

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΘΕΩΡΙΑ, ΝΟΜΙΚΟ &  
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΟΥ  
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ**

υπό

**ΔΟΜΑΝΟΥ ΘΩΜΑ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2008

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΘΕΩΡΙΑ, ΝΟΜΙΚΟ &  
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ, ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΟΥ  
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ**

υπό

**ΔΟΜΑΝΟΥ ΘΩΜΑ**

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

2008



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

Αριθ. Εισ.: 6451/1  
Ημερ. Εισ.: 18-07-52008  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2008  
ΔΟΜ

© 2008 Δόμανος Θωμάς

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

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

Πρώτος Εξεταστής Παναγιώτης Τσιακάρας  
(Επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Βασίλης Μποντόζογλου  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής      Νικόλαος Ανδρίτσος  
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Παναγιώτη Τσιακάρα, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Βασίλη Μποντόζογλου και Νικόλαο Ανδρίτσο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.. Ευχαριστώ όλους τους προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές του εργαστηρίου Συστημάτων Μετατροπής Ενέργειας που με βοήθησαν και ήταν παρόντες όταν είχα ανάγκη της βοήθειας τους και των συμβουλών τους για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος. Ευχαριστώ όλους τους φίλους μου για τη φιλοξενία τους κατά τους τελευταίους μήνες της εκπόνησης της εργασίας και για την ηθική υποστήριξή τους. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Ιωάννη και Ιωάννα Δόμανου για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτή την εργασία σε όσους στάθηκαν δίπλα μου με κατανόηση και μου έδωσαν δύναμη και κουράγιο όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Θωμάς Δόμανος

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ .....	1
1.2 Η ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ .....	2
1.3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	3
1.3.1 Εκτίμηση των ανανεώσιμων πόρων .....	4
1.3.2 Αιολική ενέργεια .....	5
1.3.3 Γεωθερμική ενέργεια .....	7
1.3.4 Ενέργεια από τη θάλασσα .....	7
1.3.5 Υδροηλεκτρική ενέργεια .....	8
1.3.6 Ενέργεια από τη βιομάζα .....	9
1.3.7 Πυρηνική σύντηξη .....	9
1.3.8 Ηλιακή ενέργεια .....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ II .....	14
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	14
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	14
2.2 ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ .....	15
2.2.1 Περιγραφή των βασικών μερών του φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	15
2.2.2 Ανατομία του ημιαγωγού τύπου p-n .....	17
2.2.2.1 Οι ημιαγωγοί .....	17
2.2.2.2 Νόθευση (doping) ημιαγωγού .....	19
2.2.2.3 Ημιαγωγός τύπου n .....	20
2.2.2.4 Ημιαγωγός τύπου p .....	20
2.2.2.5 Η ένωση p-n .....	21
2.2.3 Τεχνολογίες κατασκευής ημιαγωγών πυριτίου .....	24
2.2.3.1 Τεχνολογία μονοκρυσταλλικού πυριτίου .....	25
2.2.3.2 Τεχνολογία πολυκρυσταλλικού πυριτίου .....	26
2.2.3.3 Τεχνολογία άμορφου πυριτίου .....	27
2.2.3.4 Τεχνολογία μικροκρυσταλλικού πυριτίου .....	28
2.2.3.5 Τεχνολογία υλικών III-V .....	28
2.2.3.6 Τεχνολογία λεπτού υμένα (thin film) .....	29
2.3 ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ .....	29
2.3.1 Το φωτόνιο .....	29
2.3.2 Θεωρία των ενεργειακών ζωνών .....	30
2.3.3 Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας .....	32
2.3.3.1 Ημιαγωγοί άμεσου ενεργειακού χάσματος .....	33
2.3.3.2 Ημιαγωγοί έμμεσου ενεργειακού χάσματος .....	34
2.3.3.3 Δευτερεύοντες τρόποι απορρόφησης .....	35
2.3.4 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο .....	36
2.3.4.1 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος .....	38
2.3.4.2 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο με βραχυκυκλωμένα άκρα .....	39
2.3.4.3 Σύνδεση αντίστασης R (φορτίου) στα άκρα φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	40
2.3.5 Επιρροή της θερμοκρασίας στην απόδοση .....	40
2.4 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΦΩΤΟΣ .....	41
2.5 ΕΠΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ .....	43



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ .....	45
ΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ Α.Π.Ε. ΚΑΙ ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	45
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	45
3.1.1 Μείωση εξάρτησης από το πετρέλαιο .....	45
3.1.2 Μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου .....	46
3.2 ΛΕΥΚΗ ΒΙΒΛΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ Α.Π.Ε. ....	49
3.2.1 Εκστρατεία απογείωσης για τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα .....	51
3.2.2 Πρόγραμμα ενσωμάτωσης Α.Π.Ε. σε 100 κοινότητες .....	52
3.3 ΠΡΑΣΙΝΗ ΒΙΒΛΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΜΠΟΡΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ .....	53
3.4 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ ΤΩΝ Α.Π.Ε. ΣΤΗΝ Ε.Ε. ....	55
3.4.1 Προγράμματα προώθησης των Α.Π.Ε. στο παρελθόν .....	55
3.4.2 Προγράμματα προώθησης των Α.Π.Ε. σήμερα .....	56
3.4.2.1 Ένα τυπικό παράδειγμα εθνικής πολιτικής για τις Α.Π.Ε. Γερμανία και Ισπανία .....	57
3.4.2.2 Η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας .....	58
3.5 ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ...	60
3.5.1 Η πορεία προς την απελευθέρωση της ενέργειας .....	61
3.5.2 Ο νόμος απελευθέρωσης της ενέργειας .....	62
3.5.2.1 Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας .....	62
3.5.2.2 Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.) .....	63
3.5.2.3 Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.) .....	63
3.5.2.4 Κώδικας διαχείρισης του δικτύου .....	63
3.5.2.5 Αυτοπαραγωγοί και ανεξάρτητοι παραγωγοί .....	63
3.5.2.6 Διασυνδεδεμένο και μη διασυνδεδεμένο δίκτυο .....	64
3.5.3 Αδειοδότηση .....	65
3.5.4 Σύνδεση παραγωγών με το δίκτυο του Διαχειριστή .....	66
3.5.5 Τιμολόγηση ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμούς Α.Π.Ε. και επιδότησεις .....	67
3.5.5.1 Ο νόμος 3468/2006 .....	67
3.5.6 Αυτοπαραγωγή .....	69
3.5.6.1 Είδη τιμολογίων .....	69
3.6 ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΝΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 100kW .....	71
3.6.1 Προεπενδυτικές μελέτες .....	71
3.6.1.1 Οικονομοτεχνική μελέτη .....	71
3.6.1.2 Προκαταρκτικές μελέτες οικοπέδου .....	71
3.6.1.3 Τεχνικές προμελέτες εγκατάστασης .....	72
3.6.2 Ανάλυση αγοράς .....	72
3.6.3 Η Τεχνολογία .....	72
3.6.4 Ανθρώπινοι πόροι .....	73
3.6.5 Επιλογή τοποθεσίας .....	73
3.6.6 Περιληπτικό πρόγραμμα της συνολικής διαδικασίας .....	74
3.6.7 Χρόνος απόσβεσης .....	74

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV .....</b>	<b>76</b>
<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>76</b>
<b>4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>76</b>
<b>4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ.....</b>	<b>77</b>
4.2.1 Η κινητή βάση στήριξης.....	79
4.2.2 Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες.....	81
4.2.3 Πειραματική συσκευή ηλεκτρονικού φορτίου.....	82
4.2.4 Τα διαγράμματα P-V, P-I, P <sub>max</sub> -t.....	82
4.2.4.1 Το διάγραμμα P-V.....	83
4.2.4.2 Το διάγραμμα P-I.....	83
4.2.4.3 Το διάγραμμα P <sub>max</sub> -t .....	84
<b>4.3 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....</b>	<b>84</b>
<b>4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>85</b>
4.4.2 Διαδικασία των μετρήσεων.....	85
4.4.2.1 Μελέτη της επιρροής της γωνίας θέσης.....	85
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ V .....</b>	<b>128</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....</b>	<b>128</b>
5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΝΟΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ .....	128
5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	129
5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	130



# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα [6].....	6
Σχήμα 1.2: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα [6].....	6
Σχήμα 1.3: Θαλάσσιοι στρόβιλοι [6].....	8
Σχήμα 1.4: Αρχή λειτουργίας αντιδραστήρα σύντηξης [7].....	8
Σχήμα 1.5: Θερμοηλιακός σταθμός στην Πορτογαλία [8].....	10
Σχήμα 1.6: Φωτοβολταϊκά στοιχεία σε διαστημικές εφαρμογές [9].....	11
Σχήμα 1.7: Φωτοβολταϊκό πάρκο.....	12
Σχήμα 2.1: Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	15
Σχήμα 2.2: Από το στοιχείο στη συστοιχία.....	16
Σχήμα 2.3: Κατάταξη υλικών με την ειδική αντίσταση.....	17
Σχήμα 2.4: Η δομή του κρυσταλλικού πυριτίου.....	19
Σχήμα 2.5: Νόθευση με φώσφορο.....	20
Σχήμα 2.6: Νόθευση με Βόριο.....	21
Σχήμα 2.7: Αρχική Ένωση ημιαγωγών n και p.....	21
Σχήμα 2.8: Δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου.....	22
Σχήμα 2.9: Γραμμικά μεταβαλλόμενη πυκνότητα φορτίου χώρου και επαφή βαθμίδας.....	23
Σχήμα 2.10: Διάγραμμα ροής εργασιών παραγωγής ηλεκτρονικά καθαρού πυριτίου.....	25
Σχήμα 2.11: Μέθοδος Czochralski.....	25
Σχήμα 2.12: Διαδικασία παραγωγής πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	27
Σχήμα 2.13: Ζώνη σθένους – Ζώνη αγωγιμότητας.....	31
Σχήμα 2.14: Ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού κενού.....	32
Σχήμα 2.15: Ημιαγωγός έμμεσου ενεργειακού κενού.....	32
Σχήμα 2.16: Απορρόφηση φωτονίου από ημιαγωγό direct band gap.....	34
Σχήμα 2.17: Απορρόφηση φωτονίου από ημιαγωγό έμμεσου ενεργειακού κενού.....	35
Σχήμα 2.18: Δημιουργία ζευγών οπών-ηλεκτρονίων.....	37
Σχήμα 2.19: Φωτοβολταϊκό στοιχείο σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος.....	39
Εικόνα 2.20: Φωτοβολταϊκό στοιχείο με βραχυκύκλωμα.....	40

Σχήμα 2.21: Φωτοβολταϊκό στοιχείο με αντίσταση R.....	40
Σχήμα 2.22: Η ηλιακή ακτινοβολία .....	42
Σχήμα 2.23: Το ηλιακό φάσμα για $AM=0$ και $AM=1.5$ .....	43
Σχήμα 2.24: Οι παγκόσμιες προβλεπόμενες ενεργειακές απαιτήσεις [4].....	43
Σχήμα 3.1: Εξέλιξη της διεθνούς τιμής του πετρελαίου 1998-2007 .....	46
Σχήμα 3.2: Χάρτης με τις χώρες που υπέγραψαν το πρωτόκολλο του Κυότο .....	47
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα σχέσης παραγωγής κόστους φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	51
Σχήμα 4.1: Το διάγραμμα V-I.....	77
Σχήμα 4.2: Η διάταξη βολτόμετρου - αμπερόμετρου.....	78
Σχήμα 4.3: Η πειραματική διάταξη.....	78
Σχήμα 4.4: Η βάση στήριξης με προσαρμοσμένα τα πάνελ.....	79
Σχήμα 4.5: Η βάση στήριξης .....	80
Σχήμα 4.6: Το διάγραμμα P-V .....	83
Σχήμα 4.7: Το διάγραμμα P-I .....	83
Σχήμα 4.8: Το διάγραμμα $P_{max}$ -t.....	84

# ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1.1:</b> Προσέγγιση της συνολικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	5
<b>Πίνακας 2.1:</b> Μέγιστη ισχύς σε διάφορους τύπους κελιών [4].....	44
<b>Πίνακας 3.1:</b> Αγορά της φωτοβολταϊκής μεγαβατώρας (MWH) από τη Δ.Ε.Η.....	68
<b>Πίνακας 4.1:</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά των μελετούμενων Φ/Β στοιχείων.....	81
<b>Πίνακας 4.2:</b> Τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής ηλεκτρονικού φορτίου.....	82
<b>Πίνακας 4.3:</b> Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.....	85
<b>Πίνακας 4.4:</b> Γωνία θέσης των Φ/Β πλαισίων ανά ημέρα.....	86

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Τα τελευταία πενήντα χρόνια επιστήμονες σε όλο τον πλανήτη καλούνται να δώσουν λύση στο πρόβλημα της εξασφάλισης της ενέργειας που απαιτεί ο σύγχρονος τρόπος ζωής. Το ζήτημα αυτό διατυπώθηκε πρώτη φορά τη δεκαετία του 1950, και αφορούσε την εξάντληση των ορυκτών πηγών ενέργειας, που είναι άμεσα συνυφασμένη με την ρύπανση της ατμόσφαιρας και των υδάτινων πόρων. Η επιβεβαίωση των φόβων των επιστημόνων ήρθε με την ενεργειακή κρίση που αντιμετώπισαν τα ανεπτυγμένα κράτη τη δεκαετία του 1970.

Η ευημερία μιας κοινωνίας, όπως αυτή εκφράζεται από το δείκτη του κατά κεφαλήν εισοδήματος εξαρτάται άμεσα από την κατανάλωση ενέργειας. Με την είσοδο στη νέα χιλιετία, η ανθρωπότητα καλείται να αντιμετωπίσει ένα πρωτοφανές ενεργειακό αδιέξοδο. Οι απαιτήσεις για ενέργεια αυξάνονται χρόνο με το χρόνο κυρίως για τους εξής λόγους [1]:

- Ο πληθυσμός της γης είναι αυτή τη στιγμή 6 δις και αναμένεται σε λίγα χρόνια να φτάσει τα 10 δις
- Η άνοδος του βιοτικού επιπέδου θα έχει ως αποτέλεσμα ο μέσος πολίτης να καταναλώνει έμμεσα ή άμεσα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας για την κάλυψη

των αναγκών του. Εδώ πρέπει να συνυπολογιστεί το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού ζει σε χαμηλό βιοτικό επίπεδο το οποίο αναμένεται να αυξηθεί και να προσεγγίσει αυτό των ανεπτυγμένων χωρών,

- Οι αυξημένες ανάγκες των αναπτυσσόμενων χωρών σε ενέργεια (για παράδειγμα, η Κίνα κατασκευάζει εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρωχημένης τεχνολογίας από ορυκτά καύσιμα με ρυθμό 300MW την εβδομάδα)

## 1.2 Η ΡΥΠΑΝΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μέχρι σήμερα, από ορυκτούς πόρους (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.α.) κατά 87%, οδηγεί σε εξάντλησή τους μέσα στα επόμενα 100 χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, το πετρέλαιο αναμένεται να διαρκέσει για ακόμη 41 χρόνια και το φυσικό αέριο για ακόμη 65 χρόνια [1].

Επιπρόσθετα, η εκμετάλλευση των πόρων αυτών προκαλεί περίπου το 80% της ρύπανσης με σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, τις κλιματολογικές συνθήκες και την ανθρώπινη υγεία. Οι σημαντικότερες επιπτώσεις της ρύπανσης είναι:

- Φαινόμενο του θερμοκηπίου: Εμφανίζεται σε παγκόσμιο επίπεδο και προκαλεί την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γης, με αποτέλεσμα σημαντικές αλλαγές στα τοπικά καιρικά φαινόμενα, αύξηση των ακραίων φαινομένων (τυφώνες, κύματα καύσωνα, καταιγίδες, ξηρασία κ.α.), μεταβολές στα ρεύματα των ωκεανών (π.χ. το φαινόμενο El Ninio), εξαφάνιση των ειδών της χλωρίδας και της πανίδας που αδυνατούν να προσαρμοστούν στις νέες συνθήκες και άνοδο της στάθμης της θάλασσας εξαιτίας της υπερθέρμανσης των πόλων. Οφείλεται σε κάποιους ρύπους της ατμόσφαιρας που έχουν υψηλό δείκτη συγκράτησης υπέρυθρης (IR) ακτινοβολίας από τον ήλιο. Οι ρύποι που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι: το CO<sub>2</sub> που είναι προϊόν καύσης ορυκτών καυσίμων, οι υδρατμοί που αποτελούν προϊόν καύσης οργανικών ενώσεων, το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) που προκύπτει κατά 30% ως προϊόν αποσύνθεσης, την κτηνοτροφία και ως ρύπος που διαφεύγει από τη βιομηχανία, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) που αποτελεί προϊόν ατελούς καύσης και τέλος τα CFCs (χλωροφθοράνθρακες) και το όζον στην τροπόσφαιρα. Μάλιστα μερικά CFCs παρουσιάζουν 15000 φορές μεγαλύτερη συγκράτηση ακτινοβολίας από το CO<sub>2</sub>. Οι εκτιμήσεις που έχουν γίνει προβλέπουν ότι μέχρι το 2050 η θερμοκρασία παγκοσμίως θα αυξηθεί από 1,5

έως 6°C. Η αύξηση της θερμοκρασίας προβλέπεται ότι δε θα γίνει ομοιόμορφα αλλά το φαινόμενο θα παρατηρηθεί πιο έντονα στους πόλους.

- Όξινη βροχή: Είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον όξινο χαρακτήρα του νερού της ατμόσφαιρας. Πιο ακριβής είναι ο όρος ‘όξινη εναπόθεση’ (acid deposition), που χωρίζεται στην υγρή και στην αέρια. Εμφανίζεται τοπικά και είναι αποτέλεσμα αντίδρασης του διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) και των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) με το οξυγόνο και τους υδατμούς της ατμόσφαιρας. Έτσι σχηματίζονται θειικό και νιτρικό οξύ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> και HNO<sub>3</sub>) που όταν διαλυθούν στο νερό της βροχής προκαλούν καταστροφές στο έδαφος, το νερό, τα φυτά και τα κτίρια.
- Αιθαλομίχλη – Φωτοχημικό νέφος: Πρόκειται για την υποκίτρινη ομίχλη που ρυπαίνει τις μεγαλουπόλεις κυρίως τους καλοκαιρινούς και φθινοπωρινούς μήνες. Αποτελείται κυρίως από όξον το οποίο παράγεται από σύνθετες αντιδράσεις οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) με άκαυστους υδρογονάνθρακες. Προκαλεί ισχυρό ερεθισμό στα μάτια και το αναπνευστικό σύστημα.
- Ρύπανση υδάτινων πόρων: Είναι αποτέλεσμα κυρίως της βιομηχανικής δραστηριότητας και των θαλάσσιων μεταφορών. Η απελευθέρωση κάθε είδους ρύπου και η εναπόθεση θερμικού φορτίου από εναλλάκτες θερμότητας σε υδάτινους πόρους καταστρέφει την ισορροπία του υδάτινου περιβάλλοντος με συνέπειες την μείωση της βιοποικιλότητας και την αλλαγή του μικροκλίματος.

### 1.3 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται αυτές των οποίων ο ρυθμός παραγωγής είναι μεγαλύτερος ή ίσος με το ρυθμό κατανάλωσης τους [1]. Το επιστημονικό ενδιαφέρον στράφηκε σε αυτόν τον τομέα μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1979 και εξελίσσεται με γοργούς ρυθμούς μέχρι και σήμερα. Στόχος των ερευνών που διεξάγονται είναι η εξασφάλιση καθαρής ενέργειας, απαλλαγμένης από την εξάρτηση με τους εξαντλούμενους ορυκτούς πόρους και την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας από ρυπογόνες διαδικασίες. Άλλωστε η ανεξάρτηση από σπάνιους ορυκτούς πόρους, που κάθε χρόνο γίνονται ακριβότεροι, αποτελεί στόχο πολλών χωρών με πρωτοπόρο στον τομέα, τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης που τα τελευταία χρόνια δαπανούν μεγάλα ποσά για την προώθηση της. [2]



Τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών εκμεταλλεύονται δύο είδη ενέργειας.

- Την εξωγήινη, δηλαδή την ηλιακή και την ηλεκτρομαγνητική από την κίνηση των πλανητών και της σελήνης. Η σημαντικότερη εξωγήινη ενέργεια είναι η ηλιακή. Ο ήλιος παράγει 173000TW ακτινοβολίας εκ των οποίων τα 52000TW (30%) ανακλώνται στο διάστημα. Ως εξωγήινη ενέργεια χαρακτηρίζεται η ηλιακή, η αιολική (που οφείλεται σε διαφορά πιέσεων λόγω διαφορετικών θερμοκρασιών ανά περιοχή), η υδροηλεκτρική (η ροή των ποταμών οφείλεται από την εξάτμιση και τη βροχή) καθώς και η ενέργεια της θάλασσας.
- Την γήινη, δηλαδή την ενέργεια του εσωτερικού και του φλοιού της γης

Έτσι έχουν αναπτυχθεί συστήματα που εκμεταλλεύονται [4]:

- την αιολική ενέργεια, που είναι αποτέλεσμα της διαφοράς ατμοσφαιρικής πίεσης λόγω άνισης θέρμανσης των αερίων μαζών από τον ήλιο
- τη γεωθερμική ενέργεια, που προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τον πυρήνα της γης
- την ενέργεια της θάλασσας, που προέρχεται από τη μετακίνηση της θαλάσσιας μάζας εξαιτίας του βαρυτικού πεδίου της σελήνης και του ήλιου, τη θέρμανση της θάλασσας από την ηλιακή ακτινοβολία και από τα κύματα που προκαλεί ο άνεμος
- την υδροηλεκτρική ενέργεια, που παράγεται από την υδατόπτωση σε κατάλληλα σχεδιασμένους υδροστροβίλους
- την ενέργεια από τη βιομάζα, που αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια (η βιομάζα δεν αξιοποιεί τα ενεργειακά φυτά και τα απόβλητα, αυτά αποτελούν τη βιομάζα) και αποτελείται από ενεργειακά φυτά και απόβλητα υψηλής ενεργειακής αξίας
- την πυρηνική σύντηξη, που βρίσκεται σε πρώιμο ερευνητικό στάδιο και στο μέλλον θα αξιοποιεί την ενέργεια που παράγεται από τη σύντηξη ατόμων υδρογόνου σε ένα άτομο ηλίου
- την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης σε μορφή ακτινοβολίας

### 1.3.1 Εκτίμηση των ανανεώσιμων πόρων

Είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί η συνολική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας. Άλλωστε η δυνατότητα μετατροπής ενέργειας εξαρτάται άμεσα από το τεχνολογικό επίπεδο. Μια προσπάθεια προσέγγισης έγινε στην έκθεση World Energy Assessment 2003 και παρουσιάζεται παρακάτω (πίνακας 1).

**Πίνακας 1.1:** Προσέγγιση της συνολικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Πηγή	Τρέχουσα Χρήση	Τεχνικά δυνατό δυναμικό	Θεωρητικό δυναμικό
Ηλιακή	0,1	>1575	3900000
Υδροϊσχύς	9	50	147
Αιολική	10TW	640	6000
Βιομάζα	0,12	>276	2900
Γεωθερμική	0,6	5000	140000000
Ενέργεια Ωκεανών	δ.ε.	δ.ε.*	7400
Σύνολο	56	32TW	144000000

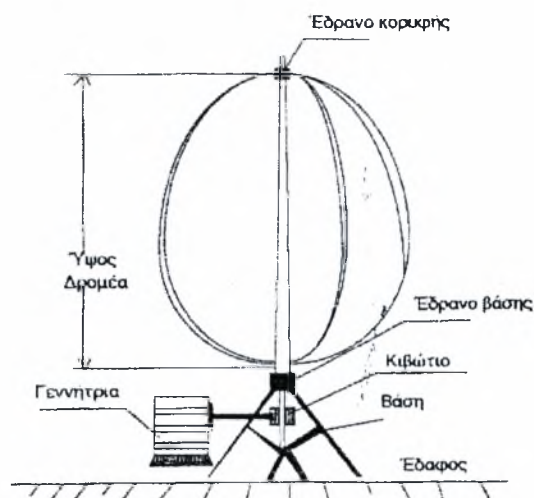
\*δ.ε.: δεν εκτιμήθηκε

### 1.3.2 Αιολική ενέργεια

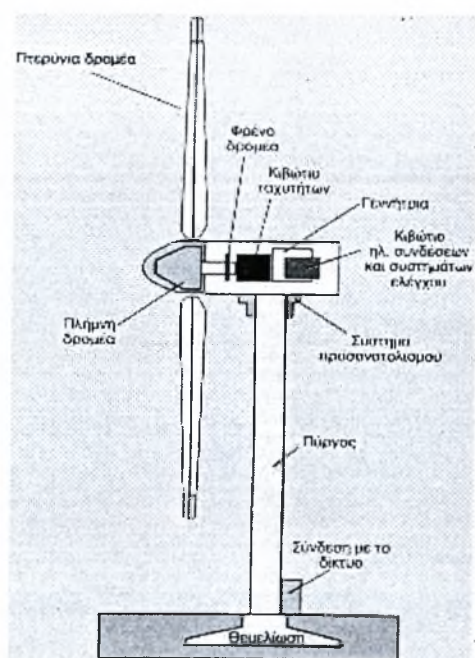
Η αιολική ενέργεια είναι αποτέλεσμα δύο παραγόντων. Της διαφορετικής γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε περιοχή της γης εξαιτίας της σφαιρικότητάς της και της διαφορετικής θερμοχωρητικότητας θάλασσας-στεριάς. Το αποτέλεσμα είναι να προκύπτει διαφορά ατμοσφαιρικής πίεσης που με τη σειρά της προκαλεί ροή αερίων μαζών. Συνολικά περίπου το 1,5% της ηλιακής ενέργειας που δέχεται η γη μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ανέμου.

Για να είναι εκμεταλλεύσιμο και οικονομικά βιώσιμο το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής θα πρέπει η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου να είναι τουλάχιστον 4 m/s. Η εκμετάλλευση αυτής της ενέργειας γίνεται με τη χρήση ανεμογεννητριών.

Αυτή τη στιγμή έχουν αναπτυχθεί δύο τύποι ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Σχήμα 2) όπου ο έλικας και η γεννήτρια αλλάζουν προσανατολισμό ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου και οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα που η γεννήτρια είναι εγκατεστημένη στη βάση της κατασκευής και λειτουργούν χωρίς να απαιτείται ο προσανατολισμός του έλικα (Σχήμα 2).



**Σχήμα 1:** Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα [6]



**Σχήμα 2:** Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα [6]

Μια ανεμογεννήτρια ανάλογα με το μέγεθός της και την ένταση του ανέμου μπορεί να παράγει ισχύ από 1 W έως μερικά kW.

Γενικά η εξέλιξη της τεχνολογίας στην ηλεκτροπαραγωγή από τον άνεμο έχει επιτρέψει την κατασκευή συστημάτων τέτοιου τύπου, ανταγωνιστικών ως προς τις κλασσικές μορφές παραγωγής ενέργειας, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται ραγδαία αιολικά πάρκα κυρίως σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό όπως τα νησιά και οι παράκτιες περιοχές της Ελλάδας.

### 1.3.3 Γεωθερμική ενέργεια

Πρόκειται για τη θερμική ενέργεια της λιθόσφαιρας της γης. Στο εσωτερικό της λιθόσφαιρας και στα στρώματα που βρίσκονται κάτω από τον γήινο φλοιό, τα πετρώματα έχουν υψηλή θερμοκρασία, η οποία αυξάνεται ανάλογα με το βάθος. Με την ηφαιστειακή δραστηριότητα και τις άλλες γεωλογικές διεργασίες, η ενέργεια μεταφέρεται στο φλοιό. Έτσι τα υπόγεια ύδατα, που είναι παγιδευμένα μέσα στα πετρώματα του φλοιού, μετατρέπονται σε θερμούς υδρατμούς. Οι υδρατμοί αυτοί έχουν υψηλή ενεργειακή αξία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη διάφορων ενεργειακών αναγκών όπως:

- Θέρμανση θερμοκηπίων και κτηνοτροφικών μονάδων
- Θέρμανση, ψύξη και παραγωγή θερμού νερού (γεωθερμική αντλία θερμότητας)
- Τηλεθέρμανση
- Ιχθυοκαλλιέργειες
- Ξήρανση αγροτικών προϊόντων
- Αφαλάτωση νερού (θαλασσινού ή γεωθερμικού)
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με εκτόνωση των υδρατμών σε ατμοστρόβιλους

Περιοχές με υψηλό γεωθερμικό δυναμικό παρουσιάζουν θερμές πηγές, σχισμές που εκτοξεύουν πίδακες υδρατμών και θερμού νερού και έντονη ηφαιστειακή δραστηριότητα. Η γεωθερμική ενέργεια είναι άφθονη στον ελληνικό χώρο και μπορεί να καλύψει μέρος των ενεργειακών αναγκών της χώρας, είναι όμως άγνωστη η επίδραση που μπορεί να έχει η εντατική εκμετάλλευση της στα οικοσυστήματα του πλανήτη.

### 1.3.4 Ενέργεια από τη θάλασσα

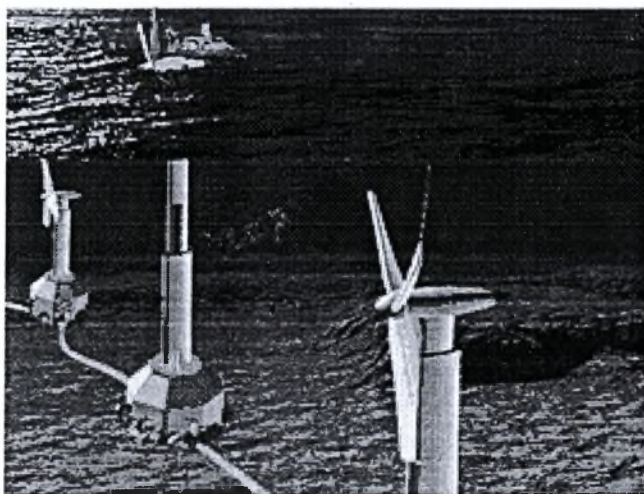
Υπάρχουν τρεις μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας στη θάλασσα

- Η ενέργεια από τα κύματα
- Η ενέργεια της παλίρροιας
- Η ενέργεια των θαλάσσιων ρευμάτων

Τα κύματα προκαλούνται από την κινητική ενέργεια των θαλάσσιων ρευμάτων και η ισχύς τους μπορεί να ξεπεράσει τα 100W ανά μέτρο κορυφής κυμάτων. Η εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων γίνεται με την κατασκευή ειδικών θαλάμων με θαλασσινό νερό του οποίου η στάθμη αυξομειώνεται ανάλογα με τον κυματισμό της θάλασσας. Η αλλαγή της στάθμης προκαλεί τη ροή του αέρα του θαλάμου, που στρέφει έναν αεροστρόβιλο συνδεδεμένο με ηλεκτρογεννήτρια.

Η παλίρροια οφείλεται στη βαρυτική επίδραση του ήλιου και της σελήνης η οποία μεταβάλλει το επίπεδο της θάλασσας. Κατάλληλα θαλάσσια φράγματα δημιουργούν υψομετρική διαφορά στα εκατέρωθεν επίπεδα της θάλασσας με αποτέλεσμα τη ροή νερού σε υδροστροβίλους και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ροή αυτή διαρκεί μόνο δέκα ώρες τη μέρα αλλά είναι απολύτως προβλέψιμη και έτσι μπορεί να γίνει ο κατάλληλος σχεδιασμός για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τις περιόδους που δεν λειτουργεί η εγκατάσταση, από άλλες πηγές.

Τέλος η ενέργεια των θαλασσιών ρευμάτων μπορεί να αξιοποιηθεί με ειδικούς θαλάσσιους στροβίλους με τρόπο λειτουργίας παραπλήσιο των ανεμογεννητριών (Σχήμα 3).



**Σχήμα 3:** Θαλάσσιοι στρόβιλοι [6]

### **1.3.5 Υδροηλεκτρική ενέργεια**

Η υδροηλεκτρική ενέργεια αφορά την αξιοποίηση της δυναμικής ενέργειας υδάτινων όγκων (ποτάμια, τεχνητές και φυσικές λίμνες). Η πτώση του νερού από μεγάλο ύψος προκαλεί την κίνηση υδροστροβίλων. Το κόστος κατασκευής των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων είναι ιδιαίτερα υψηλό αλλά τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι πολύ σημαντικά:



- Δυνατότητα αποθήκευσης του νερού και εκμετάλλευσής του σε περιόδους υψηλής ζήτησης
- Συνεχής παραγωγή ρεύματος
- Οι ηλεκτρογεννήτριες μπορούν να φτάσουν σε μέγιστη ισχύ σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα

### 1.3.6 Ενέργεια από τη βιομάζα

Η χρήση της βιομάζας εφαρμόζεται από τα αρχαία χρόνια με την καύση ξυλείας για την παραγωγή της θερμικής ενέργειας [1]. Βέβαια η καύση αυτή επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με ρύπους και συμβάλλει στην αποψίλωση των συνεχώς μειούμενων δασικών εκτάσεων.

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται πλέον για την ενεργειακή εκμετάλλευση της βιομάζας είναι:

- η καύση βιομηχανικών και αγροτικών υπολειμμάτων
- η μετατροπή κατάλληλων αμυλούχων φυτών σε αέρια, υγρά και στερεά καύσιμα με θερμοχημικές και βιοχημικές μεθόδους

Η καύση της βιομάζας παράγει διοξείδιο του άνθρακα, όμως σύμφωνα με τον ‘κύκλο του CO<sub>2</sub>’ η παραγωγή αυτή είναι σχεδόν ισοδύναμη με τη δέσμευση που γίνεται κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης στις καλλιέργειες των ενεργειακών φυτών.

Το κύριο καύσιμο που παράγεται από την επεξεργασία της βιομάζας είναι η βιοαιθανόλη, κύριες πρώτες ύλες της οποίας είναι οι ζαχαρούχες ενώσεις του ζαχαρότευτλου, του καλαμποκιού και άλλων ενεργειακών φυτών. Η βιοαιθανόλη προστίθεται στο ντίζελ και την βενζίνη με στόχο την εξοικονόμηση αυτών των μη ανανεώσιμων καυσίμων.

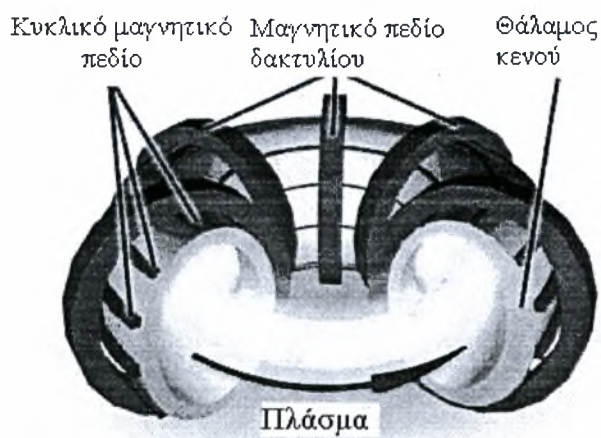
### 1.3.7 Πυρηνική σύντηξη

Η πυρηνική σύντηξη με βάση τον ορισμό δεν θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Όμως λόγω του γεγονότος ότι αποτελεί έναν ιδιαίτερα καθαρό τρόπο παραγωγής ενέργειας σε συνδυασμό με την αφθονία των καυσίμων στη φύση αξίζει να αναφερθεί ως μια σημαντική λύση για την προστασία του περιβάλλοντος [1]. Η ενέργεια αυτή προκύπτει από τη σύντηξη ατόμων υδρογόνου σε ένα άτομο ηλίου με



ταυτόχρονη απελευθέρωση τεράστιας ποσότητας ενέργειας κυρίως σε μορφή ακτινοβολίας. Η πυρηνική σύντηξη αποτελεί την πηγή ενέργειας των αστέρων.

Όλες οι μορφές υδρογόνου έχουν ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Το υδρογόνο χωρίζεται σε πρώτιο, δευτέριο και τρίτιο με κανένα, ένα και δύο νετρόνια στον πυρήνα του αντίστοιχα. Σε πειραματικές διαδικασίες χρησιμοποιούνται το δευτέριο και το τρίτιο. Για να γίνει η σύντηξη πρέπει το υδρογόνο να βρίσκεται στην φάση του πλάσματος, δηλαδή σε συνθήκες πολύ υψηλής θερμοκρασίας (της τάξης των  $10^6$  K) όπου έχει τη μορφή ηλεκτρικά φορτισμένου υπέρθερμου αερίου. Το πλάσμα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας είναι αδύνατον να τοποθετηθεί σε συμβατικούς αντιδραστήρες και έτσι συγκρατείται σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο που το εγκλωβίζει σε σπειροειδείς εγκαταστάσεις (Σχήμα 4).



**Σχήμα 4:** Αρχή λειτουργίας αντιδραστήρα σύντηξης [7]

Κατά τη σύντηξη ενός δευτέρου με ένα τρίτιο προκύπτει ένα τεράστιο ποσό ενέργειας. Το δευτέριο παράγεται από το νερό και το τρίτιο από το λίθιο που είναι άφθονο στη φύση. Απαιτούνται 500 λίτρα νερού για την παραγωγή 10 gr δευτέρου και 30 gr λίθιου για την παραγωγή 15 gr τρίτιου, ποσότητες που είναι ικανές να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες ενός ατόμου του ανεπτυγμένου κόσμου για όλη του τη ζωή. Η ελεγχόμενη σύντηξη βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο και θα χρειαστούν 50 με 100 χρόνια για βιομηχανικές εφαρμογές.

Τα πλεονεκτήματα της πυρηνικής σύντηξης είναι:

- Άφθονες ποσότητες καυσίμου (νερό, λίθιο) στη φύση, πρακτικά ανεξάντλητες
- Υψηλός δείκτης ασφάλειας, σε αντίθεση με την πυρηνική σχάση
- Το προϊόν της σύντηξης είναι το ήλιο, αβλαβές για το οικοσύστημα

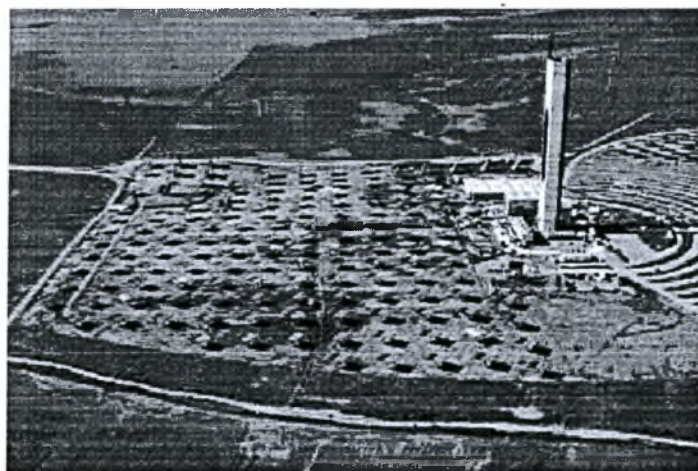
- Αν και η διαδικασία είναι ραδιενεργή, τα ραδιενεργά κατάλοιπα εξαφανίζονται σε πενήντα χρόνια από την παύση της σύντηξης σε αντίθεση με τα κατάλοιπα της πυρηνικής σχάσης που διαρκούν για χιλιάδες χρόνια
- Δεν υπάρχει παραγωγή CO<sub>2</sub> και άλλων ρύπων

### 1.3.8 Ηλιακή ενέργεια

Ο ήλιος παράγει ενέργεια με πυρηνική σύντηξη. Η ενέργεια αυτή ταξιδεύει ως τη γη με μορφή ακτινοβολίας. Σε υψόμετρο 0 m και όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο του ουρανού η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι περίπου 1000W/m<sup>2</sup>. Στην ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας οφείλεται η ροή των υδάτων, τα καιρικά φαινόμενα, οι άνεμοι και η ανάπτυξη της ζωής στον πλανήτη. Η αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται με τους εξής κυρίως τρόπους:

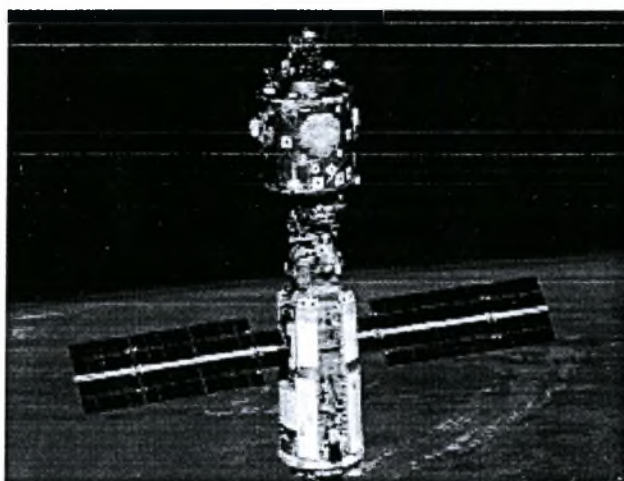
- Μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα
- φωτοηλεκτρικές μέθοδοι
- φωτοκαταλυτικές μέθοδοι
- παθητικά συστήματα θέρμανσης

Εφαρμογές μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα είναι η χρήση θερμοσιφώνων για τη θέρμανση του νερού και η κατασκευή θερμοηλιακών σταθμών. Στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς υπάρχει μια εγκατάσταση κατόπτρων που συγκεντρώνει την ακτινοβολία σε έναν θερμαντήρα νερού για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Ο υπέρθερμος ατμός με τη σειρά του μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να θέσει σε λειτουργία π.χ έναν ατμοστρόβιλο (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Θερμοηλιακός σταθμός στην Πορτογαλία [8]

Επίσης, μια διαδεδομένη φωτοηλεκτρική μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απ' ευθείας από τον ήλιο, που θα αποτελέσει και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής, είναι η χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων, που βασίζονται στην ικανότητα κάποιων ημιαγωγών να δημιουργούν διαφορά δυναμικού όταν προσπίπτει επάνω τους ακτινοβολία. Η μέθοδος αυτή είναι 'καθαρή' δηλαδή δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με ρύπους. Οι πρώτες εφαρμογές εμφανίστηκαν με την ανάπτυξη της αεροδιαστημικής (Σχήμα 6), όπου φωτοβολταϊκές διατάξεις τροφοδοτούσαν με ενέργεια δορυφόρους και επανδρωμένα διαστημικά σκάφη.



**Σχήμα 6:** Φωτοβολταϊκά στοιχεία σε διαστημικές εφαρμογές [9]

Το ρεύμα που παράγεται με τη μέθοδο αυτή είναι συνεχές και απαιτείται η εγκατάσταση μετατροπέα (inverter) που το μετασχηματίζει σε 220V AC ώστε να μπορεί να μεταφερθεί από το δίκτυο ηλεκτροδότησης και να χρησιμοποιηθεί από οικιακές συσκευές .



**Σχήμα 7:** Φωτοβολταϊκό πάρκο

Η τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρισμού από φωτοβολταϊκά στοιχεία τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να ωριμάζει και σε συνδυασμό με την ανάγκη για

εξασφάλιση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θεωρείται πλέον επίκαιρη και με υψηλό επενδυτικό ενδιαφέρον. Με βάση το πρωτόκολλο του Κιότο τα κράτη μέλη της Ε.Ε. υποχρεούνται να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων τα επόμενα χρόνια και να εξασφαλίσουν ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές κυρίως από την αιολική και την ηλιακή [5].

Στην Ελλάδα έχουν θεσμοθετηθεί μια σειρά από διατάξεις που δίνουν οικονομικά κίνητρα σε ιδιώτες που ενδιαφέρονται για την ανάπτυξη ηλιακών πάρκων (solar plants, Σχήμα 7) με βιώσιμο χαρακτήρα και αναμένεται η εγκατάσταση πάρκων αρκετών Mw.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ν. Ανδρίτσος, 'Ενέργεια και περιβάλλον', σημειώσεις Π.Θ.
- [2] 'Πράσινη Βίβλος, Ευρωπαϊκή στρατηγική για αειφόρο, ανταγωνιστική και ασφαλή ενέργεια' 2006
- [3] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.) 'Οδηγός τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ'
- [4] [www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov)
- [5] [ec.europa.eu/energy/res](http://ec.europa.eu/energy/res)
- [6] [www.dpa.unina.it](http://www.dpa.unina.it)
- [7] [science.howstuffworks.com](http://science.howstuffworks.com)
- [8] [www.mymethana.gr/?q=node/180](http://www.mymethana.gr/?q=node/180)
- [9] [www.nasa.gov/topics/shuttle\\_station/](http://www.nasa.gov/topics/shuttle_station/)

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ II

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

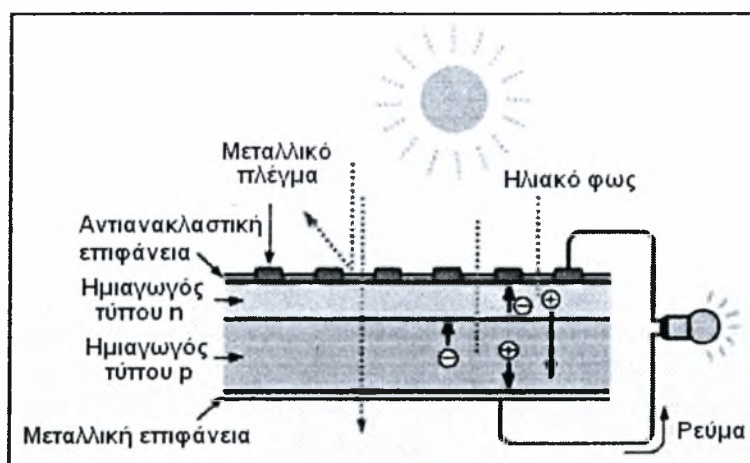
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά στην ανατομία και στη φυσιολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αρχικά παρουσιάζεται η ανατομία, δηλαδή η δομή και τα βασικά μέρη ενός τυπικού φωτοβολταϊκού στοιχείου. Στη συνέχεια, γίνεται εμβάθυνση στους ημιαγωγούς πυριτίου που αποτελούν τον «πυρήνα» του φωτοβολταϊκού στοιχείου και αναφέρονται θεμελιώδεις ιδιότητες τους όπως επίσης γίνεται αναφορά και στους ημιαγωγούς τύπου p-n (p-n junction). Ακολουθεί η φυσιολογία, δηλαδή η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η περιγραφή του τρόπου που μετατρέπεται η ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και οι φυσικοί νόμοι που διέπουν τη διεργασία αυτή. Τέλος γίνεται αναφορά στη φύση του ηλιακού φωτός και στην επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου, παράγοντες που επηρεάζουν ιδιαίτερα τη λειτουργία και την απόδοση.



## 2.2 ΑΝΑΤΟΜΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

### 2.2.1 Περιγραφή των βασικών μερών του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ημιαγωγών μπορούν να θεωρηθούν σχετικά απλές συσκευές. Αποτελούνται από ειδικά σχεδιασμένους ημιαγωγούς που έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, τέτοιας μορφής που να μπορεί να συλλεχθεί και να αξιοποιηθεί. Τα κύρια μέρη ενός τυπικού φωτοβολταϊκού κελιού που φαίνονται στο Σχήμα 2.1 συνοψίζονται στα:

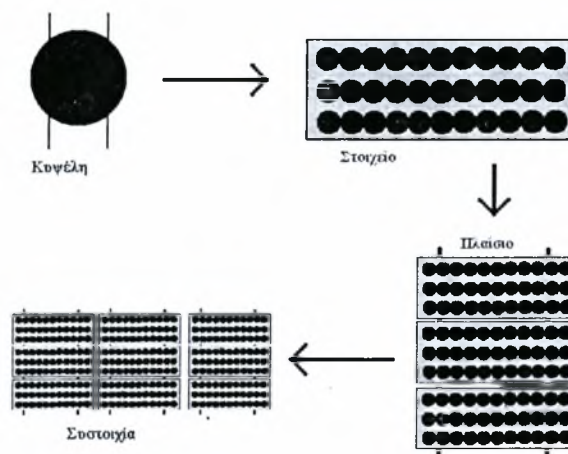


**Σχήμα 2.1:** Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο

- Ημιαγωγός τύπου n και ημιαγωγός τύπου p: Γίνεται συνδυασμός αυτών των δύο τύπων ημιαγωγού για τη δημιουργία της ένωσης p-n. Η ένωση αυτή έχει την ιδιότητα να απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και να μετατρέπει μέρος αυτής σε ηλεκτρικό ρεύμα. Οι αρχές λειτουργίας της παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.
- Μεταλλικό πλέγμα: Αποτελεί τον αρνητικό πόλο του στοιχείου. Έχει τη μορφή πλέγματος για να επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέρχεται ανεμπόδιστα στον ημιαγωγό.
- Μεταλλική επιφάνεια: Αποτελεί το θετικό πόλο του στοιχείου
- Αντιανακλαστική επιφάνεια: Η επιφάνεια αυτή έχει την ιδιότητα να μειώνει την αντανακλούμενη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό

Το ηλιακό φως προσπίπτει στην επάνω επιφάνεια του στοιχείου. Ένα λεπτό μεταλλικό πλέγμα σχεδιασμένο ώστε να επιτρέπει στο φως να προσπίπτει πάνω στον ημιαγωγό και μια μεταλλική επιφάνεια στο κάτω μέρος του συστήματος αποτελούν τις δύο ηλεκτρικές επαφές της διόδου στις οποίες αναπτύσσεται η επιθυμητή διαφορά δυναμικού για την παραγωγή ρεύματος. Μέρος του φάσματος της ακτινοβολίας, με κατάλληλα μήκη κύματος, διεγείρει τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού δημιουργώντας ελεύθερα ηλεκτρόνια και θετικές οπές ( η έννοια των θετικών οπών θα εξηγηθεί παρακάτω). Τελικό αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία διαφοράς δυναμικού στους πόλους του στοιχείου. Αν οι δύο πόλοι συνδεθούν με ένα εξωτερικό κύκλωμα προκύπτει ροή ηλεκτρονίων, δηλαδή παράγεται εκμεταλλεύσιμο ηλεκτρικό ρεύμα. Μια λεπτή επιφάνεια από κατάλληλο υλικό που έχει την ιδιότητα να μειώνει την αντανάκλαση και βρίσκεται ακριβώς κάτω από το πλέγμα, αυξάνει την ποσότητα ηλιακού φωτός που απορροφάται από τον ημιαγωγό.

Για την παραγωγή μεγαλύτερων τιμών ηλεκτρικής ισχύος συνδέονται πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά ή παράλληλα και δημιουργούνται συστοιχίες (Σχήμα 2.2).



**Σχήμα 2.2:** Από το στοιχείο στη συστοιχία

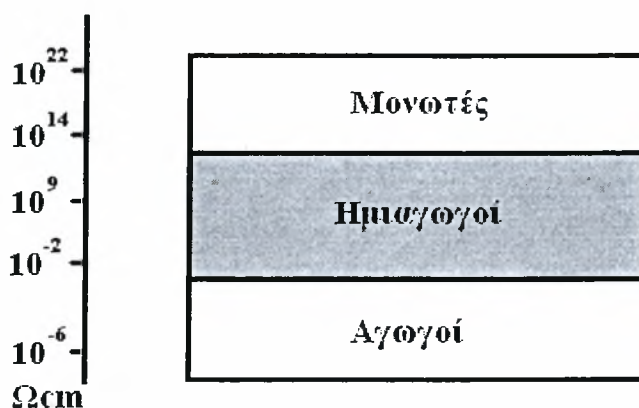
Η διάταξη αυτή για να προστατεύεται από την υγρασία, τη σκόνη και άλλους εξωγενείς παράγοντες τοποθετείται μεταξύ δύο πλακών. Η επάνω πλάκα, είναι κατασκευασμένη από διάφανο συνθετικό υλικό που επιτρέπει ανεμπόδιστα τη διέλευση του φωτός ενώ η κάτω πλάκα αποτελεί τον κύριο φορέα στήριξης του συστήματος και είναι συνήθως κατασκευασμένη από αδιαφανές συνθετικό υλικό.

## 2.2.2 Ανατομία του ημιαγωγού τύπου p-n

Όπως προαναφέρθηκε, ο «πυρήνας» ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι μια ένωση ημιαγωγών p-n. Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται αρχικά η έννοια του ημιαγωγού. Έπειτα περιγράφονται οι ιδιότητες του πυριτίου, που είναι και ο πιο διαδεδομένος ημιαγωγός για φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Τέλος, παρουσιάζεται ο ημιαγωγός τύπου p-n, οι ιδιότητες του και οι αρχές λειτουργίας του.

### 2.2.2.1 Οι ημιαγωγοί

Ένας χημικά καθαρός, κρυσταλλικός ημιαγωγός, ονομάζεται ενδογενής (intrinsic). Μπορεί να συνίσταται από ένα χημικό στοιχείο (πυρίτιο Si, Γερμάνιο Ge) ή περισσότερα στοιχεία (αρσενικούχο γάλλιο GaAs). Διακρίνεται από τα μέταλλα και τους μονωτές, με βασικό κριτήριο την τυπική ηλεκτρική του συμπεριφορά. Σε κανονικές συνθήκες, οι μονωτές πρακτικά δεν άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα, γεγονός που οφείλεται στην τεράστια ειδική τους αντίσταση, η οποία κυμαίνεται από  $10^{14}$  έως  $10^{22} \Omega\text{cm}$ . Αντίθετα, τα μέταλλα, ως καλοί αγωγοί του ηλεκτρικού ρεύματος, έχουν ειδική αντίσταση της τάξης των  $10^{-6} \Omega\text{cm}$ . Οι ημιαγωγοί αποτελούν μία ενδιάμεση κατηγορία αγωγών με ειδική αντίσταση στην περιοχή  $10^{-2}$  έως  $10^9 \Omega\text{cm}$ , ανάλογα με τη χημική τους σύνθεση (Σχήμα 2.3). Διακρίνονται σε ενδογενείς ημιαγωγούς, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από την ίδια στοιχειακή σύνθεση, σε όλη την έκτασή τους και σε ημιαγωγούς προσμίξεων. Οι τελευταίοι δημιουργούνται αν ένας ενδογενής ημιαγωγός εμποτιστεί, με κατάλληλο τρόπο, με άτομα άλλου στοιχείου και οι οποίοι αποδεικνύονται εξαιρετικά σημαντικοί για τη σύγχρονη τεχνολογία [1].



