



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ :ΕΥΣΤΑΘΙΑ ΛΙΖΑΡΔΟΥ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ  
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗ ΣΕΙΡΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΛΕΜΟΝΙΑ**



ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΓΙΑΝΝΗΣ ΒΟΥΡΔΟΥΜΠΑΣ

-ΧΑΝΙΑ 2006-

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ  
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗ ΣΕΙΡΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΛΕΜΟΝΙΑ

**Τομέας :**

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

**Φοιτήτρια :**

Λιζάρδου Ευσταθία

ΑΜ:299

**Επιβλέπων Καθηγητής :**

*Γιάννης Βουρδουμπάς*

**-ΧΑΝΙΑ 2006-**

**Ευχαριστίες**

Η πραγματοποίηση και η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την βοήθεια του εισηγητή και καθηγητή μου, κυρίου Ιωάννη Βουρδουμπά, ο οποίος μου προσέφερε την απαραίτητη βοήθεια του ώστε να ξεπεραστεί κάθε δυσκολία περάτωσης της.

Επίσης ιδιαίτερα σημαντική ήταν η συμβολή του συμφοιτητή και φίλου Δημήτρη Κουτουλάκη για την βοήθεια που προσέφερε με τις γνώσεις του αλλά και για την διαρκή υποστήριξη του.

Τέλος σημαντικό ρόλο έπαιξαν οι γονείς μου ,για την υποστήριξη τους που είχα όλα τα χρόνια σε κάθε στάδιο της ζωής μου.

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>8</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>9</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ</b> .....	<b>11</b>
1.1.2 ΟΙ ΠΡΩΤΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	11
<b>1.2 ΓΕΝΙΚΑ</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ</b> .....	<b>13</b>
1.3.1 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΛΗ .....	14
1.3.2 ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ (Η/Μ) ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΥΛΗ.....	15
1.3.3 ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ-ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ-ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ .....	15
<b>1.4 Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ</b> .....	<b>17</b>
1.4.1 Η ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ.....	17
1.4.2 ΟΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΗΛΙΑΚΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ .....	18
1.4.3 Η ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΤΟΥ «ΕΝΟΣ ΗΛΙΟΥ» .....	20
1.4.4 Η ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ .....	22
1.4.5 Ο ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ .....	23
1.4.6 Η ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΛΙΣΗ.....	25
1.4.7 ΡΟΗ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	28
1.4.8 Η ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	29
<b>1.5 Η ΕΝΩΣΗ P-N ΚΑΙ Η ΔΙΟΔΟΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ</b> .....	<b>31</b>
1.5.1 Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ .....	31
1.5.2 ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΚΑΙ ΟΠΕΣ .....	32
1.5.3 ΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΣΤΟΥΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ.....	33
1.5.4 ΦΟΡΕΙΣ ΠΛΕΙΟΝΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΦΟΡΕΙΣ ΜΕΙΟΝΟΤΗΤΑΣ.....	35
1.5.5 ΕΠΑΦΕΣ P-N .....	35
<b>1.6 ΦΩΤΟΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ-ΑΓΩΓΟΙ-ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ-ΜΟΝΩΤΕΣ</b> .....	<b>38</b>
1.6.1 ΑΓΩΓΟΙ.....	39
1.6.2 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ.....	39
1.6.3 ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΕΣ.....	40
<b>1.7 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ</b> .....	<b>41</b>
<b>1.8 Η ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ</b> .....	<b>43</b>
1.8.1 ΤΟ Φ/Β ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ .....	43
1.8.2 Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ .....	45
1.8.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΩΤΙΖΟΜΕΝΟΥ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ .....	47
[1],[2] .....	48
<b>1.9 Η ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΑ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΑ</b> .....	<b>48</b>
<b>1.10 ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ (ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ)</b> .....	<b>51</b>
1.10.1 Η ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ .....	51

1.10.2 Η ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΣΕ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ 53

<b>1.11 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ .....</b>	<b>55</b>
1.11.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ I-V ΕΝΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ .....	55
1.11.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΟΥ .....	56
1.11.3 ΣΗΜΕΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ .....	56
1.11.4 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ .....	57
1.11.5 Η ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΕΝΟΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ .....	58
<b>1.12 ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ .....</b>	<b>60</b>
1.12.1 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	60
1.12.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	63
<b>1.13 ΒΑΣΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΕΝΟΣ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>64</b>
1.13.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	65
<b>1.14 ΤΡΟΠΟΙ ΧΡΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (ΩΣ ΑΥΤΟΝΟΜΑ Ή ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ).....</b>	<b>66</b>
1.14.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	67
1.14.2 Η Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα .....	68
<b>1.15 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΛΕΜΟΝΙΑ.....</b>	<b>69</b>
1.15.1 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ .....	69
1.15.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ- (Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΛΕΜΟΝΙΩΝ ΩΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑ) .....	70
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 1.....</b>	<b>72</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 2.....</b>	<b>109</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΩΤΙΣΤΙΚΩΝ ΚΗΠΟΥ .....</b>	<b>125</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>132</b>

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η εργασία αυτή έχει ως τίτλο, την διερεύνηση της λειτουργίας συνδεσμολογίας φωτοβολταϊκών στοιχείων στη σειρά και παράλληλα καθώς και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λεμόνια.

Σε αυτή την εργασία έχουμε την λειτουργία Φωτοβολταϊκών στοιχείων με διάφορους συνδεσμολογίες είτε σε σειρά ή παράλληλα και την κατασκευή καμπύλων ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V) . Ακόμη έχουμε την λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος με λεμόνια με διάφορες συνδεσμολογίες και την κατασκευή καμπύλων ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

Η λειτουργία φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως ότι είναι ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή, ακόμη είναι σχετικά εύκολη η μέθοδος κατασκευή ηλιακών στοιχείων από πρώτες ύλες και επίσης σημαντικό είναι ότι η Φωτοβολταϊκή μετατροπή δεν προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον, ούτε θόρυβο ή ενόχληση και δεν δημιουργεί απόβλητα ή άχρηστα παραπροϊόντα. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι το υψηλό κόστος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων.

Η χρήση λεμονιών με τις λωρίδες χαλκού και τσίγκου είναι σαν δυο ηλεκτρόδια που αν βουτηχτούν σε αγωγό διάλυμα για παράδειγμα ένα όξινο διάλυμα που είναι ο χυμός του λεμονιού και συνδέσουμε τις λωρίδες εξωτερικά με καλώδια , η αντίδραση μεταξύ ηλεκτροδίων και διαλύματος δημιουργεί ένα κύκλωμα με συνεχή ροή ηλεκτρονίων, το οποίο μπορούμε να εκμεταλλευτούμε ,όπου και σε αυτή την αρχή στηρίζονται και η μπαταρίες των αυτοκινήτων. Η χρήση λεμονιών συμφέρει για μια συσκευή που καταναλώνει ελάχιστο ρεύμα όπως είναι ένα ρολόι με ενδείξεις LED ή ένα ηλεκτρικό θερμόμετρο.

Στο πρώτο πειραματικό μέρος χρησιμοποιούμε 12 φ/β στοιχεία τα οποία συνδέουμε σε σειρά ή παράλληλα και με χρήση πυρανόμετρου μετράμε την ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης με το πολύμετρο μετράμε την τάση και με την μεταβλητή αντίσταση έχουμε κάποιες τιμές αντιστάσεων. Τέλος με τον νόμο του (ohm) γίνεται και ο υπολογισμός έντασης και η ισχύ προκύπτει από την εξίσωση ( $P=V*I$ ).

Στο δεύτερο πειραματικό χρησιμοποιούμε δυο λεμόνια τα οποία στην αρχή κυλούμε τα λεμόνια με την παλάμη σε μια σκληρή επιφάνεια, πιέζοντας το για να σπάσουν μερικοί από τους θυλάκους με το χυμό στο εσωτερικό του στα οποία τοποθετούμε δύο μεταλλικές λωρίδες βαθιά μέσα στο λεμόνια, σε απόσταση 2-3 εκ., από τσίγκο η μια και από χαλκό η άλλη και κάνουμε συνδέσεις παράλληλα ή σε σειρά ,ακόμη συνδέουμε 4φ/β πλαίσια και ένα πολύμετρο παράλληλα στα λεμόνια, επίσης χρησιμοποιούμε και το πυρανόμετρο για μέτρηση ηλιακής ακτινοβολίας.

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο ΤΕΙ Φυσικών πόρων και Περιβάλλοντος ,παράρτημα Χανίων, στο εργαστήριο Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά την χρονική περίοδο Μάιο του 2005-2006.

Η εργασία αυτή έχει τρία μέρη στο *δύο πειραματικά* και ένα *θεωρητικό μέρος*. Στο **δεύτερο κεφάλαιο** έχουμε το *πρώτο πειραματικό μέρος* όπου αναφέρεται σε διάφορες συνδεσμολογίες με φ/β στοιχεία. Το **τρίτο κεφάλαιο** έχουμε το *δεύτερο πειραματικό μέρος* και αναφέρεται σε διάφορες συνδεσμολογίες μεταξύ λεμονιών και φ/β στοιχείων σε διάφορες συνδεσμολογίες με λεμόνια .Τέλος στο **τέταρτο κεφάλαιο** αναφέρεται ο σχεδιασμός φωτοβολταϊκής εγκατάστασης φωτιστικών του κήπου.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** είναι το θεωρητικό μέρος αναφέρονται αρχικά κάποια εισαγωγικά για την ηλιακή ακτινοβολία για το διαθέσιμο δυναμικό της ακτινοβολίας στην Ελλάδα και κάποιους Φωτοβολταϊκούς σταθμούς. Μετά ακολουθούν τα ιστορικά που έχουμε τις πρώτες φωτοβολταϊκές εφαρμογές στην Ευρώπη και την Αμερική. Στη συνέχεια στο έχουμε κάποια γενικά περί των φ/β στοιχείων.

Στο *κεφάλαιο 1.3* γίνεται αναφορά για την φύση του φωτός που εκεί έχουμε τις διάφορες θεωρίες για την φύση του φωτός από διάφορους επιστήμονες. Ακόμη συμπεριλαμβάνεται η έννοια του φωτονίου και στην συνέχεια έχουμε κάποια συνοπτικά χαρακτηριστικά διάδοσης ακτινοβολίας, μετά ακολουθεί η ανακλαστικότητα ,η διαπερατότητα και απορροφητικότητα το πώς ορίζονται το καθένα .

Στο κεφάλαιο 1.4 γίνεται αναφορά για την ηλιακή ενέργεια που εκπέμπει ο ήλιος , την φασματική σύσταση της ηλιακής ακτινοβολίας ,ακόμη την επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία. Παρακάτω αναφέρονται οι συμβατικές ηλιακές ακτινοβολίες με έννοιες όπως ζενιθιακή απόσταση ,μάζα αέρα ακόμη έχουμε την ακτινοβολία ενός ηλίου, την ηλιακή γεωμετρία που εκεί αναφέρεται η ζενιθιακή απόσταση , το ηλιακό αζιμούθιο, το χειμερινό και θερινό ηλιοστάσιο. Στη συνέχεια έχουμε τον προσανατολισμό του συλλέκτη , ποια η βέλτιστη κλίση , και τέλος εισάγουμε την ροή και ένταση και την διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο κεφάλαιο 1.5 αναφέρεται η ένωση p-n και η δίοδος ημιαγωγών που εκεί βλέπουμε το πώς γίνεται σε ημιαγωγούς η ένωση p-n ακόμη γίνεται κατανοητή η λειτουργία μιας διόδου και τι συμβαίνει όταν είναι ορθά ή ανάστροφα πολωμένη.

Στο κεφάλαιο 1.6 γίνεται μια μικρή εισαγωγή για την φωτοαγωγιμότητα για τους αγωγούς, ημιαγωγούς και τους μονωτές.

Στο κεφάλαιο 1.7 έχουμε τις βασικές τεχνολογίες παραγωγής Φ/Β στοιχείων οι οποίες είναι το μονοκρυσταλλικό ,πολυκρυσταλλικό και το άμορφο πυρίτιο.

Στο κεφάλαιο 1.8 έχουμε την εσωτερική λειτουργία ενός φ/β που εκεί γίνεται αναφορά φ/β φαινόμενο παρακάτω έχουμε την έννοια του φωτορεύματος και πως δημιουργείται, ακόμη την ηλεκτρική συμπεριφορά του φωτιζόμενου φ/β στοιχείου.

Στο κεφάλαιο 1.9 έχουμε την απορρόφηση της ακτινοβολίας στα φ/β στοιχεία και εδώ βλέπουμε τη μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης σε συνάρτηση με το μήκος κύματος ή την ενέργεια φωτονίων τις ακτινοβολίας για τους κυριότερους ημιαγωγούς των φ/β διατάξεων.

Στο κεφάλαιο 1.10 παρουσιάζεται η αποδοτική λειτουργία φ/β πλαισίων σε σταθερές και μεταβαλλόμενες συνθήκες, στην πρώτη περίπτωση για σταθερή ακτινοβολία αλλά για μεταβαλλόμενες τιμές τις αντίστασης και στην δεύτερη περίπτωση για μεταβαλλόμενη ακτινοβολία αλλά για σταθερή τιμή της αντίστασης.

Στο κεφάλαιο 1.11 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά φ/β όπου εδώ αναφέρεται η χαρακτηριστικά καμπύλη ενός Φωτοβολταϊκού στοιχείου, η καμπύλη φορτίου, το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος, ο συντελεστής πλήρωσης, η ονομαστική ισχύς φ/β πλαισίου και τα τεχνικά χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου .

Στο κεφάλαιο 1.12 έχουμε την σύνδεση και την κατασκευή φ/β στοιχείων δηλαδή τρόποι σύνδεσης και ονομασίες σύνδεσης ακόμη κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.

Στο κεφάλαιο 1.13 παρουσιάζεται η βασική μορφή ενός φ/β συστήματος δηλαδή την ροή ενέργειας σε φ/β σύστημα με αποθήκευση και μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη. Παρακάτω παρουσιάζονται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική.

Στο κεφάλαιο 1.14 αναφέρονται οι τρόποι χρήσης φ/β ως αυτόνομα ή συνδεδεμένα με το δίκτυο, τέλος ακολουθούν κάποιες εφαρμογές.

Στο κεφάλαιο 1.15 αναφέρονται κάποια εισαγωγικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λεμονιά, ακόμη γίνεται αναφορά στην ηλεκτρόλυση και την περιγραφή λειτουργίας μιας μπαταρίας (λειτουργία λεμονιών) .

Στην εργασία αυτή όσο αναφορά το πρώτο πειραματικό μέρος με τα φ/β όταν τα βάζαμε και σε σειρά και παράλληλα οι καμπύλες (P,I-V) είχαν την ίδια μορφή με την θεωρία της βιβλιογραφίας ,ακόμη στο δεύτερο πειραματικό μέρος με τις συνδεσμολογίες των λεμονιών όταν τα βάζαμε σε σειρά και παράλληλα οι καμπύλες (P,I-V) είχαν την ίδια μορφή με την θεωρία της βιβλιογραφίας .

# INVESTIGATION OF THE OPERATION OF VARIOUS SMALL SIZE SOLAR CELLS UNDER VARIOUS CONFIGURATIONS

## ABSTRACT

This study investigates the operation of photovoltaic panels connected either serial or parallel, as well as the electrical energy production by the use of lemons.

In this study we have two experimental parts and one theoretical part. The first experimental part is about photovoltaic panels connected serial and parallel and the construction of power electrical current curves and voltage (P,I-V ). In addition the second experimental part is about the serial and parallel connection of lemons connected with photovoltaics and the construction of power electrical current curves and voltage(P,I-V ).The third part is a theoretical approach in the use of the electrical energy produced from photovoltaic panels, for garden lightening.

In the first part is described the different connections of twelve photovoltaics, either serial or parallel. In each type of connection, resistors are applied parallel to the photovoltaics. The resistor values are known and the voltage is measured. By using the ohm equation (  $I = \frac{V}{R}$  ) and

applying the values measured previously results the current and the power values. The solar radiation is measured with a pyranometer and the voltage is measured with a voltmeter.

In the second part is established a connection of lemons (2 lemons), parallel and serial. In each type of connection there are photovoltaics applied. The connection of lemons is made by the use of copper and zinc conductors (thin copper and zinc stripes). The conductors are pressed into the lemons at a certain depth. Common cables are used to connect the conductors in order to establish the connection. Afterwards we apply the same procedure as above to determine the current and power values. Solar radiation (in case of photovoltaics) and voltage are also measured as previous in the same way.

The use of lemons is that the copper and the zinc conductors react as electrodes when they are pressed in the lemons then we have created a circuit with contentiously flow of electrons because the juice of lemons is acidic reacts as a conductive dilution. In this fermentation batteries are based on.

The use of photovoltaics has the advantages that they are renewable and free energy source and also its non-polluting the environment when we have the alteration from solar energy to electrical energy.

This study implement in the T.E.I of Crete branch of Chania, Department of Natural Resources and Environment, Laboratory of R.e.s during the year 2005.



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

*«Η παλιότερη γνωστή εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας αποδίδεται στον Αρχιμήδη (287-212 π.Χ), ο οποίος έκαψε τον Ρωμαϊκό στόλο μέσα στον κόλπο των Συρακουσών, χρησιμοποιώντας επίπεδα κάτοπτρα με τα οποία εστίασε τις ακτίνες του ηλίου πάνω στα πλοία του στόλου. Αυτό το κατόρθωμα έγινε στόχος συζήτησης για πολλούς επιστήμονες από την αρχαιότητα έως σχεδόν και τη σύγχρονη εποχή. Για αρκετούς αιώνες μετά από αυτό το γεγονός δεν αναφέρθηκε άλλη σημαίνουσα πρακτική εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας »*

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η «κινητήρια δύναμη» των ανέμων, των κυμάτων των βροχοπτώσεων και χιονοπτώσεων, ενώ και τα ορυκτά καύσιμα είναι (στην ουσία) αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια. Το μέγεθος της ηλιακής ενέργειας ξεπερνά κατά πολύ τους άλλους ενεργειακούς πόρους.

Η αξιοποίηση της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας έχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η ηλιακή ενέργεια είναι άφθονη και διαθέσιμη σε κάθε περιοχή της γης γεγονός σημαντικό για περιοχές με έλλειψη ορυκτών καυσίμων. Είναι ουσιαστικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και διατίθεται δωρεάν για εκμετάλλευση. Ενδείκνυται για τοπική χρήση αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό τη μεταφορά ενέργειας από και προς τις άλλες περιοχές. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μικρές μονάδες καλύπτοντας τις ανάγκες των μεμονωμένων κτηρίων. Τέλος η τεχνολογία για την εκμετάλλευση της είναι σχετικά απλή. Η ηλιακή ενέργεια, χωρίς να υποτιμάται η σημασία της για τις ανεπτυγμένες χώρες, μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό ενεργειακό πόρο για χώρες με χαμηλό ή μέσο επίπεδο οικονομικής ανάπτυξης.

Η χρονική διακύμανση και η μικρή πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι οι κύριες αιτίες για τη δημιουργία προβλημάτων που εμφανίζονται στις πρακτικές εφαρμογές της μετατροπής της σε άλλες χρησιμοποιήσιμες μορφές δευτερογενούς ενέργειας (θερμότητα, ηλεκτρική ενέργεια).

Εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας μπορεί να γίνει είτε με παθητικές μεθόδους, είτε αφού μετατραπεί αυτή σε άλλες πιο εύχρηστες μορφές ενέργειας. Οι παθητικές μέθοδοι έχουν κυρίως σχέση με την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας, είτε μέσω αρχιτεκτονικού σχεδιασμού των κτηρίων, είτε με εφαρμογές στην αγροτική οικονομία (π.χ θερμοκήπια), και η δύσκολη η ποσοτική εκτίμηση της συμβολής τους στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Από τις μεθόδους μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε άλλες εύχρηστες μορφές ενέργειας οι σημαντικότερες είναι οι εξής:

Οι φωτοθερμικές μέθοδοι που βασίζονται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας από μια επιφάνεια που συνεπάγεται την μετατροπή της σε θερμική ενέργεια και την αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας αυτής. Στην συνέχεια η θερμότητα απάγεται για την χρήση με κάποιο κατάλληλο ρευστό.

Η Φωτοβολταϊκή μετατροπή η οποία χαρακτηρίζεται από την άμεση χρήση των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς μεσολάβηση ενδιάμεσων σταδίων και θερμοδυναμικών κύκλων ή κινούμενων μερών. Στις εφαρμογές επιτυγχάνονται σήμερα βαθμοί απόδοσης μέχρι 14%, ενώ έχουν επιτευχθεί βαθμοί απόδοσης έως 45% με συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, και έως 65% σε εργαστηριακές συνθήκες με Φ/B κύτταρα πολλών επάλληλων στρώσεων υλικών διαφορετικού ενεργειακού διάκενου.

Το διαθέσιμο δυναμικό της ηλιακής ενέργειας είναι τεράστιο. Για την εκτίμηση του ηλιακού δυναμικού στην χώρα μας έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες. Το πλέον όμως αξιολογικό βήμα καταγραφής του ηλιακού δυναμικού για τις ενεργειακές εφαρμογές έγινε από την ΔΕΗ, η οποία εγκατέστησε στα τέλη της δεκαετίας του '70 αυτόματους καταγραφικούς

ηλιακούς σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί καταγράφουν την ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (Ρόδος, Χανιά, Αγρίνιο, Λάρισα, Κύθνος, Ζάκυνθος, Καβάλα, Σπάρτη, Μυτιλήνη), καθώς και την διάχυτη σε μερικούς από αυτούς (Ρόδος, Κύθνος). Υπάρχουν και αναλυτικά στοιχεία (σε ωριαία βάση) για ηλιακή ακτινοβολία σε διάφορες κλίσεις, διάχυτη, υγρασία, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου και διεύθυνση του, για τρία χρόνια (1989-1991), που έγιναν στο Ηλιακό Χωριό στη Λυκόβρυση Αττικής. Από τα στοιχεία αυτά προκύπτει μέση ετήσια ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο για την χώρα 1.300-1.700 kWh/m<sup>2</sup>/an. Με βάση τα δεδομένα αυτά, το ενεργειακό δυναμικό της προσπίπτουσας του εδάφους της Ελλάδας ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζεται ως το γινόμενο της μέσης ετήσιας ολικής ακτινοβολίας (kWh/m<sup>2</sup>/an) επί το εμβαδόν της επιφάνειας του κάθε νομού. Για τους νομούς που δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία, τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας θεωρείται ο μέσος όρος γειτονικών περιοχών. Για όσους νομούς όμως υπάρχουν περισσότερες από μια τιμές, θεωρείται καταλληλότερη ο μέσος όρος.

Το μέσο ετήσιο φυσικώς διαθέσιμο (θεωρητικό) δυναμικό της ακτινοβολίας για την Ελλάδα υπολογίζεται σε  $195 \cdot 10^6$  GWh/a. Το φυσικώς διαθέσιμο ηλιακό δυναμικό δεν είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμο, διότι υπόκειται σε σειρά περιορισμένων (γεωγραφικών, τεχνολογικών, κοινωνικών κ.λ.π). Το δυναμικό (βεβαιωμένο), που μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε για φωτοθερμικές ή φωτοηλεκτρικές χρήσεις αναφέρεται σε επιφάνεια που δεν περιλαμβάνει δάση, βοσκοτόπους, γεωργικές καλλιέργειες, βραχώδεις περιοχές, ύδατα – έλη. Η επιφάνεια αυτή χαρακτηρίζεται με τον όρο 'αστικές και βιομηχανικές περιοχές', αποτελεί περίπου το 1% της έκτασης της χώρας και περιλαμβάνει οικισμούς, χωριά, πόλεις, της γύρω από τις βιομηχανικές περιοχές καθώς και τους δρόμους. Το δυναμικό ανέρχεται σε  $2,45 \cdot 10^6$  GWh/a, όμως δεν μπορούμε να το εκμεταλλευτούμε για λόγους λειτουργικούς καθώς και διότι η ετήσια ζήτηση ενέργειας στην παρούσα κατάσταση είναι πολύ μικρότερη από αυτή που μπορεί να προσδώσει η ηλιακή ενέργεια.

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

[2][5]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

## 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΑ

### 1.1.2 ΟΙ ΠΡΩΤΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η Φωτοβολταϊκή μετατροπή είναι μια πολύ πρόσφατη τεχνολογική ανακάλυψη που βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης της. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι ήδη γνωστό από τον περασμένο αιώνα. Ήδη το 1891, που είχε αρχίσει να γίνεται αισθητή η μόλυνση του περιβάλλοντος στις βιομηχανικές πόλεις, ο R.Appleyard έγραφε ότι «ο ήλιος δεν σκορπάει άσκοπα την ενέργεια στο διάστημα, αλλά με τη χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών στοιχείων η ενέργεια αυτή θα συγκεντρώνεται σε ηλεκτρικές αποθήκες, και έτσι θα καταργηθούν οι ατμομηχανές και θα απαλλαγεί η ατμόσφαιρα από τον καπνό». Εκείνη την εποχή το κυριότερο καύσιμο ήταν το κάρβουνο, αφού δεν είχε αρχίσει η μαζική χρήση του πετρελαίου. Ήταν λοιπόν νωρίς για να προβλέψει ο Appleyard την υποκατάσταση και αυτής της πολύ ρυπογόνου ενεργειακής πηγής από την ηλιακή ακτινοβολία.

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

Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία αναπτύχθηκαν από την δεκαετία του '50 για να τροφοδοτήσουν τους διαστημικούς δορυφόρους με την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια που χρειαζόνταν για την λειτουργία των συσκευών τους.

Την ίδια εποχή τόσο στην Ευρώπη όσο και στις ΗΠΑ επανεμφανίζονται τα παθητικά ηλιακά συστήματα με κτηριακό προσανατολισμό το Νότο, ενώ τι 1901 έως και το 1913 παρατηρείται μια μεγάλη δραστηριότητα στην κατασκευή ηλιακών μηχανών με πρακτική εφαρμογή κυρίως στην άντληση νερού για αγροτικούς σκοπούς

Το 1901 τοποθετείται σε ένα αγρόκτημα της Πασαντήνα, στην Καλιφόρνια ένας ηλιακός συγκεντρωτής. Η εσωτερική επιφάνεια του συγκεντρωτή αποτελείται από 1788 καθρέπτες. Το σύστημα περιστρεφόταν με την φορά δεικτών ρολογιού προσαρμόζοντας κάθε 20 δευτερόλεπτα την εστίαση. Η παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται για άντληση νερού ποτίσματος.

Το 1907-1912 στις ΗΠΑ, ο μηχανικός F.Shuman, κατασκευάζει και τοποθετεί δύο ηλιακές μηχανές στο Τακόνι της Πενσυλβάνιας. Το σύστημα αποτελείτο από οριζόντιους συλλέκτες με κατασκευασμένες στην βάση τους από φύλλο μαύρου σιδήρου, σαν απορροφητική επιφάνεια. Το σύστημα χρησιμοποιείτο για άντληση ποτιστικού νερού.

Το 1913 στην Αίγυπτο, κατασκευάζεται στο Maedi της Αιγύπτου το μεγαλύτερο ηλιακό σύστημα για άντληση νερού από τον Νείλο. Οι ηλιακοί περιστρεφόμενοι συλλέκτες αποτελούντο από παραβολικές σκάφες επενδεδυμένες με καθρέπτες και με προσανατολισμό Βορρά –Νότο.

Το 1936, στις ΗΠΑ παρουσιάζεται το πρώτο ραδιόφωνο που λειτουργεί με ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Είναι η πρώτη εφαρμογή φωτοβολταϊκών.

Το 1954, στις ΗΠΑ Στα εργαστήρια Bell κατασκευάζονται τα πρώτα εμπορικά ηλιακά κύτταρα, με χωρητικότητα 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή των προηγούμενων γενεών.

Το 1965, στην Ιταλία . ο καθ. G Francia, του Πανεπιστημίου της Γένοβας Εγκαθιστά στο St. Ilario, πλησίον της Γένοβας, τον πρώτο ηλιακό πύργο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα ήταν πειραματικό και αποτελείτο από 270 κυκλικούς ηλιοστάτες διαμέτρου 1m οι οποίοι είχαν παροχή 50 kw.

Το 1979 στις ΗΠΑ Στα Εργαστήρια της Sandia, στο Albuquerque του New Mexico εγκαθίσταται ο πρώτος εμπορικός ηλιακός ηλεκτρικός σταθμός αποτελούμενος από 220 ορθογώνιους ηλιοστάτες , επιφάνειας  $6*6 \text{ m}^2$  έκαστος, με ηλεκτρική παροχή 5MW

Το 1983 στις ΗΠΑ, Ένας δεύτερος ηλιακός σταθμός κατασκευάζεται και λειτουργεί στο Barstow, California. Οι Ηλιοστάτες είναι παρόμοιοι με αυτούς Albuquerque, η παροχή όμως ανέρχεται σε 35 MW.

Από το 1983 έως σήμερα έχουν εγκατασταθεί διάφοροι ηλιακοί σταθμοί παραγωγής ρεύματος, θερμικής ενέργειας ή συνδυασμού των δύο, σε διάφορα σημεία του πλανήτη, που τροφοδοτούν βιομηχανίες με την αντίστοιχη ενέργεια. Παρέχουν θερμική ενέργεια σε διάφορες θερμοκρασίες με ανώτερο όριο υπέρθερμο ατμό  $400^{\circ}\text{C}$ .

[2],[5]

## 1.2 ΓΕΝΙΚΑ

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

Τα φ/β στοιχεία κατασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως είναι το δεύτερο στη σειρά διαδεδομένο στοιχείο Πυρίτιο, το Γερμάνιο, οι χημικές ενώσεις Αρσενιούχο Γάλλιο, Φωσφορούχο Ίνδιο και πολλά άλλα υλικά. Σε αυτά ενσωματώνονται τεχνητά ίχνη διαφόρων άλλων στοιχείων (προσμίξεις) και έτσι αποκτούν την ιδιότητα να εμφανίζουν μια μικρή τάση στα άκρα τους όταν φωτίζονται. Η τάση αυτή που στην περίπτωση του Φ/Β στοιχείου από πυρίτιο είναι τάξης των 0,5 V, μπορεί να τροφοδοτήσει με ηλεκτρικό ρεύμα ένα καταναλωτή.

Επειδή οι διάφοροι καταναλωτές είναι κατασκευασμένοι να λειτουργούν με ορισμένη συνεχή ή εναλλασσόμενη τάση, είναι ανάγκη η συνεχής τάση των φ/β στοιχείων να μετατραπεί στην κατάλληλη τάση λειτουργίας των καταναλωτών.

Το φ/β σύστημα θα πρέπει να παρέχει επαρκή ηλεκτρική ενέργεια και στους περιόδους που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια (νυκτερινές ώρες, συννεφιασμένες μέρες). Αυτό επιτυγχάνεται με τη συσκευή αποθήκευσης που αποτελείται από συσσωρευτές

(μπαταρίες) πολύς καλής κατασκευής, ικανούς να αποθηκεύουν το περίσσειμα της παραγόμενης από τα φ/β στοιχεία ηλεκτρικής ενέργειας για να χρησιμοποιηθεί όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή.

Τα φ/β συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν με δύο τρόπος. Με τον πρώτο τρόπο, το σύστημα λειτουργεί σαν ανεξάρτητο και αυτοτελές και τροφοδοτεί με όλο το ρεύμα που παράγει το οικοδόμημα ή το σύμπλεγμα κτιρίων για το οποίο κατασκευάστηκε . Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη και η συσκευή αποθήκευσης των περισσευμάτων της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Με το δεύτερο τρόπο το σύστημα όπως είναι συνδεδεμένο με ένα σπίτι ή το συγκρότημα κτιρίων, συνδέεται συγχρόνως και με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο διανομής. Με τον τρόπο αυτό , όταν το σύστημα παράγει περίσσειμα ηλεκτρικής ενέργειας αυτά διοχετεύονται σε άλλα κτιριακά συγκροτήματα που δεν είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο. Στην περίπτωση που το σύστημα δεν παράγει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται το συγκρότημα των κτηρίων, συμπληρώνει με ενέργεια που αντλεί από το δίκτυο.

Γενικά η τεχνολογία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β στοιχεία είναι βασισμένη σε συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί μελετώντας την φύση του φωτός και την δομή της ύλης πράγματα τα οποία μερικά θα αναφερθούν και παρακάτω.

[1],[6]

### 1.3 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Η φύση του φωτός δεν είχε εξηγηθεί ικανοποιητικά μέχρι της αρχές του αιώνα μας. Πριν από 300 περίπου χρόνια ο Νεύτωνας διατύπωσε τη σωματιδιακή θεωρία.

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή το φως εκπέμπεται κατά τρόπο ασυνεχή (μια ροή καθορισμένων ποσών μαζεμένης ενέργειας).

Επειδή με την θεωρία του Νεύτωνα δεν ήταν δυνατών να εξηγηθούν τα μέχρι τότε γνωστά φαινόμενα (συμβολή, περίθλαση, πόλωση) επικράτησε η κυματική θεωρία του Huygens. Τα κύματα αυτά δημιουργούνται από τις φωτεινές πηγές και διαδίδονται μέσα στο υποθετικό διάφανο ελαστικό μέσο που λέγεται αιθέρας. Όπως δηλαδή συμβαίνει με τη μεταφορά ενέργειας από τα κύματα που δημιουργούνται μετά από μια διαταραχή που γίνεται στην οριζόντια επιφάνεια του νερού.

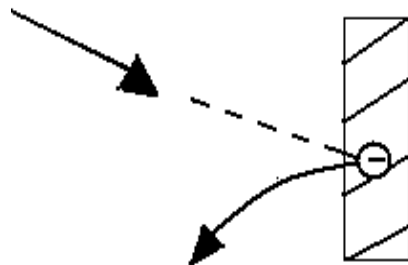
Αργότερα (στα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα) ο Maxwell έδειξε ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα, δηλαδή είναι διάδοση ηλεκτρομαγνητικά κύματα, δηλαδή είναι η διάδοση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, η οποία δεν προϋποθέτει την αυθαίρετη παραδοχή του αιθέρα.

Το 1900 ο Γερμανός φυσικός Max Planck προσπαθώντας να εξηγήσει την ακτινοβολία που εκπέμπει το «μαύρο σώμα» οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι το φως (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) εκπέμπεται κατά μικρά ποσά μαζεμένης ενέργειας τα οποία ονόμασε Κβάντα

Το 1905 ο Albert Einstein στηριζόμενος στη θεωρία του Plank εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (το φαινόμενο αυτό βοήθησε στη σταδιακή κατασκευή των πρώτων βολταϊκών στοιχείων) και συντέλεσε στη γενίκευση της θεωρίας κβάντα. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή το άτομο εκπέμπει φωτεινή ενέργεια ασυνεχώς κατά χωριστές ποσότητες που ονομάζονται κβάντα ή φωτόνια κατά τον Einstein.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο που είναι εξαγωγή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια μετάλλου που φωτίζεται στο (σχήμα 1) και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο που είναι η δημιουργία τάσης μεταξύ δύο άκρων μιας κρυσταλλοδιόδου που φωτίζεται εξηγούνται με τη σωματιδιακή θεωρία. Ότι δηλαδή η ενέργεια του φωτός που προσπίπτει το υλικό κατανέμεται σε φωτόνια και σε περίπτωση που ένα φωτόνιο συναντήσει ένα ηλεκτρόνιο στο εσωτερικό του υλικού, του δίνει όλη την ενέργεια του. Φυσικά όλο το αποτέλεσμα όλης αυτής της διαδικασίας εξαρτάται από το είδος του υλικού και από την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που είναι ανάλογη προς τη συχνότητα της.

ΦΩΤΟΝΙΟ



Σχήμα 1.

Το ηλεκτρόνιο εξέρχεται από την επιφάνεια του μετάλλου αφού πάρει την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο)

### 1.3.1 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΛΗ

Το **φωτόνιο**, έννοια που εισήχθη στην επιστημονική ορολογία από τον Einstein, είναι το ελάχιστο ποσό (quantum) της ενέργειας, που εκπέμπεται κατά τις ενεργειακές μεταβολές των ηλεκτρονικών διπολικών ταλαντώσεων της ύλης, σε κάθε συχνότητα  $\nu$ . Συνεπώς, το φωτόνιο αποτελεί το ελάχιστο ποσό ενέργειας αλληλεπίδρασης μεταξύ ηλεκτρομαγνητικού κύματος και δομικών λίθων της ύλης. Η σχέση μεταξύ της ενέργειας,  $E$  και της συχνότητας,  $\nu$ , ενός φωτονίου δόθηκε από τον Plank : $E=h*\nu$ , όπου  $h$ , η σταθερά Plank. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ΗΜ) από μια πηγή φωτός, γενικά, συνίσταται από μεγάλο και διαφορετικό πλήθος φωτονίων σε κάθε συχνότητα (φάσμα συχνοτήτων), χαρακτηριστικό της πηγής και της θερμοκρασίας της, όπως π.χ το ηλιακό φως.

Μια δέσμη φωτός, που διαδίδεται σε υλικό Α με δείκτη διάθλασης  $n_1$ , προσπίπτει στην διαχωριστική επιφάνεια του Α με άλλο σώμα, Β, με δείκτη διάθλασης  $n_2$ . Εκεί αφενός ανακλάται, ακολουθώντας το νόμο της ανάκλασης ( $\pi=\alpha$ ), αφετέρου διαθλάται, ακολουθώντας αντίστοιχα, το νόμο της διάθλασης ( $n_1\eta\mu\pi=n_2\eta\mu\delta$ ), όπου  $\pi,\alpha$  και  $\delta$  οι γωνίες πρόσπτωσης,

ανάκλασης και διάθλασης, αντίστοιχα. Ως δείκτης διάθλασης  $n$  ενός υλικού ορίζεται το αντίστοιχο πηλίκο:  $n=c_0/c$  όπου  $c_0, c$ , η ταχύτητα του φωτός στο κενό και στο μέσο αντίστοιχα ( $c < c_0$ ).

### 1.3.2 ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΤΑ ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ (Η/Μ) ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΥΛΗ.

- Η συχνότητα της ακτινοβολίας δεν αλλάζει κατά τη διάδοση του φωτός από ένα υλικό μέσο σε άλλο καθώς επίσης και κατά την ανάκλασή του στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων.
- Η ταχύτητα του φωτός,  $c$ , ορισμένου μήκους κύματος  $\lambda$ , μέσα σε ένα μέσο καθορίζεται από την φύση του μέσου αυτού.
- Μέσα σε ορισμένο μέσο, η ταχύτητα του φωτός,  $c$ , εξαρτάται από το μήκος κύματος  $\lambda$  (ή τη συχνότητα  $\nu$ ). Ομοίως εξαρτάται και ο δείκτης διάθλασης του υλικού, σύμφωνα με τη σχέση του ορισμού του. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται **διασκεδασμός**. Η σχέση εξάρτησης  $c=f\lambda$  (ή  $c=f\lambda(\nu)$ ), λέγεται σχέση διασκεδασμού και μπορεί να δοθεί με τις αντίστοιχες εκφράσεις, που αφορούν το δείκτη διάθλασης ( $n=c_0/f\lambda(\nu)=c_0/f\lambda(\nu)$ ).
- Η διαδιδόμενη ακτινοβολία σε ένα υλικό, γενικά, απορροφάται σταδιακά, καθώς εισχωρεί όλο και πιο βαθιά σε αυτό. Το ποσοστό της απορροφούμενης έντασης εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και το υλικό. Η ένταση  $J$  της ακτινοβολίας ( $W/m^2$ ), σε βάθος  $d$  μέσα στο σώμα δίδεται από το νόμο του Beer.

### 1.3.3 ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ-ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ-ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Έστω  $E_{\text{προσπ}}$  η ενέργεια Η/Μ ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός σώματος, σε ορισμένο χρόνο,  $E_{\text{ανακλ}}$  το μέρος της που ανακλάται,  $E_{\text{διαπ}}$ , το μέρος της που διαπερνά την επιφάνεια πρόσπτωσης και εισέρχεται στο εσωτερικό του σώματος. Από την εισερχόμενη ενέργεια, ένα μέρος της, ίσο με  $E_{\text{απορ}}$  απορροφάται από το υλικό του σώματος και το υπόλοιπο, εξαρτώμενο από το πάχος του σώματος και το υπόλοιπο, εξαρτώμενο από το πάχος του σώματος, εξέρχεται. Ορίζονται οι ποσότητες

Απορροφητικότητα  $\alpha$ , του σώματος:  $\alpha=E_{\text{απορ}}/E_{\text{προσπ}}$

Ανακλαστικότητα  $\rho$ , της επιφάνειας του σώματος:  $\rho=E_{\text{ανακλ}}/E_{\text{προσπ}}$

Διαπερατότητα  $\tau$ , του σώματος:  $\tau=E_{\text{διαπ}}/E_{\text{προσπ}}$

Με βάση τις ποσότητες αυτές, η διατήρηση της ενέργειας γράφεται:

$$\tau + \rho + \alpha = 1$$

Αν πρόκειται για διαφανές υλικό, τότε για τη περιοχή του φάσματος που είναι διαφανές υλικό, τότε για την περιοχή του φάσματος που είναι διαφανές,  $\alpha=0$  και συνεπώς,

$$\tau + \rho = 1$$

Στην περίπτωση ενός πλήρως αδιαφανούς σώματος, π.χ. ενός μετάλλου, η διαπερατότητα είναι μηδέν ( $\tau=0$ ) και τότε:

$$\rho + \alpha = 1$$

Γενικά, η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσα σε ένα υλικό οφείλεται στη διέγερση των ταλαντευόμενων ηλεκτρικών φορτίων του (ηλεκτρόνια- πυρήνες ατόμων του υλικού), σε ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις. Το φαινόμενο περιγράφεται, συνήθως, μέσω της έννοιας της ηλεκτρικής διπολικής ροπής των δομικών λίθων του υλικού, που σχετίζονται με ταλαντώσεις των ατόμων μέσα στα μόρια, με περιστροφές των μορίων και με διεγέρσεις ηλεκτρονίων στα άτομα.

