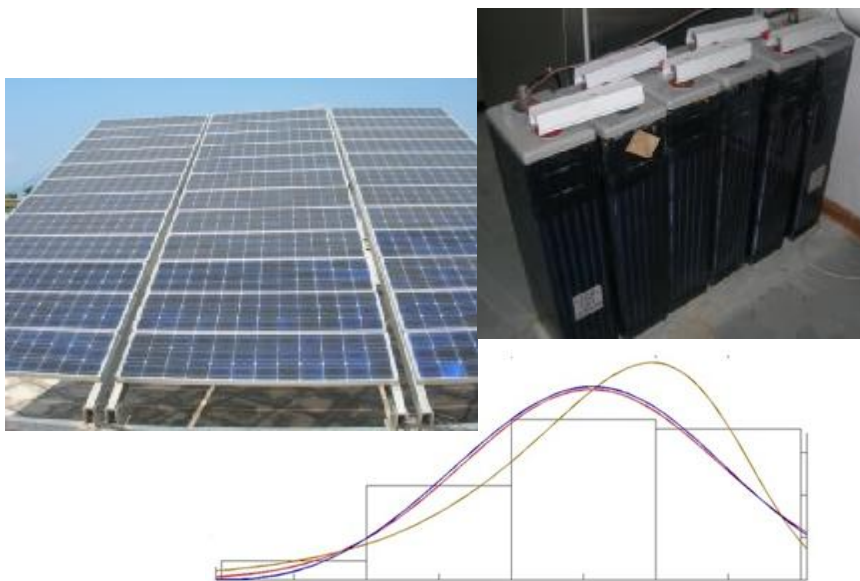


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΙΑΣ ΝΕΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ MATLAB



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΛΟΥΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ - ΜΑΘΙΟΣ ΦΩΤΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: Δρ. ΕΛΕΝΗ ΚΑΠΛΑΝΗ

ΠΑΤΡΑ 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην εφαρμογή μιας νέας μεθόδου διαστασιολόγησης αυτόνομης φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

Για τους σκοπούς μιας ακριβούς και αξιόπιστης διαστασιολόγησης γίνεται ανάλυση της ημερήσιας ακτινοβολίας σε διάφορα μέρη της Ελλάδας για μια σειρά ετών, με χρήση της βάσης δεδομένων της NASA, και προσδιορισμός του φάσματος των τιμών της. Με μοντελοποίηση σε MATLAB υπολογίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς αιχμής της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και η χωρητικότητα των συσσωρευτών με βάση μια κλασική μέθοδο διαστασιολόγησης. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια δεύτερη μέθοδος διαστασιολόγησης που περιλαμβάνει στατιστική ανάλυση των δεδομένων της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας. Τέλος, γίνεται εφαρμογή μιας νεότερης δυναμικής μεθόδου και ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής σε αντιστοιχία με αυτά των δύο προηγούμενων μεθόδων. Τα αποτελέσματα που ενισχύουν την υπεροχή της δυναμικής μεθόδου επαληθεύονται και με το πρόγραμμα του PVGIS.

Στην αρχή της πτυχιακής άσκησης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την Δρ. Ελίνα Καπλάνη, επιστημονική συνεργάτη του τμήματος Μηχανολογίας του ΤΕΙ Πάτρας, για την πολύτιμη βοήθεια στη σωστή διαδικασία των υπολογισμών και αποτελεσμάτων και την πλούσια εμπειρία που μας μετέδωσε. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Καθ. Σωκράτη Καπλάνη για την βοήθεια του και τις χρήσιμες οδηγίες του.

Λουκάς Κωνσταντίνος
Μαθιός Φώτιος
ΠΑΤΡΑ 29/04/2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία έχει ως στόχο την εφαρμογή ενός αξιόπιστου μοντέλου διαστασιολόγησης αυτόνομου φ/β συστήματος. Για το σκοπό αυτό αναλύεται η ημερήσιας ηλιακή ακτινοβολία σε διάφορα μέρη της Ελλάδας για μία σειρά 15 ετών ώστε να προσδιοριστεί το φάσμα των τιμών της. Τα στοιχεία της ανάλυσης αυτής αποτελούν ουσιαστικό στοιχείο στο μοντέλο διαστασιολόγησης που θα εφαρμοστεί. Συγκρίνονται 3 μέθοδοι διαστασιολόγησης με εκτίμηση της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος αιχμής της φ/β γεννήτριας και χωρητικότητας των συσσωρευτών, ώστε να καλυφθούν με αυτονομία οι καταναλώσεις της οικίας μίας τετραμελούς οικογένειας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε 6 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο ορίζονται τα βασικά μεγέθη και χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας, τα όργανα μέτρησης της, καθώς επίσης μελετάται το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας και οι σχέσεις μετατροπής της από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνολογία των φ/β συστημάτων. Παρουσιάζεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός φ/β στοιχείου και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του. Τέλος γίνεται αναφορά στην σύνδεση φ/β στοιχείων και πλαισίων.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται στατιστική ανάλυση των τιμών της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για διάφορες περιοχές της Ελλάδας, χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων της NASA για την εξαγωγή στατιστικών στοιχείων της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ επίσης μελετάται το φάσμα των τιμών της για τις διάφορες περιοχές της Ελλάδας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της κλασικής μεθόδου διαστασιολόγησης φ/β συστημάτων και μιας άλλης μεθόδου που βασίζεται στην στατιστική ανάλυση των δεδομένων της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς επίσης και μια νέα μέθοδος η οποία βασίζεται στην εξομοίωση για τον υπολογισμό της βέλτιστης εγκατεστημένη ισχύος αιχμής και χωρητικότητας των συσσωρευτών. Στο τέλος του

κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται επίσης και τα υπόλοιπα βασικά μέρη ενός φ/β συστήματος όπως οι συσσωρευτές, ο μετατροπέας και ο ελεγκτής φόρτισης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των τριών μεθόδων διαστασιολόγησης και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους ως προς την ελάχιστη εγκατεστημένη ισχύ αιχμής και χωρητικότητας συσσωρευτών καθώς και το ποσοστό αστοχίας τους. Η διαστασιολόγηση εφαρμόζεται για την ημερήσια κατανάλωση ενέργειας από τα φορτία τα οποία αναμένεται να χρησιμοποιεί μία οικογένεια στην περιοχή της Πάτρας κατά την διάρκεια του έτους. Τέλος, με χρήση του προγράμματος PVGIS γίνεται επαλήθευση της αυτονομίας λειτουργίας του συστήματος με τις 3 μεθόδους κατά την διάρκεια του έτους.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο γίνεται συζήτηση επί των σπουδαιότερων συμπερασμάτων που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
ΓΕΝΙΚΑ	8
Η ΑΞΙΑ, ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.	9
ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΗ ΠΟΡΕΙΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	10
1. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	12
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	12
1.1.1 Ο Ήλιος	12
1.1.2 Η ακτινοβολία του ήλιου.....	12
1.1.3 Ορισμοί μεγεθών [1].....	14
1.1.4 Βασικές έννοιες και γεωμετρία επιφάνειας Ηλίου [12]	15
1.1.5 Βασικές τριγωνομετρικές σχέσεις [1]	18
1.1.6 Ηλιακή σταθερά.....	20
1.2 ΌΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ I	21
1.2.1 Αρχή λειτουργίας.....	21
1.2.2 Πυρανόμετρο	22
1.3 ΦΑΣΜΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	23
1.4 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ, [1].....	26
1.4.1 Διακυμάνσεις για τη Πάτρα.....	27
1.5 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	28
2.ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	31
2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ	31
2.1.1 Φ/β στοιχεία (SOLAR CELLS).....	33
2.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....	37
2.2.1 Χαρακτηριστική καμπύλη φ/β στοιχείου.	38
2.2.2 Συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor), της χαρακτηριστικής ενός φ/β στοιχείου.	39
2.2.3 Τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) και ρεύμα βραχυκυκλώσεως (i_{sc}).	40
2.3 ΠΛΗΡΕΣΤΕΡΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΟΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.....	41

2.3.1 Παράλληλη αντίσταση διαρροής, R_{sh}	41
2.3.2 Σειριακή αντίσταση r_s	42
2.3.3 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC), των ϕ/β στοιχείων και πλαισίων.	43
2.4 Απόδοση ϕ/β στοιχείου, η_c	43
2.4.1 Επίδραση της έντασης της ακτινοβολίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ϕ/β στοιχείου.	45
2.4.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ϕ/β στοιχείου.	45
2.5 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ Φ/β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	47
2.5.1 Φ/β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά.	47
2.5.2 Φ/β στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα.....	48
2.6 Φ/β ΠΛΑΙΣΙΑ ΚΑΙ Φ/β ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ.....	48
2.6.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ϕ/β πλαισίου.	49
2.6.2 Απόδοση ϕ/β πλαισίου και ϕ/β συστοιχίας. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση.....	51
2.6.3 Απόδοση ϕ/β -γεννήτριας (η_{array}).....	52
2.6.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ϕ/β πλαισίων.....	53
2.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ - ΔΙΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ.....	54
2.8 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ Φ/β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.	55
2.8.1 Συνδεδεμένα στο δίκτυο ϕ/β συστήματα.	55
2.8.2 Αυτόνομα ϕ/β συστήματα.	56
2.8.3 Υβριδικό ϕ/β σύστημα.....	57
3.ΑΝΑΛΥΣΗ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	59
3.1 ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	59
<i>Surface meteorology and Solar Energy NASA</i>	60
3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	61
3.2.1 Στατιστική ανάλυση ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για διάφορες πόλεις της Ελλάδας.	62
3.3 ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.	80
3.4 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ Η.....	83
4. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΣΗΓΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ Φ/β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	92
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	92
4.1.1 Κλασική μέθοδος διαστασιολόγησης ϕ/β συστημάτων.	93
4.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ Φ/β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ. ..	95
4.3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗΣ.....	97
4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ.....	99

4.5 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ.....	100
4.6 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ, DC/AC (INVERTERS).....	107
4.7 ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (CHARGE CONTROLLER).....	112
5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ P_m ΚΑΙ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ C_L ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ.....	115
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	115
5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ P_m ΚΑΙ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ C_L	115
5.2.1 Βάση Δεδομένων PVGIS [43].....	116
5.2.2 Υπολογισμός βέλτιστης κλίσης β , με χρήση του PVGIS [43].	117
5.2.3 Εκτίμηση των ηλεκτρικών φορτίων με την χρήση του RETScreen [27].	120
5.2.4 Υπολογισμός διορθωτικών παραγόντων F και F'	123
5.2.5 Ανάπτυξη αλγορίθμου σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab για τον υπολογισμό της ελαχίστης απαιτούμενης ισχύος P_m και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L	124
5.2.6 Δυναμική μέθοδος διαστασιολόγησης. [28].....	127
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ.....	127
5.3.1 Διαστασιολόγηση για τον Χειμώνα με βάση τον Δεκέμβριο.	127
5.3.2 Διαστασιολόγηση για την Άνοιξη με βάση τον μήνα Απρίλιο.	132
5.3.3 Διαστασιολόγηση για το Καλοκαίρι με βάση τον μήνα Ιούλιο.....	134
5.4 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PVGIS.....	137
5.4.1 Επαλήθευση της αυτονομίας για διαστασιολόγηση με βάση τον Δεκέμβριο και για τις τρεις μεθόδους.....	137
5.4.2 Επαλήθευση της αυτονομίας για διαστασιολόγηση με βάση τον Απρίλιο για τις τρεις μεθόδους.....	139
5.4.3 Επαλήθευση της αυτονομίας για διαστασιολόγηση με βάση τον Ιούλιο και για τις τρεις μεθόδους.....	140
6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	142
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	145

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΓΕΝΙΚΑ

Η εξέλιξη της ανθρωπότητας είναι στενά συνδεδεμένη με τη χρήση ενέργειας. Στους τελευταίους αιώνες, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε την ενέργεια από την καύση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων και βρήκε τον τρόπο να τη μετατρέπει στην περισσότερο εξευγενισμένη μορφή της, τον ηλεκτρισμό. Στα μέσα του 20^{ου} αιώνα ένας νέος τρόπος παραγωγής ενέργειας ήρθε να δημιουργήσει ελπίδες, η πυρηνική ενέργεια. Πολύ γρήγορα όμως δραματικά γεγονότα ήλθαν να επιβεβαιώσουν, χωρίς περιθώρια αμφισβήτησης, την αδυναμία για διασφάλιση της ελεγχόμενης παραγωγής πυρηνικής ενέργειας και την αποφυγή ατυχημάτων.

Επιπλέον άρχισαν να επιβεβαιώνονται, με επιστημονικά τεκμηριωμένο τρόπο, οι προβλέψεις για σημαντικές επιβαρυντικές συνέπειες της μέχρι σήμερα συμπεριφοράς του ανθρώπου στο οικοσύστημα, εξαιτίας της αλόγιστης χρήσης των συμβατικών καυσίμων. Η παραγωγή και η χρήση της ενέργειας που προέρχεται από τα συμβατικά καύσιμα δημιούργησαν μια σειρά από περιβαλλοντικά προβλήματα με αιχμή τους το φαινόμενο του θερμοκηπίου [41]. Η υπερθέρμανση του πλανήτη αλλά και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο δεν άφησαν κανένα περιθώριο εφησυχασμού. Σύμφωνα με την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου έχουν ανεβάσει τη θερμοκρασία παγκοσμίως κατά 1.4 έως 5.8 βαθμούς έως τα τέλη του αιώνα [54]. Για το λόγο αυτό η διεθνής ερευνητική κοινότητα και η ενεργειακή βιομηχανία έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους αφενός σε σύγχρονες τεχνολογίες παραγωγής με βελτιωμένη ενεργειακά και περιβαλλοντικά απόδοση, όπως η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ).

Η ΑΞΙΑ, ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.

Όπως όλοι γνωρίζουμε ο ήλιος αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή ζωής και ενέργειας για τον πλανήτη μας. Έτσι όταν υλοποιηθεί ένα σύστημα εκμετάλλευσης της για την παραγωγή χρήσιμης ενέργειας (για παράδειγμα ηλεκτρική ή θερμική), η πρώτη ύλη -καύσιμο είναι δωρεάν και δεν υποβάλλεται ποτέ στις διακυμάνσεις των αγορών ενέργειας. Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια αντιπροσωπεύει μια "καθαρή" μορφή ενέργειας εν συγκρίσει με την ενέργεια που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, οι ρύποι από τη χρήση των οποίων συμβάλλουν στην ανάπτυξη του φαινομένου του θερμοκηπίου. Έτσι η ηλιακή ενέργεια μπορεί εν δυνάμει να αποτελεί μια σημαντική μορφή ενέργειας προς εκμετάλλευση.

Ειδικότερα, η ηλιακή ενέργεια έχει ζωτική σημασία για την διατήρηση της ζωής στη Γη και αποτελεί τη βάση για όλες σχεδόν τις άλλες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούμε. Για παράδειγμα, η ηλιακή ενέργεια είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των φυτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βιομάζα ή, υπό κατάλληλες συνθήκες, να οδηγήσουν στη δημιουργία πετρελαίου μετά από εκατομμύρια χρόνια. Η θερμότητα του ήλιου δημιουργεί θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ περιοχών και ανάπτυξη ανέμων η ενέργεια των οποίων χρησιμοποιείται στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Επιπλέον, ποσότητες υδάτων εξατμίζονται λόγω της θερμότητας του ήλιου, πέφτουν ως βροχή σε υψόμετρα και κατηφορίζουν προς τη θάλασσα, με δυνατότητα εκμετάλλευσης της δυναμικής τους ενέργειας σε υδροηλεκτρικές γεννήτριες. Ωστόσο, με τον όρο ηλιακή ενέργεια αναφερόμαστε συνήθως στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την παραγωγή κυρίως θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

Το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης είναι πραγματικά τεράστιο: όλη η ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στα παγκόσμια κοιτάσματα άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε ποσότητα ενέργειας που προκύπτει από μόλις 20 ημέρες ηλιοφάνειας. Πέρα από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου 1.3kW/m^2 . Περίπου ένα τρίτο ($1/3$) αυτής της ενέργειας ανακλάται πίσω στο διάστημα και μία ποσότητα τις απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Όταν η ηλιακή ενέργεια φτάσει στην επιφάνεια της γης, η ισχύς της μειώνεται σε περίπου 1kW/m^2 κατά τις μεσημβρινές

ώρες σε καθαρό ουρανό. Κατά μέσον όρο, λαμβάνοντας υπόψη όλη την επιφάνεια του πλανήτη, κάθε m^2 δέχεται περίπου 4.2kWh την ημέρα. Τα ποσοστά ενέργειας είναι υψηλότερα σε επιφάνειες όπως έρημοι όπου μπορούν να ξεπεράσουν τις 6kWh/ m^2 την ημέρα.

ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΗ ΠΟΡΕΙΑ ΤΩΝ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ .

Ο Γάλλος επιστήμονας Edmond Becquerel ανακάλυψε πρώτος το φωτοβολταϊκό φαινόμενο το 1839 αλλά η ιδέα παρέμενε στην σκέψη των επιστημόνων για τα υπόλοιπα 3/4 του αιώνα. Ο Becquerel διαπίστωσε ότι μερικά υλικά μπορούν παράγουν μικρές ποσότητες ηλεκτρικού φορτίου όταν εκτεθούν σε ηλιακή ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό, αρχικά μελετήθηκε σε στερεά υλικά όπως το Se απ' τον Heinrich Hertz το 1870. Σύντομα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από Se μπορούσαν να μετατρέψουν απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική με απόδοση 1-2%. Τα φ/β στοιχεία από Σελήνιο γρήγορα χρησιμοποιήθηκαν σε φωτογραφικές μηχανές και σε όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το 1954 στα εργαστήρια της εταιρίας Bell κατασκευάστηκε το πρώτο κρυσταλλικό φ/β στοιχείο από πυρίτιο Si το οποίο είχε αποδοτικότητα έως και 4%. Η πρώτη επίσημη χρήση αυτού του είδους φ/β στοιχείου έγινε το 1958 στο διαστημικό δορυφόρο Vanguard US, χρησιμοποιήθηκε μια μικρή συστοιχία από φ/β στοιχεία για να δώσει ενέργεια σε μικροσυσκευές (ράδιο). Το σύστημα δούλεψε τόσο καλά ώστε τα φ/β στοιχεία από Si χρησιμοποιούνταν συνέχεια σε παρόμοιες αποστολές.

Σήμερα τα φ/β στοιχεία τροφοδοτούν όλους τους δορυφόρους ακόμα και αυτούς που χρησιμοποιούνται για σκοπούς όπως η άμυνα, έρευνα και οι τηλεπικοινωνίες. Παρόλα αυτά τα φ/β συστήματα το 1970 ήταν ακόμη πολύ ακριβά για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατακόρον. Η ενεργειακή κρίση στα μέσα της δεκαετίας του 1970 έκανε φανερή την ανάγκη για την εύρεση εναλλακτικών πηγών ενέργειας και επαναθέρμανε την ανάγκη για τα φωτοβολταϊκά. Έτσι οι πρώτες συσκευές από κρυσταλλικό Si έκαναν την εμφάνιση τους καθώς ήταν πλέον πιο αποδοτικές, αξιόπιστες και σταθερές.

Με την πάροδο του χρόνου άρχισαν να ερευνώνται αρκετά πολλά υποσχόμενα υλικά όπως φ/β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (sc-Si), πολυκρυσταλλικού

πυριτίου (pc-Si), τεχνολογίες λεπτού υμένα (thin-film) άμορφου πυριτίου (a-Si) και άλλα οργανικά / πολυμερή υλικά. Σήμερα ένα κοινό φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να μετατρέψει από 5% έως 21% της ηλιακής ακτινοβολίας απευθείας σε ηλεκτρισμό. Πλέον το κόστος ενός φωτοβολταϊκού έχει πέσει σε αρκετά μεγάλο βαθμό. Αυτή η μείωση της τιμής επηρέασε θετικά την ραγδαία αύξηση των φ/β συστημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού από μερικά watt το 1970 τώρα πλέον αγγίζει τα 100 GW [53].

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 υπήρχαν άνω των 200 κατασκευαστών φ/β συστημάτων στην αγορά οι οποίοι προσανατολίζονταν κυρίως στους εξής τύπους φ/β: μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου, άμορφου πυριτίου και καδμίου-τελλουρίου και σε τομείς όπως: διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φ/β συστήματα, αυτόνομα φ/β συστήματα και υβριδικά φ/β συστήματα.

Στόχος των κατασκευαστών πλέον είναι να μειωθεί το κόστος των φ/β συστημάτων έτσι ώστε να μπορούν να απευθύνονται σε μεγαλύτερο καταναλωτικό κοινό. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος υπάρχουν κυρίως δύο τρόποι. Ο πρώτος είναι μέσα από τη μαζική παραγωγή συστημάτων, έτσι ώστε η φωτοβολταϊκή βιομηχανία να εξελιχθεί, ωριμάσει και να επεκταθεί γρηγορότερα. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσα από την έρευνα να δημιουργηθούν ακόμα μεγαλύτερης αποδοτικότητας φ/β στοιχεία. Πετυχαίνοντας αυτούς τους στόχους θα έχουμε σαν αποτέλεσμα την μαζική χρήση των φ/β συστημάτων με αποτέλεσμα την παραγωγή δισεκατομμυρίων Watt το χρόνο.

1. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

1.1.1 Ο Ήλιος

Ο ήλιος με μάζα 2×10^{30} kg, ακτίνα 700.000 km, ηλικία 5×10^9 χρόνια είναι η μοναδική πηγή ακτινοβολίας που φθάνει στη γη και συντελεί στη διατήρηση της ζωής. Η επιφανειακή του θερμοκρασία σύμφωνα με το φάσμα εκπομπής κατά Stefan-Bolzman, ανέρχεται σε 5.800 K. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του. Κάθε δευτερόλεπτο 564 εκατομμύρια τόνοι υδρογόνου (H) μετατρέπονται σε Ήλιο (He). Η μείωση μάζας κατά την πυρηνική σύντηξη μετασχηματίζεται σε ενέργεια. Από τη μετατροπή 1gr υδρογόνου σε Ήλιο υπολογίζεται ότι παράγεται ενέργεια ίση με $1.67 \cdot 10^5$ KWh. Η ηλιακή ενέργεια διαδίδεται στο σύμπαν κυρίως ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που φθάνει στη γη, αλλά και υπό σωματιδιακή μορφή. Η σωματιδιακή ακτινοβολία αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κυρίως ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Η ισχύς που προσπίπτει επί της γης είναι 1.7×10^{17} W/m²[1].

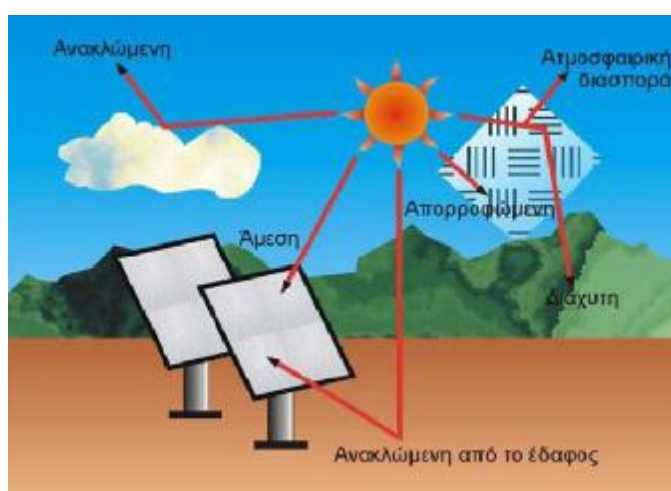
1.1.2 Η ακτινοβολία του ήλιου

Η τροχιά της γης, γύρω από τον ήλιο, είναι έλλειψη με τον ήλιο στη μία των εστιών της. Η απόσταση γης – ήλιου μεταβάλλεται περιοδικά κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ της μέγιστης τιμής της (περί την 22^η Ιουνίου), που ονομάζεται αφήλιο και της ελάχιστης (περί την 22^η Δεκεμβρίου), που ονομάζεται περιήλιο [1].

Κατά τη διέλευση των ηλιακών ακτινών, από την ατμόσφαιρα, η έντασή τους ελαττώνεται. Μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας, παραδείγματος χάριν η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του όζοντος. Ομοίως οι υδρατμοί, το CO₂, τα οξείδια του αζώτου κ.α.

απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία σε άλλες περιοχές του φάσματος. Τέλος, μέρος της σκεδαζόμενης και άμεσης ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Συνεπώς, σε κάθε τόπο στην επιφάνεια της γης, φτάνουν δυο συνιστώσες του ηλιακού φωτός: η απευθείας ή άμεση και η σκεδαζόμενη που ονομάζεται διάχυτη. Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια προέρχεται από όλο τον ουράνιο θόλο. Γενικά, η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα φ/β πλαίσιο ή έναν αισθητήρα, αποτελείται από την απευθείας, τη διάχυτη και την ανακλώμενη από το έδαφος ή από παρακείμενα κτίρια ή αντικείμενα (Σχ. 1.1). Η συνολική αυτή ακτινοβολία αναφέρεται ως ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο ή οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 1.1 Το ηλιακό φως που φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Η ανακλώμενη εξαρτάται από τη μορφολογία και το χρώμα του εδάφους ή της επικάλυψής του, ενώ η ολική, η άμεση και η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτώνται σε γενικές γραμμές από τους επόμενους παράγοντες:

1. Τη σύσταση – κατάσταση της ατμόσφαιράς τη δεδομένη χρονική στιγμή.
2. Την ημέρα και ώρα της ημέρας κατά τη διάρκεια του έτους.
3. Τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια.
4. Την κλίση της επιφάνειας ως προς το οριζόντιο.

1.1.3 Ορισμοί μεγεθών [1]

- **Άμεση Ημερήσια Ηλιακή Ακτινοβολία, H_b**

Είναι η ακτινοβολία που φθάνει από τον ήλιο στην επιφάνεια της γης χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση κατά τη διάρκεια της μέρας. Μετράται σε $\text{MJ/m}^2 \text{ per day}$ ή $\text{kWh/m}^2 \text{ per day}$. Για τους διάφορους υπολογισμούς την αναλύουμε σε δυο συνιστώσες, μια κάθετη και μια παράλληλη στην επιφάνεια της γης ή του φ/β πλαισίου ανάλογα με την περίπτωση. Η οριζόντια συνιστώσα δεν αλληλεπιδρά με την επιφάνεια της γης ή του φ/β πλαισίου αντίστοιχα και δεν συνεισφέρει στην μετατροπή της ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.

- **Διάχυτη Ημερήσια Ηλιακή Ακτινοβολία, H_d**

Είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από ολόκληρο τον ουράνιο θόλο και δημιουργείται από την σκέδαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας από σωματίδια της ατμόσφαιρας ή σύννεφα. Μετράται σε $\text{MJ/m}^2 \text{ per day}$ ή $\text{kWh/m}^2 \text{ per day}$.

- **Ανακλώμενη Ημερήσια Ηλιακή Ακτινοβολία, H_r**

Είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας από διάφορα γειτονικά αντικείμενα ή από το έδαφος. Μας ενδιαφέρει το ποσοστό αυτής που φθάνει τελικά στην επιφάνεια που μελετάμε. Μετράται σε $\text{MJ/m}^2 \text{ per day}$ ή $\text{kWh/m}^2 \text{ per day}$.

- **Ολική Ημερήσια Ηλιακή Ακτινοβολία, H**

Είναι το άθροισμα της άμεσης, διάχυτης και ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια. Μετράται σε $\text{MJ/m}^2 \text{ per day}$ ή $\text{kWh/m}^2 \text{ per day}$.

$$H = H_b + H_d + H_r \quad (1.1)$$

- **Ένταση της Ολικής Ηλιακής Ακτινοβολίας I , στο οριζόντιο επίπεδο.**

Ορίζεται ως η Ηλιακή Ακτινοβολία που προσπίπτει κάθετα στη μονάδα επιφανείας και ανά μονάδα χρόνου. Μετράται σε W/m^2 .

- **Ένταση της Διάχυτης Ηλιακής Ακτινοβολίας I_d , στο οριζόντιο επίπεδο.**

Ορίζεται ως η ένταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας που έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα . Μετράται σε W/m^2 .

- **Ένταση της Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας, I_b στο οριζόντιο επίπεδο.**

Ορίζεται ως η ένταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας που προσπίπτει απ' ευθείας ανά μονάδα επιφάνειας καθέτως χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση από την ατμόσφαιρα. Μετράται σε W/m^2 .

- **Ανακλαστικότητα, r**

Ορίζεται ως το ποσοστό της προσπίπτουσας σε μια επιφάνεια ακτινοβολίας που ανακλάται. Είναι αδιάστατο μέγεθος.

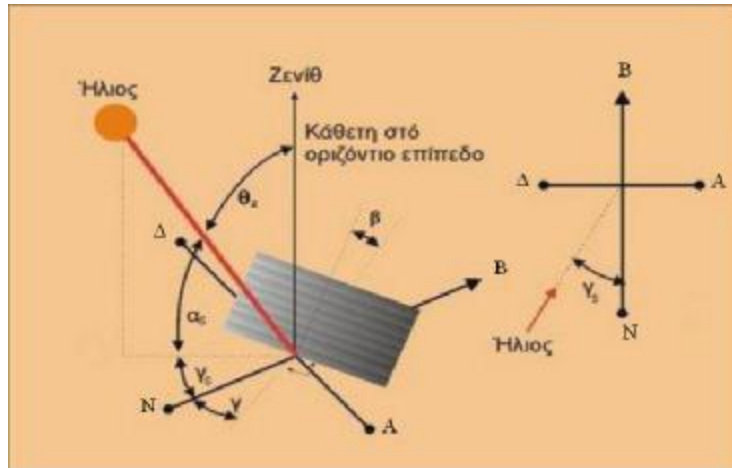
- **Αφειτικότητα, ϵ**

Ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που ακτινοβολεί ένα σώμα θερμοκρασίας T (K) προς αυτήν που θα ακτινοβολούσε εάν ήταν τέλειο μέλαν σώμα της ίδιας θερμοκρασίας. Το ϵ , είναι αδιάστατο μέγεθος.

1.1.4 Βασικές έννοιες και γεωμετρία επιφάνειας Ηλίου [12]

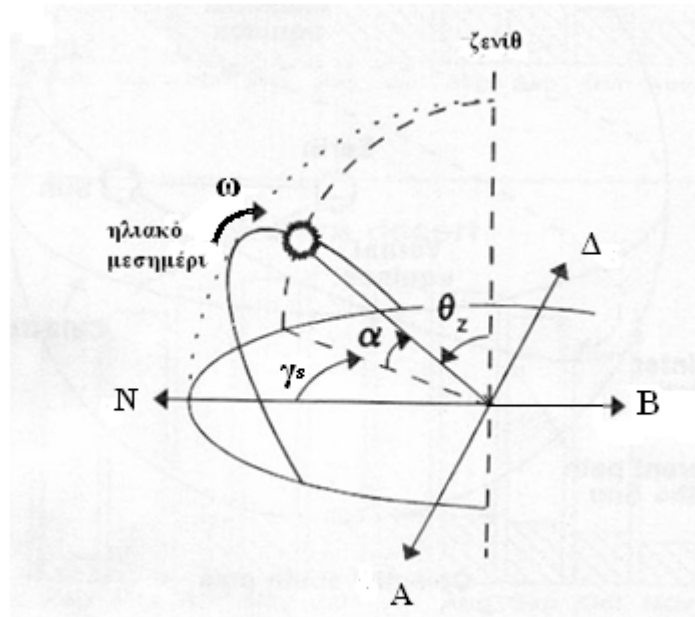
Ορίζουμε ως:

- **β** , κλίση ενός ϕ/β πλαισίου, τη γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του ϕ/β πλαισίου και το οριζόντιο επίπεδο. Η γωνία αυτή μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0° έως 90° .
- **γ , Αζιμουθιακή γωνία** ενός επιπέδου ϕ/β πλαισίου είναι η γωνία που δείχνει το προσανατολισμό του επιπέδου ϕ/β πλαισίου. Για νότιο προσανατολισμό το γ είναι μηδέν. Η αζιμουθιακή γωνία, είναι αρνητική όταν η προβολή της καθέτου στο ϕ/β πλαίσιο, επί του οριζοντίου επιπέδου “βλέπει” προς Ανατολάς και θετική όταν “βλέπει” προς Δυσμάς. Είναι η γωνία που σχηματίζεται από τη διεύθυνση B – N με την προβολή στο οριζόντιο της καθέτου της επιφάνειας (Σχ. 1.2)



Σχήμα 1.2 Προσδιορισμός της θέσης του ήλιου ως προς το φ/β πλαίσιο .

- γ_s , **Αζιμουθιακή γωνία του ηλίου.** Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μεσημβρινού του τόπου και της προβολής στο οριζόντιο επίπεδο, της ευθείας που συνδέει τον Ήλιο με τον παρατηρητή ή τον ήλιο με το φ/β πλαίσιο. Το γ_s είναι θετικό προς δύση και αρνητικό προς ανατολή και μετριέται από τη διεύθυνση B – N, (Σχ. 1.3).
- α_c , Ύψος ηλίου καλείται η συμπληρωματική γωνία της ζενιθίας γωνίας θ_z και δίνεται από τη γωνία μεταξύ της ευθείας τόπος – ήλιος και του οριζοντίου επιπέδου.
- θ_z , **Ζενιθία γωνία.** Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που συνδέει το επίπεδο του φ/β πλαισίου ή τον παρατηρητή με τον Ήλιο και της κατακόρυφου του τόπου που βρίσκεται το φ/β πλαίσιο (διεύθυνση Ζενίθ). Ισχύει $\theta_z + \alpha_c = 90^\circ$
- ω , **Ωριαία γωνία.** Είναι η γωνία που σχηματίζει ο Ήλιος κινούμενος στην ημερήσια τροχιά του. Η γωνία αυτή μετράται με αρχή το μεσημβρινό επίπεδο του τόπου, δηλαδή την ηλιακή μεσημβρία (12.00). Για κάθε χρονική στιγμή (h) για μια ημέρα (n) αντιστοιχεί και μια τιμή του ω . Η τιμή αυτή είναι θετική όταν το επίπεδο που ορίζεται από τον Ήλιο και την κατακόρυφο φ/β πλαίσιο – Ζενίθ, ευρίσκεται προς Δυσμάς του μεσημβρινού του τόπου. Είναι δε αρνητική, όταν το επίπεδο αυτό ευρίσκεται προς Ανατολή. Η ταχύτητα μεταβολής του ω είναι $15^\circ / h$.



Σχήμα 1.3 Ορισμός των γωνιών ύψους του ήλιου α , αζιμούθιας γ_s και ζενιθιακής θ_z

- ω_s , Ωριαία γωνία δύσης ή ανατολής του ήλιου καλείται η ωριαία γωνία ω όταν το ύψος του ηλίου είναι $\alpha = 0$ ή όταν η ζενιθία γωνία είναι, $\theta_z = 90^\circ$.
- ω'_s , Ωριαία γωνία δύσης ή ανατολής σε ένα κεκλιμένο επίπεδο, καλείται η ωριαία γωνία ω κατά την οποία ο ήλιος δύει ή ανατέλλει στο επίπεδο αυτό, όταν το θεωρήσουμε ως εκτεινόμενο απέραντα.
- δ , Απόκλιση ηλίου, καλείται η γωνιακή θέση Ηλίου – Γης σε σχέση με το Ισημερινό επίπεδο. Η ηλιακή απόκλιση δ αλλάζει καθημερινά και προσδιορίζεται από την εξίσωση του Cooper:

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(360^\circ \frac{284+n}{365}\right) \quad (1.2)$$

Το n είναι ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους ($n=1$ για την 1^η Ιανουαρίου).

- θ , Γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας καλείται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της καθέτου στο επίπεδο του τόπου ή του φ/β πλαισίου και της ευθείας που συνδέει αυτό το επίπεδο με τον ήλιο.
- φ , Γεωγραφικό πλάτος ή παράλληλος ενός τόπου, καλείται η γωνιώδης θέση του τόπου σε σχέση με τον ισημερινό. Ορίζεται ως θετικό για τον Βορρά και αρνητικό για το Νότο, ισχύει: $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$.