Σχήμα 2.3: Κατάταξη υλικών με την ειδική αντίσταση

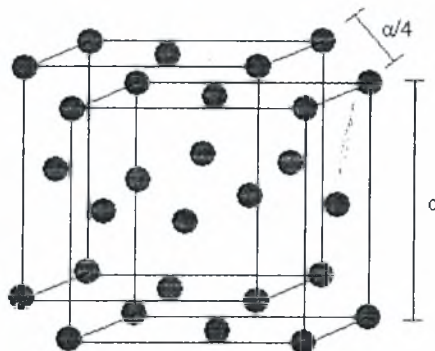
Χαρακτηριστικό των ενδογενών ημιαγωγών είναι ότι, όταν η θερμοκρασία τους αυξάνεται, η ηλεκτρική τους αντίσταση μειώνεται δραματικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη θέρμανση του υλικού, το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων αυξάνεται, ενισχύοντας την αγωγιμότητά του. Στους ημιαγωγούς πρόσμιξης αντίθετα, η αύξηση της θερμοκρασίας, σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες, δεν τροποποιεί αισθητά την αγωγιμότητά τους. Αυτό είναι συνέπεια της υψηλής, σχετικά, αγωγιμότητάς τους, εξαιτίας του ιονισμού των ατόμων πρόσμιξης στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Η αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω ιονισμού των ατόμων του κύριου συστατικού του ημιαγωγού, είναι πρακτικά ασήμαντη, σε σύγκριση με τους φορείς που προέρχονται από τον ιονισμό των ατόμων πρόσμιξης. Σε υψηλές θερμοκρασίες εμφανίζουν και αυτοί συμπεριφορά ενδογενούς ημιαγωγού. Αυτό συμβαίνει όταν το πλήθος των φορέων από τον ιονισμό των ατόμων του κύριου υλικού γίνει συγκρίσιμο με αυτό των ατόμων πρόσμιξης. Στα μέταλλα η αύξηση της θερμοκρασίας δεν προκαλεί αντίστοιχη αύξηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, ενώ αντίθετα, η ηλεκτρική αντίστασή τους αυξάνεται χαρακτηριστικά.

Οι ημιαγωγοί αποτελούν υλικά στερεάς κατάστασης. Σε ατομικό επίπεδο, η δομή των ημιαγωγών είναι κρυσταλλική. Κρυσταλλική λέγεται η δομή ενός υλικού, όταν τα άτομά του είναι διατεταγμένα σε συμμετρική περιοδική δομή. Αυτή η περιοδικότητα σε συνδυασμό με τις ατομικές ιδιότητες των στοιχείων προσδίδει στους ημιαγωγούς τις χρήσιμες φυσικές και κατ' επέκταση ηλεκτρονικές τους ιδιότητες.

Κάθε κρυσταλλικό πλέγμα χαρακτηρίζεται από έναν επαναλαμβανόμενο σχηματισμό ατομικών θέσεων που εκτείνεται σε όλο το μήκος του. Υπάρχουν συνολικά 14 τύποι γενικών σχηματισμών [1]. Οι πιο συνηθισμένοι είναι οι εξής:

- Το απλό κυβικό πλέγμα (sc), που έχει σε κάθε κορυφή ενός κύβου από μία πλεγματική θέση
- Το εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα (fcc), που είναι όπως το απλό κυβικό αλλά με μία επιπλέον πλεγματική θέση στο κέντρο κάθε έδρας του κύβου
- Το χωροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα (bcc), που είναι όπως το απλό κυβικό αλλά με μία επιπλέον πλεγματική θέση στο κέντρο του κύβου
- Το πυκνοδομημένο εξαγωνικό πλέγμα, που αποτελείται από στρώσεις πλεγματικών θέσεων σε εξαγωνικούς σχηματισμούς
- Η δομή του αδάμαντα. Ονομάζεται έτσι γιατί είναι η δομή του αδάμαντα καθώς και όλων των στοιχείων της ομάδας IV του περιοδικού πίνακα. Το πλέγμα αυτό

είναι εδροκεντρομένο κυβικό (fcc). Η βάση αποτελείται από ένα άτομο σε κάθε πλεγματική θέση κι ένα δεύτερο άτομο μετατοπισμένο στη διεύθυνση της διαγωνίου του κύβου κατά το ένα τέταρτο του μήκους αυτής. Η δομή φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



**Σχήμα 2.4:** Η δομή του κρυσταλλικού πυριτίου

Το πυρίτιο, που είναι ο πιο διαδεδομένος ημιαγωγός, έχει κρυσταλλική δομή αδάμαντα. Ανήκει στην IV ομάδα του περιοδικού πίνακα των στοιχείων και αυτό σημαίνει ότι έχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Τα ηλεκτρόνια σθένους σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς με ηλεκτρόνια σθένους γειτονικών ατόμων. Έτσι τα άτομα σχηματίζουν μεταξύ τους ένα πλέγμα ομοιοπολικών δεσμών με τετραεδρική δομή (τέσσερις δεσμοί από κάθε άτομο που η μεταξύ τους γωνία είναι  $109.5^\circ$  - δομή αδάμαντα). Αυτή η δομή προκύπτει με το συνδυασμό 2 κυβικών ολοεδρικά κεντρωμένων μοναδιαίων κυψελίδων (fcc). Παρόμοια δομή έχουν και οι ημιαγωγοί συνδυασμού στοιχείων των ομάδων III και V και II με VI του περιοδικού πίνακα, όπως οι GaAs (συνδυασμός III-V) και CdTe (συνδυασμός II-VI).

Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι μονωτής του ηλεκτρισμού διότι κανένα ηλεκτρόνιο δεν είναι ελεύθερο να κινηθεί, όπως γίνεται στους καλούς αγωγούς. Οι ιδιότητες και η αγωγιμότητα του πυριτίου μπορεί να αλλάξει αν εισαχθούν στο πλέγμα του μικρές ποσότητες στοιχείων από άλλες ομάδες. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται νόθευση (doping) [1].

#### **2.2.2.2 Νόθευση (doping) ημιαγωγού**

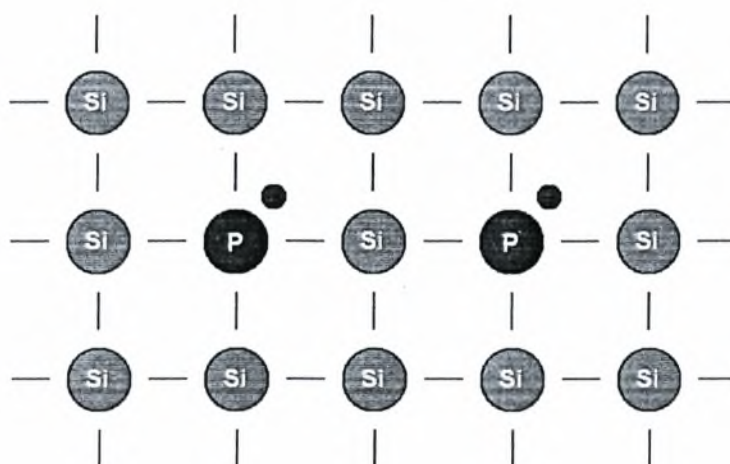
Η συγκέντρωση των φορέων ηλεκτρικής ενέργειας στους καθαρούς ημιαγωγούς είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα τα συγκεκριμένα υλικά να λειτουργούν περισσότερο ως μονωτές παρά ως αγωγοί και να μην είναι χρήσιμοι σε αυτή τη



μορφή στην ηλεκτρονική τεχνολογία [2]. Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών και κατ' επέκταση η αγωγιμότητα του ημιαγωγού μπορεί να ρυθμιστεί με την εισαγωγή συγκεκριμένων στοιχείων που χαρακτηρίζονται ως «δότες» και «λήπτες» (donors και acceptors). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται νόθευση.

### 2.2.2.3 Ημιαγωγός τύπου *n*

Όταν το πυρίτιο νοθευτεί για παράδειγμα με φώσφορο (donor), στη ζώνη αγωγιμότητας προστίθεται ένα ηλεκτρόνιο για κάθε άτομο φωσφόρου. Ο φώσφορος ανήκει στην ομάδα V του περιοδικού πίνακα των στοιχείων και αυτό σημαίνει ότι έχει 5 ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους. Τα τέσσερα από αυτά σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα άτομα πυριτίου του πλέγματος και το ένα που περισσεύει παίρνει θέση στη ζώνη αγωγιμότητας (Σχήμα 2.5) [2].

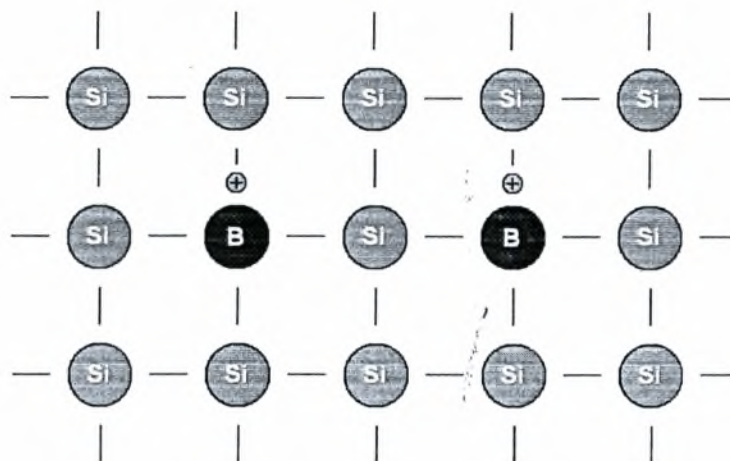


Σχήμα 2.5: Νόθευση με φώσφορο

### 2.2.2.4 Ημιαγωγός τύπου *p*

Όταν το πυρίτιο νοθευτεί με βόριο (acceptor), δημιουργείται μια οπή για κάθε άτομο βορίου που προστίθεται. Το βόριο ανήκει στην ομάδα III του περιοδικού πίνακα και έχει τρία ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους. Κατά συνέπεια, κάθε άτομο βορίου λαμβάνει ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους του πυριτίου και δημιουργείται μια θετικά φορτισμένη οπή (Σχήμα 2.6) [2].





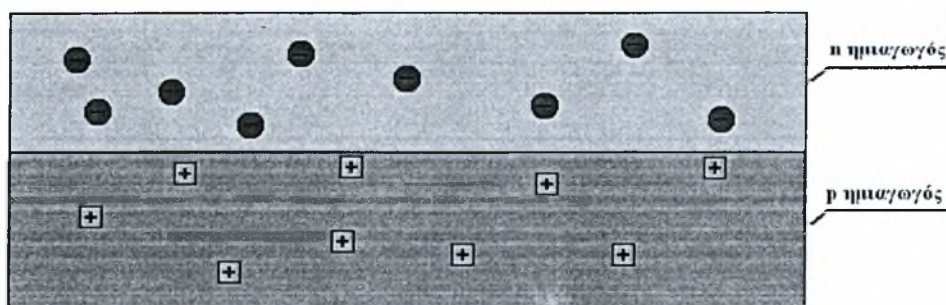
Σχήμα 2.6: Νόθευση με Βόριο

#### 2.2.2.5 Η ένωση p-n

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται αναλυτικά τι συμβαίνει όταν έρχονται σε επαφή ένας ημιαγωγός τύπου n με έναν ημιαγωγό τύπου p.

Όταν δύο σώματα έλθουν σε στενή επαφή μεταξύ τους, αναπτύσσεται σε αυτά μια δύναμη, η οποία ονομάζεται τάση επαφής. Η τάση αυτή οφείλεται στο πέρασμα των ηλεκτρονίων από το ένα σώμα στο άλλο, εξ' αιτίας της τάσης των φορέων να περάσουν σε χώρο όπου η συγκέντρωσή τους είναι μικρότερη (διάχυση). Λόγω της μετακίνησης αυτής, η ηλεκτρική ουδετερότητα της περιοχής παύει να υφίσταται, διότι παραμένουν ακάλυπτα ιόντα.

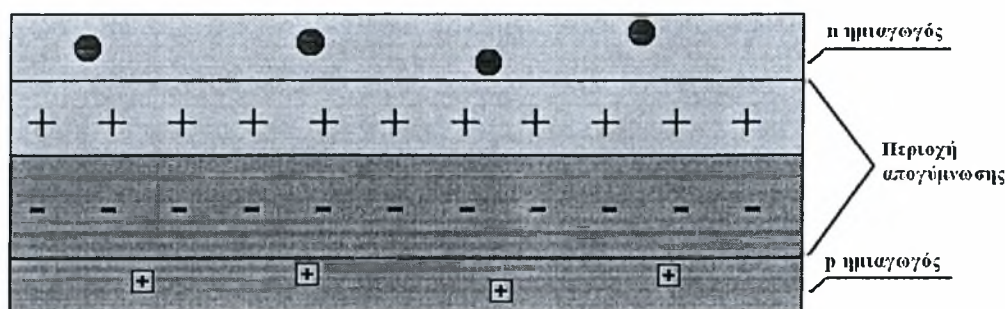
Στην περίπτωση που δυο ημιαγωγοί έρχονται σε επαφή, ανάμεσά τους δημιουργείται μια περιοχή απογυμνωμένη από ηλεκτρικούς φορείς, η οποία ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης (Σχήμα 2.7) [2] [3].



Σχήμα 2.7: Αρχική Ένωση ημιαγωγών n και p.

Όταν δημιουργηθεί μια επαφή p-n, κάποια από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του n-ημιαγωγού που βρίσκονται κοντά στο σημείο επαφής μεταβαίνουν μέσω του

μηχανισμού της διάχυσης στον ημιαγωγό τύπου p. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην περιοχή του n-ημιαγωγού, κοντά στην επαφή, να παρουσιάζεται έλλειψη ηλεκτρονίων και να δημιουργούνται θετικά φορτισμένα ιόντα. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει πλέον ηλεκτρική ουδετερότητα και η περιοχή φορτίζεται θετικά. Αντίστοιχα, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του p-ημιαγωγού κοντά στην ένωση, διαχέονται προς τον ημιαγωγό τύπου n δημιουργώντας αρνητικά ιόντα. Η κίνηση των φορέων με αυτό τον τρόπο ονομάζεται ρεύμα διάχυσης. Ως αποτέλεσμα, στο εσωτερικό του ημιαγωγού δημιουργείται μια περιοχή απογύμνωσης (Σχήμα 2.8). Εξαιτίας των ιόντων, προκύπτει ένα ισχυρό εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο ( $V_{bi}$  -  $V_{built\ in}$ ). Το πεδίο αυτό μεγαλώνει όσο συνεχίζεται η διάχυση των φορέων και δρα ανασταλτικά στην κίνησή τους, υποχρεώνοντάς τους να κινηθούν προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα ολίσθησης. Σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, το ρεύμα διάχυσης είναι ίσο και αντίθετο με το ρεύμα ολίσθησης. Το ηλεκτρικό πεδίο βρίσκεται μεταξύ 0,5 V και 1 V, και εξαρτάται από το ζεύγος των υλικών και τη θερμοκρασία [2].

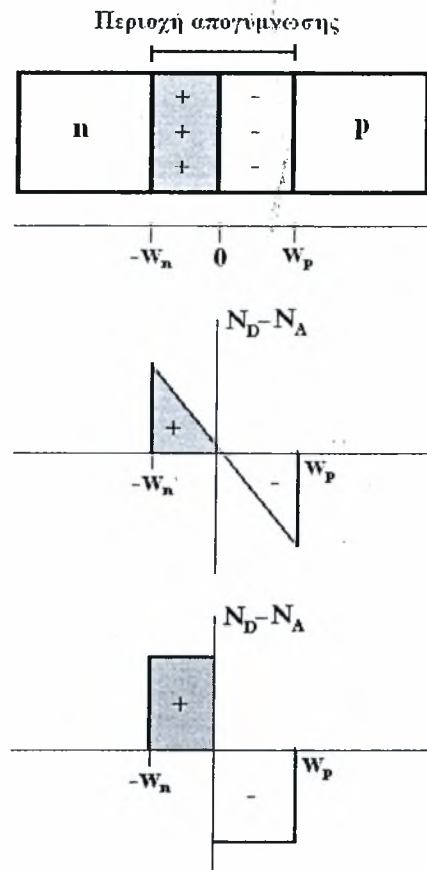


**Σχήμα 2.8:** Δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου

Το συνολικό μήκος της περιοχής απογύμνωσης συμβολίζεται με  $w$  και αποτελείται από δύο επιμέρους μήκη. Το  $w_p$  που είναι το μήκος απογύμνωσης στον p ημιαγωγό και το  $w_n$  που είναι το μήκος απογύμνωσης στον n ημιαγωγό. Το συνολικό μήκος  $w = w_p + w_n$  κυμαίνεται από κλάσματα του μm, μέχρι αρκετές δεκάδες μm και εξαρτάται από το υλικό, την πυκνότητα των προσμίξεων και την εφαρμοζόμενη τάση (Σχήμα 2.9).

Η κατανομή των φορτίων που υπάρχουν στην περιοχή απογύμνωσης προσεγγίζεται με δύο χαρακτηριστικές συναρτήσεις κατανομής της πυκνότητάς τους [2] [3]. Στη μία περίπτωση περιγράφεται με γραμμικά μεταβαλλόμενη πυκνότητα, σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της επαφής ενώ στη δεύτερη, η κατανομή περιγράφεται από τη βαθμίδα πυκνότητας. Σε αυτή την περίπτωση, η πυκνότητα του

φορτίου παραμένει σταθερή στα δύο τμήματα δεξιά και αριστερά της επαφής. Συγκεκριμένα, είναι θετική στην περιοχή του δότη και αρνητική στην περιοχή του αποδέκτη, εμφανίζοντας απότομη αλλαγή στην επιφάνεια επαφής.



**Σχήμα 2.9:** Γραμμικά μεταβαλλόμενη πυκνότητα φορτίου χώρου και επαφή βαθμίδας

Χρησιμοποιώντας τη δεύτερη περίπτωση, που είναι και απλούστερη παρουσιάζεται παρακάτω μια προσέγγιση του φαινομένου. Τα ιοντικά φορτία στην απογυμνωμένη περιοχή του n ημιαγωγού έχουν σταθερή πυκνότητα ίση με τη συγκέντρωση των δοτών  $N_D$  και στην απογυμνωμένη περιοχή του p ημιαγωγού ίση με τη συγκέντρωση των αποδεκτών  $N_A$ . Έτσι το συνολικό εύρος, απουσία εξωτερικά εφαρμοζόμενης τάσης είναι

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}} \quad (2.1)$$

όπου  $\epsilon$ , είναι η διηλεκτρική σταθερά του υλικού,  $\epsilon_0$ , η διηλεκτρική σταθερά του κενού και  $q$ , η σπόλυτη τιμή του φορτίου του ηλεκτρονίου [2].

Το πεδίο αυτό αξιοποιείται από τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία για την δημιουργία κατευθυνόμενης κίνησης των διεγερμένων ηλεκτρονίων και των θετικών

οπών με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Η διαδικασία αυτή θα αναλυθεί στην παράγραφο 2.3.

### 2.2.3 Τεχνολογίες κατασκευής ημιαγωγών πυριτίου

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για απ' ευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κύριες διαφοροποιήσεις που εμφανίζουν μεταξύ τους είναι τα υλικά κατασκευής και κατ' επέκταση το κόστος και η απόδοσή τους. Ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα υλικά υπάρχουν οι εξής κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων [3]:

- μονοκρυσταλλικού πυριτίου
- πολυκρυσταλλικού πυριτίου
- μικροκρυσταλλικού (microcrystalline) πυριτίου
- άμορφου πυριτίου
- πυριτίου λεπτού υμένα
- στοιχείων III-V

Βέβαια η συνολική ισχύς που μπορεί να εγκατασταθεί από κάθε τύπο, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των υλικών.

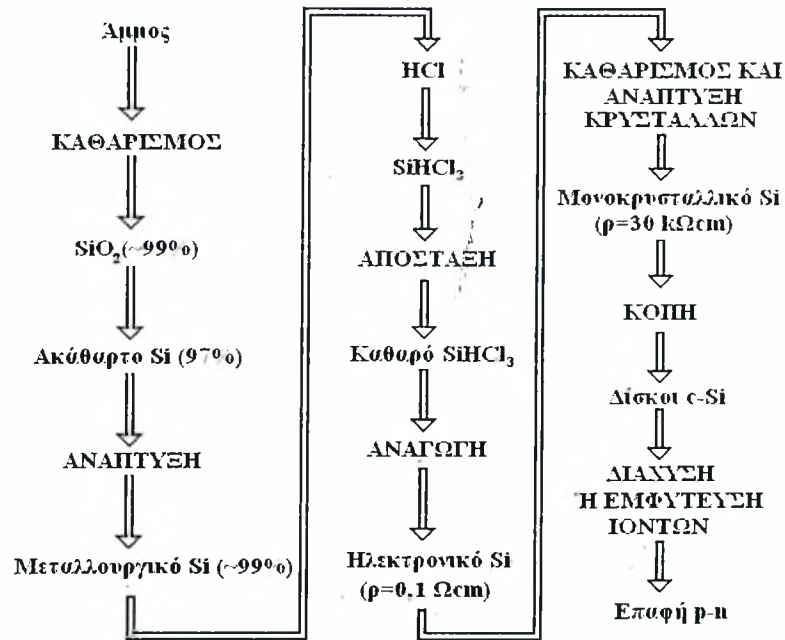
Η διαδικασία δημιουργίας μιας ένωσης p-n συνοψίζεται σε τρία βασικά βήματα:

- προετοιμασία του βασικού υλικού (του ενδογενούς ημιαγωγού)
- παρασκευή των δύο τμημάτων ημιαγωγού με προσμίξεις τύπου p και n
- συνένωση των δύο τμημάτων

Στην πράξη, παρασκευάζεται αρχικά ο ένας εκ των δύο ημιαγωγών πρόσμιξης, συνήθως ο ημιαγωγός τύπου p. Ο ημιαγωγός αυτός προκύπτει από τον ενδογενή ημιαγωγό (πυρίτιο, γερμάνιο), με την προσθήκη πρόσμιξης στοιχείου από την ομάδα των αποδεκτών. Στη συνέχεια, δημιουργείται, με κάποια από τις μεθόδους, που περιγράφονται παρακάτω, η περιοχή τύπου n, με προσθήκη στοιχείου από την ομάδα των δωτών. Ως δότες χρησιμοποιούνται συνήθως το λίθιο Li, ο φώσφορος P, το αρσενικό As, το αντιμόνιο Sb, το βισμούθιο Bi και ως αποδέκτες το βόριο B, το αλουμίνιο Al, το γάλλιο Ga, το ίνδιο In κ.α.[3].

Το πυρίτιο είναι από τα πλέον διαδεδομένα στοιχεία στη φύση (αποτελεί το 28% του φλοιού της γης) και συναντάται με τη μορφή διάφορων ενώσεών του. Το οξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) αποτελεί το κύριο συστατικό της άμμου. Στο σχήμα

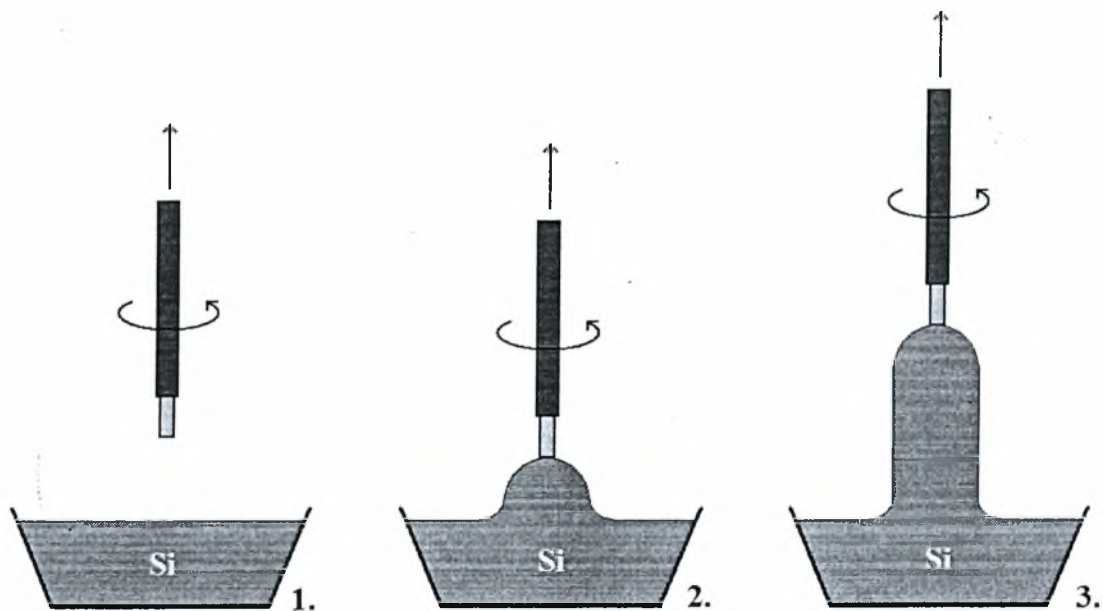
2.10 παρουσιάζονται τα βασικά στάδια παραγωγής καθαρού πυριτίου, με πρώτη ύλη την άμμο [2].



Σχήμα 2.10: Διάγραμμα ροής εργασιών παραγωγής ηλεκτρονικά καθαρού πυριτίου

### 2.2.3.1 Τεχνολογία μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Για την κατασκευή ημιαγωγών μονοκρυσταλλικού πυριτίου χρησιμοποιείται η ακόλουθη διαδικασία [2] [4]. Αρχικά παράγονται ράβδοι μονοκρυσταλλικού πυριτίου με τη μέθοδο Czochralski που φαίνεται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Μέθοδος Czochralski



Το πυρίτιο μαζί με την επιθυμητή πρόσμιξη (π.χ. βόριο) βρίσκεται τηγμένο σε μία ειδική λεκάνη. Στο άκρο ενός κατάλληλου άξονα τοποθετείται ένας μικρός κύλινδρος από κρυσταλλικό πυρίτιο. Ο κύλινδρος αυτός έρχεται αρχικά σε επαφή με την επιφάνεια του τηγμένου μίγματος και αρχίζει να περιστρέφεται και να ανυψώνεται. Λόγω τριχοειδών φαινομένων μέρος του τηγμένου μίγματος προσκολλάται και ανυψώνεται ακολουθώντας την κίνηση του άξονα. Η θερμοκρασία εκτός της λεκάνης είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία τήξης του μίγματος και έτσι, καθώς το μίγμα ψύχεται, στερεοποιείται και σχηματίζει μία δοκό μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Η διάμετρος της ρυθμίζεται από την ταχύτητα ανύψωσης και περιστροφής του άξονα καθώς επίσης και από τη θερμοκρασία. Η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον αδρανούς αερίου όπως το αργό.

Η ράβδος που παράγεται με αυτή τη διαδικασία τεμαχίζεται σε δίσκους οι οποίοι στη συνέχεια στιλβώνονται με μηχανικές μεθόδους για να απομακρυνθούν οι ατέλειες που προκαλούνται από την κοπή. Έπειτα ακολουθεί χημική στίλβωση για την αφαίρεση ατελειών που προκλήθηκαν από την μηχανική κατεργασία.

Ακολουθεί η διάχυση φωσφόρου στην μια πλευρά των δίσκων. Έτσι δημιουργείται η ένωση p-n (p-n junction). Για τη μείωση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας η πλευρά τύπου n επικαλύπτεται από έναν λεπτό υμένα αντανάκλαστικού υλικού. Συνήθως το υλικό που χρησιμοποιείται είναι το οξειδίο του τιτανίου.

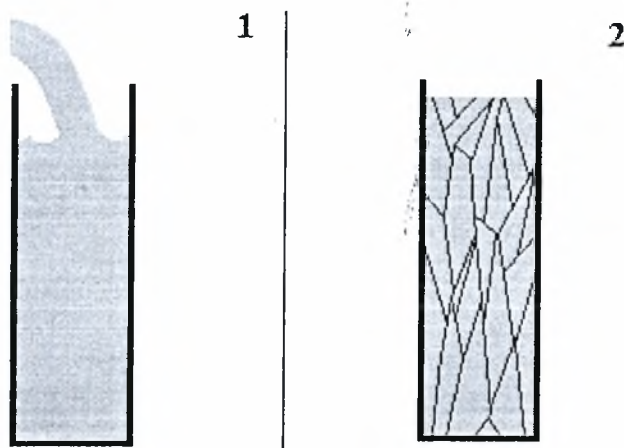
Το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια τύπου n, πρέπει να επιτρέπει τη διέλευση του φωτός. Για το λόγο αυτό εκτυπώνεται πάνω στην επιφάνεια ένα λεπτό πλέγμα αργύρου. Για την εκτύπωση του πλέγματος αυτού χρησιμοποιείται πάστα αργύρου. Ένα καλούπι με τη μορφή του επιθυμητού πλέγματος τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια και η πάστα συμπιέζεται ώστε να περάσει μέσω των σχισμών και να επικαθίσει πάνω στον ημιαγωγό. Έπειτα, αφαιρείται το καλούπι και η πάστα θερμαίνεται ώστε να εξατμιστούν οι οργανικές ενώσεις και να σχηματιστεί ένα πλέγμα καθαρού αργύρου.

### **2.2.3.2 Τεχνολογία πολυκρυσταλλικού πυριτίου**

Περισσότερο από το 60% των φωτοβολταϊκών στοιχείων που παράγονται για εμπορική χρήση, είναι κατασκευασμένα από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο [2] [4]. Η διαδικασία παραγωγής του διαφέρει από τη μέθοδο Czochralski. Σε αυτή την



περίπτωση, τηγμένο πυρίτιο χύνεται σε ραβδόμορφο καλούπι και ψύχεται. Έτσι, σχηματίζονται κατακόρυφες δομές κρυστάλλων πυριτίου. Η διαδικασία από το σημείο αυτό είναι όμοια με την αντίστοιχη για το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (σχήμα 2.12).



**Σχήμα 2.12:** Διαδικασία παραγωγής πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας είναι ότι δίνεται η δυνατότητα κατασκευής ράβδων τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής, με αποτέλεσμα να εξοικονομείται χώρος κατά τη διάταξή τους σε συστοιχίες. Επίσης, παρόλο που το κόστος κατασκευής τους μειώνεται κατά 20% σε σχέση με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, η απόδοσή τους είναι μικρότερη μόλις κατά 2-3%.

### 2.2.3.3 Τεχνολογία άμορφου πυριτίου

Οι δίσκοι άμορφου πυριτίου παράγονται με τη μέθοδο PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) που είναι μέθοδος χημικής εναπόθεση ατμών υδριδίου του πυριτίου  $\text{SiH}_4$  (silane) [4]. Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή των προσμίξεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο μέσο της διατομής να μένει ένα μεγάλο μέρος χωρίς προσμίξεις (i- type layer). Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του άμορφου πυριτίου είναι ότι η απόδοσή του μειώνεται όταν εκτεθεί για αρκετή ώρα σε ηλιακή ακτινοβολία. Με αυτόν τον τρόπο ορίζονται δύο διαφορετικές αποδόσεις. Η αρχική απόδοση, που αφορά στην απόδοση κατά την αρχική έκθεση στην ακτινοβολία και στην σταθεροποιημένη απόδοση η οποία παρατηρείται σε συνεχή λειτουργία.

Η απόδοση των εμπορικών συστοιχιών άμορφου πυριτίου κυμαίνεται από 4 έως 5% και το μερίδιο πωλήσεων σε παγκόσμια κλίμακα βρίσκεται στο 5%.

Πρόσφατα η εταιρία Sanyo ανέπτυξε ένα νέο είδος κελιού με την ονομασία HIT. Για την κατασκευή του χρησιμοποιούνται δίσκοι μονοκρυσταλλικού πυριτίου

πάνω στους οποίους γίνεται χημική εναπόθεση άμορφου πυριτίου και στις δύο πλευρές. Τα κελιά αυτά παρουσιάζουν αποδόσεις έως και 21%. Παρ' όλα αυτά το κόστος παραγωγής είναι υψηλό και δεν μπορούν να αξιοποιηθούν για μαζική παραγωγή.

#### **2.2.3.4 Τεχνολογία μικροκρυσταλλικού πυριτίου**

Αν κατά τη χημική εναπόθεση στο αέριο μίγμα Si-H το πυρίτιο αραιωθεί σε μεγάλο βαθμό τότε παράγεται μια διφασική δομή που ονομάζεται μικροκρυσταλλική [4]. Σε αυτή τη δομή παρατηρούνται κρύσταλλοι πυριτίου διασπαρμένοι μέσα σε ένα πλέγμα από άμορφο πυρίτιο. Τα χαρακτηριστικά της δομής συγκλίνουν περισσότερο σε αυτά του μονοκρυσταλλικού και μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα που βασίζονται σε αυτή τη μέθοδο δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα.

#### **2.2.3.5 Τεχνολογία υλικών III-V**

Για την κατασκευή των στοιχείων συνδυασμού III-V χρησιμοποιούνται μίγματα στοιχείων των ομάδων III και V του περιοδικού πίνακα όπως αρσενιούχο γάλλιο και φωσφορικό ίνδιο [4]. Τα μίγματα αυτά έχουν σχεδόν ιδανικά ενεργειακά κενά (band gaps), υψηλούς συντελεστές απορρόφησης και μεγάλο χρόνο ζωής των φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ιδιότητες αυτές παρουσιάζουν υψηλές αποδόσεις. Το αποδοτικότερο κελί που έχει κατασκευαστεί, με απόδοση μεγαλύτερη του 35%, είναι ένας συνδυασμός αρσενιούχου γαλλίου και αντιμονιούχου γαλλίου.

Το μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος κατασκευής εξαιτίας των ατέλειες στο πλέγμα και οι ανεπιθύμητες προσμίξεις μειώνουν κατακόρυφα την απόδοση. Το υψηλό κόστος μπορεί να αντισταθμιστεί με χρήση συγκεντρωτικών φακών, αλλά απαιτείται σύστημα εστίασης της ακτινοβολίας.

Λόγω του υψηλού συντελεστή απόδοσης-βάρους, τα συστήματα αυτά προτιμούνται κυρίως στην αεροδιαστημική τεχνολογία, της οποίας η αγορά περιορίζεται σε μερικά kWatt το χρόνο.

Τελευταίες έρευνες εστιάζονται στην ανάπτυξη στοιχείων πολλαπλών ενώσεων με βάση το γερμάνιο, με χρήση προηγμένων μεθόδων όπως η μέταλλο-οργανική εναπόθεση ατμών. Το πλεονέκτημα είναι το χαμηλότερο κόστος και ο ευκολότερος τρόπος κατασκευής. Επίσης το γερμάνιο μπορεί να συνεργαστεί καλά με τα μίγματα III-V για την κατασκευή κελιών πολλαπλών ενώσεων.

#### 2.2.3.6 Τεχνολογία λεπτού υμένου (*thin film*)

Μερικά μίγματα III-V μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων με τεχνικές χημικής εναπόθεσης [4]. Έτσι κατασκευάζονται πολυκρυσταλλικά κελιά που δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ανεπιθύμητες προσμίξεις.

Υπολογίζεται ότι αν αναπτυχθεί η βιομηχανία για μαζική παραγωγή αυτού του τύπου στοιχείων το κόστος κατασκευής μπορεί να μειωθεί από δύο έως δέκα φορές σε σχέση με τα στοιχεία που βασίζονται στο πυρίτιο.

### 2.3 ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Στην παράγραφο 2.2 περιγράφηκε η ανατομία ενός τυπικού φωτοβολταϊκού στοιχείου. Παρουσιάστηκαν τα κύρια μέρη του και η εσωτερική δομή του ημιαγωγού p-n. Σε αυτή την παράγραφο θα αναλυθεί η διαδικασία με την οποία η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ηλιακού φωτός μετατρέπεται σε εκμεταλλεύσιμη ηλεκτρική ισχύ στα άκρα του στοιχείου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αρχικά θα δοθεί ο ορισμός του φωτονίου και του ενεργειακού κενού και θα περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο ένα φωτόνιο απορροφάται από τον ημιαγωγό με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ζεύγος ελεύθερου ηλεκτρονίου-θετικής οπής. Τέλος, θα περιγραφεί πώς το φαινόμενο αυτό σε συνδυασμό με το εσωτερικό ηλεκτρικό δυναμικό προκαλεί την παραγωγή εκμεταλλεύσιμης ηλεκτρικής ισχύος.

#### 2.3.1 Το φωτόνιο

Το φωτόνιο σύμφωνα με τον Einstein είναι το ελάχιστο ποσό της ενέργειας που εκπέμπεται κατά τις ενεργειακές μεταβολές των ηλεκτρικών διπολικών ταλαντωτών της ύλης, σε κάθε συχνότητα  $\nu$ . Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι το φωτόνιο αποτελεί το ελάχιστο ποσό ενέργειας αλληλεπίδρασης μεταξύ ηλεκτρομαγνητικού κύματος και ατόμων. Η σχέση μεταξύ της ενέργειας  $E$  και της συχνότητας  $\nu$  ενός φωτονίου, που δόθηκε από τον Planck, είναι  $E=h\nu$ , όπου  $h$  είναι η σταθερά Planck [3]. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από μια πηγή φωτός, γενικά, συνίσταται από μεγάλο και διαφορετικό πλήθος φωτονίων σε κάθε συχνότητα (φάσμα συχνοτήτων).

### 2.3.2 Θεωρία των ενεργειακών ζωνών

Όταν τα άτομα ενός στοιχείου ή χημικής ένωσης βρίσκονται μεταξύ τους σε απόσταση της τάξης μεγέθους ενός ατόμου, αναπτύσσονται ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις οι οποίες παραμορφώνουν τις κυματοσυναρτήσεις των ηλεκτρονίων και ιδιαίτερα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και σθένους. Οι ενεργειακές στοιβάδες μετακινούνται, άλλες προς υψηλότερες και άλλες προς χαμηλότερες ενέργειες. Έτσι αν ένα πλέγμα αποτελείται από  $N$  άτομα, κάθε κατάσταση ηλεκτρονίου σθένους του συστήματος, που μέχρι πριν ήταν μια διακριτή ενεργειακή στάθμη χωρητικότητας  $N$  ηλεκτρονίων, διασπάται σε  $N$  πολύ παραπλήσιες στάθμες, που αποτελούν πλέον μια ζώνη. Επειδή συνήθως για ένα πλέγμα το  $N$  είναι πολύ μεγάλος αριθμός, οι στάθμες μοιάζουν να σχηματίζουν μια συνεχή κατανομή ενεργειών μέσα στη ζώνη. Μεταξύ των ζωνών υπάρχουν ενεργειακά κενά (energy gaps), δηλαδή θέσεις που δεν μπορούν να καταληφθούν από ηλεκτρόνια και δεν αποτελούν επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες. Η μορφή αυτών των ενεργειακών ζωνών καθορίζει αν ένα υλικό αποτελεί αγωγό ή μονωτή [2] [3] [5].

Έτσι, σύμφωνα με το μοντέλο των ενεργειακών ζωνών, προκύπτει ότι:

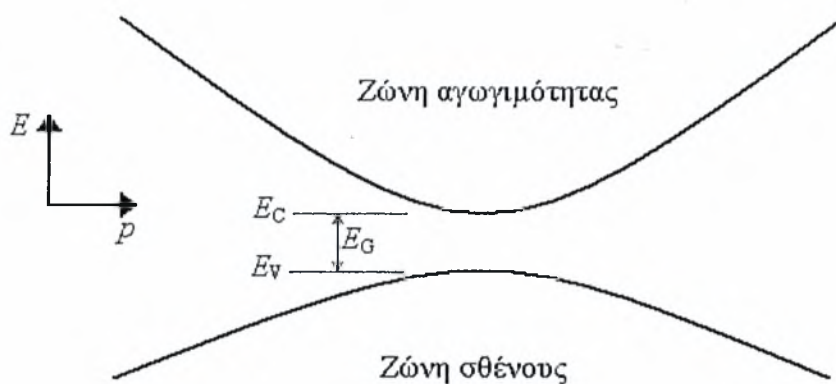
- Κάθε ενεργειακή ζώνη αποτελείται από μεγάλο πλήθος ενεργειακών επιπέδων, με πρακτικά αμελητέα ενεργειακή απόσταση μεταξύ τους, λόγω του μεγάλου πλήθους των αλληλεπιδρόντων ατόμων.
- Οι ενεργειακές ζώνες είναι περιοχές ενέργειας των ηλεκτρονίων του στερεού, μέσα στο πεδίο των πυρήνων.
- Μεταξύ των ενεργειακών ζωνών υπάρχουν περιοχές ενέργειας με μη επιτρεπτές τιμές για τα ηλεκτρόνια του κρυσταλλικού υλικού. Οι απαγορευμένες αυτές περιοχές ονομάζονται ενεργειακά κενά (energy band gaps). Αυτό σημαίνει ότι μέσα στο υλικό δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια με ενέργειες στην περιοχή των ενεργειακών κενών.

Για τους μονωτές και για τους ημιαγωγούς, σε θερμοκρασία  $T=0K$ , τα ηλεκτρόνια σθένους συμπληρώνουν πλήρως τη ζώνη σθένους, ενώ η ζώνη αγωγιμότητας παραμένει τελείως κενή. Το ενεργειακό χάσμα μεταξύ τους είναι της τάξης του 1 έως 5eV. Κατά συνέπεια, τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους για να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας χρειάζονται πρόσθετη ενέργεια η οποία δεν είναι διαθέσιμη.

Όταν η θερμοκρασία αυξηθεί τα άτομα συμμετέχουν σε θερμικές ταλαντώσεις. Έτσι είναι πιθανό κάποια ηλεκτρόνια να λάβουν αρκετή ενέργεια ώστε να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Τα ηλεκτρόνια αυτά μπορούν πλέον να

κινηθούν ελεύθερα μέσα στο πλέγμα και με αυτόν τον τρόπο γίνονται φορείς ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό αποδεικνύει ότι κανένα υλικό με θερμοκρασία  $T > 0$  δεν είναι τέλειος μονωτής.

Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται μια απλοποιημένη απεικόνιση της δομής των ενεργειακών ζωνών [3]. Πρόκειται για ένα διάγραμμα που δείχνει τις επιτρεπτές τιμές ενέργειας του ηλεκτρονίου ως προς την ορμή του κρυστάλλου,  $p = \hbar k$ , όπου  $k$  το διάνυσμα κύματος από τη λύση της διαφορικής εξίσωσης κύματος Schrodinger το οποίο για λόγους απλοποίησης παρουσιάζεται ως βαθμωτό μέγεθος. Παρουσιάζονται μόνο οι ζώνες άμεσου ενδιαφέροντος, δηλαδή η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας.



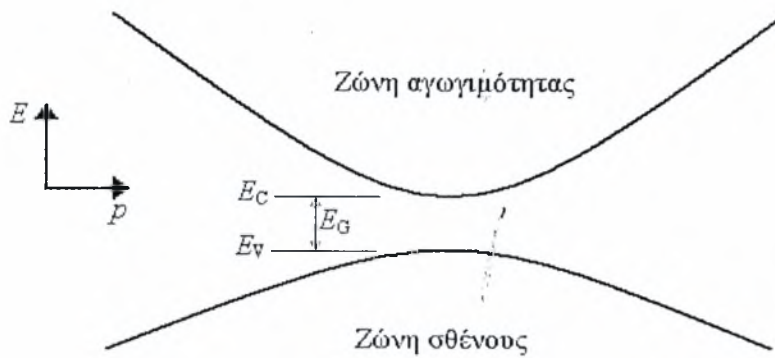
**Σχήμα 2.13:** Ζώνη σθένους – Ζώνη αγωγιμότητας

Τα ηλεκτρόνια μπορούν να καταλαμβάνουν όλες τις θέσεις μέσα στη ζώνη σθένους αλλά οι θέσεις στην κορυφή της ζώνης είναι κενές διότι τα θερμικά φορτισμένα ηλεκτρόνια μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται θετικά φορτισμένες οπές που μπορούν να λειτουργήσουν ως φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και οι οποίες έχουν θετική ενεργό μάζα. Γι' αυτό το λόγο η μελέτη των συγκεκριμένων οπών γίνεται με βάση τη θεώρηση ότι είναι θετικά φορτισμένα σωματίδια.

Όταν το ελάχιστο σημείο της ζώνης αγωγιμότητας ταυτίζεται με το μέγιστο της ζώνης σθένους, τότε το ενεργειακό κενό ονομάζεται άμεσο (direct band gap, Σχήμα 2.14) ενώ, όταν δεν είναι ευθυγραμμισμένα ονομάζεται έμμεσο (indirect band gap, Σχήμα 2.15). Το χαρακτηριστικό αυτό είναι πολύ σημαντικό στην ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει ο ημιαγωγός.

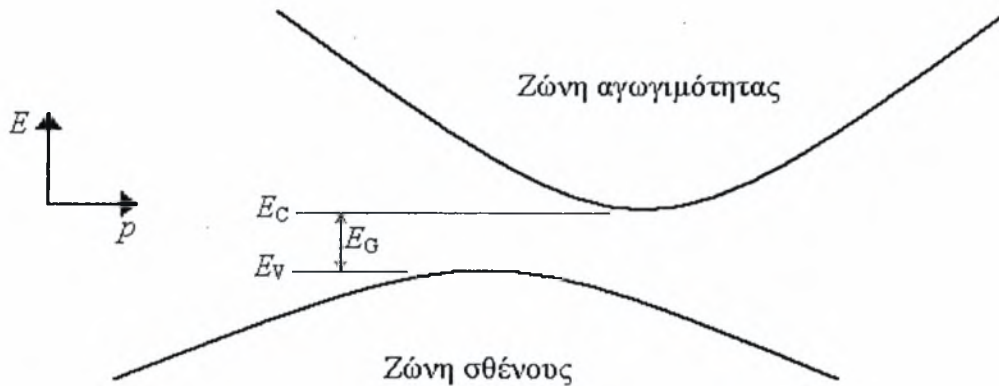


#### Ημιαγωγός direct band gap



Σχήμα 2.14: Ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού κενού

#### Ημιαγωγός indirect band gap



Σχήμα 2.15: Ημιαγωγός έμμεσου ενεργειακού κενού

### 2.3.3 Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Γενικά η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσα σε ένα υλικό, οφείλεται στη διέγερση των ταλαντευόμενων ηλεκτρικών φορτίων του υλικού (ηλεκτρόνια και πυρήνες), σε ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις [2].

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. Ο υπολογισμός της ενέργειας ενός φωτονίου μπορεί να γίνει με τη σχέση:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.2)$$



όπου  $h=6,67 \times 10^{-34}$  Js, η σταθερά Planck και  $c=3 \times 10^8$  m/s, η ταχύτητα του φωτός στο κενό [2] [3]. Επειδή το  $\lambda$  εκφράζεται σε nm και η ενέργεια φωτονίου σε eV, η προηγούμενη σχέση παίρνει τη μορφή

$$E(eV) = \frac{1240}{\lambda(nm)} \quad (2.3)$$

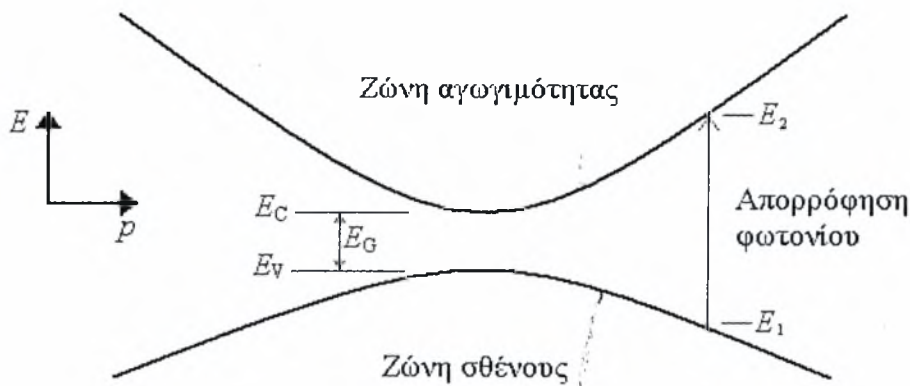
Αν η ενέργεια του φωτονίου,  $h\nu$ , είναι μικρότερη του  $E_g$ , το φωτόνιο δεν απορροφάται και κατά συνέπεια το υλικό είναι διαφανές για το συγκεκριμένο μήκος κύματος,  $\lambda$ .

Στην περίπτωση που η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη ή ίση αυτής του ενεργειακού χάσματος, το φωτόνιο απορροφάται από ηλεκτρόνιο σθένους, το οποίο καθίσταται ελεύθερο μέσα στον ημιαγωγό, αφήνοντας ακάλυπτο δεσμό, δημιουργείται δηλαδή μία θετική οπή. Το ηλεκτρόνιο ανεβαίνει ενεργειακά στη ζώνη αγωγιμότητας. Στην περίπτωση μάλιστα που η ενέργεια των φωτονίων είναι μεγαλύτερη του  $E_g$ , η γένεση του ζεύγους ηλεκτρονίου – οπής συνοδεύεται από τη θέρμανση του υλικού [2].

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, για ημιαγωγούς με άμεσο και έμμεσο ενεργειακό χάσμα.

### **2.3.3.1 Ημιαγωγοί άμεσου ενεργειακού χάσματος**

Στους ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού χάσματος (direct band gap), όπως οι GaAs, GaInP, CdTe και Cu(InGa)Se<sub>2</sub>, η βασική διαδικασία απορρόφησης φαίνεται στο Σχήμα 2.16 [3] [5].

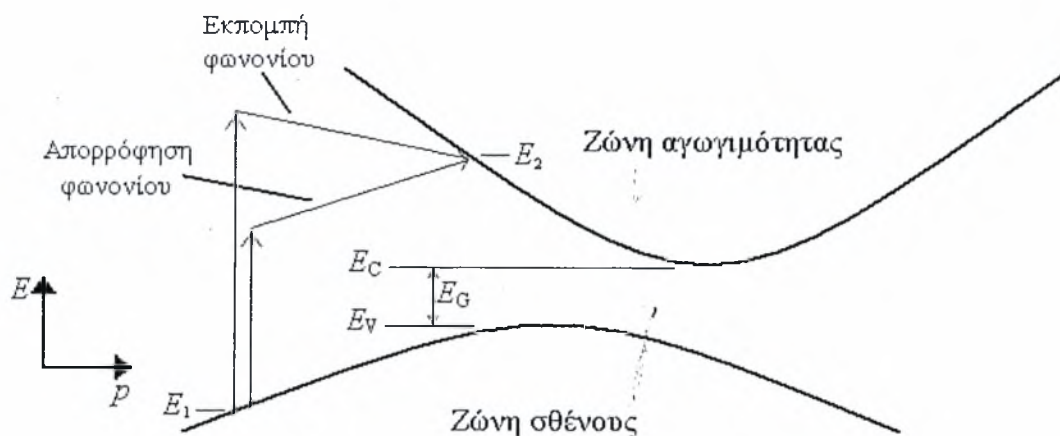


**Σχήμα 2.16:** Απορρόφηση φωτονίου από ημιαγωγό direct band gap

Όταν ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους δεχθεί ένα φωτόνιο με κατάλληλη ενέργεια,  $h\nu > E_g$ , τότε μπορεί να διεγερθεί και να μεταβεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Πλέον το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινηθεί ελεύθερα μέσα στο ατομικό πλέγμα κι έτσι προκύπτει ένα ζεύγος ελεύθερου ηλεκτρονίου/ θετικής οπής. Υπάρχει περίπτωση το ελεύθερο ηλεκτρόνιο να βρεθεί σε σημείο του πλέγματος όπου υπάρχει θετική οπή, να αποδιεγερθεί εκπέμποντας ένα φωτόνιο και να επιστρέψει στη ζώνη σθένους. Στους ημιαγωγούς έμμεσου ενεργειακού χάσματος, η διαδικασία είναι λίγο πιο περίπλοκη.

### 2.3.3.2 Ημιαγωγοί έμμεσου ενεργειακού χάσματος

Στους ημιαγωγούς έμμεσου ενεργειακού χάσματος (indirect band gap) [2] [3], όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο, όπου το μέγιστο της στοιβάδας σθένους δεν προκύπτει ταυτόχρονα με το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας, η αρχή διατήρησης της ορμής για το ηλεκτρόνιο απαιτεί ότι η διαδικασία απορρόφησης περιλαμβάνει άλλο ένα σωματίδιο. Το σωματίδιο αυτό είναι το φωνόνιο (phonon) το οποίο αποτελεί τη σωματιδιακή αναπαράσταση των ταλαντώσεων του πλέγματος του ημιαγωγού και είναι κατάλληλο για τη μελέτη του φαινομένου λόγω της χαμηλής ενέργειάς του και της σχετικά μεγάλης ορμής του. Η απορρόφηση του φωτονίου πραγματοποιείται με την απορρόφηση ή εκπομπή ενός φωνονίου (Σχήμα 2.17).



**Σχήμα 2.17:** Απορρόφηση φωτονίου από ημιαγωγό έμμεσου ενεργειακού κενού

Ανάλογα με την ενέργεια  $h\nu$  που απορροφά ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους, απαιτείται και η απορρόφηση ή εκπομπή ενός φωτονίου. Το απαιτούμενο φωτόνιο για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου μπορεί να προέλθει από εκπομπή φωτονίου κοντινού ατόμου.