Στην περίπτωση των ημιαγωγών, μια πολύ σημαντική απορρόφηση του φωτός, μπορεί να γίνει από τα ηλεκτρόνια σθένους του υλικού. Η απορρόφηση αυτή καθορίζεται από το μέγεθος της ενέργειας των φωτονίων σε σχέση με το ενεργειακό χάσμα  $E_g$ , του ημιαγωγού. Αν η ενέργεια του φωτονίου,  $h\nu$ , είναι μικρότερη του  $E_g$  ( $h\nu = hc/\lambda < E_g$ ), το φωτόνιο δεν απορροφάται και κατά συνέπεια το υλικό είναι διαφανές σε αυτό το μήκος κύματος  $\lambda$ .

Στην περίπτωση που η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη ή ίση αυτής του ενεργειακού χάσματος ( $h\nu \geq E_g$ ), το φωτόνιο απορροφάται από ηλεκτρόνιο σθένους, το οποίο καθίσταται 'ελεύθερο' μέσα στον ημιαγωγό, αφήνοντας ακάλυπτο δεσμό την οπή. Το ηλεκτρόνιο <<ανεβαίνει>> ενεργειακά στην ζώνη αγωγιμότητας

Στην περίπτωση, μάλιστα, που η ενέργεια των φωτονίων είναι μεγαλύτερη της  $E_g$ , η γένεση του ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής, συνοδεύεται από την θέρμανση του υλικού. Το επιπλέον του  $E_g$ , ποσό ενέργειας,  $h\nu - E_g$ , αποδίδεται από αντίστοιχα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας στο πλέγμα του υλικού συμβάλλοντας στην αύξηση της θερμοκρασίας του.

Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται χαρακτηριστικά από το υλικό και τη συχνότητα (ή ισοδύναμα, την ενέργεια ή μήκος κύματος) της ακτινοβολίας. Η μονάδα εκφράζεται σε αντίστροφες μονάδες μήκους (συνήθως σε  $\text{cm}^{-1}$ ) και η αντίστροφη τιμή του προσδιορίζεται το πάχος του υλικού, μέσα στο οποίο η ποσοστιαία ελάττωση της έντασης του φωτός είναι 63,2%. Παραδείγματος χάριν, αν ο συντελεστής απορρόφησης ενός υλικού, σε ορισμένο μήκος κύματος, είναι  $\alpha_\lambda = 10^4 \text{ cm}^{-1}$ , αυτό σημαίνει ότι η ένταση της ακτινοβολίας, που διαπερνά στρώμα πάχους  $d = 1/\alpha_\lambda = 10^{-4} \text{ cm}$  ( $1 = \mu\text{m}$ ), μειώνεται στο 36,8% της τιμής που είχε στην αρχή του στρώματος.

[1],[6]



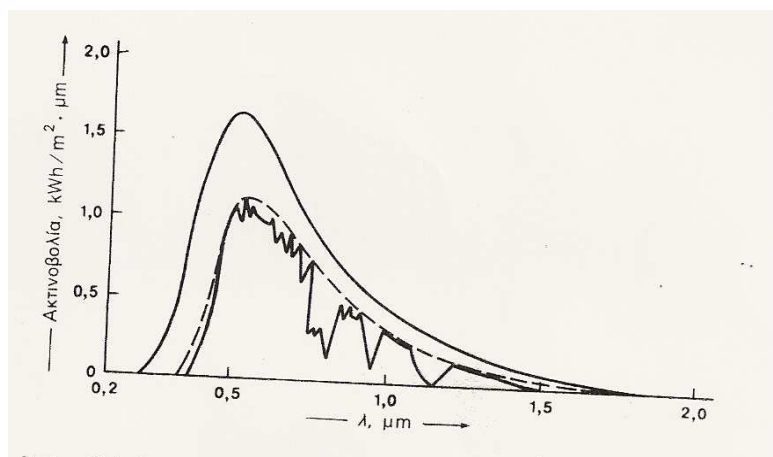
## 1.4 Η ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 1.4.1 Η ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

Η διαμόρφωση του φάσματος του φωτός που εκπέμπει ο ήλιος προσαρμόζεται συνήθως με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5800K, όση είναι, κατά μέσο όρο, η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας του ηλίου. Η προσέγγιση αυτή είναι επαρκής για μελέτη των θερμικών εφαρμογών της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως πχ η θέρμανση νερού (<<ηλιακοί θερμοσίφωνες>>). Στις περιπτώσεις αυτές μας ενδιαφέρει συνήθως η συνολική θερμική ισχύς της ακτινοβολίας και ο μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας πχ στους ηλιακούς συλλέκτες του <<θερμοσίφωνα>> ή τους θερμοσυσσωρευτικούς τοίχους του κτηρίου κ.λ.π. Δεν είναι όμως το ίδιο και για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας διότι αυτή καθορίζεται από την λεπτομερειακή φωτονική σύσταση της ακτινοβολίας. Άλλωστε, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι κατασκευασμένα από ημιαγωγούς και η δυνατότητα απορρόφησης των φωτονίων της ακτινοβολίας σε έναν ημιαγωγό εξαρτάται ουσιαστικά από την σύγκριση της τιμής της ενέργειάς τους, σε σχέση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού.

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

Η ανάγκη για την λεπτομερή εξέταση της φασματικής σύστασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές γίνεται φανερή στο παρακάτω σχήμα που δείχνει τη μεγάλη διαφοροποίηση του πραγματικού φάσματος του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της γης, σε σχέση με τη προσέγγιση που αναφερθήκαμε παραπάνω. Βλέπουμε ότι το ηλιακό φως αποκτά μια πολύ ανώμαλη φασματική κατανομή, που οφείλεται σε εκλεκτικές απορροφήσεις και σκεδάσεις στα συστατικά της ατμόσφαιρας που διασχίζει.



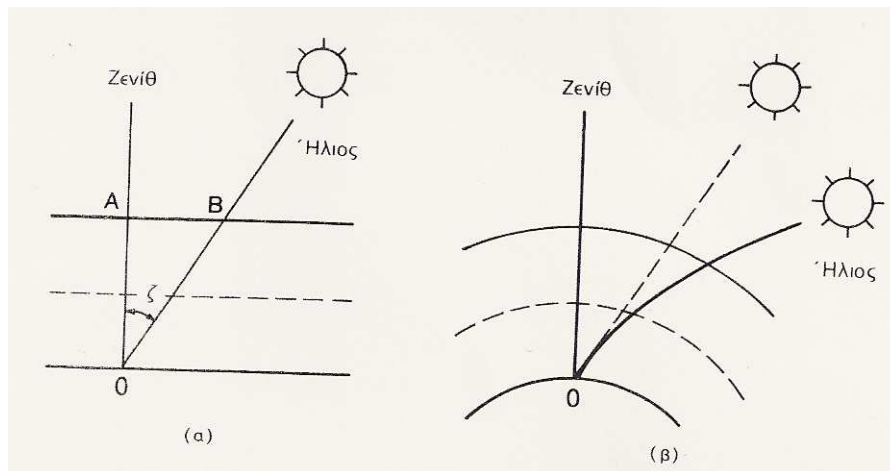
**Σχήμα 2.** Το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στη εκπομπή μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5800K (εξωτερική συνεχής γραμμή), το φάσμα της ίδιας της πηγής ύστερα από απορροφήσεις από το όζον και σκεδάσεις από τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας (ασυνεχής γραμμή) και το πραγματικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης σε συνθήκες μέτριας υγρασίας (εσωτερική συνεχής γραμμή)

Ενδεικτική είναι άλλωστε, η επίδραση 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 περίπου  $900-1000 \text{ W/m}^2$ , η τιμή της αυξάνεται κατά περίπου  $7 \text{ W/m}^2$  για κάθε  $100 \text{ m}$  ύψους της τοποθεσίας, επειδή μειώνεται αντίστοιχα το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας που διασχίζουν οι ηλιακές ακτίνες.

Το όζον, που είναι άφθονο στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, απορροφά έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία, και ειδικότερα στην περιοχή  $0,2-0,35 \mu\text{m}$ , το μοριακό οξυγόνο απορροφά κυρίως στην περιοχή του ερυθρού ( π.χ.  $0,63$  και  $0,69 \mu\text{m}$ ), το διοξείδιο του άνθρακα στο υπέρυθρο ( $2,7$  και  $4,3 \mu\text{m}$ ) και οι υδρατμοί στο ερυθρό και στο υπέρυθρο. Επίσης, από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, συνήθως λιγότερο από το  $60\%$  είναι άμεση, σε μορφή δέσμης ακτινών, που μπορούν π.χ. να εστιαστούν με κάτοπτρα ή φακούς. Η υπόλοιπη είναι διάχυτη, διότι έχει προηγουμένως σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια που αιωρούνται στον αέρα, ανάλογα βέβαια με τη σύσταση της ατμόσφαιρας και το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα σ' αυτήν.

#### 1.4.2 ΟΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΗΛΙΑΚΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ

Πέρα από τη γεωγραφική θέση και το υψόμετρο, η τελική μορφή και ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες, και κυρίως τη θέση του ήλιου στον ουρανό και την περιεκτικότητα της υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Συμβατικά, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα μέχρι τη στάθμη της θάλασσας, που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του ήλιου, χαρακτηρίζεται από μία κλίμακα **μάζας αέρα** AM (air mass, ονομάζεται επίσης οπτική αέρια μάζα) βαθμολογημένης με την τέμνουσα (το αντίστροφο του συνημιτόνου) της **ζενιθιακής απόστασης**(ζ), δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στη θέση του ήλιου και στην κατακόρυφο (Σχήμα 3). Δηλαδή η κλίμακα



**Σχήμα 3.** Η εξάρτηση της κλίμακας μάζας αέρα (AM) από τη θέση του ήλιου. (α) Απλοποιημένη απεικόνιση, με την ατμόσφαιρα να έχει επίπεδη ανάπτυξη σε άπειρη έκταση. Εξ ορισμού είναι  $AM = OB/OA = 1/\sin \zeta$ . (β) Η πραγματική διαμόρφωση της γήινης ατμόσφαιρας, με τα στρώματα της να ορίζονται από σφαιρικές επιφάνειες, και η αντίστοιχη ατμοσφαιρική διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της μέσα από τα στρώματα αυτά.

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 AM 1,5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία  $45^\circ$  από το ζενίθ, ως AM2 με τον ήλιο σε γωνία  $60^\circ$  κ.λ.π. Το μηδέν της κλίμακας (AM0) συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της γης από τον ήλιο. Στον πίνακα 3,1 γράφονται οι πυκνότητες της ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες πρότυπες συνθήκες στην κλίμακα μάζας αέρα. Πάντως, η παραπάνω προτυποποίηση δεν είναι πάρα πολύ αυστηρή. Έτσι π.χ. εκτός από τις τιμές του πίνακα, η AM0 αναφέρεται επίσης ως  $1353 \text{ W/m}^2$ , ή AM2 ως  $740 \text{ W/m}^2$  κλπ.

### ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα (Air Mass)

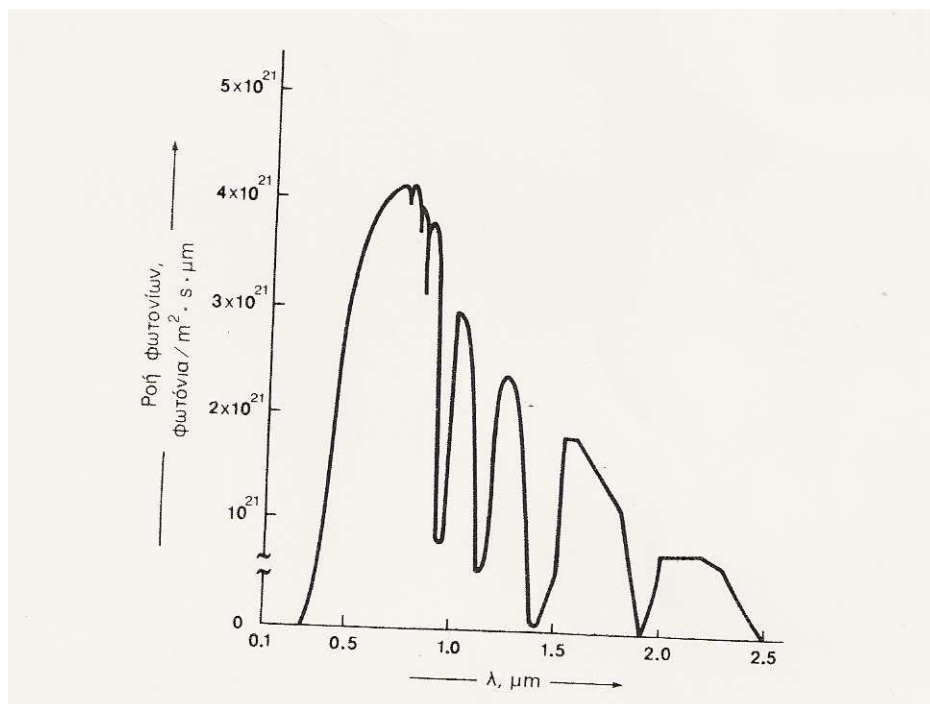
Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς	Μέση ενέργεια των φωτονίων
AM0	Στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα.	1350 $\text{W/m}^2$	1,48 eV
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα.	1060	1,32
AM2	Απόσταση του ήλιου $60^\circ$ από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση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

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

Πάντως, έτσι και αλλιώς, το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας συγκεντρώνεται στη φασματική περιοχή του κυανού και του πράσινου, και ειδικότερα σε μήκη κύματος από 0,45 μέχρι 0,6  $\mu\text{m}$ , που αντιστοιχεί σε φωτόνια ενέργειας περίπου 2,1-2,8 eV. Για την αντιστοιχία μήκους κύματος και ενέργειας των φωτονίων, υπενθυμίζεται ότι από τη σχέση  $v=c/\lambda$ , που συνδέει τη συχνότητα  $\nu$  και το μήκος κύματος  $\lambda$  μιας ακτινοβολίας με την ταχύτητα του φωτός  $c$ , βρίσκουμε ότι η ενέργεια του φωτονίου  $h\nu$ , σε eV, συνδέεται με το αντίστοιχο μήκος της ακτινοβολίας  $\lambda$ , σε  $\mu\text{m}$ , με σχέση  $h\nu=1.238/\lambda$ .

### 1.4.3 Η ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΤΟΥ «ΕΝΟΣ ΗΛΙΟΥ»

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



**Σχήμα 4. 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 περισσότερο κατοικημένες και αναπτυγμένες περιοχές της γης. Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλεύεται στα  $1000 \text{ W/m}^2$ , ονομάζεται συμβατικά **ακτινοβολία ενός ήλιου** (ή ενός πλήρους ήλιου) και παίρνεται συχνά σαν βάση σύγκρισης της ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Η μονάδα αυτή χρησιμοποιείται επίσης για την αναφορά της **ισχύος αιχμής** των φωτοβολταϊκών διατάξεων, καθώς και για την πυκνότητα της ακτινοβολίας στις συγκεντρωτικές φωτοβλαϊκές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν φακούς ή κάτοπτρα. Π.χ. η συγκεντρωμένη δέσμη ηλιακής ακτινοβολίας με πυκνότητα ισχύος  $100 \text{ kW/m}^2$  ονομάζεται «100 ήλιου».

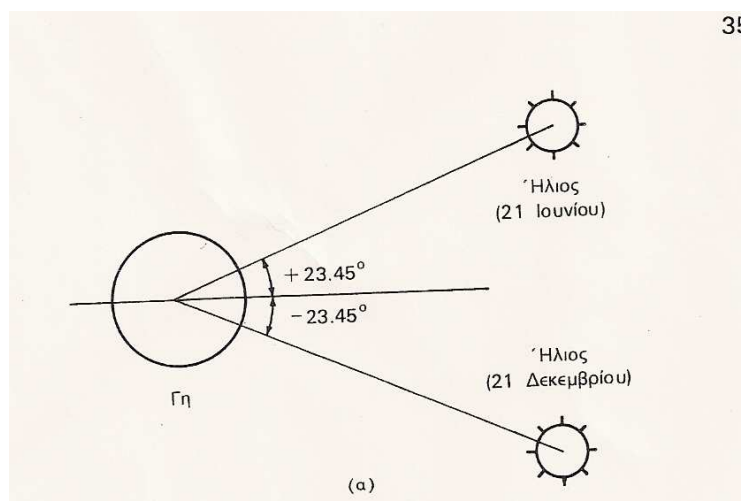
Οι συνθήκες AMO και AM2 χρησιμοποιούνται συχνά ως πρότυπες για τον έλεγχο και την αξιολόγηση των ηλιακών στοιχείων που προορίζονται για διαστημικές και επίγειες εφαρμογές, αντίστοιχα. Για αντικειμενικές συγκρίσεις είναι απαραίτητο να γίνεται σαφής αναφορά των συνθηκών διεξαγωγής των μετρήσεων, διότι οι ιδιότητες των ηλιακών στοιχείων, και γενικότερα η απόδοσή τους, επηρεάζονται σημαντικά από τη μορφή της ακτινοβολίας που δέχονται. Π.χ. από τις δύο παραπάνω συνθήκες, η AM2 δίνει μεγαλύτερη απόδοση στα ηλιακά στοιχεία πυριτίου από όσο η AMO, διότι ένα μεγάλο μέρος από τα φωτόνια από την υπεριώδη και την υπέρυθρη περιοχή της ακτινοβολίας, που όπως δείχθηκε στο (σχήμα 4) έχουν αφαιρεθεί από την AM2, έχουν σχετικά μικρή μόνο συμβολή ή είναι εντελώς άχρηστα για Φωτοβολταϊκή μετατροπή με πυρίτιο. Συγκεκριμένα, η ενέργεια των φωτονίων της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι μικρότερη από αυτό. Επομένως, στην πρώτη περίπτωση, ένα μικρό μόνο μέρος της ενέργειας των φωτονίων αξιοποιείται για τη δημιουργία ελευθέρων ηλεκτρονίων και οπών. Επίσης, στην δεύτερη περίπτωση, δηλαδή για το μεγαλύτερο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, η ενέργεια των φωτονίων δεν επαρκεί για τη διέγερση των ηλεκτρονίων σθένους του πυριτίου και τη μεταφορά τους στη ζώνη αγωγιμότητας. Έτσι, η απόδοση ενός κοινού ηλιακού στοιχείου πυριτίου καλής ποιότητας, μπορεί να είναι 16% σε συνθήκες AM2, ενώ σε συνθήκες AMO δεν ξεπερνά το 11,5%.

#### 1.4.4 Η ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

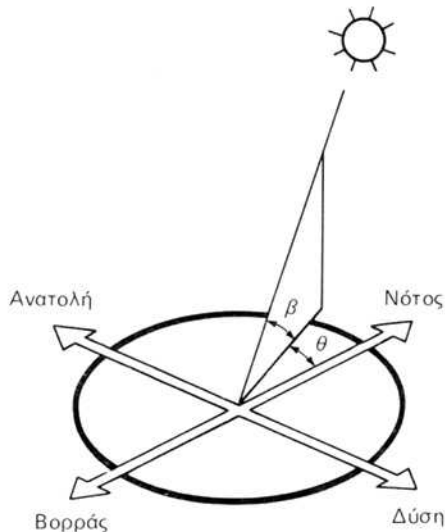
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και θα αναλυθεί και στη συνέχεια, η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας και η φωτονική της σύσταση παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ανάλογα με την ώρα, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία, σε αιωρούμενα σωματίδια και σε άλλα συστατικά.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

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια μιας χρονιάς, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της **απόκλισης** ( $\delta$ ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ηλίου, και στο επίπεδο του ισημερινού (Σχήμα 5). Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο. Οι ακραίες της τιμές είναι  $+23.45^\circ$  στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και  $-23.45^\circ$  στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο).

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



Σχήμα 5. Η ακραία απόκλιση του ήλιου για το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο

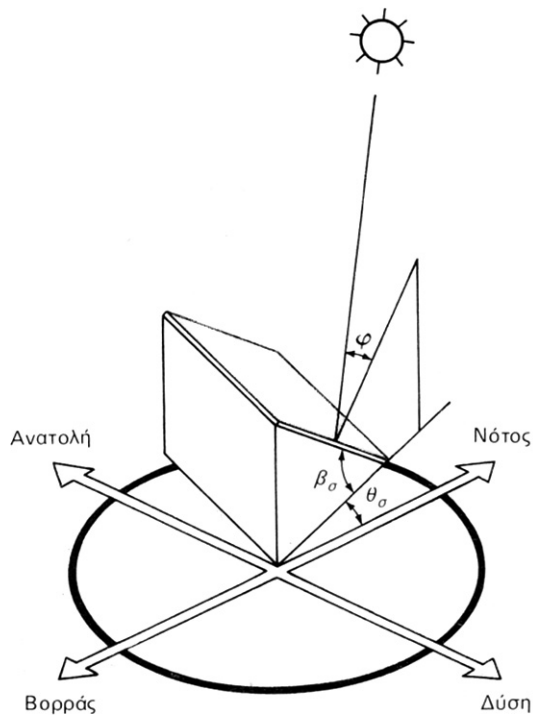


**Σχήμα 6. Οι γωνίες του ύψους( $\beta$ ) και του αζιμούθιου ( $\theta$ ) που περιγράφουν κάθε στιγμή την θέση του ουρανού και του ηλίου**

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες: το ύψος και το αζιμούθιο. Το **ύψος** του ήλιου ( $\beta$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα (Σχήμα 6). Αντί για το ύψος, χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική της γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, που όπως είδαμε ονομάζεται **ζενιθιακή απόσταση** (ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου. Ζενίθ είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου, και ο όρος προέρχεται από την αραβική λέξη sent που σημαίνει ευθεία οδός. Η δεύτερη χαρακτηριστική γωνία του ήλιου, το ηλιακό **αζιμούθιο** [ $\theta$ ], είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Ο όρος προέρχεται από την αραβική έκφραση as summut, που σημαίνει κατεύθυνση. Προς τα δεξιά από τον νότο, το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές, και προς τα αριστερό αρνητικές. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς, καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό.

#### 1.4.5 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 ηλίου στον ουρανό, έτσι ο προσανατολισμός ενός επιπέδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες: την κλίση και την αζιμούθια γωνία όπως το παρακάτω σχήμα. Η **κλίση** του συλλέκτη ( $\beta_c$ ) 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  $0$  μέχρι  $180^0$ . Για γωνίες  $\beta_c > 90^0$  το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω.



**Σχήμα 7. Η κλίση ( $\beta_{\sigma}$ ) και η αζιμούθια γωνία ( $\theta_{\sigma}$ ) που χαρακτηρίζουν τον προσανατολισμό ενός επίπεδου ηλιακού συλλέκτη στην επιφάνεια της γης.**

Η **αζιμούθια γωνία** του συλλέκτη ( $\theta_{\sigma}$ ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά- νότου. Παίρνει τις τιμές από  $-180^{\circ}$  μέχρι  $+180^{\circ}$ . Η γωνία  $-180^{\circ}$  (που συμπίπτει με την γωνία  $+180^{\circ}$ ) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς τον βορρά, η γωνία  $-90^{\circ}$  προς την ανατολή, γωνία  $0^{\circ}$  προς τον 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 επιφάνεια 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. Έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (πχ. Βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκυττάρων) ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές. Έτσι, η χρήση τους δικαιολογείται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις εφαρμογών, όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα.



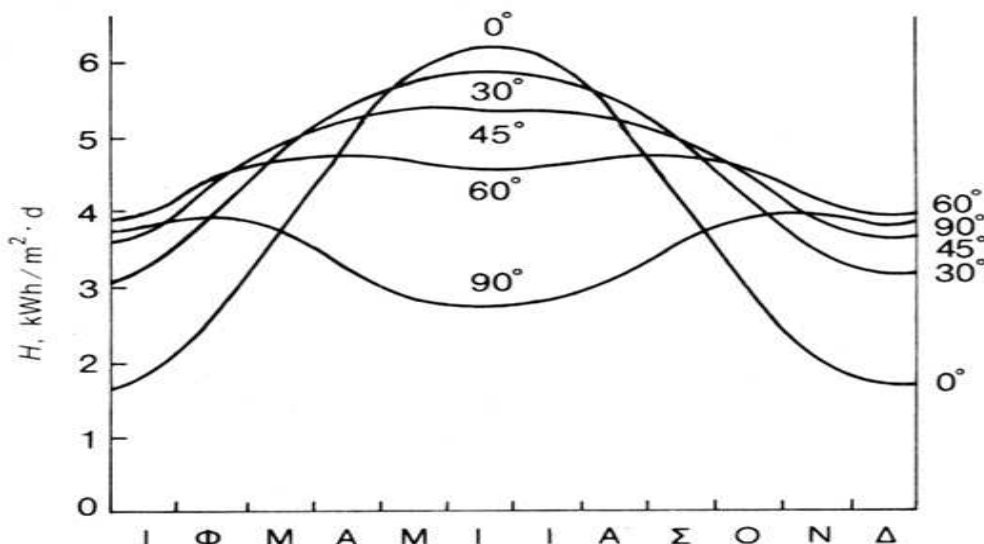
### 1.4.6 Η ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΛΙΣΗ

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

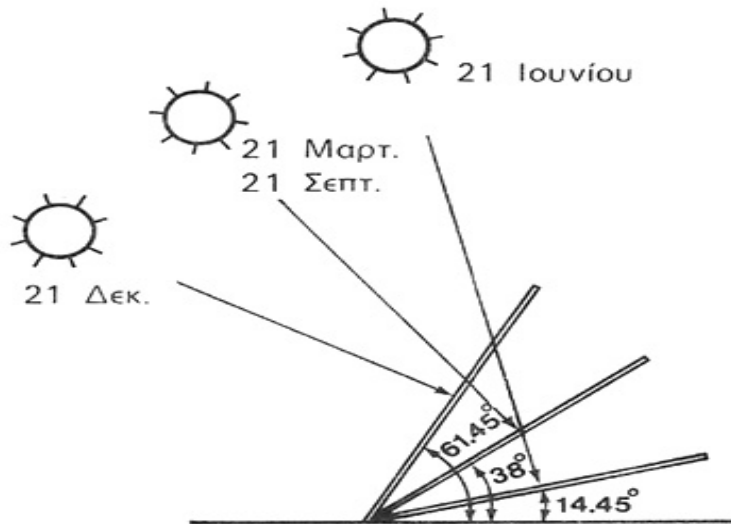
(εξ.1)

$$\text{συν}\varphi = \text{συν}\beta \eta\mu \beta_{\sigma} \text{συν}(\theta_{\sigma} - \theta) + \eta\mu\beta \text{συν} \beta_{\sigma}$$

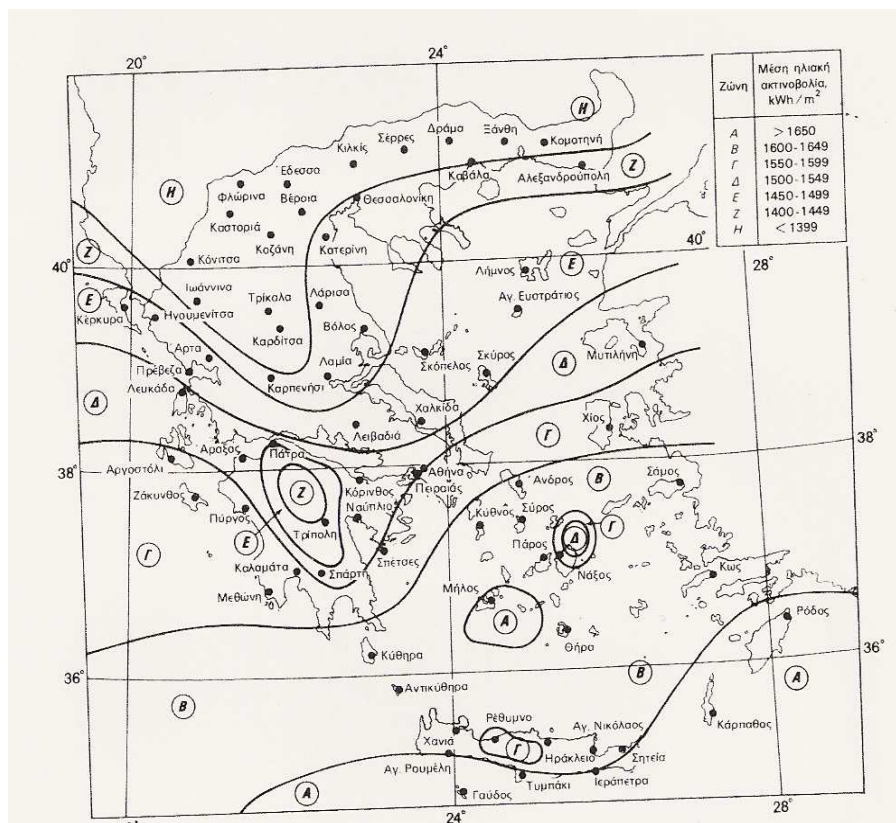
Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι  $0^{\circ}$  (προς το νότο). Αλλά λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ηλίου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή όπως δείχνει το (σχήμα 8). Έτσι αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατό περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου  $10^{\circ}$  με  $15^{\circ}$  μικρότερη από τον παράλληλο του τόπου, ενώ για τον χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου  $10^{\circ}$  με  $15^{\circ}$  η μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου. Στο (σχήμα 9) δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικότερες ημερομηνίες του έτους.



**Σχήμα 8.** Παράδειγμα της εξάρτησης της μέσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας  $H_t$ , που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια κατά την διάρκεια των διαφόρων μηνών του έτους, σε συνάρτηση με την κλίση της. Το παράδειγμα είναι για τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $45^{\circ}$  και αφορά τις κλίσεις του ηλιακού συλλέκτη ( $\beta_{\sigma}$ ) ίσες με  $0^{\circ}$  (οριζόντιο επίπεδο),  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ , και  $90^{\circ}$  (κατακόρυφο επίπεδο)



**Σχήμα 9.** Η Βέλτιστη κλίση ενός ηλιακού συλλέκτη στο θερινό (21 Ιουνίου) και το χειμερινό (22 Δεκεμβρίου) ηλιοστάσιο και στην εαρινή (21 Μαρτίου) και στην φθινοπωρινή ( 21 Σεπτεμβρίου) ισημερία, σε μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $38^{\circ}$  όπως η Αθήνα. Τα ύψη του ηλίου που εικονίζονται αφορούν στα αντίστοιχα ηλιακά μεσημέρια



**Σχήμα 10.** Η μέση ηλιακή ακτινοβολία και τα διάφορα γεωγραφικά πλάτη στην Ελλάδα.

Στον παραπάνω χάρτη έχουμε τα διάφορα γεωγραφικά πλάτη των ελληνικών περιοχών για την επιλογή της σωστής κλίσης του ηλιακού συλλέκτη. Υπάρχουν 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 ηλίου.

Τα παραπάνω ισχύουν για την συλλογή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για άλλες, ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές, μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από την θέση του ηλίου. Έτσι, όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό της 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 σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για όλη την διάρκεια 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 ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα ανάκλασης εκφράζεται από έναν συντελεστή που κυμαίνεται από 0, για πλήρη απορρόφηση μέχρι 1, για πλήρη ανάκλαση. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης για ορισμένα από τα είδη επιφανειών που συμβαίνει να έχει το περιβάλλον στις περιοχές, όπου τοποθετούνται ηλιακοί συλλέκτες.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Παράδειγμα τιμών του συντελεστή ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας.**

ΕΙΔΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ 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 ανοικτό χρώμα	0,30
Χιόνι	0,60

### 1.4.7 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. Π.χ. μιλάμε για ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, του ηλεκτροστατικού πεδίου, του ήχου, του ανέμου, της βροχής κλπ. Σε αυστηρότερη ορολογία, το μέγεθος που χαρακτηρίζει την ποσότητα της ενέργειας, την οποία μεταφέρει σε έναν τόπο μια ακτινοβολία που μεταδίδεται προς μια κατεύθυνση στο χώρο, ονομάζεται **ροή ακτινοβολίας (H)**. Ορίζεται, συγκεκριμένα, ως το ποσό της ενέργειας της ακτινοβολίας που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα του εμβαδού μιας επιφάνειας, τοποθετημένης κάθετα στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Η ροή της ηλιακής ακτινοβολίας εκφράζεται συνήθως σε  $\text{kW/m}^2$ .

Ακριβολογώντας παραπέρα, βλέπουμε ότι ο όρος «ροή ακτινοβολίας» έχει έννοια όταν πρόκειται μόνο για ακτινοβολία που αποτελείται από δέσμη παράλληλων 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.

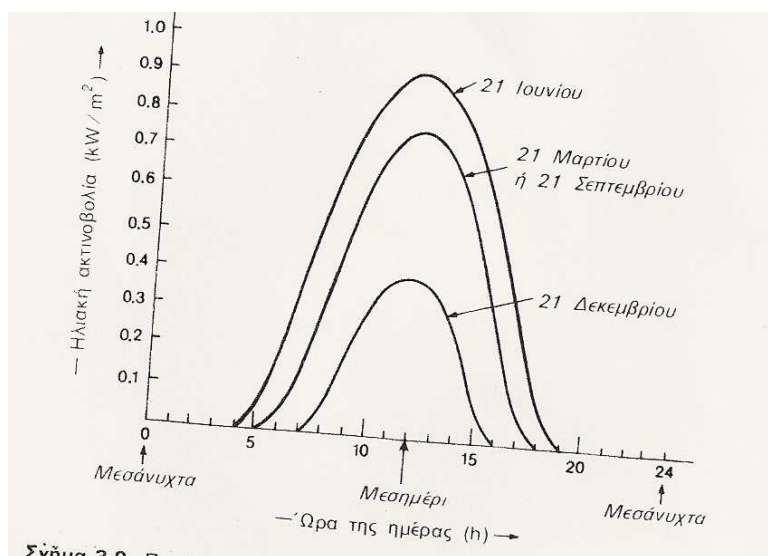
Με τον ίδιο όρο, «ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας», χαρακτηρίζεται και η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που δέχεται μια επιφάνεια σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Π.χ. στον σχεδιασμό των φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιείται συχνά ως μετεωρολογικό δεδομένο η μέση ηλιακή ενέργεια ανά τετραγωνικό μέτρο οριζόντιας επιφάνειας και ανά ημέρα, και εκφράζεται συνήθως σε  $\text{kWh/m}^2 \text{ day}$ .

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

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

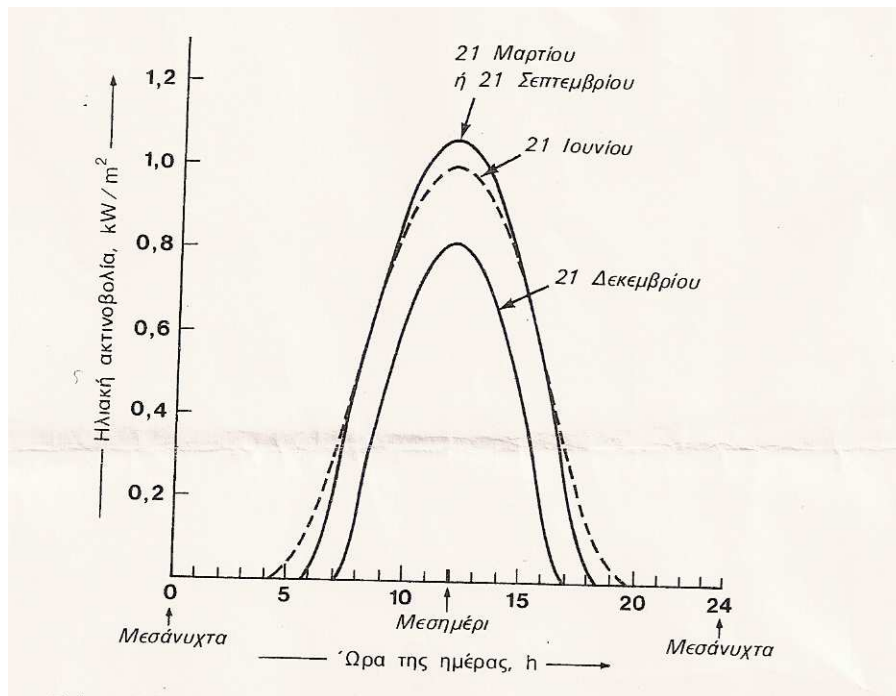
## 1.4.8 Η ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Στο (σχήμα 11) δείχνονται παραδείγματα της ομαλής μεταβολής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας για 3 ενδεικτικές ημερομηνίες (καλοκαίρι, άνοιξη και φθινόπωρο, χειμώνα) σε συνθήκες ιδανικά καθαρού ουρανού. Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της μέγιστης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. Π.χ. στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25 τον χειμώνα και 13:25 το καλοκαίρι, όταν ισχύει η θερινή ώρα.



**Σχήμα 11. Παραδείγματα της διακύμανσης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια των φωτεινών ωρών τριών χαρακτηριστικών ημερομηνιών, με εντελώς καθαρό ουρανό.**

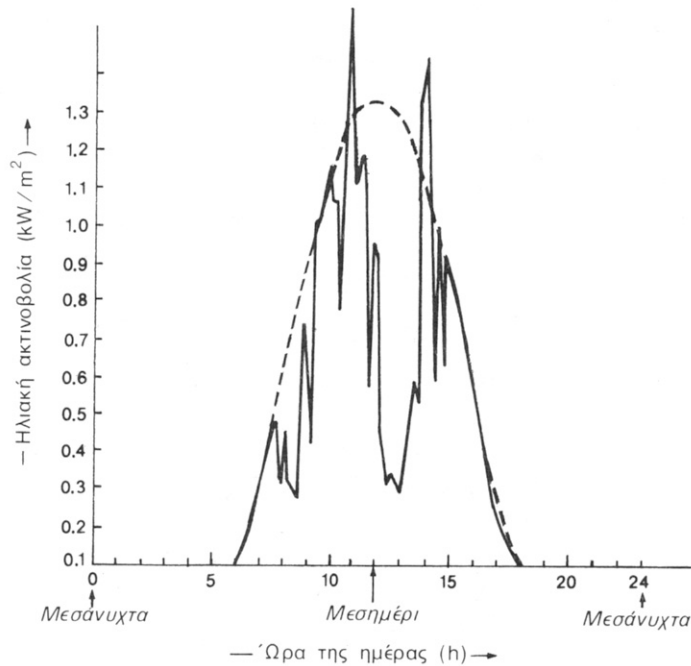
Έχουμε ήδη τονίσει ότι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια γίνεται σημαντικά μεγαλύτερη όταν βρίσκεται σε κατάλληλη κλίση, ώστε η πρόσπτωση των ακτίνων να γίνεται περισσότερο κάθετα όπως στο (σχήμα 9). Στην περίπτωση αυτή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέγιστη ισχύς της ακτινοβολίας το ηλιακό μεσημέρι στις ευνοϊκότερες ημέρες του έτους, δε διαφέρει πάρα πολύ από τόπο σε τόπο και η τιμή  $1\text{KW}/\text{m}^2$  αποτελεί μια πολύ χονδρική, αλλά και πολύ αποδεκτή προσέγγιση.



**Σχήμα 12.** Η διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στις γεωγραφικές, εποχικές και κλιματικές συνθήκες του παραδείγματος του προηγούμενου σχήματος αλλά με τον ηλιακό συλλέκτη σε κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.

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

Στη διάρκεια του έτους, το βόρειο ημισφαίριο, ο αριθμός φωτεινών ωρών της ημέρας, η μέγιστη ισχύς καθώς και η συνολική ημερήσια ενέργεια που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια, φτάνουν στις μέγιστες τιμές τους στις 21 Ιουνίου και τις ελάχιστες στις 21 Δεκεμβρίου. Στις επιφάνειες, όμως που βρίσκονται σε κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος παράλληλο του τόπου, μέγιστη τιμή της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι στα ηλιακά μεσημέρια των ισημεριών (21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου), διότι τότε δέχονται κάθετα τις ακτινοβολίες του ηλίου.



**Σχήμα13.**

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

[2]

## 1.5 Η ΕΝΩΣΗ P-N ΚΑΙ Η ΔΙΟΔΟΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

### 1.5.1 Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

Το φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγωγούς, που είναι σώματα με ενδιάμεση αγωγιμότητα, ανάμεσα στους αγωγούς (δηλαδή στα μέταλλα) και στους μονωτές (π.χ τα πολυμερή και τα κεραμικά υλικά). Οι κυριότεροι ημιαγωγοί είναι τετρασθενή στοιχεία, όπως το γερμάνιο, ή χημικές ενώσεις όπως το αρсениούχο γάλλιο και το θειούχο κάδμιο, με τετραεδρική κρυσταλλική δομή. Για να γίνουν τα πράγματα σαφέστερα, ας πάρουμε για παράδειγμα το πυρίτιο, που άλλωστε είναι ο μεγαλύτερος ημιαγωγός με τη μεγαλύτερη χρήση όχι μόνο για τα ηλιακά στοιχεία και για τις άλλες ηλεκτρονικές εφαρμογές. Επίσης, για την απλοποίηση της απεικόνισης, ας θεωρήσουμε τα άτομα σε ένα επίπεδο, αντί για τοποθέτηση στον χώρο είναι ενωμένο με 4 γειτονικά άτομα, και ο κάθε χημικός δεσμός αποτελείται

από 2 ηλεκτρόνια. Επομένως όλα τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων είναι απασχολημένα με δεσμούς, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθεροι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος και το σώμα να μην διαθέτει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η εικόνα αυτή ισχύει μόνο στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Πχ σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, κοντά στο απόλυτο μηδέν, πράγματι οι ημιαγωγοί μετατρέπονται σε μονωτές

Όταν όμως οι ημιαγωγοί απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, πχ με μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή. Έτσι, στη συνηθισμένη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η θερμική ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομά του προκαλεί την ελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Δηλαδή, καθώς η θερμική ενέργεια ανακατανέμεται συνεχώς από το ένα άτομο στο άλλο, μπορεί να επαρκέσει στιγμιαία σε μερικές τυχαίες θέσεις για να διεγείρει και να ελευθερώσει από ένα ηλεκτρόνιο σθένους σε μερικούς από τους δεσμούς του σώματος. Τα ελευθερωμένα αυτά ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από την θερμότητα, και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

## 1.5.2 ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ ΚΑΙ ΟΠΕΣ

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια περιφέρονται άτακτα στο σώμα, ανάμεσα από τα άτομα και τους δεσμούς, για όσο βέβαια χρονικό διάστημα διατηρούν την αυξημένη τους ενέργεια. Αν μειωθεί σημαντικά η ενέργειά τους, επιστρέφουν στην κενή θέση του ατελούς δεσμού, που μπορεί να συναντήσουν στο δρόμο τους και παύουν να είναι ελεύθερα. Πάντως όσο χρονικό διάστημα τα ηλεκτρόνια αυτά συμβάλλουν στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του σώματος, γι' αυτό ονομάζονται επίσης **ηλεκτρόνια αγωγιμότητας**.