1.1.5 Βασικές τριγωνομετρικές σχέσεις [1]

Η γενική σχέση που συνδέει τη γωνία πρόσπτωσης θ με τα υπόλοιπα τριγωνομετρικά μεγέθη που ορίσαμε (φ , ω , β , δ και γ) για μια ορισμένη χρονική στιγμή κατά τη νιοστή ημέρα του χρόνου είναι η:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \\ & \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (1.3)$$

Η σχέση αυτή μπορεί να απλοποιηθεί υπό ορισμένες συνθήκες που συναντώνται συχνά στη πράξη, π.χ. όταν $\gamma = 0^\circ$ για φ/β πλαίσια με νότιο προσανατολισμό, η σχέση γράφεται:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta + \cos \delta \\ & \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \omega \end{aligned} \quad (1.4\alpha)$$

ή

$$\cos \theta = \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta \quad (1.4\beta)$$

Περαιτέρω απλοποίηση επιτυγχάνεται για επιφάνειες οι οποίες είναι κάθετες στο οριζόντιο επίπεδο δηλ. όταν $\beta = 90^\circ$ τότε η Εξισ.1.3 γράφεται:

$$\cos \theta = -\sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad (1.5)$$

Για οριζόντιες επιφάνειες, $\beta = 0^\circ$, προσανατολισμένες στο νοτιά, $\gamma = 0^\circ$, η γωνία πρόσπτωσης θ ταυτίζεται με τη θ_z δηλ. $\theta = \theta_z$ και η Εξισ.1.3 γράφεται:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi \quad (1.6)$$

Για $\theta_z = 90^\circ$ η ωριαία γωνία ω , είναι η ωριαία της Δύσης και Ανατολής (ω_s) αντίστοιχα. Λόγω συμμετρίας ως προς το ηλιακό μεσημέρι, η ωριαία γωνία δύσης και ανατολής έχουν την ίδια απόλυτη τιμή. Η Εξισ.1.6 στη περίπτωση αυτή γράφεται:

$$\begin{aligned}
0 &= \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi \Rightarrow \\
\cos \omega_s &= -\tan \varphi \cdot \tan \delta \Rightarrow \\
\omega_s &= \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta)
\end{aligned}
\tag{1.7}$$

Η ωριαία γωνία (ω'_s) της δύσης ή της ανατολής του Ηλίου στο επίπεδο ενός συλλέκτη κλίσης β , είναι η μικρότερη των ακολούθων δυο μεγεθών:

1. της ωριαίας γωνίας δύσης – ανατολής για το οριζόντιο επίπεδο και
2. της γωνίας $\cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta)$

Δηλαδή η ω'_s θα προσδιορισθεί από τη εξίσωση:

$$\omega'_s = \min [\omega_s, \cos^{-1}[-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta]] \tag{1.8}$$

Η διάρκεια της ημέρας σε ώρες, N , υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$N = \frac{2}{15^\circ/h} \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \tag{1.9}$$

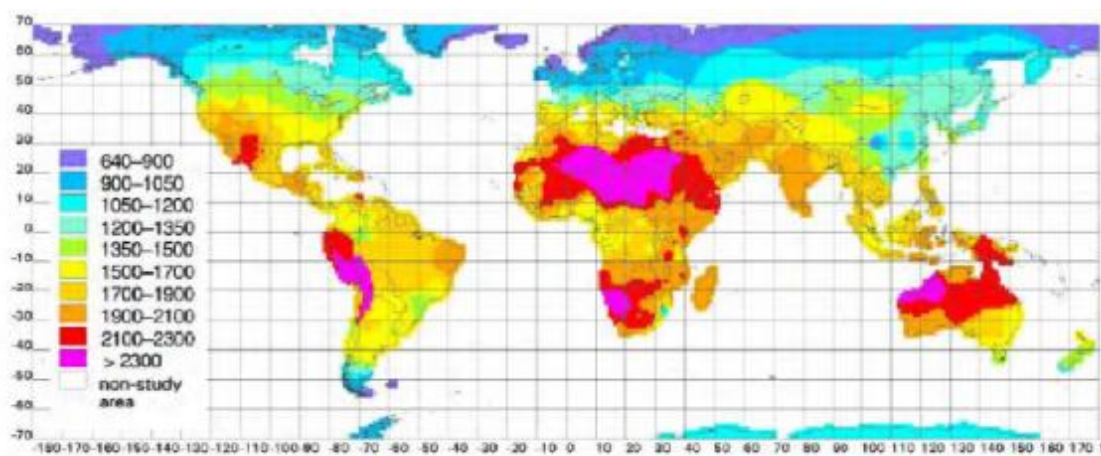
Η αζιμούθια γωνία του ηλίου κατά μια ημέρα n , που αντιστοιχεί σε απόκλιση δ και για μια χρονική στιγμή που αντιστοιχεί σε γωνία ω , προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\sin \theta_z} \tag{1.10}$$

1.1.6 Ηλιακή σταθερά

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα της γης εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ ήλιου - γης. Η μέση τιμή της έντασης ακτινοβολίας αναφέρεται ως ηλιακή σταθερά (E_0) και έχει τιμή 1367 W/m^2 , [43].

Το συγκεκριμένο επίπεδο ακτινοβολίας δεν είναι δυνατόν να φτάσει στην επιφάνεια της γης. Η ατμόσφαιρα της γης μειώνει σημαντικά την ακτινοβολία με τους μηχανισμούς της ανάκλασης, απορρόφησης και σκέδασης. Σε συνθήκες αίθριου καιρού, το μεσημέρι, η ακτινοβολία μπορεί να φτάσει τα 1000 W/m^2 στην επιφάνεια της γης. Η εν λόγω τιμή είναι σχετικά ανεξάρτητη της τοποθεσίας. Η μέγιστη ακτινοβολία παρατηρείται κυρίως σε ηλιόλουστες μέρες. Η τιμή της στην επιφάνεια της γης μπορεί να φτάσει ακόμα και 1400 W/m^2 για κάποια μικρά χρονικά διαστήματα σε κάποιες τοποθεσίες.



Σχήμα 1.4 Παγκόσμιος χάρτης ετήσιας ηλιακής ενέργειας, [43].

1.2 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ I

Το κυριότερο όργανο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια είναι το πυρανόμετρο. Το πυρανόμετρο του Angstrom αποτελείται από τέσσερις ταινίες μαγγανίου, από τις οποίες οι δυο είναι μαυρισμένες με πλατινούχο ουσία και οι άλλες δυο είναι επιστρωμένες με οξείδιο του μαγνησίου ή οξείδιο του ψευδαργύρου. Οι δυο τελευταίες ταινίες θερμαίνονται ώσπου η διαφορά θερμοκρασίας να εξισωθεί με την θερμοκρασία των μαυρισμένων ταινιών. Η μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας γίνεται με θερμοστοιχεία.

1.2.1 Αρχή λειτουργίας

Τα πυρανόμετρα διακρίνονται σε δύο τύπους:

Πρώτος τύπος: η αρχή λειτουργίας αυτού του τύπου πυρανόμετρου βασίζεται στην θερμοηλεκτρική στήλη, της οποίας η τάση εξόδου δημιουργείται από την ανίχνευση της διαφοράς θερμοκρασίας της μαύρης επιφανείας και της λευκής επιφανείας που ανακλά την ηλιακή ακτινοβολία ή της έκθεσης και της μη έκθεσης των επιφανειών στην ηλιακή ακτινοβολία. Η διαφορά θερμοκρασίας των δύο επιφανειών είναι ανάλογη προς την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μετράται με σειρά θερμοζεύγων που μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα της τάξης του mV. Επίσης υπάρχουν πυρανόμετρα μόνο μαύρης επιφανείας τα οποία είναι και τα ποιά διαδεδομένα, [47].

Δεύτερος τύπος: τα πυρανόμετρα τύπου Si. Η φωτοδίοδος από Si έκανε δυνατή την κατασκευή απλών πυρανόμετρων με λογική ακρίβεια όπου η φωτοδίοδος είναι σταθερή. Η απόκριση του αισθητήρα της φωτοδίοδου από Si δεν είναι ιδανική και πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για ηλιακή ακτινοβολία και όχι κάτω από συνθήκες μεταβαλλόμενης φασματικής κατανομής γι' αυτό το λόγο δεν προτείνεται η χρήση τους κάτω από τεχνητό φωτισμό, μέσα σε εγκαταστάσεις θόλου ή για τη μέτρηση ανακλώμενης ακτινοβολίας, [47].

1.2.2 Πυρανόμετρο

Τα σύγχρονα πυρανόμετρα αποτελούνται από δυο ομόκεντρους γυάλινους θόλους και στο εσωτερικό τους υπάρχει μια μαύρη επιφάνεια με κεραμικό υπόστρωμα κάτω από την οποία υπάρχουν εκατοντάδες θερμοστοιχεία. Το σήμα του πυρανομέτρου είναι της τάξης mV και οδηγείται σε κατάλληλη συσκευή καταχώρησης η οποία μπορεί ταυτόχρονα να κάνει και ολοκλήρωση του σήματος. Τα όργανα αυτά λέγονται και ηλιακοί ολοκληρωτές (Solar integrators) [47]. Ενδεικτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά πυρανομέτρου τύπου CMP 3, παρουσιάζονται στον Πιν.1.1.



Εικόνα 1.1 Πυρανόμετρο τύπου CMP 3 . Πηγή:[Εργαστήριο ΑΠΕ, ΤΕΙ Πάτρας]

Πίνακας 1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά πυρανομέτρου CMP 3

Φασματική περιοχή	300 έως 2800 nm
Ευσαιθησία	5 έως 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Χρόνος απόκρισης	18 s
Θερμοκρασιακή εξάρτηση της ευαισθησίας (-10 °C έως +40 °C)	<5%
Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	-40 °C έως 80 °C
Η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία	2000 W/m^2
Το οπτικό πεδίο	180°

Προκειμένου για μέτρηση της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας τα πυρανόμετρα εφοδιάζονται και με ένα δαχτυλίδι το οποίο τοποθετείται στη διεύθυνση του επιπέδου του Ισημερινού έτσι ώστε να σκιάζεται ο γυάλινος θόλος συνεχώς κατά τη διάρκεια της μέρας. Σκοπός του δαχτυλιδιού είναι να εμποδίσει την άμεση ακτινοβολία του ήλιου κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας να φτάσει στο πυρανόμετρο, (Σχ. 1.2). Επίσης κάθε λίγες ημέρες η θέση του δαχτυλιδιού πρέπει να αναπροσαρμόζεται μετακινούμενη παράλληλα κατά μήκος ενός οδηγού.



Εικόνα 1.2 Πυρανόμετρο για μέτρηση της έντασης της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας. Πηγή:[Εργαστήριο ΑΠΕ, ΤΕΙ Πάτρας.]

1.3 ΦΑΣΜΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Μέρος της ενέργειας που απελευθερώνεται από τον ήλιο κατευθύνεται προς τη Γη υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ένα μέρος αυτής είναι ορατό για τον ανθρώπινο οφθαλμό.

Πίνακας 1.2 Κλιματολογικές ζώνες στις οποίες χωρίζεται η χώρα.

Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3	Ζώνη 4	Ζώνη 5	Ζώνη 6
Ηράκλειο	Αθήνα	Αργοστόλι	Άρτα	Θεσσαλονίκη	Ιωάννινα
Ρόδος	Καλαμάτα	Κόρινθος	Κέρκυρα	Καβάλα	Κομοτηνή
Σητεία	Νάξος	Μυτιλήνη	Λαμία	Κατερίνη	Σέρρες
Χανιά	Σάμος	Πάτρα	Λήμνος	Λάρισα	Φλώρινα
Ιεράπετρα	Σύρος	Χίος	Τρίπολη	Τρίπολη	Ξάνθη

Πίνακας 1.3 Μέσες μηνιαίες τιμές της Ηλιακής Ακτινοβολίας στο οριζόντιο στο επίπεδο της θάλασσας ανά ζώνη σε MJ/m²

ΜΗΝΑΣ ΖΩΝΗ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
1	230	277	439	558	706	770	817	760	598	421	284	220
2	230	274	418	493	691	752	781	713	736	382	270	198
3	220	259	400	493	648	754	781	713	526	367	241	187
4	194	234	371	493	644	724	781	695	504	349	220	173
5	169	223	360	493	644	680	727	670	486	328	220	162
6	169	216	349	468	612	666	706	641	464	313	202	162

Η Γη περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό της και ταυτόχρονα γύρω από τον ήλιο σε ετήσια βάση. Η ακτινοβολία που φθάνει στη γη εκτός ατμόσφαιρας μεταβάλλεται εξαιτίας της ελλειπτικής τροχιάς της γης περί τον ήλιο και παίρνει τιμές μεταξύ 1310 και 1399 W/m². Οι γωνίες που σχηματίζουν το ισημερινό επίπεδο και το επίπεδο της ελλειπτικής τροχιάς είναι 23.45° ή 23°27'. Το καλοκαίρι οι ακτίνες του ηλίου πέφτουν περίπου κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο του βόρειου ημισφαιρίου και η θερμοκρασία ουσιαστικά είναι υψηλότερη, έστω και αν η απόσταση Γης – Ήλιου το καλοκαίρι είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη κατά τον χειμώνα.

Η θέση του ήλιου κατά το μεσημέρι είναι υψηλά (το α έχει μεγάλη τιμή) σε σχέση με τον ορίζοντα. Αντίθετα, το χειμώνα για την ίδια ώρα η θέση του ήλιου είναι χαμηλότερα. Όταν η τροχιά του ήλιου είναι χαμηλή οι ακτίνες του διανύουν μεγαλύτερη απόσταση μέσα στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος τους να απορροφάται αλλά και να εκτρέπεται χωρίς να φθάνει στην επιφάνεια της γης. Όταν η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μεγάλη, τότε μεγάλο μέρος της ανακλάται, χωρίς ποτέ να χρησιμοποιηθεί.

1.4 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ, [1]

Η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται διαρκώς και η ισχύς της δίδεται από τη εξίσωση:

$$I_0 = I_{sc} \left(1 + 0.033 * \cos \frac{360 * n}{365} \right) \quad (1.11)$$

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, για ένα οριζόντιο επίπεδο, το οποίο ευρίσκεται έξω από το όριο της ατμόσφαιρας υπολογίζεται από την Εξίσ1.12.:

$$I_o = I_{sc} \left[1 + 0.033 * \cos \left(\frac{360 * n}{365} \right) \right] * (\sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1.12)$$

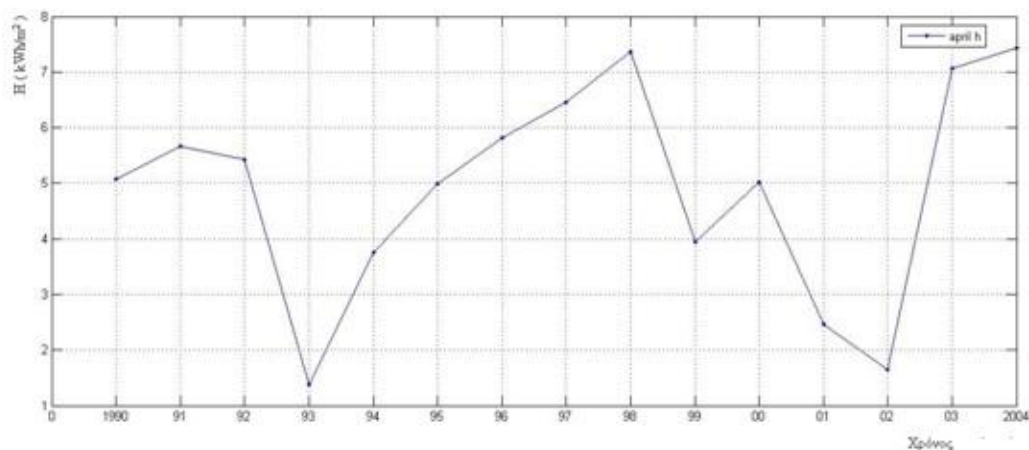
Ολοκλήρωση της ανωτέρω σχέσεως από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου θα δώσει τη συνολική ακτινοβολία που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας (J/m²), κατά τη διάρκεια μιας ημέρας.

$$H_o = \frac{24 * 3600 * I_{sc}}{\pi} * \left[1 + 0.033 * \cos \left(\frac{360 * n}{365} \right) \right] * \left(\cos \varphi * \cos \delta * \sin \omega_s + \frac{2 * \pi * \omega_s}{360} * \sin \varphi * \sin \delta \right) \quad (1.13)$$

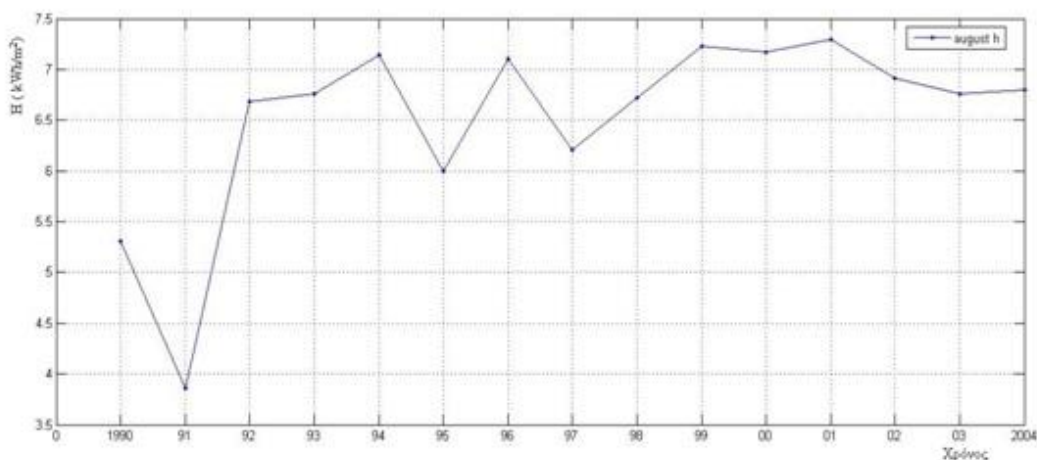
Ωστόσο, αν και η ηλεκτρική ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας μπορεί να υπολογιστεί επ' ακριβώς με βάση την ανωτέρω σχέση, η ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης υφίσταται διακυμάνσεις.

1.4.1 Διακυμάνσεις για τη Πάτρα

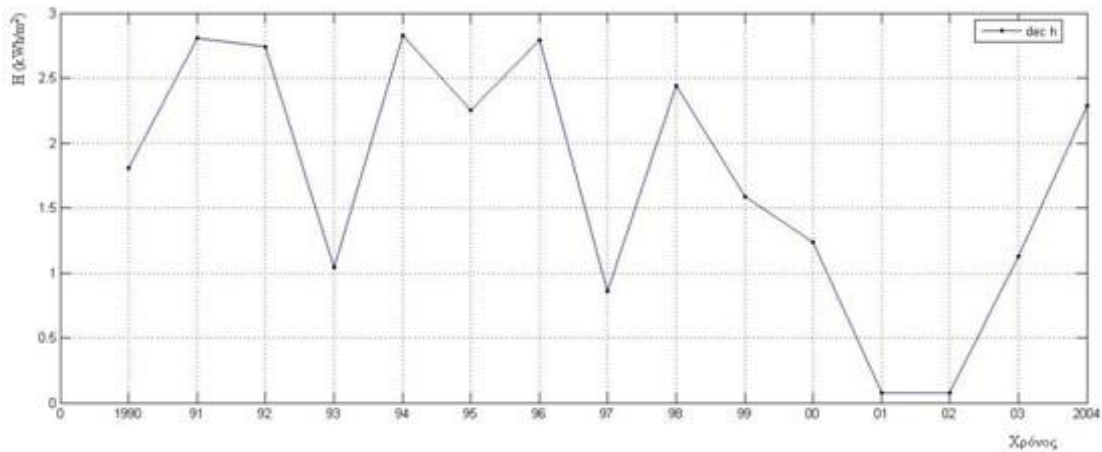
Στα Σχήματα 1.7–1.9 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για την πόλη της Πάτρας κατά τα έτη 1990-2004 για τους μήνες Αύγουστο, Απρίλιο και Δεκέμβριο, όπως μελετήθηκαν από την βάση δεδομένων της NASA[33].



Σχήμα 1.7 Διακύμανση της Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για την αντιπροσωπευτική ημέρα για τον μήνα Απρίλιο.



Σχήμα 1.8 Διακύμανση της Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για την αντιπροσωπευτική ημέρα για τον μήνα Αύγουστο.



Σχήμα 1.9 Διακύμανση της Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για την αντιπροσωπευτική ημέρα για το μήνα Δεκέμβριο.

Η ανάγκη προσδιορισμού της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας έχει οδηγήσει σε διάφορα μοντέλα πρόβλεψης που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία[29.52].

1.5 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Με βάση της τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο μπορεί να υπολογισθεί η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα κεκλιμένο επίπεδο που έχουν τοποθετηθεί τα φ/β πλαίσια. Για τον υπολογισμό του συντελεστή μετατροπής R χρησιμοποιείται η Σχέση (1.15) των Liu και Jordan, οι οποίοι υπολόγισαν την ακτινοβολία που προσπίπτει σε κεκλιμένη επιφάνεια θεωρώντας ότι συνιστάται από την άμεση, την διάχυτη και την ανακλώμενη συνιστώσα.

Στην περίπτωση αυτή προτείνεται η εξίσωση:

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} R_d \quad (1.14)$$

Η οποία και γράφεται ως ακολούθως:

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \frac{1 - \cos \beta}{2} * r \quad (1.15)$$

r είναι ο συντελεστής ανακλαστικότητας του χώρου γεινίασης του φ/β πλαισίου, με συνιστώμενες τιμές: $r \approx 0.2$ για συνηθισμένες συνθήκες εδάφους και $r \approx 0.7$ για χιονοσκεπείς περιοχές, [1].

Για να υπολογισθεί η μέση μηνιαία ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο, κλίσης β , και συμβολίζεται με \bar{H}_T και όπου κατ' αναλογία με την εξίσωση $R = \frac{I_T}{I}$ έχουμε:

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} \quad (1.16)$$

$$\text{ή } \bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \times \bar{R}_b + \left(\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \times \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + r \times \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right),$$

$$\text{ή } \bar{H}_T = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \times \bar{R}_b + \bar{H}_d \times \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + r \times \bar{H} \times \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (1.17)$$

$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ είναι ο λόγος της μέσης μηνιαίας ημερήσιας διάχυτης ακτινοβολίας προς την αντίστοιχη ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο. Υπολογίζεται από τη σχέση [1] :

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.39 - 4.03 \times \bar{K}_T + 5.53 \times \bar{K}_T^2 - 3.11 \times \bar{K}_T^3 \quad (1.18)$$

Για τους υπολογισμούς είναι απαραίτητες οι μηνιαίες τιμές της ακτινοβολίας, όπως αυτές του (Πίν.1.3). Ο Πίνακας αυτός δίνει μέσες τιμές ανά μήνα και για διάφορες κλιματολογικές ζώνες, της προσπίπτουσας στο οριζόντιο επίπεδο ηλιακής ενέργειας \bar{H} . Μέσες μηνιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο μπορούν να υπολογιστούν από βάσεις δεδομένων προηγούμενων ετών για την περιοχή υπό εξέταση, όπως γίνεται στη παρούσα πτυχιακή εργασία.

Το \overline{R}_b υπολογίζεται από το παρακάτω τύπο, και ισχύει με αυτή την μορφή όταν τα ω_s και ω_s' έχουν υπολογισθεί σε μοίρες.

$$\overline{R}_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) * \cos \delta * \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} * \omega'_s * \sin(\varphi - \beta) * \sin \delta}{\cos \varphi * \cos \delta * \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} * \omega'_s * \sin \varphi * \sin \delta} \quad (1.19)$$

Ο παράγων \overline{K}_T ονομάζεται συντελεστής αιθριότητας και ορίζεται ως ο λόγος της μηνιαίας ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο προς τη μηνιαία ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο στην περίπτωση που δεν υπήρχε ατμόσφαιρα.

Τούτο συμβαίνει μόνο σε μεγάλο ύψος δηλαδή εκτός ατμόσφαιρας, συνεπώς:

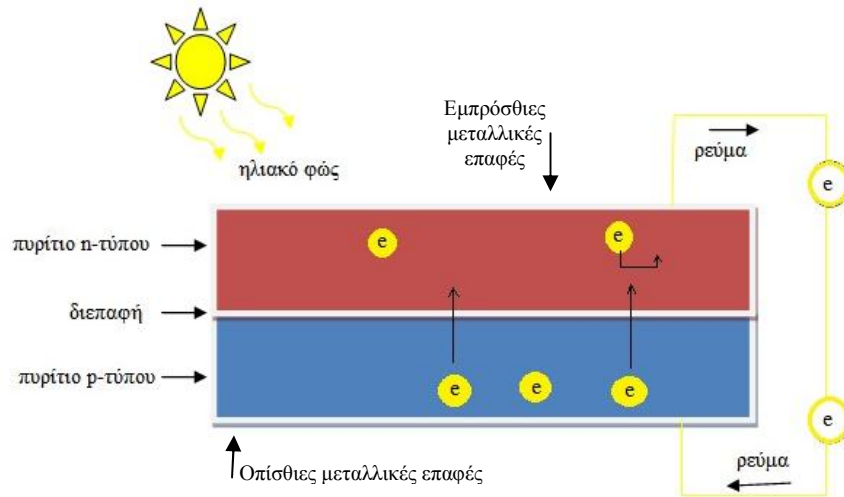
$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{H_o} \quad (1.20)$$

2.ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η βασική φυσική διεργασία μέσω της οποίας ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (φ/β στοιχείο), μπορεί να μετατρέψει το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια[1].

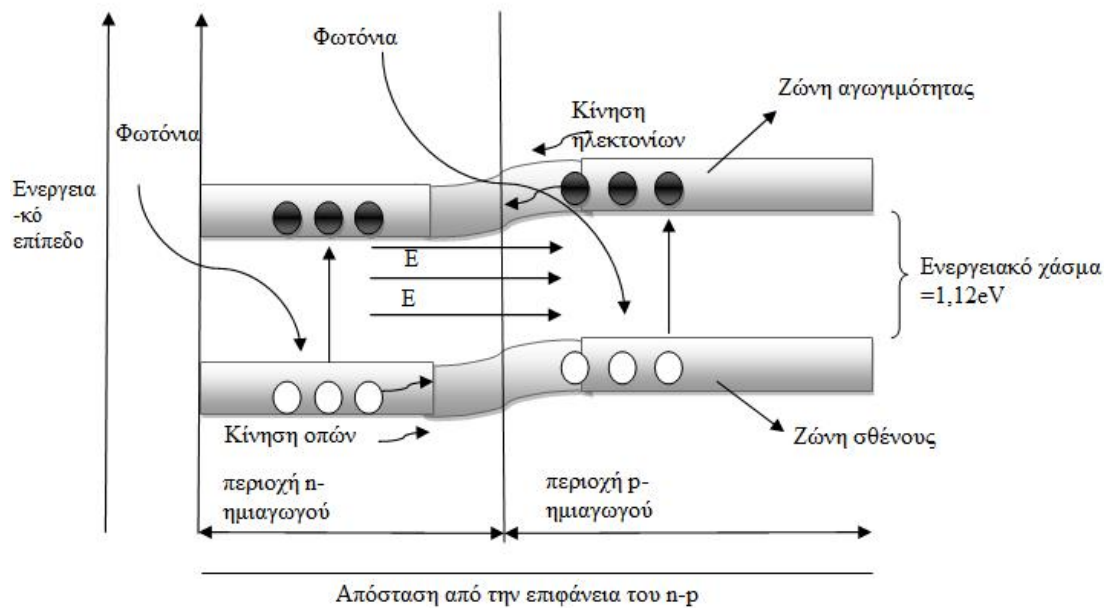
Τα σημαντικότερα μέρη ενός φ/β στοιχείου, (solar cell), είναι δύο στρώματα ημιαγωγίμου υλικού τα οποία αποτελούνται από κρυστάλλους πυριτίου (Si). Το κρυσταλλικό πυρίτιο, από μόνο του δεν είναι ένας πολύ καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, αλλά με την κατάλληλη προσθήκη προσμίξεων σ' αυτό, δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για την κινητικότητα των e^- , δηλαδή παραγωγή ηλεκτρισμού[6]. Στην κάτω στρώση του φ/β στοιχείου προστίθεται συνήθως βόριο (B), το οποίο δημιουργεί δεσμούς (p)-τύπου με το πυρίτιο. Κατά την αντικατάσταση ενός ατόμου πυριτίου Si, με ένα άτομο βορίου B, το οποίο έχει σθένος 3, δημιουργείται μια μικρή περιοχή στην οποία υπάρχουν άτομα τα οποία μπορούν να δεχθούν ένα ηλεκτρόνιο, προκειμένου να συμπληρωθεί ο ελεύθερος δεσμός. Σε αυτήν την περίπτωση λέμε ότι δημιουργείται μία οπή. Στην επάνω στρώση του φ/β στοιχείου προστίθεται συνήθως φώσφορος (P), ο οποίος δημιουργεί δεσμούς (n)-τύπου με το πυρίτιο. Η αντικατάσταση ενός ατόμου πυριτίου Si, με ένα άτομο φωσφόρου P, το οποίο έχει σθένος 5, έχει ως αποτέλεσμα να μένει ένα ηλεκτρόνιο ανά άτομο το οποίο δεν συμμετέχει σε δεσμό. Έτσι ο ημιαγωγός n-τύπου, περιέχει περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια[2]. Η επιφάνεια μεταξύ των ημιαγωγών τύπου p και τύπου n που δημιουργούνται ονομάζεται p-n επαφή (P-N junction) [4], όπως φαίνεται στο Σχ. 2.1.



Σχήμα 2.1: Ημιαγωγοί n και p σε επαφή.

Λόγω της ασυμμετρίας των περιοχών p και n στην συγκέντρωση ηλεκτρονίων και οπών, επικρατεί στην επαφή n-p το φαινόμενο της διάχυσης,[5] όπου από τον ημιαγωγό n (υπάρχει περίσσια ηλεκτρονίων),ηλεκτρόνια (e^-) διαχέονται προς την περιοχή p, τούτη η κίνηση δημιουργεί στον ημιαγωγό n, μια περιοχή κοντά στην διεπαφή n-p, όπου υπάρχει αυξημένο το θετικό φορτίο. Αντιστρόφως, οπές διαχέονται από τον ημιαγωγό p προς τον ημιαγωγό n, με αποτέλεσμα κοντά στην διεπαφή n-p στο τμήμα του ημιαγωγού p, να επικρατεί αρνητικό φορτίο. Όταν στο σύστημα επέλθει δυναμική ισορροπία λόγω του φαινομένου της διάχυσης στους δύο ημιαγωγούς δημιουργείται αντίστροφο ηλεκτρικό πεδίο \vec{E}_{p-n} , χωρίς να είναι απαραίτητη η επίδραση του φωτός [3].

Ωστόσο με την πρόσπτωση του φωτός στις περιοχές p και n, δημιουργούνται επιπλέον ηλεκτρόνια και οπές τα οποία διαταράσσουν την δυναμική ισορροπία που έχει σχηματιστεί με αποτέλεσμα να έχουμε την μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών μέσω της αντίστροφης πόλωσης ηλεκτρικού πεδίου \vec{E}_{p-n} όπως φαίνεται στο Σχ. 2.2.



Σχήμα: 2.2: Ενεργειακό διάγραμμα διεπαφής. Πηγή[Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ, 2004]

Το φαινόμενο αυτό εξηγεί τη δημιουργία του (φωτο)ρεύματος, i_{ph} , από τα φωτόνια με ικανή ενέργεια $h\nu$, μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα $h\nu \geq E_g = 1.12 \text{ eV}$, τα οποία προσπίπτουν στο σύστημα n-p. Το σύστημα αυτό καλείται φ/β στοιχείο και η συμπεριφορά αυτή φωτοβολταϊκό φαινόμενο [1].

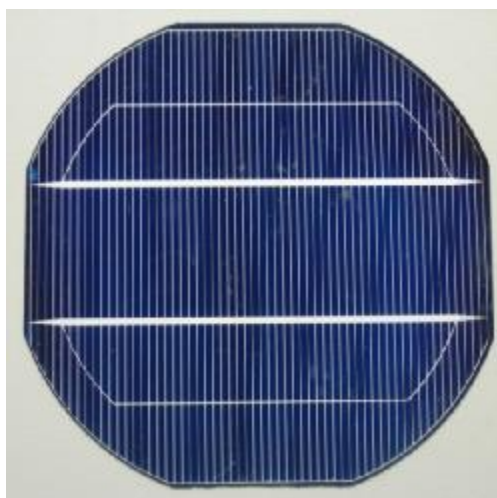
2.1.1 Φ/β στοιχεία (SOLAR CELLS)

Το φ/β στοιχείο πρακτικά είναι το μικρότερο στοιχείο ενός φ/β πλαισίου το οποίο όμως αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Στο εμπόριο κυκλοφορούν πολλά είδη φ/β στοιχείων. Παρόλα αυτά τα στοιχεία από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (sc-Si) είναι τα πιο διαδεδομένα είδη φ/β στοιχείων. Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται και άλλοι τύποι φ/β στοιχείων όπως, στοιχεία από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (pc-Si), τεχνολογίες λεπτού υμένα (thin-film) καθώς επίσης στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si), στοιχεία Καδμίου-Τελλουρίου (CdTe), στοιχεία Χαλκού-Ινδίου/ Γαλλίου-Σεληνίου στοιχεία Γαλλίου-Αρσενίου (GaAs), και τέλος οργανικά/πολυμερή στοιχεία [13].

Έτσι οι κυριότεροι τύποι φ/β στοιχείων είναι οι παρακάτω:

A. Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (sc-Si)

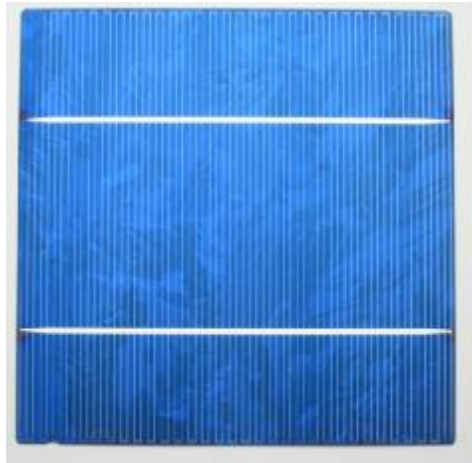
Η πρώτη κατηγορία φ/β στοιχείων είναι τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Εικ.2.1) τα οποία κατασκευάζονται από ένα μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο (wafer) πυριτίου. Η διαδικασία με την οποία κατασκευάζονται τα κελιά αυτά ονομάζεται διαδικασία "Czochralski".[11] Η απόδοση, (η) των στοιχείων αυτών σε εργαστηριακό επίπεδο είναι της τάξης του (24%), αλλά η πραγματική τους απόδοση στην πράξη αγγίζει το (15%),[1], και αυτό λόγω απωλειών που θα αναφερθούν στην συνέχεια. Το σχήμα των στοιχείων αυτών είναι συνήθως τετραγωνικής μορφής. Το χρώμα τους είναι συνήθως βαθύ μπλε έως μαύρο λόγω της αντί-ανακλαστικής (AR) επίστρωσης ή γκρι χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση.



Εικόνα.2.1: Φ/β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Πηγή: [Εργαστήριο ΑΠΕ, ΤΕΙ Πάτρας]

B. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (pc-Si)

Τα στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν φθηνότερο κόστος από αυτά του μονοκρυσταλλικού πυριτίου και χαμηλότερη απόδοση. Η κατασκευή τους προκύπτει από δίσκους (wafers) πυριτίου που κόβονται από τετραγωνισμένους ράβδους πυριτίου. Έτσι η μέθοδος κατασκευής ενός πολυκρυσταλλικού φ/β στοιχείου απαιτεί μικρότερη ακρίβεια και κόστος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά φ/β στοιχεία. Το σχήμα τους είναι τετράγωνο και η απόδοση τους κυμαίνεται από (18%) σε επίπεδο εργαστηρίου και (12%) στην πράξη [14]. Το χρώμα τους είναι συνήθως μπλε με αντί-ανακλαστική επίστρωση. Φ/β στοιχείο από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο φαίνεται στην παρακάτω Εικ.2.2.



Εικόνα.2.2:Φ/β στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Πηγή: [Εργαστήριο ΑΠΕ, ΤΕΙ Πάτρας]

Γ. Τεχνολογίες λεπτού υμενίου (thin-film).

Μία από της τελευταίες επιστημονικές εξελίξεις της τεχνολογίας των φ/β είναι τύπου λεπτού υμένα Εικ.2.3. Πρόκειται για φ/β στοιχεία πάχους μόλις μερικών μμ με στόχο την επίτευξη εύλογης απόδοσης χωρίς την χρήση μεγάλης ποσότητας Si. Η απόδοση τους εξαρτάται από το είδος του υλικού από το οποίο κατασκευάζονται. Το χρώμα τους είναι έντονα σκούρο σχεδόν μαύρο. Τα φ/β στοιχεία λεπτού υμένα μπορούν να κατασκευασθούν από ένα μεγάλο εύρος υλικών. Το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή φ/β στοιχείων λεπτού υμενίου είναι το άμορφο πυρίτιο (a-Si). Επίσης τα φ/β στοιχεία Καδμίου-Τελλουρίου (Cd-Te) και Χαλκού-Ινδίου (Cu-I) / Γαλλίου-Δισεληνίου (Ga-Se₂), λόγω του χαμηλού κόστους και της υψηλής απόδοσης τους είναι μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες.



Εικόνα2.3: Φ/β στοιχεία τεχνολογίας λεπτού υμένα. Πηγή: [Εργαστήριο ΑΠΕ, ΤΕΙ Πάτρας]

Αναλυτικότερα οι κυριότεροι τύποι της κατηγορίας αυτής είναι οι παρακάτω:

Γ1. Φ/β στοιχεία άμορφου πυριτίου (a-Si)

Τα φ/β στοιχεία άμορφου πυριτίου έχουν την ιδιότητα να απορροφούν την εκμεταλλεύσιμη ηλιακή ακτινοβολία έως και 40 φορές αποτελεσματικότερα από ότι τα φ/β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου [14,15]. Ένα ακόμη οικονομικό πλεονέκτημα που ευνοεί την κατασκευή φ/β στοιχείων άμορφου πυριτίου είναι ότι κατά την διαδικασία κατασκευής των φ/β στοιχείων αυτού του τύπου απαιτούνται χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας [19,20]. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που έχουν τα φ/β στοιχεία λεπτού υμενίου είναι ότι λόγω του μικρού πάχους τους δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η θεωρητική βέλτιστη απόδοση τους είναι της τάξεως του (12%), ενώ η απόδοση στην πράξη κυμαίνεται από (4% έως 5%) [12].

Γ2. Φ/β στοιχεία Καδμίου-Τελλουρίου (Cd-Te)

Η κρυσταλλική ένωση Καδμίου-Τελλουρίου είναι ένα από τα ποιό υποσχόμενα υλικά για την κατασκευή φ/β πλαισίων υψηλής απόδοσης και αυτό διότι η βέλτιστη απόδοση των στοιχείων CdTe αγγίζει το (24%) [16].

Γ3. Άλλοι τύποι φ/β στοιχείων

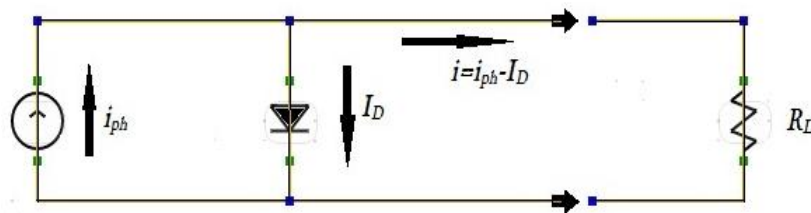
- Μεμβράνες (GaAs): Τα στοιχεία αυτού του τύπου είναι στοιχεία υψηλής απόδοσης έως και (23%) [17], ωστόσο έχουν ιδιαίτερο υψηλό κόστος.
- Μεμβράνες (CuO): Η απόδοση των στοιχείων αυτών είναι της τάξεως του (20%) [17].

