμα πόλων - κακασικό με ελαστικό δακτύλιο κολύ καλής εφαρμογής. Η στεγανότητα ελέγχεται μετά την παραγωγή των στοιχείων με υπερπίεση 0.1 bar σε όλα τα στοιχεία

### ΓΕΝΙΚΑ ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΤΥΠΟΥ OP.zS

Όνομαστική τάση	Η ονομαστική τάση κάθε στοιχείου είναι 2V	
Όνομαστική χωρητικότητα	Η ονομαστική χωρητικότητα δίνεται κατά DIN 43539 / part 4, δηλαδή είναι η 10ωρη χωρητικότητα, με πυκνότητα ηλεκτρολύτη 1.24 kg / li, σε θερμοκρασία ηλεκτρολύτη 20° C και τελική τάση 1.8 V / στοιχείο Η μεταβολή της χωρητικότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη είναι : 0.6% /°C για εκφορτίσεις διάρκειας > 1h και 1% /°C για εκφορτίσεις διάρκειας < 1h	
Αυτοεκφόρτιση	< 3% C10 ανα μήνα, σε θερμοκρασία 20° C	
Κατανάλωση νερού	(Ετήσια) 0.3 cm <sup>3</sup> / Ah ανά στοιχείο σε θερμοκρασία 20° C και τάση συνολικής φόρτισης 2.23 V / στοιχείο	
Σταθερότητα κύκλων	Πάνω από 1000 κύκλοι βάθους εκφόρτισης 75% C <sub>ονομ.</sub> Πάνω από 1800 κύκλοι βάθους εκφόρτισης 50% C <sub>ονομ.</sub> Πάνω από 4000 κύκλοι βάθους εκφόρτισης 30% C <sub>ονομ.</sub>	
Όρια θερμοκρασίας	Αποθήκευση εν ξηρώ :	από -40 έως +50° C
	Λειτουργία :	από -10 έως +50° C
Στοιχεία φόρτισης	Αρχική φόρτιση :	2.35 - 2.60 V / στοιχείο
	Συντηρητική φόρτιση :	2.23 V / στοιχείο
	Φόρτιση με Φ/Β γεννήτρια :	2.35 - 2.60 V / στοιχείο
	Αποδοχή χαμηλών ρευμάτων φόρτισης :	από 100 mA / 100 Ah
Στοιχεία εκφόρτισης	Συνιστώμενος βαθμός εκφόρτισης για προστασία :	max. 80% C <sub>ονομ.</sub>
	Μέγιστος επιτρεπόμενος βαθμός εκφόρτισης :	100% C <sub>ονομ.</sub>
Διάρκεια ζωής	Αναμενόμενη διάρκεια ζωής συσσωρευτών 10 - 14 χρόνια σε παράλληλη εφεδρική λειτουργία, με τάση φόρτισης 2.23 V / στοιχείο και θερμοκρασία 20° C. Οι απαιτήσεις συντήρησης περιλαμβάνουν μόνον την συμπλήρωση των συσσωρευτών με αμιονισμένο νερό.	

### ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΤΥΠΟΥ 16 OPzS 1600

Όνομαστική τάση	2V
Όνομαστική χωρητικότητα Ah / 10h	1600 Ah
Μήκος	360 mm
Πλάτος	210 mm
Ύψος	710 mm
Βάρος	120 kg
Ποσότητα ηλεκτρολύτη	27.2 li

# 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ



- 1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ**  
(Αντώνης Κ. Θαναηλάκης)
- 2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**  
(Ευθύμιος Η. Βαζαίος)
- 3. ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**  
(Α. Νεοκλέους, Σ.Π. Κωνσταντινίδη)
- 4. ΑΥΤΟΝΟΜΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΙΚΡΟΥ ΚΑΙ ΜΕΣΑΙΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ**  
(Μαλαμής Βασίλης)
- 5. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**  
(Παναγιώτης Κουτσούμπας)
- 6. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**  
(Αλεξιάκης Αλέξανδρος)
- 7. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΠΙΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: Α) ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, Β) ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, Γ) ΥΔΑΤΙΝΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ, Δ) ΒΙΟΜΑΖΑ, Ε) ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ**  
(Καλδέλλης Ιωάννης)
- 8. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**  
(Βαζαίος Ευθύμιος)
- 9. ΕΠΙΛΟΓΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΛΛΕΚΤΩΝ**  
(Μπουγιούκος Κώστας Α., Σταθοπούλου Ιωάννα Α., Μητρόπουλος Παναγιώτης Β.)
- 10. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΙΣΧΥΟΣ**  
(Schwaller Anthony E., μετάφραση Γιώργος Σάγος)
- 11. PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION: EUROPEAN RESEARCH AND DEVELOPMENT – CONTRACTOR'S CATALOGUE**
- 12. APPLICATIONS OF PHOTOVOLTAICS**  
(R. Hill Bristol Philadelphia)

## **ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ INTERNET**

≈ [www.solarpv.com](http://www.solarpv.com)

≈ [www.pvpower.com](http://www.pvpower.com)

≈ [www.siemens.gr](http://www.siemens.gr)

≈ [www.e-marine-inc.com/products/solar/home.html](http://www.e-marine-inc.com/products/solar/home.html)

≈ [www.solar4power.com](http://www.solar4power.com)

≈ [www.solarsales.com.au](http://www.solarsales.com.au)

≈ [www.eugenfound.edu.gr](http://www.eugenfound.edu.gr)

≈ [www.ntua.gr](http://www.ntua.gr)

≈ [www.leisurepower.co.uk/products/solar\\_slarpanels/siemens.html](http://www.leisurepower.co.uk/products/solar_slarpanels/siemens.html)

≈ [www.store.yahoo.com/wind-sun/solar-panels-1-to-39-watts.html](http://www.store.yahoo.com/wind-sun/solar-panels-1-to-39-watts.html)