Οι κενές, λοιπόν, ηλεκτρονικές θέσεις των χημικών δεσμών δρουν σαν παγίδες δέσμευσης για όσα ηλεκτρόνια έχουν σχετικά μειωμένη ενέργεια. Το φαινόμενο αυτό που συμβαίνει σε μια κοιλότητα ή μια τρύπα που παγιδεύουν ένα τόπι και το ακινητοποιούν καθώς κυλάει αργά και πέφτει μέσα. Αλλά και ακόμη και αν δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στην γειτονία της δεν σημαίνει ότι η κενή θέση μένει αμετακίνητη, αφού είναι ενεργειακά αδιάφορο αν μια κενή θέση ηλεκτρονίου βρίσκεται σε δεσμό ή σε ένα άλλο.

Έτσι ένα ηλεκτρόνιο σθένους μπορεί να έλθει από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό και να κάνει κατάληψη στην κενή θέση, με την ταυτόχρονη δημιουργία μιας κενής θέσης στον δεσμό που κατείχε προηγουμένως. Στη συνέχεια, ένα ηλεκτρόνιο σθένους από άλλον πλήρη δεσμό μπορεί να πάει σ' αυτήν τη νέα θέση, με αντίστοιχη νέα πάλι μετατόπιση της. Ο μηχανισμός αυτός κενής θέσης μπορεί να εξακολουθεί απεριόριστα, εκτός αν κάποια στιγμή παγιδέψει ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και η κενή θέση πάψει να υπάρχει πια, αφού τώρα ο δεσμός έχει γίνει πλήρης με δύο ηλεκτρόνια.

Για να απλοποιήσουμε την περιγραφή αυτού του φαινομένου, αντί να προσπαθούμε να καταγράψουμε τις διαδοχικές μετακινήσεις διαφόρων ηλεκτρονίων



σθένους προς την κενή θέση, είναι πολύ ευκολότερο να παρακολουθούμε την αντίθετη μετατόπιση της κενής θέσης από δεσμό σε δεσμό. Είναι επομένως χρήσιμο να δώσουμε μια υπόσταση στις κενές θέσεις ηλεκτρονίων, τις οποίες παρομοιάσαμε παραπάνω σαν τρύπες που δημιουργεί η απουσία ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Επειδή κάθε πράγμα στην τεχνική ορολογία πρέπει να έχει το όνομα του, τις βαφτίζουμε **οπές** και τις συμβολίζουμε συνήθως με **h**, από τον αρχικό της αγγλικής λέξης hole που σημαίνει τρύπα.

Οι οπές διαγράφουν μια άτακτη κίνηση στο σώμα, από ένα δεσμό στον άλλο, αφού είναι τυχαίο από μια πλευρά θα έρθει το γειτονικό ηλεκτρόνιο σθένους που συμπληρώνει τον ατελή δεσμό. Όταν όμως όταν επιβληθεί ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, είναι πιθανότερο ότι το ηλεκτρόνιο θα έλθει από την πλευρά που ευνοείται από το πεδίο. Π.χ αν το πεδίο έχει τέτοια κατεύθυνση ώστε να προκαλεί την κίνηση των αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων από αριστερά προς τα δεξιά, όπως στο σχ 12, η συνεπαγόμενη αντίθετη κίνηση της οπής, από δεξιά προς τα αριστερά, δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα και αντιστοιχεί στη συμπεριφορά ενός σωματιδίου όμοιας μάζας με του ηλεκτρονίου αλλά με θετικό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο. Έτσι υλοποίηση της οπής συμπληρώνεται, αφού εκτός από όνομα και σύμβολο αποκτά επίσης μάζα και φορτίο με πρόσημο ( $h^+$ ). Να μην ξεχνάμε όμως ότι δεν παύει να αποτελεί μία υποθετική οντότητα, έστω κι αν εμείς θα τη θεωρούμε σαν ένα αυτόνομο φορέα του ηλεκτρικού ρεύματος, με πρόσημο αντίθετο προς του ηλεκτρονίου.

Είδαμε παραπάνω ότι στους ημιαγωγούς εκδηλώνονται δυο ανταγωνιστικοί μηχανισμοί, που επηρεάζουν τον πληθυσμό των φορέων. Ο ένας είναι η ελευθέρωση ηλεκτρονίων από τους δεσμούς, με ταυτόχρονη δημιουργία οπών, και ο άλλος είναι η παγίδευση ελεύθερων ηλεκτρονίων στις οπές που συνεπάγεται την ταυτόχρονη εξαφάνιση και των δύο. Σε συνθήκες σταθερής ενεργειακής κατάστασης από θερμική φωτονική ή άλλη ενέργεια, γίνεται τελικά σε αποκατάσταση ισορροπίας και το πλήθος των ηλεκτρονίων που παγιδεύονται στις οπές.

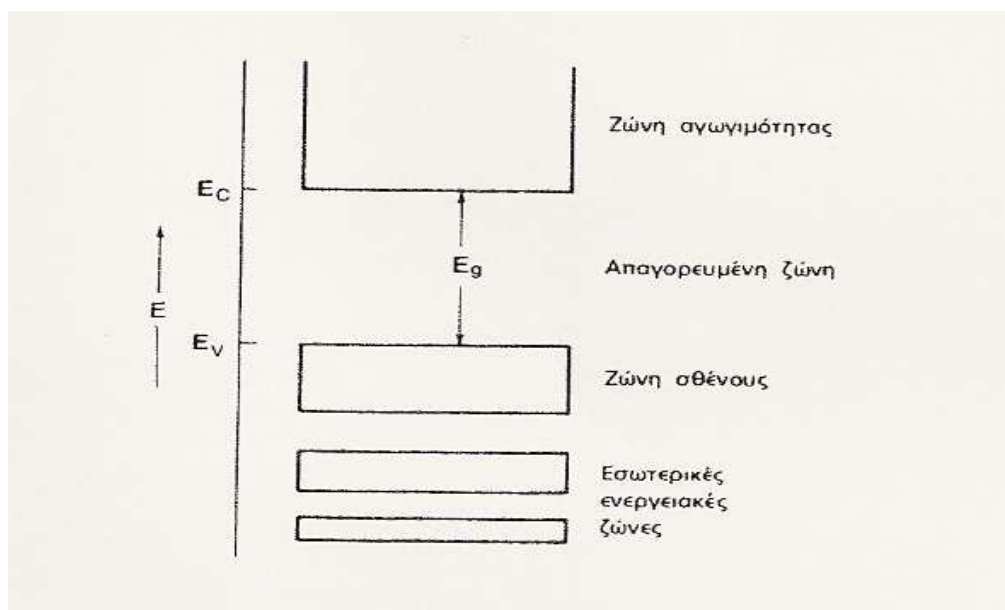
Έτσι, σε σταθερή θερμοκρασία ή ακτινοβολία, η συγκέντρωση (ή πυκνότητα) των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή των οπών ενός ημιαγωγού παραμένει αμετάβλητη και είναι χαρακτηριστική για το υλικό και την θερμοκρασία. Όσο ασθενέστεροι είναι οι δεσμοί στο υλικό και όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του ή εντονότερη η ακτινοβολία τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συγκέντρωση των φορέων του, δηλαδή ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών.

### 1.5.3 ΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΖΩΝΕΣ ΣΤΟΥΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ

Από την άποψη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς, μπορούμε να θεωρήσουμε τα ηλεκτρόνια των σωμάτων σαν να ανήκουν ες τρεις διαφορετικές κατηγορίες. Η μία είναι τα <<ελεύθερα>> ηλεκτρόνια, που διαθέτουν αρκετή ενέργεια ώστε να έχουν αποσπασθεί από τους δεσμούς του σώματος. Η δεύτερη κατηγορία είναι τα ηλεκτρόνια σθένους που σχηματίζουν τους δεσμούς και τα οποία μπορούν να κινηθούν μόνο προς τις οπές γειτονικών δεσμών ή να ανταλλάξουν θέσεις με άλλα ηλεκτρόνια σθένους γειτονικών δεσμών. Τέλος, υπάρχουν και τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων των ατόμων, που είναι λιγότερο ενεργά, δεν συμμετέχουν σε μηχανισμούς αγωγιμότητας.

Σε ένα διάγραμμα τιμών ενέργειας, οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων σθένους των ατόμων του σώματος, καθώς διαφέρουν πολύ λίγο μεταξύ τους,

σχηματίζουν μία ενεργειακή ζώνη, που ονομάζεται **ζώνη σθένους**. Αντίστοιχα οι ενέργειες των ελεύθερων ηλεκτρονίων, που είναι υπεύθυνα για την εκδήλωση ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που σχηματίζουν, τη **ζώνη αγωγιμότητας** (ή ζώνη αγωγής). Η απόσταση ανάμεσα στις δύο ζώνες, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ενέργειας του λιγότερου ενεργού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας και του περισσότερο ενεργού από τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια, στην κορυφή της ζώνης σθένους, ονομάζεται **ενεργειακό διάκενο** ή ενεργειακό χάσμα.



Σχημα.14. Ενεργειακές στάθμες

Είναι φανερό ότι το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στην ζώνη αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τα τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής. Δηλαδή, η ενέργεια αυτή είναι ισότιμη με την ισχύ των χημικών δεσμών μεταξύ των ατόμων του σώματος.

Έτσι συμβολίζουμε την ενέργεια της κορυφής της ζώνης σθένους με  $E_V$  (από τα αρχικά της λέξης valence που σημαίνει σθένος), την ενέργεια του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας με  $E_C$  (από την λέξη conduction, που σημαίνει αγωγιμότητα), και το ενεργειακό διάκενο με  $E_g$  (από την λέξη gap, που σημαίνει διάκενο ή χάσμα). Οι τιμές της ενέργειας των ηλεκτρονίων σε κάθε σώμα είναι περιορισμένες μέσα σε ενεργειακές ζώνες. Δηλαδή, σε ένα απολύτως καθαρό σώμα, χωρίς καθόλου προσμίξεις και με τέλειο κρυσταλλικό πλέγμα, δεν υπάρχουν ηλεκτρονικές στάθμες στο διάκενο ανάμεσα στις δύο ζώνες που αναφέραμε και έτσι η περιοχή μεταξύ  $E_V$  και  $E_C$  αποτελεί μια **απαγορευμένη ενεργειακή** για τα ηλεκτρόνια. Αν στα ηλεκτρόνια των δεσμών προσφερθεί μια ποσότητα ενέργειας π.χ αν δεχθούν μια δέσμη ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενεργειακό κβάντο  $h$  (εδώ  $h$  είναι σταθερά δράσης Planck και  $\nu$  η συχνότητα της ακτινοβολίας), μικρότερο από το ενεργειακό διάκενο ( $E_g > h\nu$ ), δεν μπορούν να την απορροφήσουν και μένουν στη

ζώνη σθένους. Αν όμως τα ενεργειακά κβάντα που προσφέρονται είναι ίσα ή μεγαλύτερα από το ενεργειακό διάκενο του σώματος ( $E_g \leq h\nu$ ), τότε κάθε κβάντο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους μία οπή. Η περίσσεια της ενέργειας:

$$E_k = h\nu - E_g \quad (\text{εξ.2})$$

μεταφέρεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια ως κινητή ενέργεια  $E_k$  και γίνεται αντιληπτή με την αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος.

#### 1.5.4 ΦΟΡΕΙΣ ΠΛΕΙΟΝΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΦΟΡΕΙΣ ΜΕΙΟΝΟΤΗΤΑΣ

Χαρακτηριστική ιδιότητα των ενδογενών ημιαγωγών είναι η εξίσωση της συγκέντρωσης των ελεύθερων ( $n$ ) και της συγκέντρωσης των οπών ( $p$ ). Στους ημιαγωγούς προσμίξεων όπως θα δούμε παρακάτω, επίσης προφανές ότι αν σε έναν ημιαγωγό προσμίξεων οι συγκεντρώσεις των δοτών και των αποδεκτών είναι περίπου ίσες (το να είναι ακριβώς ίσες είναι τεχνικά ανέφικτο), η αντιστάθμισή τους θα είναι σχεδόν πλήρης και ο ημιαγωγός αυτός θα συμπεριφέρεται περίπου σαν ενδογενής.

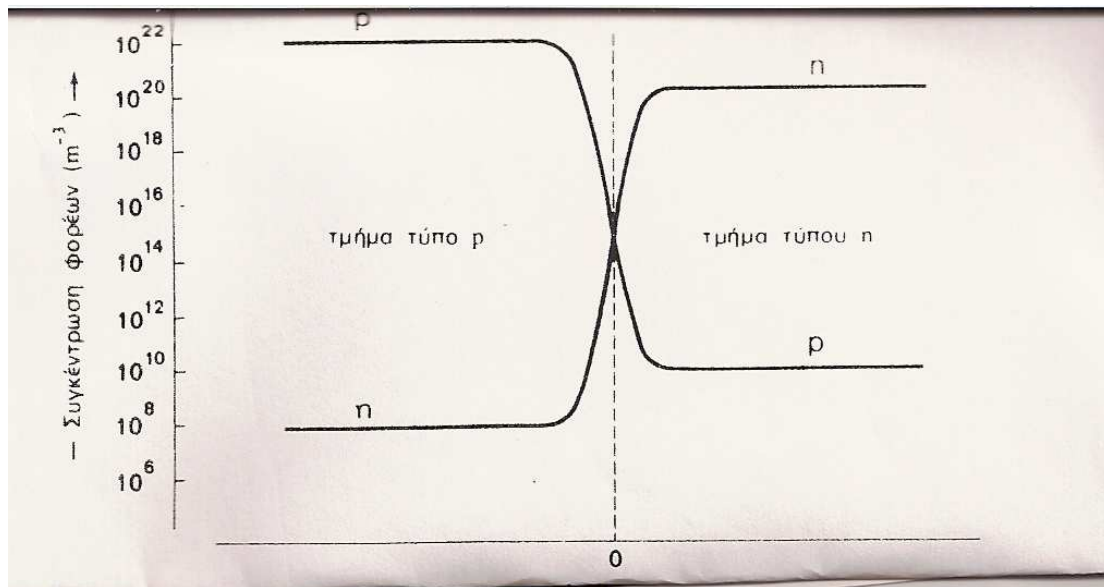
#### 1.5.5 ΕΠΑΦΕΣ P-N

Οι σημαντικότερες ιδιότητες και εφαρμογές των διατάξεων ημιαγωγών δεν προέρχονται κυρίως από τη δημιουργία φορέων. Βασική διάταξη για την εκδήλωση των ιδιοτήτων αυτών είναι η ένωση p-n (ονομάζεται επίσης σύνδεση, επαφή ή μετάβαση p-n) που μπορούμε να θεωρήσουμε ότι σχηματίζεται όταν έλθουν σε στενή επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p με ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου n. Αμέσως τότε από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n, όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι επίσης λιγότερα.

Η ανάμειξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στην διαχωριστική επιφάνεια των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την κατάσταση ισορροπίας που υπήρχε πριν. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν το νόμο δράσης μαζών

Πχ αν υποθέσουμε ότι ένα τμήμα της διάταξης μιας ένωσης p-n είναι Si τύπου p με συγκέντρωση αποδεκτών  $N_a = 10^{22} \text{ m}^{-3}$ , το άλλο τμήμα είναι Si τύπου n με συγκέντρωση δοτών  $N_d = 10^{20} \text{ m}^{-3}$ , στη θερμοκρασία που βρίσκεται το σώμα η ενδογενής συγκέντρωση των φορέων είναι  $n_i = 15^{20} \text{ m}^{-3}$  και όλες οι προσμίξεις είναι διεγερμένες. Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζοντας τη σχέση του νόμου δράσης των μαζών και τηρώντας τις πρακτικές παραδοχές που αναφέραμε, βρίσκουμε ότι οι συγκεντρώσεις στον ημιαγωγό τύπου p θα είναι κανονικά της τάξης του  $p = 10^{22} \text{ m}^{-3}$  και  $n = 10^8 \text{ m}^{-3}$  και στον ημιαγωγό τύπου n θα είναι κανονικά της τάξης του  $n = 10^{20} \text{ m}^{-3}$  και  $p = 10^{10} \text{ m}^{-3}$ . Στην περιοχή όμως της διαχωριστικής επιφάνειας των δύο τμημάτων, οι επανασυνδέσεις που ακολούθησαν τη διάχυση έχουν μειώσει δραστικά το πλήθος των φορέων. Ειδικότερα στο επίπεδο που οι συγκεντρώσεις των

οπών και ελεύθερων ηλεκτρονίων εξισώνονται στο παρακάτω σχήμα, όπου οι τιμές θα είναι αναγκαστικά  $n=p= 10^{15} \text{ m}^{-3}$ , βρίσκουμε ότι το συνολικό πλήθος των φορέων θα είναι πάρα πολύ μικρότερο σε σύγκριση με το πλήθος των φορέων στο τμήμα τύπου n (50.000 φορές λιγότεροι) και το τμήμα τύπου p (5.000.000 φορές λιγότεροι). Γι' αυτό η περιοχή γύρω από μια ένωση p-n ονομάζεται **ζώνη εξάντλησης** των φορέων (ή περιοχή αραιώσεως). Η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μια ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται **δίοδος ημιαγωγού** ή απλά **δίοδος**.

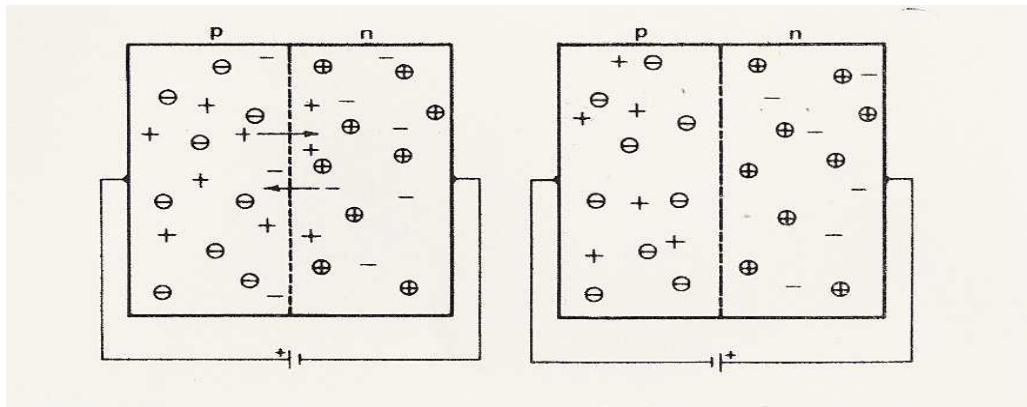


**Σχήμα 15. Παράδειγμα της μεταβολής της συγκέντρωσης των οπών (p) και των ελεύθερων ηλεκτρονίων (n) κατά μήκος μίας ένωσης p-n, σε κατάσταση ισορροπίας**

Σε αντίθεση με τους ευκίνητους φορείς ημιαγωγών (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) που τείνουν να διαχέονται προς τις περιοχές με τη μικρότερη συγκέντρωσή τους, η συγκέντρωση των αρνητικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα του τύπου p και η συγκέντρωση των θετικών ιόντων στα μετατράπηκαν οι δότες στο τμήμα τύπου n, παραμένουν αμετάβλητες, αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει την τυπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργείται λοιπόν μια διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή (συνήθως περίπου 0,3 μέχρι 0,5 V, ανάλογα τις συγκεντρώσεις προσμίξεων) αλλά το ενσωματωμένο αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η δίοδος που περιέχει την ένωση p-n παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με τη φορά του.

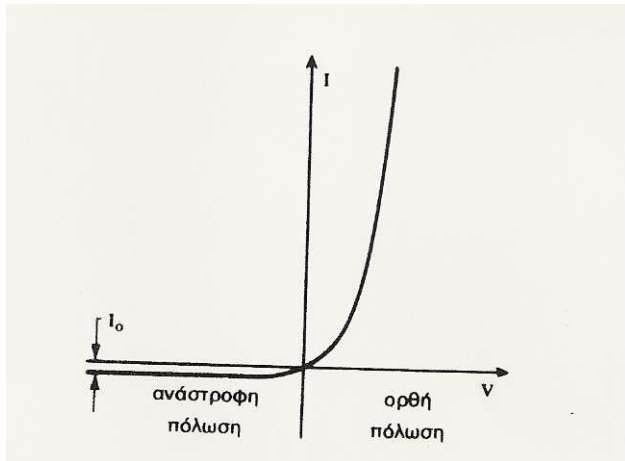
### 1.5.5.1 ΟΡΘΗ ΚΑΙ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΠΟΛΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ

Η μία περίπτωση είναι να επιβληθεί στη δίοδο p-n **ορθή πόλωση**, δηλαδή ο αρνητικός πόλος της πηγής να συνδεθεί με το τμήμα τύπου n της διόδου και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου p της διόδου και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου p. Τότε, τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή, διαμέσου του τμήματος τύπου n, προς την περιοχή ένωσης όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση των ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής διαμέσου του τμήματος τύπου p.



Σχήμα 16. Ορθή και ανάστροφη πόλωση

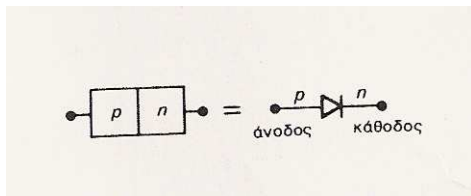
Αντίθετα, στην **ανάστροφη πόλωση**, δηλαδή αν ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδεθεί με το τμήμα τύπου p και ο θετικός με το τμήμα τύπου n, γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος τύπου p με ηλεκτρόνια που έρχονται που έρχονται από την πηγή και από την άλλη μεριά, απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων του τμήματος τύπου n προς το θετικό πόλο της πηγής. Έτσι, οι συγκεντρώσεις των φορέων μειώνονται πάρα πολύ, το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνει και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ένα ισχυρό εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή. Το αποτέλεσμα είναι ότι τώρα η δίοδος προβάλλει μεγάλη αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα πχ μπορεί μια δίοδος που έχει σε ορθή πόλωση αντίσταση μόλις  $10\Omega$ , να την αυξάνει στην αντίστροφη πόλωση σε  $100M\Omega$ , δηλαδή να γίνεται δέκα εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη. Το παρακάτω σχήμα δείχνει ακριβώς την ιδιόμορφη μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει μια δίοδο ένωσης p-n, σε συνάρτηση με την τιμή της τάσης και το είδος της πόλωσης που εφαρμόζεται.



**Σχήμα 17. Διάγραμμα ορθής και ανάστροφης πόλωσης**

### 1.5.5.2 Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ

Η p –περιοχή λέγεται άνοδος και n –περιοχή λέγεται κάθοδος . Όταν μία δίοδος είναι πολωμένη ορθά, υπάρχει μια μεγάλη ροή ηλεκτρονίων ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο, που ισοδυναμεί με μια συμβατική ροή ρεύματος από την άνοδο προς την κάθοδο.



**Σχήμα 18. Δίοδος p-n**

[2]

## 1.6 ΦΩΤΟΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ-ΑΓΩΓΟΙ-ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ-ΜΟΝΩΤΕΣ

Η αγωγιμότητα σκότους ενός ημιαγωγού είναι μικρότερη ( και σε ορισμένες περιπτώσεις, πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη) σε σχέση με την αντίστοιχη των μετάλλων. Όταν ο ημιαγωγός αυτός φωτιστεί , τότε οι φορείς ρεύματος, δηλαδή τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και οι οπές, στη ζώνη σθένους αυξάνονται και συνεπώς , αυξάνεται και η αγωγιμότητά του . Η αυξημένη αγωγιμότητα του ημιαγωγού , με την επίδραση του φωτός ονομάζεται φωτοαγωγιμότητα.

## 1.6.1 ΑΓΩΓΟΙ

Τα στοιχεία που είναι καλοί αγωγοί έχουν άτομα με ένα ή δύο ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους τα οποία μπορούν να ελευθερωθούν στη στοιβάδα αγωγιμότητας και να κινούνται στο χώρο μεταξύ των ατόμων . Αυτά είναι τα ηλεκτρόνια (ελεύθερα ηλεκτρόνια) που συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται στα μέταλλα.

Ο άργυρος (Ag) έχει την υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από όλα τα μέταλλα. Δεύτερος κατατάσσεται ο χαλκός(Cu) και τρίτος ο χρυσός (Au). Ο λόγος για τον οποίο ο χαλκός παρουσιάζει υψηλή αγωγιμότητα γίνεται φανερός αν παρατηρήσουμε την ατομική του δομή. Ο πυρήνας περιέχει 29 πρωτόνια. Επειδή ένα άτομο χαλκού είναι ηλεκτρικά ουδέτερο θα έχει και 29 περιφερειακά ηλεκτρόνια. Δύο ηλεκτρόνια βρίσκονται στην πρώτη τροχιά, 8 στην δεύτερη, 18 στην τρίτη κι ένα στην τέταρτη. Ο θετικά φορτισμένος πυρήνας έλκει τα πλησιέστερα προς αυτόν ηλεκτρόνια με μεγαλύτερη δύναμη. Η έλξη αυτή είναι μικρότερη για τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών τροχιών. Στην πραγματικότητα, το μοναδικό ηλεκτρόνιο της εξωτερικής τροχιάς βρίσκεται τόσο μακριά από τον πυρήνα, ώστε ελάχιστα αντιλαμβάνεται την ελκτική δύναμη. Επειδή η έλξη του πυρήνα είναι τόσο ασθενική, το εξωτερικό ηλεκτρόνιο λέγεται **ελεύθερο ηλεκτρόνιο**. Σ' ένα κομμάτι χάλκινου σύρματος τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μπορούν να κινούνται εύκολα από το ένα άτομο στο άλλο. Γι' αυτόν το λόγο, ακόμη και η ελάχιστη τάση στ' άκρα ενός χάλκινου αγωγού μπορεί να προκαλέσει ένα μεγάλο ρεύμα.

Ο πυρήνας και τα εσωτερικά ηλεκτρόνια ελάχιστα μας ενδιαφέρουν. Η τροχιά αυτή προσδιορίζει τον τρόπο με τον οποίο ένα άτομο συνδέεται με άλλα άτομα, το πόσο αγωγίμο ένα υλικό κτλ. Έτσι, ο «πυρήνας» του χαλκού έχει ένα καθαρό φορτίο +1, επειδή περιέχει 29 πρωτόνια και 28 εσωτερικά ηλεκτρόνια. Η τελική εικόνα ενός ατόμου χαλκού είναι ένας «πυρήνας» με φορτίο +1 κι ένα ηλεκτρόνιο σθένους με φορτίο -1. Επειδή το ηλεκτρόνιο σθένους περιφέρεται σε μια τροχιά που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από ένα καθαρό φορτίο μόλις +1 μονάδα, η έλξη που δέχεται είναι πολύ μικρή.

Οι καλύτεροι αγωγοί (χαλκός, άργυρος και χρυσός) έχουν ένα διάγραμμα. Η ουσία βρίσκεται στο μοναδικό εξωτερικό ηλεκτρόνιο που κινείται σε μια τροχιά μακριά από τον πυρήνα. Λόγω της ασθενικής έλξης του πυρήνα, αυτό το απομονωμένο ηλεκτρόνιο σθένους είναι ελεύθερο να κινηθεί από το ένα άτομο στο επόμενο.

## 1.6.2 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Είναι στοιχεία που βρίσκονται από πλευράς ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ καλών αγωγών και μονωτών. Τα άτομα τους έχουν 3,4, ή 5 ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους και για αυτό μπορούν να συνεισφέρουν κατά μικρά μεταβλητά πόσα στο ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογα με αιτία που το προκαλούν.

Οι ημιαγωγοί είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ηλεκτρονικών υπολογιστών, των φωτοανιχνευτών και στα υπό μελέτη φωτοβολταϊκή στοιχεία.

Το γερμάνιο (Ge) και το πυρίτιο (Si) είναι δύο παραδείγματα ημιαγωγών, δηλαδή υλικών που δεν είναι ούτε αγωγοί ούτε μονωτές.

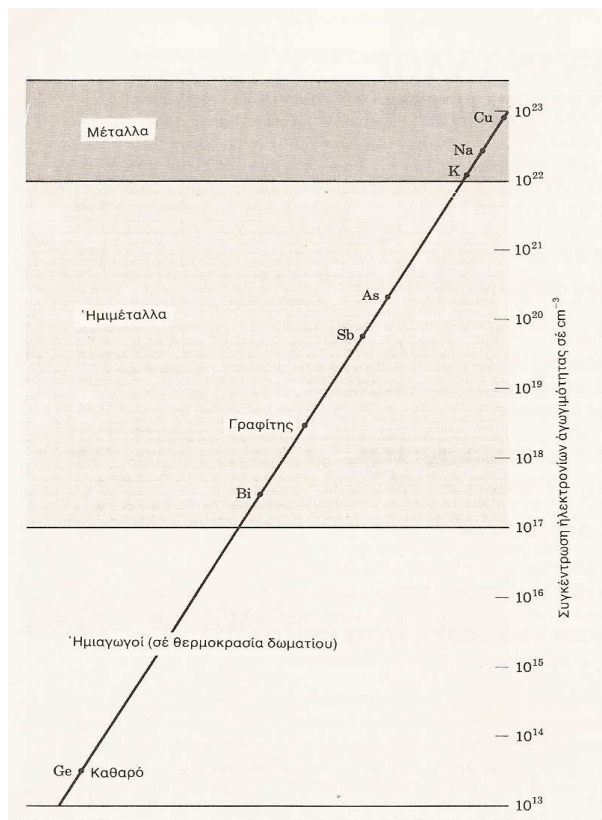
### 1.6.3 ΜΕΤΑΛΛΑ ΚΑΙ ΜΟΝΩΤΕΣ

Τα στοιχεία που ανήκουν στη κατηγορία αυτή έχουν άτομα με 6 ή 7 ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους. Τα ηλεκτρόνια αυτά παραμένουν δέσμια στο άτομο και δεν μπορούν να συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό ρεύμα.

Εάν τα ηλεκτρόνια σθένους συμπληρώνουν ακριβώς μία ή περισσότερες ζώνες, αφήνοντας άδειες άλλες, κρύσταλλος θα είναι ένας μονωτής. Ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο δεν θα προκαλεί ροή ρεύματος. Υποθέτουμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι ισχυρό αρκετά για να διαταράξει την ηλεκτρονική δομή. Επειδή η συμπληρωμένη ζώνη χωρίζεται από την επόμενη μεγαλύτερη ζώνη με ένα ενεργειακό χάσμα, δεν υπάρχει συνεχής τρόπος να αλλάξει η ολική ορμή των ηλεκτρονίων εάν κάθε προσιτή κατάσταση είναι συμπληρωμένη. Τότε δεν αλλάζει όταν εφαρμόζεται το ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή είναι αρκετά διαφορετική από την περίπτωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

Ένας κρύσταλλος μπορεί να είναι μονωτής μόνο εάν ο αριθμός των ηλεκτρονίων σθένους σε μια θεμελιώδη κυψελίδα του κρυστάλλου είναι ένας άρτιος ακέραιος

Τα αλκαλικά μέταλλα και ευγενή μέταλλα έχουν ηλεκτρόνια σθένους σε κάθε θεμελιώδη κυψελίδα, έτσι ώστε να είναι μέταλλα. Τα μέταλλα των αλκαλικών γαιών έχουν δύο ηλεκτρόνια σθένους σε κάθε θεμελιώδη κυψελίδα θα μπορούσαν να είναι μονωτές, οι ζώνες όμως επικαλύπτονται σε ενέργεια για να δώσουν μέταλλα, όχι όμως και πολύ καλά μέταλλα. Το διαμάντι, το πυρίτιο και το γερμάνιο το καθένα έχει δύο άτομα με σθένους τέσσερα σε κάθε θεμελιώδη κυψελίδα. Οι ζώνες δεν επικαλύπτονται και οι καθαροί κρύσταλλοι είναι μονωτές στο απόλυτο μηδέν.



Σχήμα 19. Η συγκέντρωση ηλεκτρονίων αγωγιμότητας διαφόρων στοιχείων (μέταλλα, ημιμέταλλα, ημιαγωγοί).



[2],[3],[4]

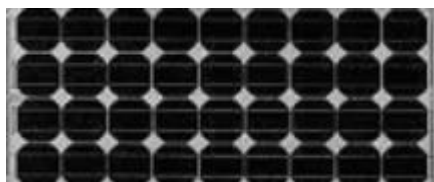
## 1.7 ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Όταν τα φωτοβολταϊκά εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπουν ένα 5-17% της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική (με τη σημερινή τεχνολογία, η οποία συνεχώς βελτιώνεται). Το πόσο ακριβώς είναι αυτό το ποσοστό εξαρτάται από την τεχνολογία που χρησιμοποιούμε. Υπάρχουν π.χ. τα λεγόμενα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, και τα άμορφα. Τα τελευταία έχουν χαμηλότερη απόδοση είναι όμως φθηνότερα.

Οι βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων που κυρίως χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι ακόλουθες:

### ◆ Μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Είναι τα πιο διαδεδομένα στην αγορά και κατασκευάζονται σε κυλίνδρους ανεπτυγμένου πυριτίου. Οι κύλινδροι αυτοί κόβονται σε λεπτές φέτες, γνωστές ως wafers, με πάχος μόλις 200μm. Ο βαθμός απόδοσης τους στα εργαστήρια φθάνει το 24%, ενώ στο εμπόριο αγγίζει το 15%.

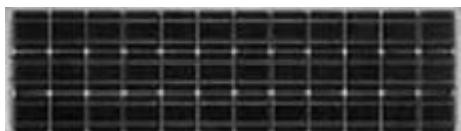


Φωτοβολταϊκή γεννήτρια μονοκρυσταλλικού πυριτίου

### ◆ Πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Κατασκευάζονται από χυτό πυρίτιο. Έχουν βαθμό απόδοσης γύρω στο 15%. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία γαλλίου - αρσενίου διακρίνονται για τον υψηλό

βαθμό απόδοσης τους, γι' αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις διαστημικές εφαρμογές και στα συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Η απόδοσή τους αγγίζει το 25%, όταν δέχονται την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και στο 28% όταν δέχονται και την διάχυτη ακτινοβολία. Σε ερευνητικό στάδιο ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων GaAs έχει ξεπεράσει το 30%.



Φωτοβολταϊκή γεννήτρια πολυκρυσταλλικού πυριτίου

#### ◆ Άμορφου πυριτίου (a-Si)

Τα φωτοβολταϊκά αυτά στοιχεία κατασκευάζονται από άμορφο πυρίτιο. Διακρίνονται από την πολύ μικρή κατανάλωση πυριτίου κατά την κατασκευή τους, ενώ ευκολότερες είναι και οι κατασκευαστικές διαδικασίες με αποτέλεσμα το κόστος τους να είναι πολύ μικρότερο. Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι η πολύ χαμηλή τους απόδοση που δεν ξεπερνά το 10%. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλιακά ρολόγια και σε αριθμητικούς υπολογιστές. Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η χρήση της τεχνολογίας άμορφου πυριτίου σε μεγάλα κτήρια, γνωστά και ως Κτηριακά Ολοκληρωμένα φ/β στοιχεία (BIPVs - Building Integrated Photovoltaics), όπου αντικαθιστούν τα τζάμια (μετά από επεξεργασία για την αύξηση της διαφάνειας τους) συμβάλλοντας έτσι στην τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στο κτήριο.

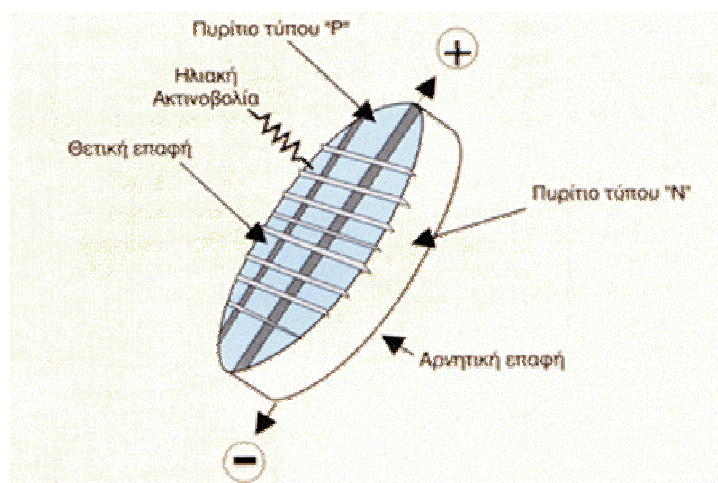


Εικόνες: Φωτοβολταϊκές γεννήτριες a-Si, κτήρια με ενσωματωμένα BIPVs

Οι άλλες τεχνολογίες φ/β στοιχείων αποτελούν μόνο το 9 - 10% της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής και αναφέρονται σε τεχνολογίες άμορφου πυριτίου και λεπτού στρώματος.

[8],[9]

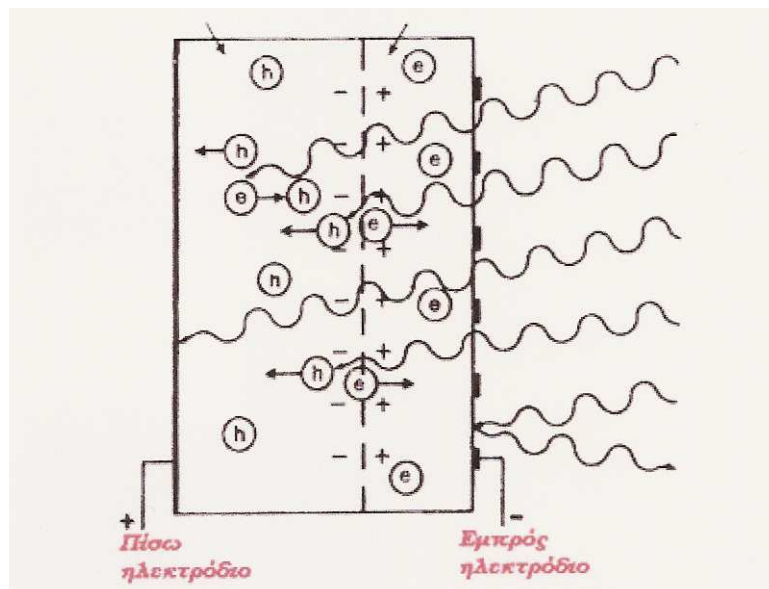
## 1.8 Η ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ



### 1.8.1 ΤΟ Φ/Β ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Είναι γνωστό ότι 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 ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας.

Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντιθέτου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου



**Σχήμα 20.** Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του Φ/Β φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο. Τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός όψη του, τύπου n στο παράδειγμα του σχήματος, παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζονται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια,  $e^-$ ) ή προς τα πίσω (οι οπές,  $h^+$ ), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Έπίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ το άλλο μέρος διέρχεται από το στοιχείο χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο.

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 μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων 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. π.χ. από διόδους Σότκν που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

Συμπερασματικά, η συνεργασία των δύο αναφερθέντων παραγόντων, του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου των δύο σε επαφή φωτοαγωγίμων υλικών και του φωτός, παράγει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο : **Επαφή υλικών + φως = Φωτοβολταϊκό φαινόμενο**

## 1.8.2 Η ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ

Το δημιουργούμενο φωτόρευμα **φωτόρευμα** είναι ευθέως ανάλογο της πυκνότητας ισχύος  $E$  ( $W/m^2$ ), της ΗΜ ακτινοβολίας που προσπίπτει στην ημιαγωγική διάταξη καθώς και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών.

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μια κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα  $I_{\Phi}$ , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο, π.χ. ας 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 μεγάλο. Τότε, για την πυκνότητα του φωτορεύματος, ισχύει ικανοποιητικά η σχέση :

$$I_{\Phi} = e \cdot g(L_n + L_p) \quad (\text{εξ.3})$$

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 μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών, αντίστοιχα.

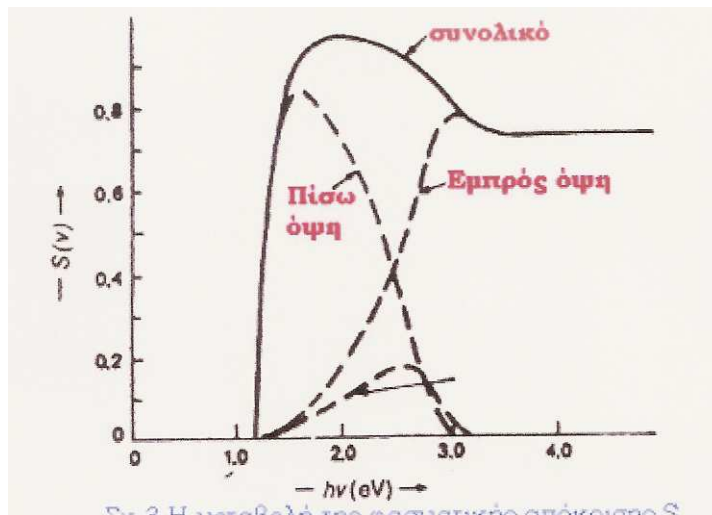
Ένα χρήσιμο μέγεθος για τον υπολογισμό του φωτορεύματος είναι η φασματική απόκριση  $S$  (ή απόδοση συλλογής ή κβαντική απόδοση), που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, σε σχέση με τη φωτονική ροή  $\Phi$ , δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της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

$$S(\lambda) = \frac{I_{\Phi}(\lambda)}{e \cdot \Phi(\lambda)} \quad (\text{εξ.4})$$

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

$$I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda \quad (\text{εξ.5})$$

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 παρακάτω σχήμα δείχνεται η μεταβολή της φασματικής απόκρισης ενός Φωτοβολταϊκού στοιχείου του εμπορίου σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται.