Γ4. Οργανικά / πολυμερή φ/β στοιχεία: Τα οργανικά-πολυμερή φ/β στοιχεία αποτελούν μια νέα τεχνολογία στο χώρο των φ/β στοιχείων. Ο τρόπος λειτουργίας των οργανικών στοιχείων είναι διαφορετικός σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες, όπου αντί για ημιαγώγιμες p-n επαφές, τα οργανικά φ/β στοιχεία χρησιμοποιούν οργανικά υλικά που λειτουργούν ως δότες και δέκτες ηλεκτρονίων[7,8,9]. Πλεονέκτημα στην χρήση οργανικών υλικών είναι ότι επιτρέπουν σε μεγάλη κλίμακα, και χαμηλή θερμοκρασία κατασκευή εύκαμπτων φ/β στοιχείων σε υποστρώματα πλαστικών. Η απόδοση των οργανικών φ/β στοιχείων κυμαίνεται στην τάξη του (5% με 6%),[13]. Ωστόσο, με την αύξηση της απόδοσης των οργανικών / πολυμερών φ/β στοιχείων

προβλέπεται σημαντική μείωση στο κόστος παραγωγής φ/β στοιχείων αυτού του τύπου.

2.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.

Το απλούστερο ηλεκτρικό ισοδύναμο ενός φ/β στοιχείου συνδεδεμένου με εξωτερικό φορτίο R_L , παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχ.2.3:



Σχήμα 2.3: Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου. Πηγή: [Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ, 2004]

Ουσιαστικά, το φ/β στοιχείο είναι μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος συνδεδεμένη παράλληλα με δίοδο που διαρρέεται από ρεύμα (I_D). Το ρεύμα (i), προκύπτει από τον συνδυασμό του φωτορεύματος (i_{ph}), και του ρεύματος της διόδου (I_D), που δημιουργείται λόγω της ύπαρξης της επαφής p-n.[1]. Έτσι ισχύει η Εξ.2.1:

$$\mathbf{i = i_{ph} - I_D} \quad (2.1)$$

$$\text{όπου: } I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right), \quad (2.2)$$

γνωστή και ως εξίσωση του Shockley, [1,2]. Η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$i = i_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

όπου:

i : ρεύμα στοιχείου

i_{ph} : φωτόρευμα, ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

I_D : ρεύμα διόδου

I_0 : αντίστροφο ρεύμα κόρου

q : το φορτίο του ηλεκτρονίου: 1.602×10^{-19} C (Coulomb)

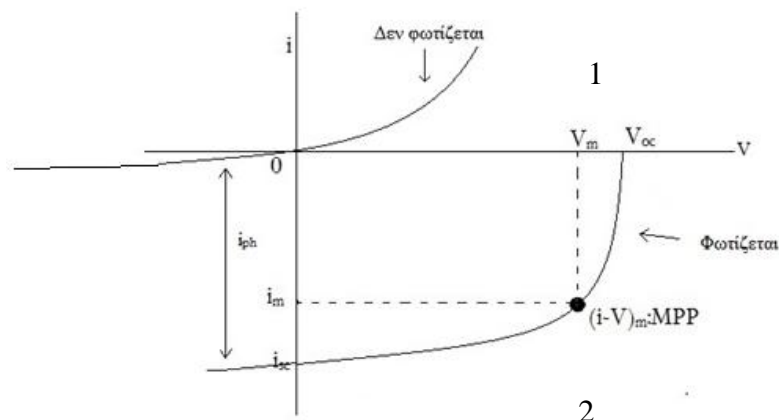
V: η τάση στα άκρα της διόδου

k: είναι η σταθερά του Boltzmann: $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 86.3 \times 10^{-3} \text{ eV/}^\circ\text{K}$

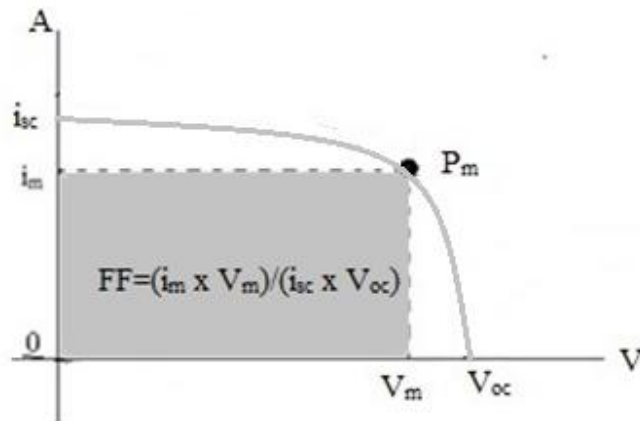
T: η απόλυτη θερμοκρασία του φ/β στοιχείου

2.2.1 Χαρακτηριστική καμπύλη φ/β στοιχείου.

Στο παρακάτω Σχ.2.4α φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V, ενός φ/β στοιχείου, στο σκοτάδι (1) και στο φως (2). Η σημαντική περιοχή για την καμπύλη I-V, βρίσκεται στο τέταρτο τεταρτημόριο. Εκεί το φ/β στοιχείο συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος και άρα παρέχει ισχύ σε έναν καταναλωτή ($P = V \times I$), [21]. Έτσι για λόγους ευκολίας από την καμπύλη I-V κατασκευάζουμε μόνο το τμήμα του τέταρτου τεταρτημορίου της καμπύλης I-V, ανεστραμμένο ως προς τις τιμές του ρεύματος. (Σχ. 2.4β).



Σχήμα 2.4(α): Χαρακτηριστική σκότους (i-v) διόδου - και διόδου, όταν αυτή φωτίζεται. Η καμπύλη παριστάνει γραφικά την εξίσωση του Shockley. Αν $V < 0$ τότε $I_D \rightarrow -I_0$ ενώ, αν $V > 0$ τότε το I_D αυξάνει εκθετικά. Πηγή: [Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ 2004]



Σχήμα: 2.4(β): Ανεστραμμένη I-V φ/β στοιχείου, στο τεταρτημόριο που αυτό παρέχει ενέργεια. Στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάστηκε η μέγιστη παρεχόμενη ισχύς P_m , καθώς και ο συντελεστής πλήρωσης FF, (Fill Factor), της χαρακτηριστικής ενός φ/β στοιχείου. Πηγή: [Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ 2004]

2.2.2 Συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor), της χαρακτηριστικής ενός φ/β στοιχείου.

Για ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας (i-V) ενός φ/β στοιχείου το γινόμενο $i \times V = P$ μεγιστοποιείται, με αποτέλεσμα το ζεύγος αυτών των τιμών i_m και V_m να δίνει τη μέγιστη ισχύ, P_m από το φ/β στοιχείο στο φορτίο R_L . Το σημείο αυτό όπου έχουμε μέγιστη ισχύ συμβολίζεται ως **MPP: Maximum Power Point**, όπου:

$$P_m = i_m \times V_m \quad (2.4)$$

Έτσι ορίζουμε τον συντελεστή πλήρωσης, FF, ενός φ/β στοιχείου:

$$FF = \frac{i_m \times V_m}{i_{sc} \times V_{oc}} \quad (2.5)$$

Στη περίπτωση αυτή ως συντελεστής πλήρωσης ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ορθογώνιας επιφάνειας που είναι εγγεγραμμένη στην καμπύλη i-V, και παριστάνεται από τη σκιασμένη επιφάνεια, προς το εμβαδόν της επιφάνειας $i_{sc} \times V_{oc}$. [1] (βλ. Σχ. 2.4β)

2.2.3 Τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) και ρεύμα βραχυκυκλώσεως (i_{sc}).

Όταν στο κύκλωμα του Σχ.2.3 έχουμε βραχυκύκλωμα, τότε $R_L \rightarrow 0$, και ισχύει: $i = i_{sc}$. Τότε το ρεύμα καλείται ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

Άρα από την Εξ.2.3 όταν τεθεί $V=0$, λόγω βραχυκυκλώματος, έχουμε:

$$i = i_{sc} \rightarrow i_{ph} \quad (2.6)$$

Αντίθετα, όταν έχουμε ανοιχτό κύκλωμα, τότε ισχύει $R_L \rightarrow \infty$, και $i=0$ άρα :

$$V = V_{oc} \text{ και η τάση καλείται τάση ανοικτού κυκλώματος.} \quad (2.7)$$

Θέτουμε $i=0$ και $V=V_{oc}$ στην Εξ.2.3 για την περίπτωση ανοικτού κυκλώματος έχουμε:

$$0 = i_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right) \text{ ή } \left(\frac{i_{ph}}{I_0} + 1 \right) = e^{qV_{oc}/kT}.$$

Λύνοντας ως προς V_{oc} βρίσκουμε την τάση ανοικτού κυκλώματος, ήτοι:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{i_{ph}}{I_0} + 1 \right), \text{ για ανοιχτό κύκλωμα.} \quad (2.8\alpha)$$

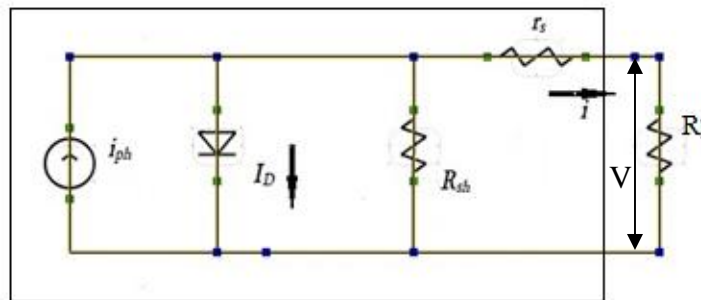
Επειδή, $i_{ph} \gg I_0$, θα ισχύει:

$$V = V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{i_{ph}}{I_0} \right) \quad (2.8\beta)$$

Τα i_{ph} και I_0 εξαρτώνται από την δομή του φ/β στοιχείου, επίσης η τιμή της V_{oc} εξαρτάται από την T , και από την τιμή του I_0 , που με την σειρά του εξαρτάται από την τεχνική της ανάπτυξης και κατασκευής του φ/β στοιχείου[1].

2.3 ΠΛΗΡΕΣΤΕΡΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΝΟΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ.

Ένα πληρέστερο ηλεκτρικό ισοδύναμο μοντέλο ενός φ/β στοιχείου δίδεται στο Σχ.2.5. Το κύκλωμα περιλαμβάνει πηγή σταθερού ρεύματος (i_{ph}), σε συνδυασμό με μία ιδανική δίοδο, την παράλληλη αντίσταση διαρροής ρεύματος (R_{sh}), καθώς και την εν σειρά αντίσταση (r_s)[45].



Σχήμα 2.5: Ισοδύναμο κύκλωμα φ/β στοιχείου. Με την παράλληλη αντίσταση R_{sh} την αντίσταση σε σειρά r_s και το φορτίο R_L . Πηγή: [Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ 2004]

Η νέα σχέση i - V που παριστάνει την χαρακτηριστική των φ/β στοιχείων, που προκύπτει μετά την εισαγωγή των αντιστάσεων R_{sh} και r_s , εκφράζεται από την Εξ. 2.9.

$$i = i_{ph} - I_0 \left(e^{(V+ir_s)/(mV_T)} - 1 \right) - \frac{V+ir_s}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

$$\text{όπου: } V_T = \frac{kT}{q} = 8.7 \times 10^{-7} \times T \quad (2.10)$$

η θερμοκρασία T δίδεται σε (K).

2.3.1 Παράλληλη αντίσταση διαρροής, R_{sh}

Η αντίσταση αυτή συνδέεται με τη διαρροή ρεύματος μεταξύ των άκρων της επαφής p-n. Αφορά διαδρομές ρεύματος διαρροής στο εσωτερικό της επαφής p-n, μεταξύ σημείων που βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού ίση με την τάση στα άκρα της διόδου,[2]. Η αντίσταση αυτή εμφανίζεται λόγω του γεγονότος ότι αρκετά ηλεκτρόνια σε ένα φ/β στοιχείο, μπορεί να οδεύουν μέσω αγωγίων περιοχών, που δημιουργούνται από διάφορα αίτια με τον καιρό π.χ. μηχανικά χτυπήματα,

θερμικά shocks και γήρανση υλικών [18,22]. Η τιμή της αντίστασης R_{sh} , είναι αρκετά μεγάλη. Μικρή R_{sh} , χαρακτηρίζει καμπύλη I-V, με αντίστοιχα μικρό παραλληλόγραμμο $I_m \times V_m$, μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, P_m , άρα και χαμηλότερη τιμή του συντελεστή πλήρωσης FF.

2.3.2 Σειριακή αντίσταση r_s .

Η αντίσταση r_s , στο ισοδύναμο κύκλωμα θεωρείται ότι συνδέεται σε σειρά με το φ/β στοιχείο. Η αντίσταση r_s προέρχεται από τις εξής επιμέρους αντιστάσεις[45]:

R_1 = επαφή μέταλλου-ημιαγωγού στο πίσω μέρος της επιφάνειας.

R_2 = λόγω του υλικού του ημιαγωγού

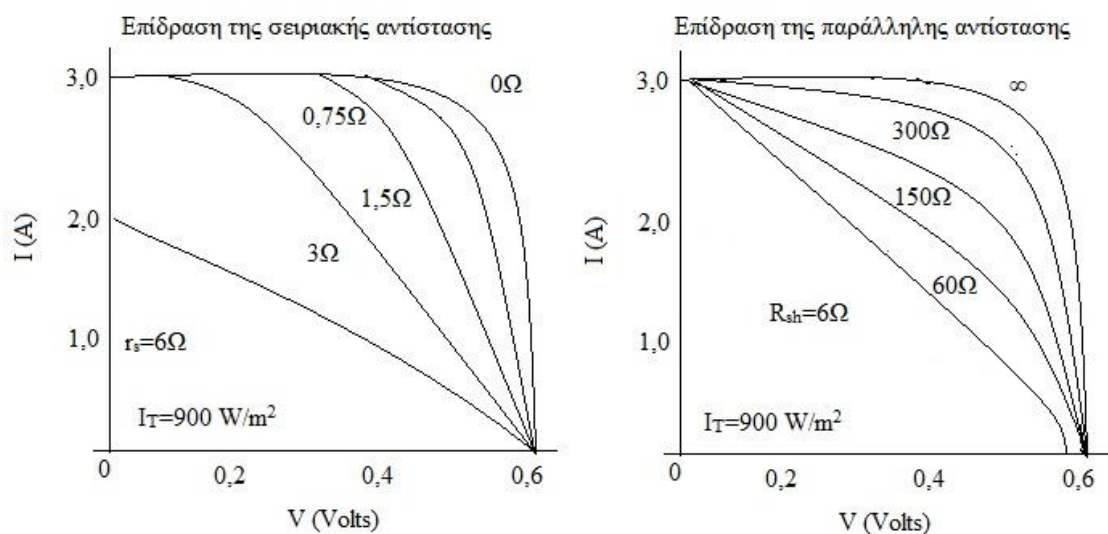
R_3 = η αντίσταση μεταξύ 2 επαφών δακτύλων του πλέγματος

R_4 = η αντίσταση της επαφής μέταλλου-ημιαγωγού στα δάκτυλα του πλέγματος

R_5 = η αντίσταση των δακτύλων του πλέγματος

R_6 = η αντίσταση της λωρίδας συλλογής (bus bar)

Οι τιμές της αντίστασης αυτής είναι πάρα πολύ μικρές καθώς η αύξηση της τιμής της r_s , οδηγεί στην αντίστοιχη μείωση της μέγιστης ισχύος που αποδίδει το φ/β στοιχείο, [1,2] και αλλοιώνει την χαρακτηριστική I-V, βλ. Σχ.2.6.



Σχήμα 2.6: Επίδραση των αντιστάσεων r_s και R_{sh} στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φ/β στοιχείου. Πηγή: [http://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cell]

2.3.3 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC), των φ/β στοιχείων και πλαισίων.

Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φ/β στοιχείων ή πλαισίων όπως η απόδοση, η , ο συντελεστής πλήρωσης, FF , το ρεύμα βραχυκύκλωσης, i_{sc} , η τάση ανοικτού κυκλώματος, V_{oc} , καθώς και η ισχύς αιχμής, P_m , που αποδίδουν τα φ/β στοιχεία έχει συμφωνηθεί να μετρούνται υπό τις ακόλουθες πρότυπες συνθήκες δοκιμών-μετρήσεων σε ελεγχόμενο περιβάλλον (S.T.C.:Standard Test Conditions) :

- 1) Ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο φ/β: $I_T=10^3 \text{ W/m}^2$
- 2) Θερμοκρασία φ/β, $T_c=25^\circ \text{ C}$
- 3) Φάσμα προσπίπτουσας ακτινοβολίας: $AM=1.5$.

Με βάση τις πρότυπες συνθήκες δοκιμών, εισάγεται η έννοια της ισχύος αιχμής, P_m , (Peak Power), ως χαρακτηριστικό του φ/β στοιχείου, η μονάδα μέτρησης της στο SI, γράφεται W_p , (Watt Peak) [23].

Έτσι ως ισχύς αιχμής ενός φ/β στοιχείου, ορίζεται η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να αποδώσει, κάτω από τις πρότυπες συνθήκες δοκιμών ελέγχου, (S.T.C.) [25].

Η έννοια της ισχύος αιχμής, χρησιμοποιείται επίσης για τον χαρακτηρισμό των φ/β-πλασίων και των φ/β συστοιχιών.

2.4 Απόδοση φ/β στοιχείου, η_c .

Απόδοση ενός φ/β στοιχείου (η_c) ονομάζεται το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική [1]. Ο Πιν.2.1 δίνει τις τιμές της απόδοσης διάφορων τύπων φ/β στοιχείων από διάφορους ημιαγωγούς και τεχνικές κατασκευής.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικές εργαστηριακές τιμές απόδοσης φ/β στοιχείων. Πηγή: NREL[17].

Υλικά φ/β στοιχείων	Βέλτιστη απόδοση (%)
Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο	25%
Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο	20.4%
Άμορφο Πυρίτιο	12.5%
Μεμβράνες GaAs	20.3%
Μεμβράνες CuO	20.3%
Μεμβράνες Cd-Te	17.3%
Οργανικά φ/β στοιχεία	10%

Έτσι ως βαθμό απόδοσης, η_c , ενός φ/β στοιχείου ορίζουμε το πηλίκο της μέγιστης ισχύος (P_m), που αποδίδει, προς την προσπίπτουσα ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας I_T , επί την επιφάνεια A_c του φ/β στοιχείου:

$$\eta_c = \frac{P_m}{A_c \times I_T} = \frac{\text{(μέγιστη) αποδιδόμενη ισχύς}}{\text{προσπίπτουσα ένταση στο φ/β-στοιχείο} \times \text{επιφάνεια}} \quad (2.11)$$

σύμφωνα με την Εξ.2.4

η Εξ.2.11 γράφεται: $\eta_c = \frac{i_m \times V_m}{A_c \times I_T}$

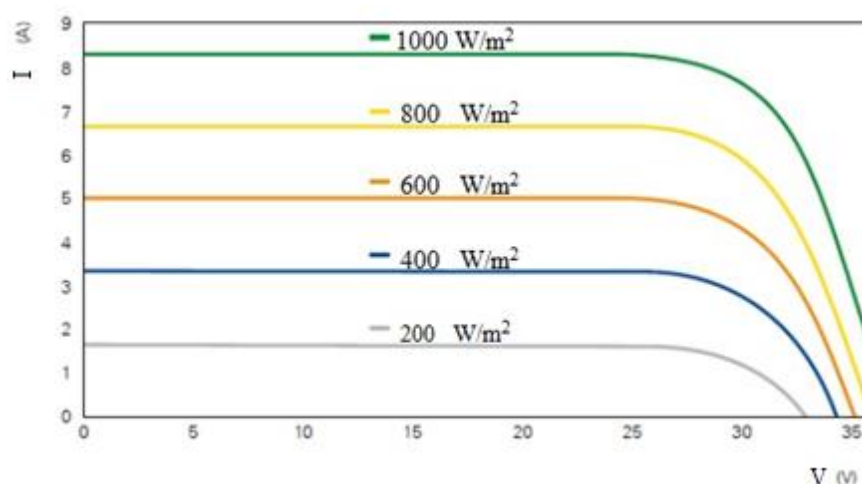
η οποία λόγω της Εξ.2.5

γράφεται ως η απόδοση φ/β στοιχείου: $\eta_c = \frac{i_{sc} \times V_{oc} \times FF}{A_c \times I_T} \times 100\%$ (2.12)

2.4.1 Επίδραση της έντασης της ακτινοβολίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φ/β στοιχείου.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φ/β στοιχείου ή πλαισίου.

Στο Σχ.2.7 αποδίδεται η εξάρτηση της καμπύλης I-V, καθώς και του ρεύματος βραχυκύκλωσης, i_{sc} και της τάσης ανοικτού κυκλώματος, V_{oc} από την ένταση I_T της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα. 2.7: Επίδραση της ακτινοβολίας στην τάση ανοικτού κυκλώματος και στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως του φ/β. Πηγή [Κατάλογος εταιρίας BP solar] [46].

Παρατηρείται ότι:

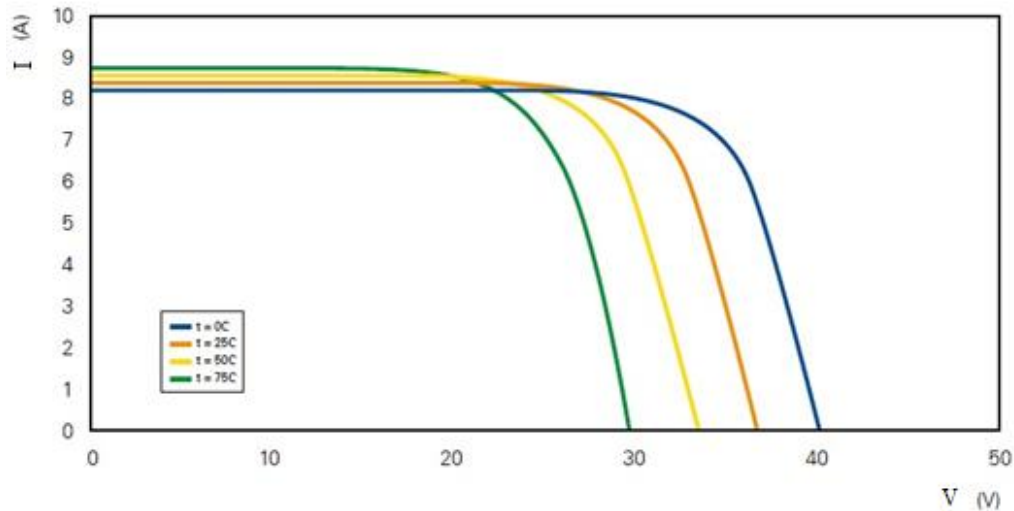
- i. το ρεύμα βραχυκύκλωσης, i_{sc} του φ/β στοιχείου είναι ανάλογο της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας I_T , στο φ/β στοιχείο.
- ii. η τάση ανοικτού κυκλώματος αυξάνεται λογαριθμικά ως συνάρτηση της έντασης της ακτινοβολίας, που προσπίπτει στο φ/β στοιχείο[1].

2.4.2 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φ/β στοιχείου.

Η επίδραση της θερμοκρασίας είναι ο δεύτερος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φ/β στοιχείου ή πλαισίου. Η

θερμοκρασία του φ/β στοιχείου αυξάνεται κατά τον φωτισμό του, εξαιτίας της μετατροπής, μέσα σε αυτό, μέρους της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια [4].

Στο Σχ.2.8 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην χαρακτηριστική καμπύλη, I-V ενός φ/β πλαισίου.



Σχήμα 2.8: Επίδραση της θερμοκρασίας στην I-V χαρακτηριστική καμπύλη ενός φ/β πλαισίου. Πηγή: [Κατάλογος εταιρίας BP solar] [46].

Όπως παρατηρούμε στο Σχ.2.8, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, i_{sc} αυξάνεται ελαφρά με την αύξηση της θερμοκρασίας ενώ, η τάση ανοικτού κυκλώματος, V_{oc} μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας στο φ/β πλαισίου [1-4].

Η απόδοση του φ/β στοιχείου ή πλαισίου επηρεάζεται επίσης από την αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτό. Μπορούμε να ορίσουμε ότι η ταχύτητα μεταβολής της απόδοσης (η), σε σχέση με την θερμοκρασία T , ήτοι το $d\eta/dT$ δίνεται από την Εξ.2.13[1]:

$$\frac{1}{\eta_c} \frac{d\eta_c}{dT} = \left[\frac{1}{V_{oc}} \times \frac{dV_{oc}}{dT} + \frac{1}{i_{sc}} \times \frac{di_{sc}}{dT} + \frac{1}{FF} \times \frac{dFF}{dT} \right] \quad (2.13)$$

Με ενδεικτικές τιμές [48]:

$$\frac{1}{P_m} \frac{dP_m}{dt} = -0.4\%/^{\circ}\text{C} \quad (2.14)$$

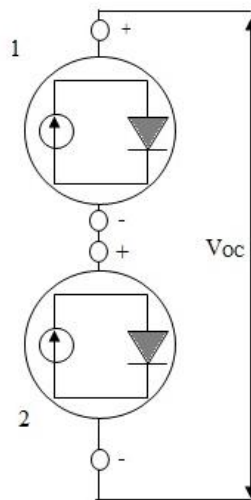
$$\frac{1}{\eta} \frac{d\eta}{dt} = -0.4\%/^{\circ}\text{C} \quad (2.15)$$

2.5 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.

Τα φ/β στοιχεία μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά ή και παράλληλα, σύμφωνα με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους έτσι ώστε να δημιουργήσουν ένα φ/β πλαίσιο.

2.5.1 Φ/β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά.

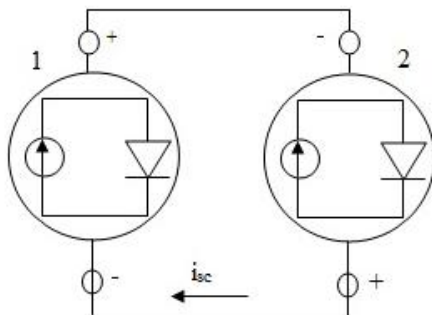
Η σύνδεση n_s όμοιων φ/β στοιχείων σε σειρά, οδηγεί σε σύστημα με τάση ανοικτού κυκλώματος $V_{oc,total}$, ανάλογη με το άθροισμα των τάσεων των επιμέρους φ/β στοιχείων, ($V_{oc,total} = n_s V_{oc}$), ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης $i_{sc,total}$, ισούται με το αντίστοιχο ρεύμα του ενός στοιχείου, ($i_{sc,total} = i_{sc}$), [2], όπως φαίνεται στο Σχ.2.9.



Σχήμα 2.9: Εν σειρά σύνδεση φ/β στοιχείων. Πηγή: [Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, 2011]

2.5.2 Φ/β στοιχεία συνδεδεμένα παράλληλα.

Η παράλληλη σύνδεση n_p , όμοιων φ/β στοιχείων (Σχ:2.10), δίνει ένα σύστημα με την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος ($V_{oc,total} = V_{oc}$), ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης του συστήματος ισούται με το άθροισμα το επιμέρους ρευμάτων του κάθε φ/β στοιχείου, ($i_{sc,total} = n_p i_{sc}$). [1].



Σχήμα 2.10: Παράλληλη σύνδεση φ/β στοιχείων. Πηγή: [I.E. Φραγκιαδάκης, 2011]

2.6 Φ/β ΠΛΑΙΣΙΑ ΚΑΙ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ.

Τα φ/β στοιχεία είναι η βασική μονάδα ενός φ/β συστήματος, έχουν συνήθως επιφάνεια περίπου 100cm^2 , και αποδίδουν τιμές ισχύος ($1\text{W}\sim 2\text{W}$). Με την σύνδεση πολλών φ/β στοιχείων μαζί δημιουργείται μια διάταξη η οποία καλείται φ/β πλαίσιο. Ο συνδυασμός πολλών φ/β πλαισίων, καλωδιωμένων μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα σε μια επίπεδη συνήθως επιφάνεια, σταθερή ή περιστρεφόμενη, [1], αποτελεί την φ/β συστοιχία (Σχ.2.14).



Εικόνα.2.4: Τυπικοί σχηματισμοί σύνθεσης φ/β στοιχείων και πλαισίων. Πηγή:
[Εργαστήριο ΑΠΕ, ΤΕΙ Πάτρας]

2.6.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου.

Το κυριότερο τυπικό ηλεκτρικό χαρακτηριστικό ενός φ/β πλαισίου, ώστε να καλύψει τις ανάγκες μιας συγκεκριμένης φ/β εγκατάστασης είναι η ισχύς αιχμής P_m , ενός φ/β πλαισίου, όπως αυτή ορίστηκε και για το φ/β στοιχείο.

Ισχύς αιχμής. P_m , ενός φ/β πλαισίου, είναι η μέγιστη ισχύς που είναι δυνατόν να αποδώσει σε ένα φορτίο όταν η φ/β γεννήτρια λειτουργεί υπό συνθήκες (STC).[1]

Τα τυπικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φ/β πλαισίου παρουσιάζονται στο Πιν.2.2.

Πίνακας 2.2 : Τυπικά χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου BP. Πηγή [Κατάλογος εταιρίας BP solar] [46].

Solar module BP 3232T.	
Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.	
Μέγιστη ισχύς αιχμής, P_m (W _p)	230 W
Ηλεκτρική τάση στο σημείο ισχύος αιχμής V_m	29.1 V
Ηλεκτρικό ρεύμα στο σημείο ισχύος αιχμής I_m	7.90 A
Τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} (V)	36.7 V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης i_{sc} (A)	8.4 A
Θερμικά χαρακτηριστικά	
NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	47±2°C
Θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης	(0.065±0.015)%/°C
Θερμικός συντελεστής τάσης ανοικτού κυκλώματος	-(0.36±0.05)% /°C
Θερμικός συντελεστής ισχύος	-(0.5±0.05)% /°C
Διαστάσεις	
L xBx H (Μήκος x πλάτος x πάχος), (mm)	1667x1000x50 mm
Βάρος (kg)	19.4 kg /42.8 lbs

Είναι προφανές ότι ένα φ/β πλαίσιο, το οποίο είναι τμήμα κάποιας εγκαταστημένης φ/β συστοιχίας κατά την διάρκεια της ημέρας βρίσκεται διαρκώς σε συνθήκες διαφορετικές από τις STC [1]. Κατά την λειτουργία του πλαισίου σε πραγματικές συνθήκες, η θερμοκρασία του φ/β στοιχείου και φυσικά του φ/β πλαισίου, είναι διαφορετική των 25°C και η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας διαφέρει από αυτήν που ορίστηκε στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου με αποτέλεσμα η μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς να είναι διαφορετική [2].

Οι ακόλουθες συνθήκες έχουν προταθεί για τον προσδιορισμό της ισχύος αιχμής, ώστε αυτές να προσεγγίζουν περισσότερο μια πραγματική κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή η τιμή της P_m , να προσεγγίζει την τιμή που θα αποδίδει το φ/β πλαίσιο στο πεδίο εφαρμογής του [1].

- **Τυπικές συνθήκες λειτουργίας φ/β πλαισίων.** (Standard Operating Conditions, **SOC**).

Οι συνθήκες αυτές είναι:

1. Ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας 800W/m^2 .
 2. Θερμοκρασία αέρα (περιβάλλοντος), $T_a=20^\circ\text{C}$.
 3. Ταχύτητα ανέμου 1m/sec .
 4. Προσανατολισμός προς Νότο και μετρήσεις κατά το ηλιακό μεσημέρι.
 5. Μετρήσεις θερμοκρασίας υπό συνθήκες ανοικτού κυκλώματος.
- **Ονομαστικές τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας ενός φ/β στοιχείου.** (Nominal Operation Cell Temperature, **NOCT**)

Είναι η θερμοκρασία που αποκτά ένα φ/β πλαίσιο όταν λειτουργεί υπό συνθήκες (SOC).

2.6.2 Απόδοση φ/β πλαισίου και φ/β συστοιχίας. Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση.

Το κάθε φ/β πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (βλ. Πιν.2.2) που προφανώς διαμορφώνονται από τα αντίστοιχα μεγέθη των φ/β στοιχείων από τα οποία αποτελείται. Επομένως ο συντελεστής απόδοσης ενός φ/β πλαισίου (η_p) ορίζεται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν του φωτοβολταϊκού στοιχείου με την διαφορά όμως, ότι η επιφάνεια ενός φ/β πλαισίου δεν είναι καλυμμένη εξολοκλήρου από φ/β στοιχεία. Έτσι η Εξ. 2.11 γράφεται:

$$\eta_p = \frac{P_m}{I_T \times A_c \times n_p \times n_s} \quad (2.16)$$

όπου A_c είναι η επιφάνεια του φ/β στοιχείου και n_s , n_p ο αριθμός των φ/β στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά και εν παραλλήλω αντίστοιχα.

Υπάρχει βέβαια η περίπτωση όπου ο κατασκευαστής ενός φ/β πλαισίου να έχει επιλέξει πλαίσιο με 36 ή 72 φ/β στοιχεία σε σειρά. Τότε, αν όλα τα φ/β στοιχεία είναι σε σειρά στην παραπάνω σχέση ο όρος $n_p=1$.

Εάν στην Εξ.2.16 αντί για τη συνολική επιφάνεια των φ/β στοιχείων χρησιμοποιείται η επιφάνεια του φ/β πλαισίου A_p , τότε πρέπει να προστεθεί ο συντελεστής πλήρωσης της επιφάνειας, του φ/β πλαισίου, $\eta_{pv,f}$ [1].

$$\text{Άρα η Εξ.2.14 γράφεται: } \eta_{pv} = \frac{P_p}{I_T \times A_{pv} \times n_{pv,f}} \quad (2.17)$$

Ο συντελεστής πλήρωσης $\eta_{pv,f}$ παίρνει τιμές περί το 0.95 και δείχνει το ποσοστό της επιφάνειας A_{pv} που καλύπτεται από φ/β στοιχεία.

2.6.3 Απόδοση φ/β-γεννήτριας (η_{array})

Στην περίπτωση που μιλάμε για απόδοση, η_{array} , μιας φ/β γεννήτριας με N_s και N_p φ/β πλαίσια εν σειρά και εν παραλλήλω αντίστοιχα τότε η Εξ.2.17 γράφεται:

$$\eta_{array} = \frac{P_{marray}}{I_T \times A_c \times n_s \times n_p \times N_s \times N_p}, \quad (2.18)$$

ή ισοδύναμα

$$\eta_{array} = \frac{P_{marray}}{I_T \times A_{pv} \times n_{pv,f} \times N_s \times N_p} \quad (2.19)$$

όπου:

n_s : ο αριθμός φ/β στοιχείων εν σειρά σε ένα φ/β πλαίσιο

n_p : ο αριθμός φ/β στοιχείων εν παραλλήλω σε ένα φ/β πλαίσιο

N_s : ο αριθμός φ/β πλαισίων εν σειρά

N_p : ο αριθμός φ/β πλαισίων εν παραλλήλω

$P_{m,array}$: η ισχύς που αποδίδει η φ/β συστοιχία.

2.6.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση φ/β πλαισίων.

Η απόδοση των φ/β πλαισίων είναι μικρότερη της αντίστοιχης του φ/β στοιχείου,[1,2,5,6] οι βασικότεροι λόγοι είναι:

- η μη πλήρης κάλυψη της γεωμετρικής επιφάνειας του πλαισίου από την επιφάνεια των φ/β στοιχείων.
- η ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών των φ/β στοιχείων που συνθέτουν το φ/β πλαίσιο και
- η ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα του πλαισίου.
- οι ηλεκτρικές συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων
- οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες οι οποίες οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας του πλαισίου.

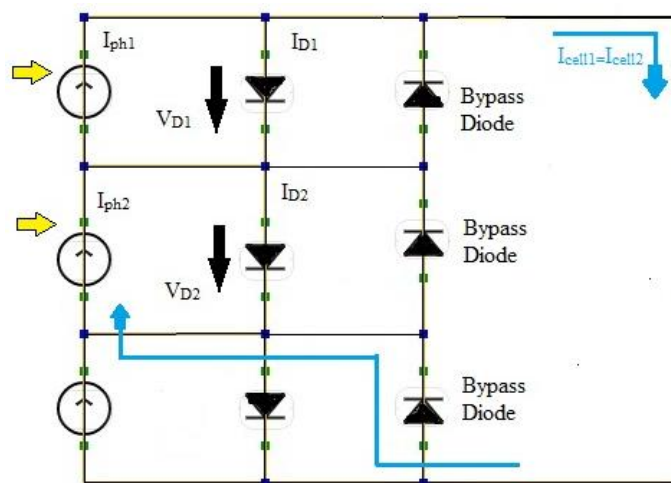
Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός φ/β πλαισίου προέρχονται κυρίως, λόγω:

- της γήρανσης του φ/β πλαισίου, που οδηγεί στη μείωση της απόδοσης του λόγω αλλοίωσης των υλικών κατασκευής των φ/β στοιχείων του φ/β πλαισίου. Γήρανση φ/β πλαισίων μπορεί να προκληθεί από υπερθέρμανση κάποιων φ/β στοιχείων ή τμημάτων του πλαισίου που προκαλείται συνήθως λόγω σκίασης αυτών [48] από οξείδωση, εισχώρηση υγρασίας, την υποβάθμιση του EVA και της ανακλαστικής επίστρωσης AR [49.50].
- η θερμοκρασία του φ/β πλαισίου λόγω της διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του αέρα υπό τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας των φ/β πλαισίων [1],
- η σκόνη και οι ακαθαρσίες στην επιφάνεια του φ/β [48].
- η σκίαση [48].

2.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ - ΔΙΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΑΜΨΗΣ.