Για τη διαδικασία λοιπόν απορρόφησης ενός φωτονίου απαιτείται ένα ηλεκτρόνιο και ένα φωτόνιο. Έτσι ο συντελεστής απορρόφησης δεν εξαρτάται μόνο από την πυκνότητα καταστάσεων της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας αλλά και από τη διαθεσιμότητα και την ορμή των φωτονίων. Για αυτό το λόγο ο συντελεστής απορρόφησης των ημιαγωγών έμμεσου ενεργειακού κενού είναι πολύ μικρότερος από αυτόν των ημιαγωγών άμεσου ενεργειακού κενού. Το αποτέλεσμα είναι το φως να διεισδύει βαθύτερα σε έναν ημιαγωγό έμμεσου ενεργειακού κενού από ότι σε έναν ημιαγωγό άμεσου ενεργειακού κενού.

### 2.3.3.3 Δευτερεύοντες τρόποι απορρόφησης

Κατά τη διάρκεια απορρόφησης των φωτονίων εμπλέκονται διάφορες διαδικασίες με κυριότερες αυτές που παρουσιάστηκαν παραπάνω [3]. Είναι πιθανή η μετακίνηση ενός ηλεκτρονίου σε έναν ημιαγωγό έμμεσου ενεργειακού χάσματος, χωρίς την συμμετοχή φωτονίου, αν η ενέργεια του φωτονίου είναι αρκετά μεγάλη. Αντίστροφα υπάρχει η πιθανότητα μετακίνησης ενός ηλεκτρονίου σε ημιαγωγό άμεσου ενεργειακού χάσματος με εκπομπή φωτονίου. Άλλοι μηχανισμοί που μπορούν να παίξουν ρόλο, είναι για παράδειγμα η ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου ( το φαινόμενο Franz-Keldysh), η ύπαρξη τοπικά ενεργειακών καταστάσεων εντός του ενεργειακού κενού και φαινόμενα εκφυλισμού όταν ένας συγκεκριμένος αριθμός

ενεργειακών καταστάσεων στην ζώνη σθένους δεν είναι κατελιγμένος ή στη ζώνη αγωγιμότητας είναι κενός.

Ο τελικός συντελεστής απορρόφησης είναι το σύνολο των συντελεστών απορρόφησης όλων των διαδικασιών. Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται χαρακτηριστικά από το υλικό και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και παίρνει αξιόλογες τιμές σε μήκη κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, μικρότερα από ορισμένη τιμή που είναι χαρακτηριστική για το υλικό. Το χαρακτηριστικό μήκος κύματος από το οποίο και κάτω αρχίζει η απορρόφηση, αντιστοιχεί στο ενεργειακό κενό του ημιαγωγού. Έτσι, για ακτινοβολίες με μήκη κύματος μεγαλύτερα του αντίστοιχου ενεργειακού χάσματος το υλικό παρουσιάζεται πλήρως διαφανές, εκτός από περιπτώσεις που εμφανίζονται απορροφήσεις άλλου τύπου.

#### **2.3.4 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο**

Ο συνδυασμός των δύο προαναφερθέντων φαινομένων, δηλαδή η ύπαρξη ισχυρού δυναμικού στην ένωση p-n και η διέγερση των ηλεκτρονίων σθένους των ημιαγωγών προκαλεί το φωτοβολταϊκό φαινόμενο [2] [3].

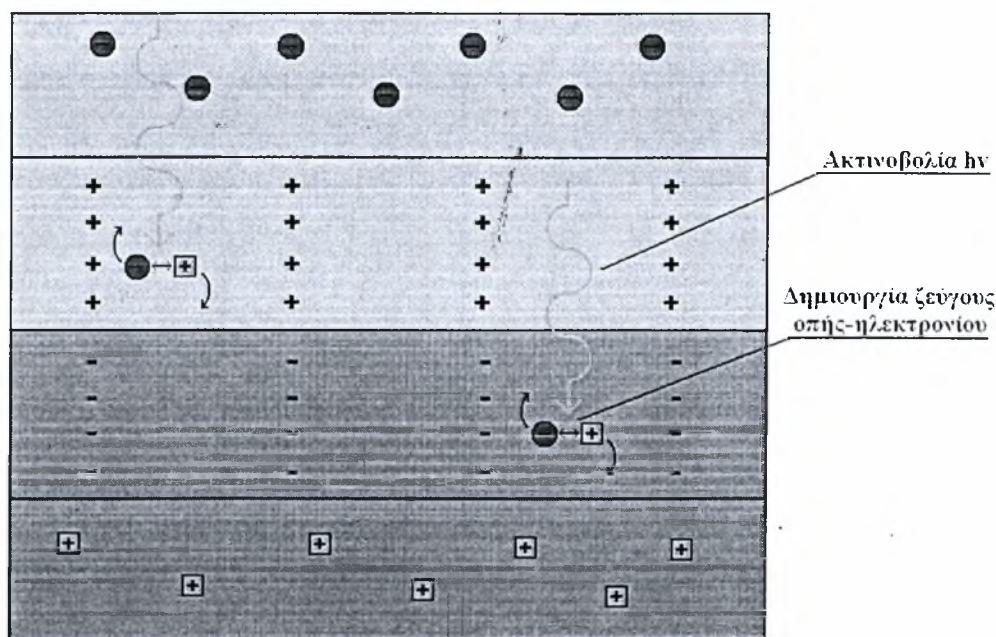
Καθώς πάνω στον ημιαγωγό προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία δημιουργούνται συνεχώς νέα ζεύγη θετικών οπών και ελεύθερων ηλεκτρονίων. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, οι ευκίνητοι αυτοί ηλεκτρικοί φορείς, πρέπει να τεθούν σε κίνηση, μέσω μηχανισμού που δεν θα καταναλώνει ενέργεια από εξωτερική πηγή. Ο μηχανισμός αυτός είναι το ισχυρό ηλεκτρικό δυναμικό της επαφής p-n.

Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών δημιουργούνται σε όλο το χώρο των ημιαγωγών, με δύο βασικούς τρόπους

- θερμικά, εξαιτίας της θερμοκρασίας στην οποία βρίσκεται η διάταξη
- με τη δράση εξωτερικού φωτισμού, κατάλληλου μήκους κύματος.

Κατά συνέπεια, τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών δημιουργούνται μέσα στην περιοχή απογύμνωσης, αλλά και έξω από αυτήν πολύ κοντά στα σύνορα με τις περιοχές τύπου p και n. Υπό άλλες συνθήκες, χωρίς την ύπαρξη του ηλεκτρικού πεδίου, τα περισσότερα από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συναντούν οπές μέσα στο πλέγμα και επανασυνδέονται, δημιουργώντας ένα νέο φωτόνιο. Στη φωτοβολταϊκή διάταξη όμως, λόγω της ύπαρξης του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, είναι πολύ πιθανό οι ελεύθεροι φορείς να κινηθούν μέσα σε περιοχή όπου υπερτερούν οι όμοιοι προς αυτούς φορείς. Με αυτόν τρόπο, η πιθανότητα να επιζήσουν, δηλαδή να μην

επανασυνδεθούν, είναι μεγάλη. Η παρουσία ατελειών στο πλέγμα αυξάνει την πιθανότητα επανασύνδεσης, μειώνοντας το χρόνο ζωής των ηλεκτρικών φορέων.



**Σχήμα 2.18:** Δημιουργία ζευγών οπών-ηλεκτρονίων

Η περιοχή τύπου *n* έχει ως φορείς πλειονότητας (φορείς που υπερτερούν) τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, ενώ η περιοχή τύπου *p* τις οπές. Οι πρόσθετοι φορείς φορτίζουν τους χώρους στους οποίους φτάνουν, με πλεονάζοντα φορτία. Το δυναμικό στο χώρο *p* γίνεται θετικότερο, ως προς το αντίστοιχο του χώρου *n*, όπου έχουν καταλήξει τα ηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν στην επαφή. Η συνεχής κίνηση των φορέων αυτών, με την επίδραση του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, αποτελεί ρεύμα, με φορά αυτή του πεδίου, δηλαδή από τον ημιαγωγό *n* στον ημιαγωγό *p*. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται φωτόρευμα  $I_L$  [2].

Οι φορείς που συμβάλουν στο φωτόρευμα, είναι μέρος εκείνων που δημιουργεί το φως σε όλο τον όγκο της διάταξης και είναι ίσοι πρακτικά με τους φορείς που καταλήγουν στα ηλεκτρόδια. Συνεπώς, η τιμή του φωτορεύματος είναι ευθέως ανάλογη του πλήθους των απορροφούμενων φωτονίων, που είναι ευθέως ανάλογα με τα προσπίπτοντα φωτόνια. Η συνολική ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας ονομάζεται πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Επιγραμματικά η διαδικασία είναι η εξής: Τα δημιουργούμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, μέσα και κοντά στην περιοχή επαφής της διάταξης, ωθούνται από το υφιστάμενο ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, στους χώρους όπου υπερτερούν οι όμοιοί τους ηλεκτρικοί φορείς (φορείς πλειονότητας του χώρου). Το ισχυρό φωτόρευμα διατηρεί τις συγκεντρώσεις των φορέων πλειονότητας σε κάθε πλευρά, σε υψηλότερα επίπεδα απ' ότι κατά την απουσία φωτός, προσδίδοντας στη διάταξη χαρακτηριστικά πηγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το δημιουργούμενο φωτόρευμα  $I_L$ , είναι ευθέως ανάλογο της πυκνότητας ισχύος  $E(W/m^2)$ , καθώς και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών.

Εκτός από το φωτόρευμα, υπάρχει ακόμη ένα ρεύμα μέσα στον ημιαγωγό. Λόγω της αύξησης της πυκνότητας φορέων πλειονότητας στις αντίστοιχες περιοχές, δημιουργείται ένα ρεύμα διάχυσης  $I_\delta$  των φορέων αυτών προς τις αντίθετες περιοχές, όπου οι φορείς αυτοί αποτελούν μειονότητα [2]. Το ρεύμα διάχυσης είναι ισχυρό, αποτελείται από δύο συνιστώσες (ρεύμα ηλεκτρονίων και οπών) και έχει φορά από τον ημιαγωγό τύπου p στον ημιαγωγό τύπου n (δηλαδή αντίθετη από αυτή του  $I_L$ ).

Συνεπώς, μέσα στον ημιαγωγό κυκλοφορούν δύο ρεύματα. Το φωτόρευμα και το ρεύμα διάχυσης. Αν τα δύο ηλεκτρόδια βραχυκυκλωθούν, τότε το ρεύμα διάχυσης κινείται μόνο από την εξωτερική διαδρομή. Τέλος, αν στα ηλεκτρόδια συνδεθεί εξωτερικό κύκλωμα με καταναλωτή (αντίσταση  $R$ ), τότε το ρεύμα διάχυσης περνάει μερικώς από το εξωτερικό κύκλωμα ( $I_R$ ) και μερικώς μέσα από τον ημιαγωγό ( $I_\delta$ ). Η ποσότητα ρεύματος  $I_R$  που θα περάσει από τον καταναλωτή εξαρτάται από την αντίστασή του.

Παρακάτω θα αναλυθούν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου [2]

- σε ανοιχτό κύκλωμα
- σε κατάσταση βραχυκύκλωσης των άρων του
- σε σύνδεση αντίστασης  $R$  στα άκρα του

#### **2.3.4.1 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος**

Όπως προαναφέρθηκε σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος και σε κατάσταση σταθερού φωτισμού, τα δύο ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στην επαφή έχουν αντίθετη φορά και απολύτως ίσες τιμές  $I_\delta = -I_L$ . Η ηλιακή ακτινοβολία δημιουργεί ζεύγη ελεύθερων φορέων και το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο ωθεί τους αντίθετου φορτίου

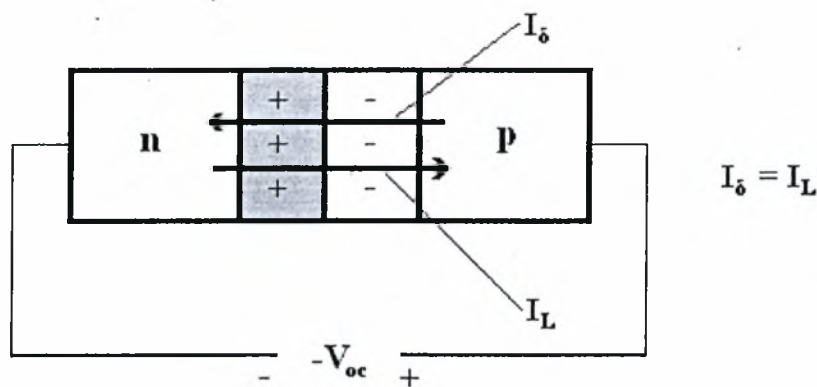


φορείς στους χώρους που περιέχουν τους όμοιους τους ηλεκτρικούς φορείς. Η κίνηση αυτή είναι το φωτόρευμα  $I_L$ . Καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των ηλεκτρικών φορέων στους δύο χώρους, αυξάνεται η τάση να διαχυθούν προς τις αντίθετες περιοχές, διαπερνώντας τον εσωτερικό ηλεκτρικό φραγμό. Έτσι το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή ελαττώνεται εξαιτίας του αναπτυσσόμενου αντίθετου ηλεκτρικού πεδίου των αυξημένων πλέον συγκεντρώσεων των φορέων πλειονότητας. Στη μόνιμη κατάσταση το ρεύμα διάχυσης ισούται με το φωτόρευμα (Σχήμα 2.19).

Η ηλεκτρική τάση στα άκρα της επαφής p-n προσεγγίζει την τιμή της  $V_{bi}$  και έχει αντίθετη φορά. Ονομάζεται  $V_{OC}$  και ισχύει

$$V_{OC} \leq V_{bi} \quad (2.4)$$

όπου το = αφορά την ιδανική περίπτωση που δεν συμβαίνουν επανασυνδέσεις.

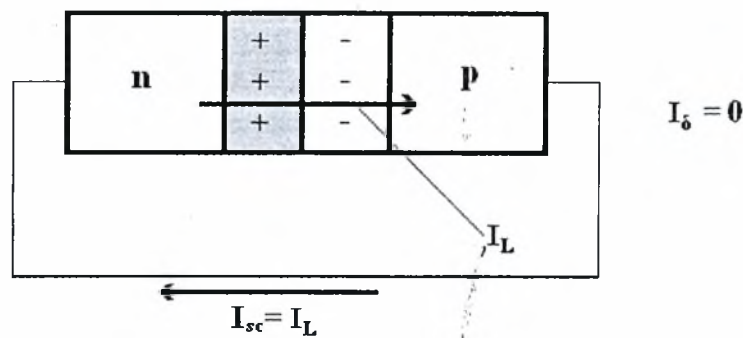


**Σχήμα 2.19:** Φωτοβολταϊκό στοιχείο σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος

#### 2.3.4.2 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο με βραχυκυκλωμένα άκρα

Αν οι δύο πόλοι του φωτοβολταϊκού στοιχείου συνδεθούν μεταξύ τους με σύρμα μηδενικής πρακτικά αντίστασης (βραχυκύκλωμα), τότε από το σύρμα περνάει ρεύμα  $I_L$ . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο εσωτερικό του ημιαγωγού υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο – φραγμός ενώ στο βραχυκύκλωμα ισχύει  $\Delta V=0$  (Σχήμα 2.20). Άρα για το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  ισχύει

$$I_{sc} = I_L \quad (2.5)$$

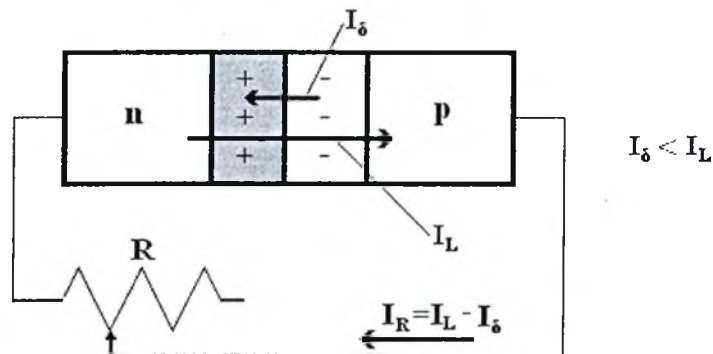


Εικόνα 2.20: Φωτοβολταϊκό στοιχείο με βραχυκύκλωμα

#### 2.3.4.3 Σύνδεση αντίστασης $R$ (φορτίου) στα άκρα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Αν στα άκρα φωτιζόμενης επαφής συνδέσουμε μια αντίσταση  $R$ , τότε αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα  $I_R$ , που αποτελεί μέρος του φωτορεύματος  $I_L$  (Σχήμα 2.21). Έτσι ισχύει

$$I_R = I_L - I_d \quad (2.6)$$



Σχήμα 2.21: Φωτοβολταϊκό στοιχείο με αντίσταση  $R$

#### 2.3.5 Επιρροή της θερμοκρασίας στην απόδοση

Η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο επιδρά στη μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου [2]. Για ημιαγωγούς με βάση το πυρίτιο, ένας τυπικός συντελεστής μεταβολής της τάσης λόγω αύξησης της θερμοκρασίας, είναι της τάξης του  $-2.3 \text{ mVK}^{-1}$ . Για το λόγο αυτό μελετούνται και αναπτύσσονται νέες μέθοδοι (ρεύμα αέρα, συμπαραγωγή θερμού

νερού με παράλληλη ψύξη των στοιχείων, και άλλες) για την απαγωγή θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

## 2.4 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΦΩΤΟΣ

Για τη σωστή μελέτη των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι απαραίτητη η γνώση της μορφής της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο στοιχείο. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, συμπεριλαμβανομένου και του ηλιακού φωτός, αποτελείται από σωματίδια που ονομάζονται φωτόνια, τα οποία μεταφέρουν συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας ανάλογα με τις φασματικές ιδιότητες της πηγής.

Τα φωτόνια επίσης, εκτός του σωματιδιακού, έχουν κυματικό χαρακτήρα και το μήκος κύματος  $\lambda$  κάθε φωτονίου συνδέεται με την ενέργεια που μεταφέρει με τον τύπο:

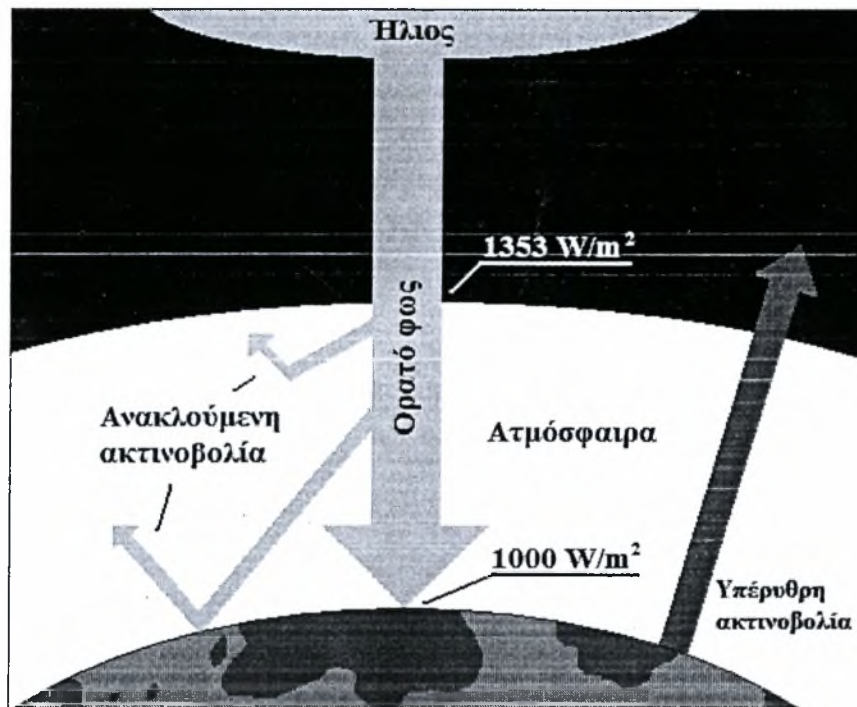
$$E_{\lambda} = hc / \lambda \quad (2.7)$$

όπου  $h$ , είναι η σταθερά του Planck και  $c$  η ταχύτητα του φωτός .

Για τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής, συμμετέχουν μόνο τα φωτόνια με επαρκή ενέργεια. Για αυτό το λόγο, παίζει σημαντικό ρόλο η μελέτη της φασματικής φύσης του φωτός.

Η επιφάνεια του ήλιου βρίσκεται σε θερμοκρασία  $T=5762K$  [5] και το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που εκπέμπεται μπορεί να θεωρηθεί ως το φάσμα ενός μέλανος σώματος σε αυτή τη θερμοκρασία. Η εκπομπή ακτινοβολίας από τον ήλιο, όπως επίσης από τα μέλανα σώματα είναι ισοτροπική, δηλαδή διαδίδεται με την ίδια ένταση προς όλες τις κατευθύνσεις. Όμως η απόσταση του ήλιου από τη γη (περίπου 150.000.000 χιλιόμετρα) είναι πολύ μεγάλη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συνεισφέρουν στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που παρατηρείται, μόνο τα φωτόνια που εκπέμπονται απ' ευθείας στη γη. Πρακτικά η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο παράλληλων δεσμών φωτονίων. Ακριβώς στο όριο ατμόσφαιρας-διαστήματος η ένταση του ηλιακού φωτός, δηλαδή η πυκνότητα της ισχύος που παρέχεται από την ηλιακή ακτινοβολία, είναι  $1353kW/m^2$ . Στο σημείο αυτό το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα χαρακτηρίζεται ως Air Mass Zero (AM0) [3] (Σχήμα

2.22). Ο δείκτης Air Mass (AM) δείχνει την επίδραση που έχει η ατμόσφαιρα στη μορφή και στην ένταση του ηλιακού φωτός που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης.



**Σχήμα 2.22:** Η ηλιακή ακτινοβολία

Η τιμή του δείκτη δίνεται από τον τύπο  $AM=1/\cos\theta$ , όπου  $\theta$  είναι η γωνία της θέσης του ήλιου προς την κάθετο της επιφάνειας της γης (όταν ο ήλιος βρίσκεται στο κέντρο του ουράνιου θόλου τότε  $\theta=0$ ). Έτσι, στην επιφάνεια ισχύει

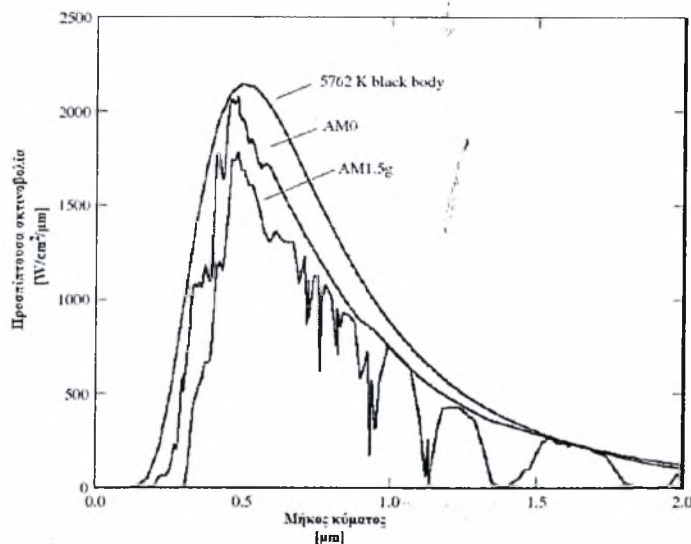
$$AM \geq 1. \quad (2.8)$$

Ένας πρακτικός τρόπος υπολογισμού του AM δίνεται από τον τύπο του Green:

$$AirMass = \sqrt{1 + (S / H)^2} \quad (2.9)$$

όπου με  $S$  συμβολίζεται το μήκος της σκιάς ενός αντικειμένου με ύψος  $H$  [3]. Η πιο διαδεδομένη τιμή AM, που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η  $AM=1.5$  που ισοδυναμεί με ένταση  $1 \text{ kW/m}^2$ . Η μορφή του ηλιακού φάσματος που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης εξαρτάται επίσης από το συντελεστή διάχυσης, που οφείλεται στη διάχυση και την αντανάκλαση του φωτός από την ατμόσφαιρα και το περιβάλλον και συνεισφέρει έως και 20% στο φως που προσπίπτει σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο. Έτσι, όταν αναφέρεται ο δείκτης AMg

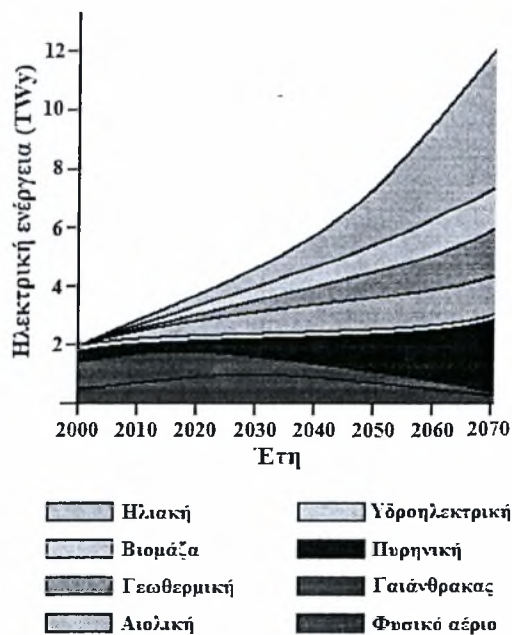
(global) λαμβάνεται υπ' όψη η διάχυση ενώ όταν αναφέρεται ο δείκτης AMd (direct) δεν λαμβάνεται υπ' όψη. Στο σχήμα 2.23 παρουσιάζεται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα του μέλανος σώματος στους 5762K, του AM=0 και του AM=1.5g.



Σχήμα 2.23: Το ηλιακό φάσμα για AM=0 και AM=1.5

## 2.5 ΕΠΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Η αύξηση του πληθυσμού του πλανήτη, σε συνδυασμό με την συνεχή άνοδο του βιοτικού επιπέδου έχουν ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση των ενεργειακών αναγκών και ιδιαίτερα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι στο δεύτερο μισό του αιώνα οι ανάγκες θα ξεπεράσουν το επίπεδο των 10TW [4].



Σχήμα 2.24: Οι παγκόσμιες προβλεπόμενες ενεργειακές απαιτήσεις [4]



Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.24, μόνο ένα μικρό ποσοστό των αναγκών αυτών θα μπορεί πλέον να καλυφθεί από τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) για να σταθεροποιηθεί το CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας σε επίπεδα χαμηλότερα των 450 ppm. Επίσης ακόμη και μια μεγάλη προσπάθεια για την περαιτέρω προώθηση της πυρηνικής ενέργειας σε συνδυασμό με την εκτεταμένη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες δεν θα είναι αρκετή για να υπερκαλύψει τις ανάγκες. Έτσι γίνεται φανερό ότι για να επιτευχθεί ο στόχος των 450 ppm CO<sub>2</sub> πρέπει να παίζει σημαντικό ρόλο η ηλιακή ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Το πλέον χρησιμοποιούμενο υλικό για την κατασκευή φωτοβολταϊκών διατάξεων είναι το πυρίτιο. Παρουσιάζει σχετικά καλά χαρακτηριστικά απορρόφησης και το κόστος του είναι χαμηλό, διότι η τεχνολογία κατασκευής του είναι ανεπτυγμένη κυρίως λόγω της εφαρμογής του στην ηλεκτρονική βιομηχανία. Επίσης είναι μη τοξικό και υπάρχει στο έδαφος σε μεγάλη αφθονία. Για την κατασκευή του πλέγματος που λειτουργεί ως ηλεκτρόδιο στην πλευρά που προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία, χρησιμοποιείται Άργυρος (Ag) του οποίου τα παγκόσμια αποθέματα είναι περιορισμένα (570 ktons). Έτσι θεωρώντας ότι για την κατασκευή των ηλεκτροδίων χρησιμοποιούνται πλέγματα μέσου πάχους 50μm και συνολικής επικάλυψης 5%, προκύπτει ότι η συνολική παγκόσμια εγκατάσταση δεν μπορεί να ξεπεράσει το 0,1TW ανά χρόνο. Όμως υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής πλέγματος αργύρου με πάχος 2μm με φωτολιθογραφικές μεθόδους και έτσι να επιτευχθεί συνολική εγκατάσταση 1TW ανά χρόνο. Στον ερευνητικό τομέα ανάπτυξης νέων, οικονομικότερων και αποδοτικότερων μεθόδων γίνονται προσπάθειες για παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου από άμορφο μέσω δύο διαφορετικών προσεγγίσεων. Με ανακρυστάλλωση μέσω ανόπτησης και με τοποθέτηση του πυριτίου σε θερμό υπόστρωμα αλουμινίου ώστε να δημιουργηθεί στην επιφάνεια του αλουμινίου εύτηκτο μίγμα Si/Al [4].

**Πίνακας 2.1:** Μέγιστη ισχύς σε διάφορους τύπους κελιών [4]

Τύπος κελιού	Μέγιστη ισχύς κελιού σε συνθήκες εργαστηρίου	Μέγιστη ισχύς Πόνελ
c-Si (μονοκρυσταλλικό πυρίτιο)	24.7%	22.7%
Multi-c-Si (πολυκρυσταλλικό πυρίτιο)	20.3%	15.3%
aSi:H (άμορφο πυρίτιο)	10.1%	10.4%
μc-Si/aSi:H (μικροκρυσταλλικό πυρίτιο)	11.7%	11.7%
HT	21%	18.4%
GaAs	25.1%	-
InP	21.9%	-
GaInP/GaAs/Ge	32%	-
CdTe	16.5%	10.7%
CIGS	19.5%	13.4%



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ebbing Gammon, 'Γενική Χημεία', Εκδόσεις Τραυλός 2002
- [2] Ι. Ε. Φραγκιαδάκης, 'Φωτοβολταϊκά Συστήματα', Εκδόσεις Ζήτη
- [3] Antonio Luque & Steven Hegedus, ' Handbook of Photovoltaic science and engineering', 2002
- [4] A. Feltrin, A. Freundlich, 'Material considerations for terawatt level deployment of photovoltaics' Renew Energy 2007
- [5] M.A. Green, 'Third Generation Photovoltaics

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΙΙΙ

## **ΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ Α.Π.Ε. ΚΑΙ ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια ραγδαίες εξελίξεις, επηρεαζόμενη από δύο αντιφατικές τάσεις. Η μία τάση αφορά στην υιοθέτηση περιβαλλοντικά φιλικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και τη μείωση της εξάρτησης της Ευρωπαϊκής Ένωσης από το πετρέλαιο. Η άλλη τάση αφορά τον ελεύθερο ανταγωνισμό στον τομέα της ενέργειας με στόχο τη μείωση της τιμής παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, στα πρότυπα της παγκοσμιοποίησης της αγοράς που υιοθέτησαν πρώτες οι Η.Π.Α.

#### **3.1.1 Μείωση εξάρτησης από το πετρέλαιο**

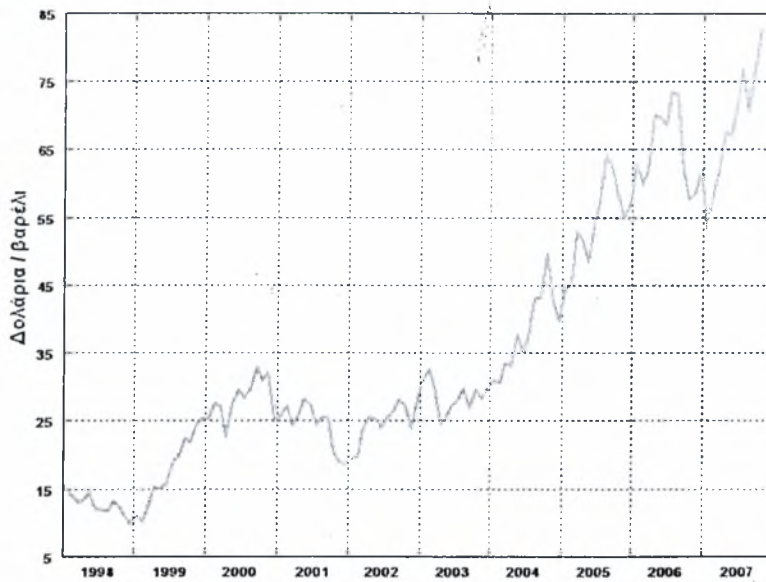
Η κοινωνία του 20<sup>ου</sup> αιώνα ονομάστηκε κοινωνία του πετρελαίου, όχι τυχαία. Η ανάπτυξη και η εξέλιξη της τεχνολογίας, από τις μετακινήσεις και την παραγωγή ενέργειας έως την κατασκευή συνθετικών υλών, βασίστηκε κατά ένα μεγάλο ποσοστό στην αξιοποίηση του αργού πετρελαίου.

Έτσι γίνεται φανερό ότι με τις τρέχουσες συνθήκες, η βιωσιμότητα και η ανάπτυξη κάθε κράτους είναι άμεσα εξαρτημένη με την ικανότητα προμήθευσης

υγρών καυσίμων σε λογικό κόστος. Παρ' όλα αυτά διαφαίνεται πως στον 21<sup>ο</sup> αιώνα, η τιμή των ορυκτών καυσίμων θα αυξάνεται ραγδαία, κυρίως για δύο λόγους [1]:

- της εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων μέσα στον επόμενο αιώνα
- των ολιγοπωλίων που διαχειρίζονται την παραγωγή και διάθεση τους

Είναι χαρακτηριστικό το παρακάτω διάγραμμα που δείχνει την εξέλιξη της διεθνούς τιμής του αργού πετρελαίου την δεκαετία 1998 – 2007 [2].



**Σχήμα 3.1:** Εξέλιξη της διεθνούς τιμής του πετρελαίου 1998-2007

Η άμεση εξάρτηση της κοινωνίας από το πετρέλαιο έχει αποτέλεσμα μια αύξηση της τιμής του να προκαλεί αλυσιδωτές ανατιμήσεις σε όλα τα καταναλωτικά αγαθά. Έτσι, γίνονται προσπάθειες από τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, να αναπτυχθούν συστήματα τα οποία θα επιτρέπουν εναλλακτικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας αλλά και τεχνολογίες που θα στοχεύουν στην εξοικονόμηση ενέργειας που δεν θα έχει αντίκτυπο στην ποιότητα ζωής.

### 3.1.2 Μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου

Το Πρωτόκολλο του Κυότο αποτελεί τη μόνη διεθνή συνθήκη που στοχεύει στη μείωση των εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παρά το γεγονός ότι το Πρωτόκολλο συμφωνήθηκε το 1997, δεν έχει γίνει ακόμη διεθνές δίκαιο και οι διαπραγματεύσεις για το σχεδιασμό κανόνων για την εφαρμογή του συνεχίζονται μέχρι σήμερα.

Για να τεθεί σε ισχύ ως διεθνής συμφωνία, το Πρωτόκολλο του Κυότο χρειαζόταν την επικύρωση από 55 χώρες συν τόσες βιομηχανικές χώρες όσες

αντιπροσωπεύουν το 55% των εκπομπών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, η Ρωσία και η Ιαπωνία το έχουν ήδη επικυρώσει, μαζί με τις περισσότερες χώρες της κεντρικής και ανατολικής Ευρώπης και πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, όπως η Βραζιλία, η Κίνα και η Ινδία.

Στην Παγκόσμια Διάσκεψη για την Αειφόρο Ανάπτυξη που πραγματοποιήθηκε από τις 26 Αυγούστου έως τις 4 Σεπτεμβρίου 2002 στο Γιοχάνεσμπουργκ, ο συνασπισμός ΗΠΑ και ΟΡΕC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) απέρριψε τον προτεινόμενο στόχο που αναφέρεται στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Η Αυστραλία επίσης δήλωσε ότι δεν θα επικυρώσει το Πρωτόκολλο του Κυότο.

Τελικά, η συμφωνία έγινε στις 16 Φεβρουαρίου 2005 και μέχρι το Δεκέμβριο του 2006 υπέγραψαν συνολικά 169 χώρες στις οποίες συμπεριλαμβάνεται το 61,6% των βιομηχανικών χωρών. Στον χάρτη του σχήματος 3.2 με πράσινο απεικονίζονται οι χώρες αυτές.



**Σχήμα 3.2:** Χάρτης με τις χώρες που υπέγραψαν το πρωτόκολλο του Κυότο

Σύμφωνα με τη συμφωνία αυτή η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) θα πρέπει να επιτύχει μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων κατά 8% και ειδικότερα του CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, σε σχέση με τις τιμές του 1990 από το έτος 2008 έως το 2012 [3].

Η διάδοση των Α.Π.Ε. στην Ε.Ε. εξαρτάται ουσιαστικά μέχρι σήμερα από τις Εθνικές Πολιτικές που έχουν υιοθετήσει τα Κράτη Μέλη (π.χ. Ισπανία, Γερμανία), χωρίς να υπάρχει ένα εξειδικευμένο πλαίσιο που να δίνει κοινές κατευθυντήριες γραμμές στα Κράτη Μέλη.

Σε συνέχεια της συμφωνίας του Κυότο, η Ευρωπαϊκή Ένωση προκειμένου να ανταποκριθεί στις δεσμεύσεις που πήρε, ψήφισε ένα κείμενο πολιτικής τη «Λευκή

Βίβλο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας–Α.Π.Ε.» με στόχο την ενίσχυση της παραγωγής ρεύματος με τρόπους περιβαλλοντικά φιλικούς.

Μεταξύ μιας σειράς ρυθμίσεων η Λευκή Βίβλος προβλέπει:

- Την εκπόνηση ενός Σχεδίου Απογείωσης των Α.Π.Ε. (Take Off Campaign). Το Σχέδιο προβλέπει τα ποσοστά ηλεκτρικού ρεύματος που θα παράγονται από Α.Π.Ε. σε κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ανάλογα με τις δυνατότητες της. Επίσης προβλέπει αναλυτικά για κάθε μορφή Ανανεώσιμης Πηγής Ενέργειας (Μικρά Υδροηλεκτρικά, Αιολικά, Βιομάζα, Φωτοβολταϊκά κλπ ) τις ποσότητες που θα πρέπει να εγκατασταθούν στην Ε.Ε. προκειμένου να επιτευχθούν, οι ανωτέρω στόχοι. Ειδικά για τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα προβλέπει την εγκατάσταση συστημάτων ισχύος 1 GW (0,5 GW στις χώρες της Ε.Ε. και 0,5 GW στις ανατολικές χώρες).

Όσον αφορά στη χρηματοδότηση των δράσεων του «Σχεδίου Απογείωσης των Α.Π.Ε.», δυστυχώς δεν προβλέπονται πόροι χρηματοδότησης από τα διαρθρωτικά ταμεία, ή δημιουργία νέου μέσου χρηματοδότησης. Τα Κράτη Μέλη μπορούν να εφαρμόσουν πολιτικές ενίσχυσης των Α.Π.Ε. από ιδίους πόρους, δηλαδή από το Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων ή για τις χώρες από τα Κοινοτικά Πλαίσια Στήριξης. Επίσης, τα Κράτη Μέλη μπορεί να εφαρμόσουν νομοθετικές ρυθμίσεις για την ενίσχυση της παραγωγής ρεύματος από Α.Π.Ε., όπως είναι π.χ. η επιδότηση της τιμής του ρεύματος που παράγεται από Α.Π.Ε., η επιδότηση της εγκατάστασης και των τόκων των δανείων, καθώς επίσης και η θέσπιση της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει».

Η μόνη Κοινοτική Χρηματοδότηση για την εγκατάσταση συστημάτων παραγωγής ενέργειας αποτέλεσαν τα ανταγωνιστικά ευρωπαϊκά προγράμματα όπως τα ALTENER, SAVE, JOULE.– THERMIE και το 5<sup>ο</sup> Πρόγραμμα Πλαίσιο που περιείχαν δράσεις σχετικές με την ενίσχυση των Α.Π.Ε.. Τα προγράμματα αυτά συνεχίζονται και σήμερα μέσω της θέσπισης νέων πολυετών προγραμμάτων για την ενέργεια και το περιβάλλον («Εξυπνη ενέργεια για την Ευρώπη», 6<sup>ο</sup> Πρόγραμμα Πλαίσιο).

Από την άλλη μεριά, υιοθετήθηκε το 1996 η Οδηγία 96/92/EC «για την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας», η οποία ορίζει τους κοινούς κανόνες για την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας στα Κράτη Μέλη. Σε συνέχεια αυτής της Οδηγίας τον Σεπτέμβριο του 2000 και με στόχο την περικοπή των επιδοτήσεων τιμής ρεύματος από Α.Π.Ε. που είχαν με νόμο θεσπίσει η Ισπανία και η Γερμανία, η Επιτροπή



Ανταγωνισμού εισηγήθηκε πρόταση οδηγίας για την θέσπιση ορίου στο ποσοστό επιδότησης μιας επένδυσης Α.Π.Ε. και της επιδότησης της τιμής του ρεύματος.

Αναλυτικότερα, τα βασικά σημεία από τα ανωτέρω κείμενα πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### **3.2 ΛΕΥΚΗ ΒΙΒΛΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ Α.Π.Ε.**

Στις 26 Νοεμβρίου 1997 δημοσιεύθηκε από την Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων η Λευκή Βίβλος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με στόχο την αύξηση της παραγωγής ενέργειας από Α.Π.Ε. από 6% το 1997 σε 12% το 2010 [4].

Στο πλαίσιο της Λευκής Βίβλου προτάθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκστρατεία απογείωσης (TAKE OFF CAMPAIGNE) των Α.Π.Ε. με στόχο την υλοποίηση έργων μεγάλης κλίμακας σε διάφορους κλάδους Α.Π.Ε.. Πιο συγκεκριμένα εισηγήθηκε να προωθηθούν οι ακόλουθες καίριες δράσεις:

- 1.000.000 φωτοβολταϊκά συστήματα (Φ/Β)
- 15 εκατομμύρια m<sup>2</sup> ηλιακών συλλεκτών
- μεγάλα αιολικά πάρκα ισχύος 10.000 MW
- εγκαταστάσεις βιομάζας 10.000 MWth
- 1.000.000 κατοικίες θερμαινόμενες από βιομάζα
- εγκαταστάσεις βιοαερίου θερμικής ισχύος 10.000 MW
- 5 εκατομμύρια τόνοι υγρών βιοκαυσίμων
- ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε 100 κοινότητες.

Η εκστρατεία απογείωσης προτείνεται να συγχρηματοδοτηθεί από την Ε.Ε. και τα κράτη μέλη. Με στόχο την προώθηση της εκστρατείας απογείωσης και την εκπλήρωση των στόχων της, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε ένα πλαίσιο συνεργασίας μεταξύ της Επιτροπής από τη μία πλευρά και δημοσίων αρχών, βιομηχανιών και οργανισμών από την άλλη (Renewable Energy Partnership).

Σε συνέχεια της Λευκής Βίβλου η Ευρωπαϊκή Επιτροπή συνέταξε ένα «Working paper» για τις Α.Π.Ε. και την εσωτερική αγορά ενέργειας όπου εξέταζε τις εφαρμοζόμενες πολιτικές. Το κείμενο αυτό εργασίας δεν υιοθετεί συγκεκριμένες προτάσεις και αφήνει περιθώριο στα Κράτη Μέλη να επιλέξουν τις πολιτικές που επιθυμούν να εφαρμόσουν για την ενίσχυση των Α.Π.Ε..

Μέχρι στιγμής η πολιτική υποστήριξης των Α.Π.Ε. από τα Κράτη Μέλη κινείται προς δύο βασικές επιλογές:

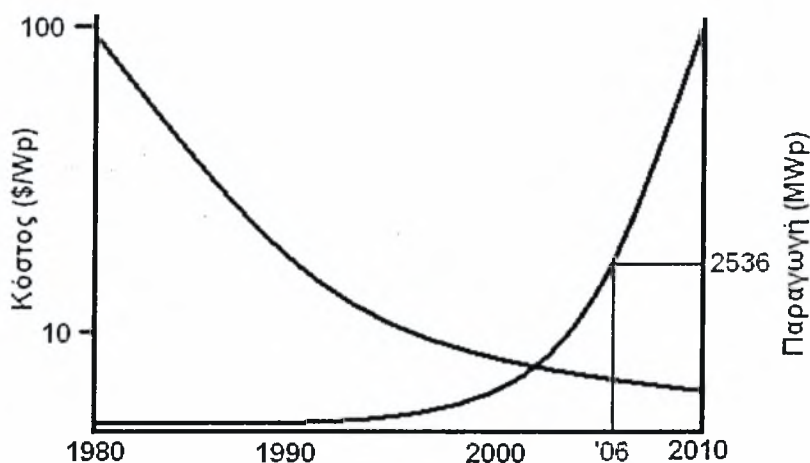
- Τα συστήματα σταθερών τιμών (tariff systems), που εφαρμόζονται ιδίως στη Γερμανία και την Ισπανία, όπου συνέβαλαν σημαντικά στη ραγδαία προώθηση των Α.Π.Ε.. Χαρακτηρίζονται από τη συγκεκριμένη τιμή της ενέργειας που καταβάλλεται από τις επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας στους παραγωγούς Α.Π.Ε..
- Τα συστήματα ποσοτώσεων (quota systems) τα οποία εφαρμόζονται ιδίως στην Αγγλία, την Ιρλανδία και τις Κάτω Χώρες, με μικρή συμβολή στην ανάπτυξη των Α.Π.Ε.. Βασίζονται στον καθορισμό της τιμής της ενέργειας μέσω του ανταγωνισμού μεταξύ των παραγωγών Α.Π.Ε. για τη στήριξη που θα γίνει, αφού προηγουμένως το κράτος αποφασίσει για το επιθυμητό ποσό ενέργειας από Α.Π.Ε.. Υλοποιούνται με δύο κυρίως μηχανισμούς:
  - ο Τα πράσινα πιστοποιητικά: Η ενέργεια Α.Π.Ε. πωλείται σε τιμές αγοράς, και για να χρηματοδοτηθεί το επιπλέον κόστος παραγωγής των Α.Π.Ε., όλοι οι καταναλωτές υποχρεούνται να προμηθεύονται ορισμένο ποσοστό ενέργειας («πράσινο πιστοποιητικό») από Α.Π.Ε.. Για την προμήθεια πράσινων πιστοποιητικών αναπτύσσεται μία δευτερεύουσα αγορά «πράσινης ενέργειας», παράλληλα με την πρωτεύουσα αγορά από συμβατικές πηγές ενέργειας.
  - ο Διαγωνιστικό σύστημα: Προκηρύσσονται από το κράτος διαγωνισμοί για την προμήθεια της ενέργειας Α.Π.Ε., η οποία διοχετεύεται στην τοπική κατανάλωση στην τιμή του διαγωνισμού. Το επιπλέον κόστος της ενέργειας Α.Π.Ε. μετακυλύεται στους καταναλωτές μέσω ειδικού τέλους.

Στις 27 Σεπτεμβρίου 2001 εκδόθηκε η Οδηγία 2001/77/ΕΚ «για την προαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας». Η Οδηγία θέτει το πλαίσιο των υποχρεώσεων των Κρατών Μελών σε ό,τι αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. ώστε να εκπληρωθούν οι στόχοι που θέτει η Λευκή Βίβλος για το 2010.

### 3.2.1 Εκστρατεία απογείωσης για τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Φ/Β) αποτελούν υψηλή τεχνολογία με ισχυρό εξαγωγικό δυναμικό σε μια πολύ ανταγωνιστική παγκόσμια αγορά και με σκληρό ανταγωνισμό από την Ιαπωνία και τις ΗΠΑ.

Παρόλο που το κόστος των συστημάτων αυτών εξακολουθεί να είναι μη ανταγωνιστικό σε σχέση με τις υπόλοιπες μορφές Α.Π.Ε. αν δε συνοδεύεται από κρατική ενίσχυση, έχει προβλεφτεί ότι εάν η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών πάνελ διπλασιαστεί, το κόστος θα μειωθεί κατά 17%.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα σχέσης παραγωγής κόστους φωτοβολταϊκών στοιχείων

Για την προώθηση των Φ/Β στην ευρωπαϊκή αγορά προκειμένου να προσφερθεί επαρκώς μεγάλη βάση αγοράς που θα καταστήσει δυνατή τη σοβαρή πτώση των τιμών, η εκστρατεία περιλαμβάνει μια πρωτοβουλία σε κλίμακα Ε.Ε. για εγκατάσταση 500.000 Φ/Β (650.000 kW<sub>p</sub>) στέγης και πρόσοψης στην εγχώρια αγορά και μία εξαγωγική πρωτοβουλία 500.000 Φ/Β (350.000 kW<sub>p</sub>) συστημάτων για χωριά, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1 GW<sub>p</sub>.

Συγκεκριμένα στην Ε.Ε. προβλέπεται η εγκατάσταση 150.000 Φ/Β στέγης συνολικής ισχύος 450.000 kW<sub>p</sub>, και 5.000 συστημάτων για χρήση σε προσόψεις κτιρίων, τουριστικές, αθλητικές και εγκαταστάσεις αναψυχής, συνολικής ισχύος 150.000 kW<sub>p</sub>. Επίσης, η εκστρατεία ενισχύεται με μία επιπρόσθετη δυναμικότητα 50 MW για απομονωμένα συστήματα. Αυτά μπορούν να εγκατασταθούν σε απομακρυσμένες κατοικίες, για την ηλεκτροδότηση μικρών νησιών (ειδικά στην Μεσόγειο θάλασσα) και εξοχικών κατοικιών σε Σκανδιναβικές χώρες.

Στις αναπτυσσόμενες χώρες δίνεται έμφαση σε συστήματα για την ηλεκτροδότηση κατοικιών (150 MW<sub>p</sub>) αλλά και για βασικές εφαρμογές όπως η

άντληση νερού (80 MW<sub>p</sub>), η εκπαίδευση (80MW<sub>p</sub>) , υγεία (20MW<sub>p</sub>) και επικοινωνία (20MW<sub>p</sub>).

Επίσης περιλαμβάνει ειδικές δράσεις, όπως:

- Την προώθηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε σχολεία και άλλα δημόσια κτίρια. Η δράση αυτή δεν εμπεριέχει μόνο εκπαιδευτικό εκπαιδευτικούς στόχους σε μια πρώιμη ηλικία πρόσληψης παραστάσεων, αλλά είναι τεχνικώς υγιής επειδή ελαχιστοποιεί την ανάγκη για ικανότητα αποθήκευσης και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να τύχει ευνοϊκής χρηματοδότησης
- Κίνητρα για φωτοβολταϊκές εφαρμογές στον τουρισμό και σε κέντρα άθλησης και ψυχαγωγίας που προσφέρουν σημαντικό δυναμικό λόγω ισχυρής εποχικής αιχμής ζήτησης μαζικού τουρισμού και του γεγονότος ότι το μεγάλο ποσοστό των τουριστικών θέρετρων είναι απομονωμένα, σε ορεινές περιοχές ή κατά διαφορετικό τρόπο δαπανηρά για παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από τα δίκτυα
- Κίνητρα για χρηματοδότηση από το δημόσιο και αστικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, για παράδειγμα κατανέμοντας το επιπλέον κόστος για τα φωτοβολταϊκά συστήματα σε ολόκληρη τη βάση των πελατών, κατ' αντίθεση προς τους μοναδικούς αγοραστές του ηλεκτρισμού από ηλιακά συστήματα.

### **3.2.2 Πρόγραμμα ενσωμάτωσης Α.Π.Ε. σε 100 κοινότητες**

Ένας από τους στόχους της εκστρατείας απογείωσης είναι και η ανεύρεση 100 Κοινοτήτων στις οποίες το 100% της χρησιμοποιούμενης ενέργειας θα είναι από Α.Π.Ε.. Για τη βέλτιστη αξιοποίηση των τεχνολογιών Α.Π.Ε. θα πρέπει αυτές να προσαρμοστούν στις τοπικές συνθήκες έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα του παραγόμενου ρεύματος.

Στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος, επιλέγονται κάποιες περιοχές, πόλεις και νησιά που στοχεύουν στην 100% κάλυψη των ενεργειακών τους απαιτήσεων από Α.Π.Ε.. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία κοινοτήτων που διαφέρουν στο μέγεθος, στην πυκνότητα πληθυσμού, στην ποιότητα ζωής, στις κλιματικές συνθήκες, στην αρχιτεκτονική των κτιρίων, στα ήθη και έθιμα και φυσικά στα ενεργειακά τους χαρακτηριστικά. Στην προσπάθεια επιλογής των κατάλληλων κοινοτήτων ενδιαφέρουν πρωτίστως:

- Η ενεργειακή κατανάλωση ανά μονάδα επιφάνειας, συγκρινόμενη με την διαθεσιμότητα των Α.Π.Ε.

- Διαθεσιμότητα και είδη ενεργειακών υποδομών
- Μοντέλο κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος
- Μέγεθος

Μία πρώτη κατηγοριοποίηση μπορεί να βασιστεί στη σύγκριση μεταξύ της ενεργειακής κατανάλωσης και της διαθεσιμότητας των Α.Π.Ε.. Σε κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες μπορεί να γίνει και περαιτέρω κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τον τύπο και το μέγεθος της κοινότητας. Έτσι διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες:

- Αστικές κοινότητες: Η εισροή ηλιακής ενέργειας είναι μικρότερη από την κατανάλωση. Η διαθεσιμότητα άλλων Α.Π.Ε. είναι περιορισμένη. Παραδείγματα: Οικοδομικά τετράγωνα, γειτονιές σε αστικές περιοχές, χωριά, πόλεις και μεγαλουπόλεις.
- Αγροτικές κοινότητες: Η εισροή ηλιακής ενέργειας είναι ανάλογη της κατανάλωσης. Συνήθως υπάρχει σημαντική διαθεσιμότητα άλλων Α.Π.Ε. (αιολική, βιομάζα). Παραδείγματα: μικρές αγροτικές περιοχές, επαρχία.
- Απομονωμένες κοινότητες: Η εισροή ηλιακής ενέργειας είναι μεγαλύτερη ή ανάλογη της κατανάλωσης. Συνήθως υπάρχει σημαντική διαθεσιμότητα άλλων Α.Π.Ε.. Δεν υπάρχει ή είναι ασθενής η σύνδεση με εξωτερικό δίκτυο ηλεκτρισμού. Παραδείγματα: απομονωμένες περιοχές, νησιά (μικρά και μεγάλα), αυτόνομες περιοχές.