**Σχήμα 21.** Η μεταβολή της φασματικής απόκρισης  $S(v)$  σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας, στις τρεις περιοχές ενός Φωτοβολταϊκού ηλιακού στοιχείου πυριτίου: εμπρός όψη τύπου n, ζώνη εξάντλησης και πίσω όψη τύπου n.

Όταν το ποσοστό της επιφάνεια του στοιχείου δεν είναι αμελητέο γράφεται :

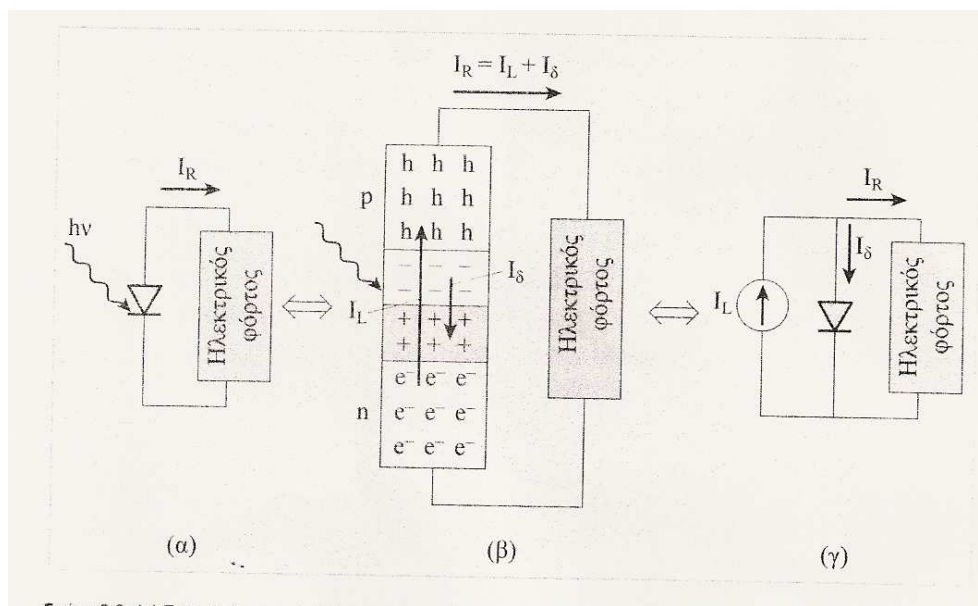
$$I_{\Phi} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda) [1 - R(\lambda)] \Phi(\lambda) d\lambda \quad (\text{εξ.6})$$

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

### 1.8.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΩΤΙΖΟΜΕΝΟΥ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Το σχήμα (α) δείχνει την πραγματική κατάσταση των ρευμάτων μέσα στο ΦΒ στοιχείο εξαιτίας της δράσης του φωτός. Φως δεδομένης πυκνότητας ισχύος και φάσματος, δημιουργεί μέσα στο σώμα του ΦΒ στοιχείου ηλεκτρικό ρεύμα  $I_L$ , του οποίου η ένταση μένει σταθερή καθώς αλλάζει η ωμική αντίσταση, που είναι συνδεδεμένη στα άκρα του. Στο σχήμα (β) δίδεται η τυπική μορφή του κυκλώματος που περιλαμβάνει ΦΒ στοιχείο και ωμικό καταναλωτή. Η λειτουργία του ΦΒ στοιχείου είναι ισοδύναμη με εκείνη που θα δημιουργούσε η σύνδεση μιας πηγής σταθερού ρεύματος στα άκρα της διόδου, όπως δείχνει στο σχήμα (γ)

Συμπερασματικά, το ΦΒ στοιχείο είναι μια ηλεκτρική πηγή, η οποία, στην ιδανική της συμπεριφορά, έχει την ιδιότητα να διατηρεί σταθερή την τιμή του ρεύματος σε μια αντίσταση, ανεξάρτητα από την τιμή της. Σε κάθε περίπτωση, η πηγή αυτή προσαρμόζει την τάση της στα άκρα της αντίστασης, ώστε το ρεύμα να μένει, πρακτικά σταθερό.



**Σχήμα 22. (α) τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα που περιλαμβάνει Φ/Β στοιχείο (β) Αναλυτική παρουσίαση ρευμάτων στο κύκλωμα (γ) Το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα**

Το ΦΒ στοιχείο συμπεριφέρεται, μέσα σε ορισμένα όρια τάσεων, ως πηγή σταθερού ρεύματος. Το παρεχόμενο ηλεκτρικό ρεύμα είναι περίπου σταθερό, σε ευρεία περιοχή τάσεων. Στη συνέχεια, και μέχρι την τάση του ανοικτού κυκλώματος, το ρεύμα μειώνεται ραγδαία, προσεγγίζοντας, σε μια στενή περιοχή τάσεων, η συμπεριφορά πηγής σταθερής τάσης.

Στον αντίποδα βρίσκεται η ηλεκτρική πηγή σταθερής τάσης, όπως π.χ ο ηλεκτρικός συσσωρευτής. Η τάση του μένει, περίπου σταθερή, σε μεγάλο εύρος εντάσεων

ρευμάτων, που δημιουργεί σε καταναλωτές-φορτία, που τροφοδοτεί. Ένα ΦΒ στοιχείο, υπό δεδομένη πυκνότητα ισχύος ΗΜ ακτινοβολίας, παράγει δεδομένο μέγιστο ρεύμα, ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αντίθετα, ένας συσσωρευτής μπορεί να δώσει μεγάλα ρεύματα. Στην περίπτωση βραχυκύκλωσης των άκρων του, δίδει εξαιρετικά μεγάλο ηλεκτρικό ρεύμα.

[1],[2]

## 1.9 Η ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΑ Φ/Β 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 που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι, η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγωγίμο υλικό του στοιχείου και απορροφάται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο με το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο συμβάλλει, όπως είδαμε, στην εκδήλωση του Φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται, σαν κινητική ενέργεια, στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό, και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα. Όπως θα αναλυθεί όμως παρακάτω, η αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιδρά αρνητικά στην απόδοσή τους.

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

$$E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{εξ.7})$$

όπου  $h$  είναι η σταθερά δράσης του Planck ( $h = 6.3 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ) και  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ). Επομένως, αν το ενεργειακό διάκενο είναι σε μονάδες ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και το μήκος κύματος σε μικρόμετρα ( $\mu\text{m}$ ), τότε το μέγιστο χρησιμοποιήσιμο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε ένα ημιαγωγό, ενεργειακού διακένου  $E_g$ , θα είναι :

$$\lambda_g = \frac{1.238}{E_g} \quad (\text{εξ.8})$$

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



$$\Phi = \frac{H}{h\nu} = \frac{H\lambda}{hc} \quad (\text{εξ.9})$$

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

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

$$\frac{d\Phi}{dx} = -a \cdot \Phi(x) \quad (\text{εξ.10})$$

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

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

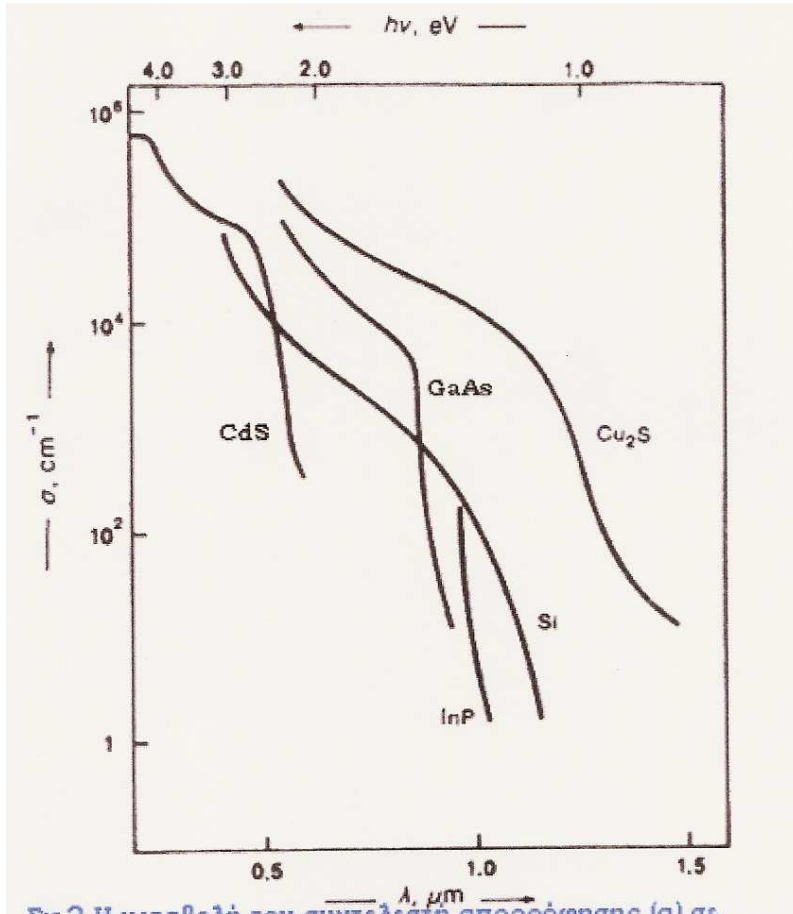
$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-ax) \quad (\text{εξ.11})$$

που ονομάζεται νόμος του BEER (Μπερ).

Στη συνέχεια βρίσκουμε εύκολα ότι :

$$-\frac{d\Phi}{dx} = a \cdot \Phi_0 \exp(-ax) \quad (\text{εξ.12})$$

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



**Σχήμα 23.** 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.

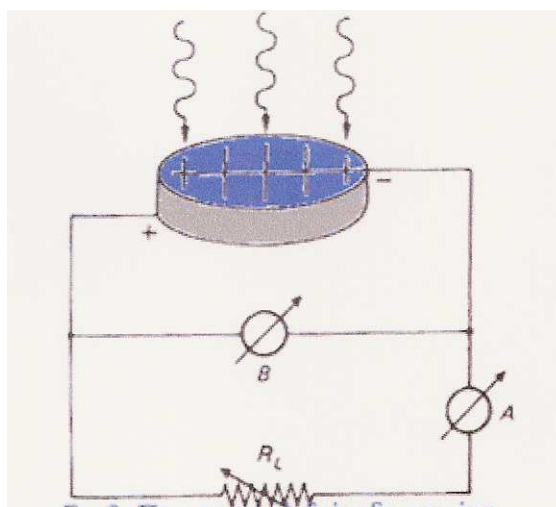
Όπως δείχνεται και στο (σχήμα 23) η τιμή του συντελεστή απορρόφησης μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, μηδενίζεται όταν το  $\lambda$  υπερβαίνει το  $\lambda_g$  του ημιαγωγού, αφού για αυτά τα μήκη κύματος δεν πραγματοποιείται καμιά απορρόφηση φωτονίων. Αντίθετα, παίρνει μεγάλες τιμές προς την πλευρά των μικρών μηκών κύματος που σημαίνει ότι η απορρόφηση πρακτικά όλων των αντίστοιχων φωτονίων γίνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού.

[1].

## 1.10 ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ (ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ)

### 1.10.1 Η ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ως πηγή 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.

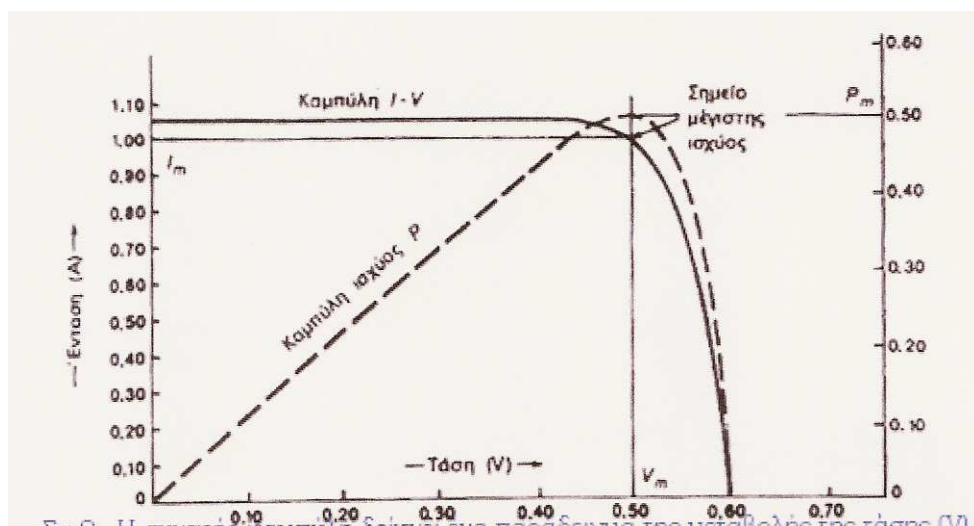


**Σχήμα 24.** Πειραματική διάταξη με ένα βολτόμετρο (B), ένα αμπερόμετρο (A) και μια μεταβλητή αντίσταση ( $R_L$ ) για τη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του Φωτοβολταϊκού στοιχείου, ας εξετάσουμε την συμπεριφορά του όταν οι πόλοι του συνδεθούν με ένα κύκλωμα που περιέχει μεταβλητή αντίσταση (Σχήμα 24). Είδαμε παραπάνω ότι όταν η τιμή της

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

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος, ανάμεσα στις παραπάνω ακραίες καταστάσεις, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές, όπως δείχνεται στο παρακάτω σχήμα. 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 τιμών  $V_{oc}$  και  $I_{sc}$ , το συντελεστή απόδοσης του στοιχείου ( $\eta$ ).

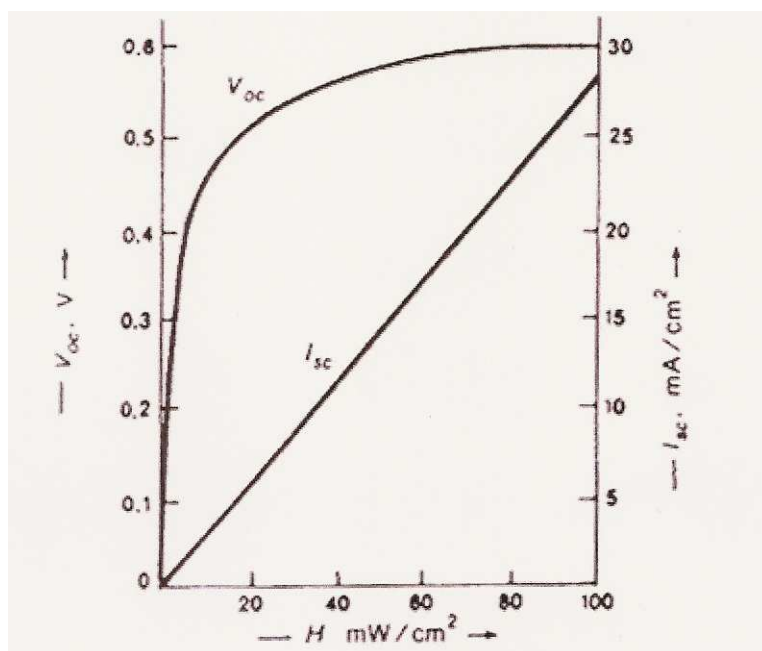


**Σχήμα 25.** Η συνεχής καμπύλη δείχνει ένα παράδειγμα της μεταβολής της τάσης ( $V$ ) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος ( $I$ ) που παράγει ένα φ/β στοιχείο πυριτίου, σε συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενη αντίσταση του κυκλώματος από μηδέν (όπου  $V=0$ ) μέχρι άπειρη (όπου  $I=0$ ). Η ασυνεχής καμπύλη δείχνει την αντίστοιχη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φ/β στοιχείο (η κλίμακα της ισχύος είναι στο δεξιό άξονα του διαγράμματος).  $V_m$  και  $I_m$  είναι η τάση και η ένταση που αντιστοιχούν στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ  $P_m$ .

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.

### 1.10.2 Η ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΣΕ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Τα παραπάνω αφορούν σε συνθήκες σταθερής ισχύος της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και σταθερής θερμοκρασίας του. Βλέπουμε όμως το (Σχήμα 26), ότι η μεταβολή της πυκνότητας της ισχύος της ακτινοβολίας συνεπάγεται αντίστοιχη μεταβολή της ανοιχτοκυκλώμενης τάσης και της βραχυκυκλώμενης 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 ανοιχτοκυκλώμενης 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.

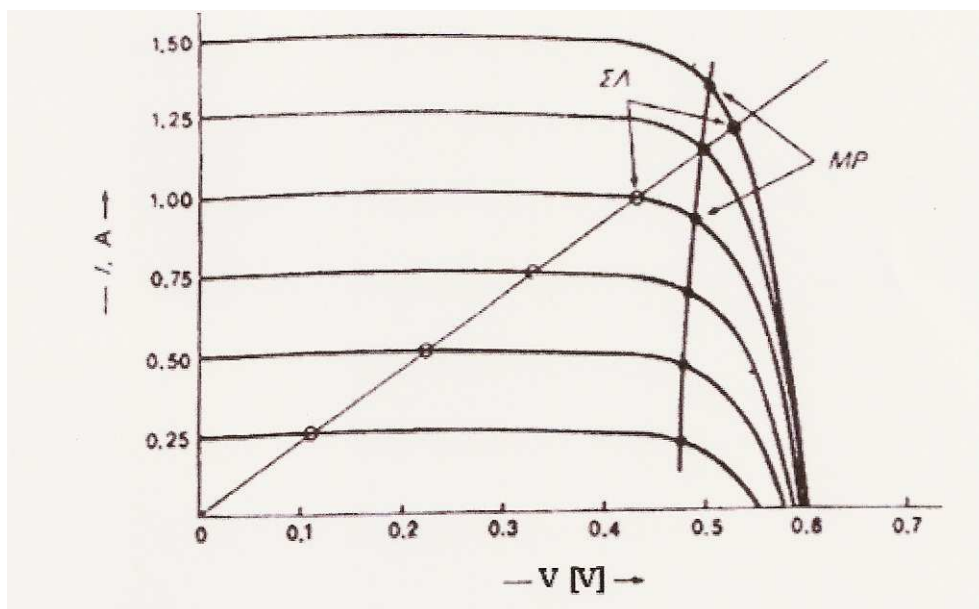


Σχήμα 26 .Η μεταβολή της ανοιχτοκυκλώμενης τάσης ( $V_{oc}$ ) και βραχυκυκλώμενης έντασης του ρεύματος ( $I_{sc}$ ) ενός Φ/Β στοιχείου πυριτίου σε συνάρτηση με την ισχύ της ακτινοβολίας ( $H$ ) που δέχεται ανά μονάδα της επιφάνειάς του.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε ότι για διαφορετικές πυκνότητες της ακτινοβολίας, σχηματίζεται μια οικογένεια μετατοπισμένων καμπυλών έντασης - τάσης. Είναι φανερό ότι π.χ. για την ακτινοβολία που δίνει  $I_{sc} = 1,25$  A έχουμε περίπου  $I_m = 1,1$  A και  $V_m = 0,5$  V και επομένως η κατάλληλη αντίσταση του κυκλώματος για να

παράγεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό στοιχείο του παραδείγματος είναι  $RL=V_m/I_m = 0,5/1,1 = 0,455 \Omega$ . 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 I-V σε σημείο διαφορετικό από το σημείο της μέγιστης ισχύος.

Πάντως, σε κάθε περίπτωση, λόγω της πολύ μικρής τιμής του ανάστροφου ρεύματος κόρου  $I_0$ , η ένταση του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι πρακτικά 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 επιφάνειας 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.



**Σχήμα 27.** Η μετατόπιση των σημείων λειτουργίας ( $\Sigma\Lambda$ ) ενός φ/β στοιχείου πυριτίου και η απομάκρυνση του από αντίστοιχα σημεία της μέγιστης ισχύος (MP) της καμπύλης έντασης (I) – τάσης (V) για διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά για σταθερή τιμή της αντίστασης του κυκλώματος.

Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η λειτουργία ενός Φωτοβολταϊκού στοιχείου και η ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται από 3 μεταβλητούς παράγοντες . α) την ένταση της ακτινοβολίας, β) τη θερμοκρασία του στοιχείου, γ) και την αντίσταση του κυκλώματος. Προφανώς, στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων επιδιώκεται οι παράγοντες αυτοί να παίρνουν ευνοϊκές

τιμές, ώστε να παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς, όσο επιτρέπει ο συντελεστής απόδοσης των στοιχείων

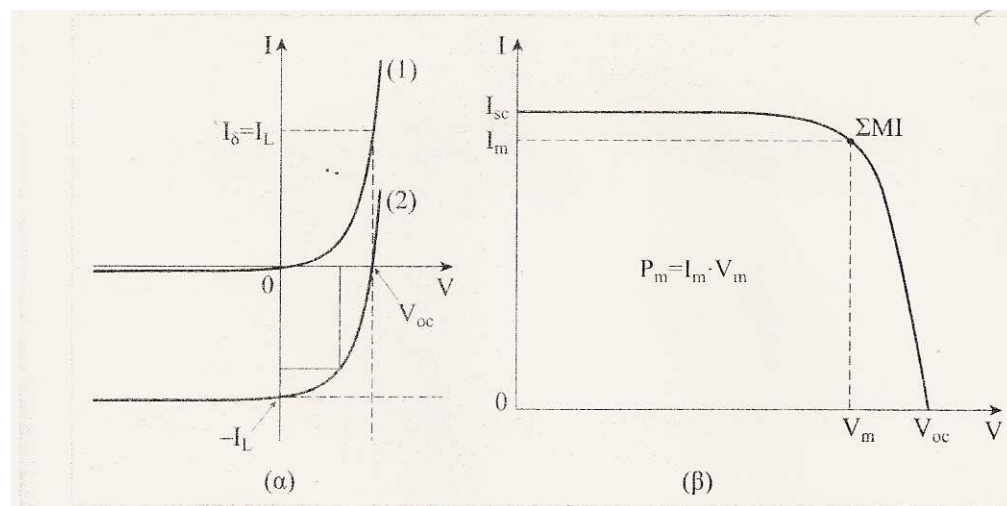
[1].

## 1.11 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

### 1.11.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ I-V ΕΝΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Το ρεύμα  $I_D$ , σε κάθε περίπτωση, είναι σαν να προέρχεται από μια ορθή τάση  $V_f$ , επειδή οφείλεται στην αύξηση των πυκνοτήτων των φορέων της πλειονότητας (αυτό ακριβώς κάνει η εφαρμογή ορθής τάσης σε δίοδο p-n). Συνεπώς συμπεραίνουμε, ότι οι τιμές του  $I_D$  ακολουθούν την καμπύλη I-V της διόδου.

Έτσι, για να κατασκευάσει κανείς την καμπύλη I-V, της φωτιζόμενης διόδου, προσθέτει δύο καμπύλες, την I-V της μη φωτιζόμενης διόδου και την ευθεία  $I=-I_L$ , του φωτορεύματος, που αποτελεί την I-V της πηγής του σταθερού ρεύματος. Το ρεύμα  $I_R$  έχει αντίθετη φορά από το επιβαλλόμενο στη δίοδο από μια εξωτερική πηγή με ορθή πόλωση. Συνεπώς το διάγραμμα I-V, της μη φωτιζόμενης επαφής, θα τοποθετήσουμε τις τιμές  $I_R$ , στο αρνητικό ημιάξονα. Σε κάθε τιμή του  $I_D$ , προσθέτουμε το  $-I_L$  και βρίσκουμε το  $I_R$  όπου  $\eta$ , ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου. Η σημαντική περιοχή για την καμπύλη I-V, βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο. Εκεί το ΦΒ στοιχείο συμπεριφέρεται ως πηγή ενέργειας και άρα παρέχει ενέργεια σε καταναλωτή ( $P=V \cdot I < 0$ ). Έτσι, από όλη την καμπύλη I-V κατασκευάζουμε μόνο το ένα τμήμα του τέταρτου τεταρτημορίου της καμπύλης I-V και μάλιστα ανεστραμμένο ως προς τις τιμές του ρεύματος (καμπύλη I-V)



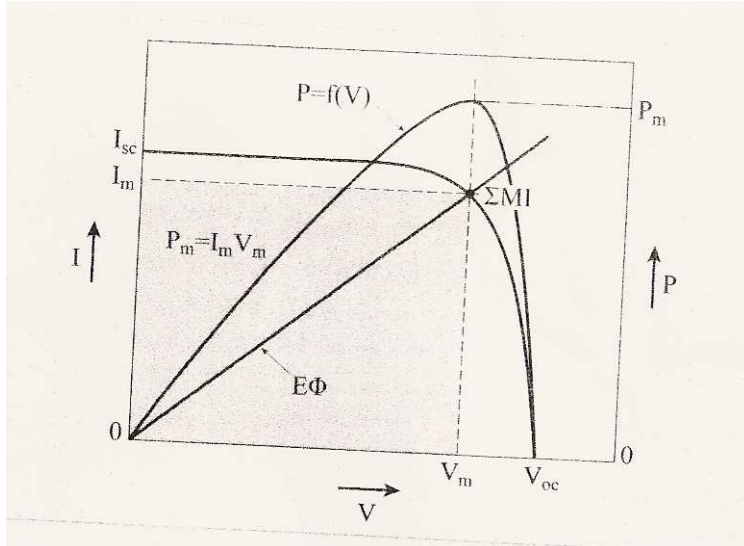
Σχήμα 28. (α) Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός, Φ/Β στοιχείου στο σκοτάδι (1) στο φως(2). (β) Λίδηται σε μεγέθυνση το τμήμα της καμπύλης που βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο, όπου η επαφή p-n συμπεριφέρεται ως Φ/Β στοιχείο.

### 1.11.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΟΥ

Μια χρήσιμη γραφική παράσταση, η οποία ενσωματώνεται και συνδυάζεται με τα διαγράμματα I-V της ηλεκτρικής πηγής που τροφοδοτεί μια διάταξη αξιοποίησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας π.χ μια ωμική αντίσταση, ένα ηλεκτρικό συσσωρευτή, ένα ηλεκτρικό κινητήρα κ.α είναι η **καμπύλη φόρτου** της διάταξης την οποία, στο εξής, θα ονομάζουμε **φόρτο** ή **φορτίο**.

### 1.11.3 ΣΗΜΕΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Υπολογίζουμε την ισχύ που παρέχει το ΦΒ στοιχείο, στην αντίσταση R σε συνάρτηση με την τάση στα άκρα του ΦΒ κατασκευάζουμε το γράφημά της σε συνάρτηση με την τάση V. Στις ακραίες τιμές τάσης, 0 και  $V_{oc}$ , οι παρεχόμενη ισχύς είναι μηδέν. Συνεπώς είναι αναμενόμενο, η καμπύλη  $P=f(V)$  να εμφανίζει το μέγιστο. Παρουσιάζεται κοντά στο σημείο όπου αρχίζει η έντονη πτώση του ρεύματος. Είναι προφανές ότι, για αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του Φ/B στοιχείου, πρέπει να προσαρμόσουμε την αντίσταση του καταναλωτή, που επιθυμούμε να συνδέσουμε στα άκρα του ΦΒ στοιχείου, ώστε η τάση και το ρεύμα σε αυτόν να αντιστοιχούν στο Σημείο Μέγιστης Ισχύος, ΣΜΙ (Maximum Power Point, MPP )



Σχήμα 29. Αναστραμμένη I- από σταθερό φωτισμό, ισχύος P, ως συνάρτηση της τάσης V στα άκρα του καταναλωτή ΣΜΙ=Σημείο μέγιστης Ισχύος. Σχεδιάστηκε επίσης, ευθεία φορτίου EΦ, για ένα ωμικό καταναλωτή, με αντίσταση R αντίστοιχη του ΣΜΙ ( $R=V_m / I_m$ ) V φ/β στοιχείου, στο τεταρτημόριο που αυτό παρέχει ενέργεια. Στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάστηκε η παρεχόμενη από αυτό κάτω



### 1.11.4 Ο ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΩΣΗΣ

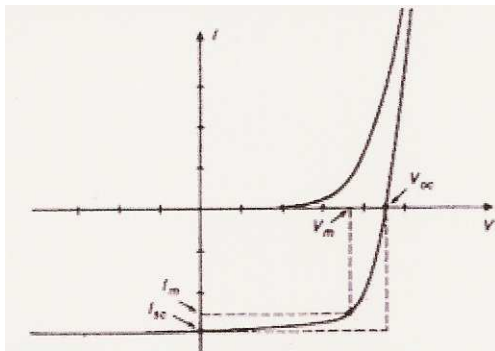
Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $p_m = I_m V_m$  προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της ανοικτωκυκλωμένης τάσης  $I_{sc} V_{oc}$  ενός Φωτοβολταϊκού στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (από την αγγλική έκφραση fill factor). Δηλαδή :

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

(εξ.13)

Στο διάγραμμα του παρακάτω σχήματος, ο FF δίνεται από το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογώνιου 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  $V_{oc}$  .

*Η χαρακτηριστική καμπύλη ενός Φ/Β στοιχείου*



**Σχήμα 30.** Η χαρακτηριστική καμπύλη έντασης (I)-τάσης (v) ενός φ/β στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως . Διακρίνονται τα δύο ορθογώνια που ο λόγος των εμβαδών τους καθορίζει την τιμή του συντελεστή πλήρωσης. Στο διάγραμμα, δεν δείχνεται το ανάστροφο ρεύμα κόρου, λόγω της ασήμαντα μικρής τιμής του σε σύγκριση με το φωτόρευμα του στοιχείου.

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

$$\eta = \frac{P_m}{HA} = \frac{I_m V_m}{HA} = \frac{FF \cdot I_a V_{oc}}{HA} \quad (\text{εξ.14})$$

όπου  $H$  είναι η ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του Φ/β στοιχείου, εμβαδού  $A$ . Όπως βλέπουμε, για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων, επιδιώκεται οι τιμές των  $FF$ ,  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$  να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

Προφανώς θα ισχύει και η σχέση :

$$\eta = \frac{\Phi(E_g) V_m}{\Phi E_\mu} \quad (\text{εξ } 15.)$$

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

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

$$\eta = \frac{2}{3} \frac{1}{3} = 22\% \quad (\text{εξ } 16.)$$

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 ίσης ισχύος αλλά πλουσιότερη σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο.

### 1.11.5 Η ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΕΝΟΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Το κυριότερο τυπικό ηλεκτρικό χαρακτηριστικό ενός ΦΒ πλαισίου, με βάση το οποίο θα αναζητηθεί στο εμπόριο, ώστε να καλύψει τις ανάγκες μιας συγκεκριμένης ΦΒ εγκατάστασης καθώς και η εμπορική του τιμή, καθορίζοντας με βάση την έννοια της ισχύος αιχμής (peak power), όπως αυτή που ορίστηκε και για το ΦΒ στοιχείο.

Ισχύς αιχμής,  $P_p$ , ενός ΦΒ πλαισίου είναι η μέγιστη ισχύς με την οποία αυτό αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC).

Οι μονάδες ισχύος που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός Φ/Β πλαισίου μιας ολόκληρης Φ/Β εγκατάστασης ή ενός ηλιακού στοιχείου ονομάζονται συχνά βάτ αιχμής ( $W_p$ , Watt peak) και κιλοβάτ αιχμής (kWp). Δηλαδή χρησιμοποιείται ο ίδιος

όρος και συμβολισμός (άλλωστε ουσιαστικά είναι και το ίδιο πράγμα) όπως για το μέτρο της επιφάνειας των Φ/Β στοιχείων που γνωρίσαμε προηγουμένως.

Από την σχέση που δίνει την απόδοση ηπ είναι φανερό ότι :

$$P_a (kWp) = 1(kW / m^2) \cdot S(m^2) \cdot \eta_{\pi} \quad (\text{εξ.17})$$

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

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

$$E(kWh / d) = \Pi(kWh / m^2 d) \cdot \frac{P_a (kWp)}{1(kW / m^2)} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho} \quad (\text{εξ.18})$$

Πάντως, μπορούμε να πούμε ότι για να έχουμε την πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς ενός Φ/Β πλαισίου, χρειάζονται οι τιμές των παρακάτω 9 τεχνικών χαρακτηριστικών του.

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

[1],[2]

## 1.12 ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

### 1.12.1 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΦΒ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα φβ στοιχεία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα, ανάλογα με τον επιδιωκόμενο σκοπό, κατά τρόπο ανάλογα σύνδεσης των ηλεκτρικών πηγών.

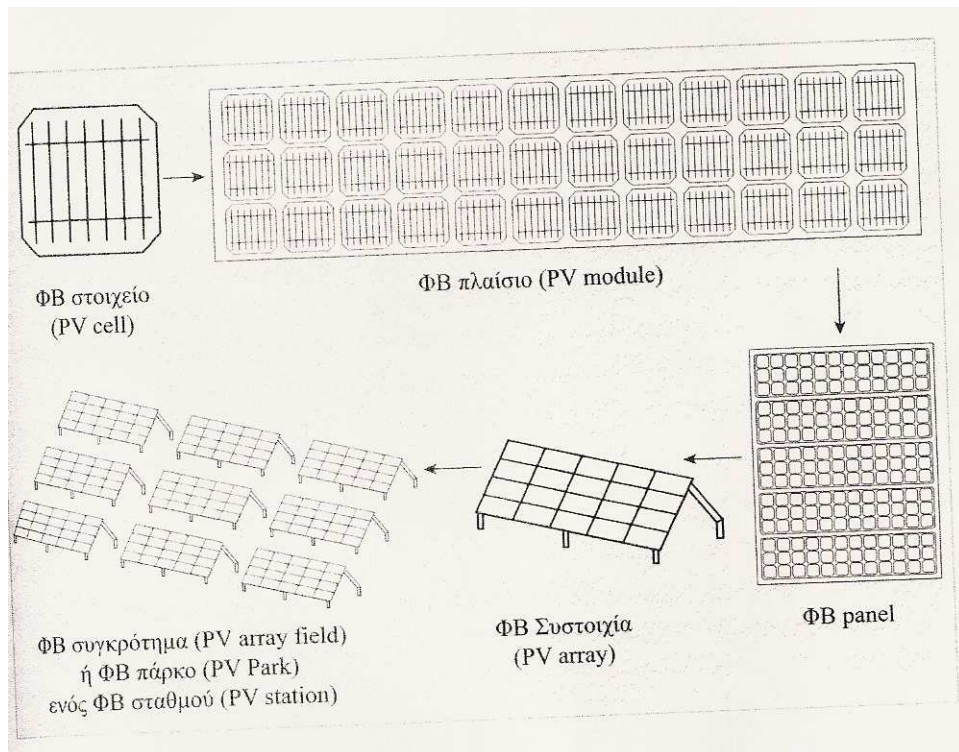
Μερικά ΦΒ πλαίσια συναρμολογημένα σε ένα μεταλλικό (συνήθως από Αλουμίνιο), με καλωδιώσεις που απολήγουν σε ηλεκτρολογικό κιβώτιο, ως ενιαία κατασκευή έτοιμη για εγκατάσταση, με δυνατότητα, λόγω μικρού βάρους εύκολης αφαίρεσης μεταφοράς ή επέμβασης στα επί μέρους ΦΒ πλαίσια, ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες όμοιες μονάδες, λέγεται ΦΒ **panel** (σύνθετο).

Ο συνδυασμός πολλών ΦΒ πλαισίων, καλωδιωμένων μεταξύ τους, σε σειρά ή παράλληλα, σε μια επίπεδη συνήθως επιφάνεια σταθερή ή περιστρεφόμενη, με αντίστοιχο κεντρικό ηλεκτρολογικό κιβώτιο, αποτελεί την ΦΒ συστοιχία (**array**). Τα ΦΒ πλαίσια συνδέονται κατά κλάδους. Κάθε κλάδος αποτελείται από ΦΒ πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Οι ισοδύναμοι κλάδοι συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους. Η σύνδεση σε σειρά αυξάνει την ολική τάση ενώ η παράλληλη σύνδεση το ολικό ρεύμα.

Τα ΦΒ πλαίσια σε μια συστοιχία, συνδυάζονται έτσι ώστε η μεταφορά της ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας να γίνεται με μικρότερες δυνατές απώλειες στη γραμμή μεταφοράς, δηλαδή με χαμηλό ρεύμα και αντίστοιχα μεγάλη ηλεκτρική τάση, μέσα στα επιτρεπτά όρια. Η μέγιστη επιτρεπτή τάση σε ΦΒ συστήματα είναι 600 V.

Σε κάθε περίπτωση, κατά τη σχεδίαση ενός ΦΒ συστήματος, λαμβάνεται πρόνοια ώστε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά κάθε τμήματος του να συμφωνούν με τα αντίστοιχα του προηγούμενου και του επόμενου του. Προκειμένου να προσαρμοστεί η τάση της ΦΒ συστοιχίας στην τάση του συσσωρευτή, απαιτούνται ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις, που ονομάζονται μετατροπείς συνεχούς τάσεως σε συνεχή (converters DC-DC) Η ισχύς αιχμής μιας τυπικής ΦΒ συστοιχίας, για μικρής ισχύος οικιακές εγκαταστάσεις, βρίσκεται στην περιοχή 100W-2KW.

Ένα συνεργαζόμενο σύνολο ΦΒ συστοιχιών αποτελούν ένα ΦΒ συγκρότημα ή πάρκο το οποίο, μαζί με όλες εκείνες τις διατάξεις που απαιτούνται για την μετατροπή ρεύματος σε εναλλασσόμενο, τον έλεγχο της φόρτισης συσσωρευτών (αν υπάρχουν), για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 1KW- μερικά MW) επαρκούς για την τροφοδοσία οικίας, οικισμών ή χωριών κλπ αποτελούν το ΦΒ σταθμό.



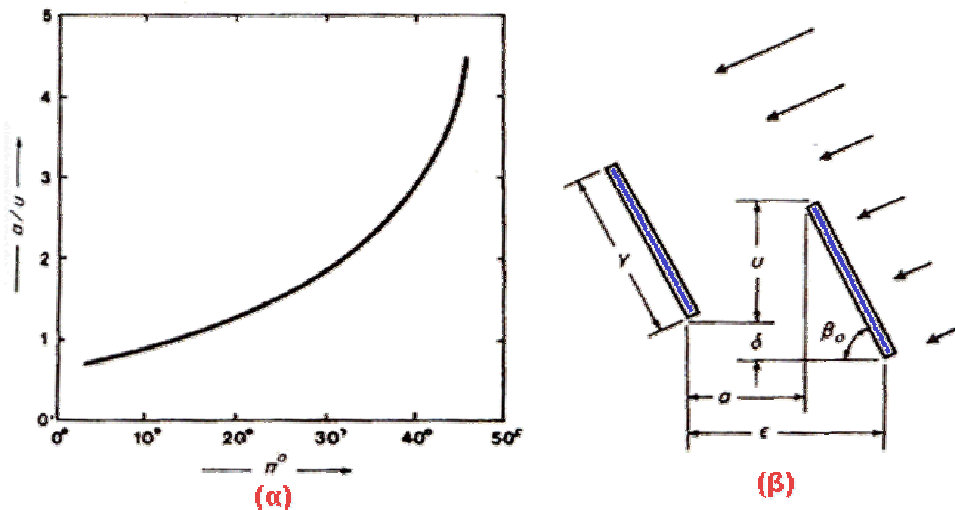
**Σχήμα 31. Τρόποι σύνδεσης φ/β**

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

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

$$\beta_{\varepsilon} \leq 48^\circ - \phi \quad (\text{εξ.19})$$

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



Σχ.3 α) Η καμπύλη του λόγου της ελεύθερης απόστασης  $a$  ανάμεσα στις γειτονικές σειρές των ηλιακών συλλεκτών μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας προς την επικάλυψη του ύψους του  $U$  σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου  $\pi^{\circ}$ , ώστε να μην εμποδίζεται ουσιαστικά η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας. β) Η έννοια των μηκών  $a, \gamma, \delta$  και  $\epsilon$  και της γωνίας κλίσης  $\beta_{\alpha}$  για τη διάταξη των ηλιακών συλλεκτών στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Το διάγραμμα είναι εμπειρικό και προέρχεται από την έκδοση Stand-alone PV systems της εταιρείας Morgan (1980)

Σχήμα 31

Ειδικότερα το διάγραμμα στο (Σχήμα 31) μας βοηθά στον προσδιορισμό της απόστασης ανάμεσα στις παράλληλες σειρές των ηλιακών συλλεκτών στις Φ/Β συστοιχίες, ώστε η μια σειρά να μη σκιάζει αισθητά την επόμενη. Συγκεκριμένα, το διάγραμμα δίνει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του λόγου της ελεύθερης απόστασης ανάμεσα στις δύο σειρές ( $a$ ) προς την επικάλυψη του ύψους της κατασκευής στήριξης του συλλέκτη ( $u$ ). Αν  $\gamma$  είναι το πλάτος το στηρίγματος (που συμπίπτει με το πλάτος του συλλέκτη, δηλαδή του Φ/Β πλαισίου, ή του πάνελ),  $\beta_{\alpha}$  είναι η κλίση του, και  $\delta$  είναι η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στα στηρίγματα των δύο σειρών, τότε το  $u$  δίνεται προφανώς από την σχέση :

$$u = \gamma \cdot \sin \beta_{\alpha} - \delta \quad (\text{εξ.20})$$

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

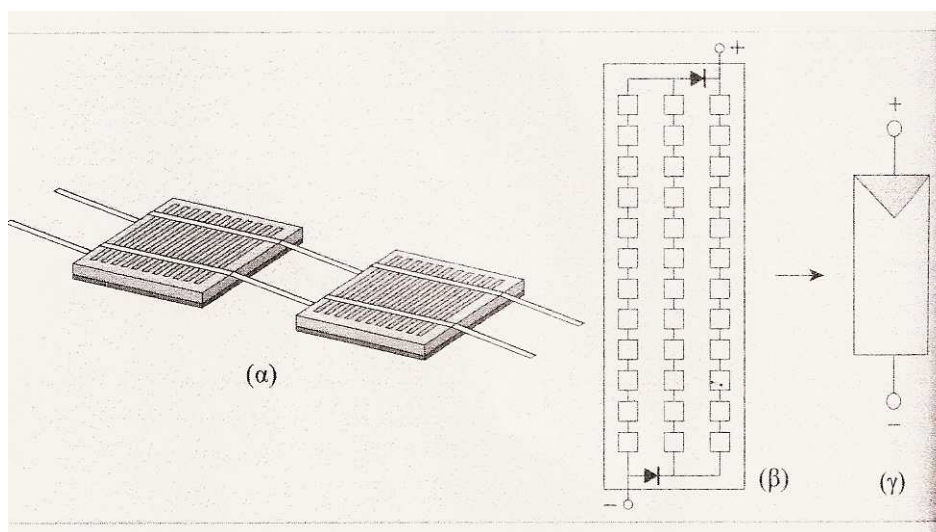
$$\epsilon = a + \gamma \cdot \cos \beta_{\alpha} \quad (\text{εξ.21})$$

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

### 1.12.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο, μικρών διαστάσεων αποτελεί αντικείμενο έρευνας σε εργαστηριακό επίπεδο. Σε επόμενο στάδιο βιομηχανικής παρασκευής, η επιτυχής μεθοδολογία μεταφέρεται σε συσκευές-θαλάμους, μεγαλύτερου μεγέθους, οι οποίοι επιτρέπουν την παρασκευή ΦΒ στοιχείων μεγαλύτερων διαστάσεων, σε αυξημένο ρυθμό παραγωγής. Μετά την παρασκευή της βασικής δομής του ΦΒ στοιχείου, ακολουθεί η κοπή του στο επιθυμητό σχήμα, συνήθως τετραγωνικό, ώστε κατά την σύνθεσή τους σε μεγαλύτερη μονάδα, να αφήνουν μεταξύ τους την ελάχιστη μη εκμεταλλεύσιμη επιφάνεια. Ένα σύνολο Φ/Β στοιχείων συνδέονται σε σειρά, ώστε να αποτελούν εύχρηστη σε μέγεθος μονάδα με τα επιθυμητά ηλεκτρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Τα βασικά κριτήρια είναι, για τα μεν ηλεκτρικά χαρακτηριστικά η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, τουλάχιστον σε απλό συσσωρευτή, ονομαστικής τάσης 12 V, για δε τις διαστάσεις του, η ευκολία κατασκευής μεταφοράς, ενσωμάτωσης τους σε σύνολα (συστοιχίες) και το μειωμένο κόστος αντικατάστασης του αν κατά τη χρήση υποστεί καταστροφή.