Η σκίαση δημιουργείται συνήθως από την παρουσία φυσικών εμποδίων (π.χ. δένδρα, κτίρια, σύννεφα), τα οποία εμποδίζουν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία να φτάσει στο φ/β. Ένα τυπικό φ/β πλαίσιο αποτελείται από φ/β στοιχεία ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών συνήθως συνδεδεμένα σε σειρά. Το σκιασμένο φ/β στοιχείο λειτουργεί ως μια μεγάλη αντίσταση,[40], όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα φ/β στοιχεία του πλαισίου. Ο παρατεταμένος σκιασμός του στοιχείου σε συνδυασμό με τον έντονο φωτισμό των υπολοίπων στοιχείων, μπορεί να οδηγήσει σε ολική καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια θα μπορούσε να επιφέρει την ολική αχρήστευση του πλαισίου.[40]

Για την λύση του προβλήματος αυτού εφαρμόζεται συνήθως η προσθήκη διόδων παράκαμψης (bypass diodes), οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των εν σειρά συνδεδεμένων φ/β στοιχείων του πλαισίου [2], επιτρέποντας τη λειτουργία του φ/β πλαισίου ακόμα κι αν κάποιο φ/β στοιχείο του σκιάζεται. Οι δίοδοι παράκαμψής τοποθετούνται στο κιβώτιο συνδέσεων που βρίσκεται στο πίσω μέρος του φ/β πλαισίου (Εικ.2.5) και καλύπτουν συνήθως 18 φ/β στοιχεία εν σειρά. Στο Σχ.2.11 φαίνεται ένα παράδειγμα τριών φ/β στοιχείων όπου το κάθε ένα καλύπτεται από δίοδο παράκαμψης, και το ρεύμα διέρχεται μέσα από την δίοδο παράκαμψης του φ/β στοιχείου που σκιάζεται.



Σχήμα 2.11: Ροή ρεύματος μέσω της δίοδου παράκαμψης όταν σκιάζεται φ/β στοιχείο.. Πηγή: [55]



Εικόνα. 2.5: Δίοδος παράκαμψης (bypass diodes) σε εγκατεστημένο φ/β πλαίσιο.

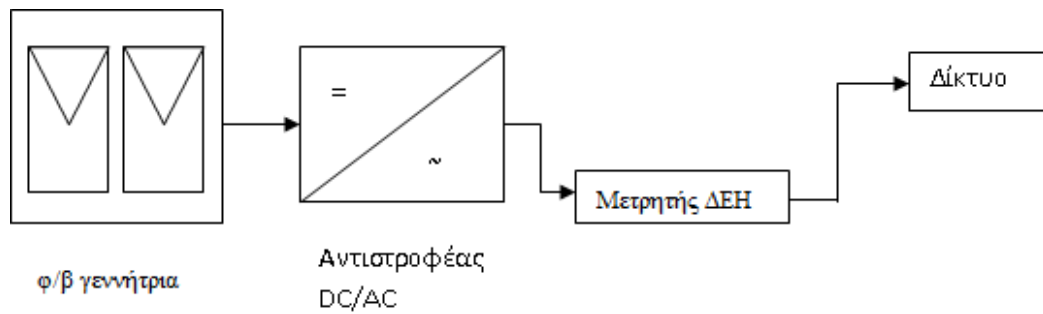
Πηγή: [Εργαστήριο ΑΠΕ, ΤΕΙ Πάτρας]

2.8 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.

Στην πράξη τα φ/β συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την τοπολογία σύνδεσης και τον στόχο της. Οι τρεις βασικές κατηγορίες είναι: τα αυτόνομα φ/β συστήματα (Stand-alone) ή εκτός δικτύου (off-grid), που καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες μεμονωμένα ενός κτιρίου ή μίας εφαρμογής, τα συνδεδεμένα στο δίκτυο (on-grid) φ/β συστήματα, τα οποία μεταφέρουν την ισχύ που παράγεται στο δίκτυο και τα υβριδικά φ/β συστήματα.

2.8.1 Συνδεδεμένα στο δίκτυο φ/β συστήματα.

Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο φ/β συστήματα μεταφέρουν την παραγόμενη ισχύ απευθείας από την φ/β συστοιχία στο δίκτυο. [1] Πλεονέκτημα των εφαρμογών αυτών είναι ότι δεν απαιτείται η ύπαρξη μπαταριών ή εφεδρικής γεννήτριας [2]. (Σχ. 2.12)



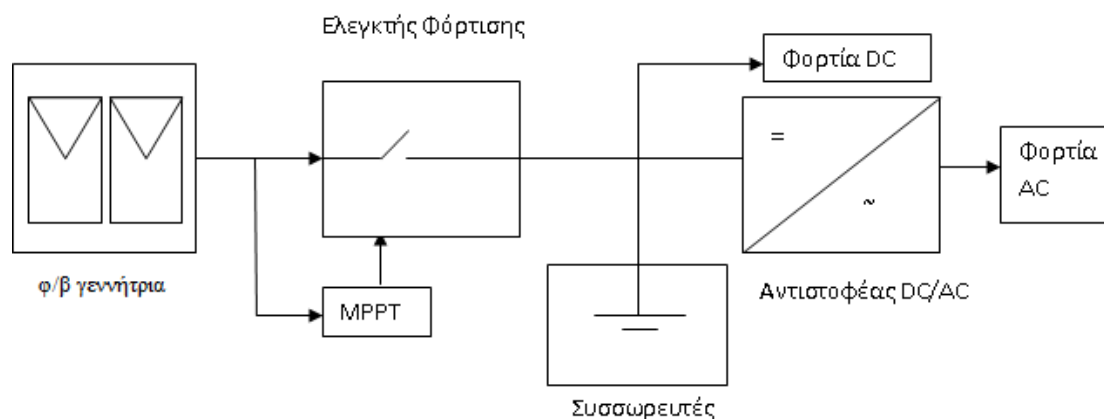
Σχήμα 2.12: Διασυνδεδεμένο με το δίκτυο φ/β σύστημα. Πηγή: [Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ 2004]

2.8.2 Αυτόνομο φ/β συστήματα.

Σε απομακρυσμένες από το δίκτυο περιοχές, η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια με την χρήση φ/β συστημάτων είναι μεγαλύτερη. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές τα φ/β συστήματα χρησιμοποιούνται για την απευθείας τροφοδοσία των ηλεκτρικών συσκευών και την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας στις μπαταρίες ενός συστήματος ώστε να ικανοποιεί τις ανάγκες του χρήστη για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας όταν το φ/β δεν παράγει ικανή ισχύ. Η παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να είναι είτε συνεχούς (DC), είτε εναλλασσόμενης (AC), τάσεως. Ωστόσο τα περισσότερα φορτία λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα (Σχ.2.13). Ένα τυπικό αυτόνομο φ/β σύστημα αποτελείται από τα εξής μέρη[1]:

- 1) την φ/β συστοιχία, δηλαδή τον αριθμό των φ/β πλαισίων που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους εν σειρά ή και εν παραλλήλω, δηλαδή μεικτά.
- 2) Το ηλεκτρικό σύστημα:
 - προστασίας της φ/β γεννήτριας από αντίστροφο ρεύμα λόγω υπερφόρτισης
 - το ηλεκτρικό σύστημα κατανομής φορτίων
 - το ηλεκτρικό σύστημα των μετρητικών συσκευών και συστημάτων ηλεκτρικής προσαρμογής για αύξηση της επίδοσης της φ/β γεννήτριας.(MPPT, Maximum Power Point Tracker). Ουσιαστικά πρόκειται για μία ηλεκτρονική διάταξη η οποία προσφέρει την βέλτιστη δυνατή ηλεκτρική προσαρμογή μεταξύ φορτίου και φ/β γεννήτριας. [1]

- 3) το σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. συσσωρευτές)
- 4) το ηλεκτρονικό σύστημα μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος που αποδίδει το φ/β σύστημα υπό σταθερή τάση (DC), σε εναλλασσόμενη τάση (AC), (αντιστροφέας DC/AC).



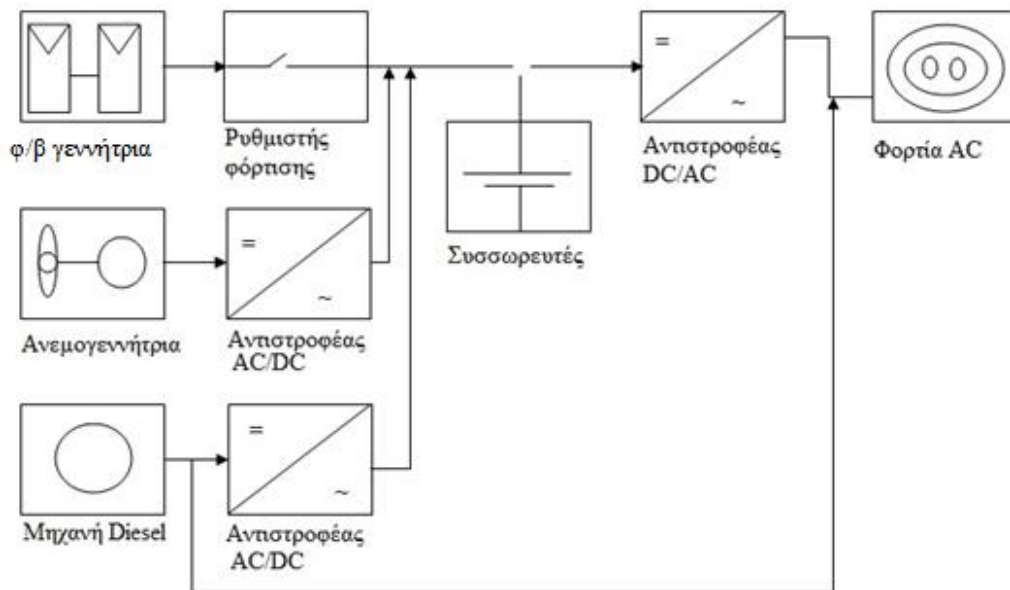
Σχήμα 2.13: Αυτόνομο ή μη συνδεδεμένο με το δίκτυο φ/β σύστημα. Πηγή:
[Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ, 2004]

2.8.3 Υβριδικό φ/β σύστημα.

Το σύστημα αυτό είναι ένα σύστημα παραγωγής ισχύος το οποίο χρησιμοποιεί δύο ή και περισσότερες πηγές ενέργειας η μία από τις οποίες είναι μια φ/β γεννήτρια [1-4]. Συνήθως, εκτός από φ/β γεννήτριες, συνδυάζονται και άλλες πηγές ενέργειας, όπως ανεμογεννήτριες, υδροηλεκτρική ισχύς, βιομάζα ή συμβατική πηγή. Γενικότερα τα υβριδικά συστήματα συνδυάζουν τις μορφές ενέργειας για να τροφοδοτούν το σύστημα συνεχώς με σταθερή τάση, ελαχιστοποιώντας τους κινδύνους αστοχίας στην τροφοδοσία των φορτίων. Χαρακτηρίζονται ως δυναμικά συστήματα,[2] καθώς είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να εναλλάσσονται ανάμεσα στις διαθέσιμες πηγές ενέργειας ή και να τις συνδυάζουν ταυτόχρονα με αποτέλεσμα να εξαρτώνται κατά το ελάχιστο από τις μεταβολές των εξωγενών παραγόντων, όπως είναι η ηλιοφάνεια, η ένταση του ανέμου, η ροή του νερού κ.α.

Ένας συνδυασμός υβριδικού τύπου είναι αυτός μιας φ/β συστοιχίας μίας ανεμογεννήτριας και ενός κινητήρα diesel, όπως φαίνεται στο Σχ.2.14.

Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα ή να και να συνδέεται στο δίκτυο.



Σχήμα 2.14: Υβριδικό σύστημα, φ/β γεννήτριας και ανεμογεννήτριας. . Πηγή: [Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ 2004]

3.ΑΝΑΛΥΣΗ - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Όπως αναφέρεται και στο 1ο κεφάλαιο η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μετράται με την χρήση των πυρανομέτρων (βλ.κεφ.1.2). Υπάρχουν αρκετοί μετεωρολογικοί σταθμοί των οποίων οι βάσεις δεδομένων είναι προσβάσιμες μέσω διαδικτύου και περιέχουν δεδομένα όπως[56]:

- ταχύτητα-διεύθυνση ανέμου
- θερμοκρασία περιβάλλοντος
- βροχόπτωση
- υγρασία
- βαρομετρική πίεση
- σημείο δρόσου

Το εργαστήριο των ΑΠΕ που βρίσκεται στο Τ.Ε.Ι Πατρών διαθέτει επίσης όργανα για την μέτρηση και καταγραφή των δεδομένων όπως:

- η ολική ηλιακή ακτινοβολία,
- η διάχυτη ακτινοβολία,
- η θερμοκρασία περιβάλλοντος,
- η σχετική υγρασία,
- η ταχύτητα-διεύθυνση ανέμου,
- και η βροχόπτωση

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων της NASA[33] καθώς περιλαμβάνει τις τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας $H(\text{kWh/m}^2)$, για διάφορους τόπους και χρονική διάρκεια πολλών ετών. Από την βάση δεδομένων της

NASA επιλέχθηκαν διάφορες πόλεις της Ελλάδας με διαφορετικές γεωγραφικές συντεταγμένες (Πίν.3.2) για την μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτές κατά τη διάρκεια 15 ετών από το 1990 έως το 2004.

Στον Πίν.3.1 παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά μεγέθη που περιέχονται στη βάση δεδομένων της NASA[33].

Πίνακας 3.1. Ενδεικτικά στοιχεία που περιέχονται στη βάση δεδομένων της NASA[33].

<i>Surface meteorology and Solar Energy NASA</i>
Γεωγραφικό πλάτος (°)
Γεωγραφικό μήκος (°)
Υψόμετρο (m)
Θερμοκρασία σχεδίασης (°C)
Θερμοκρασία αέρα (°C)
Σχετική υγρασία (%)
Ημερήσια ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (kWh/m ² /d)
Ατμοσφαιρική πίεση (kPa)
Ταχύτητα ανέμου (m/s)
Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)

Πίνακας. 3.2. Γεωγραφικό πλάτος και μήκος πόλεων της Ελλάδας.

Πόλη	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος
Αθήνα	37°58'N	23°46'E
Θεσσαλονίκη	40°38'N	22°58'E
Πάτρα	38°14'N	21°47'E
Λάρισα	39°36'N	22°27'E
Καλαμάτα	37°03'N	22°10'E
Ηράκλειο	35°10'N	25°10'E
Λαμία	38°55'N	22°26'E
Ιωάννινα	39°42'N	20°47'E
Νάξος	37°08'N	25°25'E
Χίος	38°27'N	26°09'E
Τρίπολη	37°31'N	22°25'E

Από την βάση δεδομένων της NASA[33], εξήχθη το αρχείο δεδομένων για την κάθε πόλη (Πιν.3.2), το οποίο περιλαμβάνει το έτος, μήνα, ημέρα και ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε kWh/m² στο οριζόντιο επίπεδο.

3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για την επεξεργασία των δεδομένων της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας από τα αρχεία δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις `readnasadata(array)` και `rephmonth(yearstruct)` της Ε. Καπλάνη[28].

Όπου η συνάρτηση `readnasadata(array)`, παίρνει ως είσοδο τον πίνακα των δεδομένων έτσι όπως απ' ευθείας διαβάζονται από το αρχείο και επιστρέφει ως έξοδο ιεραρχική δομή (struct array), με δεδομένα ανά έτος και ανά μήνα των \bar{H} , σ_H και πίνακα των H .

Η συνάρτηση `rephmonth(yearstruct)`, δέχεται ως είσοδο την ιεραρχική δομή `yearstruct` που επιστρέφει η προηγούμενη συνάρτηση και επιστρέφει ιεραρχική δομή τύπου struct array, με όνομα `hmonth` που περιλαμβάνει τα εξής δεδομένα επεξεργασμένα ανά μήνα για την αντιπροσωπευτική ημέρα (ή την

αντιπροσωπευτική ημέρα και ± 1 ημέρα γύρω από αυτή), του μήνα και όλα τα έτη:

- mean, μέση τιμή του H της αντιπροσωπευτικής ημέρας (ή της αντιπροσωπευτικής και ± 1 ημέρας γύρω από αυτή) και για τα χρόνια 1990 έως 2004.
- std, την τυπική απόκλιση του H της αντιπροσωπευτικής ημέρας (ή της αντιπροσωπευτικής και ± 1 ημέρας γύρω από αυτή) και για τα χρόνια 1990 έως 2004.
- median, Διάμεσος του H της αντιπροσωπευτικής ημέρας (ή της αντιπροσωπευτικής και ± 1 ημέρας γύρω από αυτή) και για τα χρόνια 1990 έως 2004.
- iqr, Ενδοτεταρτημοριακό εύρος του H της αντιπροσωπευτικής ημέρας (ή της αντιπροσωπευτικής και ± 1 ημέρας γύρω από αυτή) και για τα χρόνια 1990 έως 2004.
- wblLogL, αρνητική λογαριθμική πιθανοφάνεια (negative log-likelihood) για την προσαρμοσμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull.
- nrmLogL, αρνητική λογαριθμική πιθανοφάνεια (negative log-likelihood) για την προσαρμοσμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Normal.
- extLogL, αρνητική λογαριθμική πιθανοφάνεια (negative log-likelihood) για την προσαρμοσμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Extreme Value.

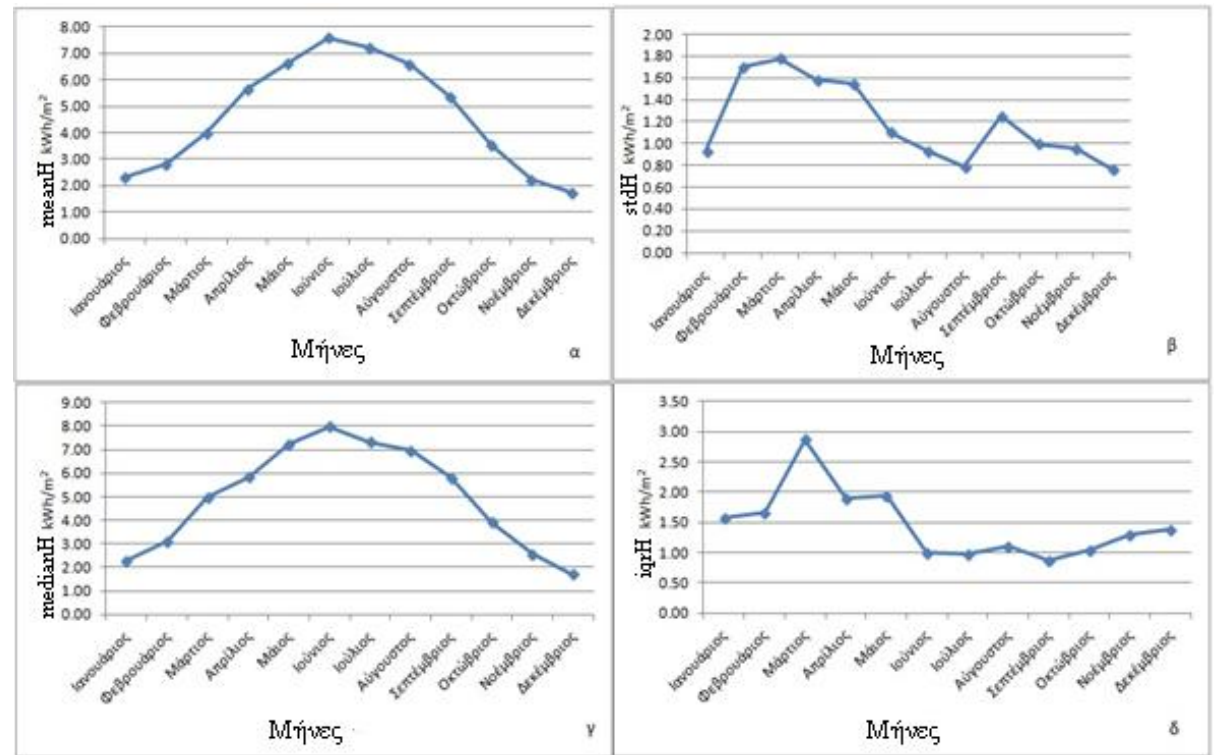
3.2.1 Στατιστική ανάλυση ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για διάφορες πόλεις της Ελλάδας.

Τα στατιστικά στοιχεία που εξήχθησαν με τη χρήση των παραπάνω συναρτήσεων για την κάθε πόλη και τον κάθε μήνα, παρουσιάζονται σε μορφή πινάκων και γραφημάτων στη συνέχεια.

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους Πίν.3.3 έως Πίν.3.13 αποτελούν στατιστικά στοιχεία όπως μέση τιμή (mean), τυπική απόκλιση (standard deviation), διάμεσος (median), ενδοτεταρτημοριακό εύρος (interquartile range), της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο H (kWh/m^2) για την αντιπροσωπευτική ημέρα και ± 1 ημέρα από την αντιπροσωπευτική για την κάθε πόλη.

Πίνακας.3.3 Στατιστικά στοιχεία της τιμής του H (kWh/m²) για την Αθήνα.

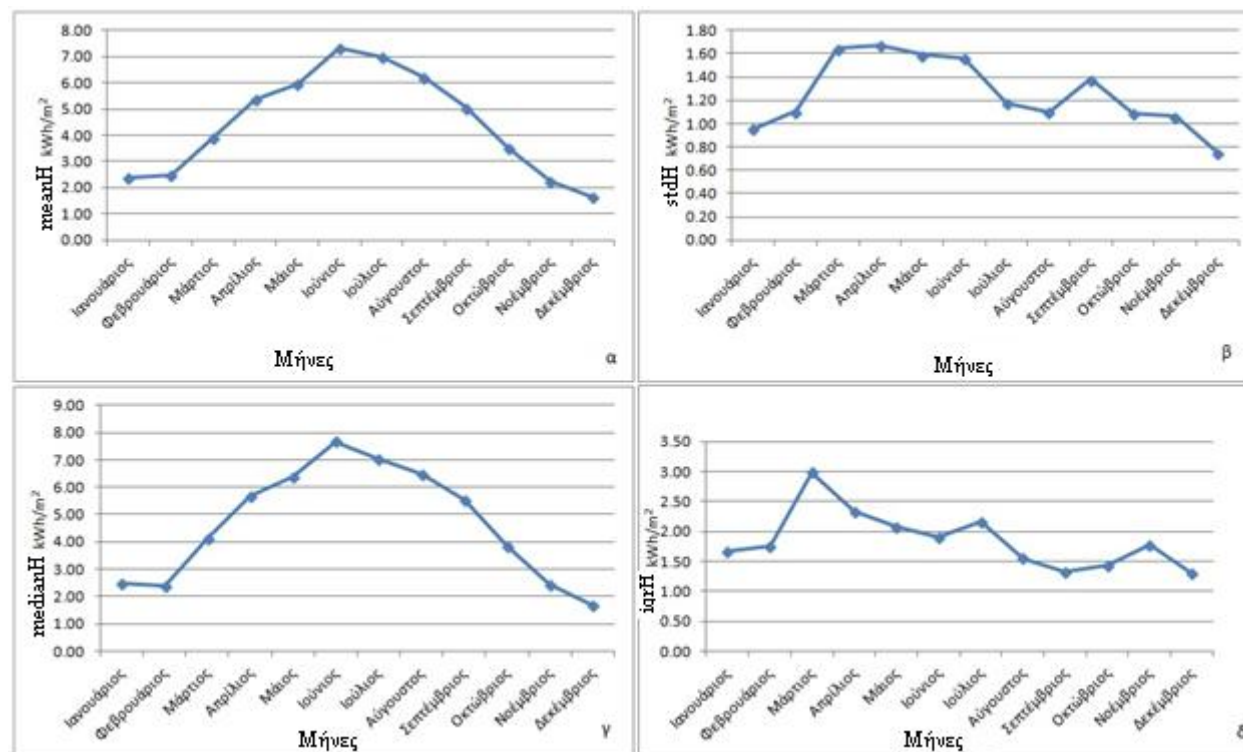
πόλη: Αθήνα				
Μήνας	mean	std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.31	0.93	2.30	1.58
Φεβρουάριος	2.80	1.71	3.13	1.67
Μάρτιος	3.99	1.78	4.97	2.87
Απρίλιος	5.65	1.59	5.84	1.89
Μάιος	6.63	1.55	7.23	1.95
Ιούνιος	7.60	1.10	7.98	1.00
Ιούλιος	7.22	0.93	7.32	0.97
Αύγουστος	6.61	0.78	6.96	1.10
Σεπτέμβριος	5.35	1.25	5.81	0.88
Οκτώβριος	3.57	1.00	3.91	1.04
Νοέμβριος	2.24	0.95	2.56	1.29
Δεκέμβριος	1.74	0.77	1.71	1.38



Σχήμα.3.1. Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του H/μήνα για την Αθήνα. (3.1.α meanH, 3.1.β.stdH 3.1.γ medianH, 3.1.δ IqrH)

Πίνακας.3.4 Στατιστικά στοιχεία της τιμής του H (kWh/m²) για την **Καλαμάτα**

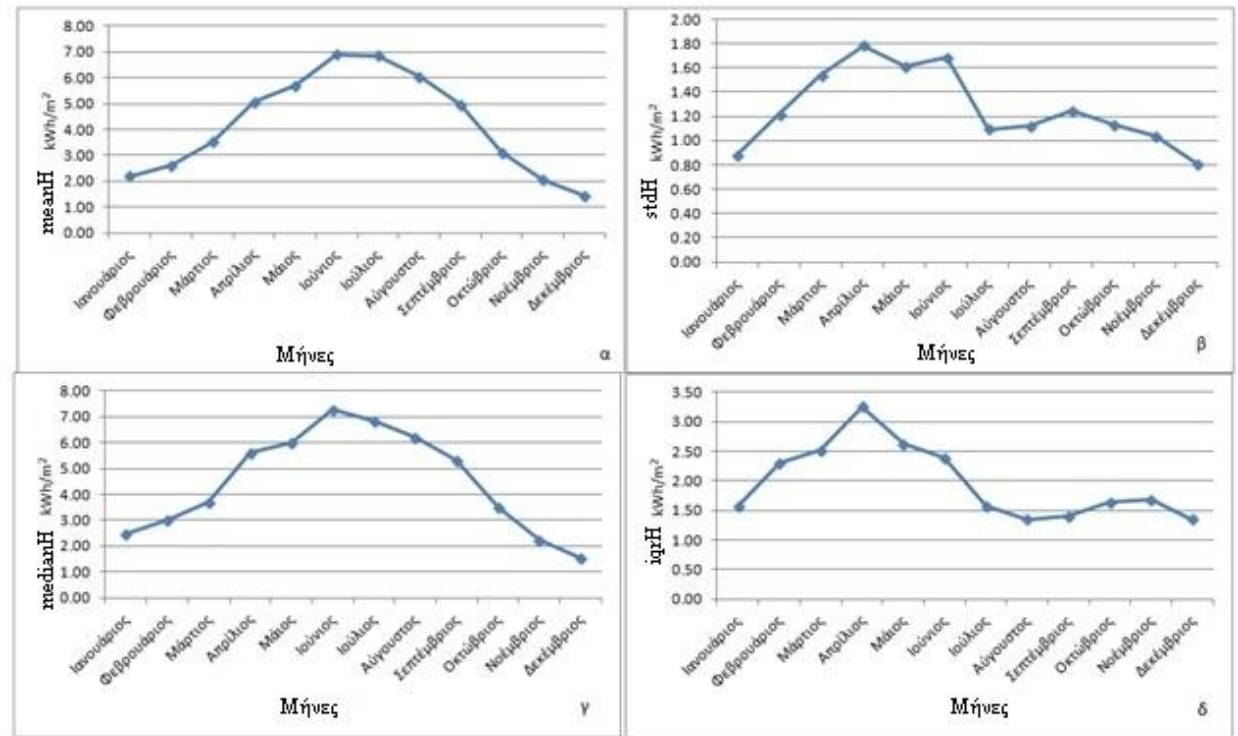
πόλη: Καλαμάτα				
Μήνας	mean	std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.36	0.95	2.47	1.68
Φεβρουάριος	2.48	1.11	2.37	1.76
Μάρτιος	3.88	1.65	4.13	2.99
Απρίλιος	5.39	1.67	5.68	2.33
Μάιος	5.97	1.59	6.38	2.08
Ιούνιος	7.31	1.56	7.67	1.90
Ιούλιος	6.99	1.18	7.02	2.16
Αύγουστος	6.20	1.10	6.46	1.55
Σεπτέμβριος	5.05	1.38	5.53	1.33
Οκτώβριος	3.49	1.09	3.85	1.44
Νοέμβριος	2.23	1.06	2.45	1.78
Δεκέμβριος	1.66	0.75	1.69	1.31



Σχήμα.3.2 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του H/μήνα για την Καλαμάτα .(3.2α meanH, 3.2.β.stdH 3.2.γ medianH, 3.2.δ IqrH)

Πίνακας.3.5 Στατιστικά στοιχεία της τιμής του Η (kWh/m²) για την **Λαμία**

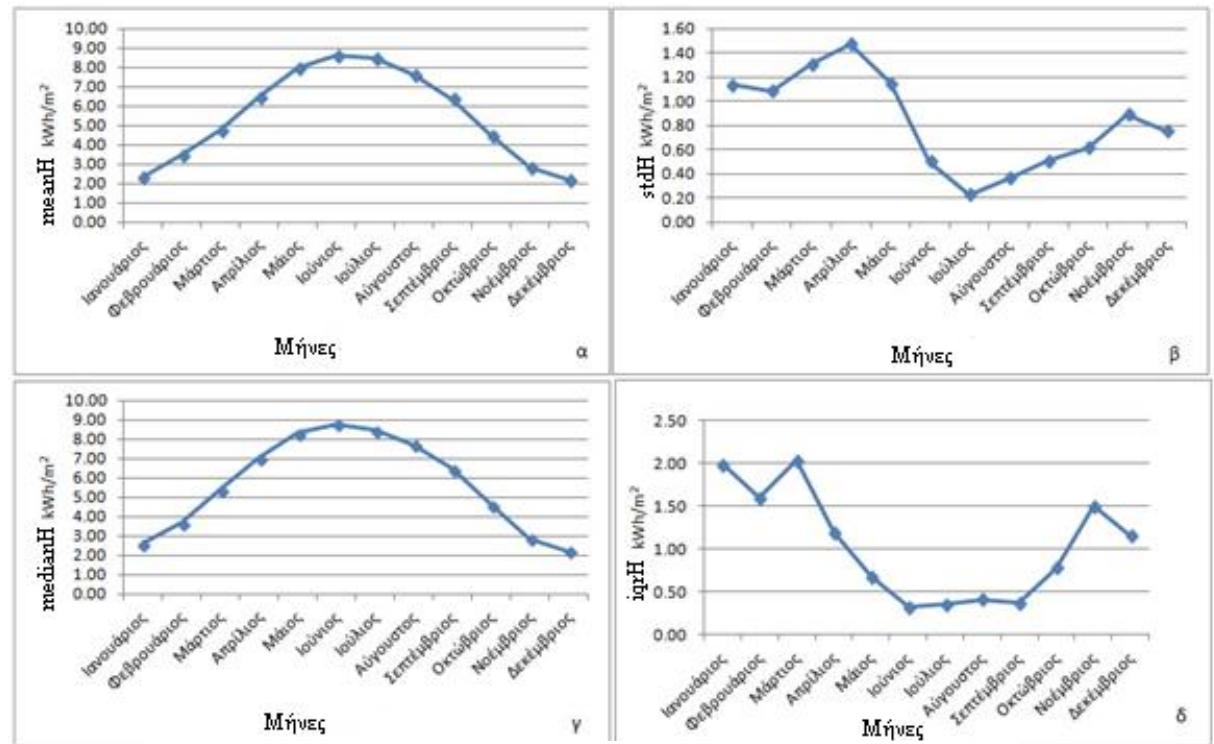
πόλη: Λαμία				
Μήνας	mean	std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.20	0.89	2.47	1.57
Φεβρουάριος	2.63	1.22	3.02	2.30
Μάρτιος	3.53	1.54	3.72	2.51
Απρίλιος	5.08	1.78	5.61	3.25
Μάιος	5.70	1.61	6.02	2.63
Ιούνιος	6.90	1.68	7.26	2.39
Ιούλιος	6.86	1.10	6.83	1.58
Αύγουστος	6.07	1.13	6.21	1.35
Σεπτέμβριος	4.96	1.25	5.31	1.40
Οκτώβριος	3.10	1.13	3.51	1.64
Νοέμβριος	2.06	1.04	2.26	1.68
Δεκέμβριος	1.43	0.81	1.56	1.35



Σχήμα.3.3 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του Η/μήνα για την Λαμία .(3.3α meanH, 3.3.β.stdH 3.3.γ medianH, 3.3.δ IqrH)

Πίνακας.3.6 Στατιστικά στοιχεία της τιμής του Η (kWh/m²) για το **Ηράκλειο**.

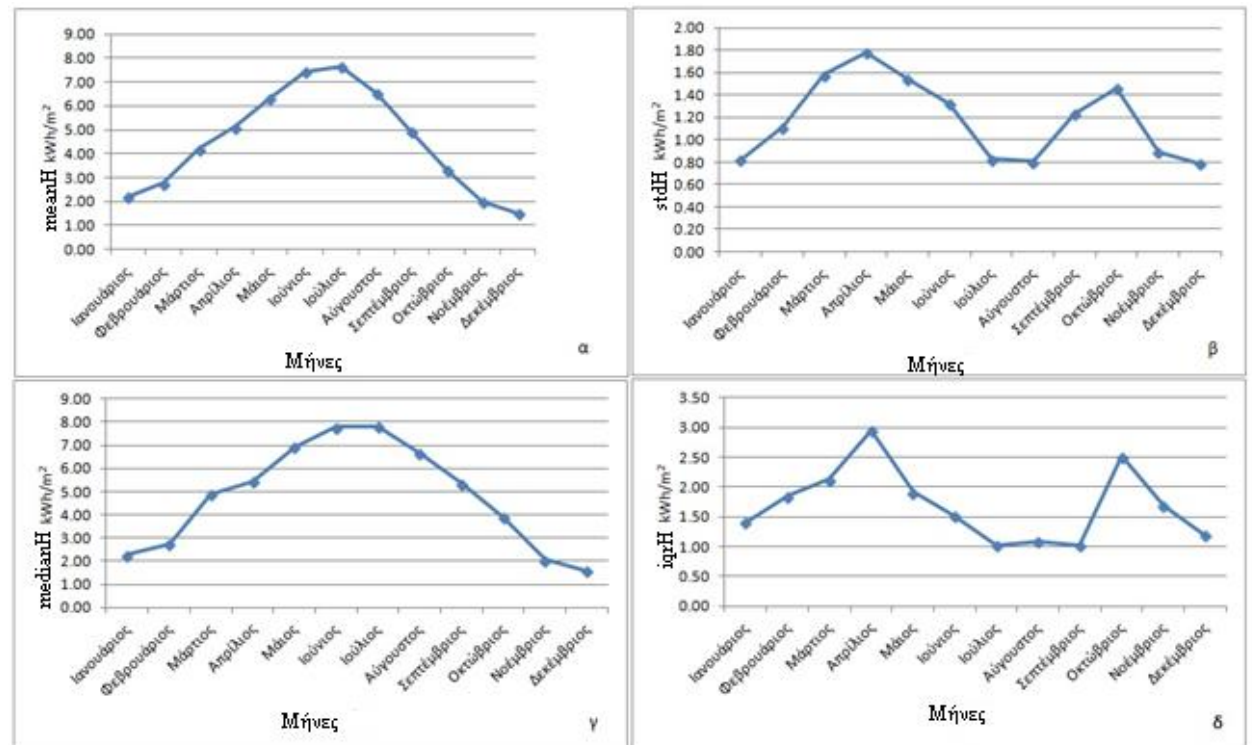
πόλη: Ηράκλειο				
Μήνας	mean	std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.36	1.14	2.64	1.99
Φεβρουάριος	3.48	1.08	3.69	1.60
Μάρτιος	4.75	1.31	5.42	2.04
Απρίλιος	6.47	1.47	7.03	1.20
Μάιος	7.98	1.15	8.32	0.68
Ιούνιος	8.62	0.50	8.79	0.33
Ιούλιος	8.46	0.23	8.47	0.36
Αύγουστος	7.64	0.36	7.73	0.42
Σεπτέμβριος	6.37	0.51	6.50	0.38
Οκτώβριος	4.46	0.62	4.62	0.79
Νοέμβριος	2.85	0.89	2.86	1.51
Δεκέμβριος	2.17	0.75	2.22	1.16



Σχήμα.3.4 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του Η/μήνα για την πόλη του Ηρακλείου .(3.4.α meanH, 3.4.β.stdH, 3.4.γ medianH, 3.4.δ IqrH)

Πίνακας.3.7. Στατιστικά στοιχεία της τιμής του H (kWh/m²) για τα **Ιωάννινα**.