Ο βαθμός της διεύθυνσης των Α.Π.Ε. εξαρτάται σημαντικά από την ύπαρξη και τον βαθμό ανάπτυξης ενεργειακών υποδομών. Για παράδειγμα σε κοινότητες που είναι προς κατασκευή μπορούν να σχεδιαστούν έτσι οι υποδομές ώστε να δίνεται από την αρχή η δυνατότητα ενσωμάτωσης των Α.Π.Ε.. Από την άλλη μεριά, σε ήδη υπάρχουσες κοινότητες, με αρκετά ανεπτυγμένες υποδομές θα χρειαστούν χρόνια μέχρι οι Α.Π.Ε. να καταλαμβάνουν ένα σημαντικό ποσοστό στη διάθεση της ενέργειας.

### **3.3 ΠΡΑΣΙΝΗ ΒΙΒΛΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΜΠΟΡΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ**

Βάσει του Πρωτοκόλλου του Κυότο, που εγκρίθηκε το 1997, η Ευρωπαϊκή Κοινότητα δεσμεύτηκε να μειώσει τις εκπομπές της σε αέρια φαινομένου θερμοκηπίου κατά 8% κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος 2008-2012 σε σύγκριση με τα επίπεδά τους το 1990 [1]. Η Κοινότητα επιθυμεί να τεθεί ταχέως σε



εφαρμογή το κοινοτικό σύστημα συναλλαγών εκπομπών, ώστε να αποκτηθεί πείρα πριν αρχίσει το διεθνές πρόγραμμα συναλλαγών εκπομπών το 2008.

Οι εμπορικές συναλλαγές εκπομπών είναι ένα σύστημα σύμφωνα με το οποίο κατανέμονται σε εταιρείες μερίδια για τις εκπομπές τους σε αέρια του θερμοκηπίου, σε συνάρτηση με τους στόχους της κυβέρνησής τους σε θέματα περιβάλλοντος. Το σύστημα είναι πολύ πρακτικό, εφόσον επιτρέπει σε επιμέρους εταιρείες να εκπέμπουν περισσότερο από το επιτρεπόμενο όριό τους, υπό την προϋπόθεση ότι μπορούν να βρουν άλλη εταιρεία η οποία έχει εκπέμψει λιγότερο από το επιτρεπόμενο και τους πωλεί το μερίδιό της.

Το σύστημα επιτρέπει να υπάρχει κάποια ευελιξία, χωρίς κανένα μειονέκτημα για το περιβάλλον, αφού το συνολικό ποσό του δικαιώματος εκπομπών είναι καθορισμένο. Ευνοεί επίσης την ανάπτυξη νέων φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών. Οι εταιρείες, κινούμενες με βάση το κέρδος που αποκομίζουν από την πώληση των εκπομπών τους, αναπτύσσουν και χρησιμοποιούν τεχνολογίες που δεν ρυπαίνουν.

Η εμπορία εκπομπών σε κοινοτικό επίπεδο θα μπορούσε να μειώσει κατά σχεδόν ένα πέμπτο τις δαπάνες για τη συμμόρφωση προς το Πρωτόκολλο του Κυότο. Όσον αφορά στο πεδίο εφαρμογής του συστήματος, μπορούν να προσδιορισθούν οι τομείς που προκαλούν ρύπανση, με γνώμονα τις ήδη υπάρχουσες περιβαλλοντικές οδηγίες (μεγάλες εγκαταστάσεις καύσεως). Προκειμένου να περιορισθούν οι κίνδυνοι στρέβλωσης μεταξύ "συναλλασσομένων" και "μη συναλλασσομένων" πηγών, η καλύτερη λύση συνίσταται στην εφαρμογή αυστηρών πολιτικών και μέτρων στις μη συναλλασσόμενες πηγές, αφήνοντάς τους τη δυνατότητα να ενταχθούν στο σύστημα εμπορίας εκ των υστέρων.

Η αρχή των εμπορεύσιμων μεριδίων (ή εκπομπών) δεν είναι νέα. Έχει ήδη τεθεί σε εφαρμογή στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής πολιτικής (Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ) και σε άλλες πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις.

Τελικοί στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως ορίζει η πράσινη βίβλος, είναι:

- αειφορία: ανάπτυξη των Α.Π.Ε. και των τεχνολογιών χαμηλών ρύπων, μείωση της ενεργειακής ζήτησης, αναστολή αλλαγής του κλίματος
- ανταγωνιστικότητα: όφελος προς τον καταναλωτή και στο σύνολο, άμβλυνση των επιπτώσεων από την αύξηση των τιμών των καυσίμων, πρωτοπορία στις ενεργειακές τεχνολογίες αιχμής
- ασφάλεια εφοδιασμού: μείωση της ζήτησης ορυκτών καυσίμων, απεξάρτηση από αυτά, βελτίωση εξοπλισμού για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης

### 3.4 ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ ΤΩΝ Α.Π.Ε. ΣΤΗΝ Ε.Ε.

#### 3.4.1 Προγράμματα προώθησης των Α.Π.Ε. στο παρελθόν

Ως μέσα για την υλοποίηση της στρατηγικής και του σχεδίου δράσης που περιγράφονται στη Λευκή Βίβλο προτάθηκαν από πολυετή προγράμματα προώθησης των Α.Π.Ε., το ALTENER και το JOULE-THERMIE.

Το πρόγραμμα ALTENER αποτέλεσε το κύριο όργανο για την υποστήριξη και παρακολούθηση της Ευρωπαϊκής πολιτικής για τις Α.Π.Ε.. Υποστήριξε την ανάπτυξη στρατηγικών, προτύπων και εναρμόνισης ανά κλάδο αγοράς. Δημιουργήθηκε το 1993 και ανανεώθηκε το 1997 (ALTENER II). Μέσω του προγράμματος δόθηκε στήριξη στο σχεδιασμό Α.Π.Ε. σε εθνικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο και σε υποδομές πληροφόρησης και εκπαίδευσης. Στηρίχθηκε επίσης η ανάπτυξη νέων αγορών και χρηματοδοτικών μέσων. Μείζονα επίσης δράση στο πρόγραμμα αποτέλεσε η διάδοση των πληροφοριών.

Προκειμένου να αυξηθεί ο αντίκτυπος του προγράμματος ALTENER II στη διείσδυση των Α.Π.Ε. στην αγορά, προτάθηκαν νέα μέτρα για να βοηθήσουν να υπερνικηθούν τα εμπόδια και να αυξηθεί η επιχειρησιακή δυναμικότητα για την παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε.. Το ALTENER II έληξε τον Δεκέμβριο του 2002, αλλά συνεχίστηκε με την ένταξη του σε ένα νέο πολυετές πρόγραμμα δράσης, το πρόγραμμα «Εξυπνη ενέργεια για την Ευρώπη» (2003-2006) που περιγράφεται στη συνέχεια.

Επιπλέον η προώθηση καινοτόμων και αποδοτικών τεχνολογιών Α.Π.Ε. και η διάδοση των σχετικών πληροφοριών έλαβαν επίσης στήριξη από το πρόγραμμα JOULE-THERMIE, που υλοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του «Τετάρτου Προγράμματος Πλαισίου» (1994-1998).

Με απόφαση του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου (22 Δεκεμβρίου 1998) θεσπίστηκε για τη περίοδο 1998-2002, πολυετές πρόγραμμα πλαίσιο για όλες τις κοινοτικές δράσεις συμπεριλαμβανομένων και θεμάτων ενέργειας, περιβάλλοντος και βιώσιμης ανάπτυξης, το «Πέμπτο Πρόγραμμα Πλαίσιο». Η πρώτη δράση του πέμπτου προγράμματος πλαισίου που αφορούσε και στον ενεργειακό τομέα, περιλάμβανε προγράμματα που στόχευαν σε καθαρότερα ενεργειακά συστήματα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής και της χρησιμοποιούμενης ενέργειας στην Ευρώπη.

### 3.4.2 Προγράμματα προώθησης των Α.Π.Ε. σήμερα

Στις 9 Απριλίου 2002 η Επιτροπή πρότεινε ένα νέο πολυετές πρόγραμμα δράσης στον τομέα της ενέργειας, το πρόγραμμα «Εξυπνη ενέργεια για την Ευρώπη» (2003-2006), το οποίο αποτελεί συνέχεια του προηγούμενου προγράμματος πλαισίου που έληξε στις 31 Δεκεμβρίου 2002. Για την περίοδο 2003-2006 η Επιτροπή πρότεινε να διατεθεί στο πρόγραμμα προϋπολογισμός 215 εκ. Ευρώ. Ο εν λόγω προϋπολογισμός λαμβάνει υπόψη του τους πολιτικούς προσανατολισμούς της Ένωσης, κυρίως την κοινοτική στρατηγική για τη βιώσιμη ανάπτυξη που εγκρίθηκε από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Γκέτεμποργκ τον Ιούνιο του 2001. Με το νέο πρόγραμμα δίνεται έμφαση στην ενίσχυση των Α.Π.Ε. μέσω του προγράμματος ALTENER για το οποίο έχουν προϋπολογιστεί 86 εκ. Ευρώ. Ως συνέχεια του 4<sup>ου</sup> και 5<sup>ου</sup> Προγράμματος Πλαισίου θεσπίστηκε το 6ο Πρόγραμμα Πλαίσιο για την Έρευνα και την Τεχνολογική Ανάπτυξη (2002-2006), το οποίο καλύπτει όλα τα θεματικά πεδία μεταξύ των οποίων και τα ενεργειακά.

Ειδικότερα, η Προτεραιότητα 6.1 «Αειφόρα ενεργειακά συστήματα» προβλέπει την χρηματοδότηση:

- βραχυ-μεσοπρόθεσμων δραστηριοτήτων. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται δραστηριότητες που αφορούν στην έρευνα για την ανάπτυξη περισσότερο αποδοτικών τεχνολογιών Α.Π.Ε., με στόχο την είσοδό τους στις αγορές της Ε.Ε., καθώς επίσης και σε έρευνα για την μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση των Α.Π.Ε. στα ενεργειακά συστήματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η έρευνα για την ενσωμάτωση των Α.Π.Ε. θα υποστηρίζεται από την νέα πρωτοβουλία «CONCERTO» που αποτελεί ουσιαστικά τον προπομπό για την εφαρμογή ουσιαστικής πολιτικής ανάπτυξης των Α.Π.Ε.. Ο Προϋπολογισμός των δραστηριοτήτων αυτών ανέρχεται συνολικά σε 405 εκ. Ευρώ.
- μεσο-μακροπρόθεσμων δραστηριοτήτων. Κύριοι στόχοι των μεσο-μακροπρόθεσμων δραστηριοτήτων είναι η μείωση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. σε ανταγωνιστικά επίπεδα με την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών και με ταυτόχρονη βελτίωση της ασφάλειας, διαθεσιμότητας και διάρκειας των Α.Π.Ε.. Ο προϋπολογισμός των δραστηριοτήτων αυτών ανέρχεται επίσης σε 405 εκ. Ευρώ.

### *3.4.2.1 Ένα τυπικό παράδειγμα εθνικής πολιτικής για τις Α.Π.Ε. Γερμανία και Ισπανία*

Τα κράτη μέλη της Ε.Ε. έχουν καθορίσει τιμές αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές (tariff systems) καθώς και κίνητρα για επενδύσεις, σύμφωνα με τις τοπικές συνθήκες και τη δομή του ηλεκτρικού συστήματος. Συνήθως στην αξιοποίηση τους υπάρχουν οικονομικά κίνητρα από εθνικούς πόρους, περιφερειακούς ή τοπικούς και προβλέπεται οικονομική υποστήριξη στην επένδυση. Ιδιαίτερα πρέπει να αναφερθεί η περίπτωση της Ισπανίας, της Δανίας και της Γερμανίας που καθιέρωσαν με εθνική νομοθεσία ικανοποιητικές οικονομικά ελάχιστες τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές και τροφοδοτεί τα δίκτυα των εταιριών ηλεκτρισμού.

#### **Ισπανία**

Ο Ισπανικός Νόμος 2818/1998 για την ηλεκτροπαραγωγή από Α.Π.Ε. ψηφίστηκε τον Δεκέμβριο του 1998 και η εφαρμογή του άρχισε την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1999. Ο νόμος δίνει έμφαση στην ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας καθώς και των αστικών απορριμμάτων και περιλαμβάνει την συμπαραγωγή. Η τιμολόγηση βασίζεται σε μια ανάλυση που διακρίνει διάφορες περιπτώσεις λαμβάνοντας υπόψη και την ισχύ για κάθε μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, και στην εφαρμογή μαθηματικών τύπων. Μια αντιπροσωπευτική τιμή για τις νέες εφαρμογές είναι της τάξης των 0,068 €/kWh, με μικρές διαφοροποιήσεις για κάθε μορφή ανανεώσιμης πηγής, ενώ για τα ηλιακά – φωτοβολταϊκά οι τιμές είναι 0,408 €/kWh, για μονάδες ισχύος μέχρι 5 kW<sub>p</sub> και για μεγαλύτερες περίπου 0,224 €/kWh.

#### **Γερμανία**

Ο Γερμανικός Νόμος EEG (Erneuerbare-Energie-Gesetz) ή REL (Renewable Energy Law), που ρυθμίζει την αγορά και τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται αποκλειστικά από τις ανανεώσιμες πηγές, είναι σε εφαρμογή από την 1<sup>η</sup> Απριλίου 2000. Ο Ισπανικός Νόμος 2818/1998 προηγήθηκε του Γερμανικού και ίσως σε ορισμένα σημεία του να τον επηρέασε. Αποβλέπει στην υποστήριξη των προσπαθειών για βιώσιμη ανάπτυξη στην παροχή ενέργειας, στον διπλασιασμό της συμμετοχής των Α.Π.Ε. στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας κατά το τέλος της δεκαετίας, ενώ μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα επιδιώκει να μειώσει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και να επιτύχει την ανταγωνιστικότητα έναντι των

συμβατικών πηγών. Σε γενικές γραμμές, ο Νόμος καθορίζει τις ελάχιστες τιμές αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται αποκλειστικά από Α.Π.Ε..

Ειδικότερα η τιμή της kWh από φωτοβολταϊκά επηρεάστηκε από τον Ισπανικό Νόμο (0,4 €/ kWh στην Ισπανία), και καθορίστηκε η τιμή στη Γερμανία κατ' αναλογία με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στις δύο χώρες, ίση προς 0,52 €/ kWh. Η τιμή αυτή προβλέφθηκε για 20 χρόνια με ορισμένες αναθεωρήσεις που αφορούν στην ορθολογική τιμολόγηση και αναπροσαρμογή στα επόμενα χρόνια. Συγκεκριμένα από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2002 πραγματοποιείται μείωση της τιμής κατά 5% ετησίως. Έτσι, για εγκαταστάσεις που ξεκίνησαν τη λειτουργία τους το 2002 η επιχορήγηση ανέρχεται σε 0,48 €/kWh.

Σύμφωνα με το Γερμανικό Νόμο όταν απαιτείται η ενίσχυση του δικτύου για τη σύνδεση των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε., αυτό γίνεται από τον διαχειριστή του δικτύου με δαπάνες του, κρατώντας λεπτομερή στοιχεία της απαιτούμενης επένδυσης, ώστε να δικαιολογήσει με πλήρη διαφάνεια τις δαπάνες των προσφερόμενων υπηρεσιών. Το μέτρο αυτό ξεκίνησε από τη Δανία το 1997 και έγινε αποδεκτό από την Ε.Ε.

Οι τοπικές εταιρίες διαχείρισης δικτύων διανομής, καθώς και οι εταιρίες των δικτύων μεταφοράς έχουν την υποχρέωση να αγοράζουν όλη την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις Α.Π.Ε. για τα δίκτυά τους κατά προτεραιότητα σαν ένα ποσοστό των συνολικών τους πωλήσεων και να πληρώσουν τις προβλεπόμενες τιμές, ενώ άλλες εταιρίες που δεν έχουν την υποχρέωση διευκολύνουν τη μεταφορά ενέργειας για την επίτευξη καλύτερου οικονομικού αποτελέσματος.

#### ***3.4.2.2 Η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας***

Στις 19 Δεκεμβρίου 1996 υιοθετήθηκε η Οδηγία 96/92/EC η οποία ορίζει τους κοινούς κανόνες για την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας στα Κράτη Μέλη. Σύμφωνα με αυτήν τα Κράτη Μέλη θα έπρεπε να έχουν απελευθερώσει το 26% της παραγωγής τους μέχρι τις 19/2/99, το 28% μέχρι το 2000 και το 33% μέχρι το 2003. Η Ελλάδα έλαβε δύο χρόνια παράταση για την υλοποίηση της απελευθέρωσης.

Η παρούσα οδηγία επίσης θεσπίζει κοινούς κανόνες που αφορούν την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Καθορίζει τους όρους οργάνωσης και λειτουργίας του τομέα του ηλεκτρισμού, την πρόσβαση στην αγορά, τα κριτήρια και τις διαδικασίες που εφαρμόζονται όσον αφορά τις προσκλήσεις για



την υποβολή προσφορών, τη χορήγηση αδειών, καθώς και την εκμετάλλευση των δικτύων.

Σύμφωνα με έκθεση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας προβλέπεται να συμβάλλει θετικά και στο περιβάλλον αφού θα δοθεί η δυνατότητα στους καταναλωτές να επιλέξουν καθαρότερες ενεργειακές πηγές.

Μεταγενέστερες Εκθέσεις της Επιτροπής που ακολούθησαν την έκδοση της Οδηγίας επικεντρώνονται στο ζήτημα του περιβάλλοντος και συγκεκριμένα στον ρόλο της ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, καθώς επίσης και στους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύμφωνα με την Έκθεση-COM (1998) 167 επιβάλλεται σε μια απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρισμού η εναρμόνιση ορισμένων κανόνων σε ότι αφορά τις Α.Π.Ε. ώστε να αποφευχθεί η στρέβλωση του εμπορίου και του ανταγωνισμού για τον ηλεκτρισμό αυτής της προέλευσης. Στην έκθεση διευκρινίζονται οι υιοθετούμενοι μηχανισμοί με τους οποίους εξασφαλίζεται η προμήθεια και η χρηματοδότηση των Α.Π.Ε. καθώς και η συμβατότητα των μηχανισμών αυτών με την κοινοτική νομοθεσία.

Στην ανακοίνωση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο (COM 2000) 297 αναφέρεται ότι λόγω της αύξησης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας η παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε. πρέπει να φτάσει στο 22% της παραγωγής για να υπάρξει συμμόρφωση με τη συνθήκη του Κυότο και προτείνει να εφαρμοστούν πολιτικές ενίσχυσης των Α.Π.Ε..

Στις 13/9/2000 η Γενική Διεύθυνση IV της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, αρμόδια για θέματα ανταγωνισμού, κυκλοφόρησε σχέδιο με θέμα «Κοινοτικές κατευθύνσεις / οδηγίες στον τομέα των κρατικών επιδοτήσεων που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος». Σύμφωνα με αυτό προτείνει για ψήφιση τα ακόλουθα για την οικονομική υποστήριξη που μπορούν να παρέχουν τα Κράτη-Μέλη σε επενδύσεις Α.Π.Ε..

- Επιδότηση επενδύσεων Α.Π.Ε.: Μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό επιδότησης:  $30 + 10 = 40\%$  επί του συνολικού επιλέξιμου κόστους της επένδυσης Α.Π.Ε. (ένα επιπρόσθετο ποσοστό επιδότησης 10% μπορεί να δίνεται, πέραν του 40%, για εγκαταστάσεις Α.Π.Ε. που εξυπηρετούν συνολικά μία κοινότητα, π.χ. ένα νησί ή μια ολόκληρη αστική περιοχή).

- Επιλέξιμο κόστος επένδυσης είναι η διαφορά μεταξύ του πραγματικού κόστους της συγκεκριμένης εγκατάστασης Α.Π.Ε. και του αντίστοιχου κόστους ενός συμβατικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής της ίδιας εγκατεστημένης ισχύος.
- Επιδότηση λειτουργίας εγκαταστάσεων Α.Π.Ε.

Τα Κράτη – Μέλη έχουν δύο εναλλακτικές δυνατότητες, σε ό,τι αφορά την επιδότηση που μπορούν να παρέχουν στην KWh που παράγεται από Α.Π.Ε.:

- Μπορούν να επιδοτούν τη διαφορά μεταξύ του πραγματικού κόστους παραγωγής της KWh από Α.Π.Ε. και της (μέσης) τιμής της KWh στην (απελευθερωμένη) αγορά. Η επιδότηση όμως αυτή της διαφοράς μπορεί να συνεχίζεται μόνο μέχρι να αποπληρωθεί η καθαρή επένδυση της συγκεκριμένης εγκατάστασης Α.Π.Ε., δηλ. η διαφορά μεταξύ του συνολικού κόστους της εγκατάστασης αυτής και της (τυχόν) κρατικής επιδότησης της επένδυσης. Από εκεί και πέρα, καμία KWh που παράγει η συγκεκριμένη εγκατάσταση Α.Π.Ε. δεν μπορεί πλέον να επιδοτείται.
- Εναλλακτικά τα Κράτη – Μέλη μπορούν να επιδοτούν τη διαφορά κόστους της KWh, όπως και παραπάνω, χωρίς όριο στο συνολικό αριθμό KWh, που θα επιδοτούνται. Στην περίπτωση όμως αυτή, η επιδότηση της διαφοράς κόστους της KWh μπορεί να δίνεται μόνο για πέντε χρόνια, με γραμμική μάλιστα μείωση του ύψους της, από 100% της διαφοράς τον πρώτο χρόνο, σε 0% στο τέλος του πέμπτου χρόνου. Εναλλακτικά, η επιδότηση της διαφοράς κόστους της KWh μπορεί να διατηρείται σταθερή μέσα στην πενταετία, αλλά στο μέσο ύψος του 50% της διαφοράς.

### 3.5 ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Είναι γεγονός ότι ο πιο σημαντικός παράγοντας που καθορίζει εν πολλοίς το ποσοστό διείσδυσης της ηλεκτροπαραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) είναι η εφαρμοζόμενη πολιτική, για τη διευκόλυνση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., τόσο σε θέματα αδειοδότησης, όσο και σε θέματα

σύνδεσης με το δίκτυο, αλλά και σε θέματα πολιτικής τιμών (χρέωση, αγορά ηλεκτρικού ρεύματος).

Στην Ελλάδα ένας απ' τους βασικούς λόγους καθυστέρησης της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, υπήρξε η καθυστέρηση στη δημιουργία κατάλληλου νομικού πλαισίου, που θα επέτρεπε να γίνουν επενδύσεις στις Α.Π.Ε..

Την τελευταία όμως δεκαετία το ελληνικό ενεργειακό σύστημα βρίσκεται σε φάση σημαντικών αλλαγών. Η διείσδυση του φυσικού αερίου, η κατασκευή των διευρωπαϊκών δικτύων, η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της εξοικονόμησης ενέργειας και τέλος η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν τα νέα δεδομένα του.

Σημαντικές είναι οι επιπτώσεις των νέων αυτών δεδομένων στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας, στην μείωση της εξάρτησης της από το εισαγόμενο πετρέλαιο, με όλα τα συνεπαγόμενα οφέλη στην εθνική οικονομία, στην εξοικονόμηση μη ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων, στην αύξηση της αποδοτικότητας των διαδικασιών παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, στην προστασία του περιβάλλοντος και τέλος στην βελτίωση των παρεχομένων υπηρεσιών στους καταναλωτές.

### **3.5.1 Η πορεία προς την απελευθέρωση της ενέργειας**

Μέχρι το 1985 η Δ.Ε.Η. ήταν ο αποκλειστικός φορέας στην Ελλάδα που μπορούσε να επενδύσει σε Α.Π.Ε..

Ο Ν. 1599/86 έδωσε για πρώτη φορά τη δυνατότητα και σε άλλους πλην της Δ.Ε.Η. (π.χ. Τοπική Αυτοδιοίκηση) να προχωρήσουν σε επενδύσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές, προέβλεπε όμως τέτοιες γραφειοκρατικές διαδικασίες για την απόκτηση των σχετικών αδειών, που ουσιαστικά έμεινε ανενεργός, εκτός ελαχίστων περιπτώσεων. Οι τιμές πώλησης του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος μάλιστα στη Δ.Ε.Η. δεν ήταν καθόλου ελκυστικές και βεβαίως πολύ χαμηλότερες εκείνων που ίσχυαν την αντίστοιχη περίοδο στην Ευρώπη.

Ουσιαστικό βήμα στην ανάπτυξη των Α.Π.Ε. στην Ελλάδα έδωσε ο Ν.2244/94 για τη «Ρύθμιση θεμάτων Ηλεκτροπαραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις», ο οποίος για πρώτη φορά δίνει τη δυνατότητα και σε ιδιώτες να επενδύσουν σε Α.Π.Ε., ενώ παράλληλα έλυσε κάποια γραφειοκρατικά προβλήματα που με το προηγούμενο νόμο φάνταζαν

αξεπέραστα (π.χ. η απαίτηση για οικοδομική άδεια για εγκατάσταση Ανεμογεννητριών). Ακόμα με το νόμο αυτό οι τιμές πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., προσαρμόστηκαν μερικώς στα Ευρωπαϊκά δεδομένα κάνοντας τις επενδύσεις σε Α.Π.Ε. των ιδιωτών σχετικά ανταγωνιστικές, κυρίως για τα μεγάλα αιολικά συστήματα [5] [6].

### **3.5.2 Ο νόμος απελευθέρωσης της ενέργειας**

Το Δεκέμβριο του 1999 ψηφίστηκε ο νέος νόμος για την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, Ν. 2773/99 με τίτλο «απελευθέρωση αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας – Ρύθμιση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής και λοιπές διατάξεις» - που κι αυτός φέρνει σοβαρές αλλαγές στη παραγωγή, μεταφορά, διανομή και προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας. Ο νόμος αυτός καθορίζει το βασικό πλαίσιο ρύθμισης της απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που άρχισε να ισχύει από τον Φεβρουάριο του 2001 σύμφωνα με την Οδηγία 96/92 της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Για πρώτη φορά εισάγονται στην ελληνική επικράτεια όροι, όπως η «Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας» (Ρ.Α.Ε.), ο «Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας», ο «Κώδικας Διαχείρισης του Συστήματος», ενώ η Δ.Ε.Η. περιορίζεται από το νόμο μόνο ως αποκλειστικός διαχειριστής του «Δικτύου διανομής της Ηλεκτρικής Ενέργειας», το οποίο και της ανήκει κατ' αποκλειστικότητα. Τέλος ρυθμίζονται οι αρμοδιότητες του «Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας».

#### **3.5.2.1 Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας**

Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) [7] είναι ανεξάρτητη διοικητική αρχή επιφορτισμένη με την παρακολούθηση και τον έλεγχο της λειτουργίας της αγοράς ενέργειας και την διατύπωση εισηγήσεων για την τήρηση των κανόνων του ανταγωνισμού και την προστασία των καταναλωτών.

Επιπλέον, η Ρ.Α.Ε. είναι επιφορτισμένη με τη διατύπωση γνωμοδοτήσεων προς τον υπουργό ανάπτυξης όσον αφορά την αδειοδότηση εγκαταστάσεων Α.Π.Ε. καθώς και με την παρακολούθηση της εξέλιξης της πορείας υλοποίησης αυτών. Τέλος, εισηγείται νομοθετικές παρεμβάσεις για περαιτέρω απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας.

### ***3.5.2.2 Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.)***

Στόχος του Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε. [8] είναι η λειτουργία, εκμετάλλευση, διασφάλιση της συντήρησης και η ανάπτυξη του συστήματος σε όλη τη χώρα, καθώς και η διασύνδεση του με άλλα δίκτυα ώστε να διασφαλίζεται ο επαρκής εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος ο φορέας αυτός ανέλαβε από το από τον Οκτώβριο του 2002 την εμπορική διαχείριση των μονάδων Α.Π.Ε. στο διασυνδεδεμένο δίκτυο της χώρας.

### ***3.5.2.3 Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.)***

Στόχος του Κ.Α.Π.Ε. [6] είναι η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η εξοικονόμηση και ορθολογική χρήση ενέργειας, καθώς και η υποστήριξη και ο συντονισμός όσων δραστηριοποιούνται σε αυτούς τους τομείς

Το κέντρο είναι εξοπλισμένο με εργαστήρια πιστοποίησης τεχνολογιών Α.Π.Ε. Επίσης εκπονεί μελέτες για τον προσδιορισμό του φυσικού και οικονομικού δυναμικού και παρακολουθεί τις σχετικές με Α.Π.Ε. επενδύσεις.

### ***3.5.2.4 Κώδικας διαχείρισης του δικτύου***

Με το «Κώδικα διαχείρισης του δικτύου» ρυθμίζονται οι όροι και οι προϋποθέσεις κάτω απ' τους οποίους γίνεται η πρόσβαση στο δίκτυο διανομής των κατόχων αδειών παραγωγής ή προμήθειας ηλεκτρικού ρεύματος.

Έτσι με βάση τη νέα αυτή νομοθεσία τα οριζόμενα στο Άρθρο 1 του Ν. 2244/94 για την αποκλειστικότητα της Δ.Ε.Η., στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές πηγές παύουν πλέον να ισχύουν. Επίσης η Δ.Ε.Η. παύει να είναι πλέον η αποκλειστική ρυθμιστική αρχή.

### ***3.5.2.5 Αυτοπαραγωγοί και ανεξάρτητοι παραγωγοί***

Παράλληλα διατηρείται το δικαίωμα και σε άλλους πλην της Δ.Ε.Η., (φυσικά ή νομικά πρόσωπα) να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από Α.Π.Ε. είτε ως αυτοπαραγωγοί, είτε ως ανεξάρτητοι παραγωγοί, ενώ δίνεται το δικαίωμα και σε άλλους πλην της Δ.Ε.Η. να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και να τη προμηθεύουν σε τρίτους πλην της Δ.Ε.Η. από συμβατικές πηγές.



- Αυτοπαραγωγοί κατά την έννοια του Ν.2244/94, θεωρούνται εκείνοι που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (από Ανανεώσιμες Πηγές) για τη κάλυψη κυρίως των δικών τους αναγκών.
- Ανεξάρτητοι παραγωγοί θεωρούνται εκείνοι που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και τη διαθέτουν στο δίκτυο διανομής.

Η συνεργασία των νέων Αρχών που ορίζονται στο Ν.2773/99 αλλά και της Δ.Ε.Η. με τους ιδιώτες – παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., είναι προϋπόθεση τόσο στη φάση υλοποίησης μιας επένδυσης στο τομέα των Α.Π.Ε., όσο και στη φάση λειτουργίας της.

Σημαντική εξάλλου είναι και η υπάρχουσα τιμολογιακή πολιτική, τόσο όσο αφορά στις τιμές που χρεώνει τις επενδύσεις στο δίκτυο διανομής, (απαραίτητες για τη σύνδεση του παραγωγού με τη Δ.Ε.Η.), όσο και στις τιμές που η Δ.Ε.Η. αγοράζει το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα από Α.Π.Ε..

#### **3.5.2.6 Διασυνδεδεμένο και μη διασυνδεδεμένο δίκτυο**

Σημαντικός παράγοντας στην Ελλάδα είναι ο διαχωρισμός της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε «διασυνδεδεμένο σύστημα» και «μη διασυνδεδεμένο σύστημα».

Μη διασυνδεδεμένα νησιά κατά το Άρθρο 1 του Ν.2773/99, είναι τα νησιά της ελληνικής επικράτειας, των οποίων το δίκτυο διανομής δεν συνδέεται με το Σύστημα και το δίκτυο διανομής της ηπειρωτικής Ελλάδας.

Στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τόσο από ανεξάρτητους παραγωγούς, όσο και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας των αυτοπαραγωγών διατίθενται αποκλειστικά στη Δ.Ε.Η. σύμφωνα με τους όρους σχετικής σύμβασης που συνάπτεται μεταξύ τους. Η Δ.Ε.Η. έχει την υποχρέωση να αγοράζει την ηλεκτρική ενέργεια.

Παρ' όλα προβλέφτηκε ότι η υποχρέωση αυτή δεν υφίσταται για τη Δ.Ε.Η. στη περίπτωση μόνο που υπάρχει πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας από αυτοπαραγωγό, εφόσον με αιτιολογημένη απόφαση διαπιστώνεται ότι οι τοπικές συνθήκες δεν επιτρέπουν τη διάθεση της στη κατανάλωση. Οι τοπικές αυτές συνθήκες αφορούν, είτε σε παραγωγή από Α.Π.Ε. ενέργειας στιγμιαίας ισχύος πάνω από 15% της στιγμιαίας ζήτησης, όποτε η Δ.Ε.Η. για λόγους ευστάθειας του δικτύου μπορεί να αποσυνδέει τους αυτοπαραγωγούς, είτε για ειδικούς τεχνικούς λόγους που πρέπει να αιτιολογήσει επαρκώς.

Αυτός ο όρος δημιουργεί πολλά ερωτήματα για το κατά πόσο είναι σε θέση το δίκτυο να αξιοποιήσει την προερχόμενη από Α.Π.Ε. ενέργεια κατά 100%. Επίσης μένει ανοιχτό το θέμα της αποζημίωσης σε περιπτώσεις όπου τελικά ο παραγωγός δεν δύναται να διαθέσει την παραγόμενη ενέργεια στο σύστημα.

Στο διασυνδεδεμένο δίκτυο η διάθεση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ανεξάρτητους παραγωγούς και της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας των αυτοπαραγωγών γίνεται με βάση τα Άρθρα 19 και 20 του Ν.2773/99, και καθορίζονται από τους κώδικες «Διαχείρισης του συστήματος» και «Συναλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας».

Στη περίπτωση αυτή η αποκλειστικότητα της Δ.Ε.Η., στην απορρόφηση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν ισχύει απόλυτα. Υπάρχει δυνατότητα της προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας σε τρίτους κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις.

Κάθε παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. που συνδέεται με το Σύστημα (απευθείας ή μέσω του δικτύου της Δ.Ε.Η.), έχει υποχρέωση να συνάψει σύμβαση με το διαχειριστή του συστήματος, ενώ αν συνδέεται με το δίκτυο (μη διασυνδεδεμένα νησιά) έχει υποχρέωση να συνάψει σύμβαση με το διαχειριστή του δικτύου (Δ.Ε.Η.). Οι συμβάσεις αυτές μεταξύ των ανεξάρτητων παραγωγών και των παραπάνω διαχειριστικών αρχών είναι δεκαετούς διάρκειας με δυνατότητα ανανέωσης με νέα σύμβαση.

Με τις συμβάσεις αυτές μεταξύ του αυτοπαραγωγού ή του ανεξάρτητου παραγωγού και της διαχειριστικής αρχής, ρυθμίζονται και οι τεχνικοί και οικονομικοί όροι διασύνδεσης και διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας στην αρχή αυτή.

Με βάση το Άρθρο 35 του Ν.2773/99, ο διαχειριστής του συστήματος είναι υποχρεωμένος να δίνει προτεραιότητα κατά τη κατανομή του φορτίου σε διαθέσιμες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., των οποίων η ισχύς δεν υπερβαίνει τα 50 MW.

### **3.5.3 Αδειοδότηση**

Για την ίδρυση ή επέκταση σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. με ισχύ πάνω από 20 kW απαιτείται ειδική άδεια, η οποία χορηγείται από τον Υπουργό Ανάπτυξης, ύστερα από γνώμη της Ρ.Α.Ε. σύμφωνα με τους όρους και προϋποθέσεις που προβλέπονται στο Ν.2773/99 και στον Κανονισμό Αδειών [5].

Παράλληλα, εκτός από την απαίτηση χορήγησης ειδικής άδειας παραγωγής, για σταθμούς με ισχύ πάνω από 20kW απαιτείται και ο εφοδιασμός με άδεια εγκατάστασης ή επέκτασης, καθώς και λειτουργίας. Η διαδικασία έκδοσης αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιγράφεται στην Υ.Α. Δ6/Φ1/2000.

Η άδεια εγκατάστασης χορηγείται από την αρμόδια υπηρεσία της κάθε Περιφέρειας, ύστερα από κατάθεση των ενδιαφερομένων της αίτησης και των σχετικών δικαιολογητικών όπως αναφέρονται στην Απόφαση (εγκεκριμένοι περιβαλλοντικοί όροι, σχετικές μελέτες, διαγράμματα κλπ).

Η άδεια λειτουργίας χορηγείται από την αρμόδια υπηρεσία της Περιφέρειας στην οποία υπάγεται η εγκατάσταση για δέκα (10) χρόνια και μπορεί να ανανεώνεται.

#### **3.5.4 Σύνδεση παραγωγών με το δίκτυο του Διαχειριστή**

Για τη διασύνδεση των εγκαταστάσεων του σταθμού του ανεξάρτητου παραγωγού με το δίκτυο του Διαχειριστή, και στη περίπτωση που ο σταθμός του αυτοπαραγωγού δεν είναι εγκατεστημένος σε όμορο γήπεδο όπου γίνεται η κατανάλωση, κατασκευάζεται «Δίκτυο Διασύνδεσης» το οποίο θα περιλαμβάνει τις αναγκαίες γραμμές διασύνδεσης και όλες τις απαραίτητες εγκαταστάσεις (π.χ. συμπληρωματικά έργα σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις της Δ.Ε.Η.). Το δίκτυο αυτό θα προκύπτει ως βέλτιστη τεχνικά και οικονομικά λύση για τη σύνδεση του παραγωγού με το δίκτυο της επιχείρησης.

Ειδικά για φωτοβολταϊκούς σταθμούς η διασύνδεση με το δίκτυο του Διαχειριστή για σταθμούς εγκατεστημένης ισχύος κάτω των 100 kW γίνεται στη χαμηλή τάση, ενώ για σταθμούς πάνω από 100 kW, η διασύνδεση γίνεται στη μέση τάση.

Η Δ.Ε.Η. αναλαμβάνει την υποχρέωση να κατασκευάσει το δίκτυο σύνδεσης μέσα σε προθεσμία όχι μεγαλύτερη των έξι (6) μηνών απ' την υποβολή σ' αυτήν σχετικής αίτησης του παραγωγού (Άρθρο 2 παράγραφος 5 του Ν. 2244/94) και στη συνέχεια να το συντηρεί. Σε περίπτωση που η Δ.Ε.Η. δηλώσει αδυναμία να κατασκευάσει το δίκτυο, αυτό μπορεί να κατασκευασθεί από τον παραγωγό με τη τήρηση όμως των προδιαγραφών της Δ.Ε.Η..

Το δίκτυο διασύνδεσης ανήκει στην αποκλειστική κυριότητα και κατοχή της Δ.Ε.Η.. Παρόλα αυτά ο παραγωγός πληρώνει εξολοκλήρου τις δαπάνες για τη

κατασκευή του δικτύου διασύνδεσης. Η πληρωμή γίνεται στη Δ.Ε.Η. μετά την κοστολόγηση της κατασκευής που γίνεται με αποκλειστική ευθύνη της Δ.Ε.Η. κατά την υπογραφή της σύμβασης Διαχειριστή – Παραγωγού. Οι τιμές κατασκευής του δικτύου ποικίλουν ανάλογα με την τάση διασύνδεσης, τη μορφολογία των εδαφών και τη φύση του κάθε δικτύου.

Ο Παραγωγός βαρύνεται ακόμα με τα έξοδα συντήρησης, επισκευής ή και αντικατάστασης των γραμμών διασύνδεσης όποτε τούτο απαιτείται, σύμφωνα με τη κρίση του Διαχειριστή.

### **3.5.5 Τιμολόγηση ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμούς Α.Π.Ε. και επιδοτήσεις**

#### **3.5.5.1 Ο νόμος 3468/2006**

Όπως προαναφέρθηκε οι εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν είναι ακόμη ανταγωνιστική σε σχέση με τις συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας. Έτσι προέκυψε η ανάγκη να θεσπιστούν μέτρα που να κάνουν μια τέτοιου είδους επένδυση βιώσιμη.

Έτσι δημιουργήθηκε και τέθηκε σε λειτουργία ο νόμος 3468/2006, ο οποίος εκτός από διάφορες ρυθμίσεις σε σχέση με τις διαδικασίες αδειοδότησης, διασύνδεσης και λειτουργίας των συστημάτων Α.Π.Ε. επαναπροσδιόρισε τις τιμές αγοράς της παραγόμενης από Α.Π.Ε. ενέργειας.

Οι τιμές που θεσπίστηκαν δημιουργούν, σε συνδυασμό με τις επιχορηγήσεις εγκατάστασης, στις οποίες θα γίνει αναφορά παρακάτω, ευνοϊκό έδαφος για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων. Είναι χαρακτηριστικό ότι είχε τεθεί ως εθνικός στόχος η εγκατάσταση συνολικά 700MW φωτοβολταϊκών συστημάτων, και οι αιτήσεις των ιδιωτών έχουν ξεπεράσει τα 2700MW.

Συγκεκριμένα η αγορά της ‘φωτοβολταϊκής’ μεγαβατώρας (MWH), από τη Δ.Ε.Η. είναι:

**Πίνακας 3.1:** Αγορά της φωτοβολταϊκής μεγαβατώρας (MWh) από τη Δ.Ε.Η.

	<b>Διασυνδεδεμένο Σύστημα (Euro/MWh)</b>	<b>Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (Euro/MWh)</b>
Εγκατεστημένη ισχύς έως 100kWp	450	500
Εγκατεστημένη ισχύς >100kWp	400	450

### 3.5.5.2 Επιχορηγήσεις εγκατάστασης

Για την περαιτέρω ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των Φ/Β συστημάτων αποφασίστηκε η σημαντική επιδότηση εγκατάστασης από πόρους του 3<sup>ου</sup> κοινοτικού πλαισίου στήριξης (Κ.Π.Σ. ΙΙΙ) και του ελληνικού κράτους. Έτσι για την περίοδο 2000 – 2006 αποφασίστηκε επιδότηση εγκατάστασης της τάξης του 40 – 50 % υπό συγκεκριμένους όρους και προϋποθέσεις και ανάλογα με την τοποθεσία που θα πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση.

Όροι και προϋποθέσεις

- Ο προϋπολογισμός πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 44.000 €
- Οι προτάσεις πρέπει να έχουν ολοκληρωμένο χαρακτήρα και να είναι λειτουργικές χωρίς την ανάγκη συμπληρωματικού ή υποστηρικτικού έργου
- Η χρηματοδότηση περιορίζεται σε μέγιστο προϋπολογισμό 44.000.000 € και η υπόλοιπη επένδυση δεν χρηματοδοτείται
- Η χρηματοδότηση εξαρτάται από το σημείο της εγκατάστασης

Πιο συγκεκριμένα προβλέπεται χρηματοδότηση

- 50% για τους νομούς Ξάνθης, Έβρου και Ροδόπης
- 40% για της περιοχές Α & Β της Κεντρικής Μακεδονίας και Αττικής
- 45% για την υπόλοιπη χώρα



### 3.5.6 Αυτοπαραγωγή

Η τιμολογιακή πολιτική της Δ.Ε.Η. προς τους πελάτες της καταναλωτές, έχει τεράστια σημασία και επηρεάζει αποφασιστικά την ανάπτυξη των Α.Π.Ε., τόσο για την αυτοπαραγωγή, όσο και για την ανεξάρτητη παραγωγή. Είναι προφανές ότι όταν οι τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τη Δ.Ε.Η. προς τους καταναλωτές και ιδιαίτερα στη βιομηχανία, στην αγροτική παραγωγή κ.λ.π., είναι πολύ υψηλές αυτό θα στρέψει πολλούς στην ιδιοπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η απελευθέρωση μάλιστα μεγάλου ποσοστού της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα επιπλέον κίνητρο, για τον ιδιωτικό τομέα, και ιδιαίτερα εκείνους που έχουν μεγάλες καταναλώσεις.

Η τιμολογιακή πολιτική της Δ.Ε.Η. προς τους πελάτες της καταναλωτές, είναι ενιαία χωρικά σε ολόκληρη την Ελλάδα, ανεξάρτητα αν ο καταναλωτής συνδέεται στο διασυνδεδεμένο δίκτυο ή είναι σ' ένα απομακρυσμένο νησί. Τα τιμολόγια της Δ.Ε.Η. καθορίζονται με κυβερνητικές αποφάσεις και έχουν διάφορες τιμολογιακές παραμέτρους (πάγιο, τιμή ενέργειας, τιμή ισχύος και ελάχιστη χρέωση). Τα τελευταία εν ισχύ τιμολόγια της Δ.Ε.Η. είναι από τον Αύγουστο του 2007. Διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες και είδη, που αναλύονται παρακάτω.

Είναι προφανές όμως ότι το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη Δ.Ε.Η., δεν είναι ενιαίο σ' ολόκληρη τη χώρα. Στο διασυνδεδεμένο δίκτυο το κόστος παραγωγής είναι σαφώς μικρότερο από αυτό των απομακρυσμένων νησιών όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από μικρούς αυτόνομους σταθμούς.

#### 3.5.6.1 Είδη τιμολογίων

Τα τιμολόγια της Δ.Ε.Η. διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες [9]:

- Τιμολόγια πώλησης Ηλεκτρισμού υπό υψηλή τάση (ΥΤ). Με τα τιμολόγια αυτά τιμολογούνται οι πελάτες της Δ.Ε.Η. που συνδέονται στο δίκτυο υψηλής τάσης της Δ.Ε.Η.. Η χρέωση για τα τιμολόγια αυτά είναι μηνιαία.
- Τιμολόγια πώλησης Ηλεκτρισμού υπό μέση τάση (ΜΤ). Με τα τιμολόγια αυτά τιμολογούνται οι πελάτες της Δ.Ε.Η. που συνδέονται στο δίκτυο μέσης τάσης της Δ.Ε.Η.. Η χρέωση για τα τιμολόγια αυτά είναι μηνιαία. Στα τιμολόγια αυτά εκτός από την ενέργεια χρεώνεται και η ισχύς με βάση τόσο την δηλωμένη ισχύ του καταναλωτή, όσο και με βάση τους ειδικούς όρους που ισχύουν και αναλύονται παρακάτω. Διακρίνονται σε τιμολόγια Γενικής

Χρήσης, τιμολόγια Βιομηχανικής χρήσης για τις βιομηχανίες και σε Τιμολόγια Αγροτικής Χρήσης.

- Τιμολόγια πώλησης Ηλεκτρισμού υπό χαμηλή τάση (XT). Είναι τα πιο συνηθισμένα τιμολόγια και καλύπτουν τους περισσότερους αριθμητικά καταναλωτές. Διακρίνονται σε τιμολόγια Οικιακής χρήσης για κατοικίες, Βιομηχανικής Χρήσης για βιομηχανίες – βιοτεχνίες, τιμολόγια ημερήσιων εφημερίδων, τιμολόγια φωτισμού οδών και πλατειών για τους δήμους και τις κοινότητες και τιμολόγια Γενικής χρήσης για όλες τις υπόλοιπες χρήσεις που δεν αναφέρθηκαν παραπάνω.

Από την ανάλυση των τιμολογίων της Δ.Ε.Η. προς τους πελάτες της καταναλωτές μπορεί εύκολα να καταλήξει κανείς σε ορισμένα συμπεράσματα σχετικά με τη πολιτική που ακολουθεί, στην τιμολόγηση του ηλεκτρικού ρεύματος:

- Υπάρχει σαφώς ευνοϊκότερη πολιτική τιμών στη βιομηχανία και στις αγροτικές εκμεταλλεύσεις, ιδιαίτερα σε εκείνες όπου εμφανίζονται υψηλές ετήσιες καταναλώσεις (κυρίως πελάτες μέσης τάσης (MT), οι οποίοι έχουν εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 100 kW).
- Οι τιμές πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος στη βιομηχανία, για μεν τις εγκαταστάσεις που συνδέονται στη μέση τάση, είναι αρκετά ευνοϊκές, ενώ κρίνονται αρκετά υψηλές στη χαμηλή τάση, ειδικότερα για τις βιομηχανίες που απαιτούν ηλεκτρικό ρεύμα το «κανονικό» ωράριο και όχι τις ώρες ελάχιστου φορτίου.
- Οι αγροτικές εκμεταλλεύσεις που απαιτούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας και κυρίως οι αρδεύσεις και όσες αξιοποιούν το μειωμένο αγροτικό τιμολόγιο, έχουν και αυτές αρκετά ευνοϊκά τιμολόγια.
- Αντίθετα οι μικρές εκμεταλλεύσεις έχουν ένα κόστος λειτουργίας σε ηλεκτρική ενέργεια σχετικά υψηλό, ιδιαίτερα εκείνες που λειτουργούν στη χαμηλή τάση.

Είναι φανερό ότι οι διαβαθμίσεις στα τιμολόγια της Δ.Ε.Η. παίζουν σημαντικό ρόλο στις επιλογές αξιοποίησης των Α.Π.Ε. για αυτοπαραγωγή. Αν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί για μια εγκατάσταση από Α.Π.Ε. είναι μικρότερο συνολικά απ' το κόστος που πωλεί η Δ.Ε.Η., είναι προφανές ότι ευνοείται η χρήση των Α.Π.Ε. για αυτοπαραγωγή.

### **3.6 ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΝΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΙΣΧΥΟΣ 100kW**

Η διαδικασία μελέτης και υλοποίησης ενός φωτοβολταϊκού πάρκου μικρής ισχύος αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία με αρκετούς παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη και να συνυπολογιστούν. Θα επιχειρηθεί η καταγραφή όλων των βημάτων που πρέπει να γίνουν από την εκτέλεση των προεπενδυτικών μελετών έως τον τελικό στόχο, δηλαδή την έναρξη λειτουργίας. Επίσης θα γίνει μια προσέγγιση του χρόνου απόσβεσης της εγκατάστασης και του συνολικού κέρδους που θα αποκομισθεί κατά τη συνολική διάρκεια λειτουργίας [10].

#### **3.6.1 Προεπενδυτικές μελέτες**

Το πρώτο στάδιο μελέτης αφορά την προετοιμασία για την έναρξη υλοποίησης της επένδυσης καθώς επίσης την κατάρτιση του προϋπολογισμού και την εύρεση των οικονομικών πόρων που απαιτούνται.

Έτσι, πρέπει να γίνουν οι εξής διαδικασίες:

- Οικονομοτεχνική Μελέτη
- Προκαταρκτικές Μελέτες Οικοπέδου
- Τεχνικές προμελέτες εγκατάστασης

##### **3.6.1.1 Οικονομοτεχνική μελέτη**

Αφορά την ανάλυση όλων των οικονομικών μεγεθών που θα εμπλακούν στο εγχείρημα, όπως γραφειοκρατικά έξοδα, κόστος εξοπλισμού και συντήρησης, κόστος εργασίας, κέρδη πωλήσεων κ.λ.π. Επίσης συμπεριλαμβάνεται η απαραίτητη μελέτη για το είδος και την τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί, η απόδοση του συστήματος και άλλοι παράγοντες

##### **3.6.1.2 Προκαταρκτικές μελέτες οικοπέδου**

Σε αυτό το στάδιο θα γίνει μια πρώτη προσέγγιση της καταλληλότητας του οικοπέδου και ο υπολογισμός των γεωτεχνικών παρεμβάσεων που απαιτούνται για να πάρει το οικόπεδο την απαιτούμενη μορφή για τη διεκπεραίωση της εγκατάστασης

### **3.6.1.3 Τεχνικές προμελέτες εγκατάστασης**

Στο σημείο αυτό γίνεται η τεχνική μελέτη για τον τελικό σχεδιασμό του πάρκου, δηλαδή οι συσκευές που θα χρησιμοποιηθούν, ο προσανατολισμός και η τοποθέτηση των πάνελ και η διασύνδεσή με το δίκτυο.

### **3.6.2 Ανάλυση αγοράς**

Για να μπορέσει ο επενδυτής να προσδιορίσει τους κινδύνους και τα ρίσκα της επένδυσης, θα πρέπει να έχει μια σαφή εικόνα για την κατάσταση της αγοράς ενέργειας από Α.Π.Ε. Το σημαντικότερο πρόβλημα που παρατηρείται τον τελευταίο καιρό βρίσκεται στο θέμα της αδειοδότησης.

Λόγω της δυναμικής προώθησης των Φ/Β από το ελληνικό κράτος μέσω επιδοτήσεων εγκατάστασης και αγοράς ενέργειας, το ενδιαφέρον των επενδυτών έχει αυξηθεί ραγδαία τον τελευταίο καιρό με αποτέλεσμα να προκύπτουν δύο σοβαρά προβλήματα. Υπάρχει μεγάλος συνωστισμός στις αιτήσεις που κατατέθηκαν στη Ρ.Α.Ε. με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η αξιολόγησή τους και την επιλογή των ιδανικότερων. Η συνολική προσφορά έφτασε τα 2700MW ενώ η ανάγκη εγκαταστάσεων Φ/Β δεν ξεπερνά τα 700MW. Επίσης η περίπλοκη διαδικασία υποβολής αιτήσεων που συμπεριλαμβάνει δεκάδες φορείς και αρκετά υπουργεία δυσχεραίνει ακόμη περισσότερο τη σωστή ροή των αδειοδοτήσεων.

Επίσης πρέπει να συνυπολογιστούν και τα προβλήματα που παρουσιάζονται στη δυναμικότητα του δικτύου μεταφοράς με αποτέλεσμα να πρέπει να επιλεγεί σημείο εγκατάστασης που να συνδυάζει υψηλό ηλιακό δυναμικό αλλά και ισχυρό ηλεκτρικό δίκτυο που να αντεπεξέλθει στη λειτουργία της εγκατάστασης.