Στην πράξη, ένα σύνολο Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένων με σειρά όπως στο παρακάτω σχήμα, ώστε να εμφανίζουν συγκεκριμένη τάση ανοικτού κυκλώματος (σύνδεση 36 Φ/Β στοιχείων πυριτίου, δίδει τάση ανοικτού κυκλώματος, σε θερμοκρασία κυψελίδας  $\theta_c = 25^\circ \text{C}$ ,  $V_{oc} = 36 \cdot 0,6 = 21,6 \text{V}$ ) τοποθετώντας, σε επίπεδη γυάλινη πλάκα, υψηλής διαφάνειας, προσαρμοσμένης σε μεταλλικό πλαίσιο, υψηλής αντοχής, συνήθως από ανοδιωμένο αλουμίνιο. Τα οπίσθια μέρη καλύπτεται από ειδικό πλαστικό, για προστασία από την υγρασία. Η τελική κατασκευή πληρεί ειδικές προδιαγραφές, ώστε να διαθέτει την απαραίτητη μηχανική αντοχή, τις κατάλληλες υποδοχές στήριξης και επιπλέον την αυξημένη στεγανότητα για προστασία από την υγρασία.



Σχήμα 32.(α) Τρόπος σύνδεσης δύο διαδοχικών Φ/Β πλαισίων μέσα σε ένα Φ/Β πλαίσιο.(β) Η εσωτερική δομή ενός Φ/Β πλαισίου. Διακρίνονται οι δίοδοι

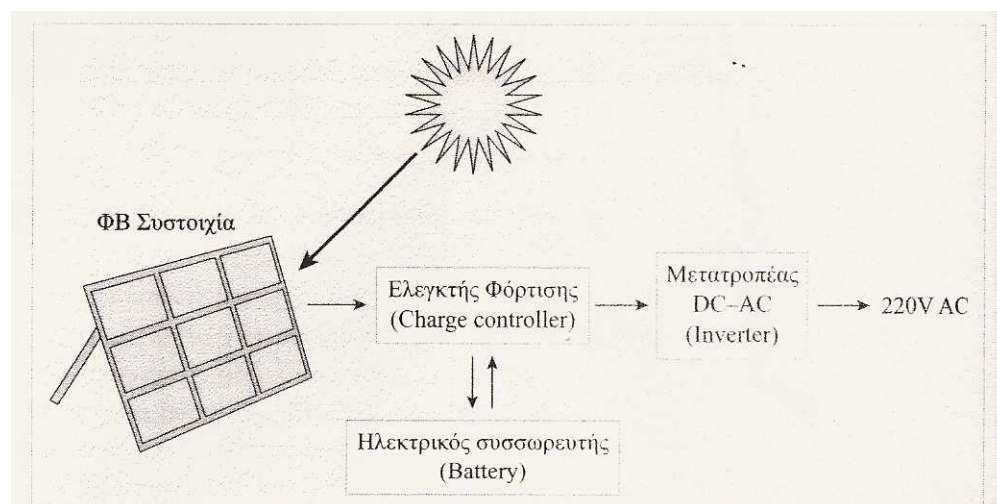
παράκαμψης ( $\gamma$ ) Η συμβολική παράσταση δουλεύει εσωτερικά , από το (-) στο (+) και στο εξωτερικό κύκλωμα από το (+) στο (-) του πλαισίου.

[1].

### 1.13 ΒΑΣΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΕΝΟΣ ΦΒ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η ΦΒ συστοιχία παράγει συνεχή τάση και άρα μπορεί να τροφοδοτήσει απευθείας μόνο ηλεκτρικές συσκευές που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα. Σε αυτές συγκαταλέγονται : οι αντιστάσεις θέρμανσης ,οι κινητήρες συνεχούς, οι ηλεκτρικοί λαμπτήρες, τα ηλεκτρικά ψυγεία συνεχούς, με τάσεις τροφοδοσίας 12 ή 24 V DC κ.α. Ειδικές διατάξεις μετατρέπουν το ρεύμα σε εναλλασσόμενο (INVERTERS), προκειμένου να τροφοδοτηθούν συσκευές οικιακής ή άλλης χρήσης, οι οποίες ουσιαστικά, λειτουργούν ως να έχουν συνδεθεί σε κεντρικό δίκτυο (220 Vac, ΔΕΗ).

Η επιλογή της απευθείας χρήσης της συνεχούς τάσης από ένα ΦΒ σύστημα ή μετατροπή της σε εναλλασσόμενη, εξετάζεται κατά περίπτωση. Σε περιορισμένες περιπτώσεις, όπως π.χ σε μικρά αυτόνομα αντλητικά συστήματα ή συστήματα τροφοδοσίας σταθμών τηλεμετάδοσης, φωτισμού δρόμων ή πάρκων κ.λ.π η αξιοποίηση απευθείας της ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας, είναι προτιμητέα. Στην πλειονότητα όμως των περιπτώσεων επιλέγεται η μετατροπή της συνεχούς σε εναλλασσόμενη τάση και ο λόγος είναι ότι οι περισσότερες συσκευές και εργαλεία καθημερινής χρήσης, τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση.



**Σχήμα 33. Διάγραμμα ροής ενέργειας σε Φ/Β σύστημα με αποθήκευση και μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη**

Παραδείγματος χάριν, όταν η ΦΒ ηλεκτρική ενέργεια προορίζεται για οικιακή χρήση, είναι προτιμότερο να προσαρμόσουμε το σύστημα τροφοδοσίας στις ήδη χρησιμοποιούμενες οικιακές συσκευές μας λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση 220 V. Οι τελευταίες χαρακτηρίζονται , λόγω μεγαλύτερης εμπορικής κατανάλωσης , από χαμηλό κόστος παραγωγής. Εξάλλου , η ηλεκτρική εγκατάσταση διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος, τάσεως 220 V, είναι σαφώς φτηνότερη της αντίστοιχης με συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, χαμηλής ηλεκτρικής τάσεως, επειδή στην περίπτωση



που απαιτούνται μεγαλύτερης διανομής καλώδια για μείωση των απωλειών στη μεταφοράς. Π.χ σε μια εγκατάσταση αγροικίας ή παραθεριστικής κατοικίας, με απαιτήσεις φωτισμού, ψύξης, χρήση ηλεκτρικών εργαλείων, άντλησης και τηλεόρασης, αποδεικνύεται προσφερόμενη η χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ένα τυπικό σύστημα ΦΒ τροφοδοσίας, με μετατροπή της συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη 220V αποτελείται από τα εξής κύρια τμήματα : το σύστημα των ΦΒ πλαισίων, τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές, τον ελεγκτή φόρτισης και τους διάφορους τύπους μετατροπέων της ηλεκτρικής τάσης, συνεχούς σε συνεχή, συνεχούς σε εναλλασσόμενη και εναλλασσόμενης σε συνεχή ανάλογα με τις αντίστοιχες απαιτήσεις.

### **1.13.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

#### **ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

1. Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή
2. Ικανοποιητική απόδοση μετατροπής
3. Σχετικά εύκολη μέθοδος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων από πρώτες ύλες που αφθονούν.
4. Πρακτικά απεριόριστη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων (τουλάχιστον 20ή 30 χρόνια)
5. Τα ηλιακά στοιχεία δεν έχουν κινούμενα μέρη, επομένως είναι σχεδόν απαλλαγμένα από την ανάγκη επίβλεψης και συντήρησης (αρκεί συνήθως η επιθεώρηση τους μία φορά το εξάμηνο). Αλλά και σε περίπτωση βλάβης, η αποκατάσταση λειτουργίας γίνεται εύκολο λόγω σπονδυλωτής μορφής της φωτοβολταϊκής διάταξης
6. Η Φωτοβολταϊκή μετατροπή δεν προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον, ούτε θόρυβο ή ενόχληση και δεν δημιουργεί απόβλητα ή άχρηστα παραπροϊόντα.
7. Δίνει δυνατότητα ανεξαρτησίας από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής
8. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν με όση μικρή ισχύ ζητηθεί.
9. Η αναλογία της παραγόμενης ισχύος προς το βάρος της διάταξης είναι αρκετά μεγάλη, περίπου 100W/kg, που είναι σημαντική ιδιότητα για της διαστημικές εφαρμογές.

## ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

1. Υψηλό κόστος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων.
2. Για 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],[2]

## **1.14 ΤΡΟΠΟΙ ΧΡΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (ΩΣ ΑΥΤΟΝΟΜΑ Ή ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ)**

### **Ανεξάρτητα από το δίκτυο της ΔΕΗ ή σε συνεργασία μ' αυτό.**

Μια Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση μπορεί να αποτελεί λοιπόν ένα **αυτόνομο σύστημα** που να καλύπτει το σύνολο των ενεργειακών αναγκών ενός κτιρίου ή μιας επαγγελματικής χρήσης. Για τη συνεχή εξυπηρέτηση του καταναλωτή, η εγκατάσταση θα πρέπει να περιλαμβάνει και μια μονάδα αποθήκευσης (μπαταρίες) και διαχείρισης της ενέργειας.



1. φωτοβολταϊκά πλαίσια
2. πίνακας ελέγχου
3. αντιστροφέας (inverter)
4. μετρητής ΔΕΗ

Εναλλακτικά, ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρισμού με φωτοβολταϊκά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το δίκτυο της ΔΕΗ (**διασυνδεδεμένο σύστημα**). Στην περίπτωση αυτή, καταναλώνει κανείς ρεύμα από το δίκτυο όταν το φωτοβολταϊκό σύστημα δεν επαρκεί (π.χ. όταν έχει συννεφιά ή κατά τη διάρκεια της νύχτας) και δίνει ενέργεια στο δίκτυο όταν η παραγωγή υπερκαλύπτει τις ανάγκες του, π.χ. τις ηλιόλουστες ημέρες ή όταν λείπει κανείς.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται για **παροχή ηλεκτρικής ενέργειας εφεδρείας (δηλαδή ως συστήματα αδιάλειπτης παροχής – UPS)**. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα είναι μεν διασυνδεδεμένο με τη ΔΕΗ, αλλά διαθέτει και μπαταρίες (συν όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά) για να αναλαμβάνει την κάλυψη των αναγκών σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος και για όσο διαρκεί αυτή.

Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό ισχύος 1 κιλοβάτ (kW) παράγει κατά μέσο όρο 1.200-1.500 κιλοβατώρες το χρόνο (ανάλογα με την ηλιοφάνεια της περιοχής) και αποτρέπει κατά μέσο όρο κάθε χρόνο την έκλυση 1.450 κιλών διοξειδίου του άνθρακα, όσο δηλαδή θα απορροφούσαν δύο στρέμματα δάσους.

### 1.14.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

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

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

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

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

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

#### ***β) Αυτόνομα ή απομονωμένα συστήματα (100Wr –200KWr)***

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

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

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

Στην κατηγορία αυτή, που σύμφωνα με τις συμβατικές θεωρήσεις προς το παρόν δεν αξιολογείται σαν οικονομικά βιώσιμη , διακρίνονται δύο κατηγορίες συστημάτων.

- Φ/Β συστήματα μεγέθους έως μερικών εκατοντάδων KWp που τροφοδοτούν κατοικίες, συγκροτήματα κατοικιών ή άλλα κτίρια και όπου η τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια τροφοδοτείται (πωλείται) προς το δίκτυο
- Φ/Β σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο
- Για τα Φ/Β συστήματα που αναρτώνται σε κτίρια (σε προσόψεις, οροφές , κλπ.), σε σύνδεση με το δίκτυο, τελευταία έχει εκδηλωθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον . Τα οφέλη που προκύπτουν είναι:
  - συγχρονισμός Ψυκτικών φορτίων κτιρίων με μεγίστη παραγόμενη ισχύ από Φ/Β
  - αποφυγή χρήσης γης
  - αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

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

#### 1.14.2 Η Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Υπάρχουν πάνω από 550 KWp εγκατεστημένων Φ/Β συστημάτων σε όλη τη χώρα.

Τα μεγαλύτερα συστήματα έχουν εγκατασταθεί από τη ΔΕΗ.

Οι εφαρμογές αυτές αφορούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το δίκτυο των νησιών και την ηλεκτροδότηση μικρών χωριών. Μεγαλύτερο πλήθος συστημάτων , πάνω από 350 αλλά μικρότερης ισχύος , έχει εγκαταστήσει η Υπηρεσία Φάρων του Πολεμικού Ναυτικού. Ένα ακόμα μεγαλύτερο πλήθος έχει εγκατασταθεί από ιδιώτες για ηλεκτροδότηση εξοχικών κατοικιών , μικρών ξενοδοχειακών μονάδων , μοναστηριών κ.λπ. Οι εγκαταστάσεις αυτές έχουν γίνει χωρίς καμία οικονομική ενίσχυση από την Πολιτεία.

Εκτιμάται ότι το τρέχον μέγεθος της ελληνικής αγοράς κυμαίνεται ανάμεσα σε 20 και 40 KWp ανά έτος. Εκτίμηση για το αξιοποιήσιμο δυναμικό δεν είναι δυνατόν να δοθεί, γιατί η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να αξιοποιηθεί παντού , φθάνει να προσφέρει μια οικονομικά βιώσιμη λύση. Το μέσο κόστος παραγωγής της ΔΕΗ, σε τιμές του 1994 , για το διασυνδεδεμένο σύστημα (Ηπειρωτική Ελλάδα) ήταν 12,5 δρχ./KWp, ενώ το μέσο κόστος παραγωγής στα νησιά κυμάνθηκε από 23 μέχρι 100 δρχ./ KWp. Αν , συνεπώς, προστεθεί στην τιμή της KWh, το εξωτερικό κόστος που παράγεται νησιωτική χώρα, αυτή αυξάνεται και η ψαλίδα ανάμεσα στα Φ/Β και στα συμβατικά καύσιμα κλείνει. Όσο για ορισμένα από τα νησιά, η τιμή της τοπικά παραγόμενης ενέργειας είναι ήδη τέτοια, που η Φ/Β ενέργεια είναι σήμερα πιθανότατα η πλέον συμφέρουσα λύση στις περιπτώσεις που προγραμματίζεται ενίσχυση του τοπικού δικτύου της ΔΕΗ. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί, ότι το κόστος ηλεκτροπαραγωγής κατά τη διάρκεια ωρών αιχμής, για πολλά από τα νησιά που παρουσιάζουν σχετικά χαμηλό μέσο κόστος, είναι δύο και τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό, γεγονός που σημαίνει, ότι και σε αυτά τα νησιά η χρήση Φ/Β συστημάτων πιθανόν να αποτελέσει μια ανταγωνιστική πρόταση στο μέλλον.

Ο πρόσφατος Νόμος 2244/94 δεν ευνοεί ιδιαίτερα τα Φ/Β συστήματα. Η προσφερόμενη τιμή αγοράς της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ (70-90% της τιμής

πώλησης της KWh από τη ΔΕΗ) , δεν κάνει ελκυστικές τις σχετικές επενδύσεις για Φ/Β συστήματα. Τέλος, το Πρόγραμμα Επιδεικτικών Έργων (Π.ΕΠ.ΕΡ) της Γ.Γ.Ε.Τ , που προκηρύχτηκε πρόσφατα στα πλαίσια του ΕΠΕΤ II, περιλαμβάνει τα Φ/Β συστήματα σαν ιδιαίτερη περιοχή εφαρμογών και αναμένεται, στο βαθμό που εξασφαλιστεί η απαιτούμενη χρηματοδότηση (50%) από ιδιωτικούς φορείς, να συμβάλει στην περαιτέρω ανάπτυξη Φ/Β εφαρμογών στη χώρα.

[8]

## **1.15 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΛΕΜΟΝΙΑ**

### **1.15.1 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗ**

Ηλεκτρόλυση είναι η διάσπαση μιας ουσίας με την βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος. Η αρχή έγινε το 1800 , όταν οι πρώτοι οι Νικόλσον και ο Κάρλαιλ παρατήρησαν πως όταν βύθιζαν δύο μεταλλικές ράβδους (ηλεκτρόδια) σε ορισμένα διαλύματα (ηλεκτρολύτες) και συνέδεσαν έπειτα τις ράβδους με μια μπαταρία, το ηλεκτρικό ρεύμα κυκλοφορούσε μέσω ηλεκτρολύτη. Μάλιστα στο ένα ή και στα δύο ηλεκτρόδια είχαμε εναπόθεση κάποιας ουσίας.

Αυτό εξηγείται ως εξής: Υπάρχουν ενώσεις οι οποίες όταν βρεθούν σε διάλυμα , διασπώνται σε αρνητικά και θετικά φορτισμένα σωματίδια. Έτσι , όταν συνδέσουμε με μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος τα ηλεκτρόδια, τα θετικά φορτισμένα θα τα έλξει το αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος), ενώ τα αρνητικά φορτισμένα το θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος). Αυτά τα σωματίδια ο Φαραντει (Faraday) τα ονόμασε 'ίόντα'(από την μετοχή του Αρχαίου Ελληνικού 'ειμί'= 'Εκείνο που πηγαίνει '). Έτσι με το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης είναι δυνατό να διασπαστεί ένωση στα στοιχεία που περιέχει, μια και τα ιόντα χάνουν τα φορτίο τους στα ηλεκτρόδια και μετατρέπονται συνήθως σε ουδέτερα άτομα.

### 1.15.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ- (Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΛΕΜΟΝΙΩΝ ΩΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑ)



Τα άτομα του χαλκού προσελκύουν ηλεκτρόνια με μεγαλύτερη δύναμη από τα άτομα του τσίγκου. Αν φέρετε τα δύο μέταλλα σε επαφή, πολλά ηλεκτρόνια θα περάσουν από τον τσίγκο στο χαλκό. Όταν η δύναμη απώθησης μεταξύ των ηλεκτρονίων και η δύναμη έλξης ηλεκτρονίων από τον χαλκό ισοσταθμιστούν και αυτό συμβαίνει σχεδόν στιγμιαία, η ροή ηλεκτρονίων σταματά.

Αν όμως τα δύο ηλεκτρόνια είναι βουτηγμένα σε έναν αγωγό-διάλυμα και τα συνδέσουμε εξωτερικά με ένα σύρμα, η αντίδραση μεταξύ ηλεκτροδίων και διαλύματος δημιουργεί ένα κύκλωμα με συνεχή ροή ηλεκτρονίων που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε.

Σε αυτή την αρχή στηρίζονται οι μπαταρίες αυτοκινήτων. Ως αγωγό-διάλυμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιονδήποτε ηλεκτρολύτη, ανεξάρτητα από το αν είναι οξύ, βάση ή διάλυμα άλατος. Η μπαταρία λεμονιού δουλεύει διότι ο χυμός του λεμονιού είναι όξινος.

Η διάρκεια ζωής της όμως είναι περιορισμένη, γιατί η παραγωγή υδρογόνου στα ηλεκτρόδια δημιουργεί αποθέσεις οξειδίων που εμποδίζουν την επαφή μετάλλου και ηλεκτρολύτη. Οι εμπορικές μπαταρίες υγρού τύπου περιέχουν ειδικά χημικά που δεσμεύουν το παραγόμενο υδρογόνο πριν δημιουργήσει αποθέσεις.

## **ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

- 1.Κυλάμε το λεμόνι με την παλάμη σε μια σκληρή επιφάνεια για να σπάσουν μερικοί από τους θυλάκους με το χυμό στο εσωτερικό του.
- 2.Στην συνέχεια βάζουμε δυο μεταλλικές λωρίδες βαθιά μέσα στο λεμόνι, σε απόσταση 2-3 εκ, προσέχοντας να μην ακουμπάνε μεταξύ τους.
- 3.Έπειτα ενώνουμε κάθε επαφή με τα καλώδια και τα κροκοδειλάκια όπως δείχνει η φωτογραφία και μετράμε το ρεύμα στο άλλο άκρο των καλωδίων με το πολύμετρο. Η μέτρηση που θα δούμε θα είναι γύρω στο 1 V και αν μετρήσουμε ρεύμα θα είναι στην κλίμακα Αμπέρ, θα μετρήσουμε 0,0001 A.
- 4.Στο τέλος ενώνουμε τα καλώδια με τα κροκοδειλάκια, στις επαφές που υπάρχουν στη θέση της μπαταρίας
- 5.Η τάση που θα δείξει το πολύμετρο είναι 0,9V

## **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

Οι εφαρμογές που μπορούμε να έχουμε με τα λεμόνια είναι περιορισμένες διότι το 1 λεμόνι δίνει  $1V \cdot 0,0001A = 0,0001W$  και για αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε συσκευές που καταναλώνουν ελάχιστο ρεύμα όπως είναι ένα ρολόι με ενδείξεις LCD ή ηλεκτρικό θερμόμετρο.


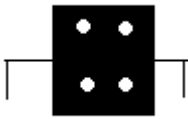

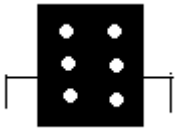
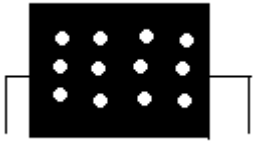
[8],[7]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 1

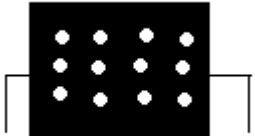




### Α' ΜΕΡΟΣ

Στο πρώτο πειραματικό μέρος χρησιμοποιούμε 12 φ/β στοιχεία τα οποία συνδέουμε με διάφορες συνδεσμολογίες (σε σειρά ή παράλληλα) και με χρήση πυρανόμετρου μετράμε την ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης με το πολύμετρο μετράμε την τάση και με την μεταβλητή αντίσταση έχουμε κάποιες τιμές αντιστάσεων. Τέλος με τον νόμο του (ohm) γίνεται και ο υπολογισμός έντασης και η ισχύς υπολογίζεται από την εξίσωση  $P=V \cdot I$ . Στις μετρήσεις που έγιναν η ηλιακή ακτινοβολία δεν ήταν σταθερή.

Στο σκαρίφημα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συνδεσμολογίες των διαφόρων πειραμάτων.

ΠΕΙΡΑΜΑ	ΔΙΑΤΑΞΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1.		1 ΣΤΟΙΧΕΙΟ
2.		2 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΚΑΙ 2 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ
3.		2 ΣΕΙΡΕΣ ΑΠΟ 4 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ
4.		3 ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΑΠΟ 2 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ
5.		3 ΣΕΙΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΑΠΟ 4 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ



6.		3 ΣΕΙΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΑΠΟ 4 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ
7.		2 ΣΕΙΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ 3Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ
8.		2 ΣΕΙΡΕΣ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ 3 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ
9.		4 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ
10.		2 ΣΕΙΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ 3 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ

**ΣΚΟΠΟΣ:** Η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος με διάφορους τρόπους είτε σε σειρά ή παράλληλα και η κατασκευή καμπύλων ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ:** Στα ακόλουθα πειράματα έχουμε τα φ/β πλαίσια τα οποία τα συνδέουμε η σε σειρά ή παράλληλα και έπειτα παίρνουμε την μεταβλητή αντίσταση ή ( διάφορες αντιστάσεις) η οποία συνδέεται παράλληλα με τα φ/β πλαίσια. Έπειτα συνδέουμε το πολύμετρο παράλληλα με τα Φ/Β πλαίσια και μετράμε την τάση. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος δηλαδή χωρίς κάποια αντίσταση στα άκρα. Τα φωτοβολταϊκά τα έχουμε στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος.

Στα φ/β πλαίσια προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία και δημιουργούνται ζεύγη φορέων (ηλεκτρόνια και οπές) τα ηλεκτρόνια και έτσι παράγεται μια τάση στα άκρα των φ/β πλαισίων με αποτέλεσμα την μετατροπή μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Από τις μετρήσεις από το πολύμετρο παίρνουμε την τάση και με τις αντιστάσεις παίρνουμε την τιμή της κάθε αντίστασης, έτσι με τον νόμο του (ohm) γίνεται ο υπολογισμός της έντασης του ρεύματος και μετά γίνεται και ο υπολογισμός της ισχύος. Στη συνέχεια γίνεται η κατασκευή καμπύλων ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι 12φ/β πλαίσια ,1 πυρανόμετρο, 1 πολύμετρο, μια μεταβλητή αντίσταση ή και διάφορες αντιστάσεις.

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ :** Όταν τα φ/β συνδέονται σε σειρά η τάση είναι το άθροισμα των τάσεων των φ/β και η ένταση του ρεύματος παραμένει η ίδια. Αντιθέτως όταν συνδέουμε τα φ/β πλαίσια παράλληλα το ρεύμα είναι μεγαλύτερο ενώ η τάση που παίρνουμε είναι μικρότερη από ότι σε σειρά. Τα μέγιστα τάσεων, ισχύων και εντάσεων που παρατηρούμε στις γραφικές είναι διαφορετικά για κάθε συνδεσμολογία και μάλιστα παρουσιάζονται σε διαφορετικές αντιστάσεις. Ακόμη για μια συγκεκριμένη συνδεσμολογία όσο αυξάνει η ηλιακή ακτινοβολία τόσο αυξάνει και η τάση ανοικτού κυκλώματος. Ακόμη παρατηρούμε από τα διαγράμματα ότι οι καμπύλες (V-I) και (P-V) έχουν την ίδια μορφή που προβλέπει η θεωρία [2].

## ΠΕΙΡΑΜΑ Α.1.

*\*Το 1 φ/β δίδει: 0,45V και 0,6A άρα η ισχύς που δίδει είναι 0,27W*

ΣΚΟΠΟΣ :

Η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος με ένα φ/β πλαίσιο και η κατασκευή καμπύλης ισχύος και της έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε το 1 φ/β πλαίσιο και στο οποίο συνδέουμε διάφορες αντιστάσεις και έπειτα μετράμε την τάση (V) και με τον νόμο του ohm βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος .Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος την ένταση του ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε το 1 φ/β πλαίσιο συνδεδεμένο με το πολύμετρο όπου μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο ακόμη έχουμε συνδέσει παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση που την μετακινούμε ώστε να παίρνουμε διάφορες τιμές αντιστάσεων Τα φωτοβολταϊκά τα έχουμε στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος.

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 1φ/β πλαίσιο, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.1

1 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟ :

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ:1000W/m<sup>2</sup>

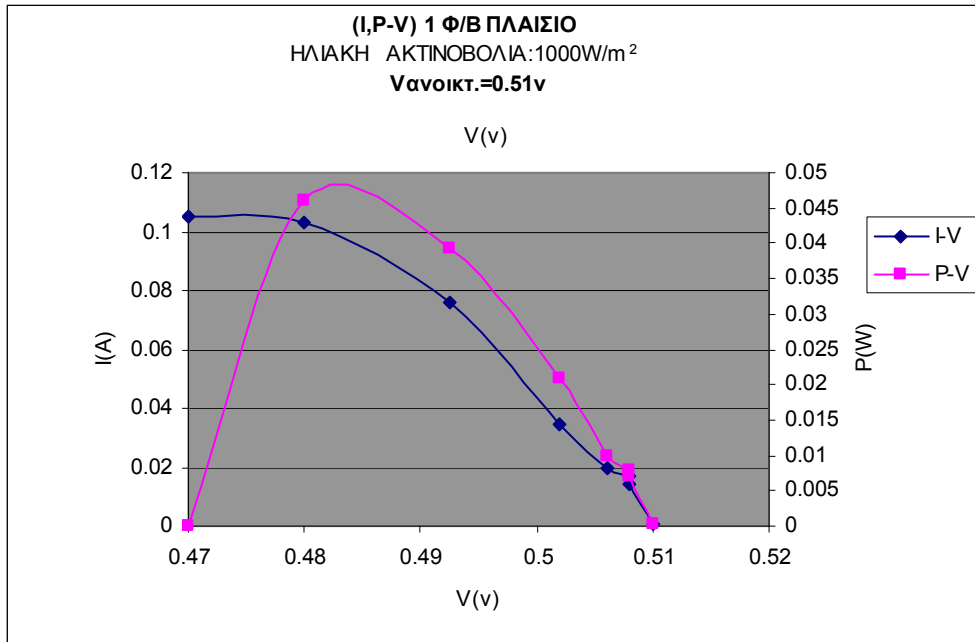
Νανοικτοκύκλωσης=0.51V

V(v)	R(Ω)	I(A)	P(W)
0.51	42	0.012	0.006
0.508	36.2	0.014	0.007
0.508	28.7	0.017	0.008
0.506	23.5	0.02	0.01
0.502	17.8	0.028	0.014
0.49	11.2	0.043	0.02
0.48	5	0.096	0.046

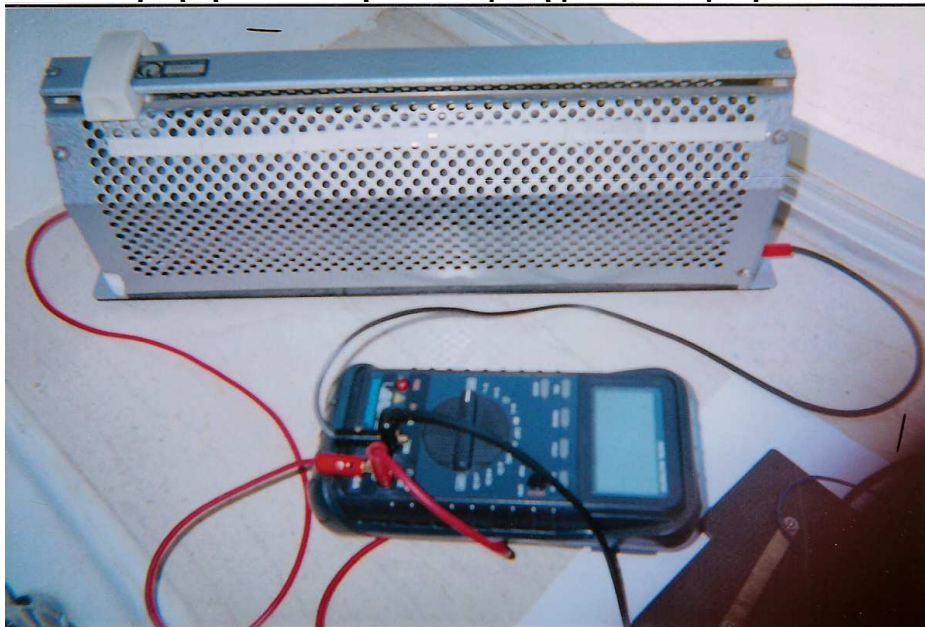
### 1 φ/β πλαίσιο



### ΓΡΑΦΗΜΑ Α.1



#### Α.1.Μεταβλητή αντίσταση συνδεδεμένη με το πολύμετρο.



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η ηλιακή ακτινοβολία κατά την διεξαγωγή του πειράματος δεν ήταν σταθερή. Η ισχύς και ένταση ρεύματος αυξάνεται σε σχέση με την τάση η οποία μειώνεται. Σε αυτή την γραφική παρατηρούμε ότι έχουμε μέγιστο στα 0.046W σε αντίσταση 5Ω και τάση 0.48 V . Το μέγιστο ρεύμα είναι 0,096 A.

## ΠΕΙΡΑΜΑ Α.2.

### ΣΚΟΠΟΣ :

Η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος με συνδεσμολογία 2 φ/β πλαίσια σε σειρά και 2φ/β πλαίσια παράλληλα και η κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε το 2 φ/β πλαίσια σε σειρά και 2φ/β πλαίσια παράλληλα και στα οποίο συνδέουμε διάφορες αντιστάσεις και έπειτα μετράμε την τάση (V) και με τον νόμο του ohm βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος .Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος την ένταση του ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε το 2 φ/β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά και 2φ/β πλαίσια παράλληλα και συνδεδεμένα παράλληλα με το πολύμετρο όπου μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο ακόμη έχουμε συνδέσει παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση που την μετακινούμε ώστε να παίρνουμε διάφορες τιμές αντιστάσεων Τα φωτοβολταϊκά τα έχουμε στον ήλιο στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος.

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 4φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

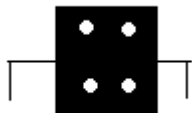
### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.2

#### 2 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΚΑΙ 2 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ: 1100W/ m<sup>2</sup>

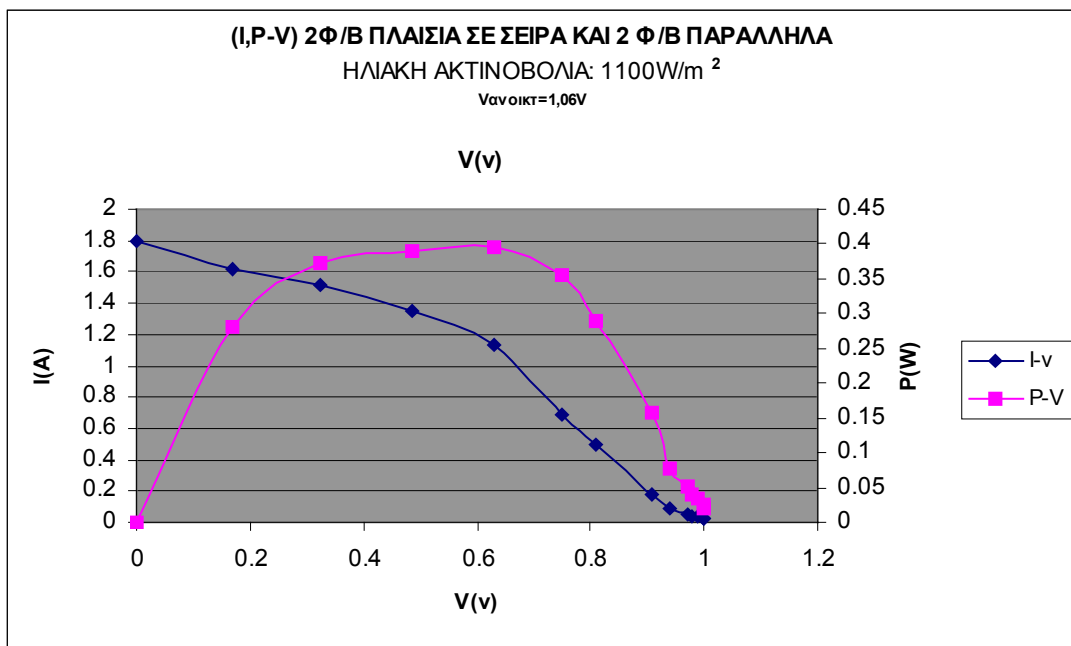
V<sub>ανοικτοκ.</sub>=1.06V

V(v)	R(Ω)	I(A)	P(W)
1	42	0.02	0.02
1	36.2	0.027	0.027
0.99	28.7	0.034	0.033
0.98	23.5	0.041	0.04
0.97	17.8	0.054	0.052
0.94	11.2	0.083	0.078
0.86	5	0.172	0.147
0.81	2.2	0.368	0.29
0.75	1.5	0.5	0.37
0.63	1	0.63	0.396
0.43	0.47	0.91	0.391
0.28	0.22	1.27	0.35
0.169	0.1	1.69	0.28

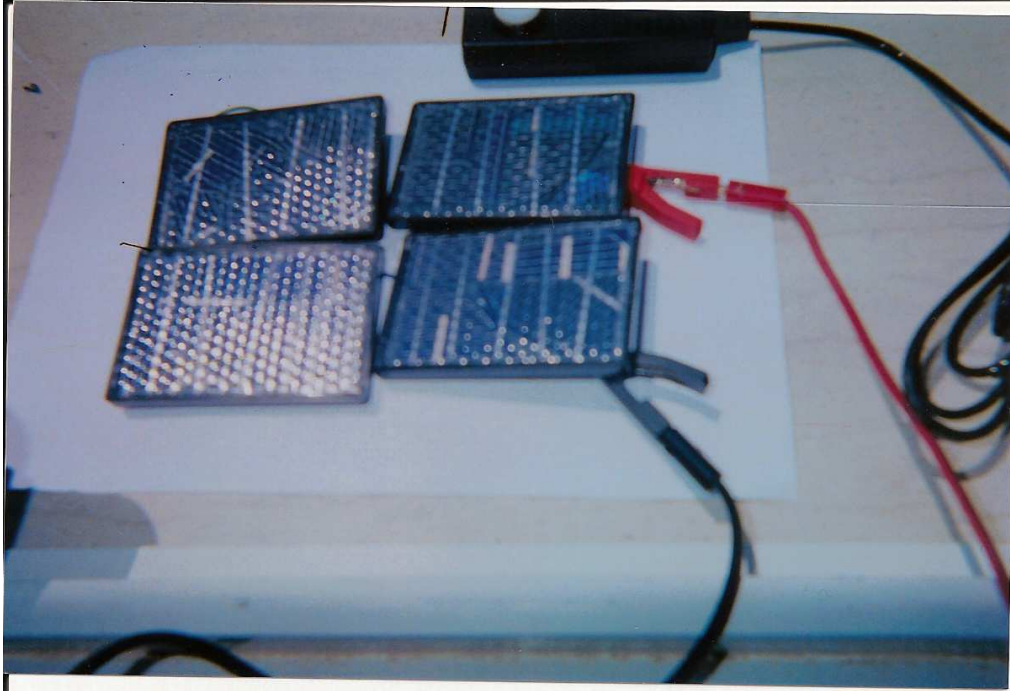


2φ/β πλαίσια σε σειρά και 2φ/β πλαίσια παράλληλα

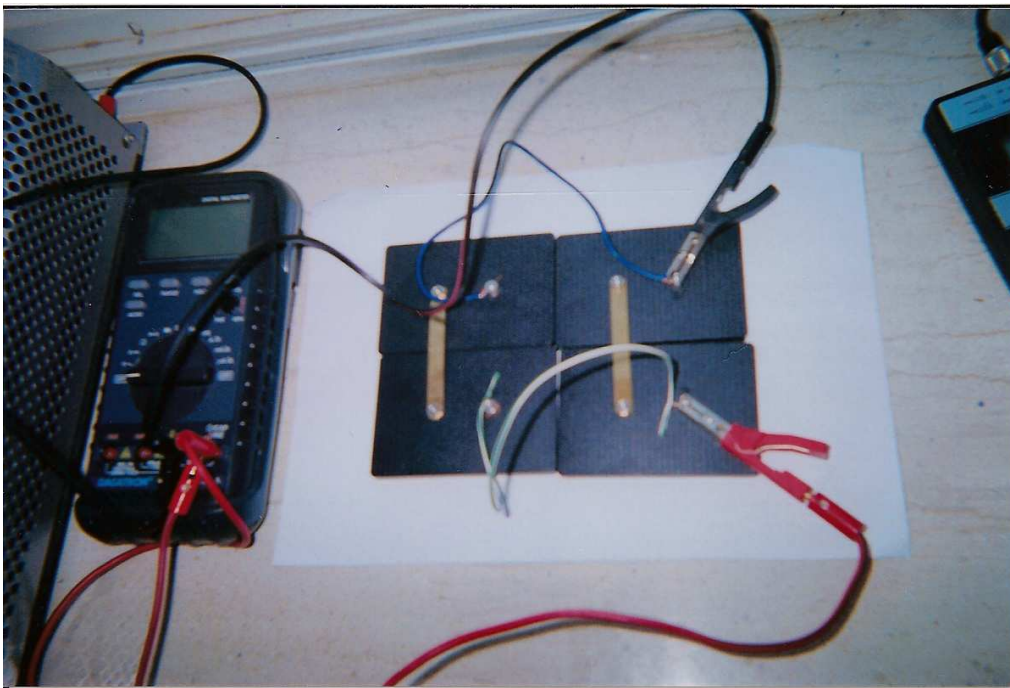
### ΓΡΑΦΗΜΑ Α.2



**A.2α) 2 φ/β πλαίσια σε σειρά 2φ/β πλαίσια παράλληλα**



**A.2β) Σύνδεση μεταξύ 2 Φ/Β πλαισίων σε σειρά και 2Φ/Β πλαισίων παράλληλα**



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.: Η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά υψηλή και η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι στα 1,06v. Σε αυτή την γραφική έχουμε κάποιο μέγιστο στην καμπύλη ισχύος στα 0,4W σε αντίσταση 1Ω. και τάση 0,63v. Το μέγιστο ρεύμα είναι 1.69 A. Η συνδεσμολογία αυτή δίνει αρκετά μεγάλο ρεύμα

### ΠΕΙΡΑΜΑ Α.3.

#### ΣΚΟΠΟΣ :

Η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος σε συνδεσμολογία 2 σειρές παράλληλα από 4φ/β πλαίσια σε σειρά και η κατασκευή καμπύλης κατασκευής καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε το 2 σειρές παράλληλα από 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και στα οποίο συνδέουμε διάφορες αντιστάσεις και έπειτα μετράμε την τάση (V) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος .Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

#### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε το 2 σειρές παράλληλα από 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και συνδεδεμένα παράλληλα με το πολύμετρο όπου μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο ακόμη έχουμε συνδέσει παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση που την μετακινούμε ώστε να παίρνουμε διάφορες τιμές αντιστάσεων Τα φωτοβολταϊκά τα έχουμε στον ήλιο στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος.