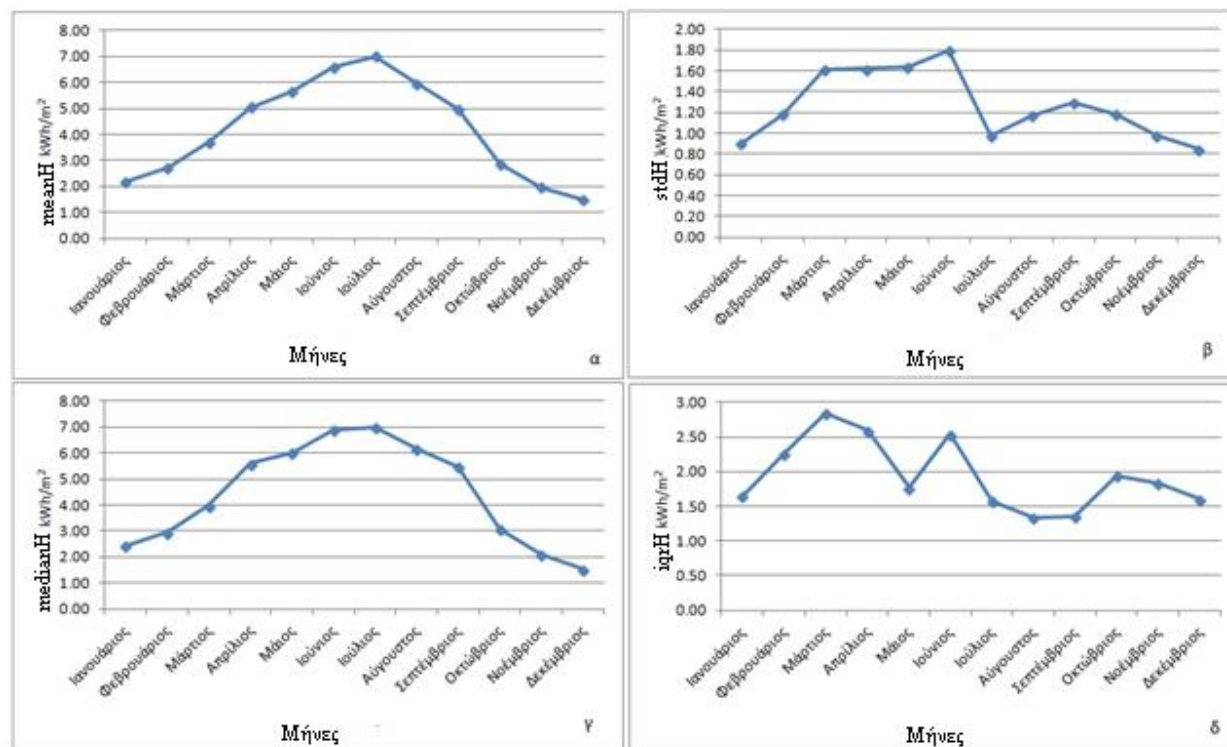
πόλη: Ιωάννινα				
Μήνας	mean	std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.22	0.82	2.28	1.41
Φεβρουάριος	2.77	1.11	2.75	1.85
Μάρτιος	4.20	1.58	4.89	2.13
Απρίλιος	5.11	1.78	5.44	2.95
Μάιος	6.33	1.54	6.94	1.91
Ιούνιος	7.45	1.33	7.78	1.52
Ιούλιος	7.64	0.83	7.80	1.02
Αύγουστος	6.53	0.81	6.67	1.09
Σεπτέμβριος	4.93	1.23	5.36	1.03
Οκτώβριος	3.31	1.46	3.90	2.52
Νοέμβριος	1.99	0.89	2.06	1.69
Δεκέμβριος	1.51	0.79	1.58	1.20



Σχήμα.3.5 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του H/μήνα για την πόλη των Ιωαννίνων .(3.5.α meanH, 3.5.β.stdH 3.5.γ medianH, 3.5.δ IqrH)

Πίνακας.3.8 Στατιστικά στοιχεία της τιμής του H (kWh/m²) για την **Λάρισα**

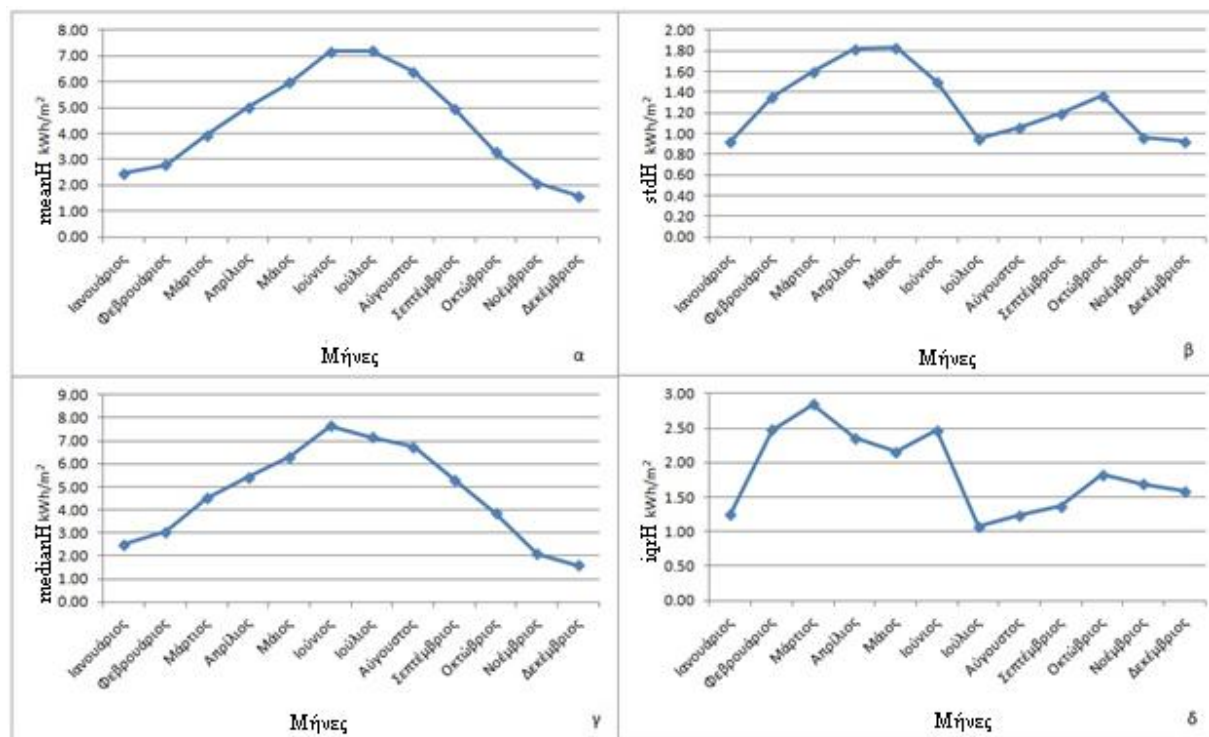
πόλη: Λάρισα				
Μήνας	mean	Std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.17	0.90	2.43	1.65
Φεβρουάριος	2.74	1.19	2.95	2.27
Μάρτιος	3.69	1.61	3.98	2.84
Απρίλιος	5.04	1.62	5.60	2.60
Μάιος	5.65	1.63	6.02	1.77
Ιούνιος	6.59	1.79	6.90	2.54
Ιούλιος	7.00	0.98	6.98	1.58
Αύγουστος	5.93	1.17	6.15	1.34
Σεπτέμβριος	4.96	1.30	5.49	1.36
Οκτώβριος	2.86	1.19	3.07	1.95
Νοέμβριος	1.96	0.97	2.10	1.83
Δεκέμβριος	1.51	0.85	1.54	1.61



Σχήμα.3.6 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του H/μήνα για την πόλη Λάρισα .(3.6.α meanH, 3.6.β.stdH 3.6.γ medianH, 3.6.δ iqrH)

Πίνακας.3.9 Στατιστικά στοιχεία της τιμής του Η (kWh/m²) για την Πάτρα

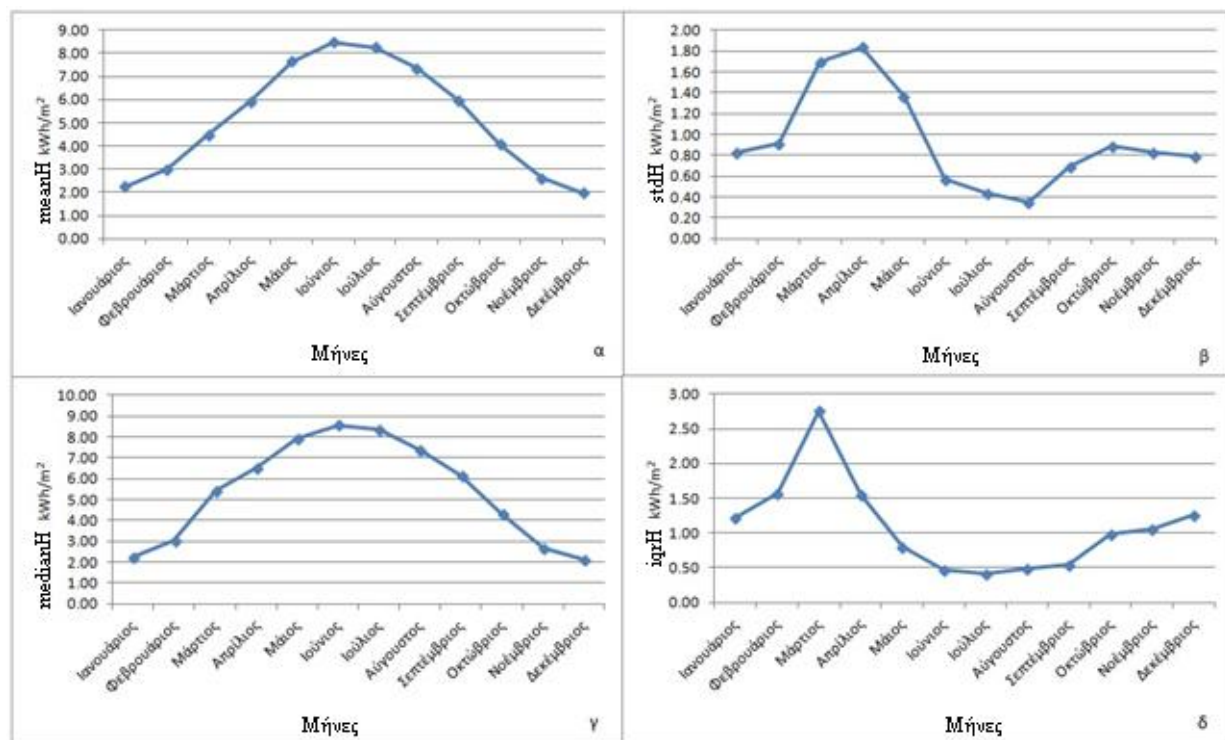
πόλη: Πάτρα				
Μήνας	mean	std	median	iqr
Ιανουάριος	2.49	0.93	2.50	1.27
Φεβρουάριος	2.79	1.36	3.05	2.48
Μάρτιος	3.95	1.60	4.52	2.85
Απρίλιος	5.04	1.83	5.42	2.37
Μάιος	5.98	1.83	6.31	2.16
Ιούνιος	7.18	1.50	7.65	2.48
Ιούλιος	7.20	0.95	7.17	1.08
Αύγουστος	6.39	1.06	6.74	1.24
Σεπτέμβριος	4.99	1.20	5.32	1.37
Οκτώβριος	3.28	1.37	3.85	1.83
Νοέμβριος	2.10	0.96	2.10	1.69
Δεκέμβριος	1.58	0.93	1.59	1.59



Σχήμα.3.7 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του Η/μήνα για την Πάτρα .(3.7.α meanH, 3.7.β.stdH 3.7.γ medianH, 3.7.δ iqrH)

Πίνακας.3.10 Στατιστικά στοιχεία της τιμής του H (kWh/m²) για τη Χίο

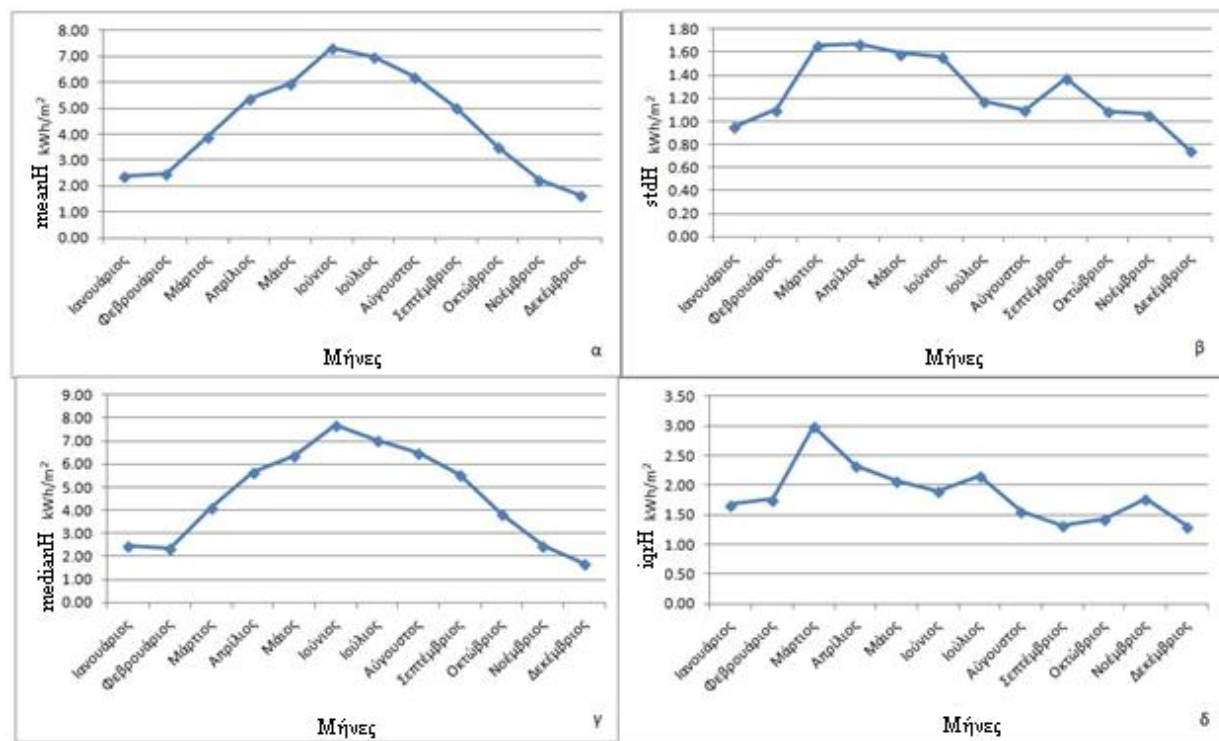
πόλη: Χίος				
Μήνας	mean	std	median	iqr
Ιανουάριος	2.27	0.83	2.22	1.23
Φεβρουάριος	3.01	0.91	3.05	1.57
Μάρτιος	4.47	1.70	5.42	2.76
Απρίλιος	5.91	1.84	6.55	1.56
Μάιος	7.65	1.36	7.91	0.80
Ιούνιος	8.47	0.57	8.58	0.48
Ιούλιος	8.27	0.44	8.35	0.42
Αύγουστος	7.36	0.35	7.40	0.49
Σεπτέμβριος	5.99	0.69	6.19	0.55
Οκτώβριος	4.07	0.89	4.32	0.99
Νοέμβριος	2.61	0.83	2.65	1.06
Δεκέμβριος	1.98	0.79	2.13	1.27



Σχήμα.3.8 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του H/μήνα για την Χίο .(3.8.α meanH, 3.8.β.stdH 3.8.γ medianH, 3.8.δ iqrH)

Πίνακας.3.11 Στατιστικά στοιχεία της τιμής του Η (kWh/m²) για την **Τρίπολη**

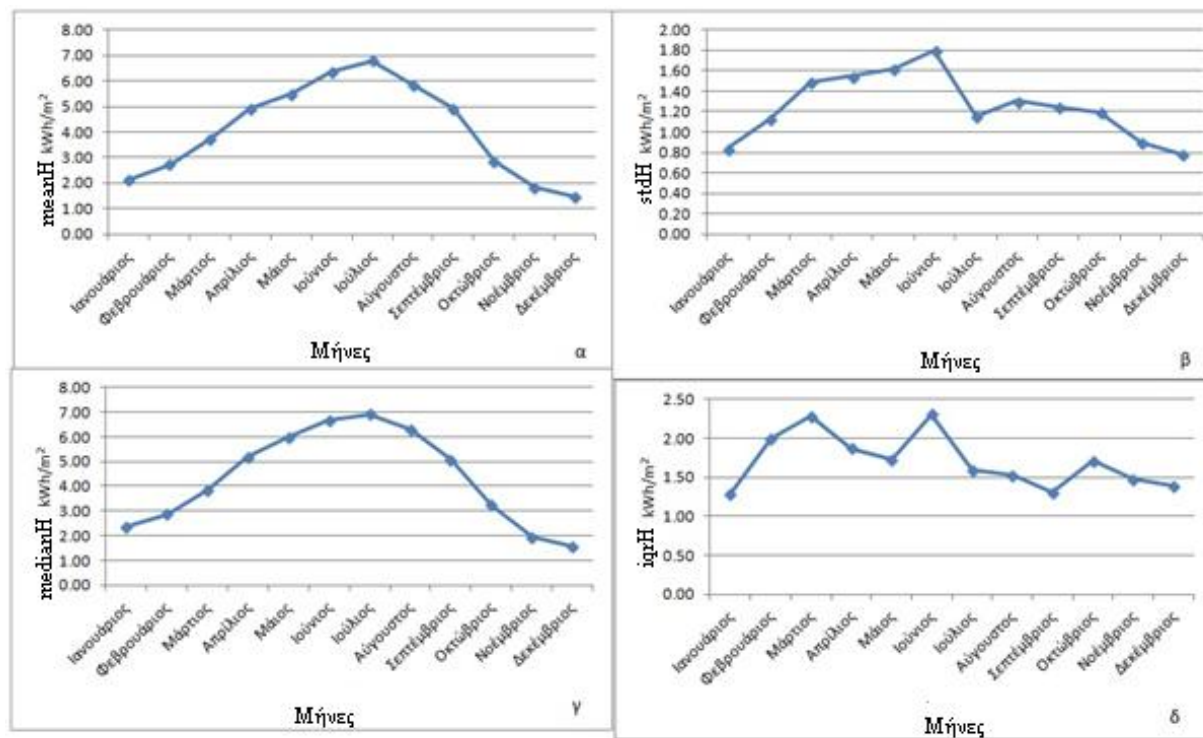
πόλη: Τρίπολη				
Μήνας	mean	std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.36	0.95	2.47	1.68
Φεβρουάριος	2.48	1.11	2.37	1.76
Μάρτιος	3.88	1.66	4.13	2.99
Απρίλιος	5.39	1.67	5.68	2.33
Μάιος	5.97	1.59	6.38	2.08
Ιούνιος	7.31	1.56	7.67	1.90
Ιούλιος	6.99	1.18	7.02	2.16
Αύγουστος	6.20	1.10	6.46	1.55
Σεπτέμβριος	5.05	1.38	5.53	1.33
Οκτώβριος	3.49	1.09	3.85	1.44
Νοέμβριος	2.23	1.06	2.45	1.78
Δεκέμβριος	1.66	0.75	1.69	1.31



Σχήμα.3.9 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του Η/μήνα για την Τρίπολη .(3.9.α meanH, 3.9.β.stdH 3.9.γ medianH, 3.9.δ iqrH)

Πίνακας.3.12 Στατιστικά στοιχεία της τιμής του H (kWh/m²) για τη **Θεσσαλονίκη**

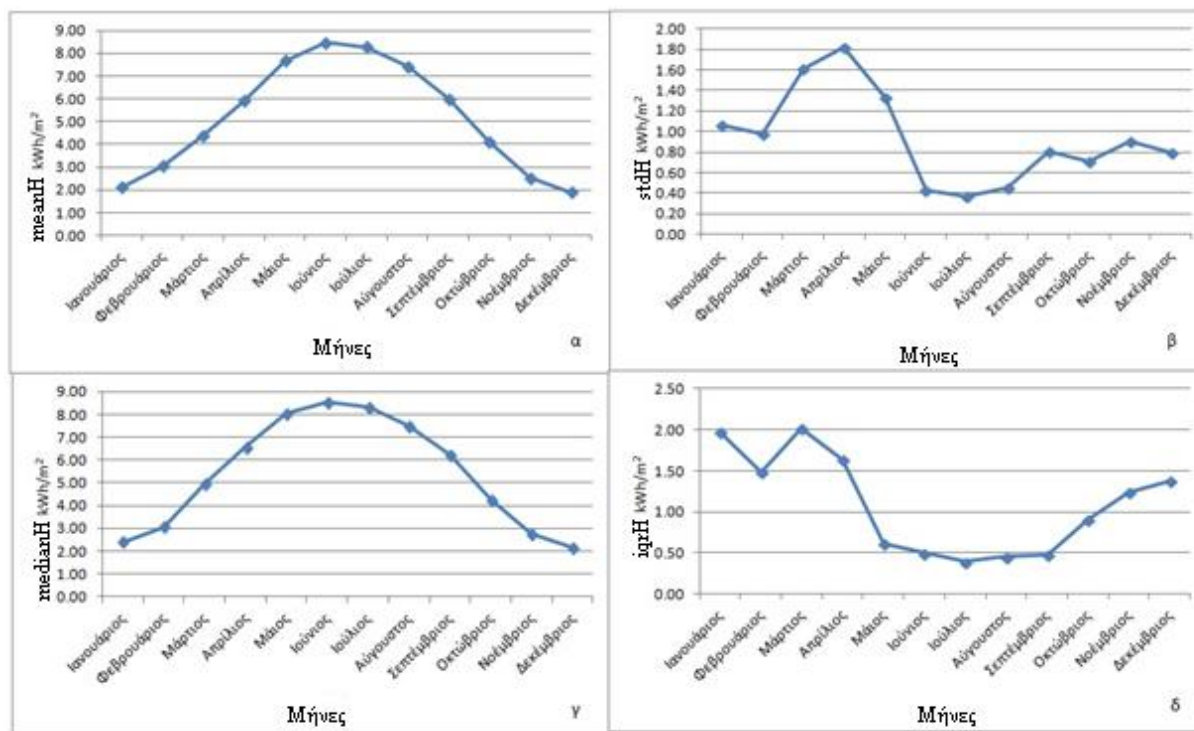
πόλη: Θεσσαλονίκη				
Μήνας	mean	std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.12	0.84	2.35	1.29
Φεβρουάριος	2.74	1.13	2.87	2.00
Μάρτιος	3.75	1.49	3.84	2.28
Απρίλιος	4.91	1.55	5.19	1.87
Μάιος	5.50	1.62	5.99	1.72
Ιούνιος	6.39	1.80	6.66	2.31
Ιούλιος	6.80	1.16	6.91	1.60
Αύγουστος	5.84	1.30	6.32	1.53
Σεπτέμβριος	4.90	1.25	5.10	1.31
Οκτώβριος	2.88	1.20	3.25	1.71
Νοέμβριος	1.82	0.90	1.94	1.47
Δεκέμβριος	1.46	0.79	1.58	1.39



Σχήμα.3.10 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του H/μήνα για την Θεσσαλονίκη .(3.10α meanH, 3.10.β.stdH 3.10.γ medianH, 3.10.δ IqrH)

Πίνακας.3.13 Στατιστικά στοιχεία της τιμής του H (kWh/m²) για τη Νάξο

πόλη: Νάξος				
Μήνας	mean	std	median	iqr
Ιανουάριος	2.12	1.07	2.41	1.97
Φεβρουάριος	3.06	0.97	3.07	1.49
Μάρτιος	4.40	1.61	4.96	2.01
Απρίλιος	5.91	1.82	6.57	1.64
Μάιος	7.68	1.34	8.03	0.62
Ιούνιος	8.47	0.43	8.54	0.50
Ιούλιος	8.29	0.37	8.33	0.39
Αύγουστος	7.42	0.46	7.50	0.45
Σεπτέμβριος	6.02	0.81	6.23	0.48
Οκτώβριος	4.12	0.71	4.26	0.90
Νοέμβριος	2.55	0.90	2.79	1.24
Δεκέμβριος	1.90	0.79	2.16	1.38



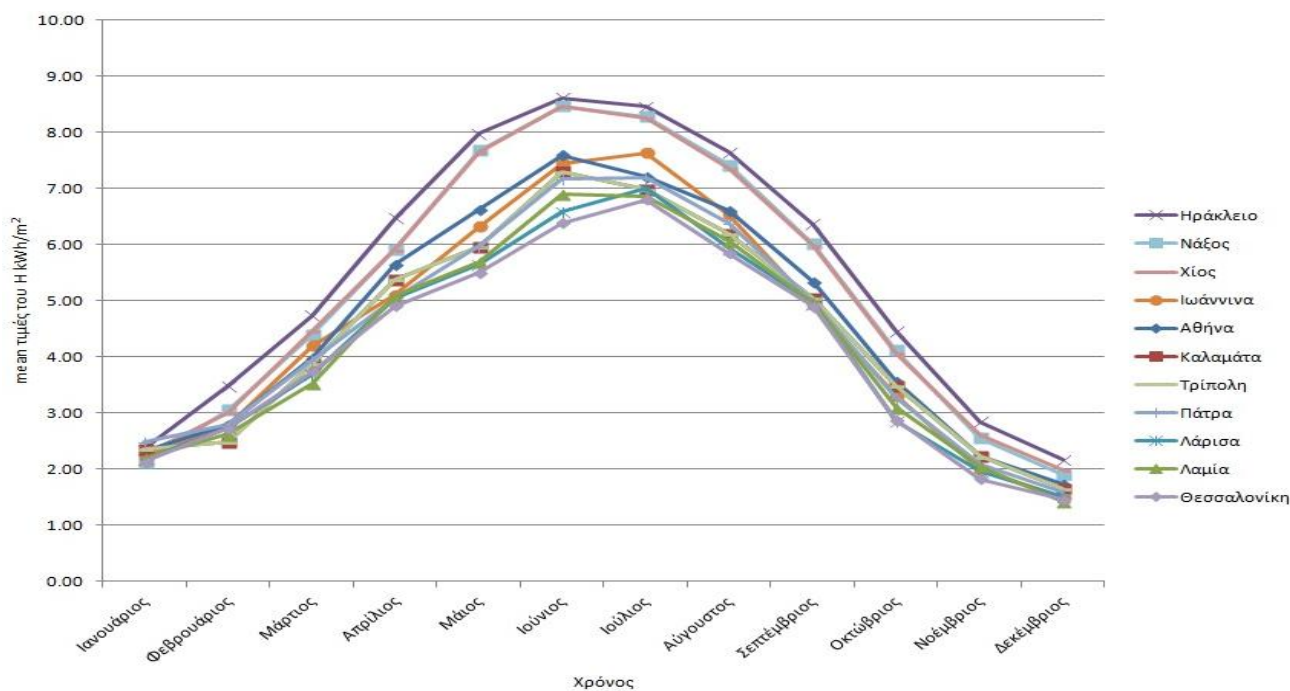
Σχήμα.3.11 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων του H/μήνα για την πόλη Νάξο .(3.11.α meanH, 3.11.β.stdH 3.11.γ medianH, 3.11.δ iqrH)

Συμπερασματικά από την στατιστική ανάλυση η οποία έγινε στις τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο $H(kWh/m^2)$, παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα που απεικονίζουν το $meanH(\alpha)$ και $medianH(\gamma)$ έχουν σχεδόν την ίδια μεταβολή για όλες τις επιλεγείσες πόλεις της Ελλάδας δίνοντας σαν μέγιστα σημεία τιμές κατά τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο.

Ενώ από τα διαγράμματα $stdH(\beta)$ και $iqH(\gamma)$ παρατηρούμε ότι τα μέγιστα σημεία είναι κατά την περίοδο της Άνοιξης και τα ελάχιστα σημεία παρατηρούνται κατά την περίοδο του Καλοκαιριού.

Επίσης στο διάγραμμα της διακύμανσης $stdH(\beta)$, για την πόλη της Καλαμάτας (Σχ.3.2.β) οι τιμές του Μαρτίου, Μαΐου και Ιουνίου είναι σχεδόν στο ίδιο ύψος με την μέγιστη τιμή όπου παρατηρείται τον μήνα Απρίλιο.

Στο Σχ.3.12 παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις μέσες τιμές ($mean$) της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο $H(kWh/m^2)$, για όλες τις πόλεις της Ελλάδας όπως προσαρμόζονται από την ανάλυση των δεδομένων που έγινε στα πλαίσια της Πτυχιακής αυτής.



Σχήμα.3.12. Συγκεντρωτικό διάγραμμα με τις μέσες τιμές ($mean$) της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο $H(kWh/m^2)$ ανά μήνα.

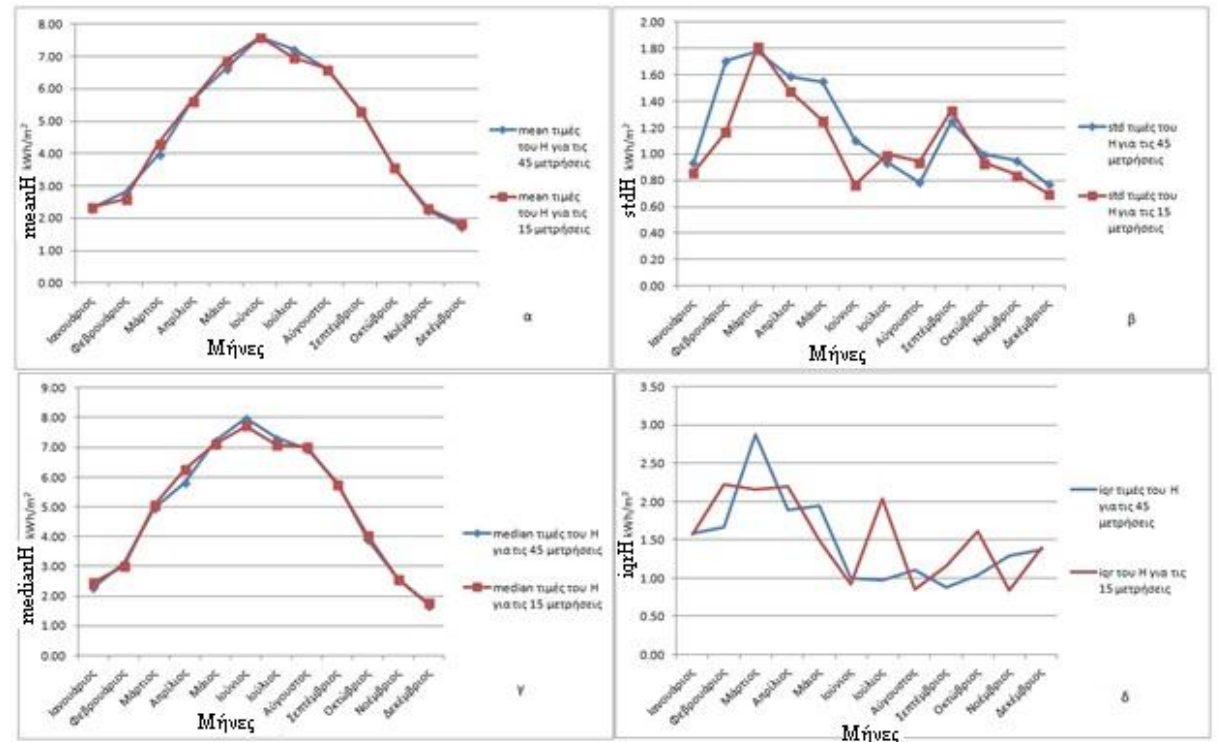
Όπως φαίνεται και από το Σχ.3.12, η πόλη με τις υψηλότερες μέσες τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας είναι το Ηράκλειο και ακολουθεί η Νάξος όπως ήταν αναμενόμενο λόγω των γεωγραφικών συντεταγμένων τους ενώ η πόλη με τις χαμηλότερες τιμές είναι η Θεσσαλονίκη.

Στους παρακάτω Πιν.3.14 έως Πιν.3.17 συγκρίνονται τα στατιστικά στοιχεία (mean,median,std,iqr), της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο $H(kWh/m^2)$, για την αντιπροσωπευτική ημέρα κάθε μήνα (δείγμα 15 μετρήσεων), σε σχέση με τις μετρήσεις του H , για την αντιπροσωπευτική και ± 1 ημέρες από την αντιπροσωπευτική ημέρα κάθε μήνα (δείγμα 45 μετρήσεων), για τις πόλεις (Αθήνα, Ηράκλειο, Νάξος, Θεσσαλονίκη) κατά την διάρκεια των ετών 1990 έως 2004, καθώς και οι γραφικές παραστάσεις των συγκρινόμενων στατιστικών στοιχείων.

Όπως παρατηρείται στα διαγράμματα Σχ3.13 έως Σχ.3.16 για τις τιμές των μετρήσεων από την αντιπροσωπευτική ημέρα κάθε μήνα (δείγμα 15 μετρήσεων), σε σχέση με τις τιμές του H , για την αντιπροσωπευτική και ± 1 ημέρες από την αντιπροσωπευτική ημέρα κάθε μήνα (δείγμα 45 μετρήσεων), υπάρχει συμφωνία στα αποτελέσματα των 2 δειγμάτων (45-15 μετρήσεις).

Πίνακας.3.14. Στατιστικά στοιχεία του H(kWh/m²) για το δείγμα των 15 και 45 μετρήσεων.

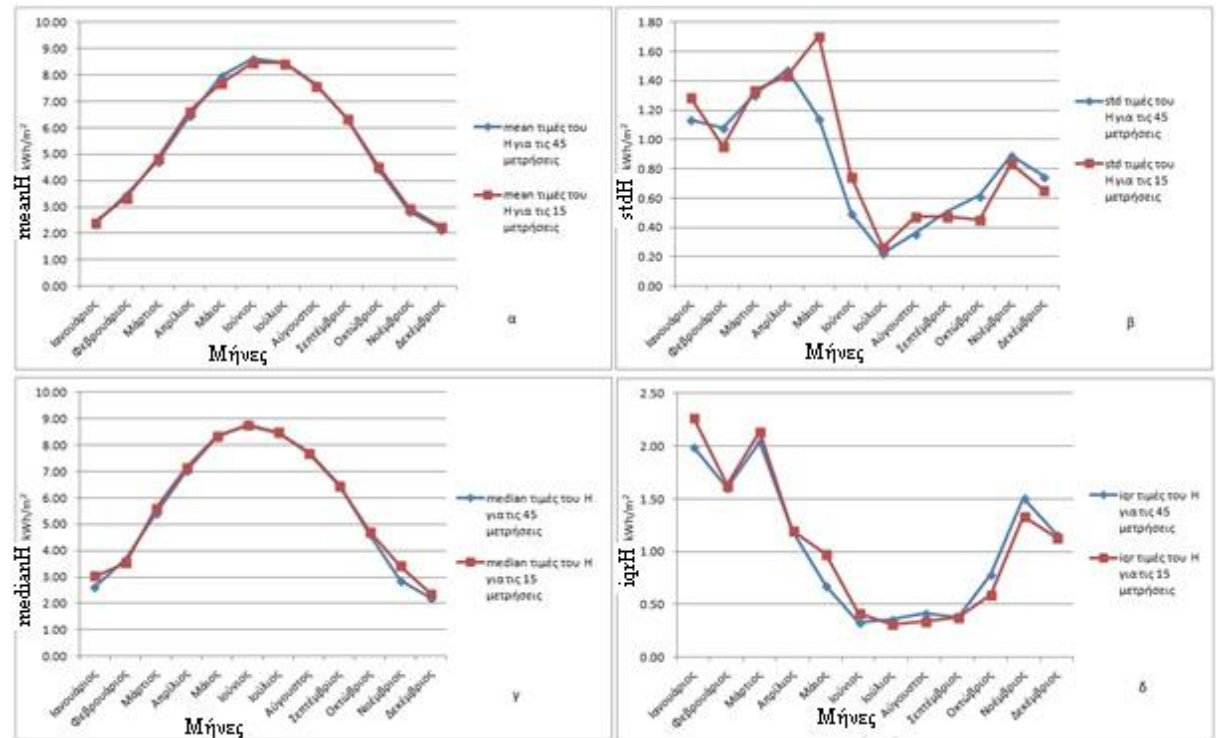
πόλη: Αθήνα. Στατιστικές μετρήσεις του H. (δείγμα 15μετ)				
Μήνας	mean	std	median	iqr
Ιανουάριος	2.35	0.86	2.46	1.57
Φεβρουάριος	2.61	1.17	3.02	2.23
Μάρτιος	4.32	1.82	5.06	2.17
Απρίλιος	5.63	1.48	6.28	2.20
Μάιος	6.87	1.26	7.13	1.49
Ιούνιος	7.60	0.77	7.72	0.92
Ιούλιος	6.97	1.00	7.09	2.03
Αύγουστος	6.62	0.94	7.02	0.86
Σεπτέμβριος	5.32	1.33	5.75	1.16
Οκτώβριος	3.58	0.94	4.04	1.62
Νοέμβριος	2.30	0.84	2.56	0.84
Δεκέμβριος	1.84	0.70	1.76	1.40
πόλη: Αθήνα. Στατιστικές μετρήσεις του H. (δείγμα 45μετ)				
Μήνας	mean	std	median	iqr
Ιανουάριος	2.31	0.93	2.30	1.58
Φεβρουάριος	2.80	1.71	3.13	1.67
Μάρτιος	3.99	1.78	4.97	2.87
Απρίλιος	5.65	1.59	5.84	1.89
Μάιος	6.63	1.55	7.23	1.95
Ιούνιος	7.60	1.10	7.98	1.00
Ιούλιος	7.22	0.93	7.32	0.97
Αύγουστος	6.61	0.78	6.96	1.10
Σεπτέμβριος	5.35	1.25	5.81	0.88
Οκτώβριος	3.57	1.00	3.91	1.04
Νοέμβριος	2.24	0.95	2.56	1.29
Δεκέμβριος	1.74	0.77	1.71	1.38



Σχήμα.3.13 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων (45-15 μετρήσεων), του H/μήνα για την πόλη Αθήνα. (3.13α meanH, 3.13.β.stdH 3.13.γ medianH, 3.13.δ iqrH)

Πίνακας.3.15 Στατιστικά στοιχεία του H(kWh/m²) για το δείγμα των 15 και 45 μετρήσεων.