Τέλος, ένας αστάθμητος παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει πολύ την εξέλιξη της επιχείρησης είναι το γεγονός ότι η τιμή αγοράς ενέργειας είναι σταθερή κατά τα δέκα πρώτα χρόνια και δεν έχει προβλεφτεί που θα κυμαίνεται η τιμή της μετά την ανανέωση του συμβολαίου. Βέβαια ως τότε κατά πάσα πιθανότητα θα έχει γίνει πλήρης απόσβεση αλλά θα υπάρχει μείωση της κερδοφορίας σε περίπτωση πτώσης της τιμής.

### **3.6.3 Η Τεχνολογία**

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες που αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας. Παρ' όλα αυτά οι ανταγωνιστικές τεχνολογίες αυτή τη στιγμή είναι μόνο αυτές που βασίζονται στο πυρίτιο. Έτσι ο μηχανικός ενέργειας που θα σχεδιάσει το σύστημα καλείται να αξιολογήσει πιο είδος θα χρησιμοποιηθεί παίρνοντας υπ' όψη παράγοντες όπως

- η απόδοση των φ/β πάνελ σε  $W/m^2$
- η απόδοση των φ/β πάνελ σε  $W/€$  εγκατάστασης
- το κόστος και η απόδοση των περιφερειακών συστημάτων
- η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης
- η επίδραση του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα της θερμοκρασίας στην απόδοση
- ο ρυθμός βλαβών και το κόστος επιδιόρθωσης

### 3.6.4 Ανθρώπινοι πόροι

Το ανθρώπινο δυναμικό που απαιτείται για τη σωστή λειτουργία του πάρκου περιορίζεται στα τρία άτομα.

- οι διοικητικές και διαχειριστικές λειτουργίες με τις οποίες είναι επιφορτισμένος ο ιδιοκτήτης, όπως μισθοδοσία, τράπεζες, υπηρεσίες κ.α.
- η λογιστική διαχείριση που θα γίνεται από εξωτερικό συνεργάτη
- η φύλαξη και περιποίηση του χώρου, όπου απαιτείται ένας ανειδίκευτος εργάτης

Γίνεται φανερό ότι το κόστος που αφορά τους ανθρώπινους πόρους είναι ιδιαίτερα μικρό και μπορεί να υπερκαλυφθεί με προσωπική εργασία του επενδυτή.

### 3.6.5 Επιλογή τοποθεσίας

Με βάση το νομικό πλαίσιο που αναλύθηκε προηγουμένως η προτιμότερη περιοχή για την εγκατάσταση είναι κάποιο νησί του μη διασυνδεδεμένου δικτύου όπου η επιδότηση αγοράς ενέργειας είναι μεγαλύτερη από ότι στην ηπειρωτική Ελλάδα. Πέρα όμως από αυτό το βασικό στοιχείο υπάρχουν και άλλα σημαντικά κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη

- το οικόπεδο πρέπει να είναι ασκίαστό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας
- ο προσανατολισμός πρέπει κατά προτίμηση να είναι νότιος
- η κλίση του οικοπέδου να μην είναι ιδιαίτερα μεγάλη
- θα πρέπει να υπάρχει υψηλός συντελεστής ηλιοφάνειας



- η απόσταση από το δίκτυο της Δ.Ε.Η. να είναι μικρό γιατί το κόστος διασύνδεσης επιβαρύνει τον παραγωγό
- αν είναι δυνατόν το οικόπεδο να μην έχει γεωργική γη υψηλής παραγωγικότητας
- η περιοχή να μην έχει προταθεί για ένταξη στο οικολογικό δίκτυο NATURA 2000, σε υγροτόπους, εθνικούς δρυμούς και αρχαιολογικούς χώρους
- να υπάρχει σύνδεση με το οδικό δίκτυο
- να υπάρχει μικρός συντελεστής ακραίων καιρικών φαινομένων που μπορεί να καταστρέψουν την εγκατάσταση (χαλάζι, πλημμύρες κ.λ.π.)

### **3.6.6 Περιληπτικό πρόγραμμα της συνολικής διαδικασίας**

Περιληπτικά οι ενέργειες που πρέπει να γίνουν και ο χρόνος διεκπεραίωσής τους

1. Σύσταση εταιρίας, 2 εβδομάδες
2. Εξαίρεση λήψης άδειας παραγωγής, 3-5 μήνες
3. Έγκριση περιβαλλοντικών όρων, 4-8 μήνες
4. Ένταξη στο νόμο 3299/04, 1-3 μήνες
5. Σύμβαση σύνδεσης με τη Δ.Ε.Η., 1 εβδομάδα
6. Σύμβαση αγοραπωλησίας με το Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε., 1 εβδομάδα
7. Χρηματοοικονομικές Διευθετήσεις, 1 εβδομάδα
8. απόκτηση και μεταφορά εξοπλισμού, παράλληλα με τις προηγούμενες διαδικασίες
9. Εργασίες κατασκευής μονάδας, 45-60 ημέρες
10. Περίφραξη, 5 ημέρες

Έτσι ο συνολικός χρόνος για την διεκπεραίωση του έργου, αν δεν παρουσιαστούν σημαντικά γραφειοκρατικά προβλήματα δε αναμένεται να ξεπεράσει τους 13 με 14 μήνες.

### **3.6.7 Χρόνος απόσβεσης**

Τελευταίο αλλά και πιο σημαντικό κομμάτι είναι ο χρόνος απόσβεσης της εγκατάστασης.

Σε περίπτωση που η εγκατάσταση δεν έχει επιδοτηθεί, ο χρόνος απόσβεσης κυμαίνεται γύρω στα δώδεκα χρόνια. Ο χρόνος αυτός δεν θεωρείται αποδεκτός

επιχειρηματικά. Έτσι προβλέπεται η κατά 40 % επιδότηση της εγκατάστασης από κρατικούς και κοινοτικούς πόρους, γεγονός που μειώνει το χρόνο απόσβεσης.

Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκού πάρκου αποτελεί επιχείρηση χαμηλού ρίσκου, μιας και έχει εκ των προτέρων οριστεί αγοραστής που θα απορροφήσει το 100% της παραγόμενης ενέργειας, αλλά και χαμηλής

## Βιβλιογραφία

- [1] 'Πράσινη Βίβλος, Ευρωπαϊκή στρατηγική για αειφόρο, ανταγωνιστική και ασφαλή ενέργεια' 2006
- [2] [futures.tradingcharts.com](http://futures.tradingcharts.com)
- [3] [unfccc.int](http://unfccc.int)
- [4] Λευκή βίβλος για τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, 1997
- [5] [www.ypan.gr](http://www.ypan.gr)
- [6] [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
- [7] [www.rae.gr](http://www.rae.gr)
- [8] [www.desmie.gr](http://www.desmie.gr)
- [9] [www.dei.gr](http://www.dei.gr)
- [10] Χρυσάγης Π., 'Οικονομοτεχνική ανάλυση μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία στην Ελλάδα', Τεχνικά Χρονικά, Σεπτέμβριος 2007

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

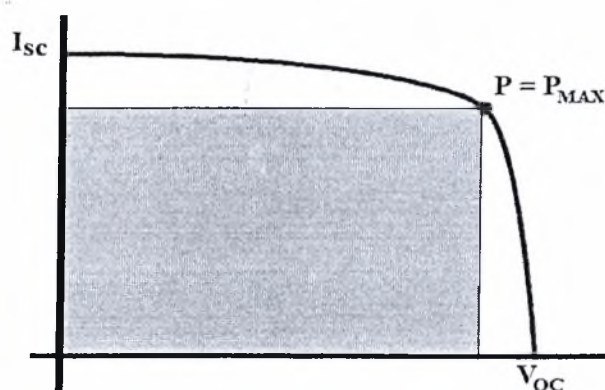
### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αλλαγές στις κλιματολογικές συνθήκες του πλανήτη καθώς και η συνεχής αύξηση του κόστους των ορυκτών πόρων τα τελευταία χρόνια, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον της επιστημονικής και επιχειρηματικής κοινότητας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η θέσπιση ευνοϊκών όρων από την ευρωπαϊκή κοινότητα και το ελληνικό κράτος, καθώς και ο μεγάλος όγκος επιχορηγήσεων που προβλέπονται για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών τεχνολογιών στην Ελλάδα, έχει δημιουργήσει έντονη κινητικότητα στο χώρο αυτό. Αναμένεται σε λίγα χρόνια να καλυφθεί περισσότερο από το 5% των ενεργειακών αναγκών της χώρας από τη ‘φωτοβολταϊκή’ ενέργεια. Έτσι ο Έλληνας μηχανικός ενέργειας καλείται να είναι σε θέση να επιλέξει μέσα από μία πληθώρα μοντέλων Φ/Β πάνελ το ιδανικότερο και οικονομικότερο (σε σχέση πάντα με την απόδοση). Βέβαια κάθε εταιρία παραγωγής φωτοβολταϊκών πάνελ ορίζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των προϊόντων που παράγει, αλλά αυτά δεν είναι πάντα αξιόπιστα, με αποτέλεσμα ο μηχανικός να κάνει λάθος επιλογές που μπορεί να κοστίσουν πολύ. Με βάση τα παραπάνω, ένας από τους στόχους της παρούσας διατριβής ήταν η ανάπτυξη μίας εύχρηστης και οικονομικής μεθόδου, η οποία δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της παραγόμενης ισχύος και της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κελιών. Η μέθοδος λοιπόν που θα παρουσιαστεί παρακάτω,

αποτελεί ένα εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο μηχανικός για να εντοπίσει ποιο είδος πάνελ είναι το καλύτερο κατά περίπτωση. Το συνολικό κόστος αυτής της μεθόδου δεν ξεπερνάει τα 700 €.

## 4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Για να μελετηθεί η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, πρέπει αρχικά να εντοπιστεί η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει. Η ισχύς δίνεται από τον τύπο  $P=VI$ , οπότε πρέπει να εντοπιστούν η τάση και η ένταση στις οποίες παράγεται η μέγιστη ισχύς ( $P_{\max}$ ). Αυτό γίνεται με την κατασκευή των διαγραμμάτων V-I. Στα διαγράμματα αυτά, ο οριζόντιος άξονας είναι η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στα άκρα του στοιχείου, ενώ ο κάθετος άξονας είναι η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το στοιχείο (σχήμα 4.1).



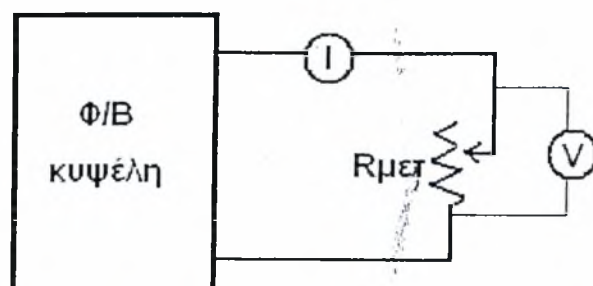
Σχήμα 4.1: Το διάγραμμα V-I

Ανάλογα με το φορτίο το οποίο συνδέεται στο στοιχείο, αλλάζει και το ζεύγος τάσης – έντασης στο οποίο λειτουργεί. Όταν το στοιχείο είναι βραχυκυκλωμένο, δηλαδή υπάρχει ηλεκτρική αντίσταση φορτίου 0 Ohm, η τάση στα άκρα του είναι μηδενική και η ένταση παίρνει τη μέγιστη τιμή ( $I_{sc}$ ). Αντίθετα, όταν η αντίσταση του φορτίου είναι πολύ μεγάλη, το κύκλωμα μπορεί να θεωρηθεί ανοιχτό. Σε αυτή την κατάσταση, δε διαρρέεται από ρεύμα και η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή ( $V_{oc}$ ). Χρησιμοποιώντας λοιπόν διαφορετικές αντιστάσεις, λαμβάνονται διαφορετικά ζεύγη τάσης – έντασης και σχηματίζεται η καμπύλη του σχήματος. Σε κάποιο σημείο το γινόμενο  $VI$ , και κατ' επέκταση το εμβαδό που φαίνεται στο σχήμα, έχει τη μέγιστη τιμή. Αυτό το σημείο είναι και το σημείο μέγιστης ισχύος  $P_{\max}$ .

Από τα παραπάνω φάνηκε η ανάγκη κατασκευής μιας πειραματικής διάταξης που να επιτρέπει την μέτρηση της τάσης και της έντασης κάτω από την επίδραση

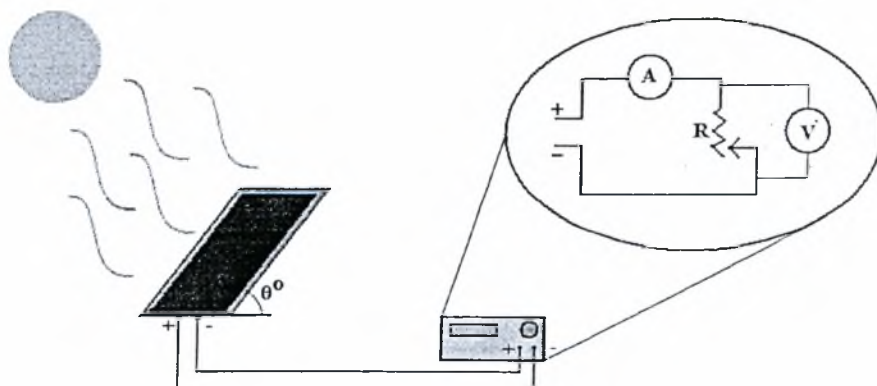


διαφορετικών φορτίων. Στα πρώτα στάδια των πειραμάτων, κατασκευάστηκε η πειραματική διάταξη του σχήματος:



Σχήμα 4.2: Η διάταξη βολτόμετρου - αμπερόμετρου

Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει μία μεταβλητή αντίσταση που λειτουργεί ως φορτίο και μια διάταξη βολτόμετρου - αμπερόμετρου. Μεταβάλλοντας σταδιακά την αντίσταση, λαμβάνονται οι τιμές για την τάση και την ένταση. Έτσι κατασκευάζεται και η ζητούμενη καμπύλη  $V-I$ . Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για απλά φωτοβολταϊκά στοιχεία η διάταξη λειτουργεί ικανοποιητικά. Για μεγαλύτερες διατάξεις, της τάξης των πάνελ  $1\text{m}^2$ , είναι δύσκολο να βρεθεί μεταβλητή αντίσταση η οποία έχει τη δυνατότητα να καταναλώσει ισχύ της τάξης των  $100\text{ W}$ . Έτσι, για τις ανάγκες των πειραμάτων που έγιναν, η διάταξη αντικαταστάθηκε από μία συσκευή ηλεκτρονικού φορτίου (Σχήμα 4.3). Τα χαρακτηριστικά της συσκευής αυτής περιγράφονται σε επόμενη παράγραφο.

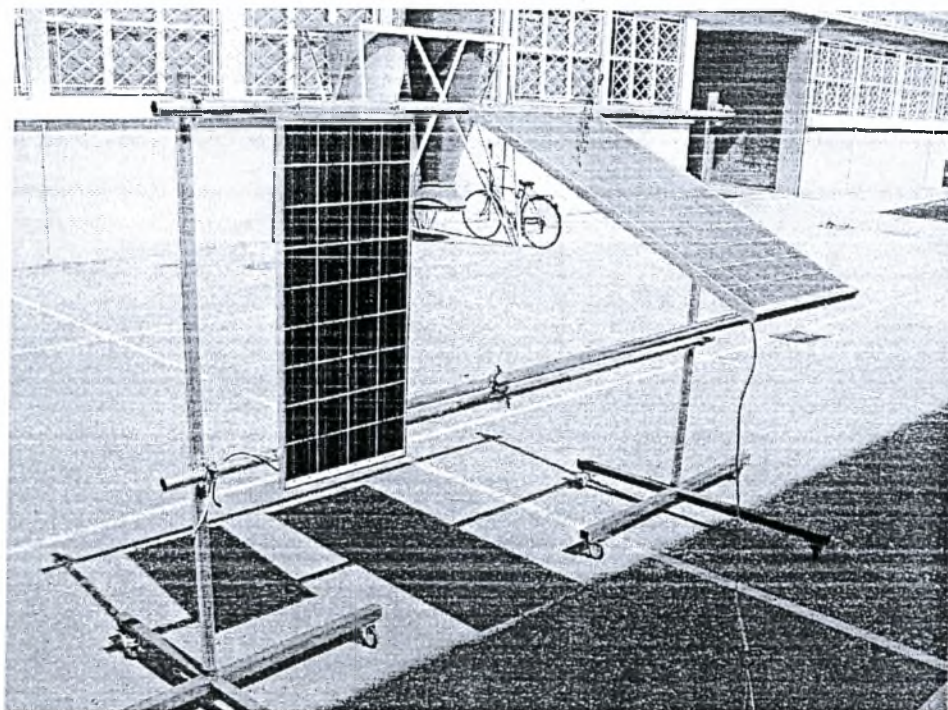


Σχήμα 4.3: Η πειραματική διάταξη

Μετά την κατασκευή του διαγράμματος  $V - I$  κατασκευάστηκαν και κάποιοι άλλοι τύποι διαγραμμάτων, που επέτρεψαν την περαιτέρω μελέτη της συμπεριφοράς των πάνελ. Η περιγραφή των διαγραμμάτων παρουσιάζεται σε επόμενη παράγραφο.

Τέλος, για την διεξαγωγή των πειραμάτων απαιτήθηκε η κατασκευή μιας βάσης για τη στήριξη των πάνελ.

#### 4.2.1 Η κινητή βάση στήριξης

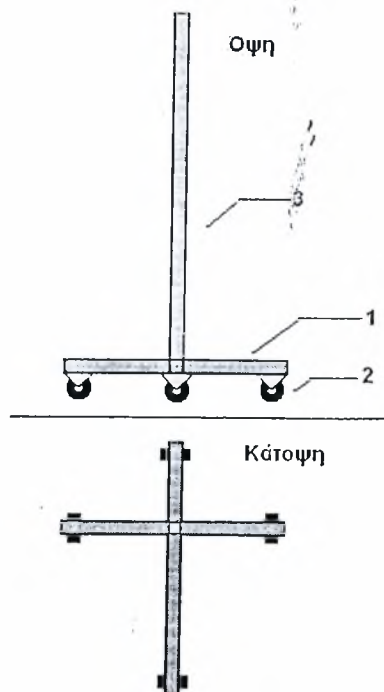


Σχήμα 4.4: Η βάση στήριξης με προσαρμοσμένα τα πάνελ

Από την πρώτη στιγμή θεωρήθηκε αναγκαίο να κατασκευαστεί μια βάση στην οποία θα τοποθετηθούν τα πάνελ. Τα κύρια κριτήρια για την κατασκευή της ήταν:

- η βάση να είναι κινητή ώστε να υπάρχει η δυνατότητα άμεσης αλλαγής προσανατολισμού ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε πειράματος,
- η δυνατότητα μετά το πέρας των μετρήσεων η βάση να λύνεται ώστε να είναι πιο εύκολη η μεταφορά της αλλά και να είναι μικρότερος ο χώρος αποθήκευσής της,
- η προσαρμογή του μεγέθους της, ώστε με μικρές επεμβάσεις να μπορεί να στηρίξει συστοιχίες φωτοβολταϊκών κυψελών διαφόρων μεγεθών,
- η δυνατότητα τα πάνελ να τοποθετούνται σε γωνίες από 0 έως 90 μοίρες,
- η μεγάλη ευστάθεια και αντοχή ώστε να μπορεί να αντεπεξέλθει σε μεγάλο βάρος αλλά και σε περιπτώσεις αντίξωων καιρικών συνθηκών όπως ο ισχυρός άνεμος.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια κατασκευάστηκε η διάταξη που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Η βάση στήριξης

1. Σταυροειδής βάση από χαλύβδινους δοκούς τετραγωνικής διατομής. Η μορφή και το υλικό κατασκευής της βάση αυτής εξυπηρετεί δύο σκοπούς:
  - Αύξηση της ευστάθειας του συστήματος λόγω το μεγάλου μήκους των δοκών ώστε να αντιστέκεται σε πλευρικές δυνάμεις που μπορεί να αναπτυχθούν εξ' αιτίας του ανέμου,
  - Ικανοποιητικό βάρος ώστε το κέντρο βάρους του συστήματος όταν βρίσκεται υπό πλήρες φορτίο να βρίσκεται σε σχετικά χαμηλό σημείο,
  - Υψηλή αντοχή ώστε να μπορεί να δέχεται μεγάλα στατικά και δυναμικά φορτία,
2. Ειδικοί τροχοί από κράμα αλουμινίου και ελαστικό. Είναι κατασκευασμένοι ώστε να μπορούν να δεχτούν μεγάλο φορτίο και να αντέχουν σε κραδασμούς λόγω πιθανών ανωμαλιών του εδάφους. Μάλιστα ο εμπρός και πίσω τροχός είναι εξοπλισμένοι με κατάλληλα φρένα για την πλήρη σταθεροποίηση του συστήματος,
3. Γαλβανισμένος χαλύβδινος δοκός κυκλικής διατομής. Θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί γαλβανισμένος δοκός διότι στερεώνονται πάνω του μέσω

- σύσφιξης κατάλληλοι σύνδεσμοι (4) που διαφορετικά θα έφθειραν οποιαδήποτε προστατευτική επικάλυψη (λαδομπογιά ή κάποια άλλη ουσία),
4. Σύνδεσμοι οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να στερεώνουν δύο δοκούς κυκλικής διατομής υπό γωνία  $90^\circ$ . Η στερέωσή τους γίνεται με σύσφιξη και θεωρούνται ιδιαίτερα ασφαλείς και εύχρηστοι καθώς χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην κατασκευή ικριωμάτων για οικοδομικές εργασίες,
  5. Γαλβανισμένοι σωλήνες όμοιοι με τους (3). Με τοποθέτηση κατάλληλων αγκίστρων κατά μήκος τους και αντίστοιχων κρίκων στα πλαίσια των πάνελ είναι δυνατή η ανάρτηση φωτοβολταϊκών διαφόρων μεγεθών και σχημάτων. Το μήκος των δοκών μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με το συνολικό εμβαδόν που θέλουμε να αξιοποιήσουμε και μπορεί να φτάσει μέχρι τα 6 μέτρα. Έτσι μπορεί να επιτευχθεί ωφέλιμη επιφάνεια μέχρι και  $12\text{m}^2$  περίπου,
  6. Δευτερεύοντες δοκοί για τη διαμόρφωση της γωνίας θέσης των πάνελ.

#### 4.2.2 Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες

Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά πάνελ. Το πρώτο είναι κατασκευασμένο από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Κατασκευάστηκε από την εταιρία Sharp και έχει ονομαστική ισχύ 80W. Αποτελείται από 36 τετραγωνικά φωτοβολταϊκά στοιχεία με πλευρά 0.125m και εμβαδόν  $156.25\text{cm}^2$ . Το δεύτερο είναι κατασκευασμένο από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Κατασκευάστηκε από την εταιρία Sata. Αποτελείται από 72 στοιχεία με πλευρά 0.1m και εμβαδόν  $100\text{cm}^2$ . Τα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι:

**Πίνακας 4.1:** Τεχνικά χαρακτηριστικά των μελετούμενων Φ/Β στοιχείων

Χαρακτηριστικά	Sata	Sharp
Ισχύς	80 W	110 W
Τύπος κελιού	125 mm square Polycrystalline	100 mm square Monocrystalline
Αριθμός κελιών	36 in series	72 (36 in series x 2)
Μήκος	1200 mm	1310 mm
Πλάτος	530 mm	660 mm
Πάχος	35 mm	35 mm
Βάρος	8,5 kg	11 kg



#### 4.2.3 Πειραματική συσκευή ηλεκτρονικού φορτίου

Όπως εξηγήθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, για την κατασκευή των καμπυλών V-I ήταν απαραίτητη μια μεταβλητή αντίσταση. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε μια χειροκίνητη που χρησιμοποιούσε μια μεγάλη συστοιχία ωμικών αντιστάτων. Όμως οι προδιαγραφές της ήταν να δέχεται ρεύμα μέγιστης έντασης 2A με αποτέλεσμα να πάθει ανεπανόρθωτες ζημιές από την πρώτη μέτρηση. Μετά από έρευνα αγοράς αποδείχτηκε ότι δεν υπάρχει ωμικός μεταβλητός αντιστάτης που να έχει προδιαγραφές που να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των μετρήσεων. Η λύση βρέθηκε με την προμήθεια συσκευής ηλεκτρονικού φορτίου με ενσωματωμένο βολτόμετρο και αμπερόμετρο. Η πλήρης ονομασία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε είναι «PROGRAMMABLE DC ELECTRONIC LOAD 3711A 360V/300W» της εταιρίας «array electronics». Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της είναι:

**Πίνακας 4.2:** Τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής ηλεκτρονικού φορτίου

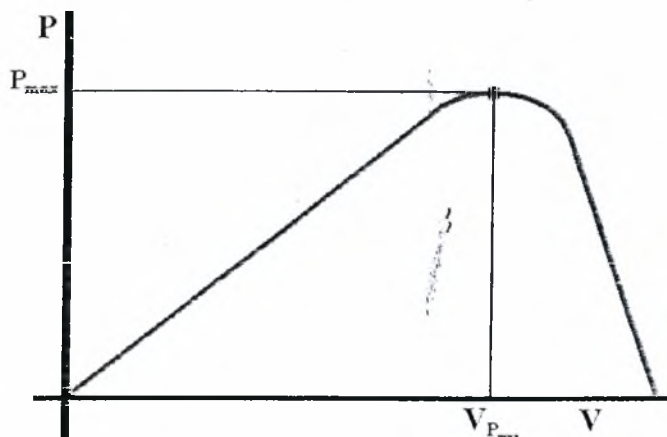
Input Voltage	0 – 360 V DC
Input Current	0 – 30 A DC
Input Power	0 – 300 W
Minimum Resolution	Voltage 1mV, Current 1mA
Lowest Conductive Resistance	0,08 Ohm

Η συσκευή αυτή δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να θέσει ως σταθερή, την τιμή της έντασης, της αντίστασης ή της ισχύος, ανάλογα με τις απαιτήσεις του πειράματος και να καταγράψει τη στιγμιαία τάση και ένταση του κυκλώματος. Έχει τη δυνατότητα προγραμματισμού βηματικών μετρήσεων και σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή για απ' ευθείας καταγραφή των τιμών.

#### 4.2.4 Τα διαγράμματα P-V, P-I, Pmax-t

Η σπουδαιότητα του διαγράμματος V-I εξηγήθηκε σε προηγούμενες παραγράφους. Από τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων κατασκευάστηκαν άλλα δύο είδη διαγραμμάτων που βοήθησαν στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των στοιχείων κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

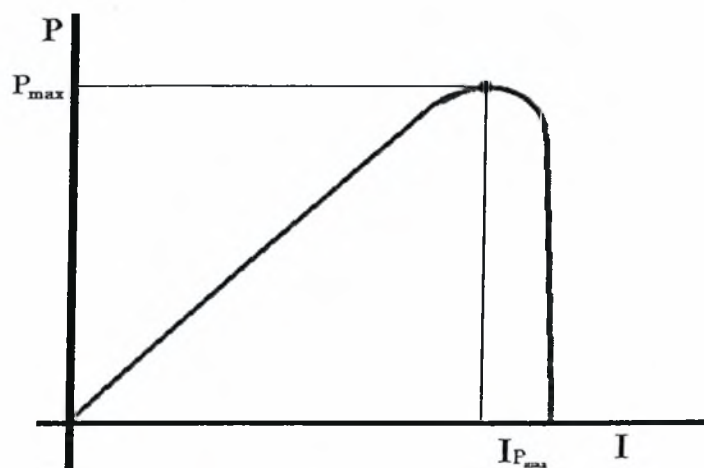
#### 4.2.4.1 Το διάγραμμα P-V



Σχήμα 4.6: Το διάγραμμα P-V

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.6, στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η τάση  $V$ , ενώ στον κάθετο άξονα η παραγόμενη ισχύς. Με αυτόν τον τρόπο παρουσιάζεται η τάση λειτουργίας του στοιχείου, ανάλογα με την ισχύ που καταναλώνεται. Στο υψηλότερο σημείο της καμπύλης βρίσκεται η μέγιστη παραγόμενη ισχύς  $P_{max}$  και μπορεί να εντοπιστεί η αντίστοιχη τάση στην οποία αποδίδεται αυτή η ισχύς. Παρατηρείται επίσης ότι εκτός από το σημείο  $P_{max}$ , για κάθε ισχύ  $P$  αντιστοιχούν δύο τιμές τάσης. Καθώς λοιπόν αυξάνεται η τάση λειτουργίας αυξάνεται και η παραγόμενη ισχύς σχεδόν γραμμικά, μέχρι να φτάσει στην  $P_{max}$  και έπειτα μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί ξανά.

#### 4.2.4.2 Το διάγραμμα P-I

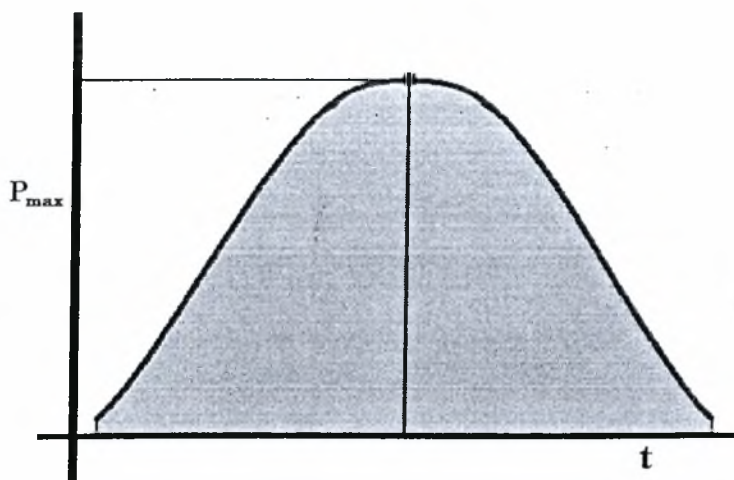


Σχήμα 4.7: Το διάγραμμα P-I



Σε αυτό το διάγραμμα στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η ένταση που διαρρέει το στοιχείο, ενώ στον κάθετο άξονα βρίσκεται η παραγόμενη ισχύς. Κατ' αντιστοιχία με το διάγραμμα P-V, υπάρχει στην καμπύλη ένα μέγιστο σημείο. Στο σημείο αυτό παράγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς. Έτσι εντοπίζεται η ένταση που αντιστοιχεί στο σημείο που παράγεται η μέγιστη ισχύς. Παρατηρείται επίσης ότι καθώς αυξάνεται η τιμή της έντασης, η ισχύς αυξάνεται μέχρι το σημείο μέγιστης ισχύος και έπειτα μειώνεται απότομα μέχρι να μηδενιστεί.

#### 4.2.4.3 Το διάγραμμα $P_{max}-t$



**Σχήμα 4.8:** Το διάγραμμα  $P_{max}-t$

Σε αυτό το διάγραμμα, παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης ισχύος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται ο χρόνος, από την ανατολή μέχρι τη δύση του ηλίου. Στον κάθετο άξονα βρίσκεται η μέγιστη ισχύς. Έτσι εντοπίζεται η χρονική στιγμή της ημέρας που παράγεται η μέγιστη ισχύς. Παρατηρείται ότι η καμπύλη έχει μορφή 'ηφαιστείου' (volcano), γεγονός που είναι γενικά αναμενόμενο λόγω της τροχιάς που διαγράφει ο ήλιος. Τέλος, το εμβαδό που περικλείεται από την καμπύλη και τον οριζόντιο άξονα, ισούται με τη συνολική παραγόμενη ενέργεια.

### 4.3 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η ισχύς που αποδίδει ένα πάνελ σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Κάποιοι από αυτούς είναι:

- η θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο,

- ο προσανατολισμός του πάνελ,
- η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αλλά και του στοιχείου πυριτίου,
- η υγρασία της ατμόσφαιρας,
- η νέφωση, που μειώνει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στα κελιά.

Έτσι οι στόχοι που τέθηκαν είναι:

- ο πειραματικός υπολογισμός των μεταβολών στην παραγόμενη ισχύ, ανάλογα με τη μεταβολή της γωνίας θέσης των πάνελ και των καιρικών συνθηκών,
- η σύγκριση της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας (πυκνότητα ισχύος) των δύο διαφορετικών πάνελ
- ο υπολογισμός της απόδοσης, όπως αυτή προκύπτει από το λόγο της παραγόμενης προς την προσπίπτουσα ισχύ
- η σύγκριση της απόδοσης ανά μονάδα επιφάνειας (πυκνότητα ισχύος) των δύο διαφορετικών πάνελ

## 4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 4.4.2 Διαδικασία των μετρήσεων

Για να προσεγγιστεί η παραγωγή ισχύος από διαφορετικές οπτικές γωνίες, έγιναν τρεις ομάδες μετρήσεων με διαφορετικούς στόχους η καθεμία

**Πίνακας 4.3:** Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν

Ομάδα μετρήσεων	Διάρκεια	Στόχοι μελέτης
A	27 Αυγούστου – 4 Σεπτεμβρίου	Επιρροή γωνίας θέσης
B	6 – 14 Σεπτεμβρίου	Ολοήμερη μέτρηση – Επιρροή νέφωσης
Γ	17 – 30 Οκτωβρίου	Επιρροή θερμοκρασίας περιβάλλοντος

#### 4.4.2.1 Μελέτη της επιρροής της γωνίας θέσης

Αρχικός στόχος των πειραμάτων ήταν να αποσαφηνιστεί σε ποιο βαθμό επηρεάζεται η απόδοση από τη γωνία θέσης των πάνελ. Έτσι διενεργήθηκε μια ομάδα μετρήσεων από τις 27 Αυγούστου έως τις 4 Σεπτεμβρίου. Τα πάνελ προσανατολίστηκαν νότια και κατασκευάστηκαν οι καμπύλες V-I ανά μία ώρα για ένα ευρύ φάσμα ωρών. Αρχικά τα πάνελ τοποθετήθηκαν κάθετα στο επίπεδο και τις επόμενες μέρες η γωνία

θέσης τους αυξήθηκε βηματικά ανά 15 μοίρες ώσπου να φτάσουν σε θέση παράλληλα με το έδαφος. Πιο συγκεκριμένα οι θέσεις κάθε μέρας ήταν:

**Πίνακας 4.4:** Γωνία θέσης των Φ/Β πλαισίων ανά ημέρα

Ημερομηνία	Γωνία θέσης
27 Αυγούστου	90°
28 Αυγούστου	75°
29 Αυγούστου	60°
30 Αυγούστου	45°
31 Αυγούστου	30°
3 Σεπτεμβρίου	15°
4 Σεπτεμβρίου	0°

Για την καλύτερη κατανόηση και αξιοποίηση των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται στη συνέχεια τετράδες διαγραμμάτων στα οποία απεικονίζονται οι καμπύλες:

**V-I** (ηλεκτρικού δυναμικού με την ένταση του ρεύματος),

**P-V** (ηλεκτρικής ισχύος με το ηλεκτρικό δυναμικό),

**P-I** (Ηλεκτρικής ισχύος με την ένταση του ρεύματος),

**P<sub>max</sub>-t** (Μέγιστης παραγόμενης ισχύος με το χρόνο).

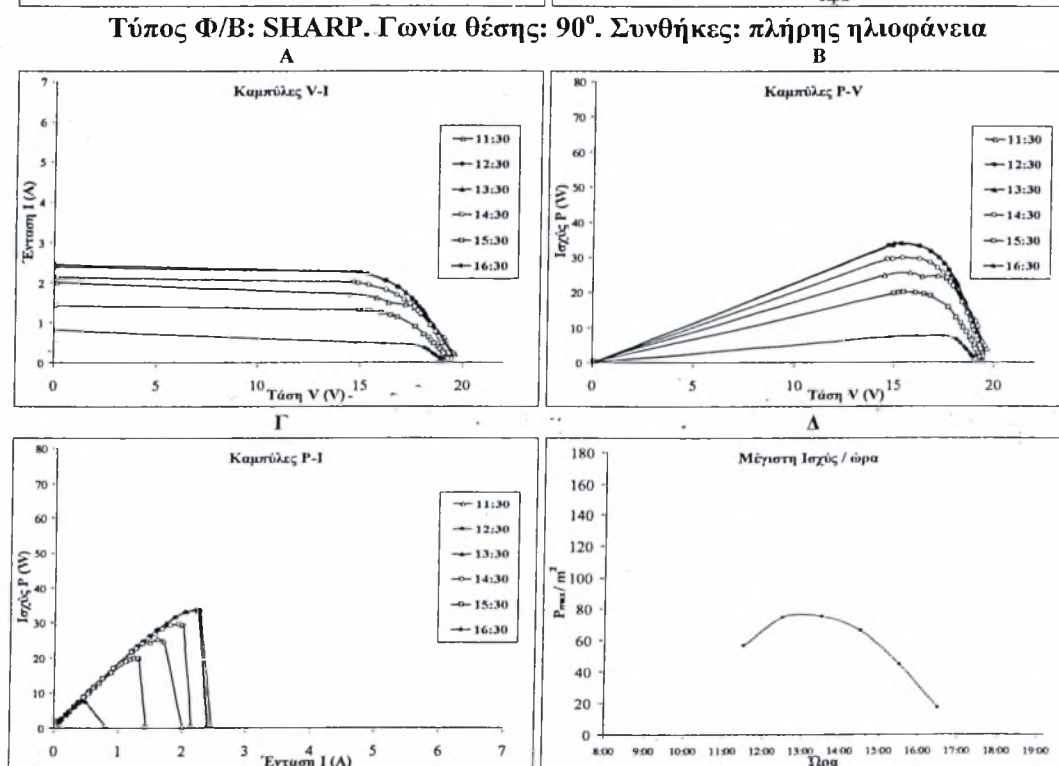
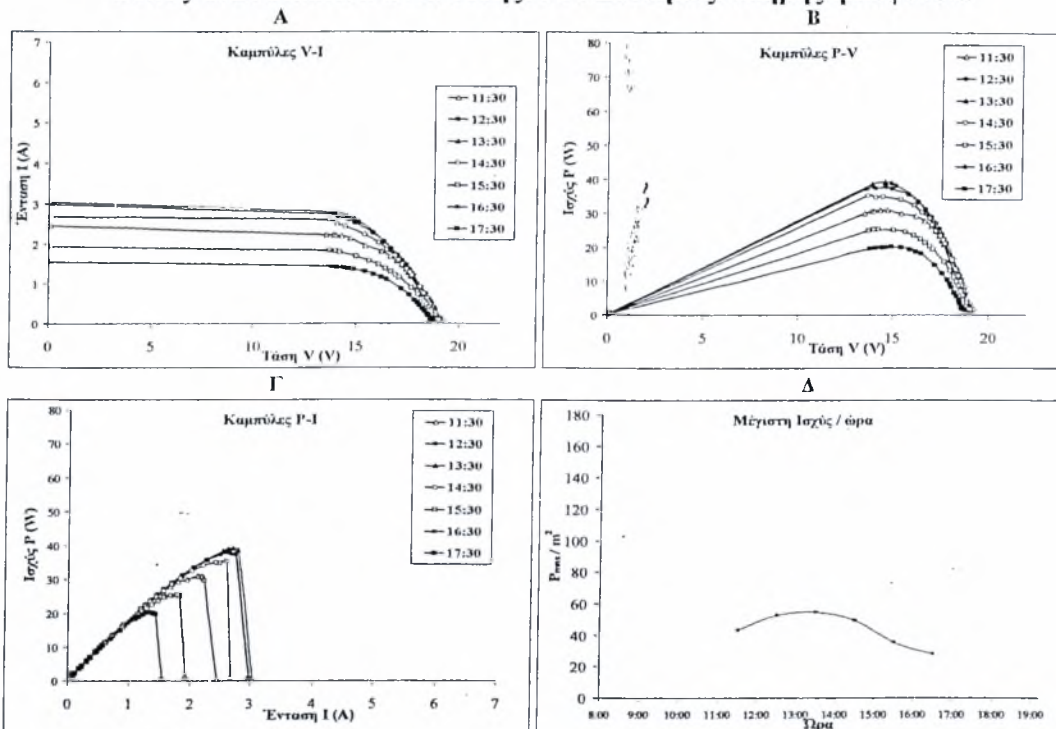
Αφού καταρτίστηκαν τα διαγράμματα V-I, P-V, P-I και P<sub>max</sub>-t χρησιμοποιήθηκε ειδικό λογισμικό που υπολογίζει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη γη σε επιφάνεια 1m<sup>2</sup>. Έτσι κατασκευάστηκαν διαγράμματα που δείχνουν το ποσοστό της ισχύος αυτής που μετατράπηκε σε ηλεκτρική ισχύ από τα πάνελ. Επειδή το λογισμικό υπολογίζει την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και τα πάνελ ήταν τοποθετημένα νότια στις 30°, δημιουργήθηκε στο Excel κατάλληλο πρόγραμμα που υπολογίζει την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια των πάνελ ανάλογα με την θέση του ηλίου, δηλαδή την γωνία αζιμούθιου και ανύψωσης (azimuth angle & elevation angle).

Παρατήρηση: Για να είναι συγκρίσιμες οι τιμές ισχύος P των δύο πάνελ, έγινε αναγωγή σε ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας (W/m<sup>2</sup>). Η τάση εξαρτάται από τον αριθμό των φωτοβολταϊκών στοιχείων που απαρτίζουν ένα πάνελ, και όχι από το εμβαδό του πάνελ. Επίσης υπάρχει περιορισμός στο μέγιστο εμβαδό που μπορεί να έχει ένα στοιχείο, λόγω των μεθόδων κατασκευής του ημιαγωγού πυριτίου. Έτσι η αναγωγή της έντασης σε ένταση ανά μονάδα επιφάνειας και η αντίστοιχη αναγωγή της τάσης σε τάση ανά μονάδα επιφάνειας δεν οδηγεί σε χρήσιμα και συγκρίσιμα αποτελέσματα.

# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΘΕΣΗΣ (27 ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ – 4 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ)

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 27/8/2007

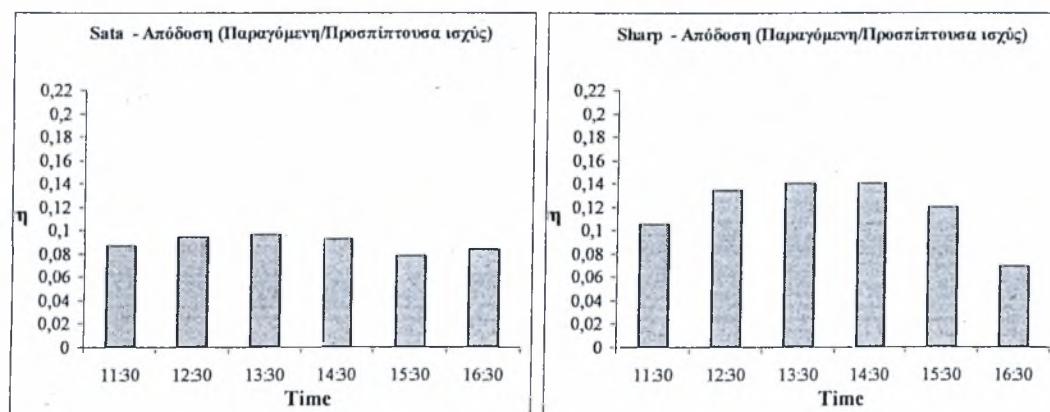
Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 90°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



Στις παραπάνω δύο τετράδες διαγραμμάτων (Α, Β, Γ, Δ) παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν στις 27 Αυγούστου και διήρκεσαν συνολικά 6 ώρες. Τα πάνελ τοποθετήθηκαν σε γωνία θέσης 90° και επικράτησε πλήρης ηλιοφάνεια καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Από τα τρία πρώτα διαγράμματα (Α, Β, Γ) παρατηρείται ότι κατά τις μεσημβρινές ώρες που ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος η τάση στην

οποία παρουσιάζεται η μέγιστη ισχύς παραμένει σχεδόν σταθερή περίπου στα 15 V και στις δύο περιπτώσεις (**Sata & Sharp**). Έτσι η τιμή της έντασης αυξάνεται σταδιακά ως τις 13:30 όπου παρουσιάζεται και η βέλτιστη  $P_{max}$  στην τιμή των 3 A για το μονοκρυσταλλικό και 2,2 A για το πολυκρυσταλλικό πάνελ.

Η μέγιστη ισχύς ( $P_{max}$ ), όπως παρατηρείται στα διαγράμματα  $\Delta$ , εντοπίζεται και στις δύο περιπτώσεις μεταξύ των ωρών 12:30 έως 14:30. Στις 13:30 συγκεκριμένα, εντοπίζεται η μέγιστη ισχύς για το πάνελ **Sata** στα 60 W/m<sup>2</sup> και για το πάνελ **Sharp** στα 80 W/m<sup>2</sup>. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι αυτή τη χρονική διάρκεια ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο του ουράνιου θόλου με αποτέλεσμα η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στα πάνελ να είναι η βέλτιστη δυνατή. Συγκρίνοντας παρακάτω, τα αποτελέσματα αυτά με αποτελέσματα από άλλες γωνίες θέσης, παρατηρείται η συνολική απόδοση σε μειωμένη. Το συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι η κάθετη θέση των φωτοβολταϊκών είναι μάλλον ακατάλληλη.

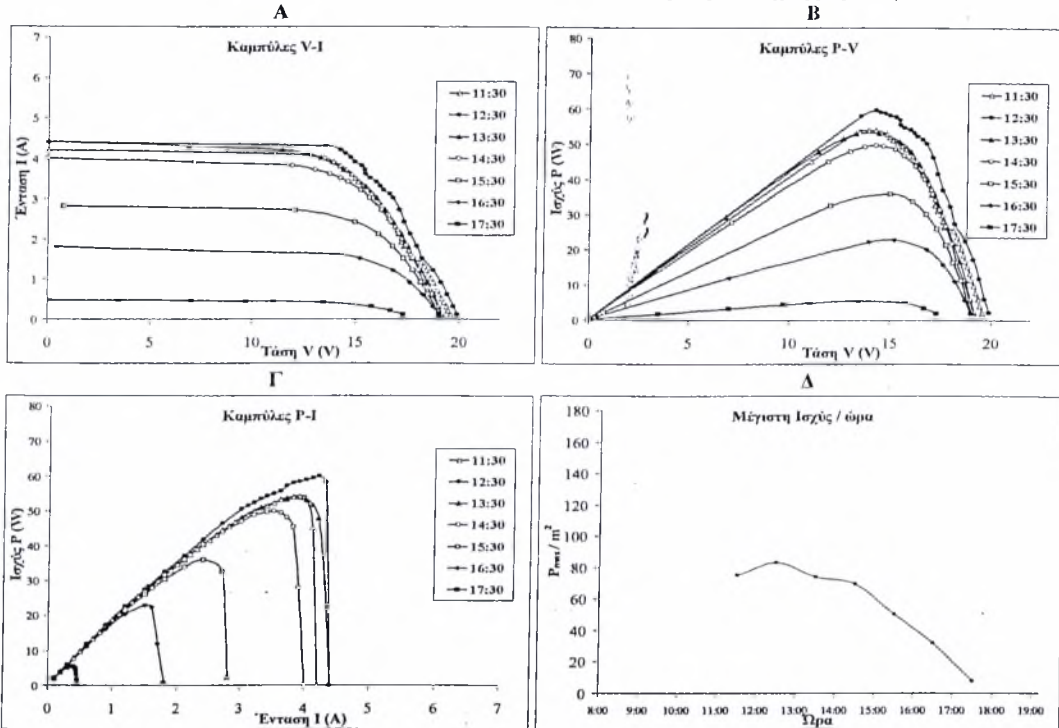


Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζεται η απόδοση των πάνελ, δηλαδή το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που μετατράπηκε σε ηλεκτρική ισχύ. Στο πάνελ της **Sata** η απόδοση βρίσκεται μεταξύ 0,08 και 0,1. Η μέγιστη παρατηρούμενη απόδοση είναι 0,1 και παρατηρήθηκε στις 13:30. Ανάλογα, η απόδοση για το πολυκρυσταλλικό πάνελ κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 0,12 έως 0,14, για τη μεγαλύτερη διάρκεια των μετρήσεων. Η μέγιστη απόδοση παρατηρήθηκε στις 13:30 και είχε τιμή 0,14. Οι μικρότερες τιμές παρατηρήθηκαν τις πρωινές (0,1) και τις απογευματινές (0,07) ώρες.

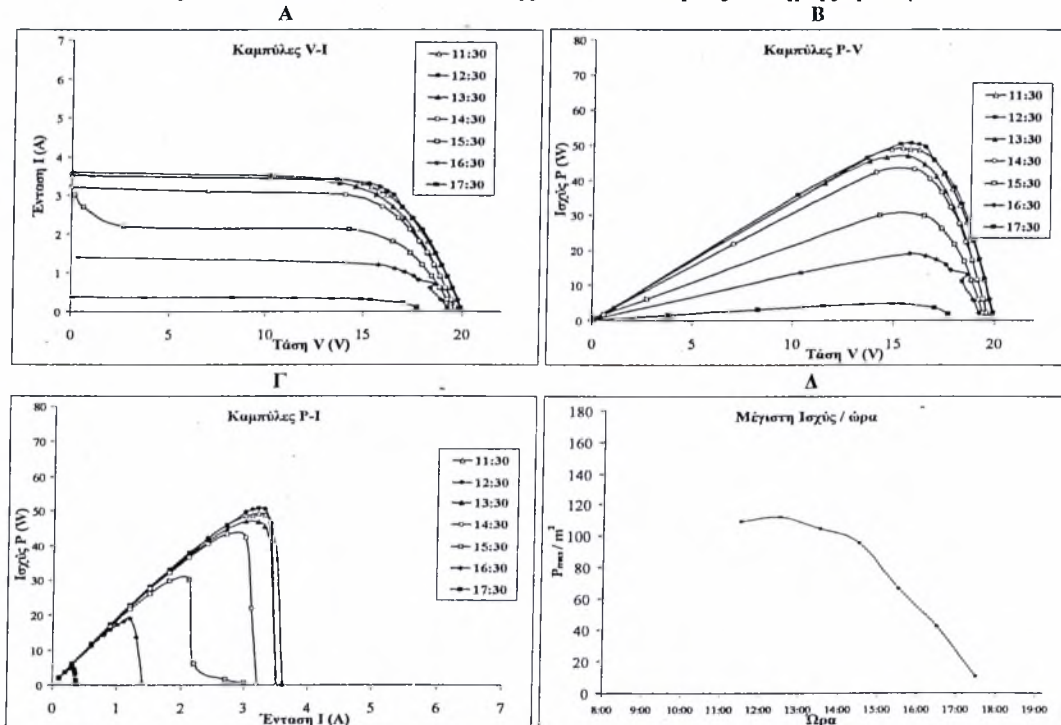


ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 28/8/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 75°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 75°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια

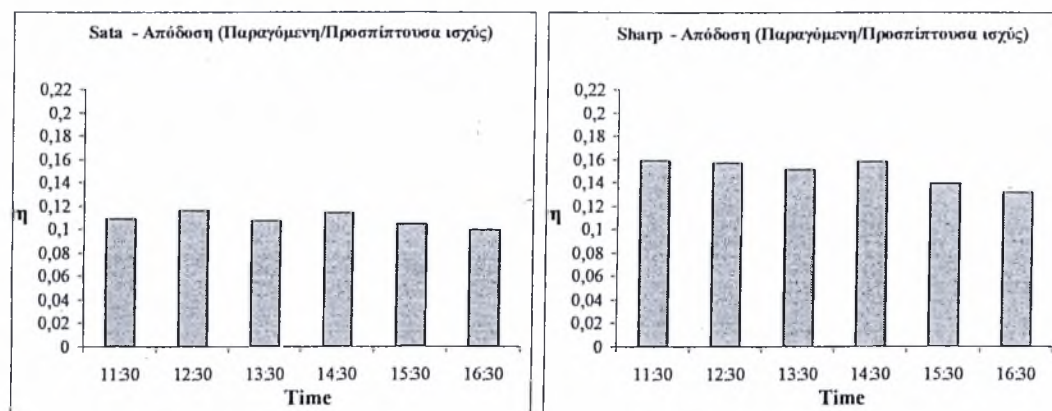


Στις παραπάνω τετράδες διαγραμμάτων (Α, Β, Γ, Δ) παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν στις 28 Αυγούστου, όπου τα πάνελ τοποθετήθηκαν σε γωνία θέσης 75°. Οι μετρήσεις διήρκεσαν 6 ώρες. Επικράτησε πλήρης ηλιοφάνεια καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Συγκριτικά στην περίπτωση αυτή, συνολική απόδοση παρουσιάζεται σαφώς βελτιωμένη. Η τάση στην οποία παρουσιάζεται η μέγιστη ισχύς και για τα δύο πάνελ κυμαίνεται στα 15,5 με 16,5V. Και στις δύο περιπτώσεις (Sata



& Sharp) η μέγιστη ισχύς παρατηρείται στις 12:30. Στο πάνελ **Sata** η μέγιστη ισχύς της ημέρας ήταν τα  $82 \text{ W/m}^2$  ενώ στο πάνελ **Sharp** ήταν τα  $120 \text{ W/m}^2$ . Στα σημεία μέγιστης παραγωγής ισχύος, η αντίστοιχη ένταση ήταν  $4,2\text{A}$  για το πρώτο πάνελ και  $3,5\text{A}$  για το δεύτερο πάνελ. Παρατηρείται πως η παραγόμενη ισχύς είναι αρκετά βελτιωμένη σε σχέση με τις μετρήσεις που έγιναν υπό γωνία θέσης  $90^\circ$ . Το γεγονός αυτό δείχνει ότι για την καλοκαιρινή περίοδο η γωνία θέσης των  $75^\circ$  είναι καλύτερη από τη γωνία θέσης των  $90^\circ$ .