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 4φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο



### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.3

#### 2 ΣΕΙΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΑΠΟ 4Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ:  $279 \text{ W/m}^2$

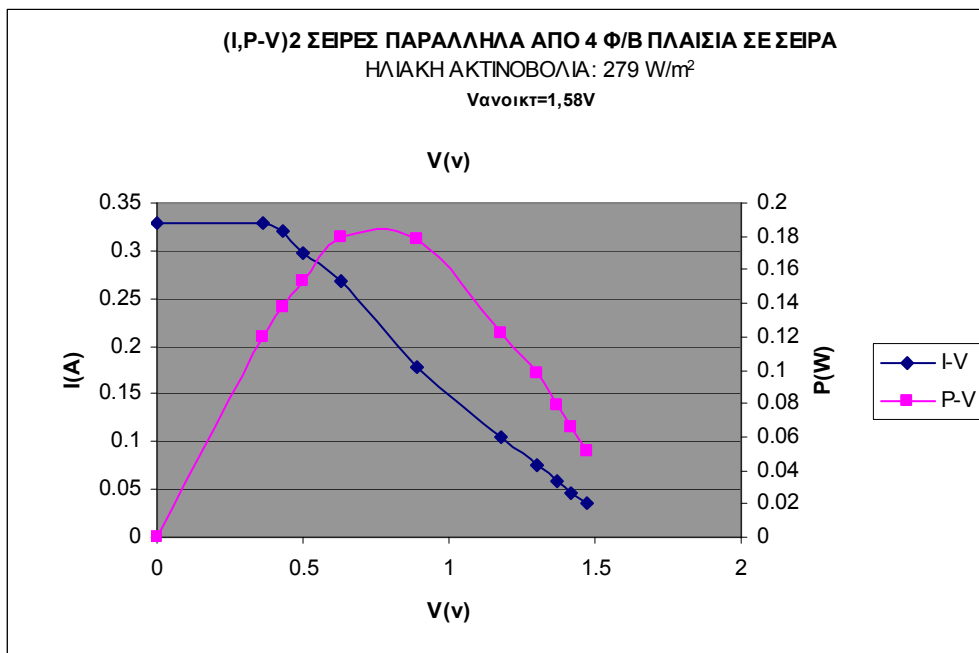
$V_{\text{ανοικτ.}} = 1.58\text{V}$

V(v)	R( $\Omega$ )	I(A)	P(W)
1.47	42	0.035	0.051
1.42	29.7	0.047	0.066
1.37	23.5	0.058	0.079
1.3	17	0.076	0.098
1.175	11.2	0.104	0.122
0.89	5	0.178	0.158
0.63	2.2	0.268	0.18
0.5	1.8	0.277	0.138
0.43	1.5	0.286	0.122
0.38	1.2	0.316	0.12

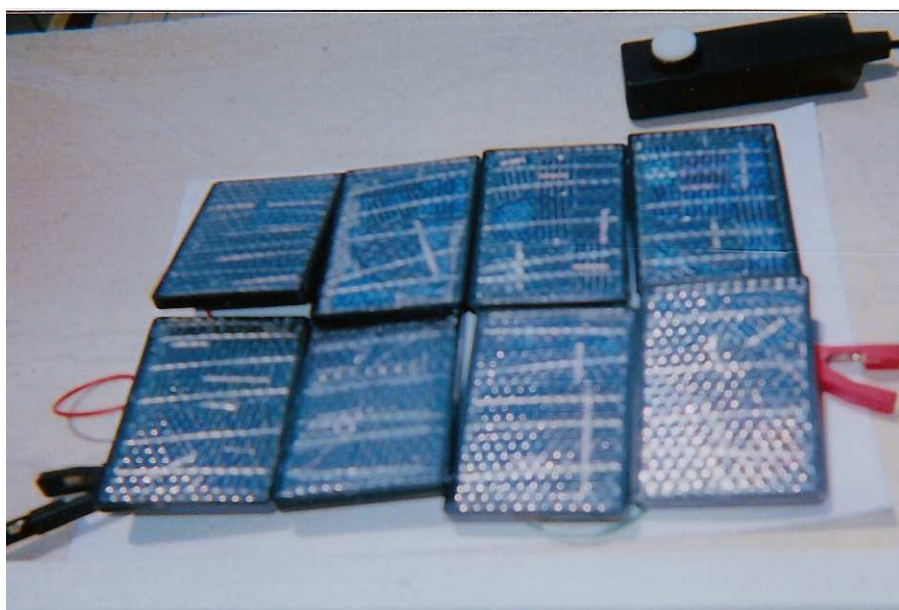


Συνδεσμολογία 2 σειρές από 4 Φ/Β

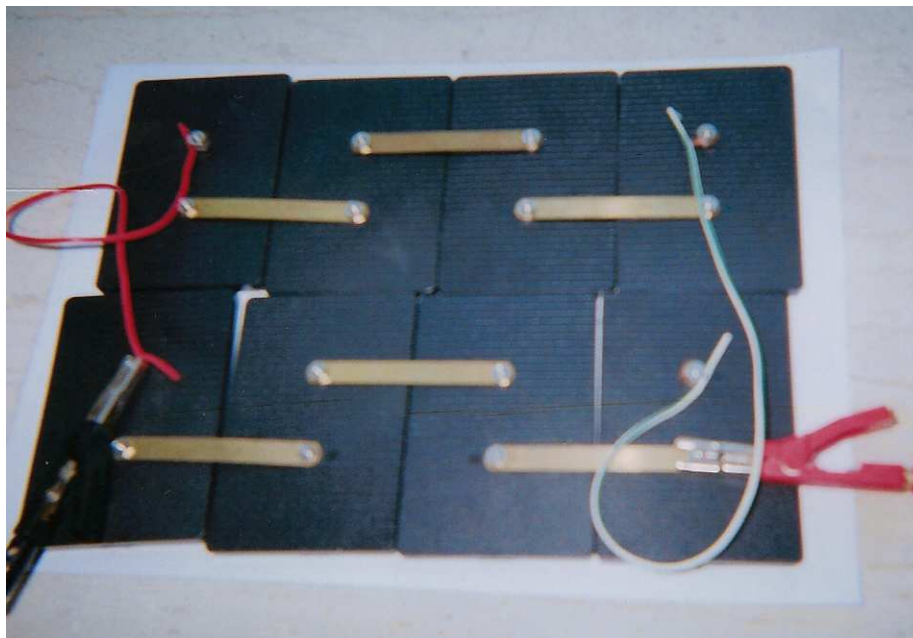
### ΓΡΑΦΗΜΑ Α.3



**A.3α) 2 σειρές παράλληλες από 4 Φ/Β πλαίσια σε σειρά**



**A.3β) 2 σειρές παράλληλες από 4 Φ/Β πλαίσια σε σειρά**



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:- Η ηλιακή ακτινοβολία κατά την διεξαγωγή του πειράματος δεν ήταν σταθερή, εδώ έχουμε την μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία. Στην καμπύλη ισχύος έχουμε μέγιστο  $0,18\text{W}$  για αντίσταση  $2,2\Omega$  και για τάση  $0,63\text{v}$ . Το μέγιστο ρεύμα  $0,316\text{A}$ . Η συνδεσμολογία αυτή δίνει μικρό ρεύμα.

#### ΠΕΙΡΑΜΑ Α.4.

ΣΚΟΠΟΣ :

Η συνδεσμολογία του πειράματος αυτού είναι 3 σειρές παράλληλα από 2 φ/β πλαίσια σε σειρά και η κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε το 3 σειρές παράλληλα από 2 φ/β πλαίσια σε σειρά και στα οποίο συνδέουμε διάφορες αντιστάσεις και έπειτα μετράμε την τάση (V) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος. Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε το 2 σειρές παράλληλα από 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και συνδεδεμένα παράλληλα με το πολύμετρο όπου μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο ακόμη έχουμε συνδέσει παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση που την μετακινούμε ώστε να παίρνουμε διάφορες τιμές αντιστάσεων. Τα φωτοβολταϊκά τα έχουμε στον ήλιο στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος.

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 6φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

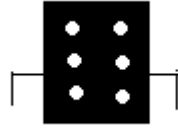
#### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.4

##### 3 ΠΑΡΑΛΛΗΛΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΚΑΙ 2 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ:  $990\text{W}/\text{m}^2$

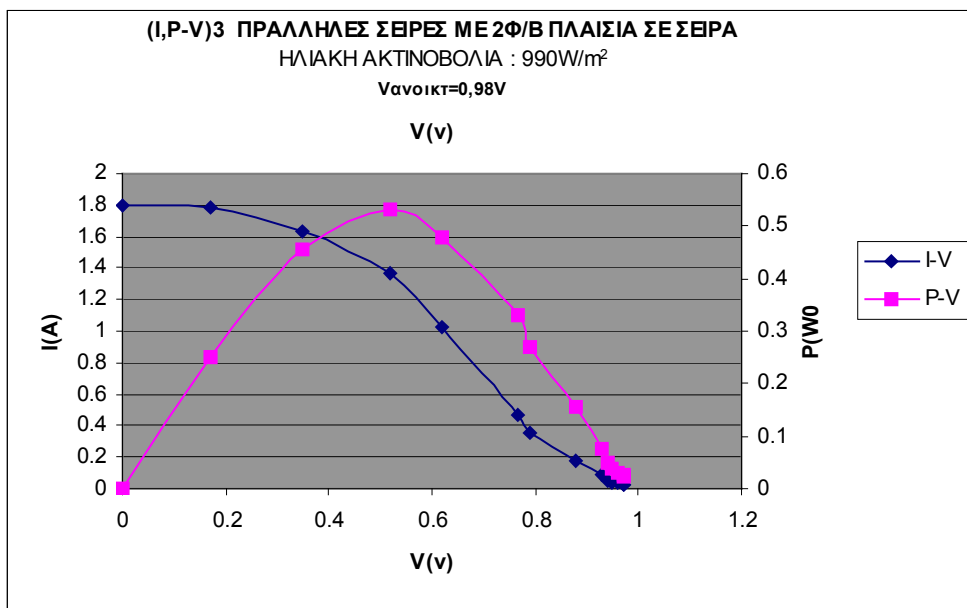
Υανοικτοκυκλ.=0.98V

V(v)	R(Ω)	I(A)	P(W)	
0.97		42	0.023	0.022
0.971		36.2	0.026	0.025
0.96		28.7	0.034	0.032
0.95		23.5	0.04	0.038
0.94		17.8	0.052	0.048
0.93		11.2	0.083	0.077
0.88		5	0.176	0.154
0.79		2.2	0.35	0.27
0.71		1.5	0.47	0.33
0.62		1	0.62	0.38
0.5		0.47	1.06	0.53
0.3		0.22	1.36	0.4
0.17		0.1	1.77	0.3

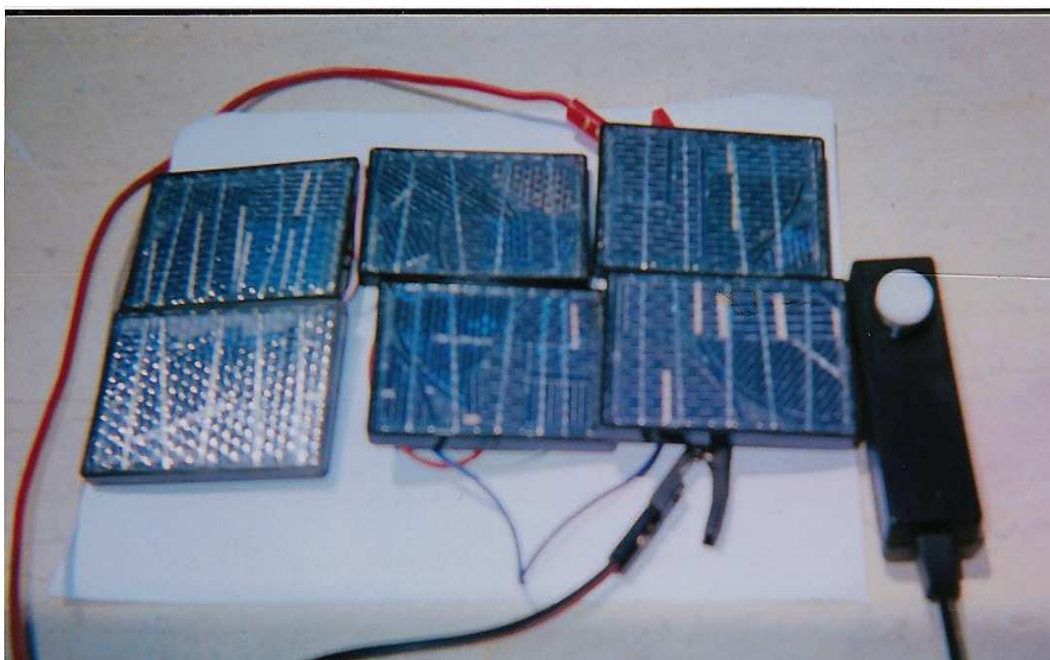


3 παράλληλες σειρές και 2 φ/β πλαίσια σε σειρά

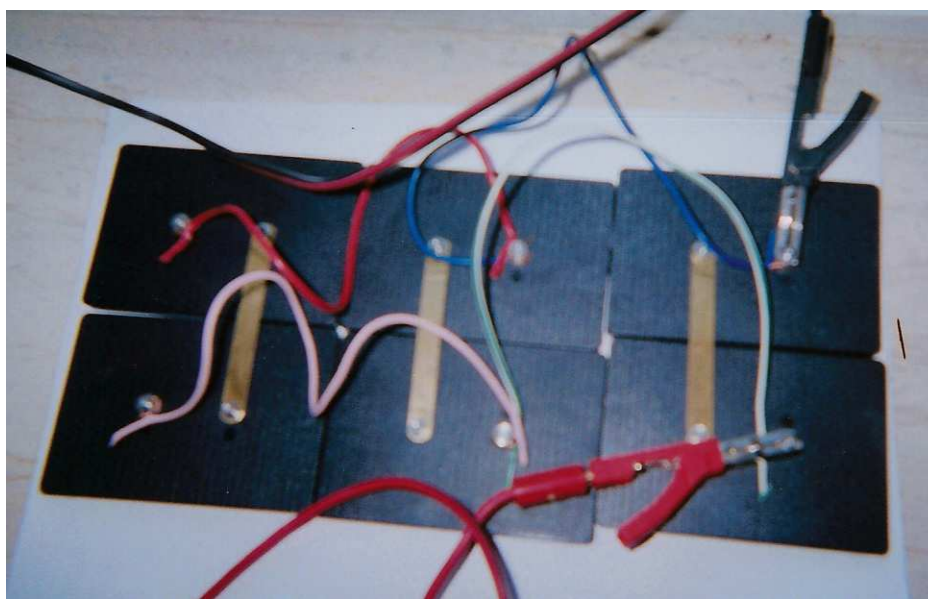
ΓΡΑΦΗΜΑ Α.4



**Α.4α) 3 σειρές παράλληλα και 2 Φ/Β πλαίσια σε σειρά**



**Α.4β) 3 σειρές παράλληλα και 2 Φ/Β πλαίσια σε σειρά**



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ήταν σταθερή κατά την διεξαγωγή του πειράματος. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή. Στην καμπύλη ισχύος έχουμε μέγιστο  $0,53 \text{ W}$  σε αντίσταση  $0,47\Omega$  και η τάση  $0,5\text{v}$ . Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι ( $V_{\text{ανοικτ}}=0,98\text{v}$ ). Το μέγιστο του ρεύματος είναι  $1,77 \text{ A}$ . Η συνδεσμολογία αυτή δίνει μεγάλο ρεύμα.

## ΠΕΙΡΑΜΑ Α. 5.

### ΣΚΟΠΟΣ :

Η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος με συνδεσμολογία 3 σειρές παράλληλα από 4φ/β πλαίσια σε σειρά και η κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε το 3 σειρές παράλληλα από 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και στα οποίο συνδέουμε διάφορες αντιστάσεις και έπειτα μετράμε την τάση (V) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος .Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε το 3 σειρές παράλληλα από 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και συνδεδεμένα παράλληλα με το πολύμετρο όπου μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο ακόμη έχουμε συνδέσει παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση που την μετακινούμε ώστε να παίρνουμε διάφορες τιμές αντιστάσεων Τα φωτοβολταϊκά τα έχουμε στον ήλιο στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος.

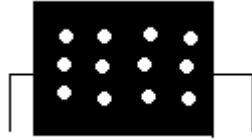
Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 12φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.5

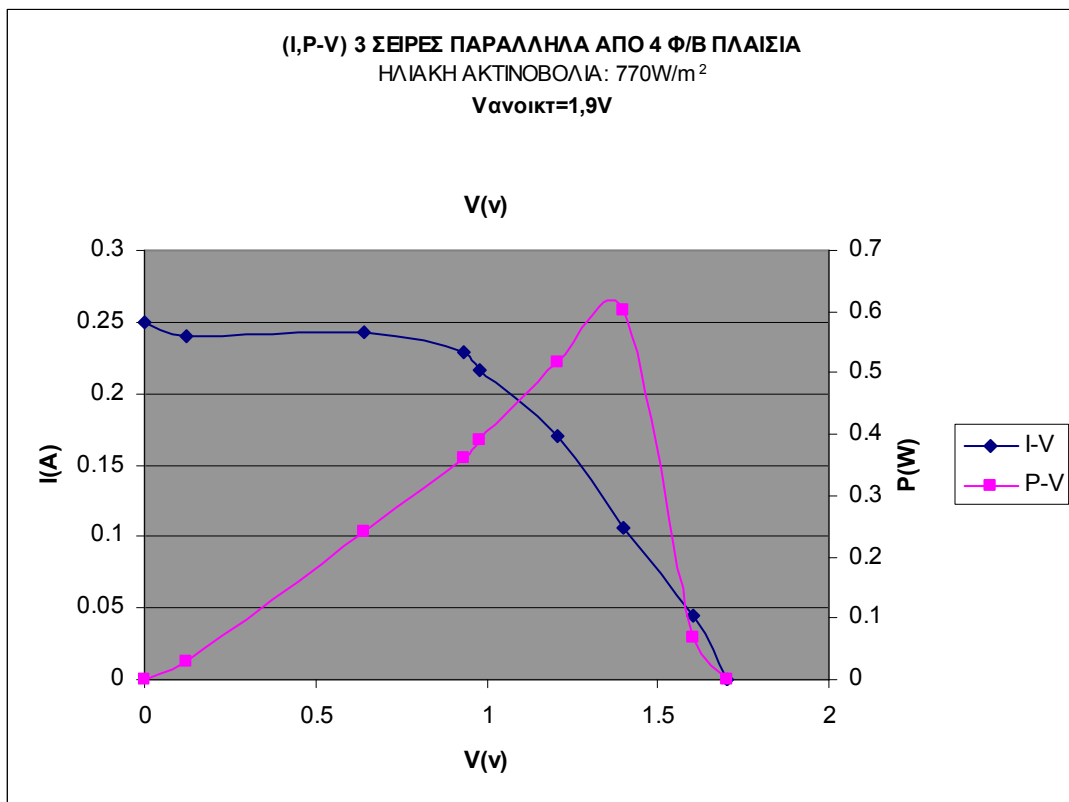
**3 ΣΕΙΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΑΠΟ 4 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ**  
ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ :770W/m<sup>2</sup>  
Vανοικτ=1.9V

V(v)	R(Ω)	I(A)	P(W)
1.7	42	0.04	0.68
1.61	36	0.044	0.07
1.4	29.7	0.047	0.63
1.42	23.5	0.06	0.08
1.35	17	0.07	0.09
1.3	11.2	0.11	0.143
1.1	6	0.22	0.242
0.12	0.5	0.24	0.028

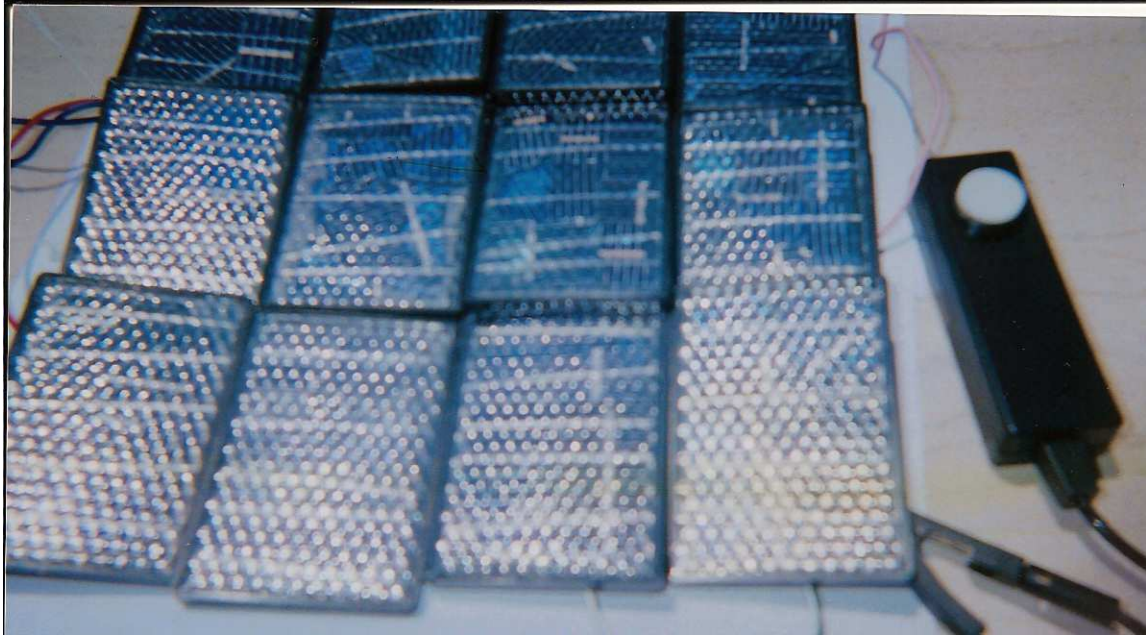


3 σειρές παράλληλα από 4φ/β πλαίσια σε σειρά

ΓΡΑΦΗΜΑ Α.5



**A.5) 3 σειρές από 4 Φ/Β πλαίσια σε σειρά**



**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:** Η ηλιακή ακτινοβολία κατά την διεξαγωγή του πειράματος δεν ήταν σταθερή. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι στα  $770\text{W/m}^2$  και η τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{\text{ανοικτ}}=1.9\text{v}$ ). Η ισχύς παρουσιάζει στη αρχή ένα μικρό μέγιστο και μετά ακολουθεί ένα δεύτερο μεγαλύτερο μέγιστο στα  $0.68\text{ W}$  με αντίσταση  $42\ \Omega$  με τάση  $1,7\text{v}$ . Το μέγιστο ρεύμα παρουσιάζεται στα  $0,24\ \text{A}$ .



## ΠΕΙΡΑΜΑ Α.6.

### ΣΚΟΠΟΣ :

Η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος με συνδεσμολογία σε 3 σειρές παράλληλα από 4φ/β πλαίσια σε σειρά και κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε το 3 σειρές παράλληλα από 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και στα οποίο συνδέουμε διάφορες αντιστάσεις και έπειτα μετράμε την τάση (V) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος .Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε το 3 σειρές παράλληλα από 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και συνδεδεμένα παράλληλα με το πολύμετρο όπου μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο ακόμη έχουμε συνδέσει παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση που την μετακινούμε ώστε να παίρνουμε διάφορες τιμές αντιστάσεων Τα φωτοβολταϊκά τα έχουμε στον ήλιο στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος.

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 12φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

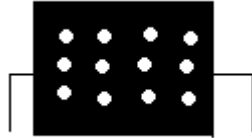
### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.6

#### 3 ΣΕΙΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ 4Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ:  $1000\text{W/m}^2$

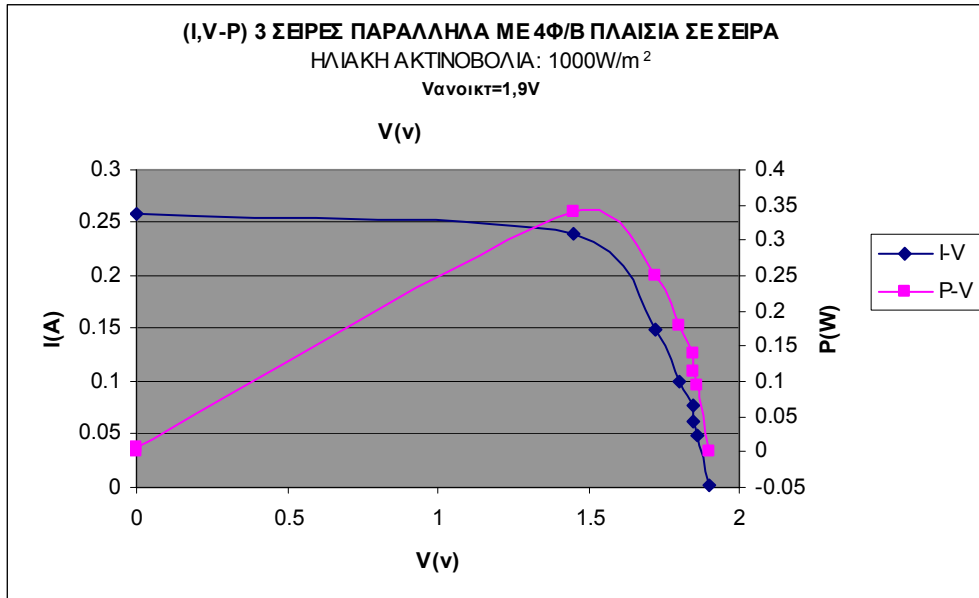
$V_{\text{ανοικτ}}=1.9\text{V}$

V(v)	R( $\Omega$ )	I(A)	P(W)
1.9	42	0.045	0.08
1.86	36	0.05	0.093
1.85	29.7	0.062	0.115
1.85	23.5	0.077	0.14
1.8	17	0.1	0.18
1.72	11.2	0.15	0.25
1.45	6	0.24	0.34
0.058	0.5	0.116	0.006

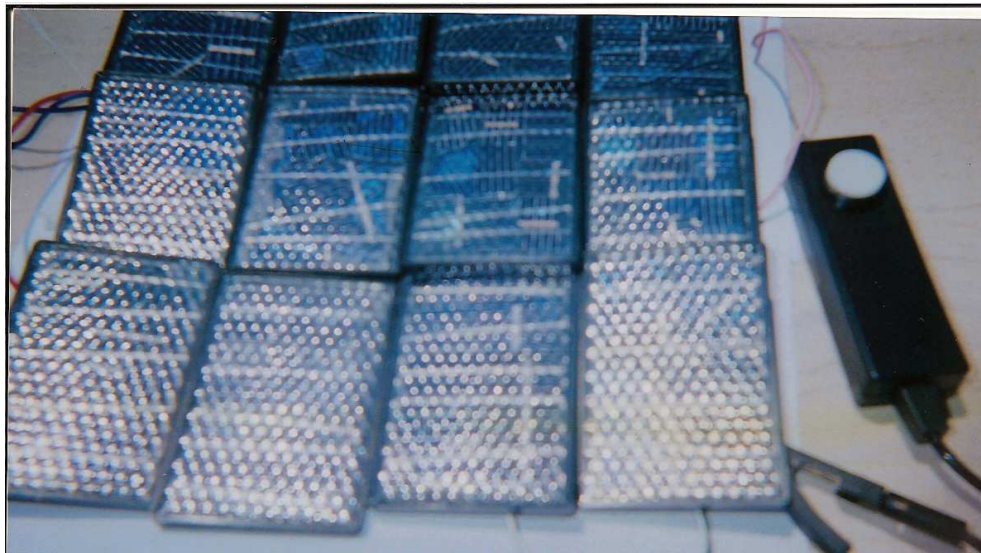


3 σειρές παράλληλα από 4φ/β πλαίσια σε σειρά

ΓΡΑΦΗΜΑ Α.6



Α.6) 3 σειρές από 4 Φ/Β πλαίσια σε σειρά



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η ηλιακή ακτινοβολία κατά την διεξαγωγή πειράματος δεν ήταν σταθερή. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η μέγιστη για τα φ/β πλαίσια. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι 1.9V οπότε η τάση είναι κοντά στο 1.8V με ανοικτό κύκλωμα που πρέπει να βγάζουν στην μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία. Η καμπύλη ισχύος κάνει μέγιστο στα 0,34W σε αντίσταση 6 Ω σε τάση 1,45V. Η καμπύλη της έντασης κάνει και αυτή μέγιστο στα 0,24 A, σχετικά κοντά με το μέγιστο της καμπύλης ισχύος.

## ΠΕΙΡΑΜΑ Α.7.

### ΣΚΟΠΟΣ :

Η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος με συνδεσμολογία 2 σειρές παράλληλα από 3 φ/β πλαίσια σε σειρά και η κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε το 2 σειρές παράλληλα από 3 φ/β πλαίσια σε σειρά και στα οποίο συνδέουμε διάφορες αντιστάσεις και έπειτα μετράμε την τάση (V) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος .Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε το 2 σειρές παράλληλα από 3 φ/β πλαίσια σε σειρά και συνδεδεμένα παράλληλα με το πολύμετρο όπου μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο ακόμη έχουμε συνδέσει παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση που την μετακινούμε ώστε να παίρνουμε διάφορες τιμές αντιστάσεων Τα φωτοβολταϊκά τα έχουμε στον ήλιο στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος.

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 6φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.7

#### 2 ΣΕΙΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ 3Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ: 300W/ m<sup>2</sup>

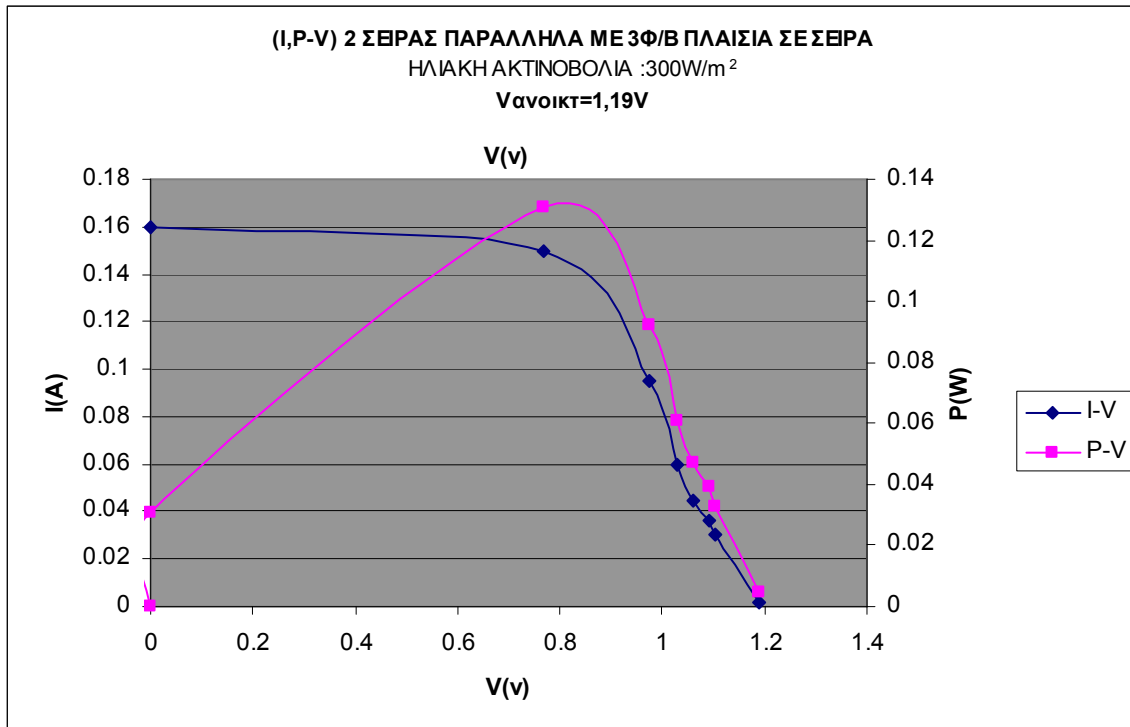
V<sub>ανοικτ</sub>=1.19V

V(v)	R(Ω)	I(A)	P(W)
1.124	42	0.026	0.029
1.112	36	0.03	0.033
1.09	29.7	0.036	0.039
1.06	23.5	0.045	0.047
1.029	17	0.06	0.061
0.96	11.2	0.085	0.081
0.81	5	0.162	0.131
0.307	4	0.102	0.031

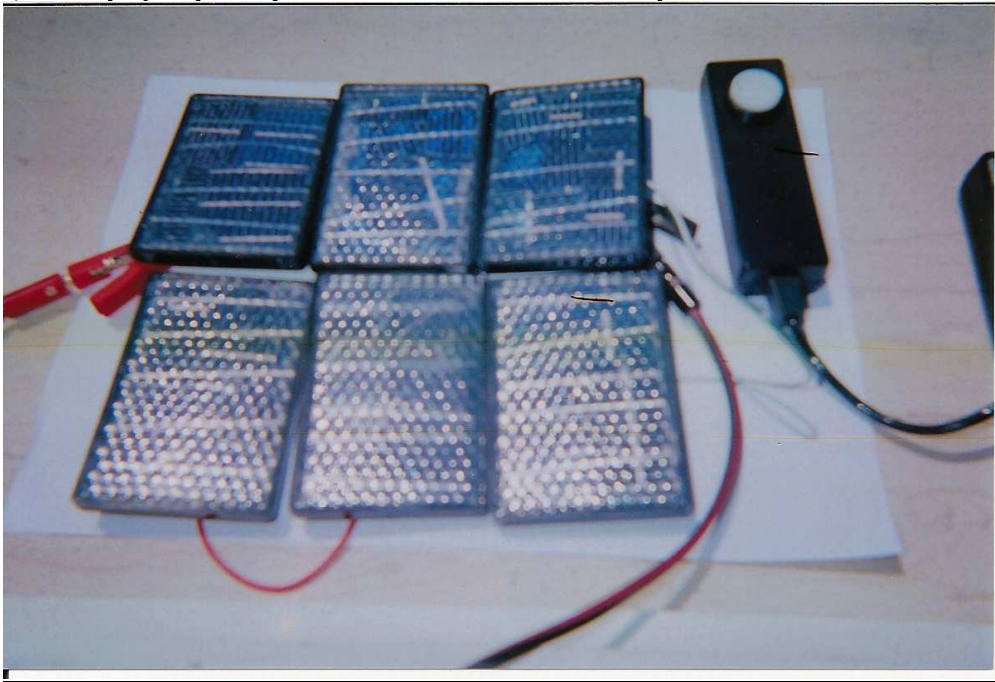


2 σειρές παράλληλα με 3φ/β πλαίσια σε σειρά

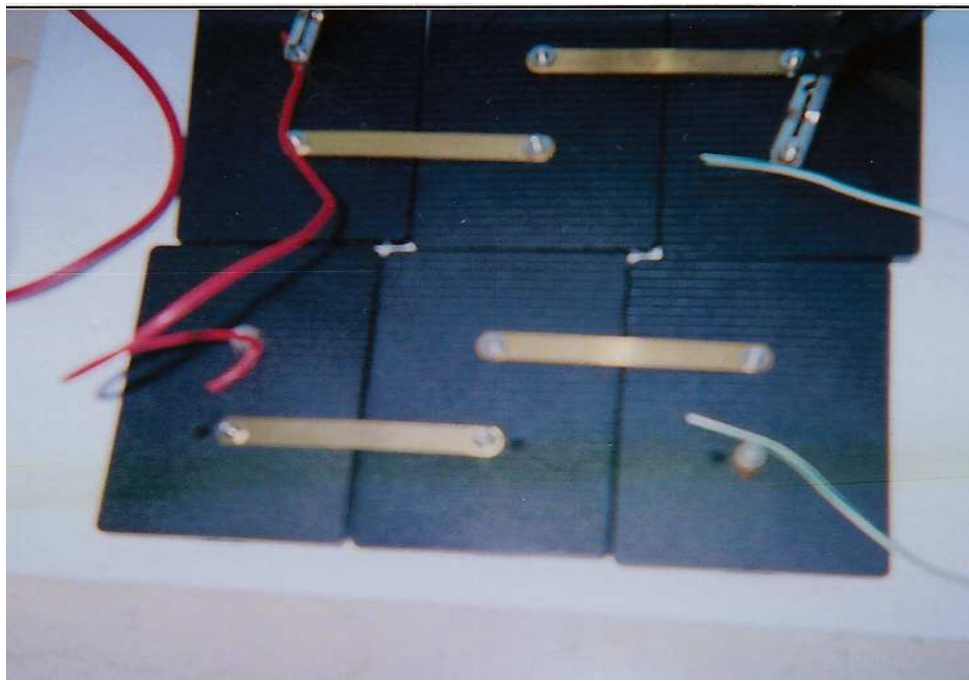
ΓΡΑΦΗΜΑ Α.7



**A.7α) 2σειρές παράλληλα από 3Φ/Β πλαίσια σε σειρά**



**A.7β) 2σειρές παράλληλα από 3Φ/Β πλαίσια σε σειρά**



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ήταν σταθερή κατά την διεξαγωγή του πειράματος. Οι μετρήσεις που έγιναν ήταν με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία. Η καμπύλη ισχύος κάνει μέγιστο στα 0,13W σε αντίσταση 5Ω και τάση 0,81V. Το μέγιστο ρεύμα παρουσιάζεται στα 0,16 A.

## ΠΕΙΡΑΜΑ Α.8.

### ΣΚΟΠΟΣ :

Η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος με συνδεσμολογία 2 σειρές παράλληλα από 3 φ/β πλαίσια σε σειρά και η κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε το 2 σειρές παράλληλα από 3 φ/β πλαίσια σε σειρά και στα οποίο συνδέουμε διάφορες αντιστάσεις και έπειτα μετράμε την τάση (V) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος .Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε το 2 σειρές παράλληλα από 3 φ/β πλαίσια σε σειρά και συνδεδεμένα παράλληλα με το πολύμετρο όπου μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο ακόμη έχουμε συνδέσει παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση που την μετακινούμε ώστε να παίρνουμε διάφορες τιμές αντιστάσεων Τα φωτοβολταϊκα τα έχουμε στον ήλιο στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος.

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 6φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.8

**2 ΣΕΙΡΕΣ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ 3 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ**

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ :  $860\text{W/m}^2$

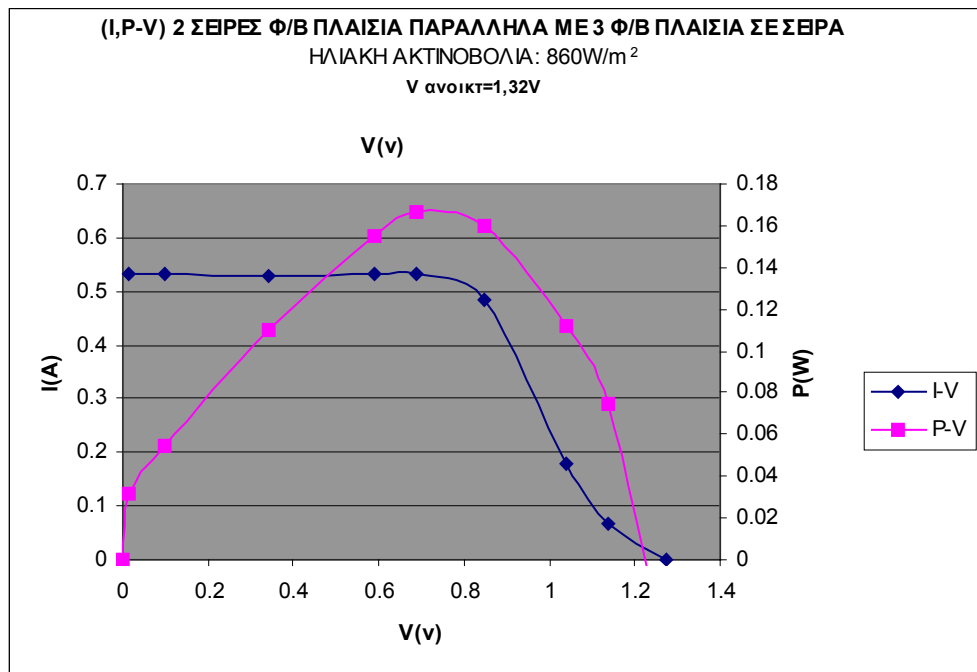
$V_{\text{ανοικτ}}=1.32\text{V}$

V(v)	R( $\Omega$ )	I(A)	P(W)
1.21	23.5	0.051	0.061
1.18	17.8	0.068	0.08
1	11.2	0.089	0.089
0.9	5	0.18	0.16
0.57	3.3	0.31	0.17
0.59	1.8	0.32	0.18
0.34	1	0.34	0.11
0.1	0.22	0.45	0.045
0.066	0.1	0.66	0.043



2 σειρές φ/β παράλληλα με 3φ/β πλαίσια σε σειρά

### ΓΡΑΦΗΜΑ Α.8



**A.8) 2σειρές παράλληλα από 3Φ/Β πλαίσια σε σειρά**



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ήταν σταθερή κατά την διεξαγωγή του πειράματος. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή. Η καμπύλη ισχύος κάνει μέγιστο στα 0,18W σε αντίσταση 1,8 A και σε τάση 0,59V. Το μέγιστο ρεύματος παρουσιάζεται στα 0,34 A.