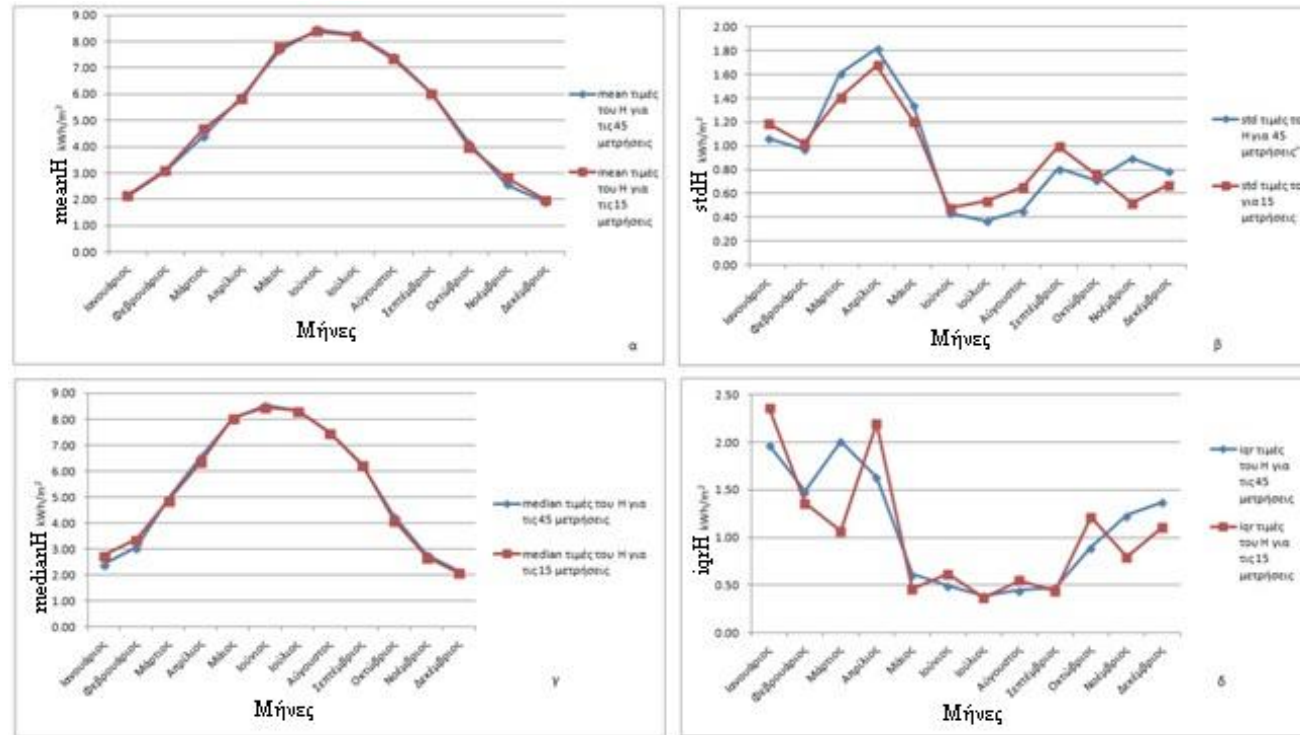
πόλη: Ηράκλειο. Στατιστικές μετρήσεις του H. (δείγμα 15 μετ)				
Μήνας	mean	std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.44	1.29	3.03	2.27
Φεβρουάριος	3.35	0.96	3.53	1.63
Μάρτιος	4.86	1.34	5.60	2.13
Απρίλιος	6.63	1.43	7.15	1.20
Μάιος	7.69	1.70	8.34	0.98
Ιούνιος	8.46	0.75	8.74	0.42
Ιούλιος	8.46	0.27	8.47	0.31
Αύγουστος	7.60	0.48	7.68	0.34
Σεπτέμβριος	6.38	0.47	6.44	0.38
Οκτώβριος	4.56	0.45	4.71	0.59
Νοέμβριος	2.95	0.84	3.41	1.33
Δεκέμβριος	2.25	0.65	2.36	1.13
πόλη: Ηράκλειο. Στατιστικές μετρήσεις του H. (δείγμα 45 μετ)				
Μήνας	mean	std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.36	1.14	2.64	1.99
Φεβρουάριος	3.48	1.08	3.69	1.60
Μάρτιος	4.75	1.31	5.42	2.04
Απρίλιος	6.47	1.47	7.03	1.20
Μάιος	7.98	1.15	8.32	0.68
Ιούνιος	8.62	0.50	8.79	0.33
Ιούλιος	8.46	0.23	8.47	0.36
Αύγουστος	7.64	0.36	7.73	0.42
Σεπτέμβριος	6.37	0.51	6.50	0.38
Οκτώβριος	4.46	0.62	4.62	0.79
Νοέμβριος	2.85	0.89	2.86	1.51
Δεκέμβριος	2.17	0.75	2.22	1.16



Σχήμα.3.14 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων (45-15 μετρήσεων), του H/μήνα για την πόλη Καλαμάτα .(3.14.α meanH, 3.14.β.stdH 3.14.γ medianH, 3.14.δ IqrH)

Πίνακας..3.16 Στατιστικά στοιχεία του H(kWh/m²) για το δείγμα των 15 και 45 μετρήσεων.

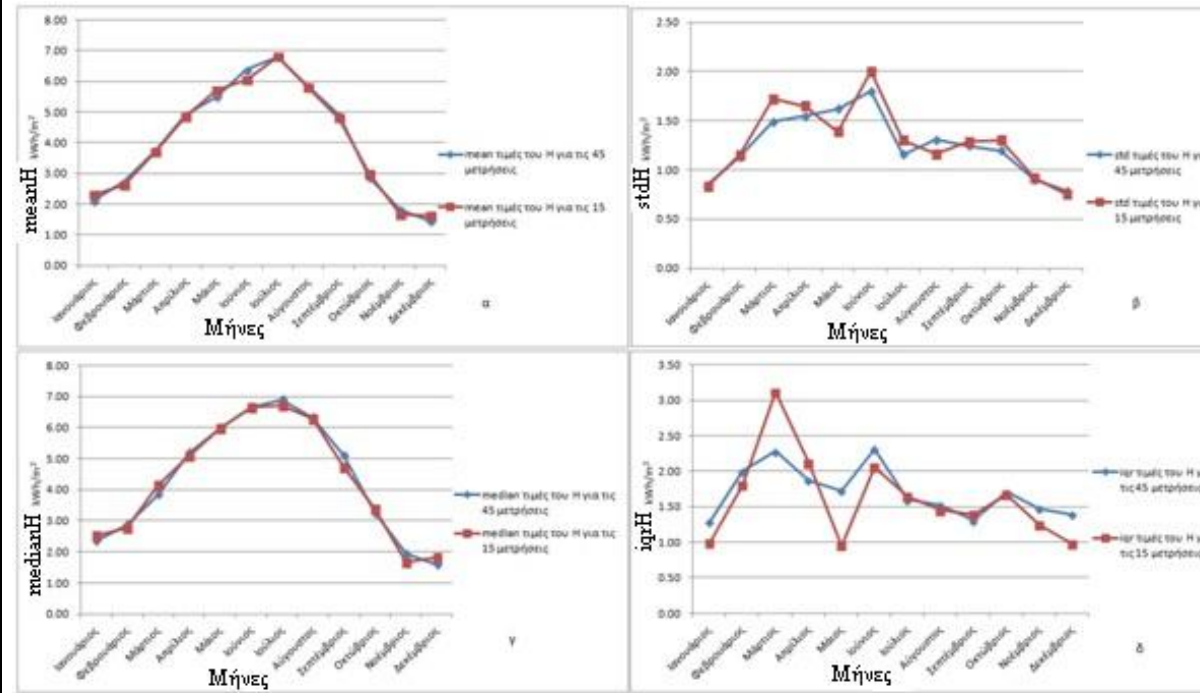
πόλη: Νάξος. Στατιστικά στοιχεία του H. (δείγμα 15μετ)				
Μήνας	mean	std	median	iqr
Ιανουάριος	2.15	1.19	2.76	2.36
Φεβρουάριος	3.10	1.02	3.40	1.36
Μάρτιος	4.68	1.41	4.89	1.07
Απρίλιος	5.82	1.68	6.38	2.20
Μάιος	7.81	1.21	8.08	0.46
Ιούνιος	8.39	0.48	8.47	0.62
Ιούλιος	8.22	0.54	8.33	0.37
Αύγουστος	7.33	0.65	7.51	0.55
Σεπτέμβριος	6.02	1.00	6.27	0.44
Οκτώβριος	3.97	0.76	4.12	1.21
Νοέμβριος	2.82	0.52	2.71	0.80
Δεκέμβριος	1.97	0.67	2.10	1.11
πόλη: Νάξος. Στατιστικά στοιχεία του H. (δείγμα 45 μετ)				
Μήνας	mean	std	median	iqr
Ιανουάριος	2.12	1.07	2.41	1.97
Φεβρουάριος	3.06	0.97	3.07	1.49
Μάρτιος	4.40	1.61	4.96	2.01
Απρίλιος	5.91	1.82	6.57	1.64
Μάιος	7.68	1.34	8.03	0.62
Ιούνιος	8.47	0.43	8.54	0.50
Ιούλιος	8.29	0.37	8.33	0.39
Αύγουστος	7.42	0.46	7.50	0.45
Σεπτέμβριος	6.02	0.81	6.23	0.48
Οκτώβριος	4.12	0.71	4.26	0.90
Νοέμβριος	2.55	0.90	2.79	1.24
Δεκέμβριος	1.90	0.79	2.16	1.38



Σχήμα.3.15 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων (45-15 μετρήσεων), του H/μήνα για την πόλη Νάξο .(3.15α meanH, 3.15.β.stdH 3.15.γ medianH, 3.15.δ iqrH)

Πίνακας.3.17 Στατιστικά στοιχεία του H(kWh/m²) για το δείγμα των 15 και 45 μετρήσεων.

πόλη: Θεσσαλονίκη. Στατιστικά στοιχεία του H. (δείγμα 15μετ)				
Μήνες	Mean	Std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.30	0.83	2.53	0.99
Φεβρουάριος	2.62	1.15	2.76	1.81
Μάρτιος	3.71	1.72	4.14	3.11
Απρίλιος	4.85	1.65	5.09	2.12
Μάιος	5.72	1.39	5.99	0.95
Ιούνιος	6.04	2.00	6.66	2.06
Ιούλιος	6.81	1.30	6.71	1.64
Αύγουστος	5.81	1.16	6.29	1.45
Σεπτέμβριος	4.80	1.29	4.72	1.39
Οκτώβριος	2.98	1.30	3.37	1.67
Νοέμβριος	1.67	0.92	1.68	1.24
Δεκέμβριος	1.63	0.75	1.82	0.98
πόλη: Θεσσαλονίκη . Στατιστικά στοιχεία του H. (δείγμα 45μετ)				
Μήνες	mean	std	median	Iqr
Ιανουάριος	2.12	0.84	2.35	1.29
Φεβρουάριος	2.74	1.13	2.87	2.00
Μάρτιος	3.75	1.49	3.84	2.28
Απρίλιος	4.91	1.55	5.19	1.87
Μάιος	5.50	1.62	5.99	1.72
Ιούνιος	6.39	1.80	6.66	2.31
Ιούλιος	6.80	1.16	6.91	1.60
Αύγουστος	5.84	1.30	6.32	1.53
Σεπτέμβριος	4.90	1.25	5.10	1.31
Οκτώβριος	2.88	1.20	3.25	1.71
Νοέμβριος	1.82	0.90	1.94	1.47
Δεκέμβριος	1.46	0.79	1.58	1.39

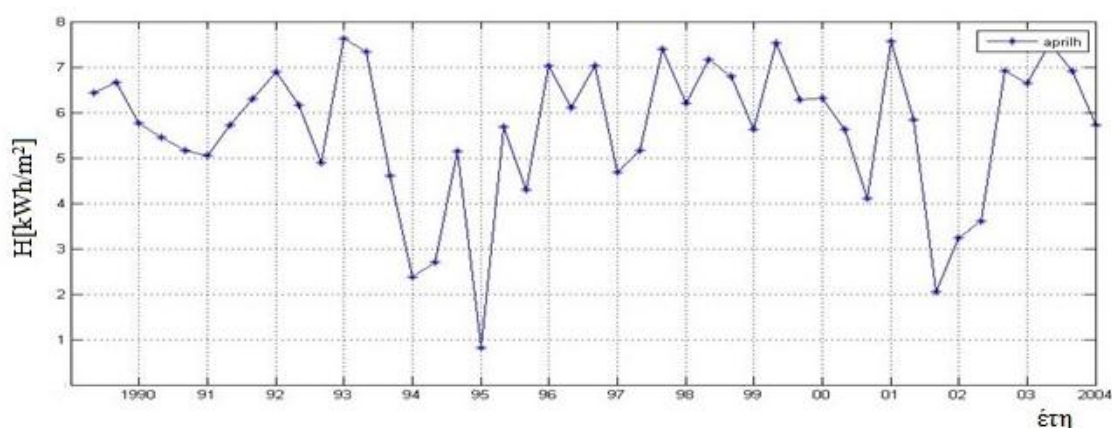


Σχήμα.3.16 Γραφικές παραστάσεις στατιστικών στοιχείων (45-15 μετρήσεων), του H/μήνα για τη Θεσσαλονίκη .(3.16α meanH, 3.16.β.stdH 3.16.γ medianH, 3.16.δ IqrH)

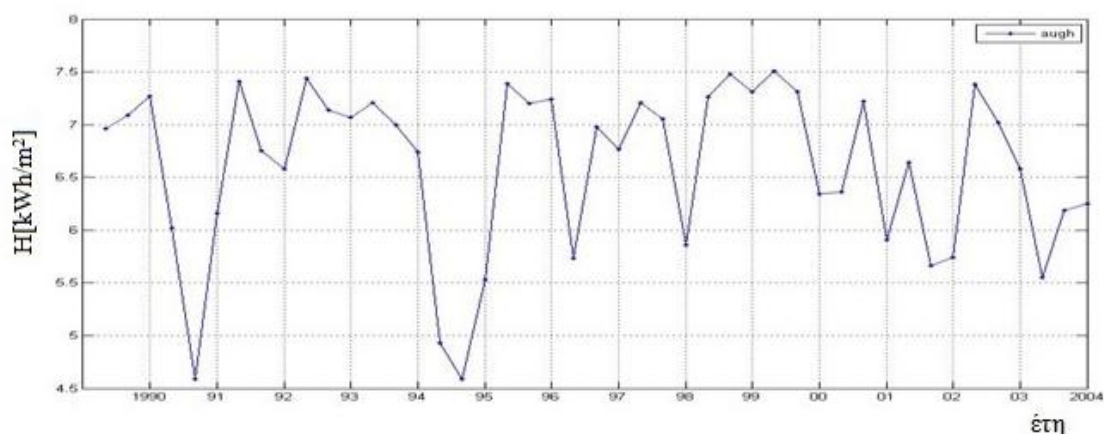
3.3 ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.

Στα Σχ.3.17 έως 3.622 γίνεται εξέταση της διακύμανσης της τιμής του H (kWh/m^2), για την αντιπροσωπευτική ημέρα κάθε μήνα καθώς και ± 1 ημέρες γύρω από αυτήν για τις πόλεις της Αθήνας και του Ηρακλείου κατά τους μήνες Απρίλιο, Αύγουστο και Δεκέμβριο για τα έτη από το 1990 έως το 2004.

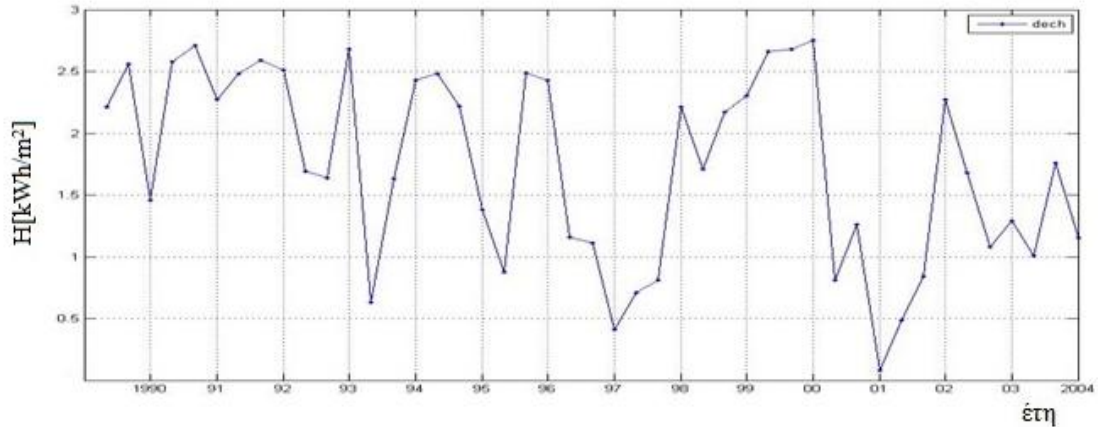
Πόλη: Αθήνα



Σχήμα.3.17: Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για την αντιπροσωπευτική ημέρα και ± 1 ημέρα γύρω από αυτήν για τον μήνα Απρίλιο για τα έτη 1990-2004 για την πόλη της Αθήνας.



Σχήμα.3.18: Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για την αντιπροσωπευτική ημέρα και ± 1 ημέρα γύρω από αυτήν για τον μήνα Αύγουστο για τα έτη 1990-2004 για την πόλη της Αθήνας.

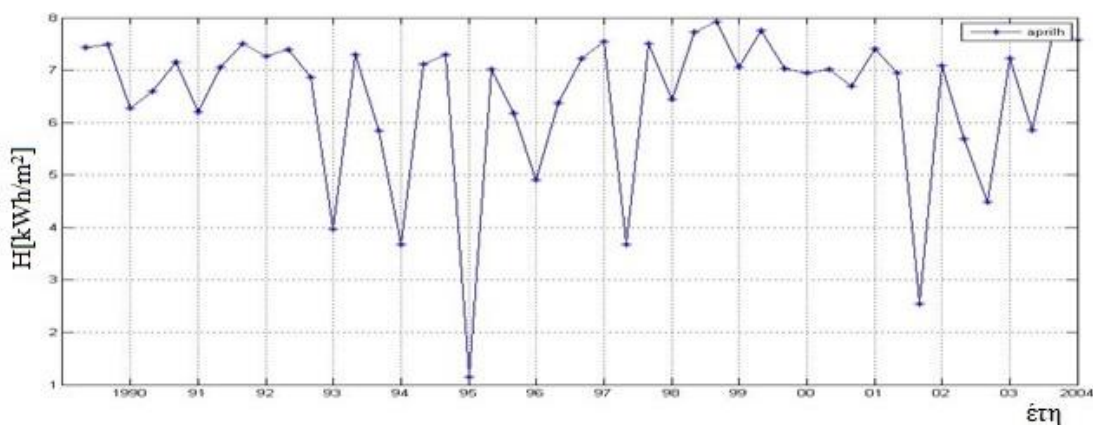


Σχήμα.3.19: Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για την αντιπροσωπευτική ημέρα και ± 1 ημέρα γύρω από αυτήν για τον μήνα Δεκέμβριο για τα έτη 1990-2004 για την πόλη της Αθήνας.

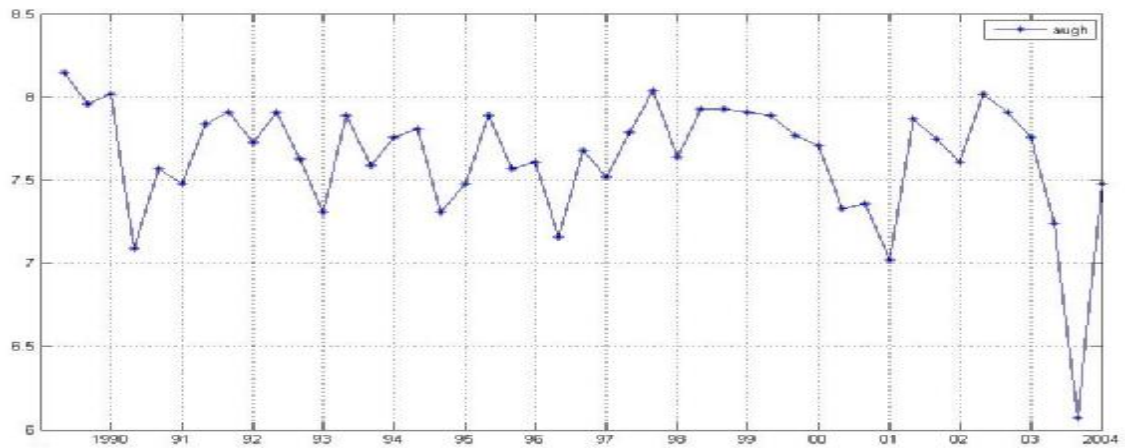
Συμπερασματικά για την πόλη της Αθήνας μπορεί να ειπωθεί πως οι μεταβολές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας H στο οριζόντιο επίπεδο που παρατηρούνται για τις ημέρες γύρω από την αντιπροσωπευτική ημέρα εμφανίζουν τυχαιότητα στην μεταβολή και δεν σχετίζονται απαραίτητα με την τιμή του H κατά την αντιπροσωπευτική ημέρα. Επίσης όπως είναι αναμενόμενο μπορεί να παρατηρηθεί πως κατά τους μήνες Απρίλιο και ιδιαίτερα των Αύγουστο οι τιμές H λαμβάνουν τις υψηλότερες τιμές τους σε σχέση με τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο κατά τον μήνα Δεκέμβριο.

Το ίδιο παρατηρείται και για την πόλη του Ηρακλείου βλ.Σχ.3.20-3.22

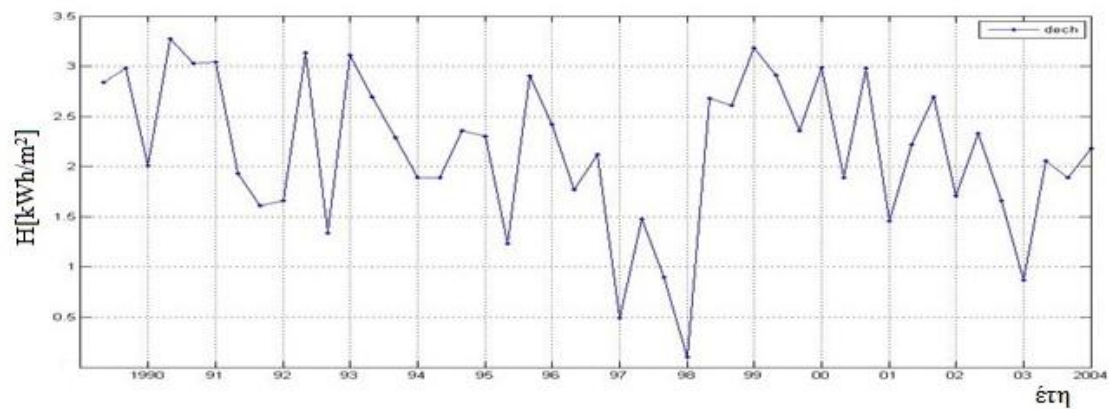
Πόλη: Ηράκλειο



Σχήμα.3.20: Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για την αντιπροσωπευτική ημέρα και ± 1 ημέρα γύρω από αυτήν για τον μήνα Απρίλιο για τα έτη 1990-2004 για την πόλη του Ηρακλείου.



Σχήμα.3.21: Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για την αντιπροσωπευτική ημέρα και ± 1 ημέρα γύρω από αυτήν για τον μήνα Αύγουστο για τα έτη 1990-2004 για την πόλη του Ηρακλείου.



Σχήμα.3.22: Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για την αντιπροσωπευτική ημέρα και ± 1 ημέρα γύρω από αυτήν για τον μήνα Δεκέμβριο για τα έτη 1990-2004 για την πόλη του Ηρακλείου.

3.4 ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ Η.

Με την χρήση του distribution fitting tool του Matlab, έγινε προσαρμογή των κατανομών Normal, Weibull, Extreme Value, Εξ.3.1- 3.2 - 3.3, στα διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας (probability density functions, pdf), της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας.

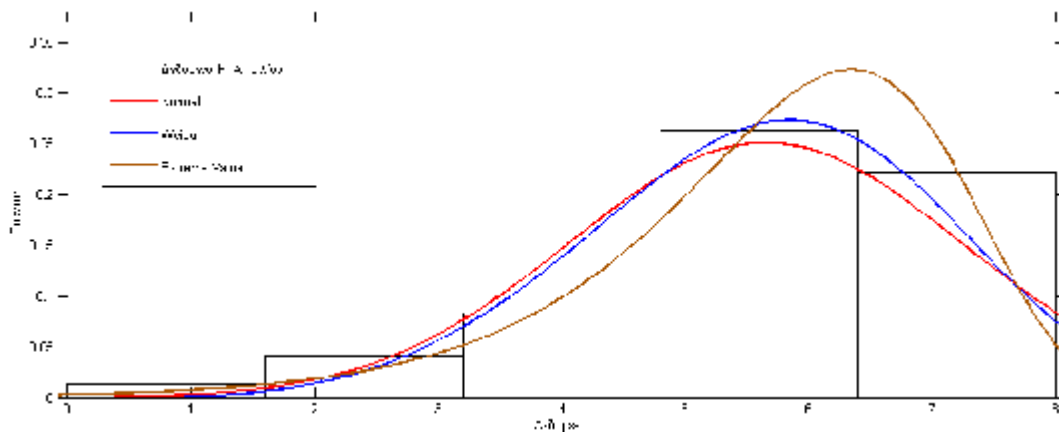
Με βάση το κριτήριο μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood), εξετάστηκε πια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας προσαρμόζεται με καλύτερο τρόπο στο pdf της ηλιακής ακτινοβολίας Η για τον κάθε μήνα τα οποία έχουν καταγραφεί για τις επιλεγείσες πόλεις της Ελλάδας.

Οι συναρτήσεις κατανομών που χρησιμοποιηθήκαν είναι οι εξής:[28]

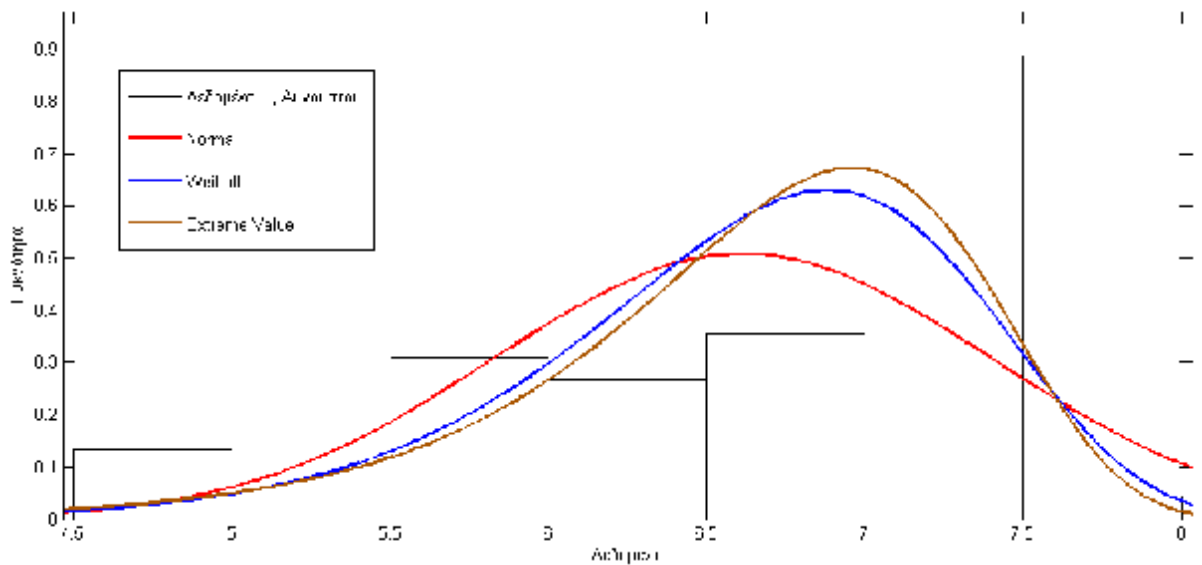
- κατανομή Normal(μ, σ): $f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ (3.1)
- κατανομή Weibull(α, β): $f(x; a, b) = ba^{-b}x^{b-1}e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b}, x \geq 0$ (3.2)
- κατανομή Extreme Value (type 1) (μ, σ): $f(x; \mu, \sigma) = \sigma^{-1} \times e^{\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)} \times e^{-e^{\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}}$ (3.3)

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι τρεις προσαρμοσμένες κατανομές (pdf), για τα δεδομένα του Η, κατά τους μήνες, Απρίλιο, Αύγουστο και Δεκέμβριο για τις πόλεις Αθήνα Σχ.3.23 (α), (β), (γ), Ηράκλειο Σχ.3.24 (α), (β), (γ), και Ιωάννινα Σχ.3.25 (α), (β), (γ).

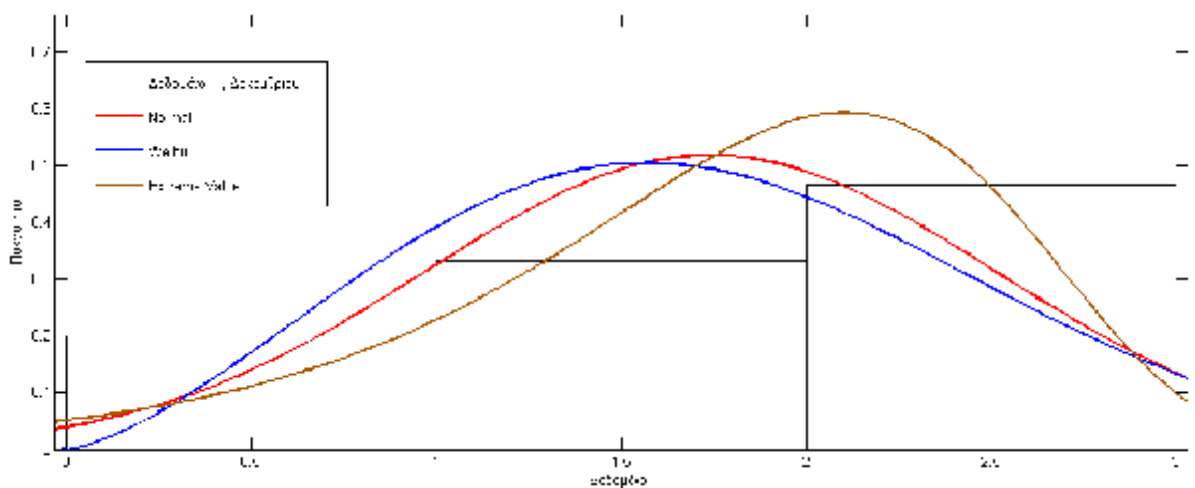
Πόλη : Αθήνα



Σχήμα. 3.23 α, Διάγραμμα pdf για την πόλη Αθήνα με προσαρμοσμένες τις συναρτήσεις Normal, Weibull & Extreme Value για τον μήνα Απρίλιο.



Σχήμα. 3.23β, Διάγραμμα pdf για την πόλη Αθήνα με προσαρμοσμένες τις συναρτήσεις Normal, Weibull & Extreme Value για τον μήνα Αύγουστο.



Σχήμα. 3.23γ, Διάγραμμα pdf για την πόλη Αθήνα με προσαρμοσμένες τις συναρτήσεις Normal, Weibull & Extreme Value για τον μήνα Δεκέμβριο.

Από τα διαγράμματα (pdf), για την Αθήνα φαίνεται ότι η κατανομή που προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα είναι η Extreme Value κατανομή και αυτό επιβεβαιώνεται για όλους τους μήνες από τις τιμές της αρνητικής λογαριθμικής πιθανοφάνειας (negative log-Likelihood) Πιν.3.18.

Πίνακας.3.18. Τιμές της αρνητικής λογαριθμικής πιθανοφάνειας (negative log-Likelihood) για την Αθήνα.

πόλη: Αθήνα						
Μήνας	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος
Normal	60.19	70.44	89.26	84.14	83.06	67.77
Weibull	61.21	70.66	91.11	83.46	79.72	59.50
Extreme value	57.59	68.87	84.22	78.29	74.41	55.73
Μήνας	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
Normal	60.29	52.43	73.34	62.30	61.08	51.51
Weibull	55.80	47.58	69.11	60.03	64.46	52.49
Extreme value	54.72	46.23	57.05	55.52	56.11	49.92

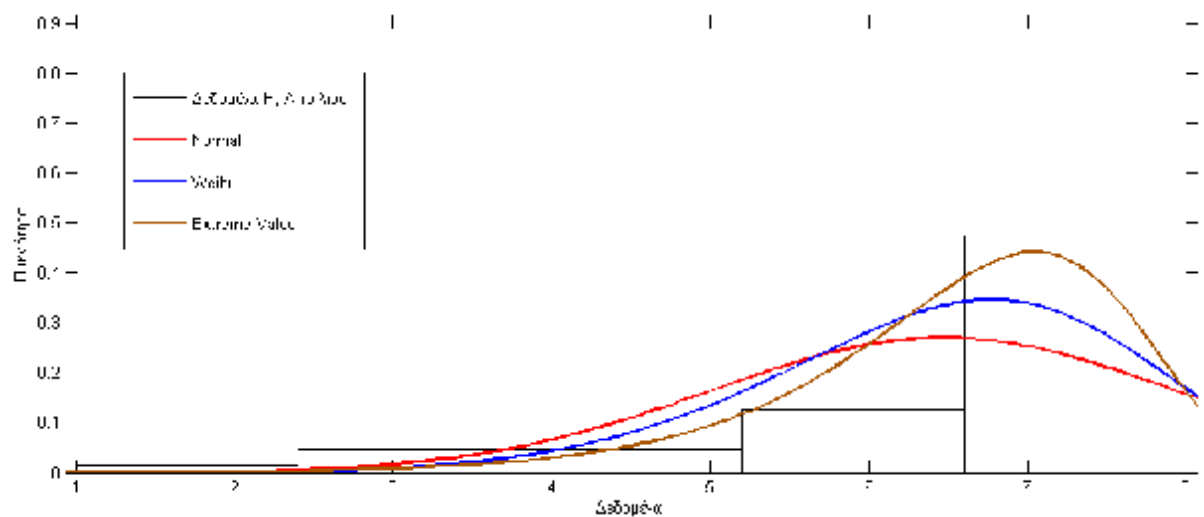
Όπως φαίνεται στον Πίν.3.18, οι τιμές της αρνητικής λογαριθμικής πιθανοφάνειας (negative log-Likelihood) της κατανομής Extreme Value δείχνει ότι η κατανομή αυτή προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα κάθε μήνα από την Normal ή Weibull κατανομή.

Στον Πίν.3.19 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας Normal, Weibull και Extreme Value για όλους τους μήνες του έτους .

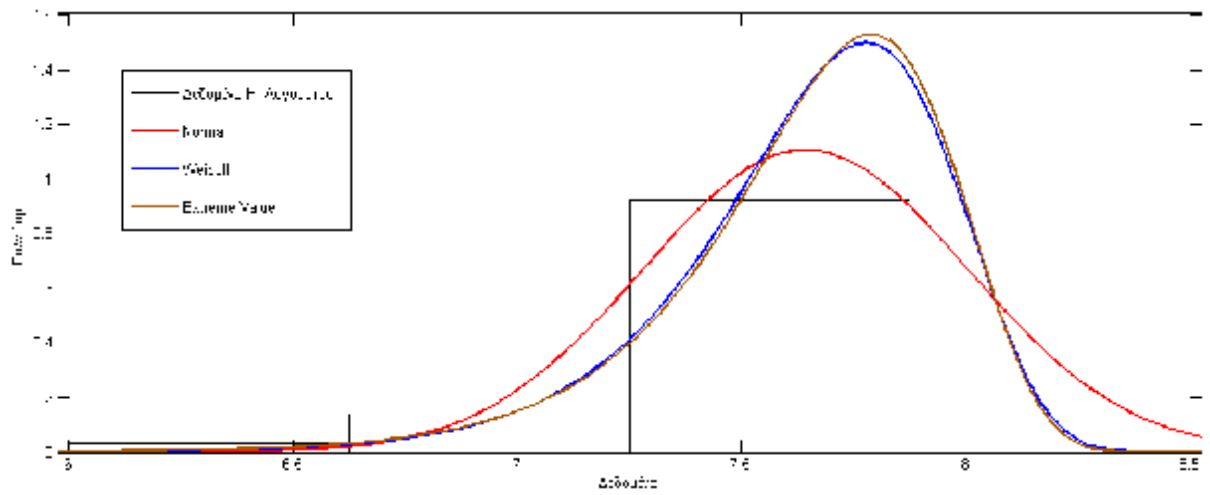
Πίνακας.3.19 Τιμές των παραμέτρων των κατανομών Normal, Weibull και Extreme Value για την Αθήνα.

πόλη: Αθήνα						
Μήνας	Κατανομή Normal		Κατανομή Weibull		Κατανομή Extreme Value	
	μ	σ	α	b	μ	σ
Ιανουάριος	2.31	0.93	2.59	2.75	2.75	0.73
Φεβρουάριος	2.8	1.71	3.15	2.67	3.35	0.95
Μάρτιος	3.99	1.78	4.46	2.4	4.79	1.27
Απρίλιος	5.65	1.59	6.18	4.47	6.34	1.14
Μάιος	6.63	1.55	7.17	5.93	7.28	0.99
Ιούνιος	7.6	1.1	7.99	11.05	8.04	0.64
Ιούλιος	7.22	0.93	7.59	10.45	7.63	0.69
Αύγουστος	6.61	0.78	6.93	11.84	6.96	0.55
Σεπτέμβριος	5.35	1.25	5.73	6.48	5.8	0.64
Οκτώβριος	3.57	0.98	3.92	4.83	3.99	0.67
Νοέμβριος	2.24	0.95	2.49	2.48	2.67	0.69
Δεκέμβριος	1.74	0.77	1.95	2.43	2.1	0.62

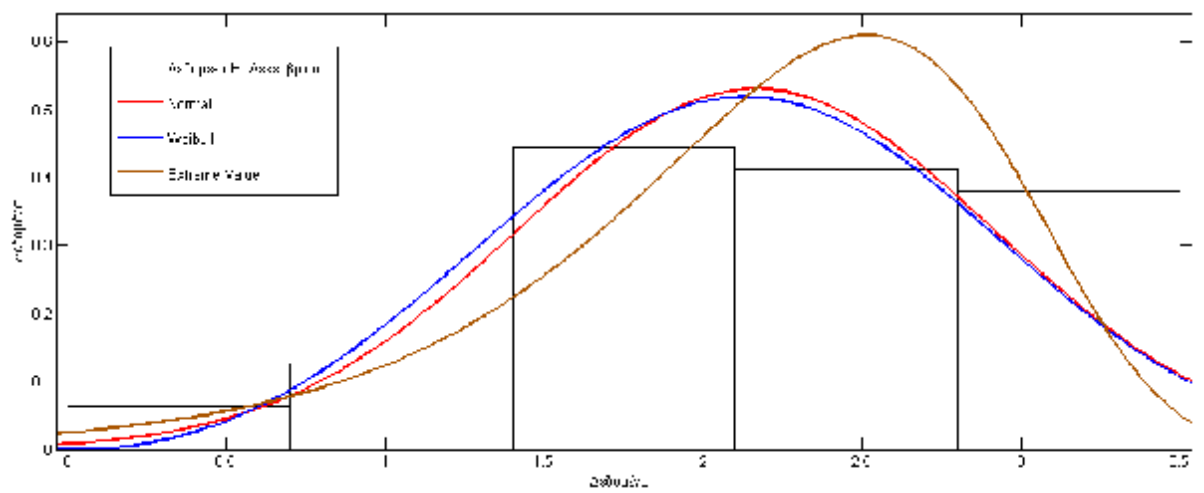
Πόλη : Ηράκλειο



Σχήμα. 3.24α. Διάγραμμα pdf για την πόλη Ηράκλειο με προσαρμοσμένες τις συναρτήσεις Normal, Weibull & Extreme Value για τον μήνα Απρίλιο.