Επίσης παρατηρείται ότι λείπουν οι μετρήσεις τις πρωινές ώρες, λόγω σκιάσεων που δεν επέτρεψαν τη διεξαγωγή μετρήσεων. Παρ' όλα αυτά οι μετρήσεις αρκούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων και συγκρίσεων με τις υπόλοιπες γωνίες θέσης.

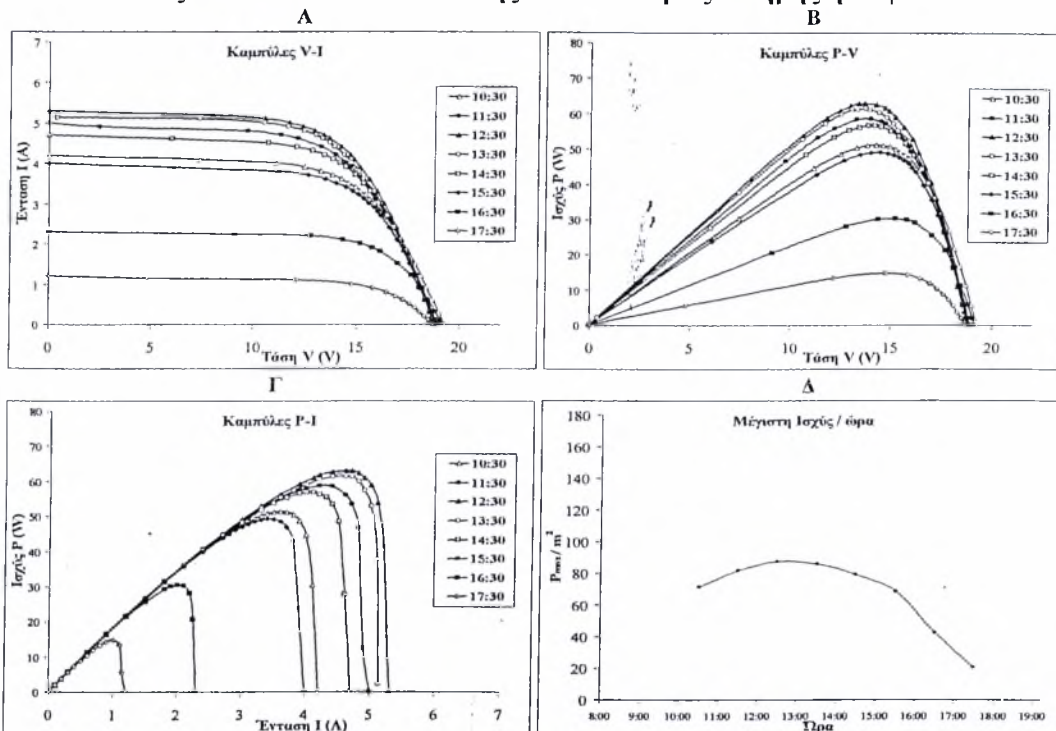


Οι αποδόσεις εμφανίζουν σταθερότητα σε όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων τόσο για το πάνελ Sata όσο και για το πάνελ Sharp. Το πάνελ **Sata** έχει απόδοση μεταξύ 0,11 και 0,12 καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας με βέλτιστη απόδοση στις 12:30 όπου παρατηρήθηκε η τιμή 0,12. Το **Sharp** έχει απόδοση μεταξύ 0,14 και 0,16. Η βέλτιστη απόδοση παρατηρήθηκε στις 14:30 και είχε τιμή 0,16. Παρατηρείται μια μικρή τάση μείωσης της απόδοσης προς τις απογευματινές ώρες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας των πάνελ λόγω της αντίστοιχης αύξησης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

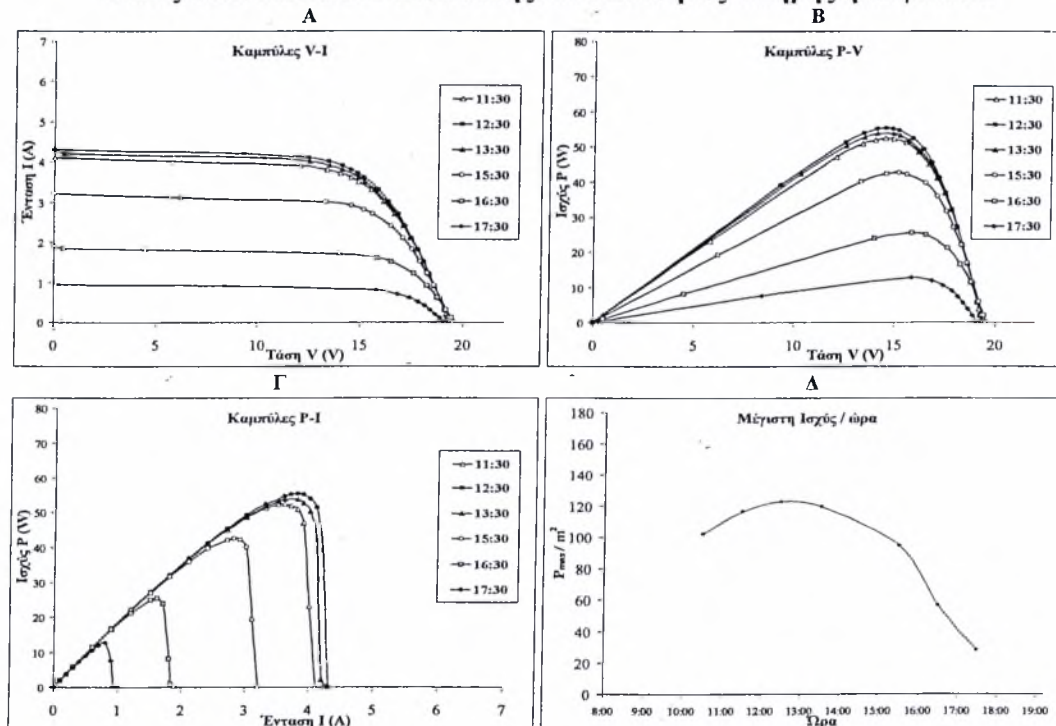
Οι αποδόσεις που μετρήθηκαν συνολικά, τείνουν στις προδιαγραφόμενες από τους κατασκευαστές των πάνελ.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 29/8/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης:  $60^\circ$ . Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια.

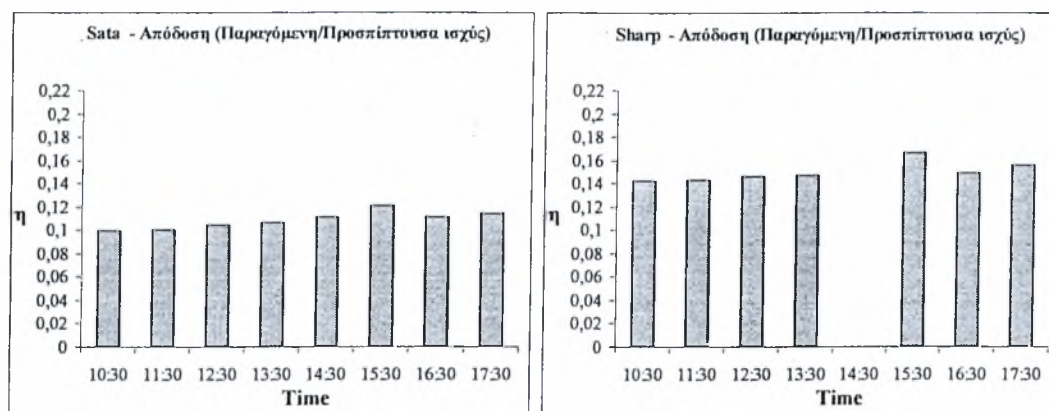


Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης:  $60^\circ$ . Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια.



Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στις 29 Αυγούστου. Οι μετρήσεις διήρκεσαν 8 ώρες και τα δύο πάνελ τοποθετήθηκαν στις  $60^\circ$ . Καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων επικράτησε πλήρης ηλιοφάνεια. Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς και για το πάνελ Sata και για το πάνελ Sharp παρατηρήθηκε και πάλι τις μεσημεριανές ώρες, από τις 11:30 έως τις

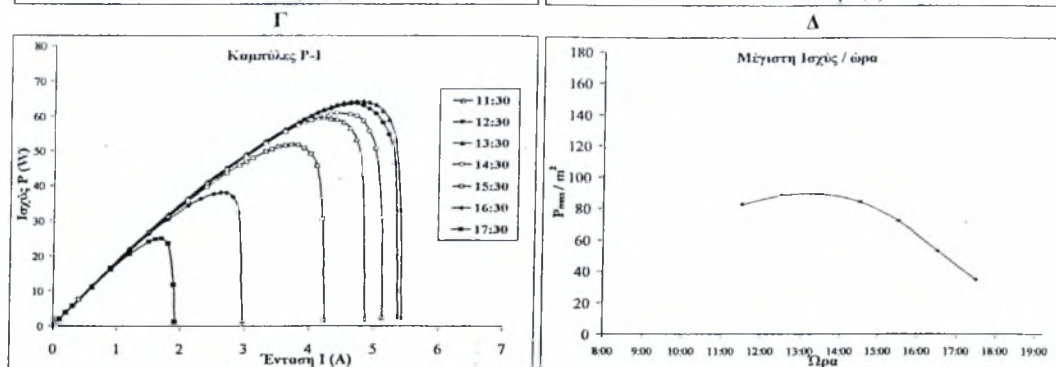
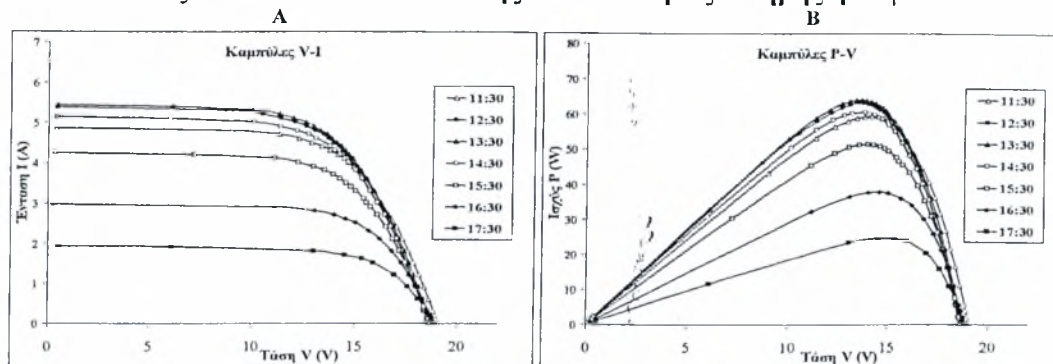
13:30, για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε στις προηγούμενες περιπτώσεις. Το μονοκρυσταλλικό πάνελ **Sata** απέδωσε τη μέγιστη ισχύ στις 12:30 όπου και έφτασε τα  $85 \text{ W/m}^2$  με αντίστοιχη τάση τα 15 V. Στο σημείο της μέγιστης ισχύος μετρήθηκε ένταση 4,8 A. Για το πολυκρυσταλλικό πάνελ **Sharp** παρατηρήθηκε η μέγιστη ισχύς επίσης στις 12:30, με τιμή  $123 \text{ W/m}^2$  και τάση 15 V. Η ένταση στο σημείο αυτό ήταν 4 A περίπου. Τέλος παρατηρείται πως τις απογευματινές ώρες που ο ήλιος βρίσκεται σε χαμηλό ύψος (17:30), η παραγωγή ισχύος για το πάνελ **Sata** είναι  $20 \text{ W/m}^2$  ενώ για το πάνελ **Sharp** είναι  $30 \text{ W/m}^2$ . Οι τιμές αυτές είναι καλύτερες από τις αντίστοιχες που παρατηρήθηκαν σε γωνία θέσης  $75^\circ$  ( $7 \text{ W/m}^2$  και  $10 \text{ W/m}^2$ ). Συγκριτικά με τις γωνίες θέσης των προηγούμενων μετρήσεων, η τοποθέτηση των πάνελ στη θέση των  $60^\circ$  οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές απόδοσης, σε όλη τη διάρκεια της ημέρας.



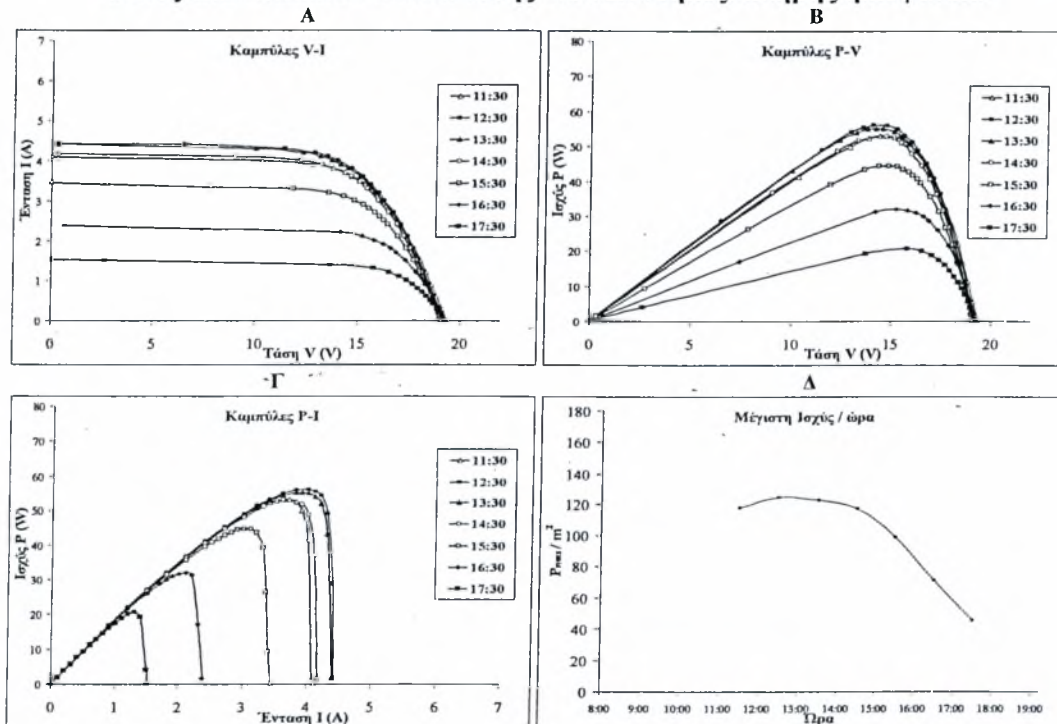
Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται οι τιμές απόδοσης. Η απόδοση για το πάνελ της εταιρίας **Sata** παρατηρείται μεταξύ 0,1 και 0,12. Η μέγιστη απόδοση παρατηρείται στις 15:30 και έχει τιμή 0,12. Γενικά, δεν υπάρχει έντονη διαφοροποίηση των αποδόσεων σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Οι αποδόσεις για το πάνελ της **Sharp** παρατηρήθηκαν μεταξύ 0,14 και 0,16, αποτελέσματα που ομοιάζουν με της προηγούμενης ημέρας. Η μέγιστη απόδοση παρατηρήθηκε στις 15:30 με τιμή 0,16. Στις 14:30 δεν πραγματοποιήθηκε μέτρηση για το Sharp και έτσι η στήλη παρέμεινε κενή. Τέλος, κάποιες αντανakλάσεις είχαν ως αποτέλεσμα τη μικρή άνοδο των αποδόσεων τις απογευματινές ώρες.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 30/8/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 45°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 45°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια

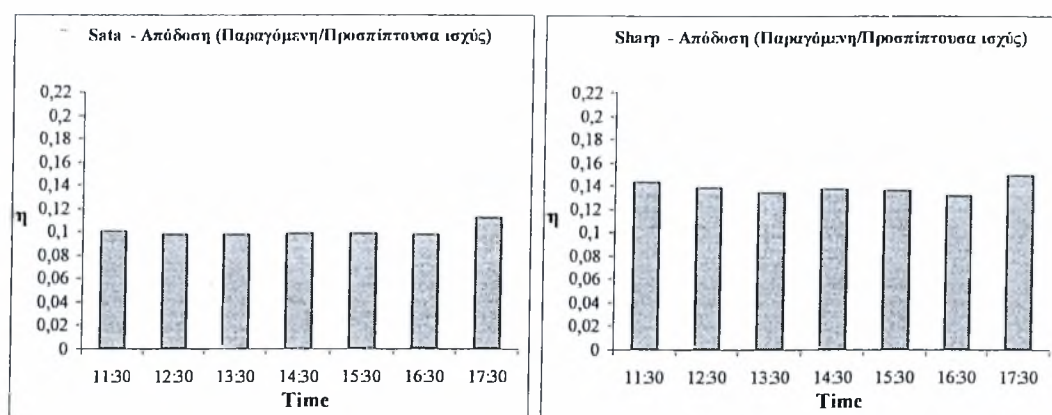


Στα παραπάνω διαγράμματα καταγράφονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν στις 30 Αυγούστου. Η γωνία θέσης των πάνελ ήταν 45° και έγιναν μετρήσεις για 6 ώρες κάτω από πλήρη ηλιοφάνεια. Οι καμπύλες  $P_{max}/t$  ( $\Delta$ ) εμφανίζονται πεπλατυσμένες σε σχέση με τις προηγούμενες μετρήσεις, γεγονός που δείχνει ότι η συνολική παραγόμενη ενέργεια ήταν σημαντικά αυξημένη. Η μέγιστη παραγωγή ισχύος παρατηρήθηκε μεταξύ των ωρών 12:30 και 13:30. Για το



μονοκρυσταλλικό πάνελ της Sata παρατηρήθηκε η μέγιστη ισχύς στις 12:30 με τιμή  $90 \text{ W/m}^2$ . Στη λειτουργία μέγιστης ισχύος, όπως παρατηρείται και από το διάγραμμα Γ, η ένταση ήταν 5 A. Από τα διαγράμματα Β παρατηρείται ότι η ιδανική ένταση λειτουργίας ήταν τα 15 V. Στο πολυκρυσταλλικό πάνελ της Sharp η μέγιστη ισχύς παρατηρήθηκε στις 12:30 όπου η τιμή ήταν  $125 \text{ W/m}^2$ . Από τα διαγράμματα Β και Γ παρατηρείται πως στο σημείο μέγιστης ισχύος η τάση είναι 15 V και η ένταση 4,2 A.

Η καμπύλες  $P_{\max}/t$  είναι ακόμη πιο πεπλατυσμένες σε σχέση με τις μετρήσεις των προηγούμενων ημερών. Τα σημεία μέγιστης ισχύος καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων είναι συνολικά βελτιωμένα. Η γωνία θέσης των  $45^\circ$  φαίνεται να είναι σαφώς καλύτερη από τις γωνίες  $90^\circ$ ,  $75^\circ$  και  $60^\circ$ .



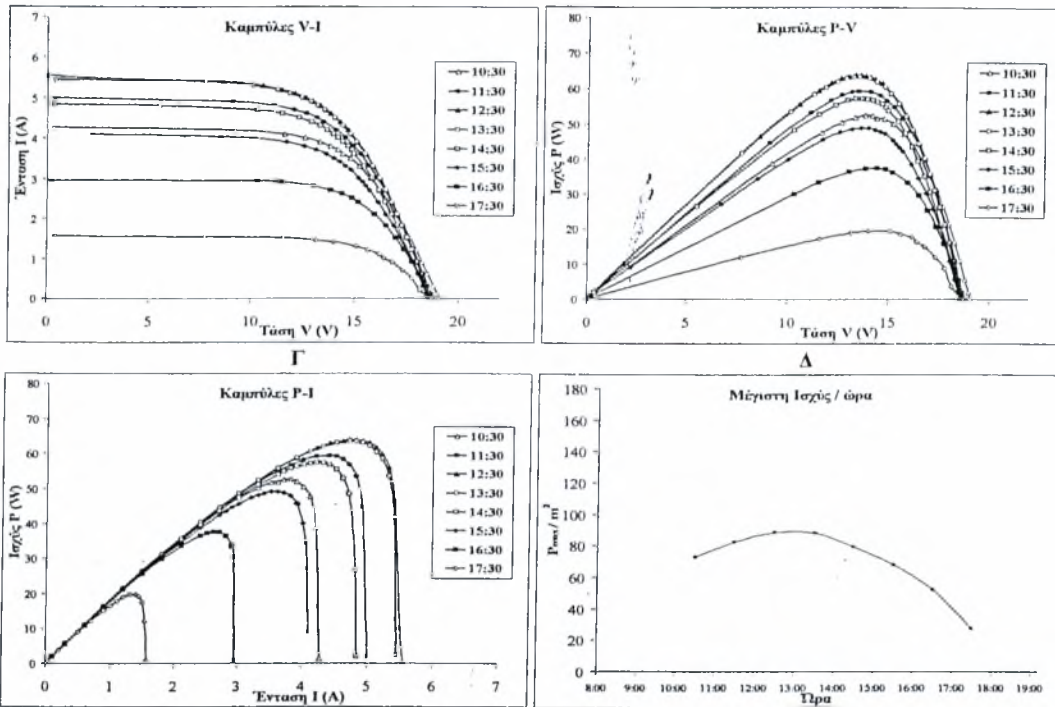
Παραπάνω παρουσιάζονται οι αποδόσεις των πάνελ. Στο πρώτο διάγραμμα, που αφορά το μονοκρυσταλλικό πάνελ Sata, οι αποδόσεις κινούνται μεταξύ 0,10 και 0,12. Η βέλτιστη απόδοση παρατηρήθηκε στις 17:30 και είχε τιμή 0,12. Γενικά παρατηρείται σταθερότητα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και οι τιμές προσεγγίζουν την απόδοση που έχει προβλεφθεί από τις προδιαγραφές. Στο διάγραμμα αποδόσεων του πολυκρυσταλλικού πάνελ Sharp, οι αποδόσεις βρίσκονται μεταξύ 0,14 και 0,15. Η μέγιστη απόδοση παρατηρείται στις 17:30 και έχει τιμή 0,15.

Παρατηρώντας συνολικά τα διαγράμματα αποδόσεων έως αυτό το σημείο παρατηρείται ότι η απόδοση δεν εξαρτάται από τη γωνία θέσης των πάνελ. Αντίθετα η παραγωγή ισχύος εξαρτάται από τη γωνία θέσης γιατί μεταβάλλεται η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

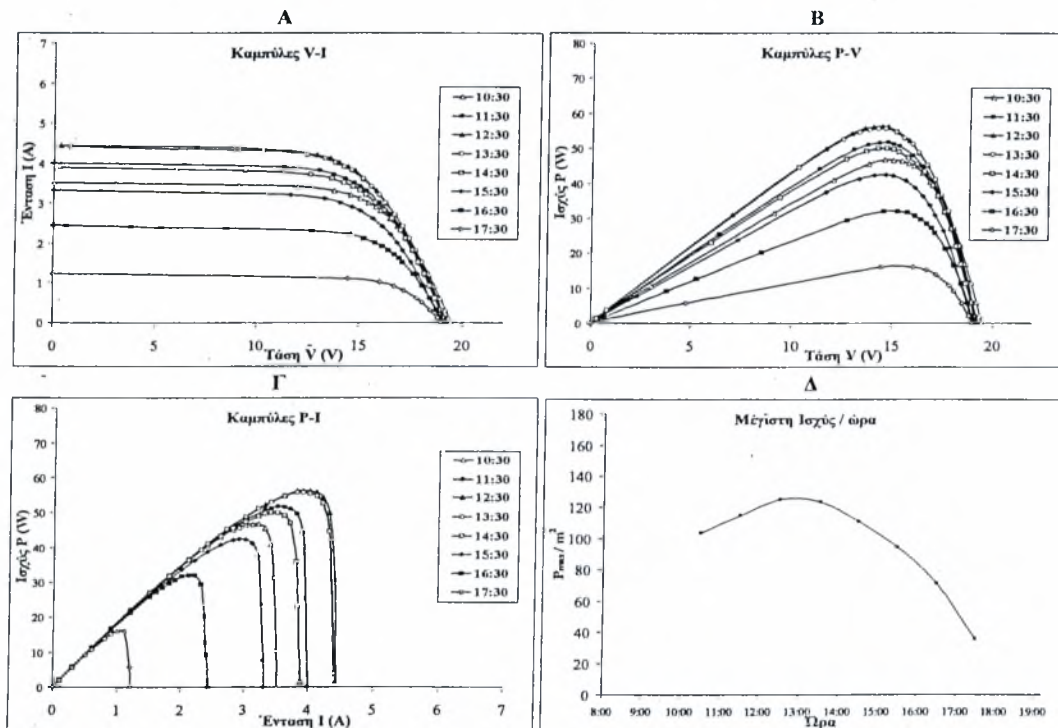


ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 31/8/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια.

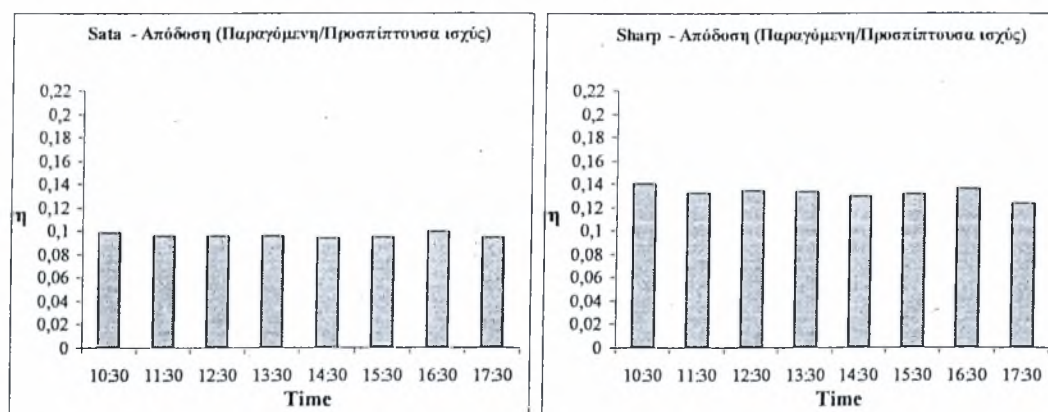


Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια.



Εδώ παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μετρήσεων που έγιναν στις 31 Αυγούστου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κάτω από συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας, και η γωνία θέσης ήταν 30°. Η συνολική διάρκεια των μετρήσεων ήταν 7 ώρες. Από τα διαγράμματα Δ παρατηρείται η μέγιστη ισχύς, μεταξύ 12:30 και 13:30 τόσο για το μονοκρυσταλλικό όσο και για το πολυκρυσταλλικό πάνελ. Πιο

συγκεκριμένα το πάνελ **Sata** παρουσίασε τη μέγιστη ισχύ στις 12:30 με τιμή  $90 \text{ W/m}^2$ . Από τα διαγράμματα Β και Γ παρατηρείται ότι η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος μετρήθηκε στα 15 V ενώ η ένταση μετρήθηκε στα 5,1 A. Στην περίπτωση του πάνελ **Sharp** η μέγιστη ισχύς μετρήθηκε στις 12:30 στα  $125 \text{ W/m}^2$ . Η τάση ήταν 15 V ενώ η ένταση ήταν 4 A. Συγκρίνοντας αυτά τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα της προηγούμενης μέτρησης όπου η γωνία θέσης ήταν  $45^\circ$ , παρατηρείται ότι δεν παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές. Αυτό δείχνει ότι αυτές οι γωνίες πλησιάζουν την ιδανική γωνία που βελτιστοποιεί την απόδοση. Όπως φαίνεται και στις επόμενες μετρήσεις, παραπλήσια συμπεριφορά παρατηρείται και σε γωνία θέσης  $0^\circ$ .

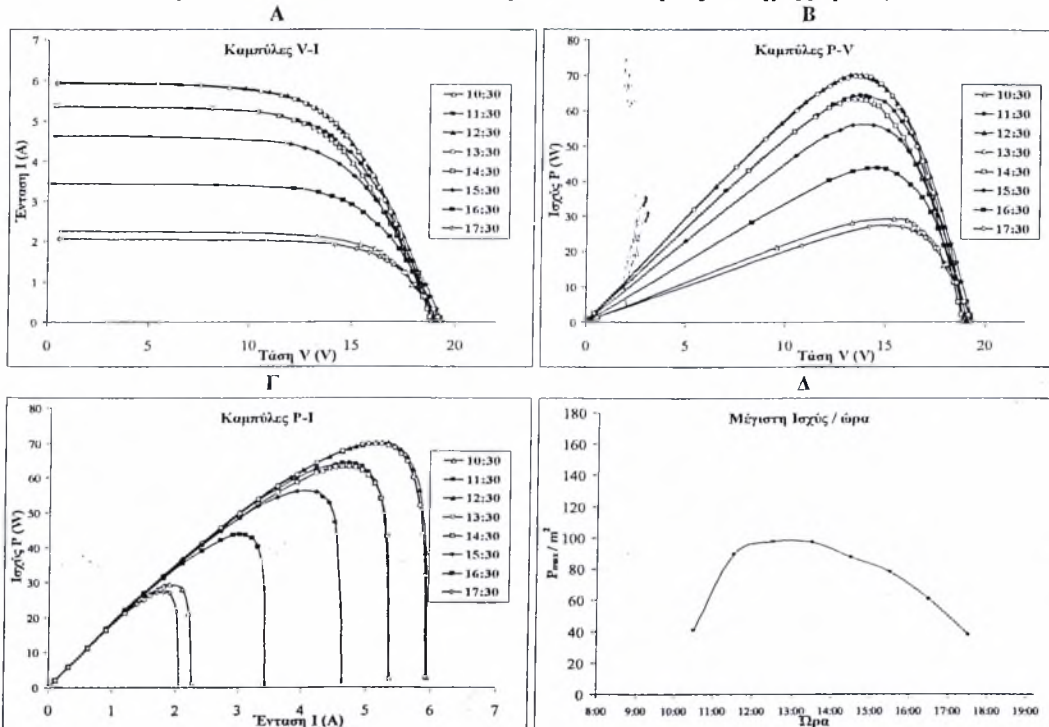


Στα παραπάνω διαγράμματα καταγράφονται οι αποδόσεις των πάνελ. Για το μονοκρυσταλλικό πάνελ **Sata** η απόδοση βρίσκεται μεταξύ 0,09 και 0,1. Η μέγιστη παρατηρήθηκε στις 16:30 και είχε τιμή 0,1. Στην περίπτωση του πολυκρυσταλλικού πάνελ **Sharp** οι αποδόσεις είναι μεταξύ 0,12 και 0,14. Η μέγιστη απόδοση ήταν στις 10:30 και είχε τιμή 0,14.

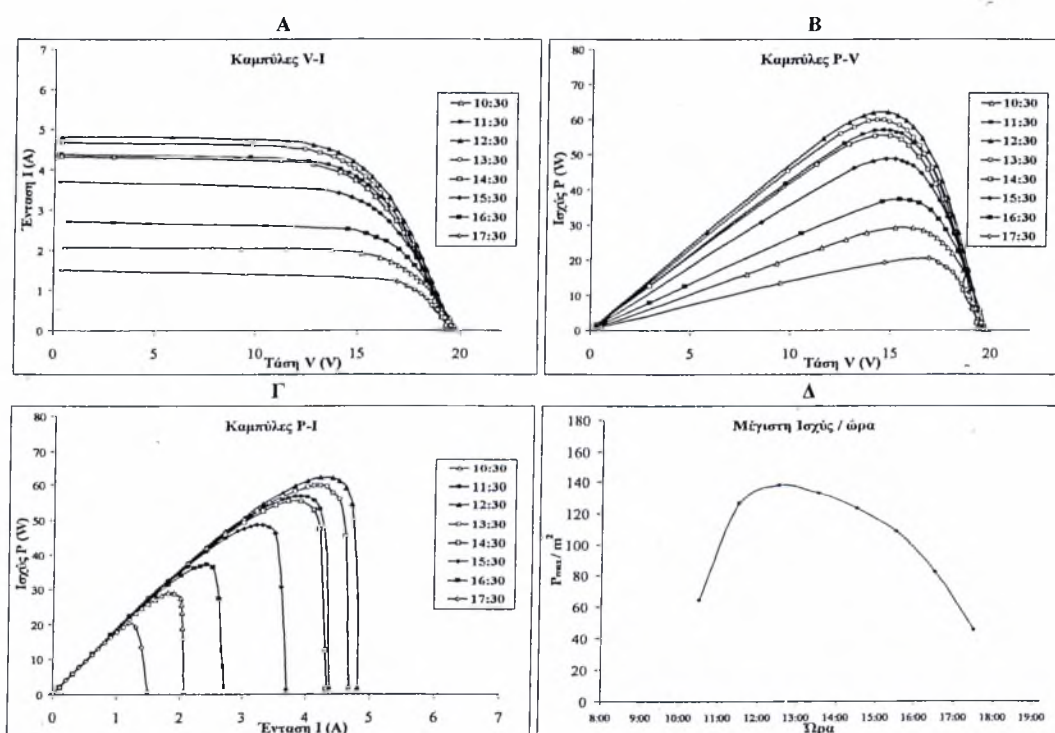
Στις μετρήσεις της ημέρας αυτής οι αποδόσεις για κάθε πάνελ παραμένουν σταθερές. Αυτό οφείλεται στην προσπάθεια μείωσης των σφαλμάτων και της επιρροής εξωγενών παραγόντων (σκόνη, απόκλιση από τη προβλεπόμενη θέση κ.λ.π.).

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 3/9/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης:  $15^\circ$ . Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια.

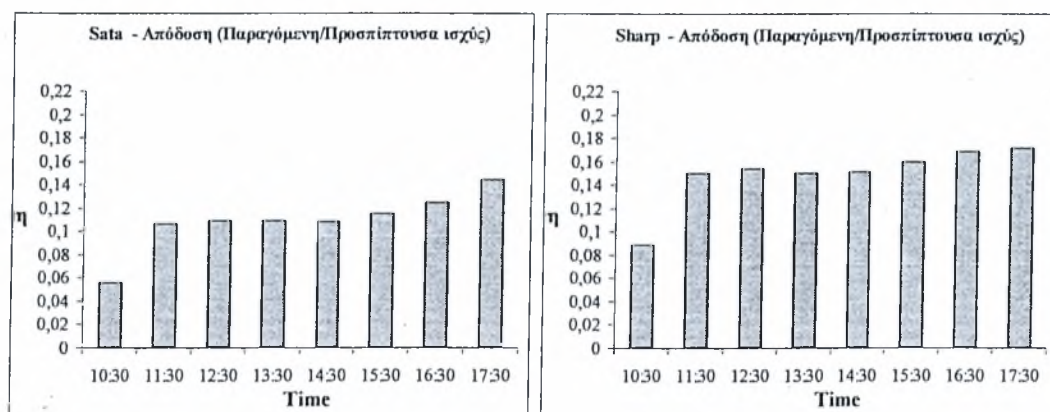


Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης:  $15^\circ$ . Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια.



Παραπάνω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μετρήσεων που έγιναν στις 3 Σεπτεμβρίου. Τα πάνελ αυτή τη φορά τοποθετήθηκαν σε γωνία θέσης  $15^\circ$  και οι μετρήσεις διήρκεσαν συνολικά 7 ώρες. Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα Δ η μέγιστη παραγωγή ισχύος για το πάνελ Sata εντοπίστηκε στις 12:30 και είχε τιμή  $100 W/m^2$ . Από τα διαγράμματα Β και Γ παρατηρείται ότι η τάση στο σημείο αυτό ήταν

15 V ενώ η ένταση 5,8 A. Για την περίπτωση του πολυκρυσταλλικού πάνελ Sharp από το διάγραμμα Δ παρατηρήθηκε η μέγιστη ισχύς στις 12:30 με τιμή  $140 \text{ W/m}^2$ . Από τα διαγράμματα Β και Γ παρατηρήθηκε η τάση για το σημείο στα 15 V ενώ η ένταση είχε τιμή 4,7 A. Οι επιφάνειες που σχηματίζουν οι καμπύλες  $P_{\max}/I$  με τους άξονες X και γνωρίζοντας ότι το εμβαδό των επιφανειών αυτών ισούται με την συνολικά παραγόμενη ενέργεια, έχουν το μεγαλύτερο εμβαδό σε σύγκριση με τα εμβαδά στις περιπτώσεις των υπολοίπων γωνιών θέσης. Όπως θα φανεί και στην αμέσως επόμενη ημέρα μετρήσεων, όπου περιγράφονται οι μετρήσεις σε γωνία  $0^\circ$ , η γωνία θέσης των  $15^\circ$  θεωρείται η καλύτερη όσον αφορά τη συνολικά παραγόμενη ενέργεια. Πρέπει να τονιστεί ότι η γωνία αυτή φαίνεται να είναι ιδανική για τους θερινούς μήνες, το συμπέρασμα αυτό όμως δεν μπορεί να γενικευτεί για όλη τη διάρκεια του χρόνου επειδή ο ήλιος τους χειμερινούς μήνες διαγράφει χαμηλότερη και μικρότερη τροχιά στον ουράνιο θόλο.



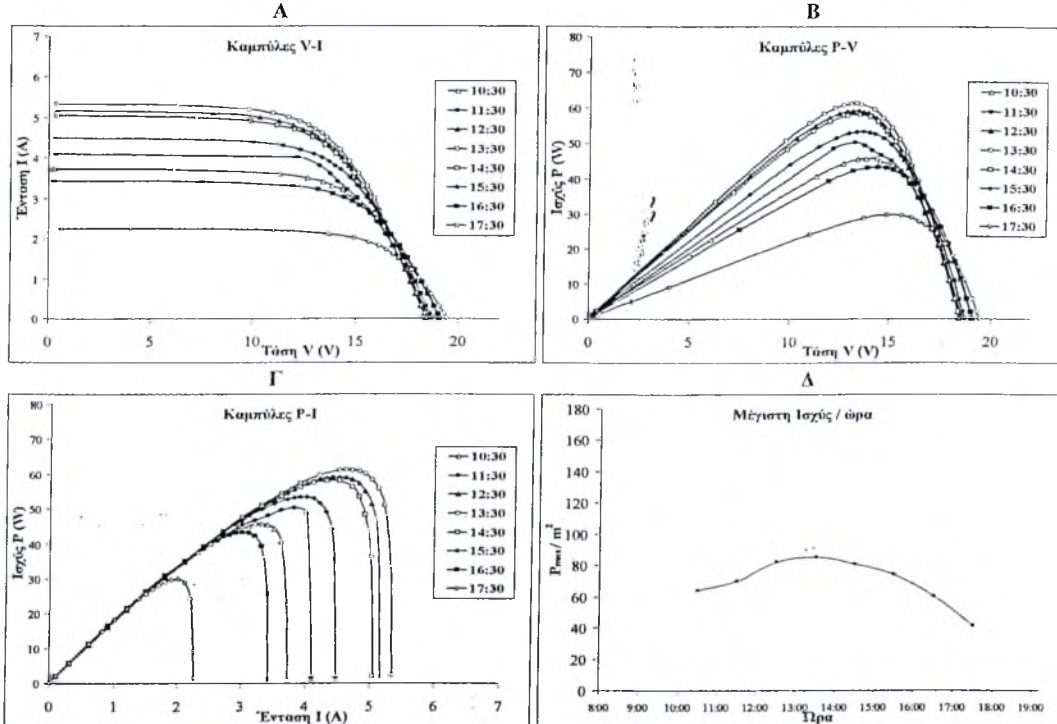
Στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζεται η απόδοση των πάνελ τη συγκεκριμένη ημέρα. Στην περίπτωση του πάνελ **Sata** οι αποδόσεις βρίσκονται μεταξύ 0,1 και 0,14. Η μεγαλύτερη απόδοση παρουσιάζεται στις 17:30 και έχει τιμή 0,14. Η πολύ μικρή απόδοση, της τάξης του 0,055 στις 10:30 οφείλεται πιθανότατα σε σφάλμα στη μέτρηση ή σε σφάλμα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.

Το πολυκρυσταλλικό πάνελ **Sharp** παρουσίασε αποδόσεις μεταξύ 0,15 και 0,16. Η μεγαλύτερη απόδοση παρατηρήθηκε στις 17:30 με τιμή 0,16. Και πάλι παρατηρείται στις 10:30 μειωμένη απόδοση για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

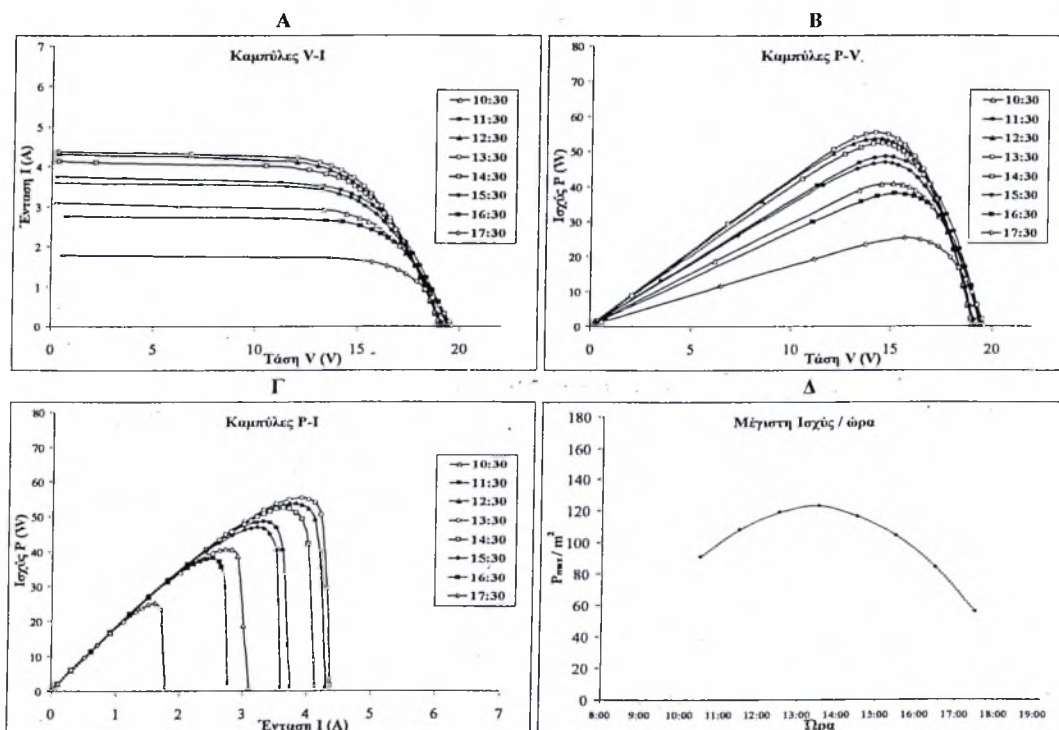


ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 4/9/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης:  $0^\circ$ . Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης:  $0^\circ$ . Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια.

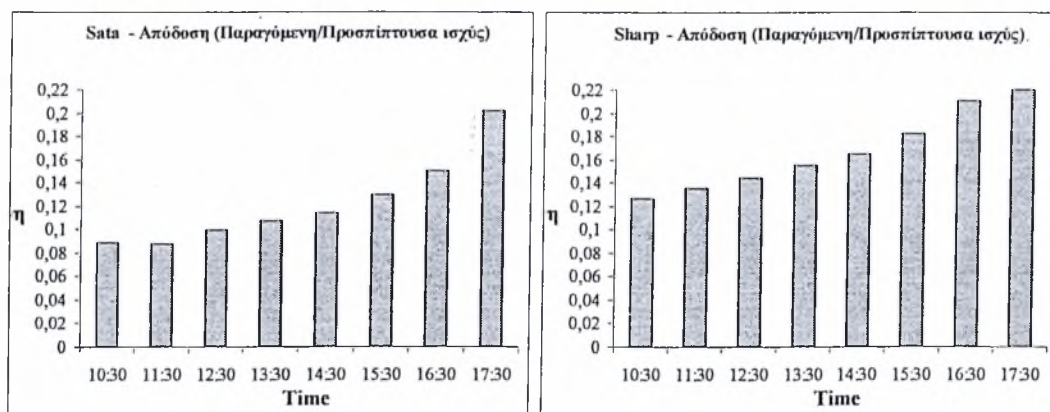


Στις 4 Σεπτεμβρίου τα πάνελ τοποθετήθηκαν σε γωνία  $0^\circ$  κάτω από πλήρη ηλιοφάνεια. Έγιναν μετρήσεις για 7 ώρες. Από το διάγραμμα Δ παρατηρήθηκε, για το μονοκρυσταλλικό πάνελ **Sharp**, η μέγιστη ισχύς στις 13:30 με τιμή  $82 \text{ W/m}^2$ . Από τα διαγράμματα Γ και Δ παρατηρείται η αντίστοιχη ένταση στα 4,8 A ενώ η τάση είναι 15 V. Για το πολυκρυσταλλικό πάνελ **Sata** παρατηρήθηκε μέγιστη ισχύς  $120 \text{ W/m}^2$ ,



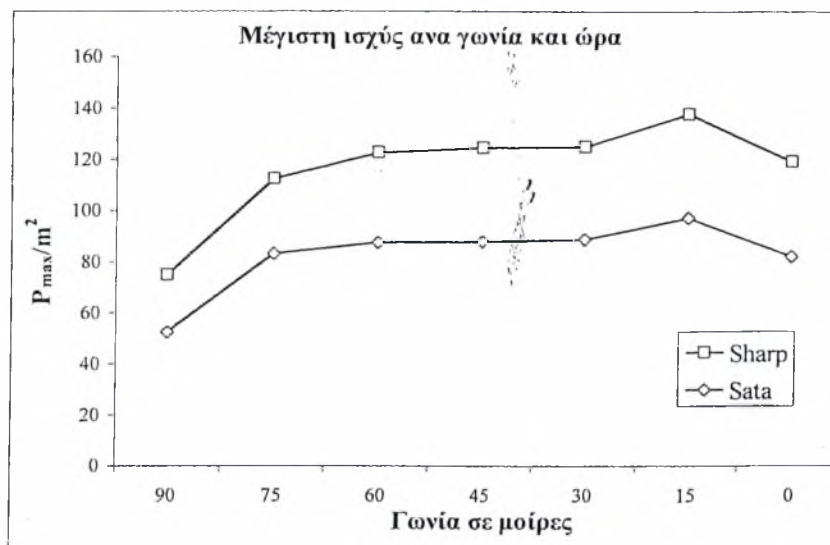
την ίδια χρονική στιγμή, με αντίστοιχη ένταση περίπου 4 A. Η τάση ήταν 15 V. Όπως προαναφέρθηκε η απόδοση στις 0° ομοιάζει με αυτές στις 30° και 45°. Όμως συνολικά καθώς κινούμαστε από τις 45° στις 0° η καμπύλη  $P_{\max}$ -t διατηρεί την μορφή της αλλά γίνεται περισσότερο πεπλατυσμένη, που σημαίνει ότι αυξάνεται και η συνολική παραγόμενη ενέργεια.

Αποδεικνύεται ότι κατά τη συγκεκριμένη περίοδο του χρόνου η ιδανική γωνία είναι κοντά στις 15°. Ο ήλιος αυτήν την εποχή ανεβαίνει σε μεγάλο ύψος σε αντίθεση με τους χειμερινούς μήνες που η τροχιά του είναι χαμηλότερη. Όπως εξηγήθηκε και στην προηγούμενη μέτρηση, η γωνία αυτή (15°) δεν ισοδυναμεί με την ιδανική γωνία που πρέπει να επιλέξει ο μηχανικός κατά την εγκατάσταση μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



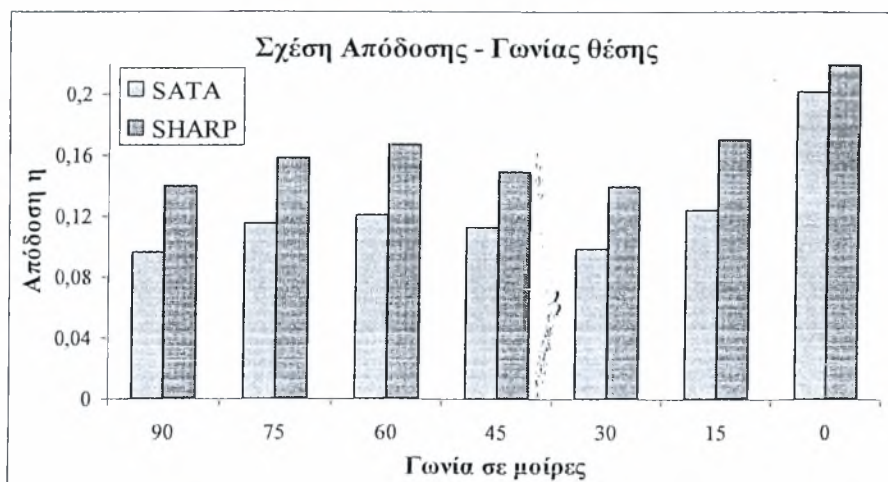
Αξιοσημείωτη είναι η μορφή των διαγραμμάτων απόδοσης στις 0°. Παρουσιάζεται μια τάση για αύξηση που οδηγεί σε ακραίες τιμές προς τις απογευματινές ώρες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα πάνελ αυτή τη μέρα τοποθετήθηκαν στο δάπεδο και όχι στην μεταλλική βάση με αποτέλεσμα οι αντανάκλασεις από τους υαλοπίνακες του παρακείμενου κτηρίου να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Το μονοκρυσταλλικό πάνελ Sata έχει εύρος αποδόσεων 0,08 – 0,2 με τη μέγιστη τιμή στις 17:30. Αντίστοιχα, στο πολυκρυσταλλικό πάνελ Sharp η απόδοση έχει εύρος 0,12 – 0,22. Είναι φανερό ότι έχει γίνει κάποιο σφάλμα στις μετρήσεις, μιας και αποδόσεις της τάξης του 0,2 είναι αδύνατες. Πιθανώς στη χαμηλή θέση στην οποία τοποθετήθηκαν τα πάνελ (έδαφος), να υπήρξαν αντανάκλασεις από τα γύρω κτήρια.

## ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται συγκεντρωμένες σε ένα διάγραμμα οι μετρήσεις στις 13:30, όπου και παρατηρήθηκε η μέγιστη ισχύς κάθε ημέρας. Έτσι καταρτίστηκε ένα διάγραμμα μέγιστης ισχύος – γωνίας θέσης. Παρατηρείται ότι στις 90° και στις 75° η μέγιστη ισχύς και στο Sharp και στο Sata είναι συγκριτικά πολύ χαμηλότερες από τις υπόλοιπες. Σε γωνία θέσης 60°, 45° 30°, και 0° η διαφοροποίηση είναι μικρή. Τέλος είναι σαφές ότι στη γωνία θέσης των 15° το μονοκρυσταλλικό πάνελ παράγει ισχύ 140 W/m<sup>2</sup>. Το πολυκρυσταλλικό πάνελ σε αυτή τη γωνία θέσης παράγει ισχύ 100 W/m<sup>2</sup>.

Η γωνία θέσης που μπορεί να θεωρηθεί ιδανική είναι οι 15°. Πρέπει να τονιστεί ότι αυτή η γωνία δεν είναι ιδανική για μία εγκατάσταση που λειτουργεί όλη τη χρονιά γιατί το μέγιστο ύψος του ήλιου μεταβάλλεται από 65° το καλοκαίρι σε 30° περίπου το χειμώνα. Έτσι για τον ελλαδικό χώρο η ιδανική γωνία θέσης για ένα σταθερό σύστημα είναι οι 30° (κατά προσέγγιση ισούται με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής).



Εδώ διακρίνεται η απόδοση η των φωτοβολταϊκών πάνελ σε σχέση με τη γωνία θέσης. Παρόλο που φαίνεται να υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση από γωνία σε γωνία, μετά από προσεκτική παρατήρηση όλων των αποδόσεων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει σχέση που να επηρεάζει την απόδοση. Έτσι οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται οφείλονται σε άλλα αίτια. Κάποια από αυτά είναι:

- η θερμοκρασία των πάνελ
- η ακρίβεια του λογισμικού υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας
- πειραματικά σφάλματα
- αντανakλάσεις από παρακείμενα κτήρια

Για να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα είναι απαραίτητη η χρήση ειδικής πειραματικής συσκευής που ονομάζεται πυρόμετρο (pyrometer), καθώς και μεγαλύτερη άνεση χώρου ώστε να επιλεγεί μία τοποθεσία για τη διεξαγωγή του πειράματος, με λίγες αντανakλάσεις από παρακείμενα κτήρια.

#### 4.4.2.2 Μελέτη της απόδοσης κατά τη διάρκεια μιας ημέρας

Στη δεύτερη ομάδα μετρήσεων ο στόχος ήταν να μελετηθεί η συνολική απόδοση κατά τη διάρκεια ολόκληρης της ημέρας. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκαν ολοήμερες μετρήσεις ανά μια ώρα, από την αυγή μέχρι τη δύση του ηλίου. Η διεξαγωγή των μετρήσεων αυτών έγινε από τις 6 έως τις 14 Σεπτεμβρίου.