## ΠΕΙΡΑΜΑ Α.9.

### ΣΚΟΠΟΣ :

Είναι η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος με συνδεσμολογία 4 φ/β σε σειρά και η κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και στα οποίο συνδέουμε διάφορες αντιστάσεις και έπειτα μετράμε με το πολύμετρο την τάση (V) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος .Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε 4φ/β πλαίσια σε σειρά και συνδεδεμένα παράλληλα με το πολύμετρο όπου μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο ακόμη έχουμε συνδέσει παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση που την μετακινούμε ώστε να παίρνουμε διάφορες τιμές αντιστάσεων Τα φωτοβολταϊκά τα έχουμε στον ήλιο στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος. Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 4φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.9

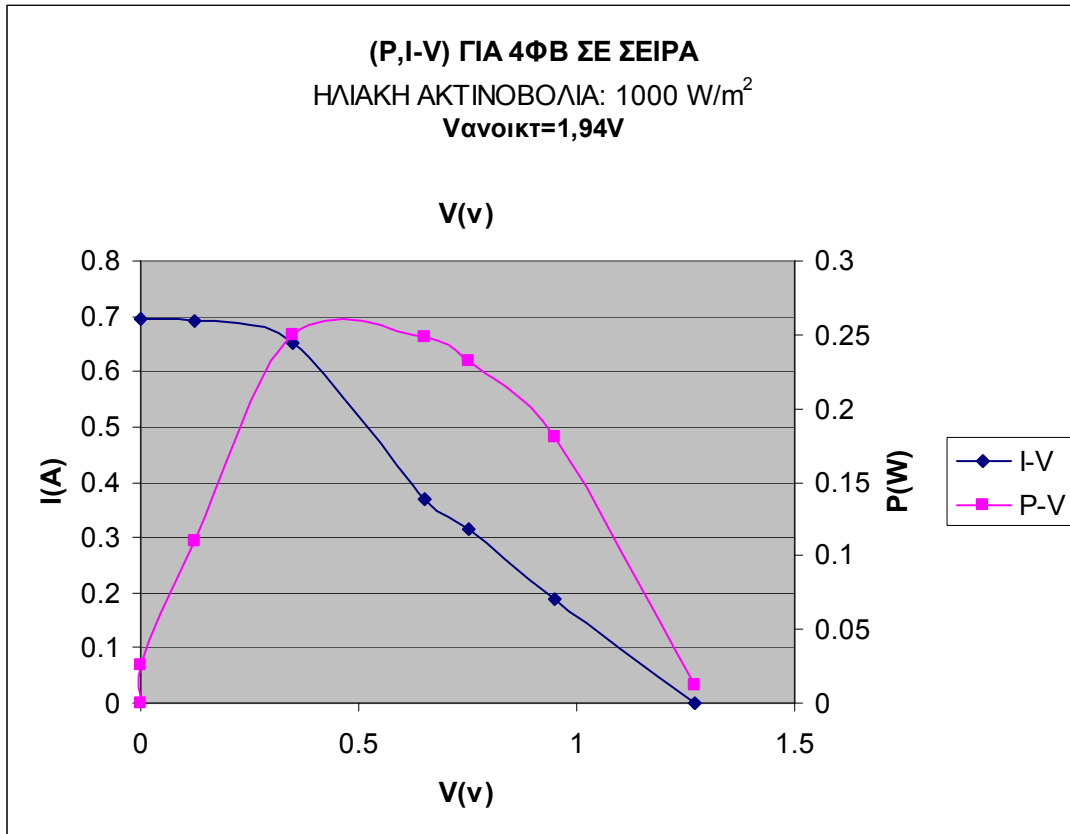
ΓΙΑ 4 Φ/Β ΣΕ ΣΕΙΡΑ  
ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ:  $1000\text{W}/\text{m}^2$   
V ανοικτοκυκλ.=1.94V

V(v)	R( $\Omega$ )	I(A)	P(W)
1.2	11.2	0.1	0.12
0.95	5	0.19	0.18
0.55	2.2	0.25	0.13
0.5	1.8	0.27	0.13
0.35	0.47	0.74	0.25
0.16	0.22	0.72	0.11
0.064	0.1	0.64	0.04

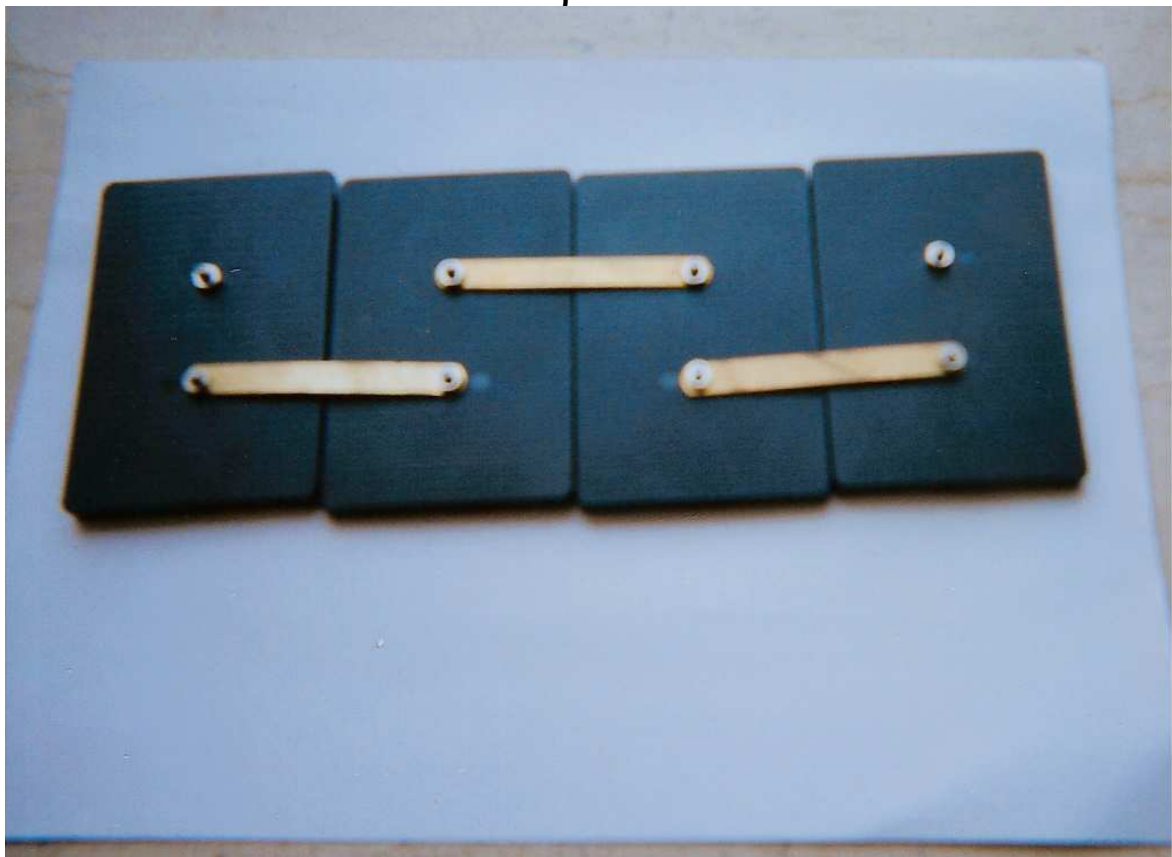


4 φ/β πλαίσια σε σειρά

### ΓΡΑΦΗΜΑ Α.9



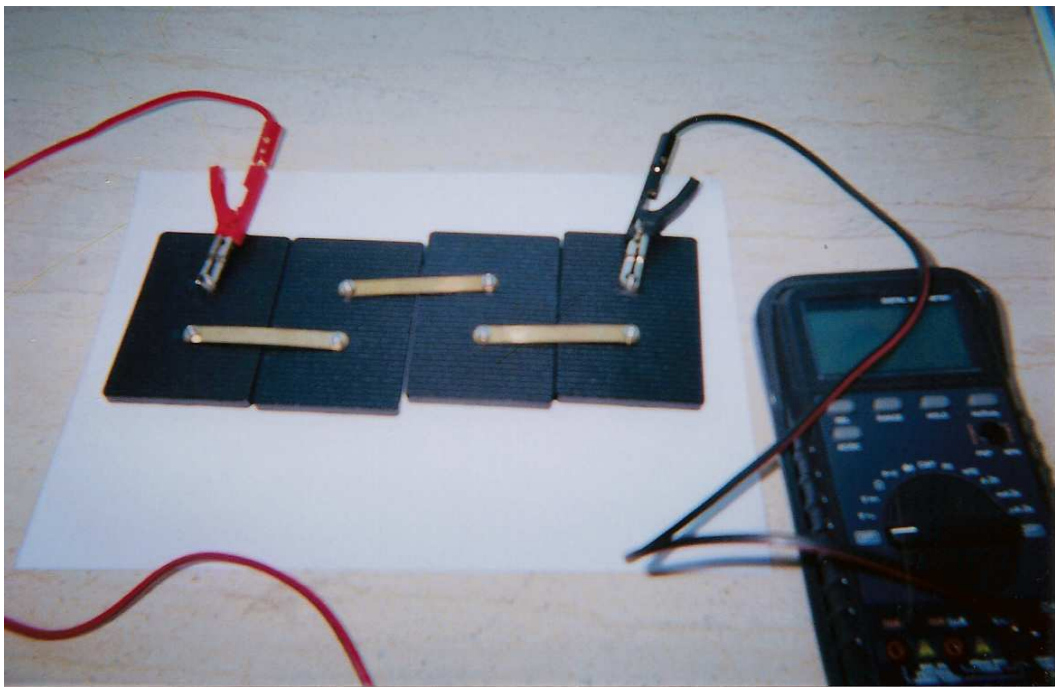
**Α.9.α) Συνδεσμολογία 4Φ/Β Πλαισίων στη σειρά**



**A.9.β) 4 Φ/Β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά και το πυρηνόμετρο.**



**A.9.γ) Συνδεσμολογία 4Φ/Β πλαισίων σε σειρά και σύνδεση με πολύμετρο.**



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ήταν σταθερή κατά την διεξαγωγή του πειράματος. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά υψηλή. Η καμπύλη ισχύος κάνει ένα μέγιστο στα 0.25 W σε αντίσταση 0,47Ω και σε τάση 0,35 V. Ακόμη η καμπύλη έντασης κάνει μέγιστο στα 0.74 A. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι στα 1,94V

## ΠΕΙΡΑΜΑ Α.10.

### ΣΚΟΠΟΣ :

Η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος με συνδεσμολογία 2σειρές παράλληλα από 3φ/β πλαίσια σε σειρά και κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε το 2 σειρές παράλληλα από 3 φ/β πλαίσια σε σειρά και στα οποίο συνδέουμε διάφορες αντιστάσεις και έπειτα μετράμε με το πολύμετρο την τάση (V) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος. Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε το 2 σειρές παράλληλα από 3 φ/β πλαίσια σε σειρά και συνδεδεμένα παράλληλα με το πολύμετρο όπου μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο ακόμη έχουμε συνδέσει παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση που την μετακινούμε ώστε να παίρνουμε διάφορες τιμές αντιστάσεων. Τα φωτοβολταϊκά τα έχουμε στον ήλιο στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος. Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 6φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.10

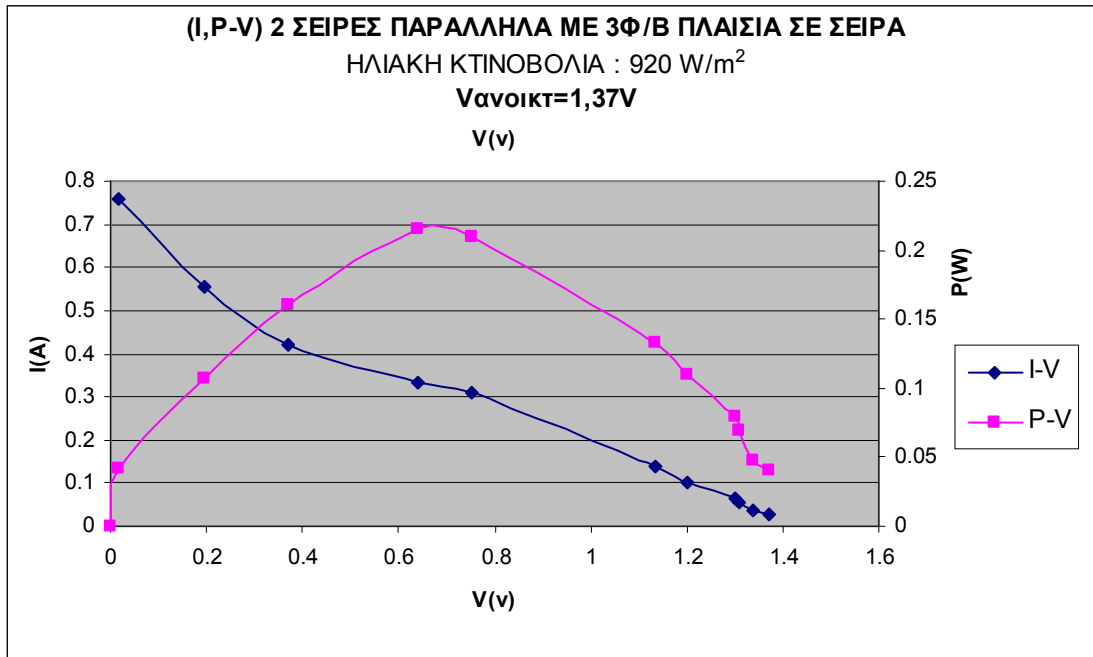
#### 2 ΣΕΙΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ 3 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ: 920 W/ m<sup>2</sup>

V <sub>ανοικτοκυκλ</sub> =1.37 V			
V(v)	R(Ω)	I(A)	P(W)
1.37	42	0.03	0.04
1.34	36.2	0.036	0.047
1.31	23.5	0.055	0.07
1.3	17.8	0.067	0.08
1.2	11.2	0.1	0.11
1.16	5	0.14	0.1
0.74	2.2	0.31	0.21
0.64	1.8	0.35	0.22
0.34	1	0.34	0.11
0.194	0.47	0.41	0.07
0.076	0.1	0.76	0.057



2 σειρές παράλληλα με 3 φ/β πλαίσια σε σειρά

ΓΡΑΦΗΜΑ Α.10



**A.10) 2σειρές παράλληλα από 3Φ/Β πλαίσια σε σειρά**



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η ηλιακή κατά την διεξαγωγή του πειράματος δεν ήταν σταθερή. Στο γράφημα βλέπουμε ότι η ισχύς γίνεται μέγιστη στα 0,22W σε αντίσταση 1,8Ω και τάση 0,64V. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι 1,37V. Το μέγιστο του ρεύματος παρουσιάζεται στα 0,76 A. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγάλη.

## ΠΕΙΡΑΜΑ Α.11.

### ΣΚΟΠΟΣ :

Η λειτουργία Φωτοβολταϊκού συστήματος σε συνδεσμολογία 3σειρές παράλληλα από 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (ανοικτού κυκλώματος) (P, I-Vανοικτ).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε το 3 σειρές παράλληλα από 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και χωρίς αντίσταση Με το πολύμετρο μετράμε την τάση ανοικτού κυκλώματος (Vανοικτ.) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος .Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε το 3 σειρές παράλληλα από 4 φ/β πλαίσια σε σειρά και συνδεδεμένα παράλληλα με το πολύμετρο όπου εδώ μετράμε την τάση ανοικτού κυκλώματος διότι δεν έχουμε συνδέσει καμία αντίσταση στα άκρα των φωτοβολταϊκών, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο .Τα φωτοβολταϊκα τα έχουμε στον ήλιο στον ήλιο και δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος. Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 12 φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, πολύμετρο

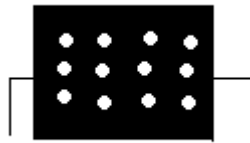


## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### ΠΙΝΑΚΑΣ Α.11

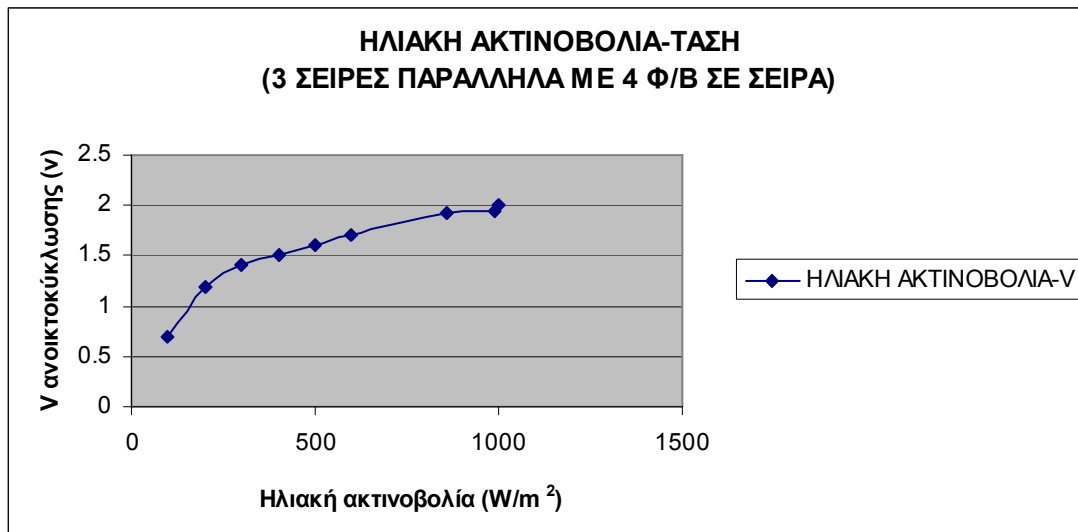
**ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΗΛΙΑΚΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ  
(3 ΣΕΙΡΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ 4Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ)**

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (W/ m <sup>2</sup> )	V(v)ανοικτ.	R(Ω)=Άπειρη
100	0.7	
200	1.2	
300	1.4	
400	1.5	
500	1.6	
600	1.7	
860	1.92	
989	1.95	
1000	2	

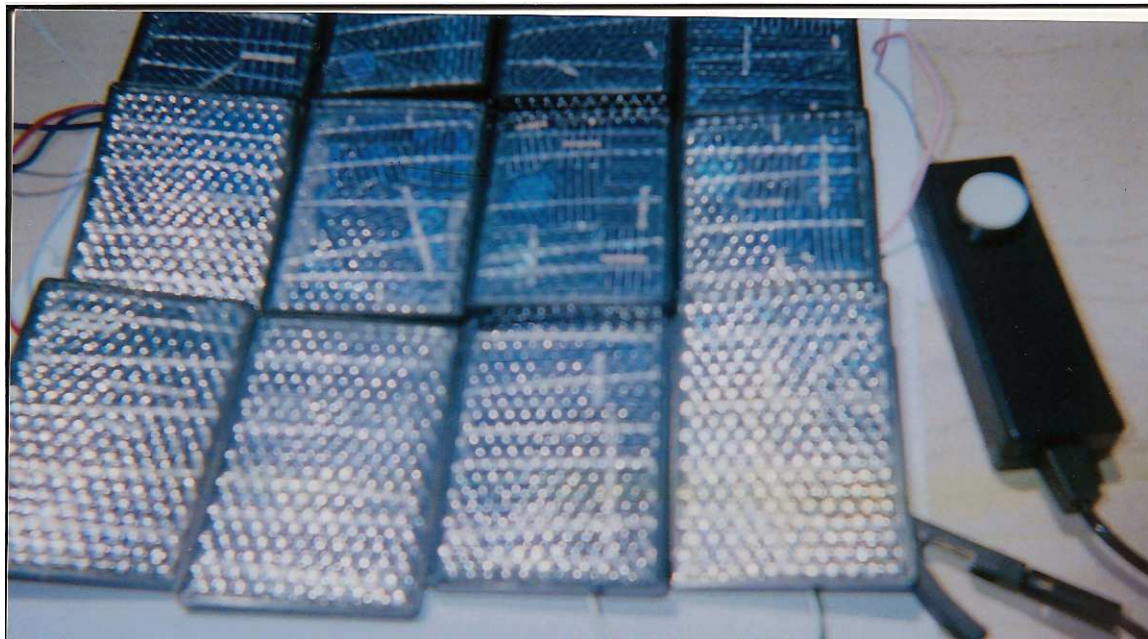


**3 σειρές παράλληλα με 4φ/β πλαίσια σε σειρά**

## ΓΡΑΦΗΜΑ Α.11




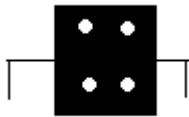
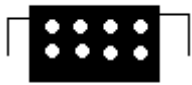
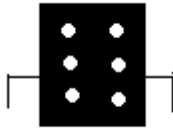
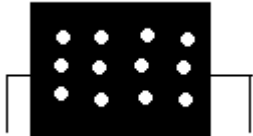
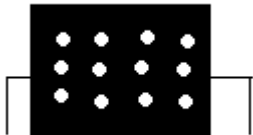
Α.11) 3 σειρές από 4 Φ/Β πλαίσια σε σειρά







ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Εδώ οι μετρήσεις έγιναν για μεταβαλλόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Σε αυτό το γράφημα έχουμε μετρήσει για διάφορες ηλιακές ακτινοβολίες την τάση ανοικτού κυκλώματος δηλαδή για αντίσταση άπειρη και παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη ακτινοβολία έχουμε τόσο αυξάνεται και τάση ανοικτού κυκλώματος. Επίσης παρατηρούμε ότι για μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας από  $(100-250)W/m^2$  η μεταβολή της τάσης ανοικτοκύκλωσης είναι αξιοσημείωτη περίπου από  $(0,75-1,4)V$ . Η περαιτέρω αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας στα φ/β δίνει αύξηση της τάσης ανοικτοκύκλωσης αλλά με μικρότερο ρυθμό μεταβολής (αύξησης). Συμπεραίνουμε έτσι ότι κάποια στιγμή όσο και να αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία δεν θα αυξηθεί η τάση ανοικτοκύκλωσης.

Στον πίνακα 1. παρουσιάζεται το σκαρίφημα όπου αναφέρεται για κάθε πείραμα τα  $V_{ανοικτ}$ ,  $P_{max}$ ,  $R-V-I$  (στο  $P_{max}$ ) και η ηλιακή ακτινοβολία.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.



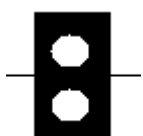

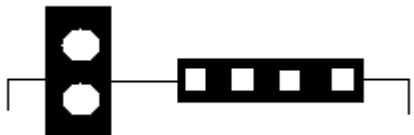
ΠΕΙΡΑΜΑ	ΔΙΑΤΑΞΗ	$V_{ανοικτ}$ (V)	$P_{max}$ (W)	R ( $\Omega$ m) at $P_{max}$	V(V) at $P_{max}$	I(A) at $P_{max}$	ΜΕΣΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ( $W/m^2$ )
1.		0.51	0.046	5	0.48	0.096	1000
2.		1.06	0.396	1	0.63	0.63	1100
3.		1.58	0.18	2.2	0.63	0.268	279
4.		0.98	0.53	0.47	0.5	1.06	990
5.		1.9	0.242	6	1,1	0,22	770
6.		1.9	0.34	6	1.45	0.24	1000

7.		1.19	0.131	5	0.81	0.162	300
8.		1.32	0.180	1.8	0.59	0.32	860
9.		1.94	0.250	0.47	0.35	0.74	1000
10.		1.37	0.220	1.8	0.64	0.35	920

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 2

### Β' ΜΕΡΟΣ

Στο δεύτερο πειραματικό χρησιμοποιούμε δυο λεμόνια τα οποία στην αρχή τα κυλούμε με την παλάμη σε μια σκληρή επιφάνεια, πιέζοντας το για να σπάσουν μερικοί από τους θυλάκους με το χυμό στο εσωτερικό του στα οποία τοποθετούμε δύο μεταλλικές λωρίδες βαθιά μέσα στο λεμόνιο, σε απόσταση 2-3 εκ., από τσίγκο η μια και από χαλκό η άλλη και κάνουμε συνδέσεις παράλληλα ή σε σειρά ,ακόμη συνδέουμε 4φ/β πλαίσια και ένα πολύμετρο παράλληλα στα λεμόνια, επίσης χρησιμοποιούμε και το πυρανόμετρο για μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας.

ΠΕΙΡΑΜΑ	ΔΙΑΤΑΞΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
1.		ΓΙΑ ΤΟ 1 ΛΕΜΟΝΙ
2.		ΓΙΑ ΤΟ 2 ΛΕΜΟΝΙ
3.		2 ΛΕΜΟΝΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ
4.		2 ΛΕΜΟΝΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ
5.		4 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΜΕ 2 ΛΕΜΟΝΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ

**ΣΚΟΠΟΣ:** Συνδεσμολογίες 2 λεμονιών σε σειρά ή παράλληλα ξεχωριστά αλλά και με σύνδεση φ/β πλαισίων και η κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ:** Τα ακόλουθα πειράματα είναι με 2 λεμόνια τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα παίρνοντας 2 μέταλλα χαλκού και 2 μέταλλα τσίγκου(ψευδαργύρου) στα οποία συνδέσαμε παράλληλα ένα πολύμετρο και μια μεταβλητή αντίσταση. Με το πολύμετρο μετρήσαμε την τάση του κυκλώματος και με τις τιμές των αντιστάσεων υπολογίσαμε με τον νόμο του (ohm) ρεύμα και στην συνέχεια την ισχύ.

Σε αυτό το πείραμα ο χυμός λεμονιού ο οποίος είναι όξινος όπου και είναι ηλεκτρολύτης. Τα άτομα του χαλκού προσελκύουν ηλεκτρόνια με μεγαλύτερη δύναμη από τα άτομα του τσίγκου(ψευδαργύρου) δηλαδή με άνοδο τον χαλκό και με κάθοδο τον τσίγκο (ψευδάργυρο) έχουμε φορά ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο, που αυτή η συνεχής ροή ηλεκτρονίων δημιουργείται μέσω του ηλεκτρολύτη και έτσι προκύπτει μια διαφορά δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων και δημιουργείται συνεχής ροή ρεύματος.

Στα πειράματα μας πραγματοποιήσαμε και συνδυασμό της παραπάνω διάταξης με τα φ/β πλαίσια στα οποία συνδέσαμε ένα πολύμετρο παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση. Με το πολύμετρο μετρήσαμε την τάση του κυκλώματος και με τις τιμές των αντιστάσεων υπολογίσαμε με τον νόμο του (ohm) ρεύμα και στην συνέχεια την ισχύ. Ακόμη δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος. Τέλος κατασκευάζουμε τις καμπύλες ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 2 λεμόνια, 4 φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση πολύμετρο, δυο λωρίδες τσίγκο και δυο λωρίδες χαλκό, κροκοδειλάκια, καλώδια

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:** Η ισχύς αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της τάσης και το ρεύμα είναι σχεδόν σταθερό. Τα λεμόνια σε συνδεσμολογία σε σειρά δίνουν μικρότερο ρεύμα και η τάση είναι μεγαλύτερη από ότι σε σύνδεση παράλληλα. Τα λεμόνια σε συνδεσμολογία παράλληλα δίνουν μεγαλύτερο ρεύμα και μικρότερη τάση. Αυτά δικαιολογούνται από την ηλεκτροτεχνία με βάση την θεωρία συνδεσμολογιών σε σειρά και παράλληλα για την σύνδεση συσσωρευτών εφόσον τα λεμόνια λειτουργούν σαν μπαταρία.

Επιπλέον η τάση που θα πάρουμε σε σύνδεση παράλληλη θα είναι μικρότερη αλλά αυτό δεν μπορούμε να το συγκρίνουμε με την σύνδεση σε σειρά λόγω διαφορετικής ισχύς που έδιναν τα λεμόνια. Θεωρητικά θα έπρεπε για δεδομένο φορτίο να καταναλώνεται η ίδια ισχύς είτε για τα λεμόνια σε σειρά είτε παράλληλα. Αυτό δεν φαίνεται από τα διαγράμματα γιατί οι μετρήσεις έγιναν με διαφορετικά λεμόνια.

Τέλος για την συνδεσμολογία λεμονιών και φ/β η ισχύς παραμένει σταθερή και το ρεύμα μειώνεται με την αύξηση της τάσης.

Η χρήση λεμονιών δεν συμφέρει για καμία ουσιαστική εφαρμογή διότι το ρεύμα που δίνουν είναι πολύ μικρό όπως και η ισχύς όπως ο όγκος και η ευαισθησία της κατασκευής. Εκτός κάποιας πειραματικής εφαρμογής στο εργαστήριο άλλη χρήση είναι σε ρολόι με ενδείξεις LCD ή σε ηλεκτρικό θερμόμετρο.

## ΠΕΙΡΑΜΑ Β1.

ΣΚΟΠΟΣ: Σύνδεση ενός λεμονιού με πολύμετρο και αντιστάσεις και κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε 1 λεμόνι και μια μεταβλητή αντίσταση όπου παίρνουμε κάποιες τιμές αντίστασης. Με το πολύμετρο μετράμε την τάση (V.) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος δηλαδή χωρίς αντίσταση. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V).

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε 1 λεμόνι στο οποίο έχουμε βάζουμε μια λωρίδα τσίγκο όπου είναι πλην(-) και μια λωρίδα χαλκό όπου είναι συν(+). Σε απόσταση 2-3 εκ. προσέχοντας να μην ακουμπάνε μεταξύ τους στην συνέχεια ενώνουμε κάθε επαφή με τα καλώδια και τα κροκοδειλακια. και τα συνδέουμε με το πολύμετρο όπου εδώ μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο. Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 1 λεμόνι, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο, μια λωρίδα τσίγκο και μια λωρίδα χαλκό.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### ΠΙΝΑΚΑΣ Β1

#### ΓΙΑ ΤΟ 1 ΛΕΜΟΝΙ

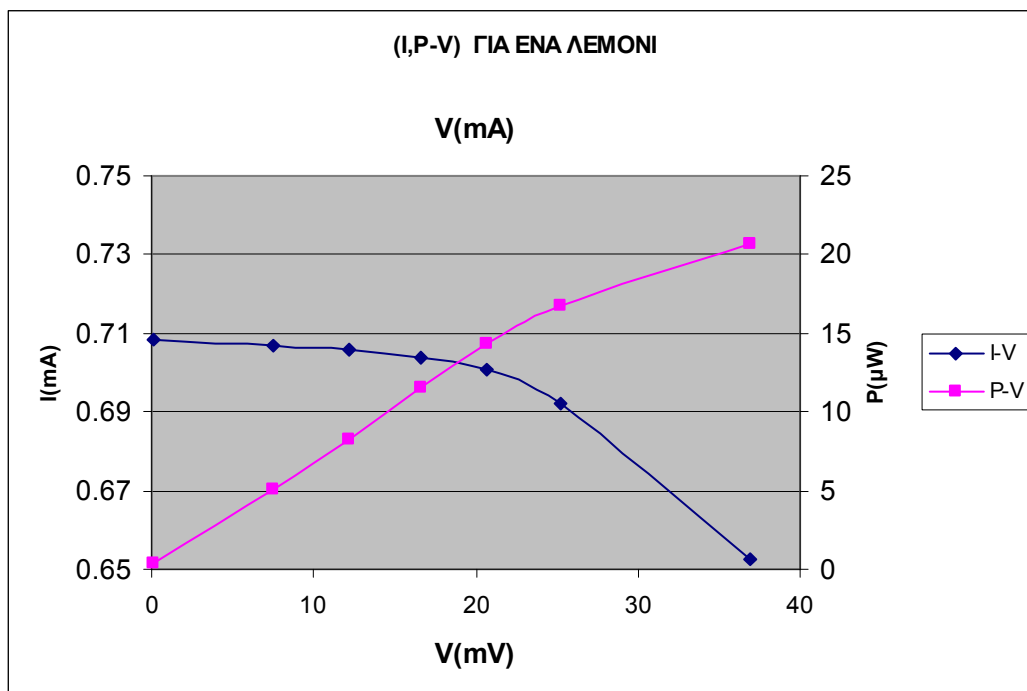
Vanοικτ=0.99V

V(mV)	R(Ω)	I(mA)	P(μW)
30	43	0.69	20.7
25.2	36.2	0.7	17.8
20.8	28.7	0.72	14.9
16.6	23.5	0.7	11.6
12.2	17.8	0.68	8.2
7.5	11.2	0.69	5.1
3.5	5	0.7	2.4

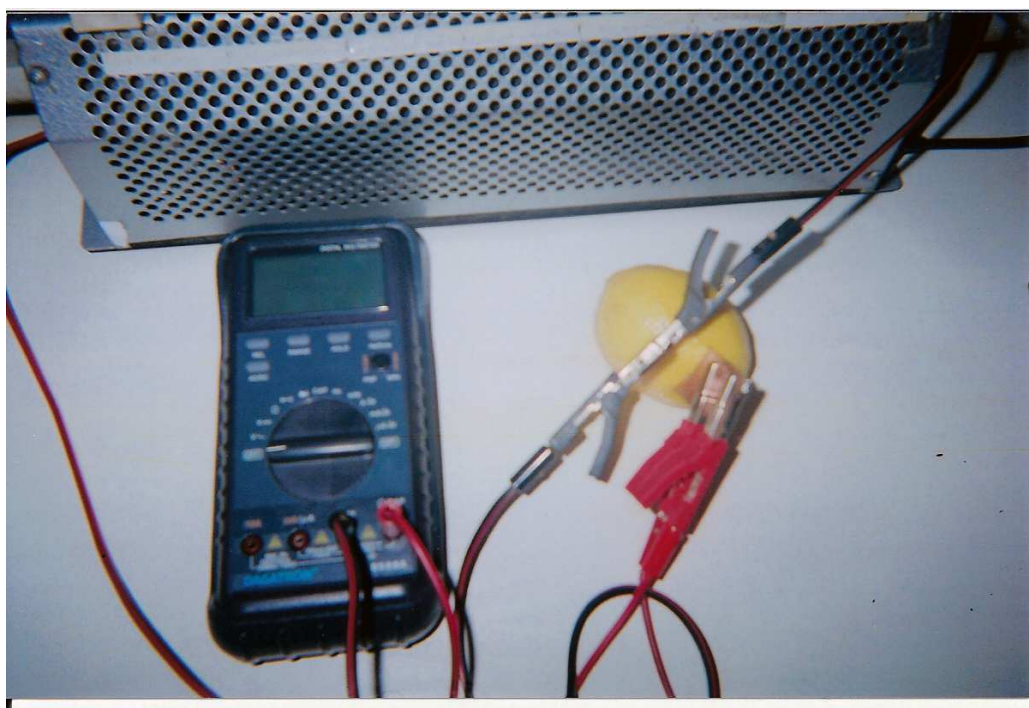


Για το 1 λεμόνι

## ΓΡΑΦΗΜΑ Β1



**B1) Το 1<sup>ο</sup> Λεμόνι συνδεδεμένο με πολύμετρο και μεταβλητή αντίσταση**



**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:** Η καμπύλη ισχύος αυξάνεται καθώς αυξάνει η τάση ενώ η καμπύλη έντασης είναι σταθερή. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι ( $V_{\text{ανοικτ}}=0,99\text{v}$ )



## ΠΙΝΑΚΑΣ Β2.

ΣΚΟΠΟΣ: Σύνδεση δεύτερου λεμονιού με πολύμετρο και αντιστάσεις και κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε ένα άλλο λεμόνι (δεύτερο λεμόνι) και μια μεταβλητή αντίσταση όπου παίρνουμε κάποιες τιμές αντίστασης Με το πολύμετρο μετράμε την τάση (V.) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος δηλαδή χωρίς αντίσταση . Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V)

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε ένα άλλο λεμόνι (δεύτερο λεμόνι) στο οποίο έχουμε βάζουμε μια λωρίδα τσίγκο όπου είναι πλην(-) και μια λωρίδα χαλκό όπου είναι συν(+). σε απόσταση 2-3 εκ. προσέχοντας να μην ακουμπάνε μεταξύ τους στην συνέχεια ενώνουμε κάθε επαφή με τα καλώδια και τα κροκοδειλάκια. και τα συνδέουμε με το πολύμετρο όπου εδώ μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο . Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 1 λεμόνι, μεταβλητή αντίσταση πολύμετρο, μια λωρίδα τσίγκο και μια λωρίδα χαλκό, κροκοδειλάκια ,καλώδια.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### ΠΙΝΑΚΑΣ Β2

#### ΓΙΑ ΤΟ 2 ΛΕΜΟΝΙ

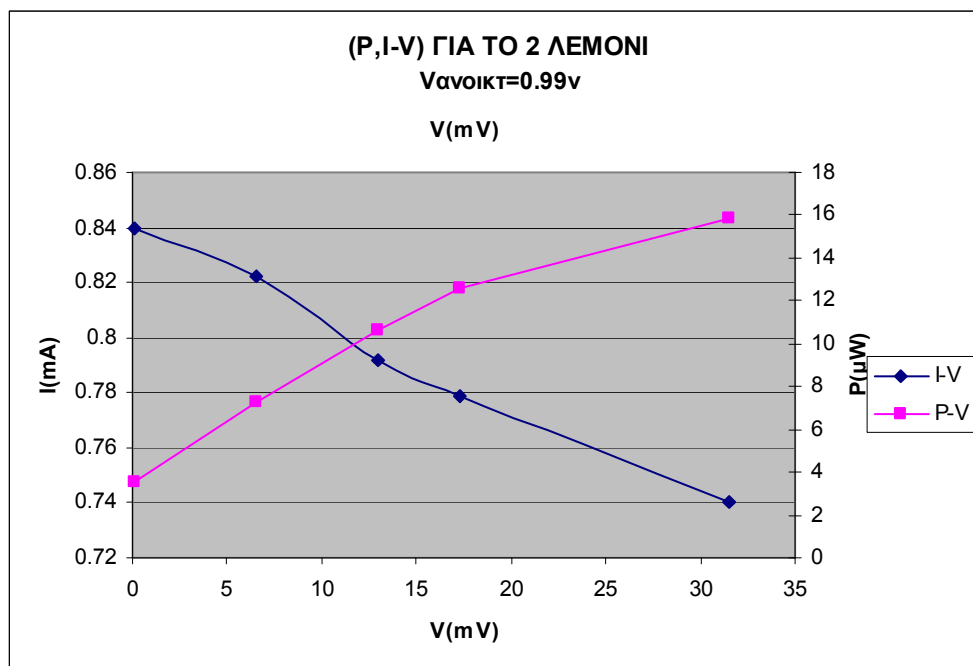
Νανοικτ.=0.99V

V(mv)	R(Ω)	I(mA)	P(μW)
31.5	28.7	0.74	15.9
17.3	23.5	0.73	12.6
13	17.8	0.73	9.4
8.4	11.2	0.75	6.3
4.2	5	0.84	3.5



Για το 2 λεμόνι

## ΓΡΑΦΗΜΑ Β2



B2) Το 2<sup>ο</sup> Λεμόνι συνδεδεμένο με πολύμετρο και μεταβλητή αντίσταση



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η καμπύλη ισχύος αυξάνει καθώς αυξάνει και η τάση ενώ η καμπύλη της έντασης μειώνετε καθώς αυξάνει η τάση. Η τάση ανοικτού κυκλώματος (Vανοικτ=0.99v).