Σχήμα. 3.24β, Διάγραμμα pdf για την πόλη Ηράκλειο με προσαρμοσμένες τις συναρτήσεις Normal, Weibull & Extreme Value για τον μήνα Αύγουστο.



Σχήμα. 3.24γ, Διάγραμμα pdf για την πόλη Ηράκλειο με προσαρμοσμένες τις συναρτήσεις Normal, Weibull & Extreme Value για τον μήνα Δεκέμβριο.

Πίνακας.3.20. Τιμές της αρνητικής λογαριθμικής πιθανοφάνειας (negative log-Likelihood) για το Ηράκλειο.

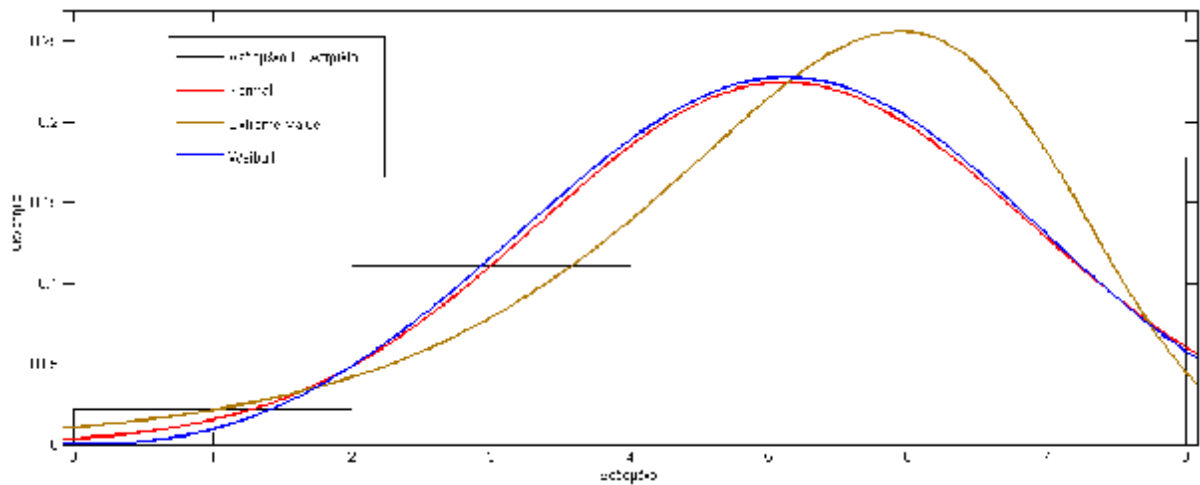
Πόλη: Ηράκλειο						
Μήνας	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος
Normal	69.06	66.90	75.37	80.83	69.54	31.89
Weibull	69.54	66.12	73.49	76.65	56.36	15.76
Extreme value	66.57	62.54	70.78	67.78	48.69	13.83
Μήνας	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
Normal	-3.29	17.43	32.72	41.79	58.30	50.46
Weibull	-4.45	8.95	20.80	37.26	57.47	52.71
Extreme value	-4.36	8.38	18.78	35.84	54.38	48.23

Στον Πίν.3.21 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των κατανομών Normal, Weibull και Extreme Value για όλους τους μήνες του έτους .

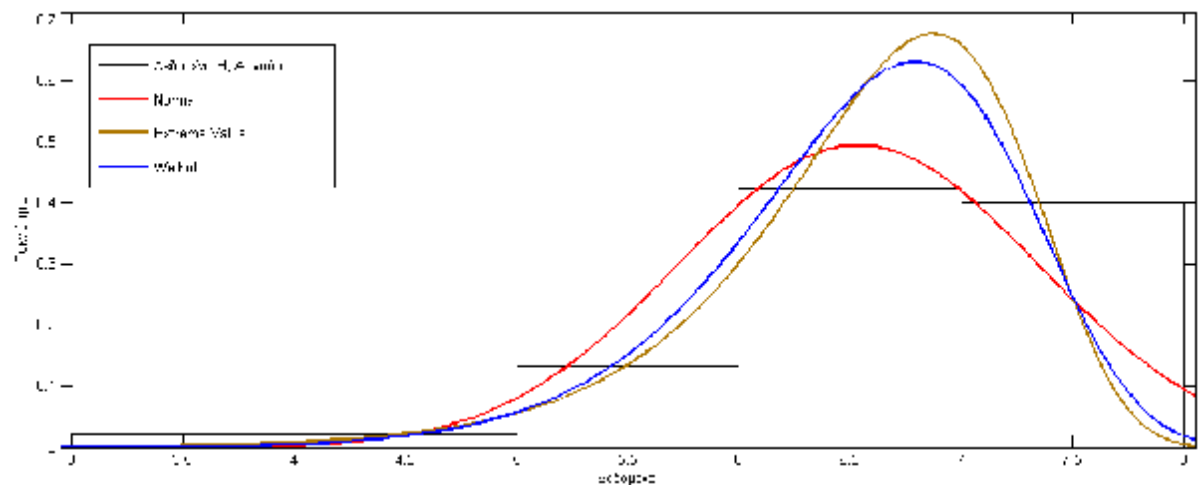
Πίνακας.3.21 Τιμές των παραμέτρων των κατανομών Normal, Weibull και Extreme Value για το Ηράκλειο.

Πόλη: Ηράκλειο						
Μήνας	Κατανομή Normal		Κατανομή Weibull		Κατανομή Extreme Value	
	μ	σ	α	b	μ	σ
Ιανουάριος	2.36	1.14	2.65	2.21	2.89	0.89
Φεβρουάριος	3.48	1.08	3.84	3.95	3.97	0.8
Μάρτιος	4.75	1.31	5.22	4.63	5.34	0.95
Απρίλιος	6.47	1.47	6.95	6.47	7.04	0.83
Μάιος	7.98	1.15	8.33	13.33	8.36	0.52
Ιούνιος	8.62	0.49	8.79	33.78	8.79	0.25
Ιούλιος	8.46	0.23	8.57	44.99	8.57	0.19
Αύγουστος	7.64	0.36	7.78	31.73	7.79	0.24
Σεπτέμβριος	6.37	0.51	6.55	21.59	6.56	0.29
Οκτώβριος	4.46	0.62	4.71	9.92	4.73	0.44
Νοέμβριος	2.85	0.89	3.15	3.89	3.25	0.67
Δεκέμβριος	2.17	0.75	2.39	3.2	2.51	0.6

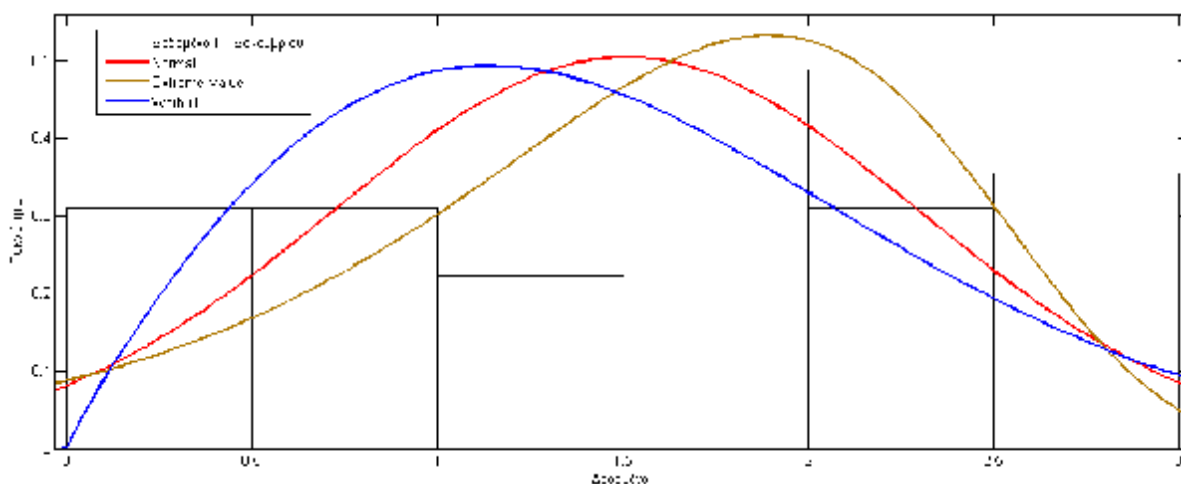
Πόλη: Ιωάννινα



Σχήμα. 3.25α, Διάγραμμα pdf για την πόλη Ιωάννινα με προσαρμοσμένες τις συναρτήσεις Normal, Weibull & Extreme Value για τον μήνα Απρίλιο.



Σχήμα. 3.25β, Διάγραμμα pdf για την πόλη Ιωάννινα με προσαρμοσμένες τις συναρτήσεις Normal, Weibull & Extreme Value για τον μήνα Αύγουστο.



Σχήμα. 3.25γ, Διάγραμμα pdf για την πόλη Ιωάννινα με προσαρμοσμένες τις συναρτήσεις Normal, Weibull & Extreme Value για τον μήνα Δεκέμβριο.

Πίνακας.3.22. Τιμές της αρνητικής λογαριθμικής πιθανοφάνειας (negative log-Likelihood) για τα Ιωάννινα.

πόλη: Ιωάννινα						
Μήνας	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος
Normal	54.59	68.15	83.94	89.22	82.74	76.08
Weibull	55.25	67.62	84.44	89.04	80.00	71.76
Extreme value	52.25	68.15	78.15	87.41	73.16	69.30
Μήνας	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Οκτώβριος	Νοέμβριος	Δεκέμβριος
Normal	54.96	53.64	72.80	80.35	58.29	52.75
Weibull	47.78	47.52	69.50	82.73	60.14	53.46
Extreme value	45.98	45.59	63.39	75.38	57.48	53.33

Αξίζει να αναφερθεί για την πόλη των Ιωαννίνων πως κατά τους μήνες Φεβρουάριο και Ιούλιο η κατανομή Weibull παρουσιάζει καλύτερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες δύο κατανομές, ενώ κατά τον μήνα Δεκέμβριο η κατανομή Normal είναι εκείνη με τη μικρότερη τιμή.

Στον Πίν.3.23 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των κατανομών Normal, Weibull και Extreme Value για όλους τους μήνες του έτους .

Πίνακας.3.23 Τιμές των παραμέτρων των κατανομών Normal, Weibull και Extreme Value για τα Ιωάννινα.

Πόλη: Ιωάννινα						
Μήνας	Κατανομή Normal		Κατανομή Weibull		Κατανομή Extreme Value	
	μ	σ	α	b	μ	σ
Ιανουάριος	2.22	0.82	2.48	3.06	2.6	0.65
Φεβρουάριος	2.78	1.11	3.11	2.81	3.31	0.95
Μάρτιος	4.2	1.58	4.69	3.13	4.9	1.11
Απρίλιος	5.11	1.78	5.69	3.35	5.94	1.44
Μάιος	6.33	1.54	6.85	5.65	6.96	0.97
Ιούνιος	7.44	1.32	7.95	7.78	8.02	0.92
Ιούλιος	7.64	0.83	7.95	13.59	7.98	0.55
Αύγουστος	6.53	0.81	6.84	11.71	6.87	0.54
Σεπτέμβριος	4.93	1.23	5.35	5.57	5.44	0.78
Οκτώβριος	3.31	1.46	3.7	2.41	3.97	1.04
Νοέμβριος	1.99	0.89	2.22	2.32	2.42	0.74
Δεκέμβριος	1.51	0.79	1.68	1.9	1.89	0.69

4. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΣΗΓΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έγκυρη και αποτελεσματική διαστασιολόγηση του φ/β συστήματος είναι μία από τις σημαντικότερες φάσεις του σχεδιασμού ενός συστήματος. Οι παράγοντες που καθορίζουν την διαστασιολόγηση ενός φ/β συστήματος είναι η ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m^2 ή MJ/m^2), στην εκάστοτε περιοχή και η ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τα φορτία. Εάν το φ/β σύστημα είναι υπέρ-διαστασιολογημένο αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση του κόστους της τελικής εγκατάστασης και την τιμή της παραγόμενης ενέργειας, αντιθέτως εάν το φ/β σύστημα είναι υπό-διαστασιολογημένο θα υπάρχουν προβλήματα στην κάλυψη των φορτίων με ηλεκτρική ενέργεια και στην αδυναμία επαναφόρτισης του συστήματος των συσσωρευτών που οδηγεί στην ταχύτερη γήρανση των συσσωρευτών. Επίσης η σωστή επιλογή του μετατροπέα ισχύος (inverter, βλ.κεφ.4.5), έτσι ώστε η περιοχή λειτουργίας του να καλύπτει πλήρως το MPP του φ/β συστήματος [51]. Για αυτούς τους λόγους η διαδικασία της διαστασιολόγησης πρέπει να είναι πολύ προσεχτική για να αποφευχθούν τέτοιου είδους προβλήματα που αυξάνουν την περίοδο αποπληρωμής του έργου ή προκαλούν αστοχίες στην κάλυψη των φορτίων.

4.1.1 Κλασική μέθοδος διαστασιολόγησης φ/β συστημάτων.

Εκτός από τους παραπάνω σημαντικούς παράγοντες οι οποίοι είναι καθοριστικοί στην διαστασιολόγηση ενός φ/β συστήματος, υπάρχει επίσης αυξημένο ενδιαφέρον σχετικά με την αξιοπιστία ενός φ/β συστήματος να μπορεί να καλύψει τα ηλεκτρικά φορτία με την ελάχιστη εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύ αιχμής, και με την ελάχιστη προδιαγεγραμμένη αστοχία κάλυψης των φορτίων κατά την διάρκεια του έτους. [27,28].

Για αυτόν τον λόγο εισάγεται ο παράγοντας ενεργειακής αυτονομίας ενός φ/β συστήματος μετρούμενος σε ημέρες,(d).[29] Η σημασία αυτού του παράγοντα είναι μεγάλη διότι επηρεάζει τόσο το μέγεθος, την συνολική χωρητικότητα των συσσωρευτών που θα επιλεγούν, τον τύπο τους, καθώς επίσης το μέγεθος της φ/β γεννήτριας και το συνολικό κόστος της.

Ο παράγοντας αυτονομίας d, ενός φ/β συστήματος σχετίζεται και με το προφίλ των φορτίων τα οποία το φ/β σύστημα πρέπει να τροφοδοτεί.

Κατά την σχεδίαση ενός φ/β συστήματος διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

1. κρίσιμο σύστημα ή κρίσιμα φορτία
2. μη-κρίσιμο σύστημα ή μη κρίσιμα φορτία.

1. Κρίσιμο σύστημα.

Κρίσιμο ονομάζουμε το σύστημα εκείνο του οποίου τα φορτία απαιτούν ενέργεια τουλάχιστον κατά το 99% του χρόνου ετησίως,[30]. Τέτοιου είδους φορτία θα είναι φορτία τα οποία η λειτουργία τους είναι υψίστης σημασίας για την λειτουργία κάποιου συστήματος, π.χ. φώτα ασφαλείας, φορτία σε Νοσοκομεία κλπ.

2. Μη κρίσιμο σύστημα.

Μη κρίσιμο ονομάζουμε το σύστημα εκείνο του οποίου τα φορτία απαιτούν τροφοδότηση τουλάχιστον κατά το 95% του χρόνου ετησίως,[30]. Τα φορτία αυτού του είδους δικαιολογούν προσωρινές ελλείψεις ενέργειας.

Ο παράγοντας αυτονομίας d, μπορεί να υπολογισθεί για αυτά του είδους φορτία από τις Εξ.4.1 και Εξ.4.2. [6]

$$d_{cr} = -1.9 \times (PSH_{min}) + 18.3(days) \quad (4.1)$$

$$d_{ncr} = -0.48 \times (PSH_{min}) + 4.58(days) \quad (4.2)$$

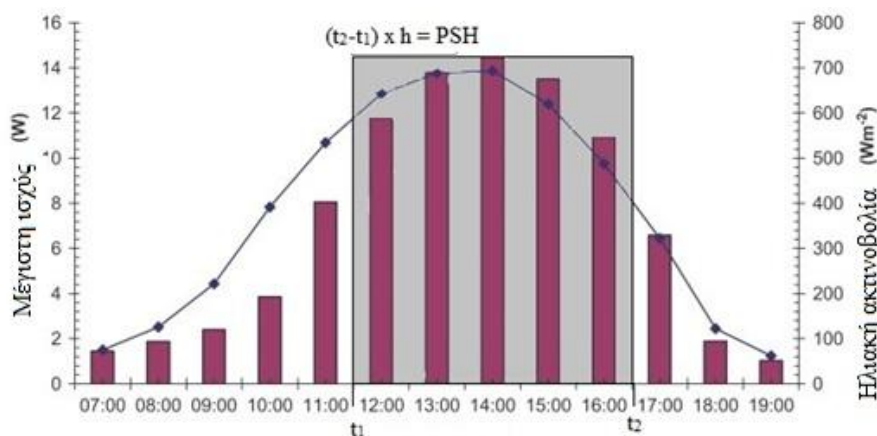
PSH, είναι ο ισοδύναμος αριθμός ωρών / ημέρα: Είναι μία χρονική περίοδος σε ώρες/ ημέρα (h/day), κατά την οποία υποθέτουμε ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι σταθερή και ίση με, $I_T = 1000(\text{W}/\text{m}^2)$, καθ' όλη την διάρκεια των ωρών αυτών, $PSH_{[1,5,6]}$ και PSH_{min} η ελάχιστη τιμή του PSH για τον μήνα που γίνεται η διαστασιολόγηση. Η τιμή του παράγοντα PSH μετρούμενη σε (h/day) είναι ίση αριθμητικά με την τιμή του $H(n_j)$, μετρούμενη σε kWh/m^2 , [1], και δίνεται από την Εξ.4.3.

Ο αριθμός αυτός PSH ικανοποιεί την ακόλουθη συνθήκη:

Η ηλεκτρική ενέργεια που θα αποδώσει το φ/β πλαίσιο κατά την υποθετική αυτή κατάσταση να είναι ισοδύναμη με την ηλεκτρική ενέργεια που θα αποδώσει με την πραγματική κατανομή ακτινοβολίας [1,6] όπου η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας I_T , κατά τη διάρκεια της ημέρας μεταβάλλεται, όπως δείχνει το Σχ. 4.1

Δηλαδή

$$(PSH) \text{ h/day} \times 1000 \text{ W}/\text{m}^2 = H_{hor} \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{ day} \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.1: Έντασης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα φ/β πλαίσιο κατά τη διάρκεια μιας ημέρας. Η βάση του ορθογωνίου (t_2-t_1) σε ώρες είναι ίση με PSH, εξ ορισμού. Πηγή: [Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ 2004]

Η κλασική μέθοδος διαστασιολόγησης φ/β συστημάτων βασίζεται κυρίως στον υπολογισμό της ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος P_m (Εξ.4.4), του φ/β συστήματος για την κάλυψη των φορτίων με ενεργειακή αυτονομία d ημερών, και της χωρητικότητας C_L , των συσσωρευτών που απαιτούνται για την αποθήκευση της

περίσσειας ενέργειας ώστε να χρησιμοποιηθεί όταν το φ/β σύστημα δεν παράγει επαρκή ισχύ (Εξ.4.5).[18,28,29]

$$P_m = \frac{d \times Q_L \times F}{PSH_m \times R_m} \quad (4.4)$$

$$C_L = \frac{d \times Q_L \times F'}{V \times DOD} \quad (4.5)$$

όπου Q_L , είναι το ημερήσιο φορτίο σε (Wh), F και F' είναι διορθωτικοί συντελεστές λόγω των απωλειών ενέργειας κατά την μεταφορά της ισχύος, V η DC τάση και DOD (Depth of Discharge), το βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών.

Η μέση τιμή του παράγοντα PSH , συμβολίζεται με PSH_m , ο παράγοντας R_m , χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο στο κεκλιμένο [26,27]. Η τιμή του R , προσδιορίζεται για την αντιπροσωπευτική ημέρα του κάθε μήνα, με βάση το γεωγραφικό πλάτος και την κλιματική ζώνη της εκάστοτε περιοχής που είναι εγκατεστημένο το φ/β σύστημα, (βλ. Κεφ.1.5). Όπου d είναι ο παράγοντας αυτονομίας που δίδεται από τις Σχ. (4.1) ή (4.2) ανάλογα με το είδος του συστήματος.

4.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.

Η προηγούμενη κλασική μεθοδολογία διαστασιολόγησης ενός φ/β συστήματος δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με τη δεινότητα του συστήματος να καλύψει με ενέργεια τα φορτία του μέσω της εισαγωγής του παράγοντα αυτονομίας, d , λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του παράγοντα PSH_{min} για την εξεταζόμενη περιοχή. Παρόλα αυτά με την εισαγωγή του παράγοντα αυτονομίας d , έτσι ώστε να προσαρμοστεί στις διακυμάνσεις των δεδομένων της ηλιακής ακτινοβολίας ικανοποιώντας την αξιοπιστία του φ/β συστήματος, η εκτίμηση για την εγκατεστημένη ισχύ αιχμής και την χωρητικότητα των συσσωρευτών αυξάνεται γραμμικά οδηγώντας έτσι σε μεγαλύτερες φ/β συστοιχίες και περισσότερους συσσωρευτές, δηλαδή πολλαπλάσια χωρητικότητα.

Μια οικονομικά αποδοτικότερη μεθοδολογία διαστασιολόγησης φ/β συστήματος παρουσιάζεται στην εργασία [18]. Σε αυτήν αναλύεται μια διαφορετική προσέγγιση σχετικά με τον υπολογισμό της ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος και της χωρητικότητας του συστήματος των συσσωρευτών. Η μέθοδος αυτή δίνει μικρότερες τιμές για τα μεγέθη P_m και C_L για την ίδια περίοδο αυτονομίας σε σύγκριση με την προηγούμενη μέθοδο. Κατά την προσέγγιση αυτή, γίνεται υπόθεση ότι οι τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας $H(n_j)$, ακολουθούν μια κατανομή Gauss. Η τιμή του μεγέθους $H(n_j)$, βρίσκεται με πιθανότητα 95% εντός του πεδίου τιμών που δίδεται από την (4.6) ,

$$H(n_j) \in [H_m(n_j) \pm 2 \times \sigma_{H(n_j)}] \quad (4.6)$$

όπου $H_m(n_j)$, είναι η μέση τιμή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για την αντιπροσωπευτική ημέρα του μήνα, για την οποία το φ/β σύστημα θα διαστασιολογηθεί, και $\sigma_{H(n_j)}$, είναι η τυπική απόκλιση του $H(n_j)$. Οι τιμές για την εξαγωγή των ανωτέρω μεγεθών προκύπτουν από την ανάλυση των δεδομένων της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας I , για μια περίοδο N χρόνων.

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, η διαστασιολόγηση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει στο σύστημα αυτονομία για έναν αριθμό d , ημερών ανεξαρτήτως των διακυμάνσεων της ηλιακής ακτινοβολίας.

Λόγω της πιθανής μεταβολής της ακτινοβολίας κατά δH ή σ_{Hd} , προκύπτει μια μεταβολή στην ισχύ αιχμής κατά δP_m . Για να αντισταθμιστεί το έλλειμμα ενέργειας d , ημερών με ποσοστό επιτυχίας 95% θα πρέπει να αυξηθεί η ισχύς αιχμής κατά δP_m , που δίδεται από την Εξισ.4.7. Σύμφωνα με την αναλογία αυτή ο υπολογισμός της μέγιστης ισχύος P_m , και της χωρητικότητας των συσσωρευτών C_L , υπολογίζονται από της Εξισ.4.9 και 4.10 αντίστοιχα.

$$\frac{\delta P_m}{P_m} = \frac{\delta(PSH)}{PSH_m} = \frac{\sigma_{Hd}}{H_m(n_j)} = \frac{2 \times \sqrt{d} \times \sigma_{H(n_j)}}{H_m(n_j)} \quad (4.7)$$

Όπου η σ_{Hd} δίδεται από τη σχέση [18,52]:

$$\sigma_{Hd}^2 = \sigma_{H(n_j)_1}^2 + \sigma_{H(n_j)_2}^2 + \dots + \sigma_{H(n_j)_d}^2 \approx d \times \sigma_{H(n_j)}^2$$

$$\sigma_{Hd} = \sqrt{d} \times \sigma_{H(n_j)} \quad (4.8)$$

$$P_{m,d} = P_m \times \left(1 + \frac{2 \times \sqrt{d} \times \sigma_H(n_j)}{H_m(n_j)} \right) \quad (4.9)$$

$$C_{L,d} = C_L \times \left(1 + \frac{2 \times \sqrt{d} \times \sigma_H(n_j)}{H_m(n_j)} \right) \quad (4.10)$$

4.3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗΣ

Σύμφωνα με την παρακάτω ενεργειακή προσέγγιση (Εξίσ.4.11), η ενέργεια η οποία προσφέρεται από την φ/β συστοιχία θα καταναλώνεται από τα φορτία, ένα ποσοστό αυτής θα χάνεται λόγω των απωλειών που αναφέρθηκαν (βλ.κεφ2.5.4), και κατά συνέπεια η περισσευούμενη ενέργεια θα αποθηκεύεται στους συσσωρευτές.

Το ενεργειακό ισοζύγιο δίνεται στη συνέχεια.

$$\begin{aligned} & \text{Ενέργεια που προσφέρεται} - \text{Ενέργεια που δαπανάται} - \text{Ενέργεια που χάνεται λόγω απωλειών} = \\ & \text{Ενέργεια που αποθηκεύεται στους συσσωρευτές.} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Το παραπάνω ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να μετατραπεί όπως δείχνει η (Εξίσ.4.12), όπου είναι προσαρμοσμένο ανά ημέρα. [52]

$$\sum_{h=h_{sr}}^{h_{ss}} A_{PV} I_T(h; n_j) n_{pv} \delta h - \sum_{h=1}^{24} Q_L(h; n_j) \delta h - \sum_{h=1}^{24} power_{losses} \delta h = Energy_{stored} per day \quad (4.12)$$

όπου A_{PV} είναι η επιφάνεια της φ/β συστοιχίας, $I_T(h;n_j)$, είναι η ωριαία ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο κατά την ώρα h , και ημέρα n_j , και με n_{pv} , συμβολίζεται ο βαθμός απόδοσης της φ/β γεννήτριας. Με $Q_L(h;n_j)$, συμβολίζεται η ωριαία κατανάλωση ενέργειας από τα φορτία.

Η δυναμική μέθοδος διαστασιολόγησης [28] εξομοιώνει την ενέργεια που παράγει η φ/β γεννήτρια με δειγματοληψία της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας από την κατανομή Extreme Value (type I) με παραμέτρους που έχουν προσδιοριστεί από ανάλυση δεδομένων προηγούμενων ετών, την ενέργεια που καταναλώνεται από τα φορτία κατά τη διάρκεια της ημέρας και νύχτας, και την κατάσταση φόρτισης των

συσσωρευτών. Η ενέργεια η οποία παρέχεται από την φ/β γεννήτρια κατά την διάρκεια της ημέρας δίνεται από την Εξίσ.(4.13), η ενέργεια η οποία περισσεύει για την φόρτισή των συσσωρευτών δίνεται από την Εξίσ.(4.14), η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών SOC,(βλ.κεφ4.4) δίνεται από την Εξίσ.(4.15α), και η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών μετά την κατανάλωση ενέργειας από τα νυχτερινά φορτία Q_{Lnight} δίνεται απο την εξ.4.15(b) [28]

$$E_{PV} = P_{m,d} \times PSH \times R \quad (4.13)$$

$$DE = E_{PV} - F \times Q_{Lday} \quad (4.14)$$

$$SOC = SOC\alpha + DE / (C_{L,d} \times V) \quad (4.15\alpha)$$

$$SOC = SOC\alpha - Q_{Lnight}F' / (C_{L,d} \times V) \quad (4.15b)$$

Κατά τον υπολογισμό της κατάστασης φόρτισης του συσσωρευτή SOC, προστίθεται σε αυτό η προϋπάρχουσα κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή SOCα από την προηγούμενη ημέρα [28]. Ο παράγοντας F, είναι διορθωτικός παράγοντας λόγω απωλειών από τη διαδρομή από τη φ/β συστοιχία έως τα φορτία, και ο διορθωτικός παράγοντας F' απο τους συσσωρευτές εως τα φορτία.

Εν κατακλείδι για να είναι αποτελεσματική μια μεθοδολογία διαστασιολόγησης πρέπει να εξεταστούν με ακρίβεια οι παρακάτω παράγοντες [52].

- Η σωστή κλίση και αζιμούθιο της φ/β συστοιχίας (βλ. κεφ1,1), καθώς και όλοι οι γεωμετρικοί παράγοντες που αφορούν την φ/β συστοιχία
- οι ελάχιστες απώλειες ενέργειας στις καλωδιώσεις, τον ελεγκτή φόρτισης και τον αντιστροφέα λόγω της συμβατότητας κατά την λειτουργία τους. (Ο παράγοντας αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός διότι εάν οι χαρακτηριστικές καμπύλες i-V, της φ/β συστοιχίας δεν ταιριάζουν με αυτές του αντιστροφέα τότε ο βαθμός απόδοσης του DC/AC μπορεί να πέσει έως και 90%
- ο υπολογισμός της χωρητικότητας των συσσωρευτών
- η διαστασιολόγηση της φ/β γεννήτριας έχοντας υπόψη την ημερήσια κατανάλωση των φορτίων καθώς και τις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας.

4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ.

Σε όλες της μεθοδολογίες διαστασιολόγησης ο υπολογισμός των απωλειών μεταφοράς ισχύος από τα φ/β πλαίσια μέχρι τον καταναλωτή λαμβάνεται υπόψη για τον προσδιορισμό των συντελεστών F, F' (Εξίσ.4.4-4.5), και τον υπολογισμό της τελικής εγκατεστημένης ισχύος και χωρητικότητας του συστήματος των συσσωρευτών.

Απώλειες κατά την μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος και καλωδιώσεις.

Στην ηλεκτρική εγκατάσταση ενός φ/β συστήματος η χρήση ειδικού τύπου καλωδίων είναι απαραίτητη για να καλυφθούν οι απαιτήσεις της εφαρμογής. Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά συνεχούς DC ρεύματος διαφέρουν από τα καλώδια που μεταφέρουν εναλλασσόμενο AC ρεύμα.

Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο καλώδιο κατά την εγκατάσταση φ/β συστημάτων είναι καλώδιο με μόνωση λάστιχο και μανδύα από νεοπρένιο, όπου η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του είναι έως 60°C. [37]

Για αυτόν το λόγο οι κατασκευαστές προχώρησαν στην δημιουργία νέων τύπων καλωδίων ειδικά κατασκευασμένων για χρήση σε φ/β εγκαταστάσεις (solar cables)[38]. Τα νέα αυτά καλώδια έχουν χαρακτηριστική αντοχή στις καιρικές συνθήκες και σε υπεριώδη ακτινοβολία καθώς αντέχουν και σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών της τάξης από -55 °C έως 125°C. Οι διατομές των καλωδίων που χρησιμοποιούνται στις φ/β εγκαταστάσεις κυμαίνονται συνήθως από 4 mm² έως 16 mm². Ο ακριβής προσδιορισμός της διατομής των καλωδιώσεων εξαρτάται κυρίως από τα άνω όρια των απωλειών των καλωδίων που θέτουμε. Η αύξηση του μήκους των καλωδίων συνεπάγεται γραμμική αύξηση των απωλειών. Το ποσοστό της πτώσης τάσης δίδεται από την Εξίσ.4.16

$$\frac{\delta V}{V} \% = \frac{i}{V_s} \times \left(\frac{\Omega}{kft} \right) \times \left(\frac{2 \times l}{1000} \right) \times 100\% \quad (4.16)$$

Ομαδοποιούμε τις απώλειες αυτές ως εξής, βλ.Εικ.4.1

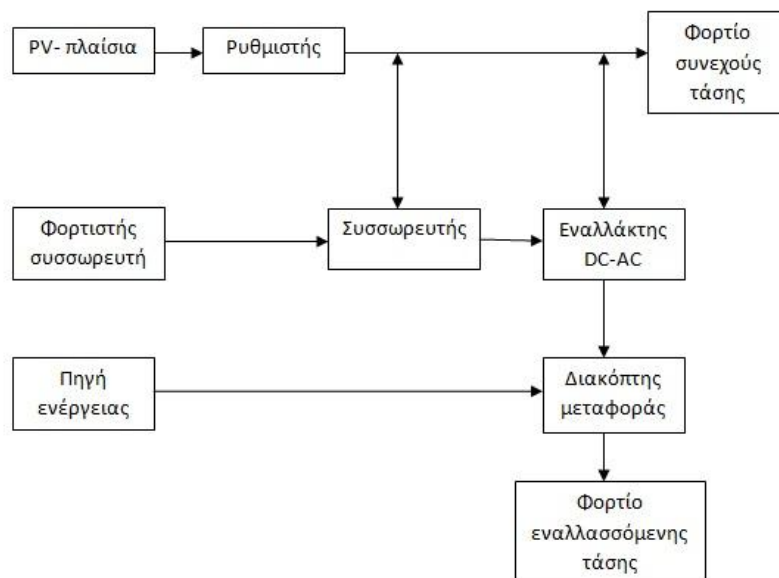
Απώλειες φορτίων στην διαδρομή DC:.

Στις απώλειες των φορτίων αυτών λαμβάνουμε υπόψη το ποσοστό του 2% στις καλωδιώσεις για τα φορτία που εξυπηρετούνται απευθείας από την φ/β γεννήτρια.

Για τα φορτία που εξυπηρετούνται μέσω των συσσωρευτών έχουμε 5% απώλειες στον ελεγκτή φόρτισης και στον αντιστροφέα. (βλ.κεφ4.6 και 4.7) και 15% λόγω της απόδοσης των συσσωρευτών (βλ.κεφ4.5).

Απώλειες φορτίων AC διαδρομή:

Στις απώλειες των φορτίων που εξυπηρετούνται απευθείας από την φ/β γεννήτρια μέσω του αντιστροφέα DC/AC, υφίστανται απώλειες της τάξεως του 2% στις καλωδιώσεις και 5% απώλειες στον αντιστροφέα. (βλ.κεφ4.6)



Εικόνα.4.1. Διαδρομές DC-AC. Πηγή: [Εφαρμογή SMA Sunny Design 2.3].

4.5 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Ένα βασικό χαρακτηριστικό ενός φ/β συστήματος είναι ότι η ενέργεια παράγεται μόνο όταν το ηλιακό φως είναι διαθέσιμο. Για αυτόν τον λόγο ένα σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας είναι απαραίτητο για να παρέχει ισχύ στα φορτία κατά την διάρκεια της νύχτας και των περιόδων με χαμηλή ή και καθόλου ηλιοφάνεια. Μέχρι στιγμής ο πιο κοινός τύπος αποθήκευσης της ενέργειας είναι οι

ηλεκτροχημικές συσκευές γνωστές και ως συσσωρευτές. Οι συσσωρευτές αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια υπό μορφή χημικής η οποία μπορεί να απελευθερωθεί στην συνέχεια ως ηλεκτρική. Όταν ο συσσωρευτής είναι συνδεδεμένος με ένα εξωτερικό φορτίο, η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και ρεύμα έντασης i ρέει μέσω του κυκλώματος Εικ.4.2.



Εικόνα.4.2: Συσσωρευτές. Πηγή:[Εργαστήριο ΑΠΕ, ΤΕΙ Πάτρας]

Οι βασικές λειτουργίες ενός συστήματος συσσωρευτών σε ένα φ/β σύστημα είναι να:

- Αποθηκεύουν την ενέργεια που έχει παραχθεί από το φ/β σύστημα.
- Τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τα φορτία, όταν η φ/β γεννήτρια δεν παράγει ισχύ.
- Δρουν ως σταθεροποιητές τάσης στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για την ηλεκτροδότηση των ηλεκτρικών φορτίων υπό σταθερή τάση και ρεύματα, με σκοπό την καταστολή υπερτάσεων που μπορούν να εμφανιστούν σε φ/β συστήματα.[34.35]

Οι σημαντικότεροι παράμετροι ενός συσσωρευτή είναι η χωρητικότητα του C , η τάση στα ηλεκτρόδια, οι απαιτήσεις συντήρησης και η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζονται από την χρήση του συσσωρευτή στο σύστημα, την θερμοκρασία του και την ταχύτητα φόρτισης και εκφόρτισης του.[1]

Πολλά είναι τα είδη και οι ταξινομήσεις των συσσωρευτών που κατασκευάζονται σήμερα, το κάθε ένα με συγκεκριμένο σχεδιασμό και χαρακτηριστικά απόδοσης κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές. Στα φ/β συστήματα, οι συσσωρευτές Pb-οξέος, (θεικού), και NiCd που είναι ειδικοί για ηλιακές εγκαταστάσεις, είναι οι πιο συχνές λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητας τους στο εμπόριο.[2,34]

Σε γενικές γραμμές οι συσσωρευτές μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, πρωτοβάθμιοι και δευτεροβάθμιοι συσσωρευτές.

Πρωτοβάθμιοι συσσωρευτές

Οι πρωτοβάθμιοι συσσωρευτές μπορούν να αποθηκεύσουν και να αποδώσει ηλεκτρική ενέργεια, αλλά δεν μπορούν να επαναφορτιστούν. Αυτές είναι τυπικές μπαταρίες άνθρακα-ψευδαργύρου (CZn) και μπαταρίες λιθίου (Li), που χρησιμοποιούνται συνήθως σε απλές καταναλωτικές ηλεκτρικές συσκευές. Οι πρωτοβάθμιοι συσσωρευτές δε χρησιμοποιούνται σε φ/β συστήματα επειδή δεν μπορούν να επαναφορτιστούν.