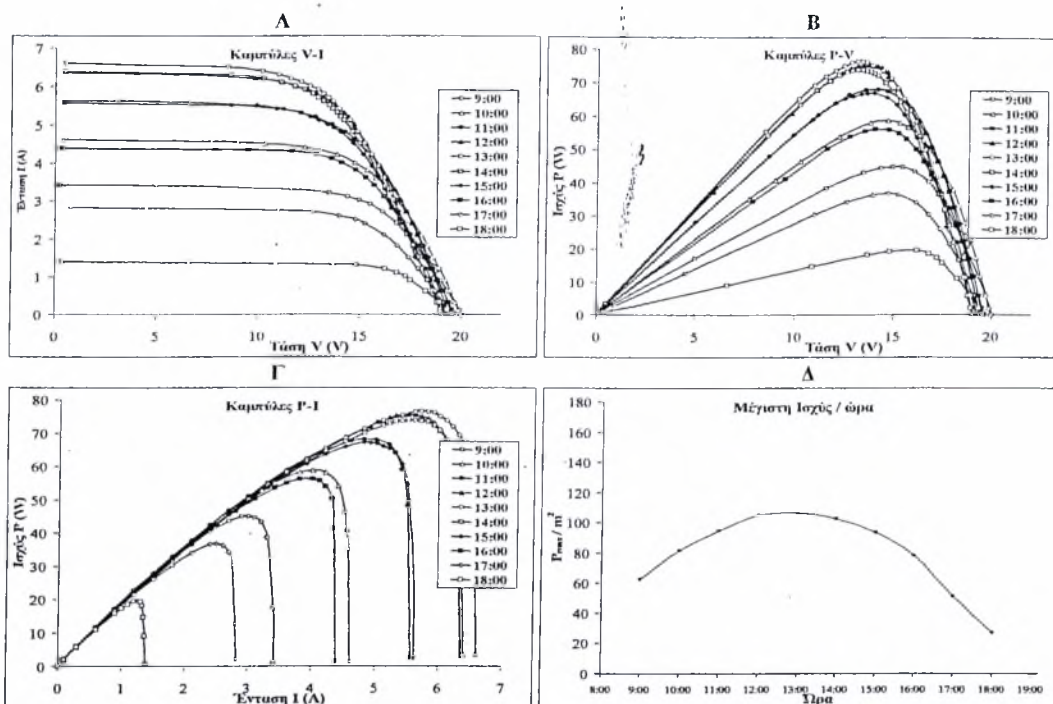
Ένας δεύτερος στόχος ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά των πάνελ υπό συνθήκες νέφωσης και να συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτά με μετρήσεις που έγιναν υπό τις ίδιες συνθήκες, αλλά με πλήρη ηλιοφάνεια. Επίσης τις ημέρες που οι καιρικές συνθήκες ήταν ασταθείς, δηλαδή υπήρχε εναλλαγή ηλιοφάνειας – νέφωσης, η θερμοκρασία των πάνελ διατηρήθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα από τις ημέρες με πλήρη ηλιοφάνεια. Έτσι θα εξαχθούν κάποια ποιοτικά συμπεράσματα, όσο αφορά την επιρροή της θερμοκρασίας στην απόδοση.

Παρακάτω παρουσιάζονται αρχικά οι καμπύλες  $V-I$ ,  $P-V$ ,  $P-I$  και  $P_{\max}-t$  και έπειτα τα διαγράμματα απόδοσης ( παραγόμενη ισχύς / προσπίπτουσα ισχύς ) για κάθε μέρα μετρήσεων και για τα δύο πάνελ που μελετήθηκαν. Στο τέλος της ενότητας παρουσιάζονται και κάποια συγκεντρωτικά διαγράμματα όπου συγκρίνονται οι αποδόσεις υπό πλήρη ηλιοφάνεια, ελαφριά, μέτρια και πυκνή νέφωση.

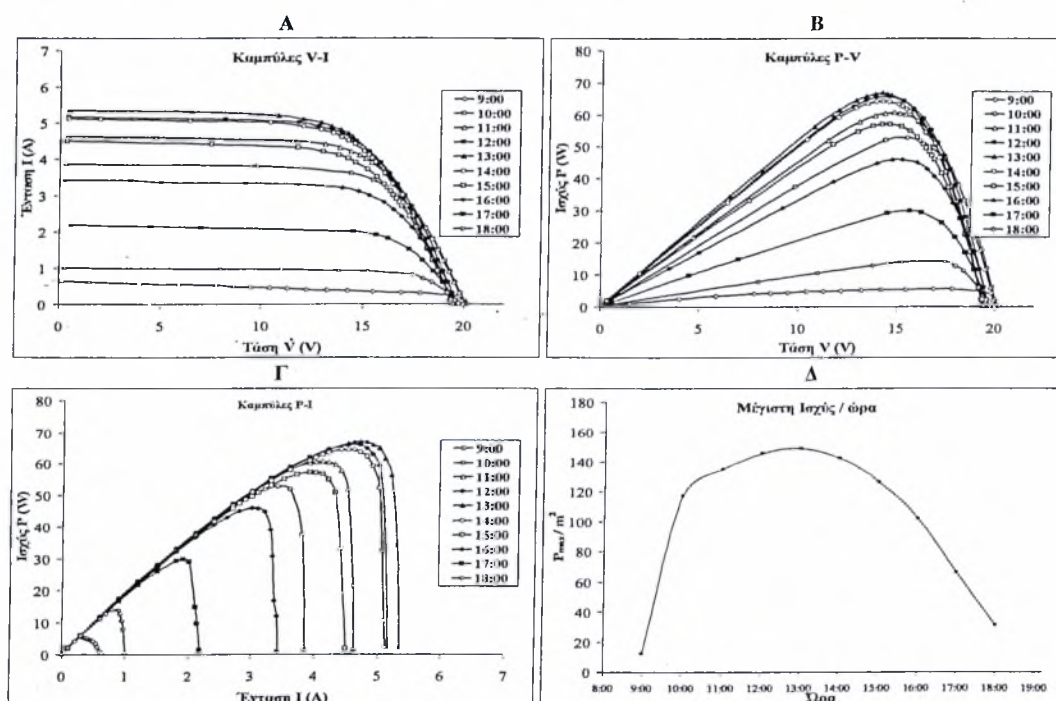
# ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΝΕΦΩΣΗΣ (6 - 14 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ)

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 6/9/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης:  $30^\circ$ . Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης:  $30^\circ$ . Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια

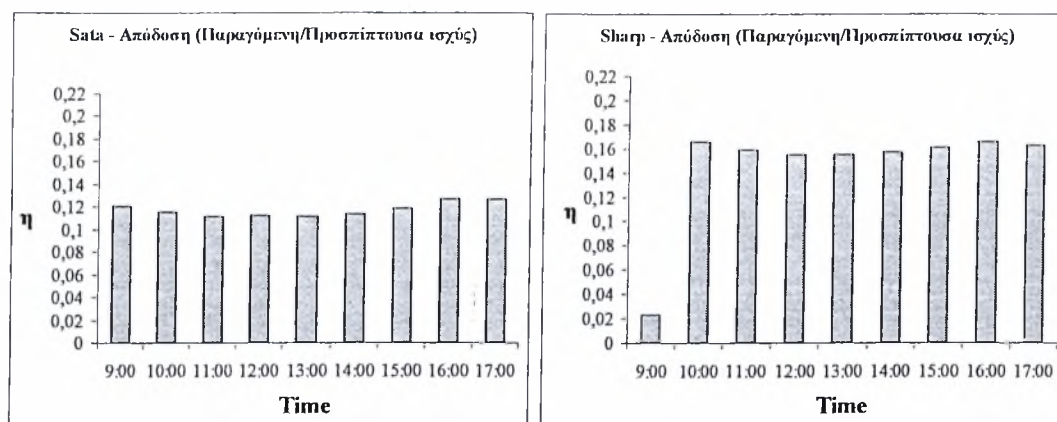


Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται εδώ έγιναν στις 6 Σεπτεμβρίου και διήρκεσαν 9 ώρες. Η γωνία θέσης ήταν  $30^\circ$  και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν υπό συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας. Για το μονοκρυσταλλικό πάνελ από την καμπύλη  $P_{max}/t$  του διαγράμματος Δ παρατηρείται ότι η παραγωγή ισχύος μεγιστοποιήθηκε και πάλι μεταξύ των ωρών 12:00 και 14:00. Στις 13:00 παρατηρήθηκε η μέγιστη ισχύς με



τιμή  $105 \text{ W/m}^2$  όπου και η ένταση για την τιμή αυτή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα Γ ήταν 6,1 A. Η τάση σε αυτό το σημείο ήταν 15 V. Το πολυκρυσταλλικό πάνελ παρουσίασε κι αυτό τις μέγιστες αποδόσεις μεταξύ των ωρών 12:00 και 14:00, με μέγιστη τιμή στις 13:00, στα  $150 \text{ W/m}^2$ . Η αντίστοιχη ένταση έφτασε τα 5 A ενώ η τάση ήταν 15 V (διαγράμματα Β και Γ).

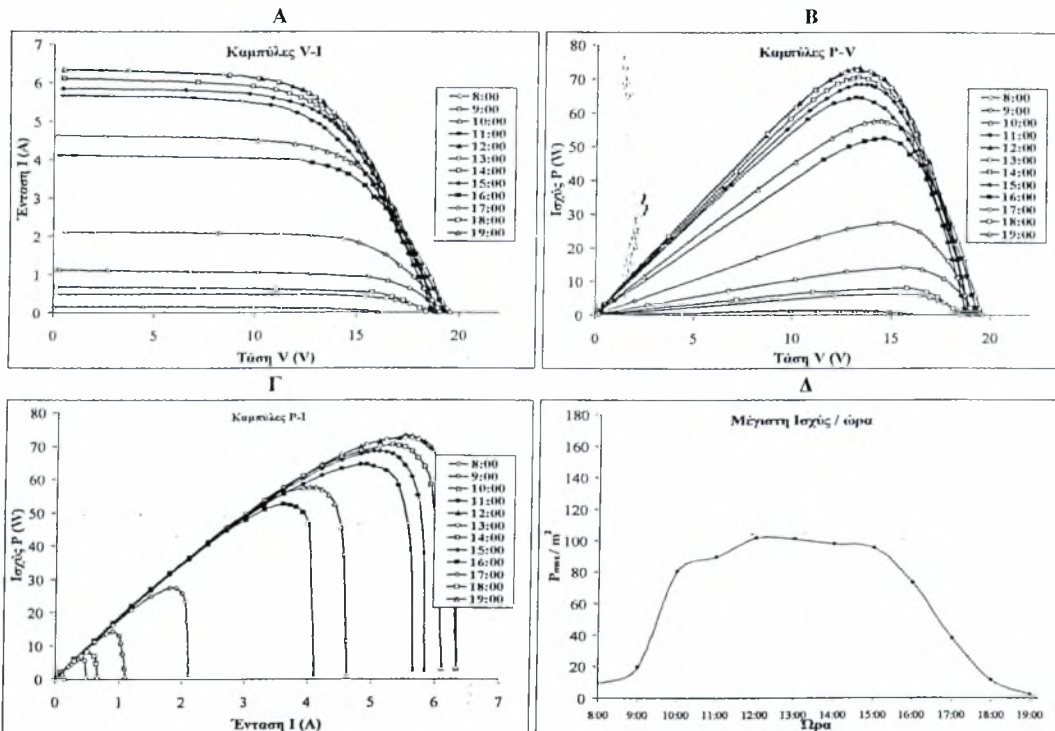
Έχοντας ολοκληρωμένη μέτρηση για όλες τις ώρες της ημέρας, παρατηρείται ότι τα διαγράμματα Δ παρουσιάζουν μορφή ‘ηφαιστειού’ (volcano). Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί και το διάγραμμα προσπίπτουσας ακτινοβολίας – χρόνου παρουσιάζει παρόμοια μορφή.



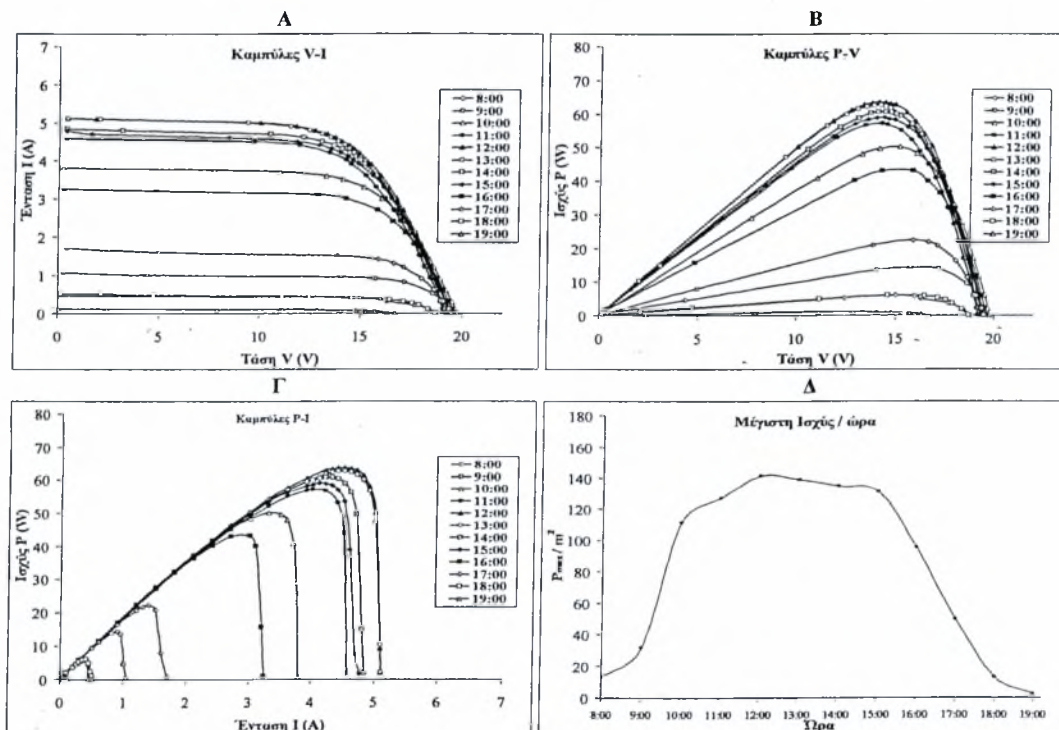
Λόγω των ιδανικών συνθηκών που επικρατούσαν αυτή τη μέρα η απόδοση η παραμένει σταθερή. Το μονοκρυσταλλικό πάνελ αποδίδει περίπου 0,11 με 0,12. Η μέγιστη απόδοση παρατηρείται στις 16:00. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας η απόδοση παραμένει σταθερή και αυτό οφείλεται κυρίως στις ιδανικές καιρικές συνθήκες που επικράτησαν τη συγκεκριμένη ημέρα. Το πολυκρυσταλλικό πάνελ είχε απόδοση 0,15 - 0,17 με εξαίρεση τις 9:00 που η απόδοση ήταν 0,02. Η απόδοση αυτή οφείλεται σε πειραματικό σφάλμα. Η μέγιστη απόδοση παρατηρήθηκε στις 10:00 και είχε τιμή 0,16. Οι τιμές αυτές, αν συγκριθούν με τις μετρήσεις της προηγούμενης ομάδας παρουσιάζουν μία μικρή βελτίωση της τάξης του 0,01. Αυτό οφείλεται στις χαμηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος που επικράτησαν σε σχέση με τις προηγούμενες μετρήσεις.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 10/9/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30° Συνθήκες: εναλλαγή ηλιοφάνειας – νέφωσης



Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30° Συνθήκες: εναλλαγή ηλιοφάνειας – νέφωσης

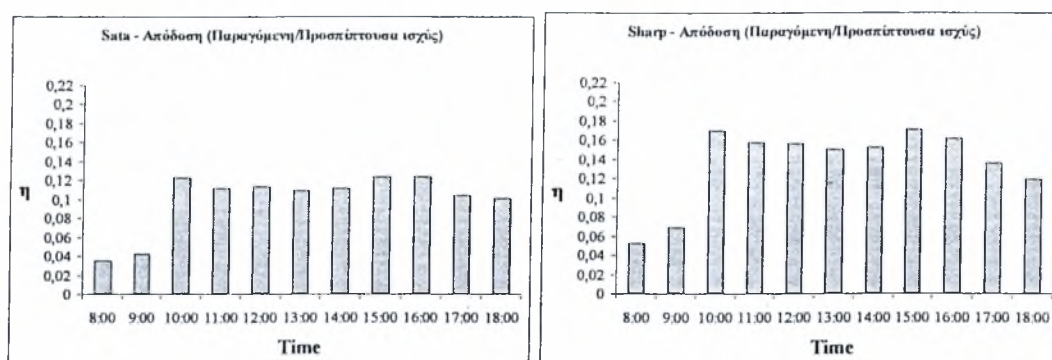


Στις 10 Σεπτεμβρίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις που διήρκησαν 11 ώρες.

Οι καιρικές συνθήκες ήταν ασταθείς με αποτέλεσμα να γίνουν μετρήσεις υπό ηλιοφάνεια αλλά και υπό ελαφριά νέφωση. Η περιοδική νέφωση δεν επέτρεψε να ληφθεί καμπύλη  $P_{\max}$ -t υπό ιδανικές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά με την παρουσίαση των διαγραμμάτων αυτών σε συνδυασμό με τα διαγράμματα απόδοσης μπορεί να

παρατηρηθεί ποιοτικά ο βαθμός στον οποίο επηρεάζεται η λειτουργία των πάνελ από τις καιρικές συνθήκες και να αντληθούν συμπεράσματα για τις απώλειες στην παραγωγή ισχύος. Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα Δ του πάνελ **Sata** η μέγιστη ισχύς παρουσιάζεται στις 12:00 με τιμή περίπου  $100 \text{ W/m}^2$ . Από τα διαγράμματα Β και Δ εντοπίζεται ότι η αντίστοιχη ένταση σε αυτό το σημείο λειτουργίας ήταν 5,9 A και η τάση στα 15 V.

Το πολυκρυσταλλικό πάνελ **Sharp** απέδωσε και αυτό τη μέγιστη ισχύ στις 12:00 με τιμή  $140 \text{ W/m}^2$ . Η ένταση, όπως φαίνεται στο διάγραμμα Γ είναι, 4,6 A και η τάση 15 V (διάγραμμα Β).



Σε αυτή την περίπτωση στις περιοχές κοντά στον ορίζοντα υπήρχε μεγάλη συγκέντρωση υγρασίας με αποτέλεσμα μέρος της ακτινοβολίας να χάνεται. Έτσι τις πρωινές και απογευματινές ώρες παρουσιάζεται ραγδαία πτώση της αναμενόμενης απόδοσης που έφτασε μέχρι και το κατώτερο όριο του 0,05. Αυτό δείχνει ότι μικρές διαφοροποιήσεις στην κατάσταση της ατμόσφαιρας επηρεάζουν σημαντικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης λόγω της εναλλαγής νέφωσης – ηλιοφάνειας, η θερμοκρασία των πάνελ διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα και έτσι παρουσιάζουν ελαφρώς βελτιωμένη απόδοση.

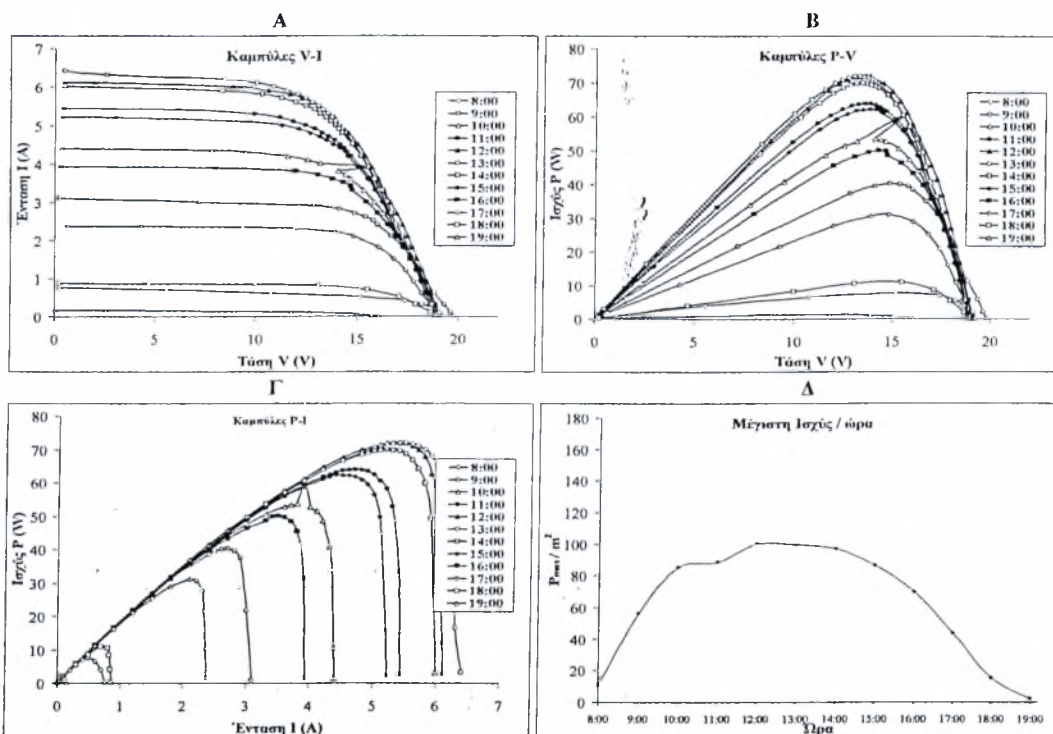
Το μονοκρυσταλλικό πάνελ **Sata** παρουσίασε αποδόσεις μεταξύ 0,03 και 0,12. Η μέγιστη απόδοση παρουσιάστηκε στις 10:00 και είχε τιμή 0,12. Αντίστοιχα το πολυκρυσταλλικό πάνελ **Sharp** παρουσίασε απόδοση 0,5 – 0,17. Η μέγιστη απόδοση εντοπίστηκε στις 10:00 και είχε τιμή 0,17.

Λόγω της μικρής αστάθειας του καιρού αποτυπώνονται κάποιες αυξομειώσεις στις αποδόσεις των πάνελ.

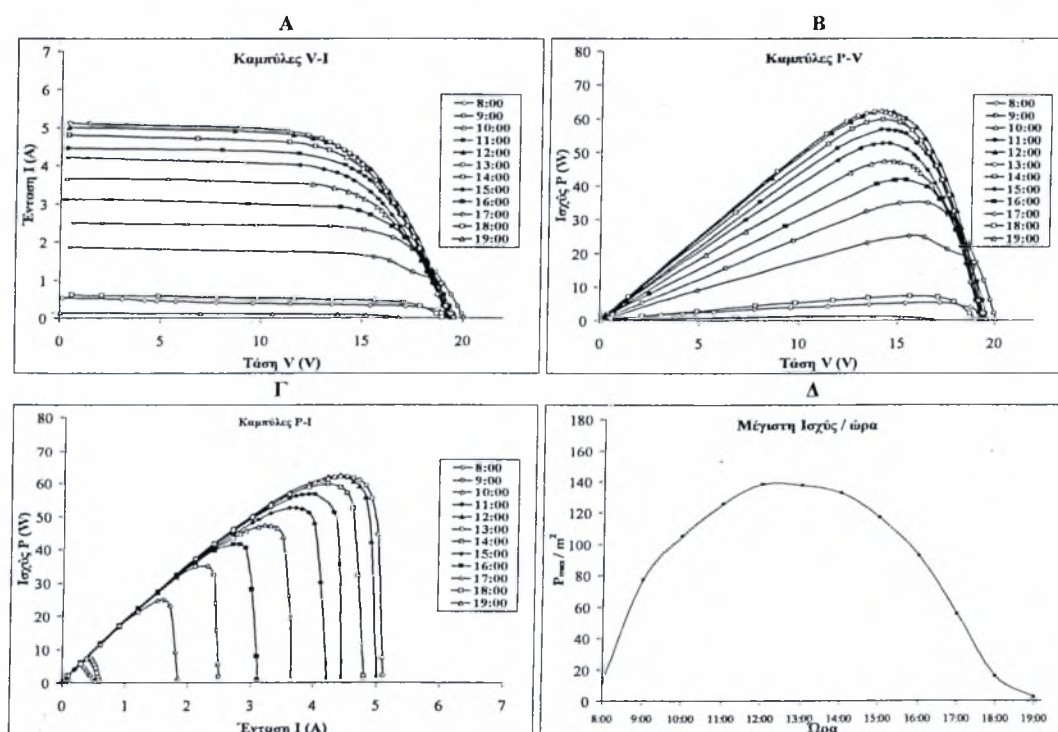


ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 11/9/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια

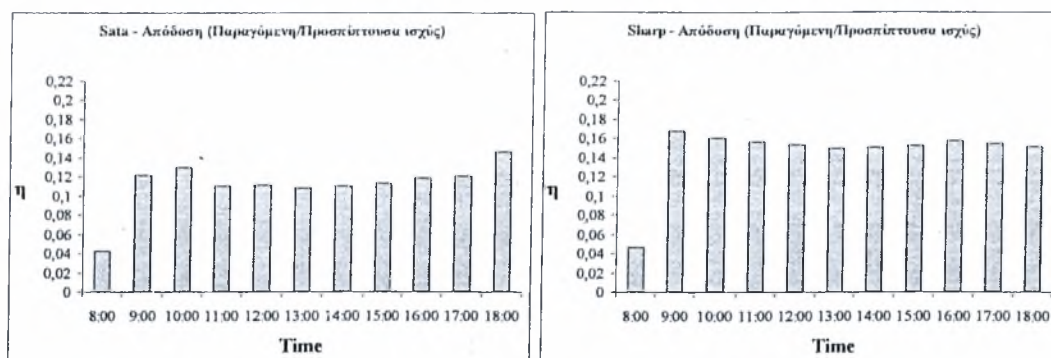


Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



Στις 11 Σεπτεμβρίου οι μετρήσεις έγιναν υπό ιδανικές συνθήκες και διήρκεσαν 11 ώρες. Η γωνία θέσης ήταν στις 30°. Οι καμπύλες  $P_{\max}/t$  είναι από τις πλέον ολοκληρωμένες. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα όλης της ημέρας η μέγιστη απόδοση εντοπίζεται και πάλι μεταξύ 12:00 και 14:00. Το μονοκρυσταλλικό πάνελ παρουσιάζει τη μέγιστη ισχύ στις 12:00 (διάγραμμα Δ). Όπως και στην προηγούμενη

μέτρηση, έτσι και σε αυτή η μέγιστη ισχύς για το μονοκρυσταλλικό πάνελ είναι  $100 \text{ W/m}^2$  με ένταση  $5,9 \text{ A}$  (διαγράμματα Β και Γ). Η τάση στο σημείο αυτό είναι στα  $15 \text{ V}$ . Για το πολυκρυσταλλικό πάνελ η μέγιστη ισχύς, που παρουσιάστηκε στις  $12:00$  είναι  $140 \text{ W/m}^2$  και η ένταση στα  $4,6 \text{ A}$ . Η τάση βρέθηκε να είναι  $15 \text{ V}$ . Τα διαγράμματα Δ παρουσιάζουν και πάλι μορφή ‘ηφαιστείου, (volcano). Γενικά παρατηρούνται παραπλήσια αποτελέσματα σε σχέση με τις δύο προηγούμενες μετρήσεις.



Σε αυτά τα διαγράμματα φαίνεται έντονα η επιρροή της θερμοκρασίας στην απόδοση. Τις μεσημεριανές ώρες όπου η θερμοκρασία των πάνελ βρισκόταν σε υψηλά επίπεδα γίνεται ορατή η μικρή πτώση της απόδοσης κατά  $0.01$  περίπου. Έγιναν προσπάθειες να καταγραφούν οι θερμοκρασιακές των στοιχείων, με χρήση θερμοστοιχείων και θερμογραφικής κάμερας, χωρίς όμως ικανοποιητικά και ασφαλή αποτελέσματα.

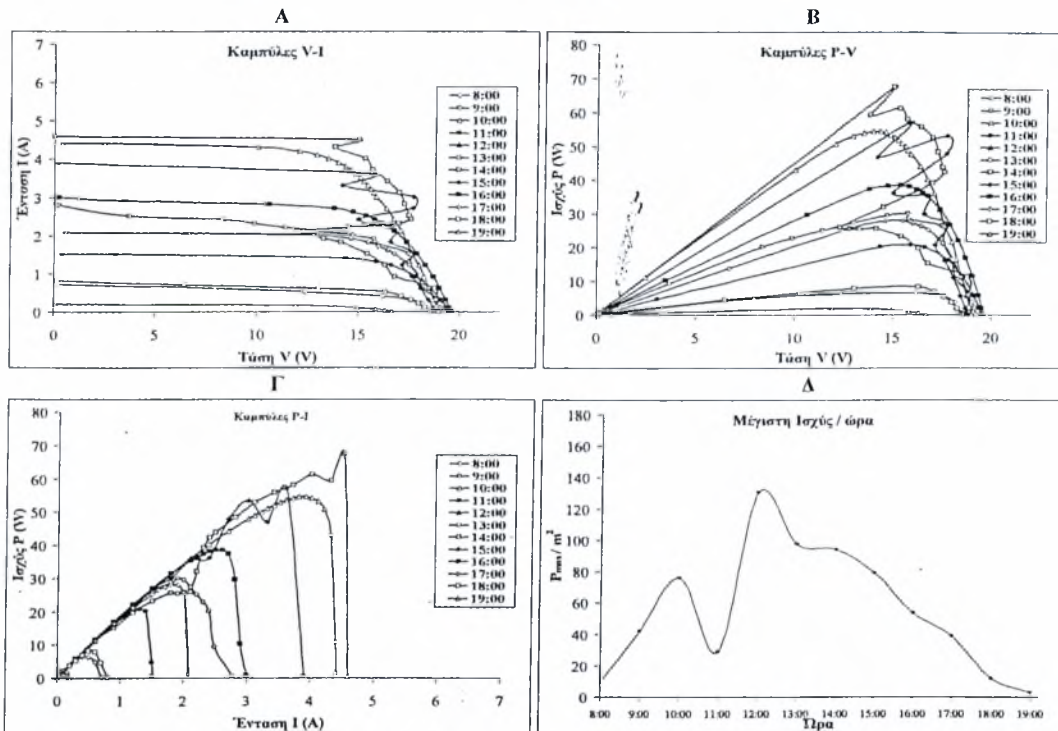
Πιο συγκεκριμένα το πάνελ **Sata** είχε αποδόσεις μεταξύ  $0,11$  και  $0,14$ . Η μέγιστη τιμή παρατηρήθηκε στις  $18:00$  όπου και έφτασε το  $0,14$ .

Τέλος το πάνελ **Sharp** απέδωσε από  $0,14$  έως  $0,17$ . Η μέγιστη απόδοση παρατηρήθηκε στις  $9:00$  και η τιμή της ήταν  $0,17$ .

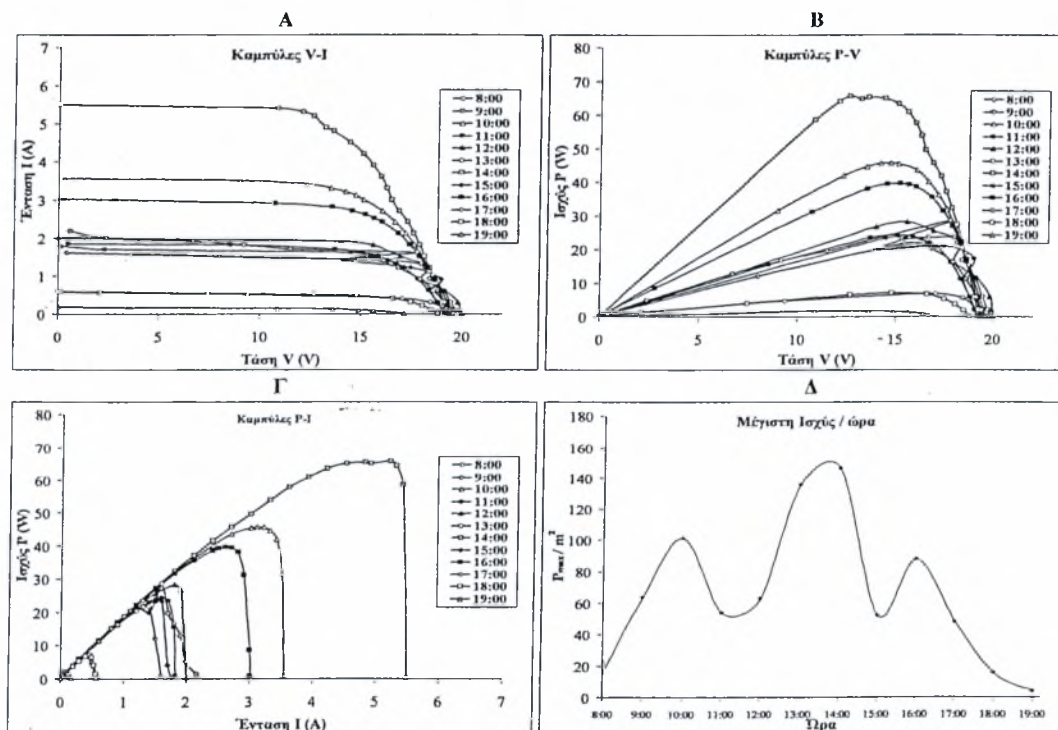


ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 12/9/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: Εναλλαγή νέφωσης – ηλιοφάνειας.



Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: Εναλλαγή νέφωσης – ηλιοφάνειας.



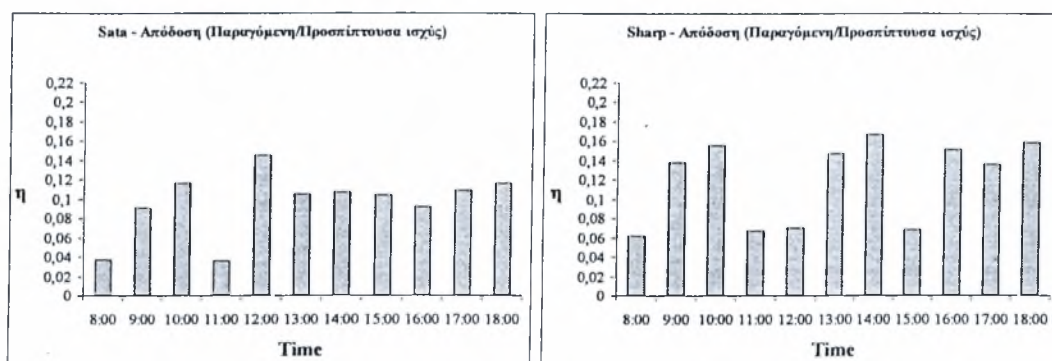
Την ημέρα αυτή ο ουρανός ήταν κατά τόπους νεφελώδης και τα ρεύματα αέρα δημιουργούσαν συνεχή κίνηση των νεφών. Έτσι κάποιες χρονικές περιόδους επικρατούσαν συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας και κάποιες άλλες πυκνή νέφωση. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται και στο διάγραμμα  $P_{\max}/t$  όπου παρατηρείται μία

‘ταλάντωση’ κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι μετρήσεις διήρκησαν 11 ώρες υπό γωνία 30°.

Η μέγιστη ισχύς για το μονοκρυσταλλικό πάνελ έφτασε την τιμή των 140 W/m<sup>2</sup> στις 12:00 με ένταση 4,6 A (διαγράμματα Γ και Δ). Η τάση στο σημείο αυτό ήταν 15,2 V.

Το πολυκρυσταλλικό πάνελ παρουσίασε τη μέγιστη ισχύ στις 14:00 (στις 12:00 και στις 13:00 υπήρχε νέφωση) στα 150 W/m<sup>2</sup> με ένταση στα 5,1 A. Η τάση στο σημείο αυτό ήταν 15 V.

Η περιοδική νέφωση αποτυπώνεται και στα 4 διαγράμματα κάθε πάνελ. Η ισχύς κατά τη διάρκεια της νέφωσης πέφτει κάτω από το μισό της αναμενόμενης. Για παράδειγμα για το πάνελ Sata ενώ η αναμενόμενη τιμή τις 11:00 είναι περίπου 85 W/m<sup>2</sup>, την συγκεκριμένη ημέρα δεν ξεπερνά τα 22 W/m<sup>2</sup>. Επίσης για το πάνελ Sharp, ενώ η αναμενόμενη ισχύς για τις 11:00 είναι 120 W/m<sup>2</sup>, τη συγκεκριμένη μέρα δεν ξεπέρασε τα 55 W/m<sup>2</sup>.



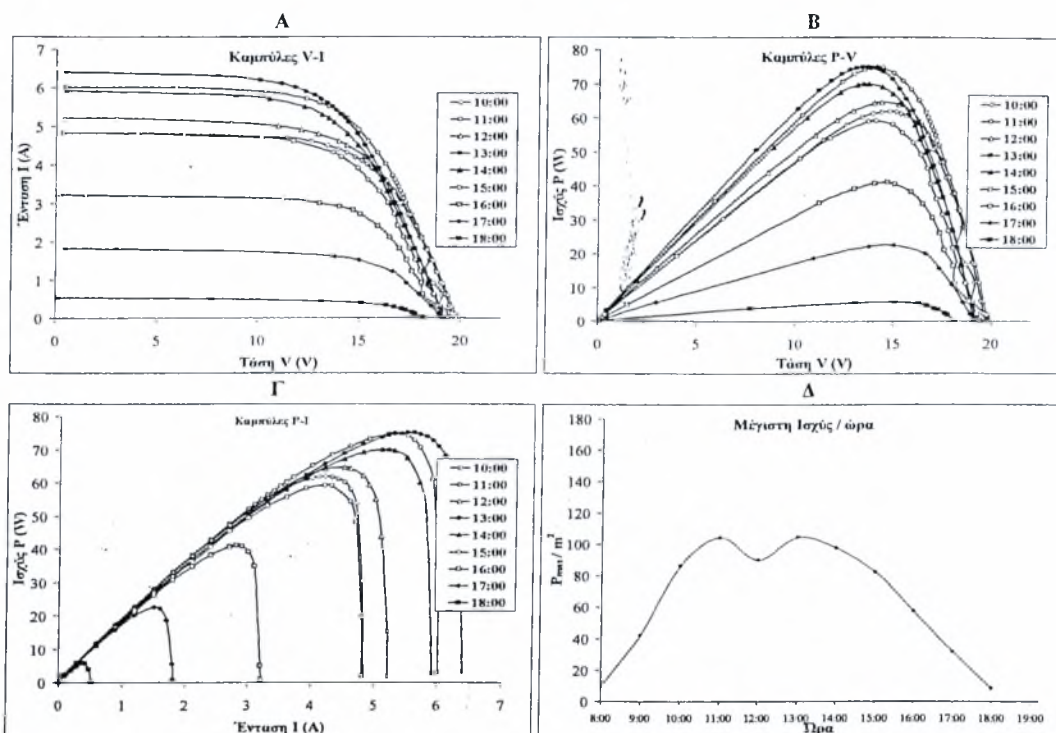
Στο μονοκρυσταλλικό πάνελ η απόδοση ήταν μεταξύ 0,03 και 0,14. Η μέγιστη απόδοση εμφανίστηκε στις 12:00 και είχε τιμή 0,14. Αντίστοιχα στο πολυκρυσταλλικό πάνελ οι αποδόσεις ήταν μεταξύ 0,06 και 0,18. Η μέγιστη τιμή παρατηρήθηκε στις 14:00.

Η ημέρα αυτή όπως προαναφέρθηκε παρουσίαζε έντονες μεταβολές στην ηλιοφάνεια. Μπορούν όμως να παρατηρηθούν κάποια σημαντικά στοιχεία. Οι αποδόσεις κατά τη διάρκεια νέφωσης έπεσαν μέχρι και στο 0,03 για το μονοκρυσταλλικό πάνελ και στο 0,06 για το πολυκρυσταλλικό.

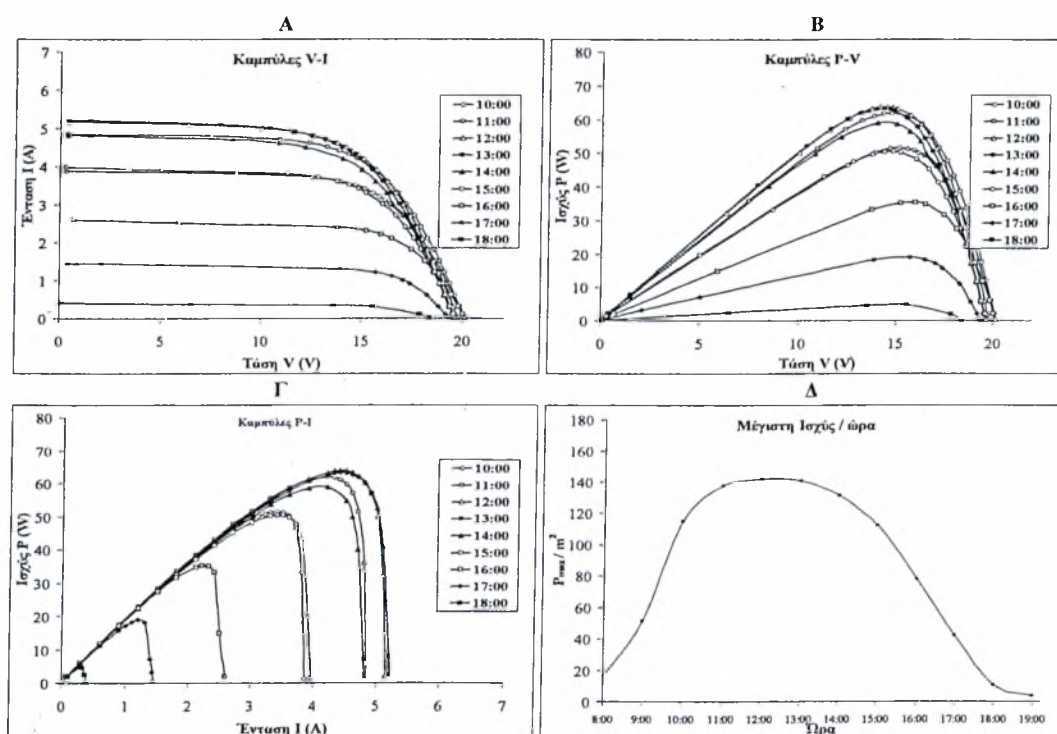
Η νέφωση, ανάλογα με την πυκνότητά της μειώνει σημαντικά την απόδοση. Όπως φαίνεται και στα σχήματα η αποδόσεις μπορούν να μειωθούν κάτω από το μισό της αναμενόμενης.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 13/9/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



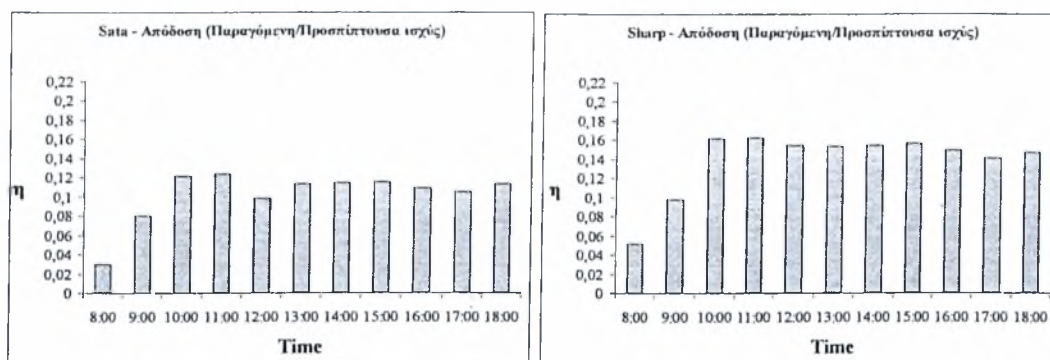
Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



Οι μετρήσεις αυτές έγιναν στις 13 Σεπτεμβρίου. Η γωνία θέσης ήταν 30° και διήρκεσαν 8 ώρες. Επικράτησε πλήρης ηλιοφάνειας καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Ομοιάζουν με αυτές της 11<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου με εξαίρεση τη μέτρηση που έγινε στο μονοκρυσταλλικό πάνελ στις 12:00 λόγω μικρής σκίασης από παρακείμενο στύλο.

Στην περίπτωση του πάνελ **Sata** όπως φαίνεται και στο διάγραμμα Δ, από τις 11:00 μέχρι τις 13:00 η  $P_{\max}$  σταθεροποιείται στα 100 – 105 W/m<sup>2</sup>. Η μέγιστη ισχύς παρουσιάζεται στις 11:00 και είναι 105 W/m<sup>2</sup>. Στο σημείο αυτό η ένταση, όπως φαίνεται στα διαγράμματα Β και Γ, είναι 6 Α και η τάση 15 V. Αντίστοιχα, για το πάνελ **Sharp**, η μέγιστη ισχύς παρουσιάζεται στις 12:00 και έχει τιμή 140 W/m<sup>2</sup>.

Παρατηρείται επίσης μια μικρή τάση των καμπύλων  $P_{\max}$ -t προς τα αριστερά, που οφείλεται στη χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος τις πρωινές ώρες με επακόλουθο τη μικρή βελτίωση της απόδοσης.

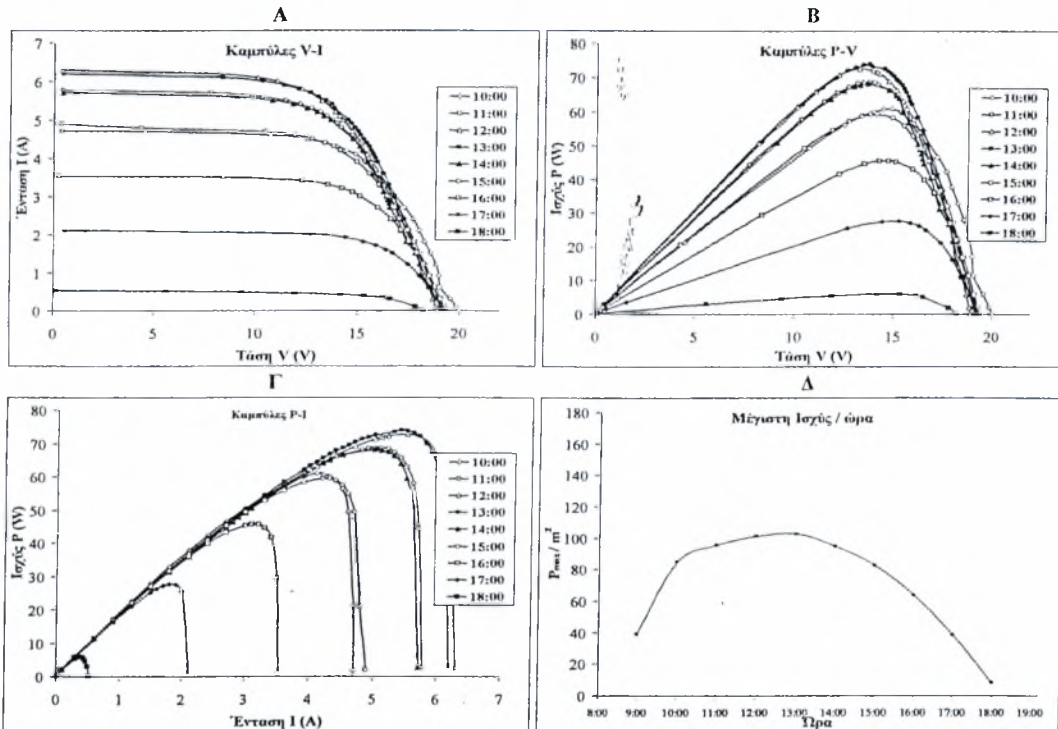


Και σε αυτές τις μετρήσεις η συγκέντρωση υγρασίας κοντά στον ορίζοντα τις πρωινές ώρες μείωσε αισθητά την απόδοση. Βέβαια αυτό το φαινόμενο δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την συνολική παραγόμενη ενέργεια, γιατί η παραγωγή ενέργειας αυτές τις ώρες είναι συγκριτικά μικρή. Η απόδοση στο μονοκρυσταλλικό πάνελ βρίσκεται μεταξύ 0,11 και 0,12, με εξαίρεση στις 12:00 όπου η μερική σκίαση μείωσε αισθητά την απόδοση. Η βέλτιστη απόδοση παρατηρήθηκε στις 11:00 και είχε τιμή 0,12. Αντίστοιχα το πάνελ **Sharp** παρουσίασε αποδόσεις μεταξύ 0,15 και 0,16, ενώ η μέγιστη απόδοση παρατηρήθηκε στις 11:00. Γίνεται φανερό ότι όσο μειώνεται η θερμοκρασία, βελτιώνεται η απόδοση των πάνελ.

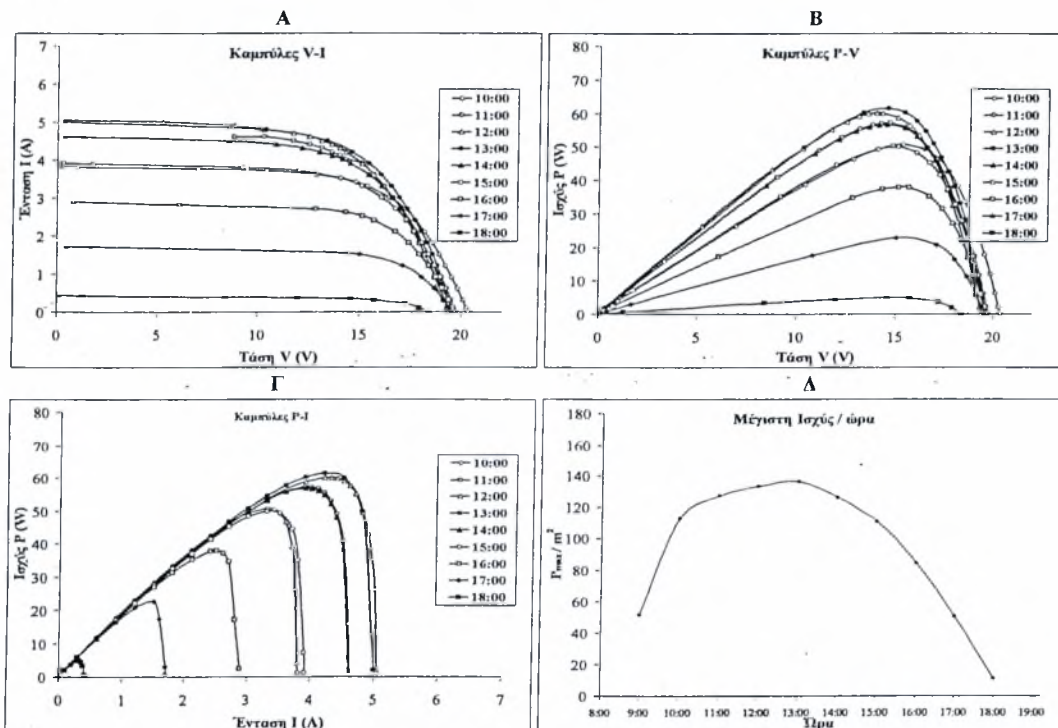


ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 14/9/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια

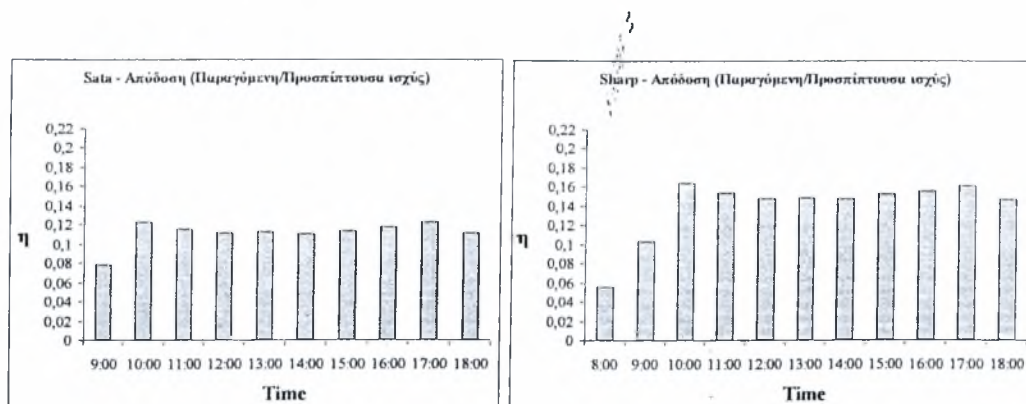


Στις 14 Σεπτεμβρίου διενεργήθηκαν μετρήσεις για 8 ώρες και επικρατούσε πλήρης ηλιοφάνεια. Στην περίπτωση του μονοκρυσταλλικού πάνελ, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα Δ η μεγαλύτερη ισχύς παρουσιάστηκε στις 13:00 και είχε τιμή 100 W/m². Η ένταση σε αυτό το σημείο λειτουργίας ήταν 5,9 A και η τάση στα 15 V. Το πολυκρυσταλλικό πάνελ έφτασε στις 13:00 τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ των 140



$W/m^2$ . Η αντίστοιχη ένταση ήταν τα 4,8 A. Η τάση παρέμεινε στα 15 V όπως και στα περισσότερα αποτελέσματα μέχρι τώρα (διαγράμματα Β, Γ, Δ).

Και σε αυτή τη μέτρηση γίνεται φανερή η μικρή τάση των καμπύλων προς τα αριστερά όπως και στα διαγράμματα της προηγούμενης ημέρας, που επιβεβαιώνει την επιρροή της θερμοκρασίας στην απόδοση των πάνελ.

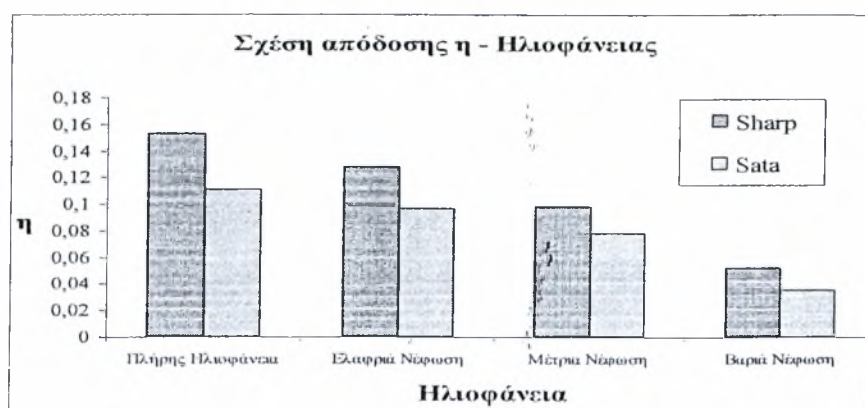


Σε αυτά τα διαγράμματα παρατηρείται πως η απόδοση ήταν σχετικά σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στην περίπτωση του πάνελ **Sata** η απόδοση κινήθηκε μεταξύ 0,11 και 0,12 με εξαίρεση την απόδοση στις 9:00. Η μεγαλύτερη απόδοση παρουσιάστηκε στις 10:00 και είχε τιμή 0,12.

Στην περίπτωση του Sharp, η απόδοση ήταν από 0,14 έως 0,16 και η μεγαλύτερη απόδοση βρέθηκε στις 10:00, ίση με 0,16.