### ΠΕΙΡΑΜΑ Β3.

ΣΚΟΠΟΣ: Σύνδεση 2 λεμονιών παράλληλα και κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε 2 λεμόνια παράλληλα και μια μεταβλητή αντίσταση όπου παίρνουμε κάποιες τιμές αντίστασης Με το πολύμετρο μετράμε την τάση (V.) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος δηλαδή χωρίς αντίσταση . Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V)

#### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε 2 λεμόνια παράλληλα στα οποία βάζουμε μια λωρίδα τσίγκο όπου είναι πλην(-) και μια λωρίδα χαλκό όπου είναι συν(+) σε απόσταση 2-3 εκ. προσέχοντας να μην ακουμπάνε μεταξύ τους στην συνέχεια ενώνουμε κάθε επαφή με τα καλώδια και τα κροκοδειλάκια Τα 2 λεμόνια συνδέονται παράλληλα βάζοντας δύο κροκοδειλάκια για να ενώσουν ένα κομμάτι τσίγκου του ενός λεμονιού με το κομμάτι τσίγκου άλλου λεμονιού και τα άλλα δύο κομμάτια χαλκού συνδέονται και αυτά με δύο κροκοδειλάκια και παράλληλα με τα λεμόνια συνδέουμε το πολύμετρο όπου εδώ μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο . Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 2 λεμόνια , μεταβλητή αντίσταση πολύμετρο, δυο λωρίδες τσίγκο και δυο λωρίδες χαλκό, κροκοδειλάκια, καλώδια

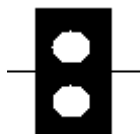
### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### ΠΙΝΑΚΑΣ Β3

##### 2 ΛΕΜΟΝΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ

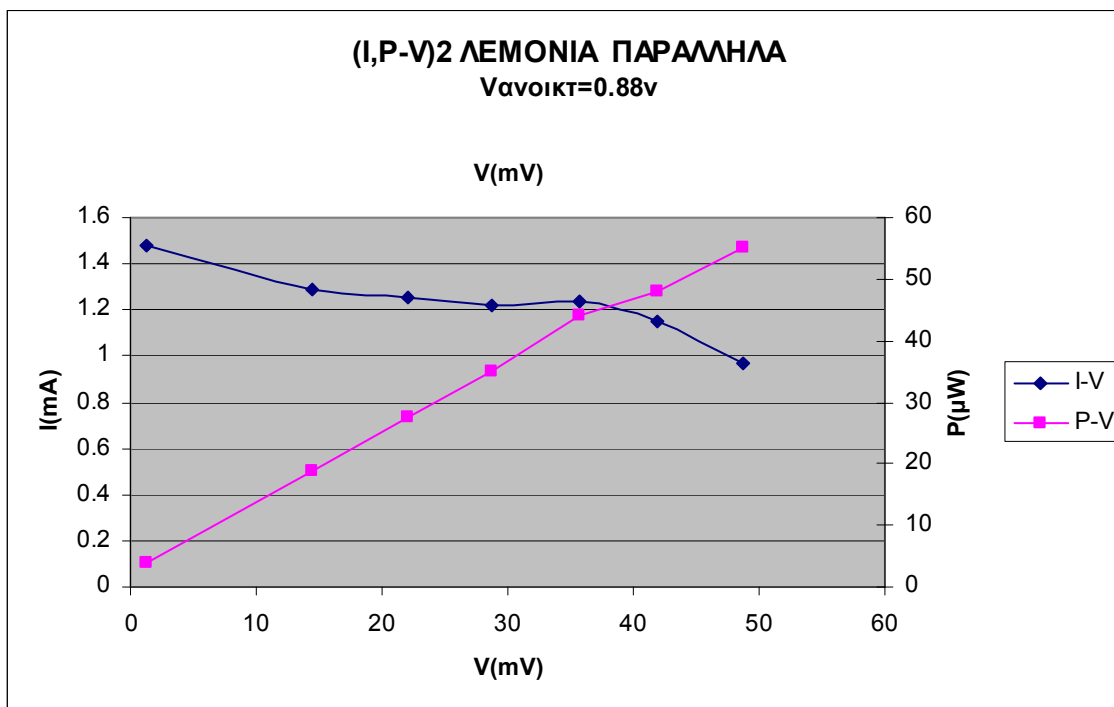
$V_{\text{ανοικτοκυκλ}}=0.88\text{V}$

V(mv)	R( $\Omega$ )	I(mA)	P( $\mu$ W)
48.8	43	1.13	55.1
41.9	36.2	1.15	48.1
35.7	28.7	1.24	44.2
28.8	23.5	1.22	35.1
22	17.5	1.25	27.5
14.5	11.2	1.29	18.7
7.4	5	1.48	10.9

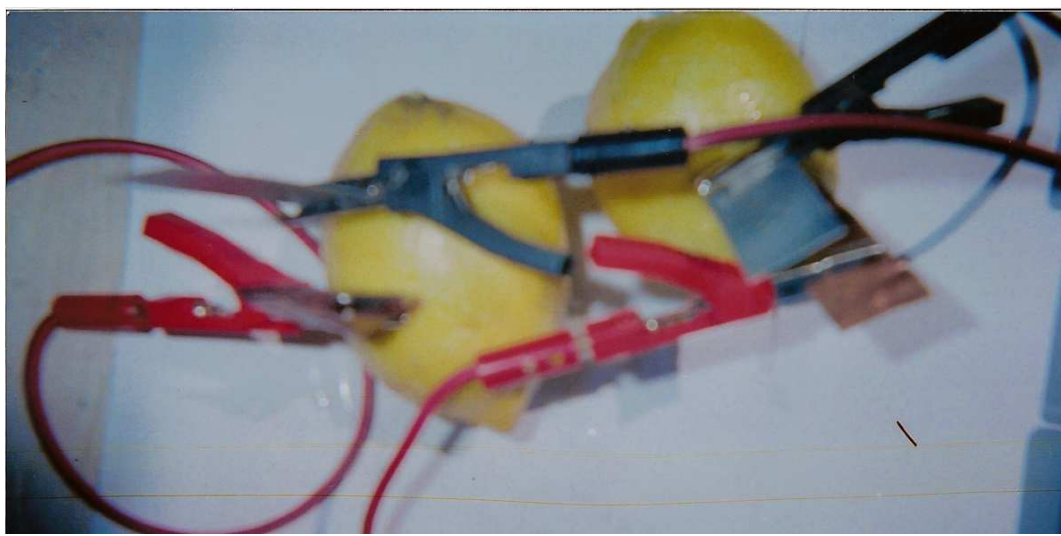


Για 2 λεμόνια παράλληλα

### ΓΡΑΦΗΜΑ Β3



### B3) 2 Λεμόνια παράλληλα



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η καμπύλη ισχύος αυξάνει καθώς αυξάνει και η τάση και επίσης το ρεύμα που δίδει η παράλληλη σύνδεση είναι μεγαλύτερο σε σχέση με την σύνδεση σε σειρά. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι 0,99 V

#### ΠΕΙΡΑΜΑ Β4.

ΣΚΟΠΟΣ: Σύνδεση 2 λεμονιών σε σειρά και η κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε 2 λεμόνια σε σειρά και μια μεταβλητή αντίσταση όπου παίρνουμε κάποιες τιμές αντίστασης. Με το πολύμετρο μετράμε την τάση (V.) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος δηλαδή χωρίς αντίσταση. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V)

#### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε 2 λεμόνια σε σειρά στα οποία βάζουμε μια λωρίδα τσίγκο όπου είναι πλην(-) και μια λωρίδα χαλκό όπου είναι συν(+) σε απόσταση 2-3 εκ. προσέχοντας να μην ακουμπάνε μεταξύ τους στην συνέχεια ενώνουμε κάθε επαφή με τα καλώδια και τα κροκοδειλακια. Τα 2 λεμόνια συνδέονται σε σειρά βάζοντας ένα κροκοδειλάκι να ενώσει το κομμάτι τσίγκο του ενός λεμονιού με το κομμάτι χαλκού του άλλου λεμονιού και τα άλλα δύο κομμάτια τα συνδέουμε με το πολύμετρο όπου εδώ μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο. Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 2 λεμόνια, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο, δυο λωρίδες τσίγκο και δυο λωρίδες χαλκό, κροκοδειλάκια, καλώδια

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### ΠΙΝΑΚΑΣ Β4

#### 2 ΛΕΜΟΝΙΑ ΣΕ ΣΕΙΡΑ

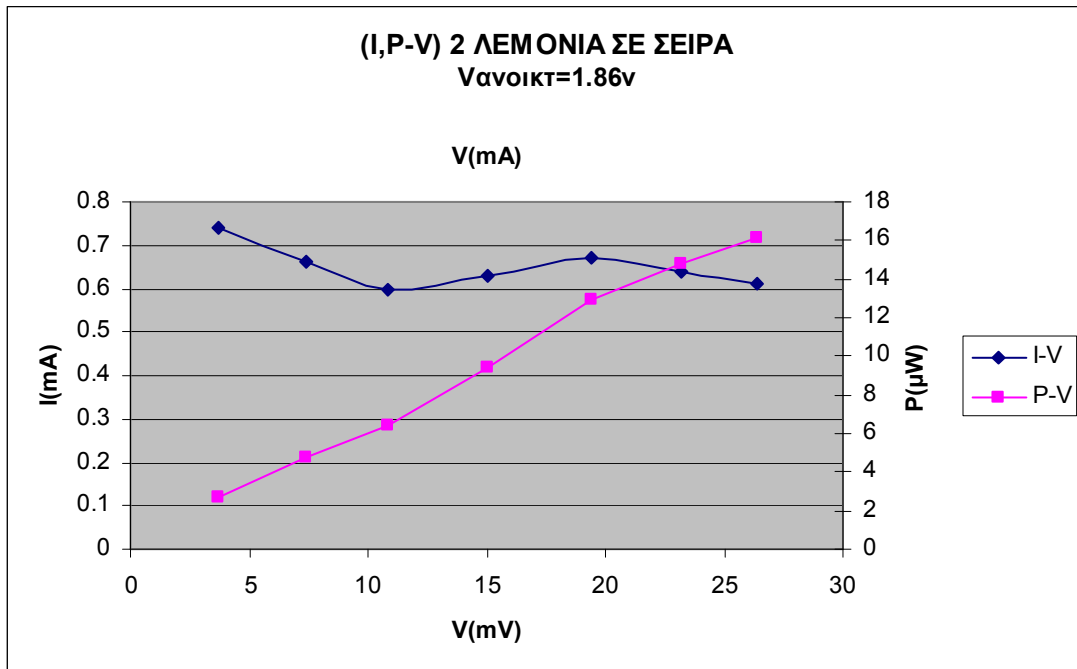
Υανοικτ=1.86V

V(mV)	R( $\Omega$ )	I(mA)	P( $\mu$ W)
26.4	43	0.613	16.1
23.2	36.2	0.64	14.8
19.4	28.7	0.67	12.9
15	23.5	0.63	9.4
10.8	17.8	0.6	6.4
7.4	11.2	0.66	4.8
3.7	5	0.74	2.7

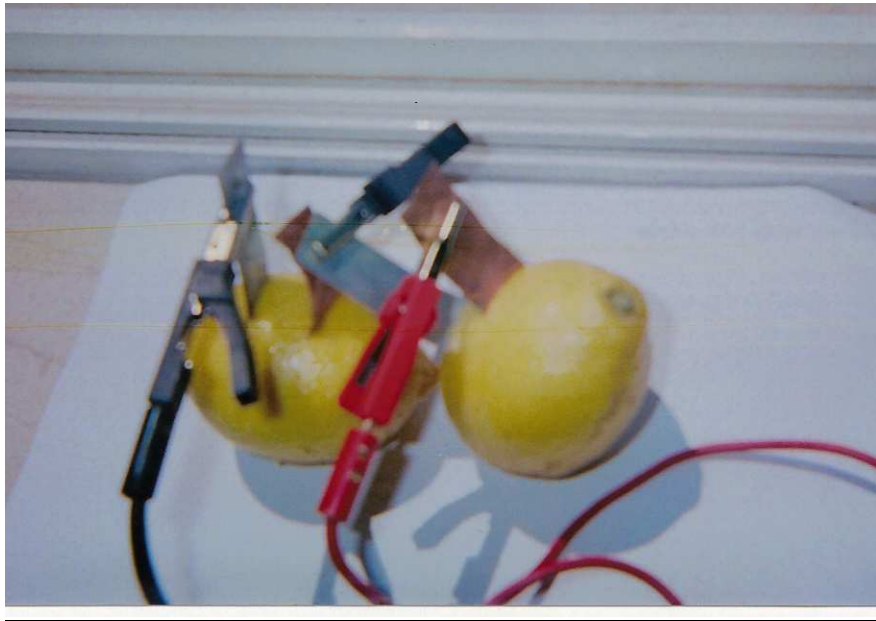


2 Λεμόνια σε σειρά

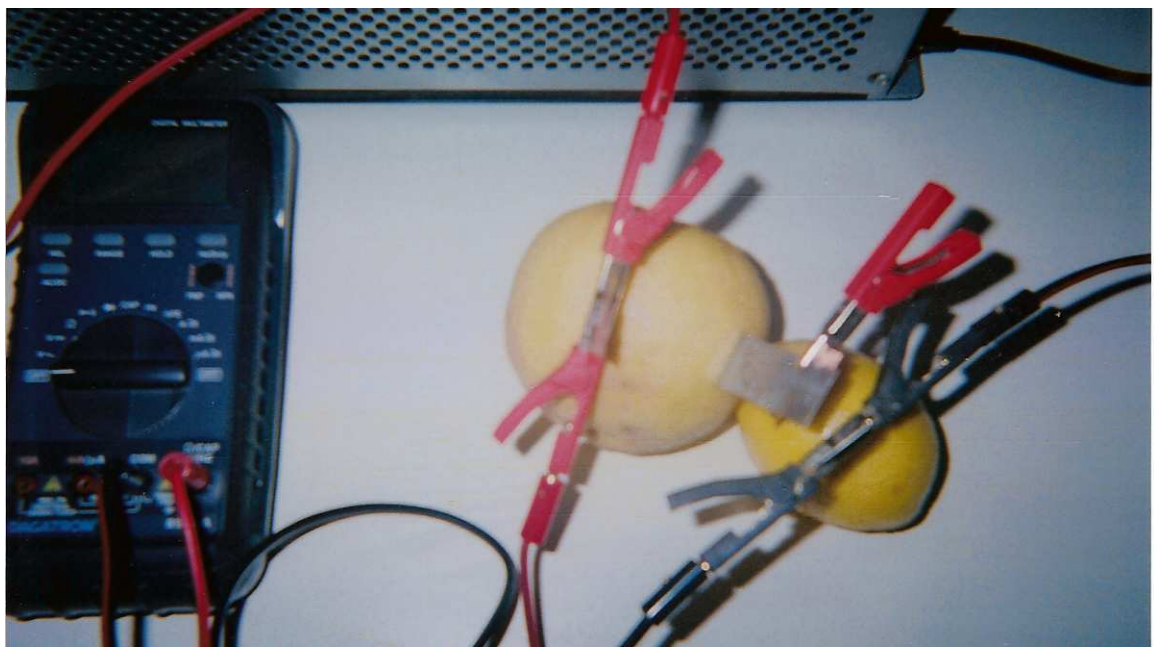
### ΓΡΑΦΗΜΑ Β4



**B4.α) 2 Λεμόνια σε σειρά**



**B4.β) 2 Λεμόνια σε σειρά**



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η καμπύλη ισχύος αυξάνει καθώς αυξάνει και η τάση και η καμπύλη έντασης είναι σταθερή. Η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι 1,86V.

## ΠΕΙΡΑΜΑ Β5.

ΣΚΟΠΟΣ: Σύνδεση 2 λεμονιών παράλληλα και σύνδεσή τους με φ/β στοιχεία και κατασκευή καμπύλης ισχύος και έντασης του ρεύματος συναρτήσει της τάσης (P, I-V).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ: Στο πείραμα αυτό έχουμε 2 λεμόνια παράλληλα με 4φ/β σε σειρά και μια μεταβλητή αντίσταση όπου παίρνουμε κάποιες τιμές αντίστασης. Με το πολύμετρο μετράμε την τάση (V.) και με τον νόμο του (ohm) βρίσκουμε την ένταση του ρεύματος και την ισχύ. Ακόμη γίνεται μέτρηση τάσης ανοικτού κυκλώματος δηλαδή χωρίς αντίσταση. Στις μετρήσεις που γίνονται η ηλιακή ακτινοβολία είναι σταθερή. Έπειτα γίνεται η σχεδίαση γραφήματος ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσης (I-V),( P-V)

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ:

Στο πείραμα έχουμε 2 λεμόνια παράλληλα με 4φ/β πλαίσια σε σειρά. Στα λεμόνια βάζουμε μια λωρίδα τσίγκο όπου είναι πλην(-) και μια λωρίδα χαλκό όπου είναι συν(+) σε απόσταση 2-3 εκ. προσέχοντας να μην ακουμπάνε μεταξύ τους στην συνέχεια ενώνουμε κάθε επαφή με τα καλώδια και τα κροκοδειλάκια. Τα 2 λεμόνια συνδέονται παράλληλα βάζοντας δύο κροκοδειλάκια για να ενώσουν ένα κομμάτι τσίγκου του ενός λεμονιού με το κομμάτι τσίγκου άλλου λεμονιού και τα άλλα δύο κομμάτια χαλκού συνδέονται και αυτά με δύο κροκοδειλάκια με τα λεμόνια ακόμη παράλληλα συνδέονται με 4 φ/β πλαίσια τα οποία είναι σε σειρά και παράλληλα συνδέουμε το πολύμετρο όπου εδώ μετράμε την τάση, για να μετρήσουμε τάση στο συν(+) συνήθως βάζουμε το κόκκινο καλώδιο και στο πλην(-) το μαύρο καλώδιο. Ακόμη έχουμε δίπλα σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε βάλει το πυρανόμετρο και μετράει τις ολική ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος. Τα όργανα που χρησιμοποιούμε είναι: 2 λεμόνια, 4 φ/β πλαίσια, πυρανόμετρο, μεταβλητή αντίσταση, πολύμετρο, δυο λωρίδες τσίγκο και δυο λωρίδες χαλκό, κροκοδειλάκια, καλώδια



## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

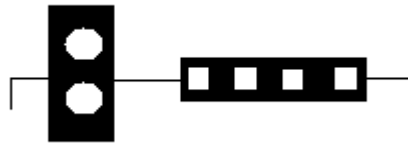
### ΠΙΝΑΚΑΣ Β5

#### 2 ΛΕΜΟΝΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΜΕ 4 Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ :  $1000 \text{ W/m}^2$

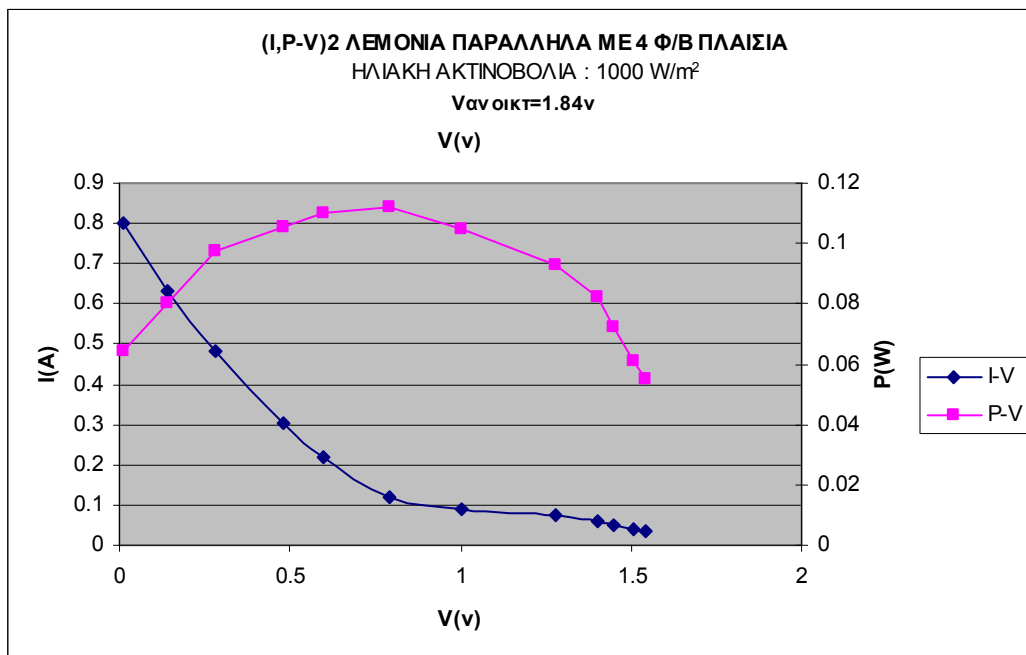
Νανοϊκτοκυκλ=1,84V

V(v)	R( $\Omega$ )	I(A)	P(W)
1.54	42	0.036	0.055
1.51	36.2	0.041	0.061
1.45	28.7	0.05	0.072
1.4	23.5	0.059	0.082
1.28	17.3	0.073	0.093
1	11.2	0.089	0.089
0.75	5	0.15	0.112
0.5	2.2	0.22	0.11
0.3	1.2	0.25	0.075
0.23	0.47	0.48	0.11
0.14	0.22	0.63	0.088
0.08	0.1	0.8	0.064

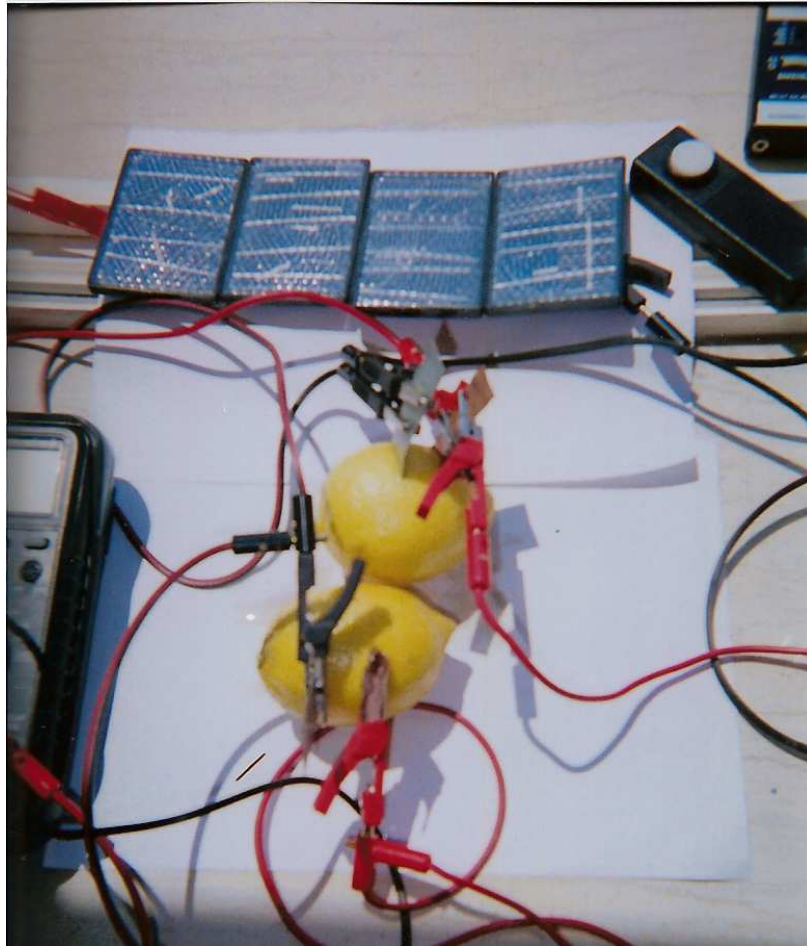


4 φ/β πλαίσια σε σειρά με 2 λεμόνια παράλληλα (υβριδικό σύστημα)

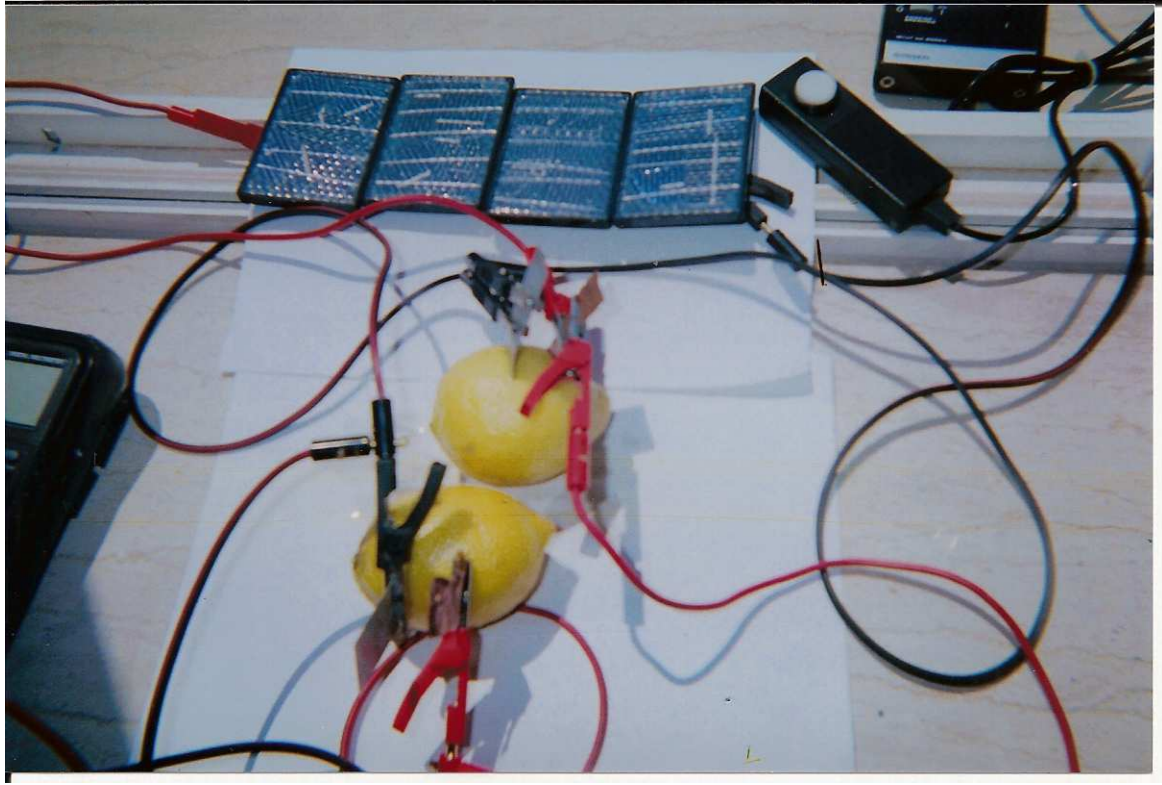
### ΓΡΑΦΗΜΑ Β5



**B5α) 2 Λεμόνια παράλληλα με 4 Φ/Β πλαίσια σε σειρά**





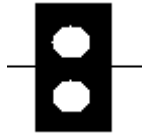

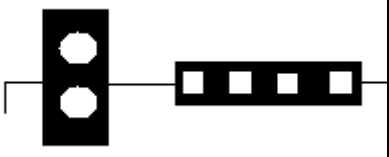
**B5.β) 2 Λεμόνια παράλληλα με 4 Φ/Β πλαίσια σε σειρά**



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ήταν σταθερή κατά την διεξαγωγή του πειράματος. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά υψηλή. Η τάση ανοικτού κυκλώματος ( $V_{\text{ανοικτ}}=1.84\text{v}$ ). Η καμπύλη ισχύος κάποιο μέγιστο στα  $0,11\text{W}$  για αντίσταση  $0,5\ \Omega$  και τάση  $0,75\text{V}$ . Η καμπύλη έντασης μειώνεται με την αύξηση του φορτίου.

Στον πίνακα 2. παρουσιάζεται το σκαρίφημα όπου αναφέρεται για κάθε πείραμα τα  $V_{ανοικτ}$ ,  $P_{max}$ ,  $R-V-I$  (στο  $P_{max}$ ) και η ηλιακή ακτινοβολία.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.

ΠΕΙΡΑΜΑ	ΔΙΑΤΑΞΗ	$V_{ανοικτ}$ (V)	$P_{max}$ ( $\mu$ w)	$R(\Omega)$ at $P_{max}$	$V(mv)$ at $P_{max}$	$I(mA)$ at $P_{max}$	ΜΕΣΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟ ΛΙΑ
1.		0.99	20.7	43	30	0.69	-
2.		0.99	15.9	28.7	31.5	0.74	-
3.		0.88	55.1	43	48.8	1.13	-
4.		1.86	16.1	43	26.4	0.613	-
5.		1.84	$0.11^* 10^6$	(0.47-0.5)	$(0.23-0.75)^*10^3$	$(0.15-0.48)^*10^3$	1000

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΩΤΙΣΤΙΚΩΝ ΚΗΠΟΥ

### Γ' ΜΕΡΟΣ

**ΣΚΟΠΟΣ:** Είναι να δείξουμε τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνει η εφαρμογή Φ/Β πλαισίων για την τροφοδοσία φωτιστικών κήπου.

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ:** Αρχικά προσδιορίζουμε την ηλεκτρική ενέργεια που δαπανούνται φωτιστικά τους 5 μήνες. Έπειτα βρίσκουμε την επιφάνεια του φ/β στοιχείου για την κάλυψη ημερήσιας κατανάλωσης. Στην συνέχεια υπολογίζουμε την παραγόμενη και την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια και έτσι βρίσκοντας το περίσσειμα ενέργειας. Επίσης βρίσκουμε τον λόγο καταναλισκόμενης προς παραγόμενης ενέργειας για τους 5 μήνες. Ακόμη γίνονται προσδιορισμοί όπως η ημερήσια κατανάλωση, η κατανάλωση μπαταρίας για 3 μέρες, η ονομαστική και η ενεργός χωρητικότητα ενός συσσωρευτή και η κατανάλωση μέση ισχύος για 3 μέρες. Τέλος προσδιορίζουμε το ποσοστό ηλιακής ενέργειας που αξιοποιείται.

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:** Η παραγόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που καταναλώθηκε (για τους 5 μήνες από Μάιο-Σεπτέμβριο). Για τον Ιούλιο και τον Αύγουστο επειδή έχουμε την μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία η παραγόμενη ενέργεια είναι πολύ μεγαλύτερη από την καταναλισκόμενη. Ενώ για τον Σεπτέμβριο που έχουμε την μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τους 5 υπόλοιπους μήνες η παραγόμενη ενέργεια είναι σχεδόν ίση με την καταναλισκόμενη ενέργεια αλλά και πάλι είναι λίγο μεγαλύτερη από την καταναλισκόμενη.

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ:** Η συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε τομέα όπου θα μπορούσαν τα 6 φωτιστικά να είναι αρκετά όπως την αυλή μιας πολυκατοικίας, ή μιας εταιρίας έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ο βραδυνός φωτισμός. Ακόμη τα φωτιστικά κήπου θα μπορούσαν σε μεγαλύτερο αριθμό να χρησιμοποιηθούν για ένα μεγάλο συγκρότημα.

## ΦΩΤΙΣΤΙΚΑ ΚΗΠΟΥ



### ΔΙΝΟΝΤΑΙ:

Έχουμε έναν κήπο με 6 φωτιστικά που το κάθε ένα βγάζει Ισχύ 9 Watt. Τα φωτιστικά είναι αναμμένα από της 10 το βράδυ έως 6 το πρωί. Η τάση μπαταρίας είναι 12V. Για τον υπολογισμό επιφάνειας φ/β πλαισίων και χωρητικότητας συσσωρευτών θα κάνετε υπερδιαστασιολόγηση 30%

- Η ονομαστική ισχύ είναι 54 W
- Οι συνθήκες ηλιοφάνειας για τα Χανιά δίνονται από πίνακες.
- 14% απόδοση φωτοβολταϊκών
- 90% απόδοση συσσωρευτή
- 60% βαθμός εκφόρτισης συσσωρευτή

### ΖΗΤΟΥΜΕΝΑ:

Α) Ηλεκτρική ενέργεια για τους 5 μήνες

Β) Καλούμαστε να σχεδιάσουμε για τα Χανιά ένα Φ/Β σύστημα που θα καλύπτει κάποιες ανάγκες μιας κατοικίας για 5 μήνες συγκεκριμένα από Μάιο έως Σεπτέμβριο. Επίσης να σχεδιαστούν τα φωτιστικά κήπου για τον μήνα με την μικρότερη ηλιοφάνεια

Γ) Να υπολογιστεί ο μέγιστος συνεχόμενος χρόνος χωρίς ηλιοφάνεια είναι 3 ημέρες. Ακόμη να υπολογιστεί το πλεόνασμα ηλιοφάνειας ηλεκτρικής ενέργειας για τους 5 μήνες

#### *ΕΡΩΤΗΜΑ Α.*

Τα φωτιστικά είναι αναμμένα 8h/ημέρα άρα:

$$8\text{h/ημέρα} * 153 \text{ ημέρες} = 1.224 \text{ (h/ το 5μηνο)}$$

$$\text{Εκαταναλ.} = P * t = 54\text{W} * 1.224 \text{ (h/το 5μηνο)} = 66.096\text{Wh/5μηνο}$$

*Εκατ:* Ηλεκτρική ενέργεια που δαπανούν τα φωτιστικά.

*P:* Ονομαστική Ισχύ σε (W)

*t:* Ώρες λειτουργίας

#### **ΠΕΡΙΟΧΗ: ΧΑΝΙΑ ΜΕ ΚΛΙΣΗ 30**

<b>ΜΗΝΕΣ</b>	<b>ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (KWh/m<sup>2</sup>)</b>
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	83
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	97
ΜΑΡΤΙΟΣ	128
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	152
ΜΑΙΟΣ	183
ΙΟΥΝΙΟΣ	191
ΙΟΥΛΙΟΣ	208
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	207
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	172
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	127
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	107
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	83

ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (KWh/m <sup>2</sup> /ημέρα)
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	83/31=2.68
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	97/28=3.46
ΜΑΡΤΙΟΣ	128/31=4.13
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	152/30=5.06
ΜΑΙΟΣ	183/31=5.90
ΙΟΥΝΙΟΣ	191/30=6.36
ΙΟΥΛΙΟΣ	208/31=6.70
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	207/31=6.67
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	172/30=5.73
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	127/31=4.06
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	107/30=3.56
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	83/31=2.67

Συσκευή	Ισχύς(W)	Ώρες (h)/ημέρα	Κατανάλωση(Wh/ημέρα)
6 φωτιστικά	9*6=54	8	432

### ΕΡΩΤΗΜΑ Β.

#### ΓΙΑ ΤΟΝ ΜΗΝΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟ

Με μικρότερη ηλιοφάνεια έχουμε τον **Σεπτέμβριο** (14%):  
 $172(\text{KWh}/\text{m}^2)/30=5.73(\text{KWh}/\text{m}^2/\text{ημέρα})$

Βρίσκουμε την επιφάνεια Φ/Β στοιχείου για κάλυψη ημερήσιας κατανάλωσης:  
 $A = E / (\Pi * n)$

Όπου: A= επιφάνεια σε m<sup>2</sup>, E= ηλεκτρική ενέργεια σε KWh/ημέρα, Π= ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας σε KWh/m<sup>2</sup>/ημέρα, n= συντελεστής απόδοσης.  
 $A = 0, 432 / (5.73 * 0.14) = 0.54 \text{ m}^2$

Υπερδιαστασιολόγηση 30%:  
 $A = 0.54 * 1.3 = 0.70 \text{ m}^2$



### ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για τους 5 μήνες για ( Μάιο- Σεπτέμβριο):

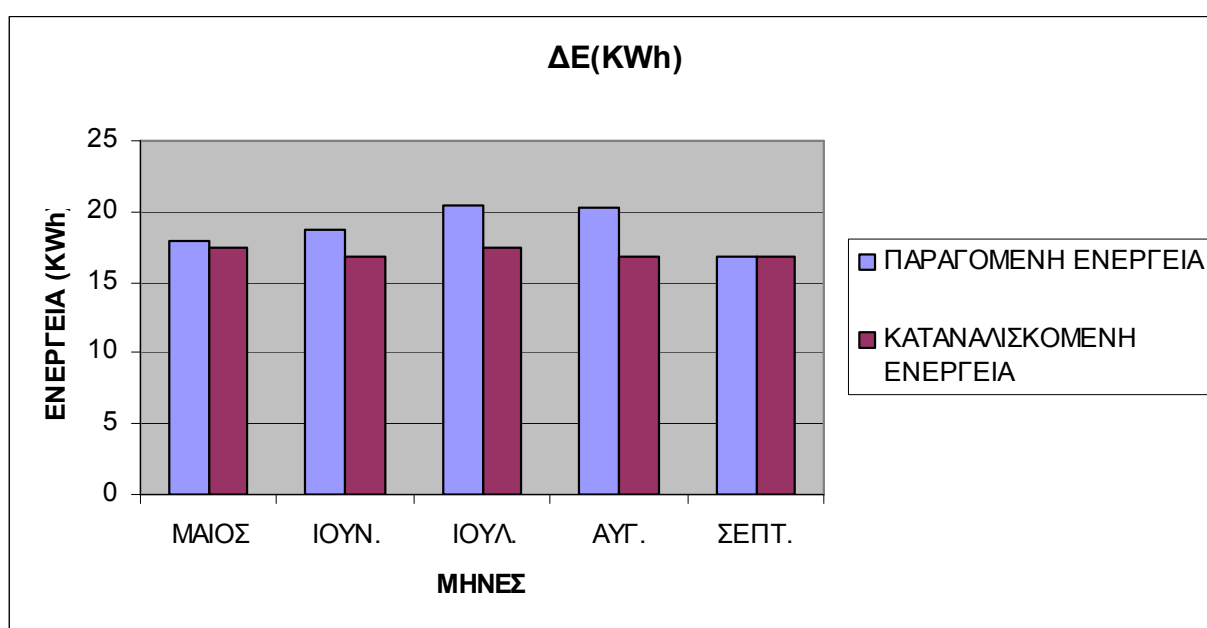
ΜΗΝΕΣ	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ(KWh)
ΜΑΙΟΣ	$183*0.70*0,14=17.93$
ΙΟΥΝΙΟΣ	$191*0.70*0,14=18.72$
ΙΟΥΛΙΟΣ	$208*0.70*0,14=20.38$
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	$207*0.70*0,14=20.28$
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	$172*0.70*0,14=16.85$

### ΠΙΝΑΚΑΣ 2

ΜΗΝΕΣ	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ (KWh)	ΚΑΤΑΝΑΛ/ΜΕΝΗ (KWh)	ΔΕ (KWh)
ΜΑΙΟΣ	17.93	$0,432*1.3*31=17.40$	0.53
ΙΟΥΝΙΟΣ	18.72	$0,432*1.3*30=16.84$	1.88
ΙΟΥΛΙΟΣ	20.38	$0,432*1.3*31=17.40$	2.98
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	20.28	$0,432*1.3*30=16.84$	3.44
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	16.85	$0,432*1.3*30=16.84$	0.01
ΣΥΝΟΛΟ	94,16	85,32	8,84

ΕΡΩΤΗΜΑ Γ.

ΓΡΑΦΗΜΑ 1



Υπολογισμός λόγου: Ο λόγος ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν οι συσκευές 5 μήνες προς παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα Φ/Β στους 5 μήνες:

$$\text{ΧΑΝΙΑ } (85.32 \text{ KWh}/5\text{μηνος}) / (94.16\text{KWh}/5 \text{ μηνος}) = 0.9061$$

Ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση:

$$0,432 * 1.3 = 0,5616 \text{ KWh}/\text{ημέρα}$$

Για 3 ημέρες κατανάλωση με μπαταρίες:

$$E_{bat} = 0,5616 * 3 = 1,6848 \text{ KWh} \text{ ή } 1684,8 \text{ Wh}$$

Ονομαστική χωρητικότητα ενός συσσωρευτή:

$$CN = E / (\alpha * \beta * v) = 1684,8 / (0.9 * 0.6 * 12) = 260 \text{ Ah}$$

Ενεργός χωρητικότητα ενός συσσωρευτή

$$C = \beta * CN = 0.6 * 260 = 156 \text{ AhV}$$

Κατανάλωση με μέση ισχύ P για μ συνεχείς ημέρες

$$P = (c * a * v) / 24 * \mu = 156 * 0.9 * 12 / 24 * 3 = 23.4 \text{ Wh}$$

Όπου: E=ηλεκτρική ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν οι συσσωρευτές

α= βαθμός απόδοσης συσσωρευτών

β= βαθμός εκφόρτισης συσσωρευτών

CN= ονομαστική χωρητικότητα συσσωρευτών

C= ενεργός αξιοποιήσιμη χωρητικότητα συσσωρευτών

P=ισχύς που δίνουν οι συσσωρευτές

V=τάση που δίνουν οι συσσωρευτές

ΜΗΝΕΣ	ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (KWh/m <sup>2</sup> )	Η ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΥΣΑ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΕ Φ/Β(kWh) ΜΕ A=0,7m <sup>2</sup>
ΜΑΙΟΣ	183	183*0,7=128,1
ΙΟΥΝΙΟΣ	191	191*0,7=133,7
ΙΟΥΛΙΟΣ	208	208*0,7=145,6
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	207	207*0,7=144,9
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	172	172*0,7=120,4
ΣΥΝΟΛΟ		672,7

Ποσοστό ηλιακής ενέργειας που αξιοποιείται:  $94,16 / 672,7 = 0,1399 = 0,14$

Όπου το 94,16( KWh/5μηνο) η συνολική παραγόμενη ενέργεια και 672,7(KWh/5μηνο) η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια.

Άρα αξιοποιείται το 14 % της ηλιακής ενέργειας, τιμή που συμπίπτει και με το βαθμό απόδοσης του Φ/Β.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.] Ι. Ε. Φραγκιαδάκης, <<Φωτοβολταϊκά Συστήματα>> Εκδόσεις 'Ζήτη', Θεσσαλονίκη. Σελ. 3-4, 47-49, 56-60, 139-145, 152-154, 118-121, 188-190, 213-214
- [2.] Κ. Καγκαράκη, <<Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία>> Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1992 Σελ. 3-5, 7, 11-27, 29-38, 40-45, 58, 63-64
- [3.] Albert Paul Malvino Phd, <<Βασική Ηλεκτρονική>> Εκδόσεις 'Τζιόλα', Θεσσαλονίκης 4<sup>η</sup> Έκδοση Σελ. 2-3
- [4.] C. Kittel, Έκδοση: Γ. Πνευματικού 5<sup>η</sup> Έκδοση <<Εισαγωγή στη φυσική στερεάς καταστάσεως.>> Σελ. 240
- [5.] Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής. (Ι.Η.Τ) Εργαστήριο Ηλιακών και Άλλων Ενεργειακών συστημάτων <<Πέμπτο Εθνικό Συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας>> Αθήνα, 6-8 Νοεμβρίου '96 ΕΚΕΦΕ, Τόμος Γ' Ο 20<sup>ος</sup> ΑΙΩΝΑΣ: Η Βιομηχανική Εφαρμογή ηλιακής ενέργειας Σελ. 156, 168
- [6.] Α. Νεοκλέους M.Sc. - Σ. Π. Κωνσταντινίδη M.Sc., M. Ed. <<Μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική με φωτοβολταϊκά συστήματα>> Εκδόσεις 'ΙΩΝ' Σελ. 18, 24, 25-28
- [7.] Discovery & Science-Τεύχος Ιουνίου 2005 Σελ. 174-175
- [8.] <http://www.tech.in.gr>
- [9.] <http://www.heliosteiath.gr>