Τα αποτελέσματα αυτά ομοιάζουν αρκετά με αυτά της 11<sup>ης</sup> και 13<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι υπό σταθερές συνθήκες και για ημέρες που δεν απέχουν πολύ μεταξύ τους υπάρχει ικανοποιητική επαναληψιμότητα.

## ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ



Σε αυτό το διάγραμμα γίνεται μία προσέγγιση του βαθμού επιρροής της νέφωσης στην απόδοση των πάνελ. Είναι προφανές ότι όταν επικρατούν συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας, η απόδοση του μονοκρυσταλλικού πάνελ προσεγγίζει το 0,11 - 0,12, ενώ το πολυκρυσταλλικό προσεγγίζει το 0,14 - 0,16. Καθώς η πυκνότητα της νέφωσης αυξάνεται οι αποδόσεις μειώνονται και φτάνουν στο 0,03 για το μονοκρυσταλλικό και στο 0,04 για το πολυκρυσταλλικό. Τα αποτελέσματα είναι ως ένα βαθμό υποκειμενικά γιατί η πυκνότητα της νέφωσης έγινε διαισθητικά λόγω έλλειψης πυρόμετρου. Γενικά όμως φαίνεται πως οι απώλειες στην παραγωγή ισχύος είναι μεγάλες όταν οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές.

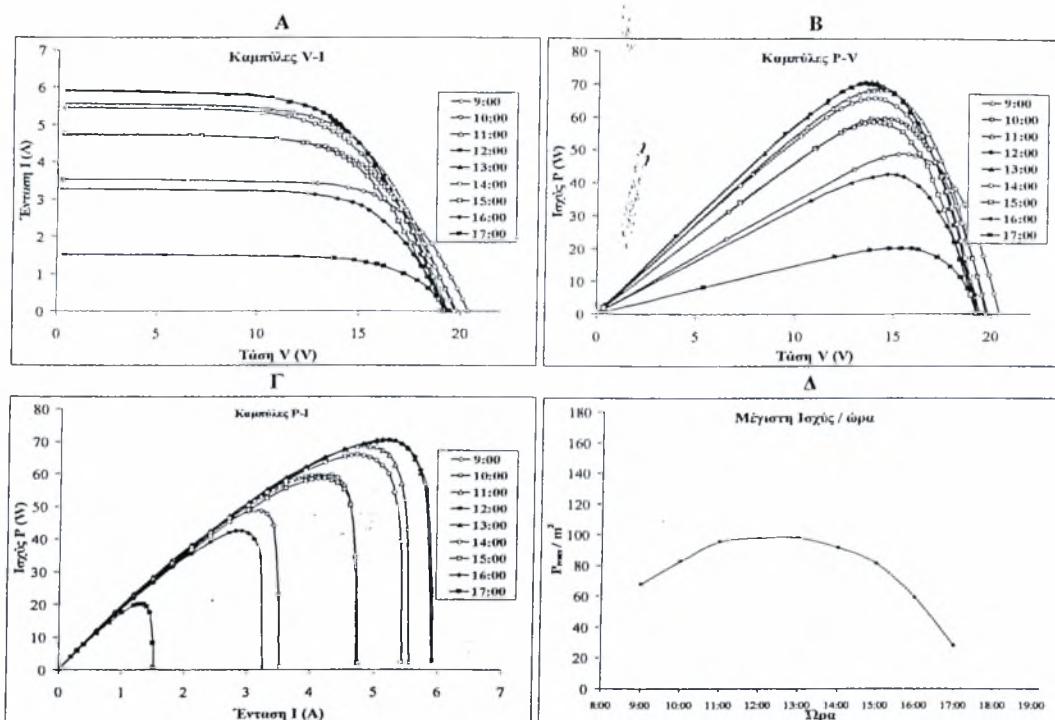


Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζεται η επίδραση της νέφωσης στην μέγιστη ισχύ. Σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας η μέγιστη ισχύς για το μονοκρυσταλλικό πάνελ είναι ενδεικτικά  $100 \text{ W/m}^2$ . Η μέγιστη ισχύς για το πολυκρυσταλλικό πάνελ είναι περίπου  $140 \text{ W/m}^2$ . Κάτω από συνθήκες νέφωσης η μέγιστη ισχύς μειώνεται ραγδαία και υπό πυκνή νέφωση το μονοκρυσταλλικό πάνελ παράγει μόλις  $30 \text{ W/m}^2$  ενώ το πολυκρυσταλλικό  $35 \text{ W/m}^2$ . Και πάλι ο διαχωρισμός σε βαριά - μέτρια - ελαφριά νέφωση είναι υποκειμενικός λόγω έλλειψης πυρομέτρου.

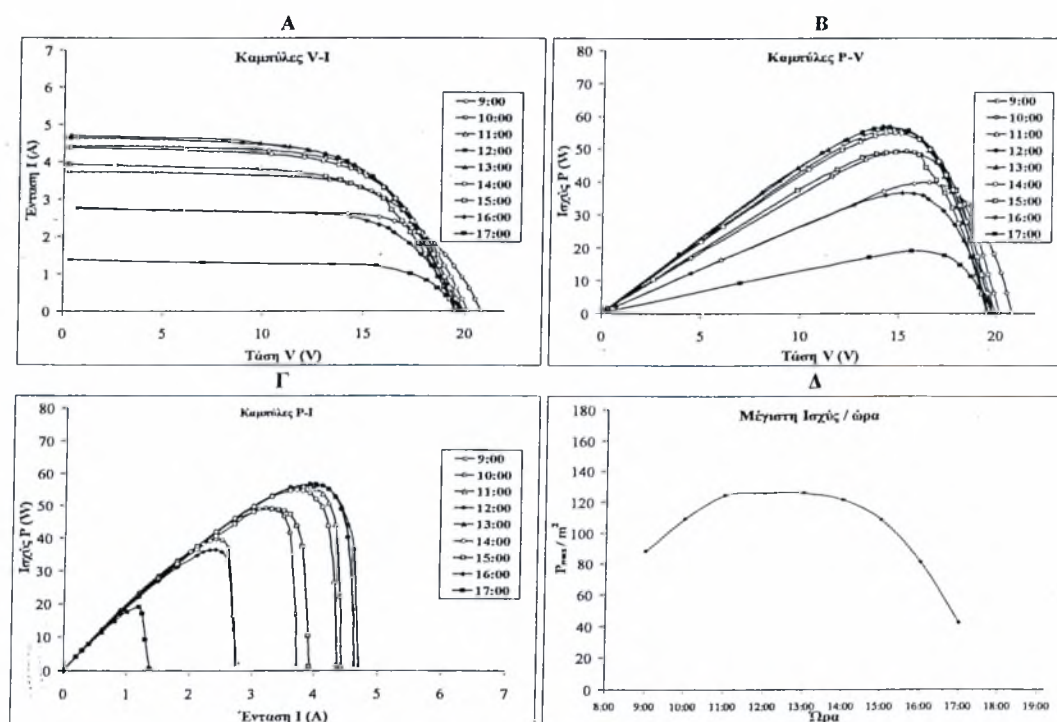
## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (17 - 30 Οκτωβρίου)

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 17/10/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια.



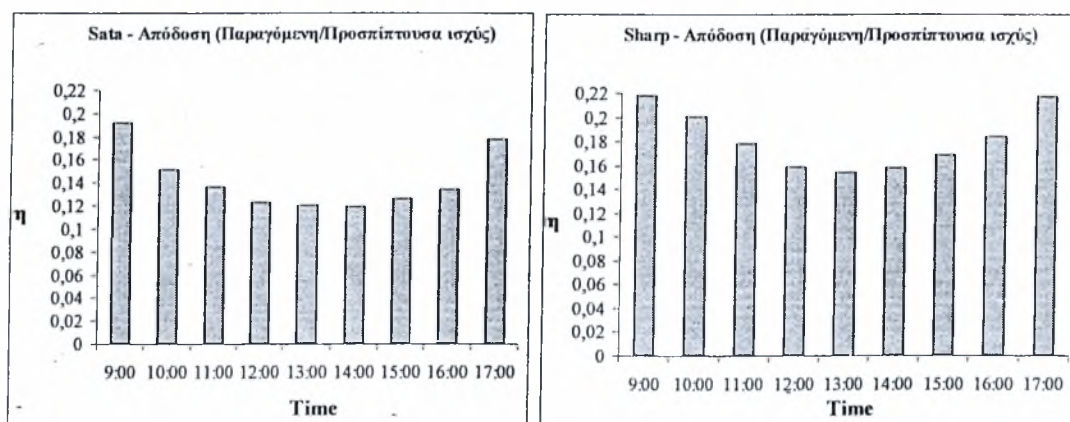
Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια.



Η τρίτη ομάδα μετρήσεων, που η διεξαγωγή της έγινε από τις 17 έως τις 30 Οκτωβρίου, είχε στόχους τον εντοπισμό πιθανών διαφοροποιήσεων στην απόδοση

λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών περιβάλλοντος καθώς επίσης και τη μελέτη της απόδοσης σε εποχή που ο ήλιος διαγράφει μικρότερη και χαμηλότερη τροχιά.

Στις μετρήσεις που έγιναν στις 17 Οκτωβρίου οι καιρικές συνθήκες ήταν ιδανικές με πλήρη ηλιοφάνεια και χαμηλή θερμοκρασία. Το μονοκρυσταλλικό πάνελ απέδωσε περίπου ισχύ  $100 \text{ W/m}^2$  για τις ώρες 11:00 έως 13:00. Η μέγιστη ισχύς παρατηρήθηκε στις 13:00 (διάγραμμα Δ). Η ένταση στο σημείο αυτό ήταν στα 5,2A και την τάση στα 15V (διαγράμματα Β και Γ). Το πολυκρυσταλλικό πάνελ είχε σταθερή απόδοση στις ώρες 11:00 έως 13:00. Η μέγιστη ισχύς παρουσιάστηκε στις 12:00 και είχε τιμή  $120 \text{ W/m}^2$  ενώ η ένταση στο σημείο αυτό ήταν 4,1A. Η τάση μετρήθηκε στα 15V. Όπως παρατηρείται, η συνολική παραγόμενη ενέργεια είναι μικρότερη σε σχέση με τις μετρήσεις που έγιναν στις αρχές του Φθινοπώρου. Αυτό οφείλεται στην μικρότερη τροχιά που διαγράφει ο ήλιος το μήνα αυτό. Πιο συγκεκριμένα, στις αρχές Σεπτεμβρίου ο ήλιος φτάνει σε μέγιστο ύψος τις  $60^\circ$  ενώ τη μελετώμενη ημέρα τις  $41^\circ$ . Επίσης η ημέρα διαρκεί 11 ώρες και 12 ώρες αντίστοιχα.

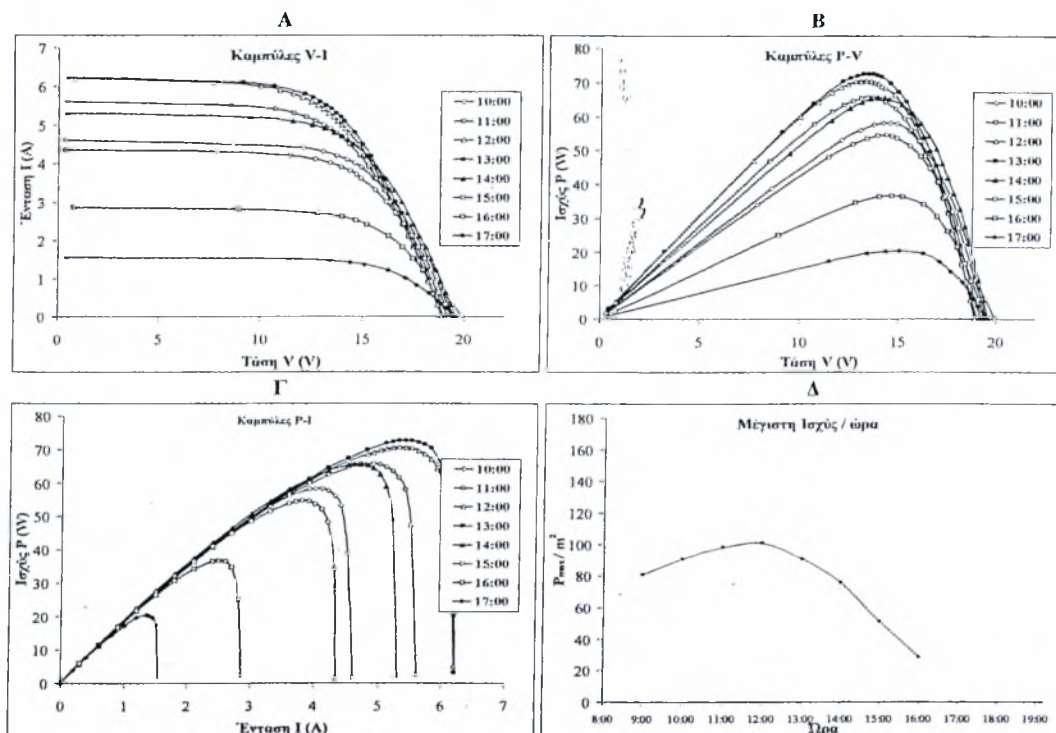


Παρόλο που η συνολική παραγόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας παρουσιάζεται μειωμένη, η απόδοση παρουσιάζει σημαντική βελτίωση. Το πάνελ Sata αποδίδει τις πρωινές και απογευματινές ώρες περίπου 0,19. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμοκρασία πέφτει αισθητά αυτές τις ώρες με αποτέλεσμα η απόδοση να αυξάνεται κατά 37%. Οι τιμές αυτές είναι πολύ υψηλές και ξεπερνούν την μέγιστη δυνατή απόδοση των πάνελ. Αυτό οφείλεται σε αποκλίσεις που παρουσιάζει η μέθοδος υπολογισμού της απόδοσης. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στο πάνελ Sharp όπου οι αποδόσεις φτάνουν το 0,22. Τις μεσημεριανές ώρες οι αποδόσεις είναι στα επίπεδα των προηγούμενων μετρήσεων.

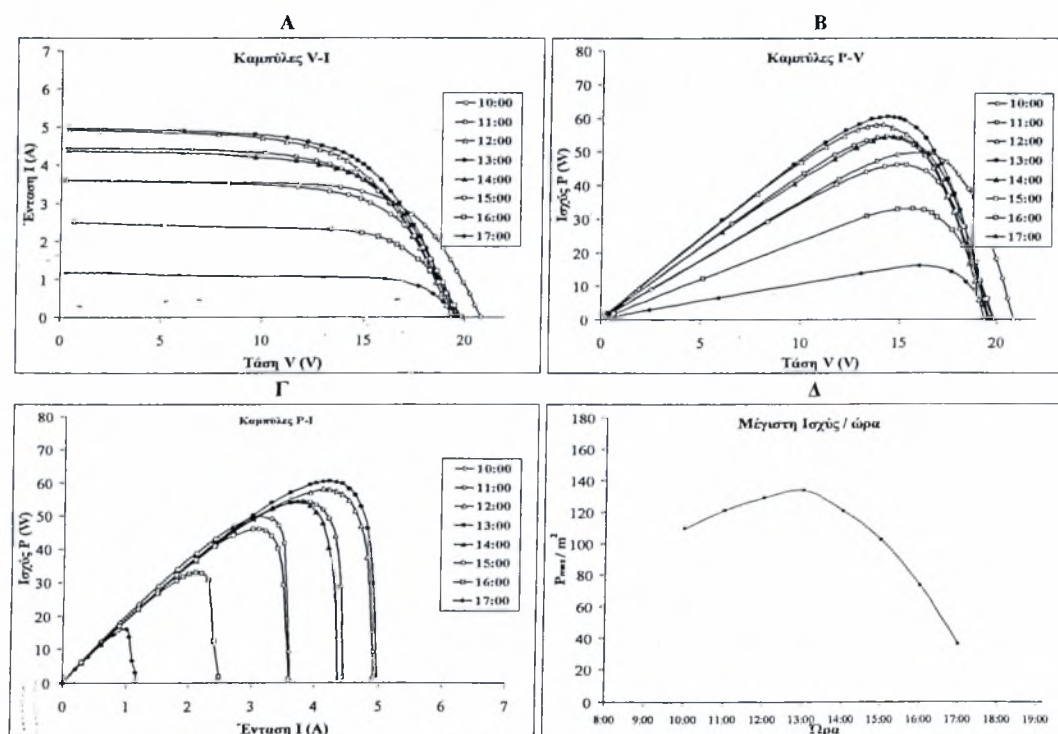


ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 18/10/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



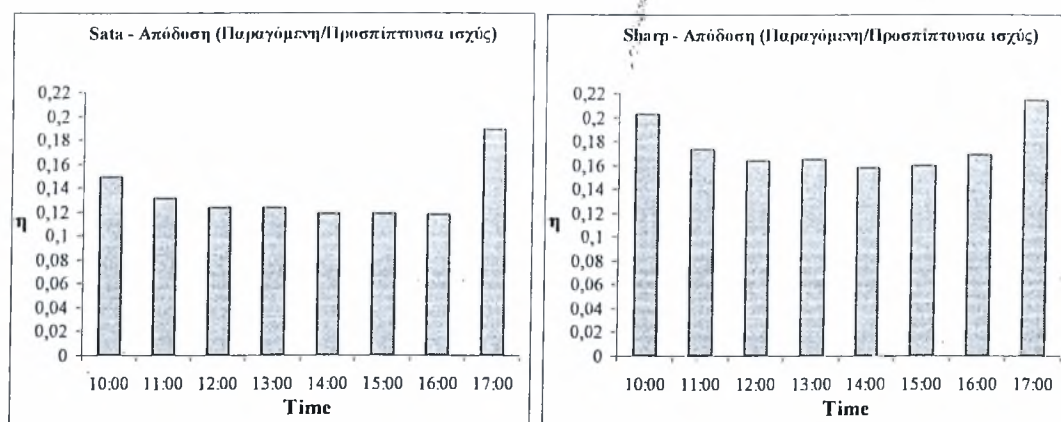
Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: πλήρης ηλιοφάνεια



Στις 18 Οκτωβρίου οι μετρήσεις διήρκεσαν 7 ώρες και τα πάνελ τοποθετήθηκαν σε γωνία θέσης 30°. Υπήρξε πλήρης ηλιοφάνεια καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Το μονοκρυσταλλικό πάνελ παρουσίασε μέγιστη ισχύ στις 12:00 με τιμή 100 W/m<sup>2</sup> και ένταση στη λειτουργία μέγιστης ισχύος, 5,8 A. Η τάση



λειτουργίας ήταν 15 V. Το πολυκρυσταλλικό πάνελ είχε ελαφρώς διαφορετική συμπεριφορά και παρουσίασε μέγιστη ισχύ  $140 \text{ W/m}^2$  στις 13:00 παρόλο που την αμέσως προηγούμενη ημέρα η ισχύς του πολυκρυσταλλικού πάνελ δεν ξεπέρασε τα  $120 \text{ W/m}^2$ , με ένταση στο σημείο αυτό στα 4,3 A. Η τάση λειτουργίας παρέμεινε στα 15 V.



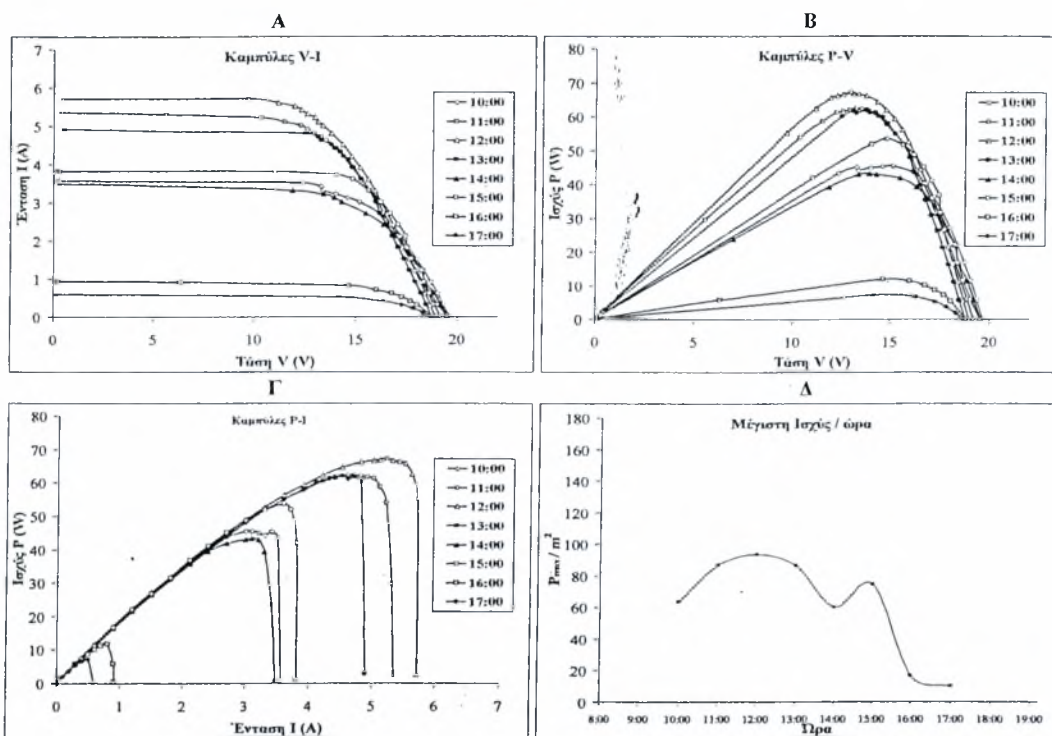
Η βελτίωση στην απόδοση σε σχέση με τη θερινή περίοδο είναι και εδώ φανερή. Το μονοκρυσταλλικό πάνελ κατά τις πρωινές ώρες αποδίδει μέχρι και 0,15 και στις 17:00 φτάνει στο 0,2 που αποτελεί και την μέγιστη απόδοση της ημέρας. Το πολυκρυσταλλικό πάνελ αποδίδει και αυτό πολύ καλύτερα τις πρωινές και απογευματινές ώρες. Οι αποδόσεις αυτές τις ώρες φτάνουν μέχρι το 0,21.

Τις υπόλοιπες ώρες η απόδοση για το μονοκρυσταλλικό πάνελ είναι 0,12 – 0,13 ενώ για το πολυκρυσταλλικό 0,16. Έχουν δηλαδή τιμές που συμβαδίζουν με αυτές παλαιότερων μετρήσεων.

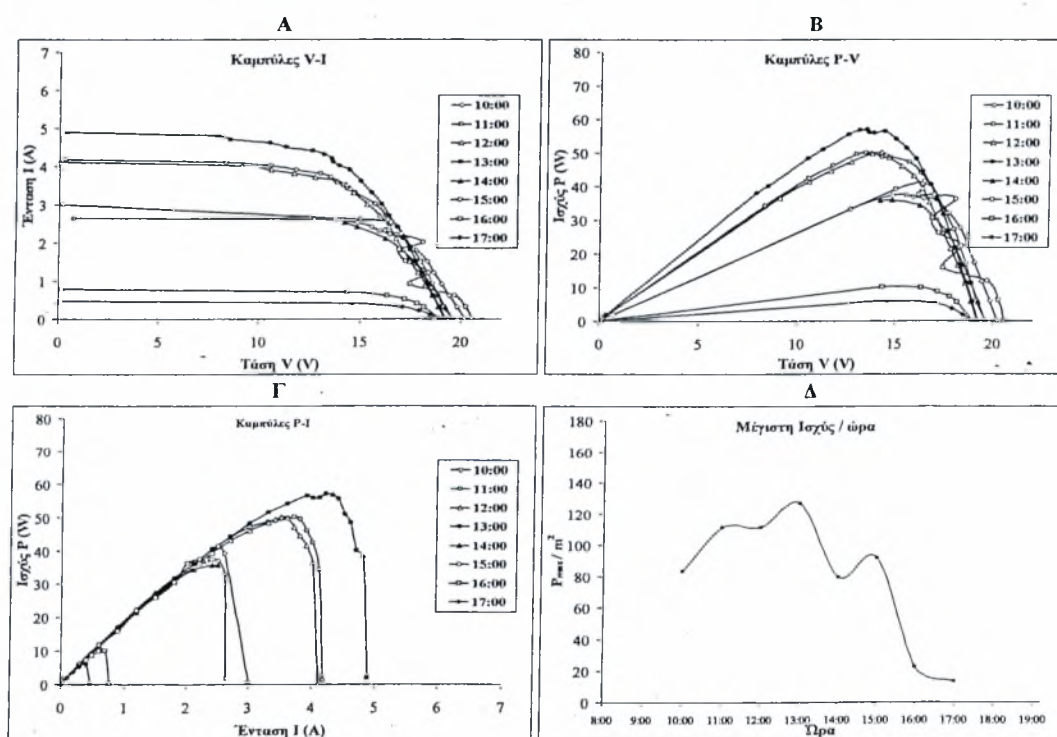
Επιβεβαιώθηκε έτσι η υπόθεση ότι διαφορετικές θερμοκρασίες στο πάνελ προκαλούν αλλαγές στην απόδοση.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 25/10/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: εναλλαγή νέφωσης ηλιοφάνειας



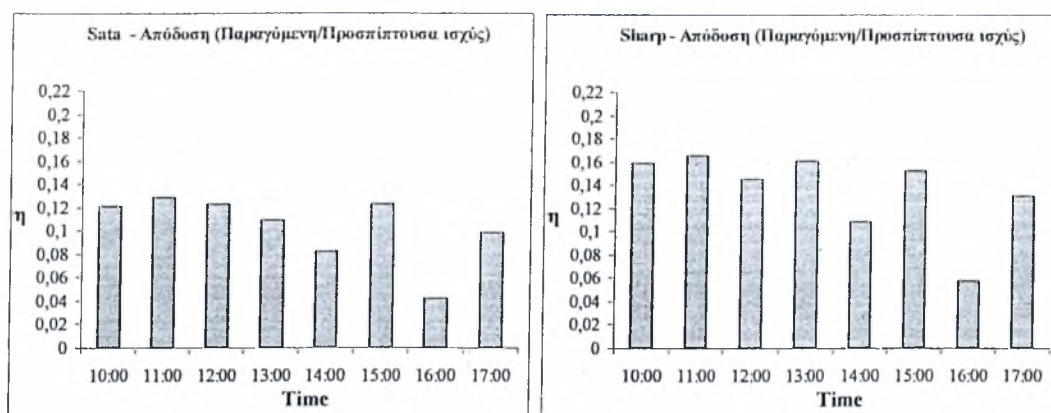
Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: εναλλαγή νέφωσης ηλιοφάνειας



Στις 25 Οκτωβρίου τα πάνελ τοποθετήθηκαν υπό γωνία θέσης 30° και έγιναν μετρήσεις για 8 ώρες. Οι καιρικές συνθήκες ήταν ασταθείς με αποτέλεσμα άλλες μετρήσεις να γίνουν κάτω από συνθήκες ηλιοφάνειας και άλλες κάτω από νέφωση.

Για το μονοκρυσταλλικό πάνελ **Sata** η μέγιστη ισχύς παρατηρήθηκε στις 12:00 και είχε τιμή  $95 \text{ W/m}^2$ , όπως φαίνεται και στο διάγραμμα Δ. Η ένταση σε αυτό το σημείο ήταν 5,2 A και η τάση 15 V.

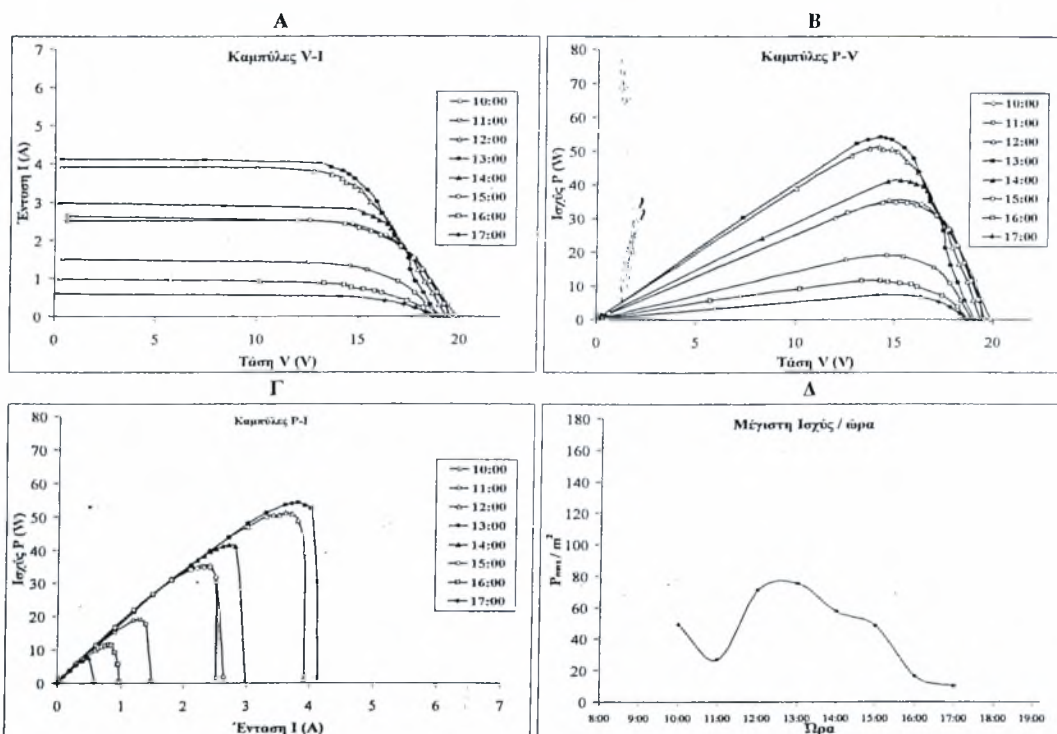
Αντίστοιχα για το πολυκρυσταλλικό πάνελ η μέγιστη ισχύς εμφανίστηκε στις 13:00 και είχε τιμή  $125 \text{ W/m}^2$  με ένταση 4,2A. Η τάση ήταν 15V. Τη μέρα αυτή οι αυξομειώσεις στην ισχύ οφείλονται όπως αναφέρθηκε στην εναλλαγή ηλιοφάνειας και μέτριας νέφωσης.



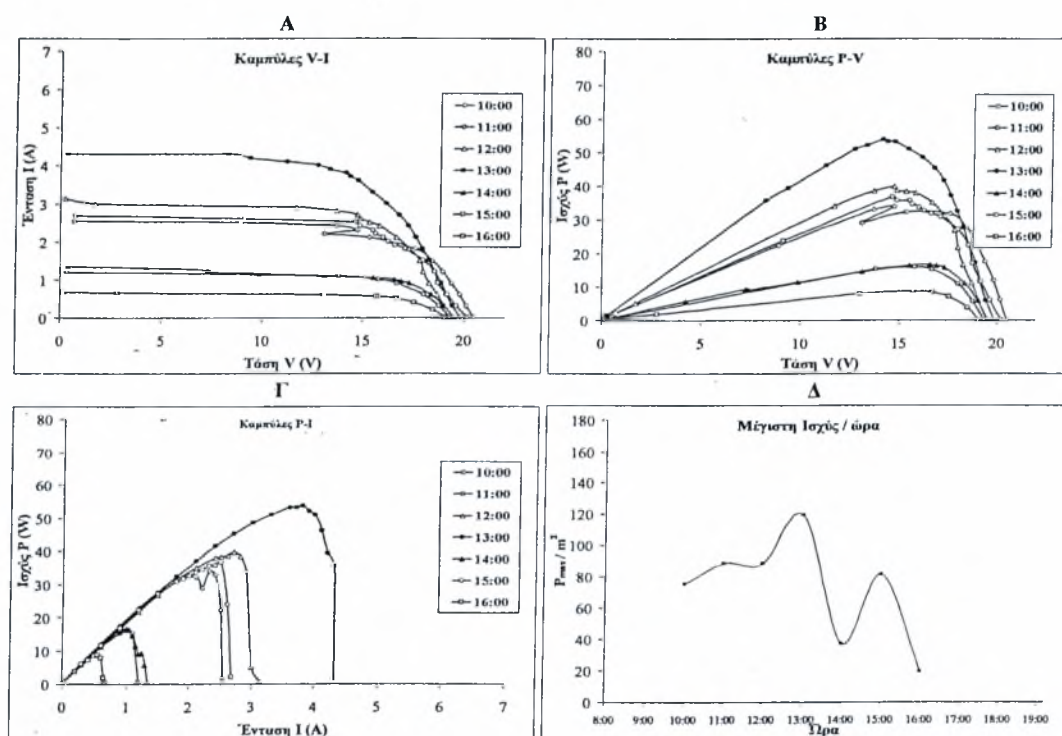
Λόγω του ασταθούς καιρού η θερμοκρασία των πάνελ παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα με αποτέλεσμα τις στιγμές ηλιοφάνειας να παρατηρηθεί αυξημένη απόδοση. Πιο συγκεκριμένα το μονοκρυσταλλικό πάνελ απέδωσε περίπου 0,12 με 0,13 υπό πλήρη ηλιοφάνεια ενώ το πολυκρυσταλλικό περίπου 0,16. Στις περιπτώσεις νέφωσης οι αποδόσεις μειώθηκαν έως και στο 0,4 για το μονοκρυσταλλικό και 0,6 για το πολυκρυσταλλικό πάνελ. Μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι σε μια ημέρα με βαριά νέφωση, η συνολικά παραγόμενη ενέργεια ισοδυναμεί με το 30% περίπου της ενέργειας που παράγεται σε μία αντίστοιχη ημέρα με πλήρη ηλιοφάνεια. Έτσι η παραγωγή ενέργειας κατά τους χειμερινούς μήνες με νεφελώδεις ημέρες, δεν πρέπει να θεωρείται αμελητέα κατά τον υπολογισμό της ετήσιας απόδοσης των πάνελ.

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 26/10/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: εναλλαγή νέφωσης ηλιοφάνειας



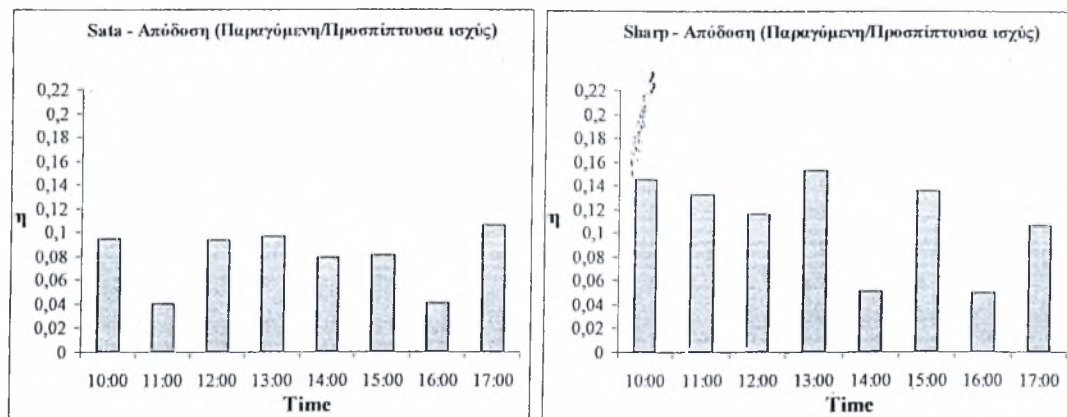
Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: εναλλαγή νέφωσης ηλιοφάνειας



Στις 26 Οκτωβρίου οι μετρήσεις διήρκεσαν 7 ώρες. Τα πάνελ τοποθετήθηκαν υπό γωνία θέσης 30° και οι καιρικές συνθήκες ήταν ασταθείς με εναλλαγές νέφωσης - ηλιοφάνειας. Ο άστατος καιρός είχε αποτέλεσμα να διεξαχθούν μετρήσεις υπό διαφορετικές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά η μέγιστη ισχύς για το μονοκρυσταλλικό πάνελ παρουσιάστηκε στις 13:00 και είχε τιμή 80 W/m<sup>2</sup> με ένταση στο σημείο αυτό 4



Α και τάση 15 V. Στο πολυκρυσταλλικό πάνελ η μέγιστη ισχύς παρατηρήθηκε στις 13:00 και είχε τιμή  $120 \text{ W/m}^2$ . Από τα διαγράμματα απόδοσης φαίνεται και ο βαθμός επιρροής της νέφωσης στις αποδόσεις.

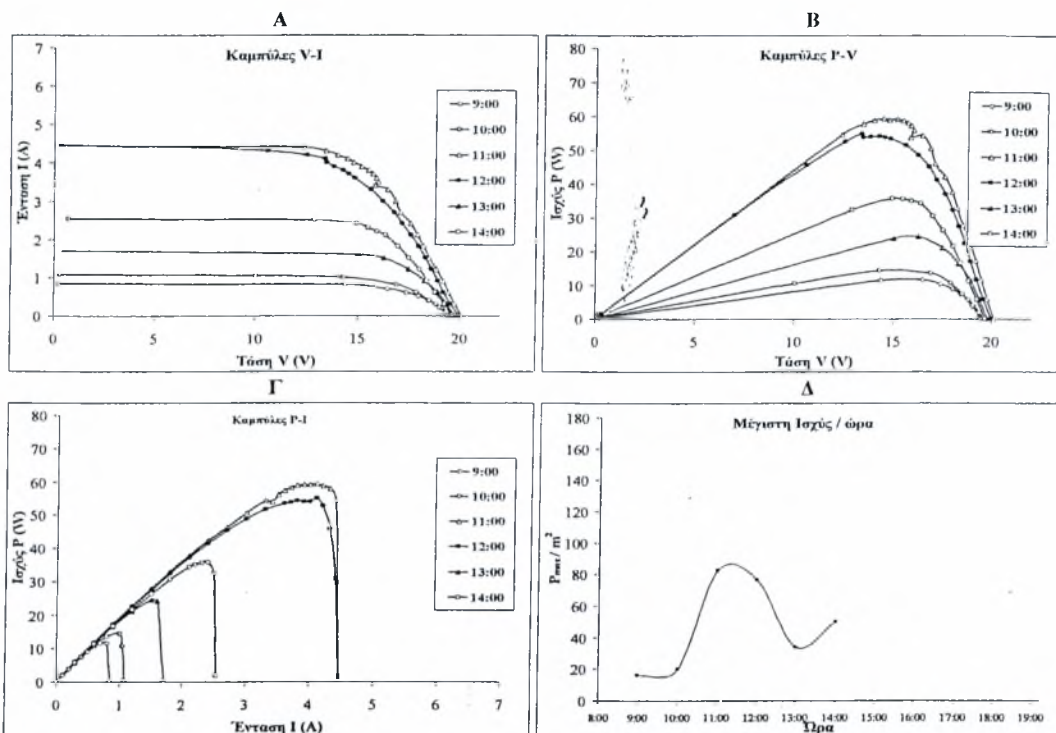


Οι αποδόσεις κατά την ηλιοφάνεια διατηρήθηκαν στο επίπεδο του 0,09 με 0,11 για το πρώτο πάνελ και στο επίπεδο του 0,14 με 0,16 για το δεύτερο πάνελ. Όταν επικρατούσε νέφωση δηλαδή στις 11:00 και 16:00 για το μονοκρυσταλλικό πάνελ οι αποδόσεις μειώθηκαν στο 0,04. Στο πολυκρυσταλλικό πάνελ οι ώρες νέφωσης ήταν οι 12:00, 14:00 και 16:00. Οι αποδόσεις εδώ μειώθηκαν στο 0,12, 0,4 και 0,4 αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι η απόδοση υπό συνθήκες νέφωσης δεν είναι σταθερή. Εξαρτάται από την πυκνότητα της νέφωσης.

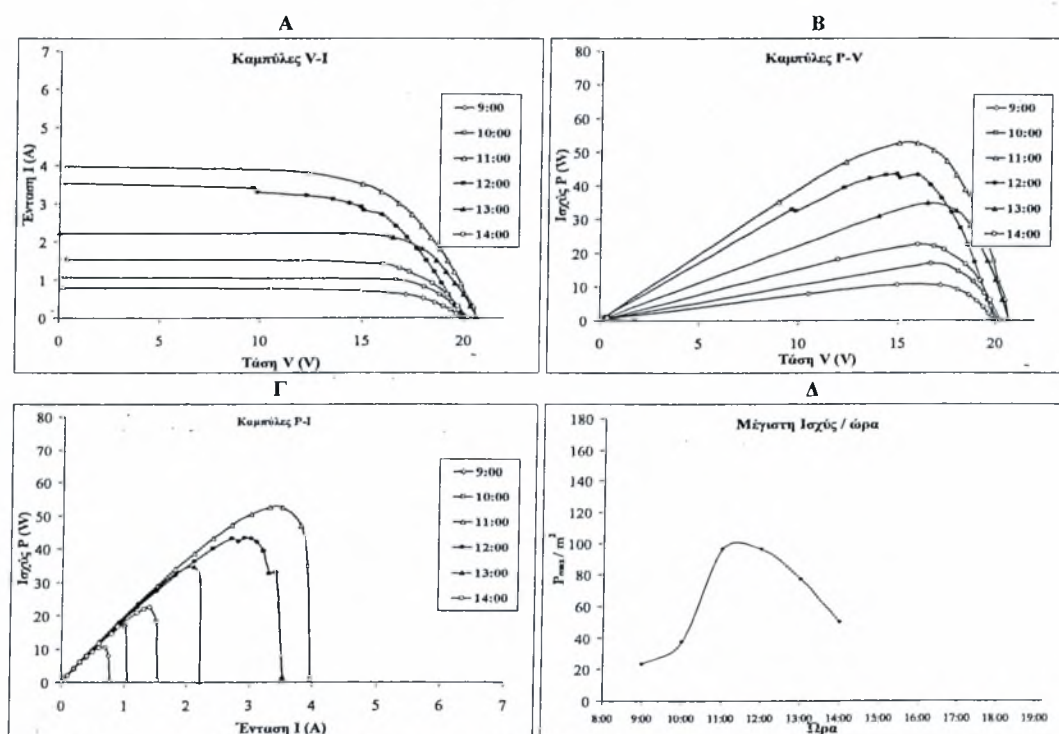


ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 30/10/2007

Τύπος Φ/Β: SATA. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: εναλλαγή νέφωσης ηλιοφάνειας.

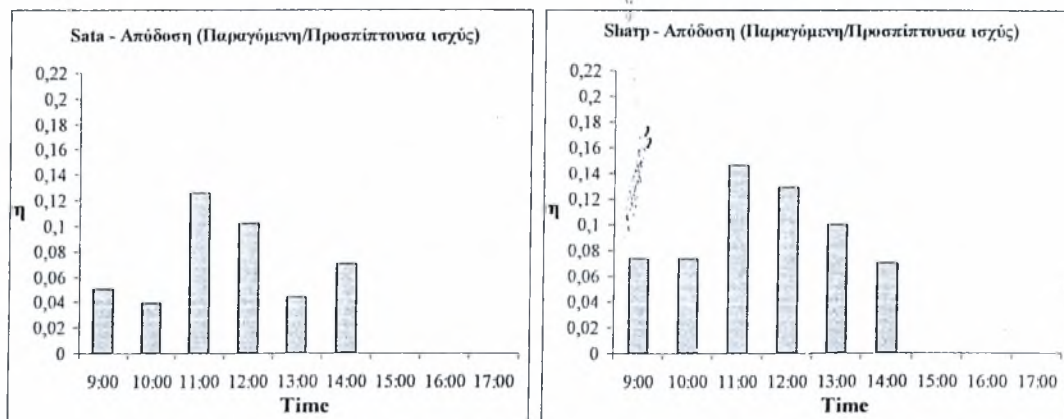


Τύπος Φ/Β: SHARP. Γωνία θέσης: 30°. Συνθήκες: εναλλαγή νέφωσης ηλιοφάνειας.



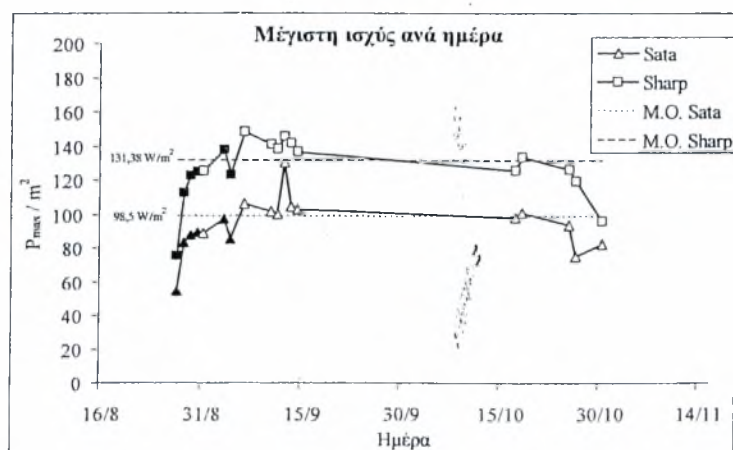
Η τελευταία μέτρηση έγινε στις 30 Οκτωβρίου. Διήρκεσε 5 ώρες και ο καιρός ήταν ασταθής. Διακόπηκε νωρίς διότι παρουσιάστηκαν προβλήματα σκίασης από τα παρακείμενα κτήρια. Στις 11:00 όπου και επικρατούσε ηλιοφάνεια παρατηρήθηκε η μέγιστη ισχύς της ημέρας και στις δύο περιπτώσεις. Στο μονοκρυσταλλικό πάνελ

μετρήθηκε ισχύς  $80 \text{ W/m}^2$  με ένταση  $4,2 \text{ A}$  ενώ στο πολυκρυσταλλικό πάνελ  $100 \text{ W/m}^2$  με ένταση  $3,8 \text{ A}$ .



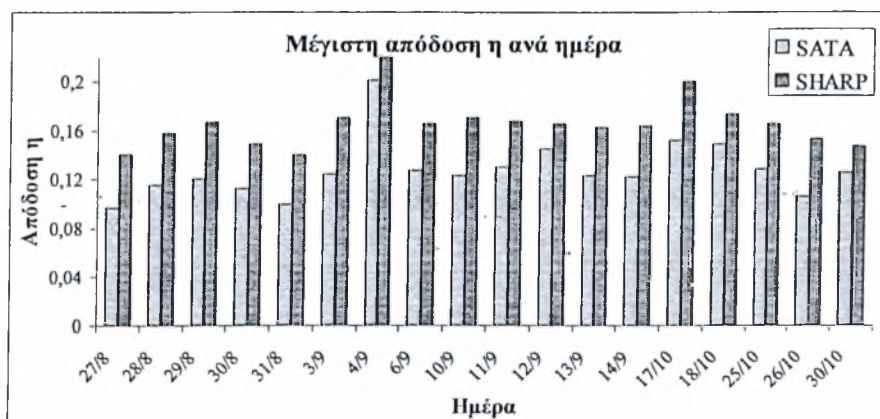
Στις συνθήκες ηλιοφάνειας η απόδοση του πρώτου πάνελ κινήθηκε στο επίπεδο  $0,11 - 0,12$  και του δεύτερου στο επίπεδο  $0,13 - 0,15$ . Ανάλογα με την πυκνότητα της νέφωσης παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις στην απόδοση μεταξύ  $0,04$  και  $0,08$  για το μονοκρυσταλλικό και  $0,07$  και  $0,1$  για το πολυκρυσταλλικό.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΗΜΕΡΕΣ



Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέγιστες αποδόσεις που μετρήθηκαν κάθε ημέρα. Όλες οι μετρήσεις έγιναν με γωνία θέσης 30° εκτός από αυτές τα σημεία των οποίων είναι σημειωμένα με μαύρο χρώμα. Επίσης παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων αυτών.

Η μέση τιμή του μονοκρυσταλλικού πάνελ είναι 98,5 W/m<sup>2</sup> και η μέση τιμή του πολυκρυσταλλικού πάνελ είναι 131,38 W/m<sup>2</sup>. Στον υπολογισμό των μέσων τιμών δεν λαμβάνονται υπ' όψη οι ημέρες με γωνία θέσης διαφορετική των 30°. Τέλος παρατηρείται ότι η μέγιστη ισχύς έχει την τάση να μειώνεται προς τις φθινοπωρινές ημέρες, επειδή, όπως έχει εξηγηθεί το μέγιστο ύψος του ήλιου μειώνεται.



Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζονται οι μέγιστες αποδόσεις των πάνελ ανά ημέρα. Παρουσιάζεται μια σχετική σταθερότητα καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Κάποιες διαφοροποιήσεις που παρουσιάζονται, οφείλονται σε αποκλίσεις του λογισμικού, σε σφάλματα και στις καιρικές συνθήκες.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

### 5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΝΟΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Μετά την εκτενή μελέτη του νομικού πλαισίου μπορούν να εξαχθούν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα για το μέλλον της ηλιακής ενέργειας στον ευρωπαϊκό χώρο. Η προσπάθεια που γίνεται από την ευρωπαϊκή κοινότητα φαίνεται να αποδίδει και τα περισσότερα κράτη μέλη έχουν επιτύχει τους στόχους που έχουν τεθεί για την αντικατάσταση ρυπογόνων πηγών με ανανεώσιμες. Οι κύριοι λόγοι που βοήθησαν προς αυτή την κατεύθυνση είναι:

- 1) Τα ισχυρά οικονομικά κίνητρα που δόθηκαν από τα κράτη και την ευρωπαϊκή ένωση στους επιχειρηματίες, καθιστώντας με αυτό τον τρόπο τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, όχι απλά βιώσιμες επιχειρήσεις, αλλά και κερδοφόρες
- 2) Η κατανόηση από τους φορείς, ότι απαιτείται άμεσα η ανεξαρτητοποίηση της ευρωπαϊκής ένωσης από τα ορυκτά καύσιμα και ιδίως το πετρέλαιο, που αναγκάζεται να εισάγει από τις χώρες της Μέσης Ανατολής.
- 3) Η ραγδαία αύξηση της τιμής του αργού πετρελαίου, που μέσα σε ένα χρόνο ανέβηκε από τα 60\$ στα 90\$ ανά βαρέλι

- 4) Η απελευθέρωση της ενέργειας, που επιτρέπει την ανάληψη πρωτοβουλιών από ιδιωτικούς φορείς για ανάπτυξη συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- 5) Η αύξηση των ρυθμών παραγωγής φωτοβολταϊκών συστημάτων συνεπάγεται και ταυτόχρονη μείωση του κόστους
- 6) Η συνειδητοποίηση από το μέσο ευρωπαϊό πολίτη, ότι οι κλιματικές αλλαγές και η μόλυνση του περιβάλλοντος έχουν άμεσες επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής και την υγεία

## **5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφηκε η μέθοδος με την οποία μπορεί ο μηχανικός να μελετήσει εύκολα και οικονομικά ποια είναι η καλύτερη λύση για μία σχεδιαζόμενη εγκατάσταση. Η μέθοδος αυτή έχει τα εξής πλεονεκτήματα

- 1) Το συνολικό κόστος της μεθόδου δεν υπερβαίνει τα 700 €. Στο κόστος συμπεριλαμβάνονται η συσκευή ηλεκτρονικού φορτίου, οι βάσεις στήριξης και τα καλώδια σύνδεσης.
- 2) Αναλογικά με το κόστος, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εμφανίζεται ικανοποιητική. Μάλιστα αν στην πειραματική διάταξη προστεθεί και ένα πυρόμετρο (κόστος: 200€) ώστε να γνωρίζει ο μελετητής την τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τα αποτελέσματα θα είναι ακόμη πιο ακριβή.
- 3) Δεν χρειάζεται δαπάνη πολύ χρόνου για να σχηματιστεί μια εικόνα για την συνολική ποιότητα των μελετώμενων συστημάτων. Βέβαια, όσο πιο πολλές μετρήσεις γίνονται, σε διάφορες συνθήκες, τόσο περισσότερα συμπεράσματα μπορούν να αντληθούν.
- 4) Δεν απαιτούνται ιδιαίτερες εργαστηριακές εγκαταστάσεις. Οι μετρήσεις γίνονται σε πραγματικές συνθήκες με αποτέλεσμα να λαμβάνονται πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα..
- 5) Στη μέθοδο αυτή δεν απαιτείται ο ερευνητής να έχει κάποια εξειδίκευση στο αντικείμενο. Απαιτούνται μόνο βασικές γνώσεις ηλεκτρολογίας και εκμάθηση της χρήσης της συσκευής ηλεκτρονικού φορτίου.



### 5.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Το θέμα των φωτοβολταϊκών στοιχείων μελετήθηκε στο τμήμα μας πρώτη φορά στα πλαίσια διπλωματικής διατριβής. Έτσι, η έρευνα που έγινε μπορεί να αποτελέσει μια αρχή για την περαιτέρω εμβάθυνση στη λειτουργία της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης διατυπώθηκαν πολλές ιδέες για την εξέλιξη αυτής της έρευνας. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες από αυτές

- 1) Μελέτη της συμπεριφοράς ενός στοιχείου σε συνθήκες εργαστηρίου, όπου ο ερευνητής θα έχει τη δυνατότητα να αλλάζει διάφορες παραμέτρους του συστήματος (θερμοκρασία στοιχείου, ένταση ηλιακού φωτός, γωνία θέσης, άνεμος και άλλες).
- 2) Μελέτη της συμπεριφοράς όταν υπάρχουν σκιάσεις που καλύπτουν μέρος ή όλο το στοιχείο.
- 3) Κατασκευή ενός λογισμικού που να αξιοποιεί μετρήσεις που γίνονται, ώστε να υπολογίζει μία προσέγγιση της συνολικά παραγόμενης ενέργειας στη διάρκεια ενός χρόνου.
- 4) Μελέτη περιφερειακών συστημάτων (μετατροπείς ισχύος, trackers, συσσωρευτές κ.λ.π.).
- 5) Συστήματα ψύξης με νερό ή αέρα για τη βελτίωση της απόδοσης.
- 6) Συμπαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμού νερού.



ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	
ΤΙΤΛΟΣ	
ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
15-9-11	
30/9/11	
13-1-12	

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
Τηλ.: 24210 06300-1



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000097208