Δευτεροβάθμιοι συσσωρευτές

Ένας δευτεροβάθμιος συσσωρευτής μπορεί να αποθηκεύσει και να αποδώσει ηλεκτρική ενέργεια καθώς επίσης να επαναφορτιστεί για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά. Οι κοινοί συσσωρευτές Pb-οξέος που χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα και φ/β συστήματα είναι δευτεροβάθμιοι συσσωρευτές.

$$\text{Ενέργεια} = \text{Χωρητικότητα} \times \text{Τάση} \quad (4.17)$$

Βασικοί τύποι συσσωρευτών:

- Συσσωρευτές μολύβδου (Pb-οξέως)
- Συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου (Pb/Sb)
- Συσσωρευτές μολύβδου-ασβεστίου (Pb-Ca)
- Συσσωρευτές Pb-Sb/ Ca

Χαρακτηριστικά στοιχεία συσσωρευτών.

- **Χωρητικότητα:** Ορίζουμε ως χωρητικότητα ενός συσσωρευτή το μέγιστο φορτίο σε C , το οποίο μπορεί να αποθηκευθεί σε έναν συσσωρευτή, και ισούται με το γινόμενο της έντασης (i_{disc}) εκφόρτισης επί το χρόνο t εκφόρτισης (h), μετρούμενη σε Ah.

$$C(Ah) = i_{disc}(A) \times t(h) \quad (4.18)$$

Η **Η.Ε** σε Wh που αποθηκεύεται σε ένα συσσωρευτή με ονομαστική τάση στα άκρα του V είναι:

$$H.E = V(Volts) \times C(Ah) = V \times C (Wh) \quad (4.19)$$

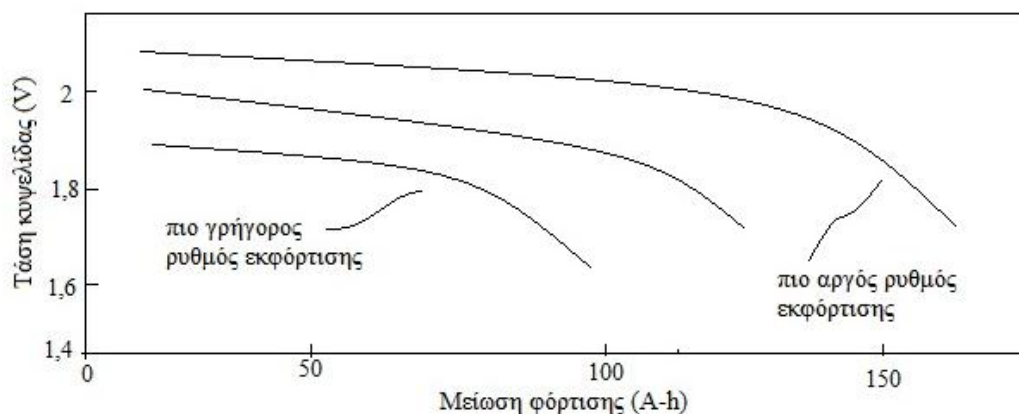
- **Ρυθμός φόρτισης-εκφόρτισης:** ορίζεται ο χρόνος σε ώρες (h), για να φορτισθεί ο συσσωρευτής ή να εκφορτισθεί στην ονομαστική τιμή της χωρητικότητας του.

Συνήθεις τιμές του είναι $t=10-20h$, οπότε το αντίστοιχο ρεύμα φόρτισης-εκφόρτισης είναι:

$$C(Ah)/t(10h) \rightarrow C/10 \text{ ή}$$

$$C(Ah)/t(20h) \rightarrow C/20$$

Όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός εκφόρτισης τόσο μειώνεται και η διαθέσιμη χωρητικότητα C , για αυτόν τον λόγο προτιμάται μικρός ρυθμός εκφόρτισης για να υπάρχει μεγαλύτερη διαθέσιμη χωρητικότητα C Σχ.4.2



Σχήμα.4.2. Επίδραση του ρυθμού εκφόρτισης στην διαθέσιμη ενέργεια για ένα συσσωρευτή Pb-οξέος. Πηγή: [Σ.Ν.ΚΑΠΛΑΝΗΣ 2004]

- **Θερμοκρασία συσσωρευτή.**

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος T_a , καθώς και η θερμοκρασία του ίδιου του συσσωρευτή T_b έχουν σημαντική επίδραση στην διαθεσιμότητα των (Ah) που μπορεί να δώσει ένας συσσωρευτής δηλαδή στη χωρητικότητα του.

Η ονομαστική χωρητικότητα ενός συσσωρευτή αναφέρεται συνήθως για 27°C θερμοκρασία περιβάλλοντος. Θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτήν έχουν σαν αποτέλεσμα την μείωση της χωρητικότητας (Ah), ενώ θερμοκρασίες υψηλότερες έχουν σαν αποτέλεσμα την ελαφρά αύξηση της χωρητικότητας (Ah) (Εξίς.4.20). Παρόλα αυτά στη περίπτωση αυτή έχουμε απώλεια νερού και μείωση του κύκλου ζωής του συσσωρευτή.

$$\frac{C}{C_0} = 0,00575 \times T + 0,54, \text{ όπου } T \text{ η θερμοκρασία } T, \text{ σε } ^\circ\text{F}. \quad (4.20)$$

- **Βάθος εκφόρτισης, Depth of Discharge (DOD)**

Ως βάθος εκφόρτισης ονομάζουμε το ποσοστό (%) της ονομαστικής χωρητικότητας C (Ah), του συσσωρευτή που μειώνεται κατά την διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης-επαναφόρτισης. [24]

Στο εμπόριο κυκλοφορούν πολλά είδη συσσωρευτών με διάφορα βάθη εκφόρτισης. Οι φθηνοί συσσωρευτές έχουν σχεδιαστεί για αβαθείς κύκλους με βάθος εκφόρτισης της τάξεως του 10%-25%. [1] Οι ακριβοί συσσωρευτές προσφέρουν μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φορτίσεων-εκφορτίσεων και συγχρόνως βαθιές εκφορτίσεις. Οι συσσωρευτές αυτοί ονομάζονται (deep cycle batteries)[35], με βάθος εκφόρτισης έως και 80% χωρίς να συντρέχει κίνδυνος καταστροφής τους.

Οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (Ni-Cd) μπορούν να ενταχθούν σε αυτήν την κατηγορία διότι μπορούν να εκφορτίζονται τελείως χωρίς να κινδυνεύουν με καταστροφή.

- **Κατάσταση φόρτισης (State of Charge) : SOC**

Το μέγεθος SOC δίνει την κατάσταση φόρτισης ενός συσσωρευτή σε ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας, δηλαδή δίνει την τιμή των Ah για κάθε χρονική στιγμή: SOC(t).

Η κατάσταση της φόρτισης ενός συσσωρευτή Pb εξαρτάται από το ειδικό βάρος που έχει ο ηλεκτρολύτης του.[1,2,34,35] Όσο μεγαλύτερο το ειδικό βάρος τόσο καλύτερη η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή.

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αποτελούνται συνήθως από έναν αριθμό στοιχείων ίδιας χωρητικότητας με ονομαστική τάση 2V, τα οποία είναι συνδεδεμένα συνήθως σε σειρά.

Το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη μετρείται με τη βοήθεια κατάλληλου πυκνόμετρου, ενώ η τάση κάθε στοιχείου (cell voltage), μπορεί να μετρηθεί εν κενό ή υπό φορτίο με την βοήθεια βολτομέτρου κατάλληλης κλίμακας.

- **Αυτο-εκφόρτιση συσσωρευτών.**

Αν αφήσουμε έναν φορτισμένο συσσωρευτή για κάποιο χρονικό διάστημα αχρησιμοποίητο τότε θα χάσει ένα ποσοστό από την χωρητικότητα του C(h), καθώς αυτοεκφορτίζεται. Η τιμή της αυτοεκφόρτισης ενός συσσωρευτή μπορεί να φτάσει το ποσοστό του 5% ανά μήνα έως και 1% ανά ημέρα καθώς εξαρτάται από την θερμοκρασία, την υγρασία του περιβάλλοντος χώρου και τη γενικότερη χημεία του συσσωρευτή.[1.36]

- **Βαθμός απόδοσης συσσωρευτή**

Κατά την διάρκεια φόρτισης ενός συσσωρευτή δεν έχουμε εξολοκλήρου αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας και αυτό διότι ένα ποσοστό της μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω της εσωτερικής αντίστασης r, του συσσωρευτή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή να μην είναι δυνατόν να αποκτηθεί το ηλεκτρικό φορτίο (Ah) ή η ηλεκτρική ενέργεια (Wh) που προσφέραμε κατά την φόρτιση του συσσωρευτή.

Μπορούν να οριστούν δύο βαθμοί απόδοσης για τους συσσωρευτές, [1]:

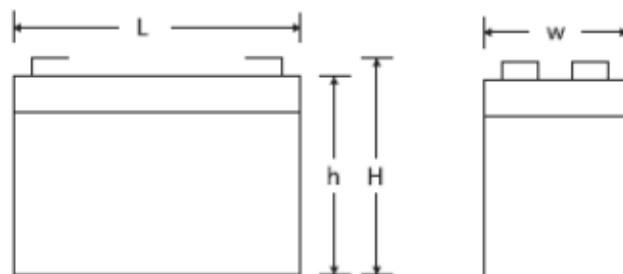
$$\text{Βαθμός απόδοσης (ρεύματος)} = \eta_{Ah} = \frac{(Ah)_{\text{εκφόρτισης}}}{(Ah)_{\text{φόρτισης}}} \quad \text{και} \quad (4.21)$$

$$\text{Βαθμός απόδοσης (ενέργειας)} = \eta_{Wh} = \frac{(Wh)_{\text{εκφόρτισης}}}{(Wh)_{\text{φόρτισης}}} \quad (4.22)$$

Ο βαθμός απόδοσης ενός συσσωρευτή ο οποίος βρίσκεται σε καλή κατάσταση είναι έχει συνήθως τιμές της τάξεως του $\eta_{Ah}=90\%$ και $\eta_{Wh}=80\%$. [36]

Πίνακας.4.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά συσσωρευτών. Πηγή:[Κατάλογος εταιρίας SUNLIGHT Creating energy AGM VRLA batteries].

Τεχνικά χαρακτηριστικά συσσωρευτών.									
Τύπος	Τάση (V)	Χωρητικότητα (Ah)		Διαστάσεις (mm)				Βάρος (kg)	Εσωτερική Αντίσταση (mΩ)
				L	W	H	H		
		20 h	10h						
		Σε 1.75 V _{pc}							
SP _B 12-33	12	34	33	195	130	155	168	10.20	10
SP _B 12-80	12	84	81	350	167	179	179	24.00	5.5
SP _B 12-150	12	166	153	485	172	240	240	47.00	3.7
SP _B 6-180	12	198	177	260	180	247	250	30.00	2



Σχήμα.4.3: Διαστάσεις συσσωρευτών

4.6 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ, DC/AC (INVERTERS)

Με τον όρο μετατροπέας νοείται η ηλεκτρονική διάταξη ισχύος η οποία μετατρέπει τη συνεχή τάση των φ/β πλαισίων σε εναλλασσόμενη ονομαστικών τιμών 230V (ανά φάση)/50 Hz. Οι μετατροπείς DC/AC αποτελούν ένα σημαντικό στοιχείο σε μια φ/β εγκατάσταση καθώς όλη η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται μέσω αυτών στους καταναλωτές. Κατά συνέπεια έχει ιδιαίτερη σημασία να χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία και υψηλή απόδοση Εικ.4.3.



Εικόνα.4.3: Μετατροπέας (inverter). Πηγή:[Εργαστήριο ΑΠΕ ΤΕΙ Πάτρας.]

Διάφοροι τύποι μετατροπέων DC/AC έχουν αναπτυχθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις των φορτίων.

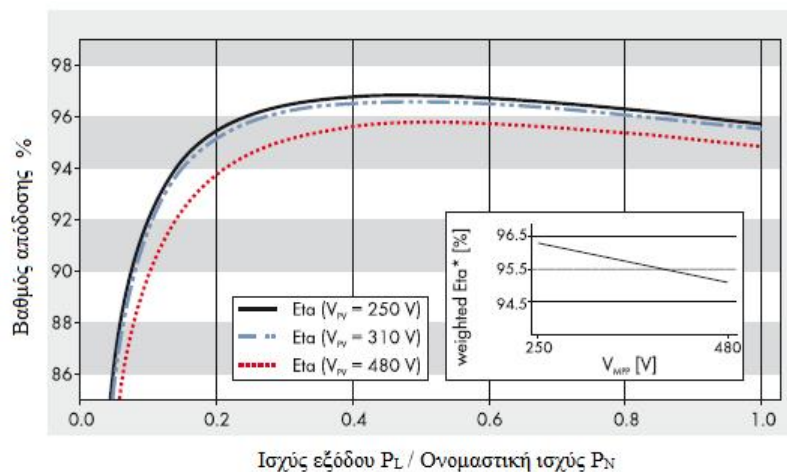
Η επιλογή του μετατροπέα DC/AC εξαρτάται:

- Από την επιθυμητή κυματομορφή στην έξοδο του μετατροπέα που είναι η είσοδος στο φορτίο.
- Από τις εισόδους (strings) του μετατροπέα.
- Από την DC τάση στην είσοδο.
- Από το πόσο ρεύμα DC μπορεί να δεχθεί.
- Από την απόδοση του μετατροπέα.

- Και από το αν βρίσκεται ως αυτοδύναμο στοιχείο στο φ/β σύστημα ή αποτελεί μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος συνδεδεμένου με το δίκτυο.

Η απόδοση ενός αντιστροφέα DC/AC εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα στο φορτίο. Η απόδοση είναι μέγιστη (95%) [10], όταν λειτουργεί περί την ονομαστική τιμή της ισχύος στην έξοδο του. Η απόδοση όμως πέφτει περίπου στο 75-80% [1.10.31] όταν λειτουργεί υπό μερικό φορτίο.

Έχει παρατηρηθεί ότι η μέγιστη απόδοση του μετατροπέα DC/AC επιτυγχάνεται κοντά στις τιμές της ονομαστικής ισχύος εξόδου. Στο Σχ.4.4 φαίνεται η απόδοση ενός μετατροπέα DC/AC ως συνάρτηση της ισχύος εξόδου P_L προς την ονομαστική του ισχύ, P_N .



Σχήμα 4.4: Απόδοση μετατροπέα ως συνάρτηση του λόγου της ισχύος εξόδου P_L προς την ονομαστική του ισχύ, P_N . Πηγή[Κατάλογος εταιρίας SMA.]

Πίνακας.4.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέα DC/AC. Πηγή Κατάλογος εταιρίας SMA.

Τεχνικά στοιχεία μετατροπέα	Sunny Boy 3800-US 240V
Είσοδος (DC)	
Μέγιστη προτεινόμενη ισχύς φ/β	4750 W
Μέγιστη DC ενέργεια (cosφ~1)	4200 W
Μέγιστη τάση εισόδου	600 V
Ελάχιστη τάση εισόδου	250 V / 285 V
Μέγιστο ρεύμα εισόδου	18 A
Έξοδος (AC)	
Μέγιστη AC ισχύς	3800
Συχνότητα AC ισχύος	60 Hz
Μέγιστη ρεύμα εξόδου	16 A
Βαθμός απόδοσης	96% / 96.8%

Στον Πίν.4.3 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων μετατροπέων DC/AC.

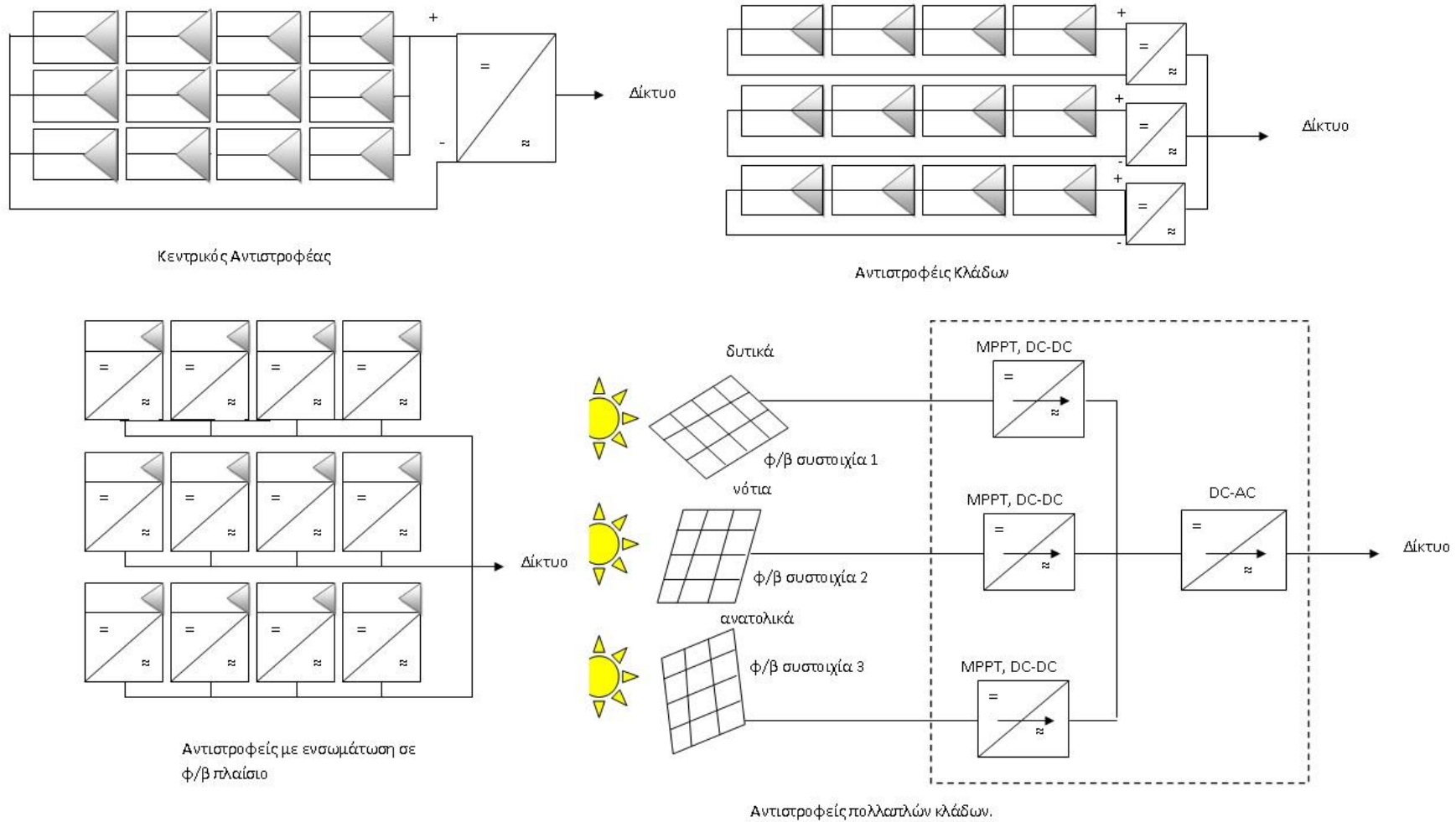
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά των διαθέσιμων μετατροπέων DC/AC. Πηγή: Σ. Ν. Καπλάνης,

Παράμετροι DC/AC	Τετραγωνικός Παλμός	Διαμορφωμένος ημιτονοειδής παλμός	DC/AC με διαμόρφωση πλάτους	Καθαρός ημιτονοειδής παλμός
Ισχύς Εξόδου σε Watts	Μέχρι 1,000,000	300-2,500	Μέχρι 20,000	Μέχρι 2,000
Αντοχή σε Απότομη Άνοδο της Ισχύος	Μέχρι 20X	Μέχρι 4X	Μέχρι 2.5X	Μέχρι 4X
Τυπική Απόδοση	70-98%	70-85%	>90%	Μέχρι 80%
Παραμόρφωση Αρμονικών	Μέχρι 40%	≈ 5%	< 5%	< 1%

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που καθορίζουν τη λειτουργική συμπεριφορά του μετατροπέα είναι η ονομαστική ισχύς στην έξοδο του, η αντοχή του σε απότομη αύξηση της ισχύος εισόδου, η απόδοση του και η παραμόρφωση των αρμονικών του. [1]

Ανάλογα με τις τεχνολογίες διασύνδεσης των φ/β πλαισίων που χρησιμοποιούνται, οι αντιστροφείς χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες (βλ.Σχ.4.5):

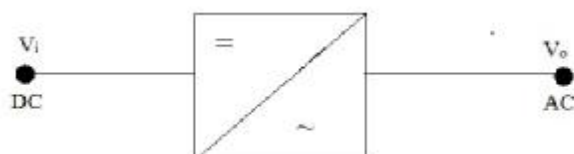
1. Κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters)
2. Αντιστροφείς κλάδων (string inverters)
3. Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων (multi-string inverters)
4. Αντιστροφείς με ενσωμάτωση σε φ/β πλαίσιο (module integrated inverters).



Σχήμα.4.5: Κατηγορίες αντιστροφέων Πηγή:

[Σ. Ν. Καπλάνης,2004]

Στο παρακάτω Σχ.4.6 φαίνεται η συμβολική παράσταση ενός αντιστροφέα DC/AC μονοφασικού που είναι και το συνηθέστερο είδος αντιστροφέα που χρησιμοποιείται σε φ/β συστήματα.



Σχήμα 4.6: Μετατροπέας DC/AC. Πηγή:[Σ. Ν. Καπλάνης,2004]

4.7 ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (CHARGE CONTROLLER)

Η σημαντικότερη λειτουργία ενός ελεγκτή φόρτισης σε ένα φ/β σύστημα είναι να διατηρεί την μπαταρία στα υψηλότερα ποσοστά φόρτισης της, να την φορτίζει υπό σταθερή τάση και με την τάση εξόδου καθώς και να την προστατεύει από υπερφορτίσεις λόγω της φ/β διάταξης και από αποφορτίσεις λόγω των φορτίων που τροφοδοτούνται από το σύστημα Εικ.4.4. Παρόλα αυτά κάποια φ/β συστήματα μπορούν να αποδώσουν τα επιθυμητά αποτελέσματα χωρίς την παρουσία φορτιστή όπως για παράδειγμα συστήματα χωρίς απρόσμενα εξωτερικά φορτία.



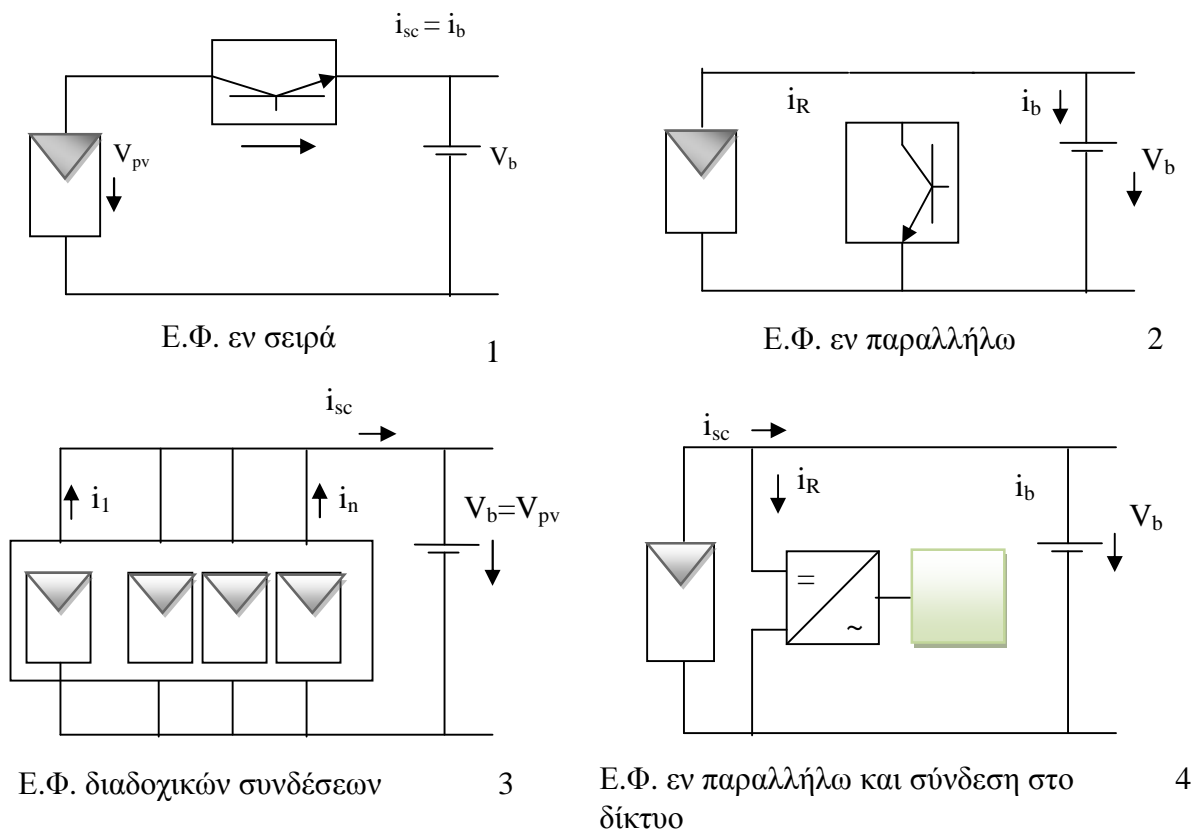
Εικόνα.4.4. Ελεγκτής φόρτισης τύπου Steca. Πηγή: Εργαστήριο ΑΠΕ ΤΕΙ Πάτρας.

Έτσι οι κυριότερες λειτουργίες ενός ελεγκτή φορτιστή είναι:

- Προστατεύει την μπαταρία από υπερφορτίσεις: περιορίζοντας την ενέργεια στην μπαταρία από τις διατάξεις όταν η μπαταρία βρίσκεται σε επίπεδα πλήρους φόρτισης.
- Προστατεύει την μπαταρία από αποφορτίσεις: αποσυνδέοντας την μπαταρία από τα φορτία όταν εκείνη φθάσει σε χαμηλά ποσοστά φόρτισης.
- Παρέχει λειτουργία έλεγχου φορτίων: για την αυτόματη σύνδεση και αποσύνδεση ηλεκτρικών φορτίων σε καθορισμένο χρόνο, για παράδειγμα αυτόματο σύστημα φωτισμού από τη δύση του ηλίου έως την ανατολή.

Οι ελεγκτές φόρτισης διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο ρυθμίζουν το ρεύμα προς τους συσσωρευτές. Οι βασικότερες κατηγορίες είναι οι εξής, βλ.Σχ.4.7

1. ελεγκτής φόρτισης εν σειρά
2. ελεγκτής φόρτισης εν παραλλήλω
3. ελεγκτής φόρτισης διαδοχικών συνδέσεων
4. ελεγκτής φόρτισης εν παραλλήλω και σύνδεση στο δίκτυο.



Σχήμα.4.7 Πηγή:[Σ. Ν. Καπλάνης,2004]

Ένας ελεγκτής φόρτισης σειράς απενεργοποιεί την μπαταρία από την φ/β διάταξη όταν αυτή είναι γεμάτη, ενώ ένας ελεγκτής φόρτισης διακλάδωσης έχει την δυνατότητα να εκτρέπει το πλεόνασμα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα βοηθητικό φορτίο, όπως για παράδειγμα ένα ηλεκτρικό θερμοσίφωνα, όταν οι μπαταρίες είναι γεμάτες.

Στο επόμενο κεφάλαιο ακολουθεί ο υπολογισμός της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος P_m και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L , που απαιτούνται για την κάλυψη των ημερήσιων φορτίων που καταναλώνονται από μία οικογένεια στην περιοχή της Πάτρας.

Ο υπολογισμός αυτός θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τις δύο μεθόδους διαστασιολόγησης φ/β συστημάτων (κλασική [1.28], στατιστική [29]), καθώς επίσης θα εφαρμοστεί και η δυναμική μέθοδος διαστασιολόγησης [28], η οποία υπολογίζει τις ελάχιστες τιμές ισχύος P_m και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L που απαιτούνται ώστε να υπάρχει αυτονομία στο σύστημα σε ποσοστό $\geq 95\%$ κατά την διάρκεια όλου του έτους.

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ P_m ΚΑΙ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ C_L ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας από ένα φ/β σύστημα βασίζεται στην ακριβή θέση εγκατάστασης του φ/β συστήματος, τα μετεωρολογικά και κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής καθώς επίσης τα χαρακτηριστικά των συσκευών που χρησιμοποιούνται και την ολοκληρωμένη ηλεκτρολογική διάταξη της φ/β εγκατάστασης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο υπολογισμός της ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος P_m και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L , ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες (φορτία ανά ημέρα) μίας οικείας στην περιοχή της Πάτρας. Στον υπολογισμό αυτόν λαμβάνονται υπόψη, οι γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής και τα στατιστικά στοιχεία που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, της ολικής ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο στην περιοχή της Πάτρας.

5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ P_m ΚΑΙ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ C_L .

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι ο υπολογισμός της ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος P_m και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L , που απαιτούνται έτσι ώστε να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες (φορτία ανά ημέρα) μίας

τετραμελούς οικογένειας στην περιοχή της Πάτρας. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό αυτό έχουν ως εξής:

- Στατιστική ανάλυση των δεδομένων της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο με χρήση της βάσης δεδομένων της NASA,[33] όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.
- Υπολογισμός της βέλτιστης γωνίας κλίσης β° των φ/β πλαισίων με χρήση του προγράμματος PVGIS [43].
- Υπολογισμός της ημερήσιας κατανάλωσης των φορτίων Q_L , μίας τετραμελούς οικογένειας ανά εποχή με χρήση του προγράμματος RETScreen.[27]
- Υπολογισμός διορθωτικών παραγόντων F και F' λόγω απωλειών ενέργειας κατά την μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος από το φ/β σύστημα στα φορτία, και από το σύστημα συσσωρευτών στο μετατροπέα DC/AC, στα φορτία. [βλ.κεφ.4]
- Υπολογισμός της ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος P_m και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L , σύμφωνα με την κλασική[1], στατιστική[18] μεθοδολογία.
- Υπολογισμός του βέλτιστου συντελεστή αυτονομίας d και της ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος P_m και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L για την κάλυψη των φορτίων, σύμφωνα με την δυναμική μεθοδολογία[28], με χρήση του προγράμματος της Ε. Καπλάνη[28].
- Επαλήθευση της αυτονομίας του συστήματος για διαστασιολόγηση με κάθε μια από τις τρεις μεθόδους με την χρήση του προγράμματος PVGIS.[43]

5.2.1 Βάση Δεδομένων PVGIS [43]

Το PV-GIS (Photovoltaic Geographical Information System)[43], είναι ένα εργαλείο έρευνας, παρουσίασης και εκτίμησης της ηλιακής ενέργειας σε οποιαδήποτε επιφάνεια σε ένα τόπο ανά ημέρα, ώρα και μήνα.

Στην βάση δεδομένων του PVGIS περιλαμβάνονται στοιχεία για την Ευρωπαϊκή ήπειρο τη λεκάνη της Μεσογείου, την Αφρική και τη Νότιο Δυτική Ασία.

Χωρίζονται στις εξής ομάδες δεδομένων.

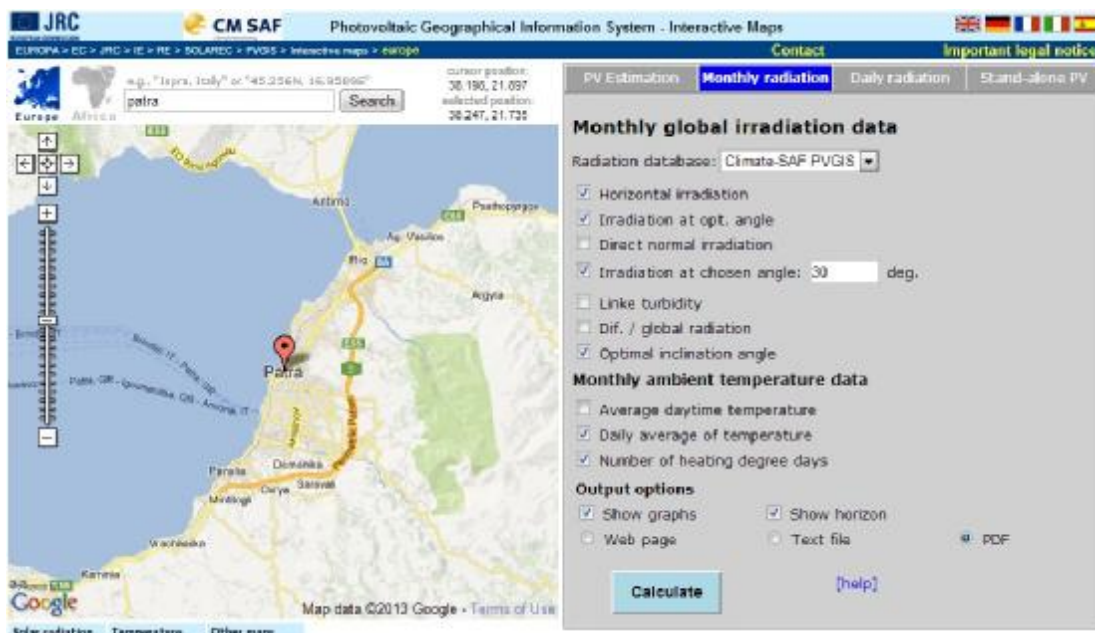
1. Γεωγραφικά δεδομένα όπως: ψηφιακά μοντέλα εδάφους, γεωγραφικές συντεταγμένες, ονομασίες και σύνορα χωρών, ονομασίες πόλεων
2. Κλιματολογικά δεδομένα που αντιπροσωπεύουν μηνιαία και ετήσια στοιχεία όπως: ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (Wh/m^2),

ακτινοβολία κατά την βέλτιστη γωνία (Wh/m^2), ακτινοβολία σε επιλεγείσα γωνία (Wh/m^2), αναλογία διάχυτης / ολικής ακτινοβολίας, συνολική ετήσια εκτίμηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (στο οριζόντιο, κάθετο ή γενικά κεκλιμένο επίπεδο, Wh), καθώς επίσης και τη βέλτιστη γωνία κλίσης (β°) των ϕ/β μονάδων ώστε να μελετηθεί η μεγιστοποίηση της ενεργειακής επίδοσης κατά τη διάρκεια του χρόνου (kWh/kWp).

3. Θερμοκρασιακά δεδομένα όπως: μέση ημερήσια θερμοκρασία ($^\circ C$) και η μέση ημερήσια θερμοκρασία από την ανατολή του ηλίου έως την δύση ($^\circ C$).

5.2.2 Υπολογισμός βέλτιστης κλίσης β , με χρήση του PVGIS [43].

Κάνοντας χρήση του προγράμματος PVGIS, το οποίο υπολογίζει την ενέργεια την οποία μπορεί να αποδώσει ένα ϕ/β σύστημα, μπορούν να υπολογιστούν στοιχεία της ηλιακής ακτινοβολίας για την Πάτρα καθώς επίσης και η βέλτιστη γωνία κλίσης β° , των ϕ/β πλαισίων όπως φαίνεται στην (Εικ.5.1) :



Εικόνα.5.1. Καρτέλα επιλογής περιοχής και δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας. Πηγή: [Πρόγραμμα PVGIS[43]].

Με χρήση της βάσης δεδομένων του PVGIS-CMSAF[43], για την περιοχή της Πάτρας με γεωγραφικές συντεταγμένες 38°14'47" North, 21°44'4" East, προέκυψαν οι τιμές (Πιν.5.1):

Πίνακας.5.1. Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία / m² στην Πάτρα.

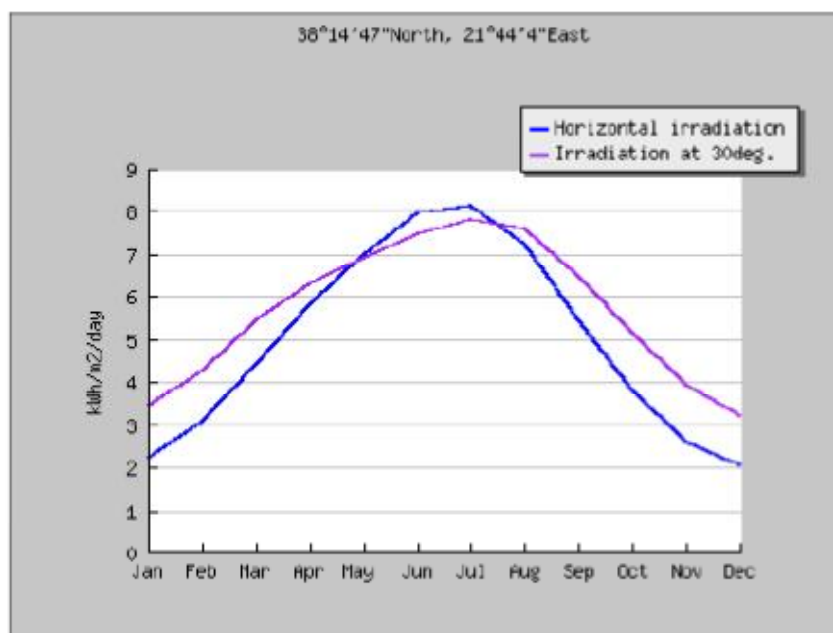
Μήνας	H _h (Wh/m ²).	H(30) (Wh/m ²).	β _{opt} (°)
Ιανουάριος	2220	3450	61
Φεβρουάριος	3050	4240	53
Μάρτιος	4430	5440	41
Απρίλιος	5810	6290	26
Μάιος	7010	6900	13
Ιούνιος	7960	7490	6
Ιούλιος	8120	7800	10
Αύγουστος	7250	7600	21
Σεπτέμβριος	5450	6450	37
Οκτώβριος	3820	5150	50
Νοέμβριος	2570	3940	59
Δεκέμβριος	2050	3190	62
Χρόνος	4990	5670	30

H_h: ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, (Wh/m²).

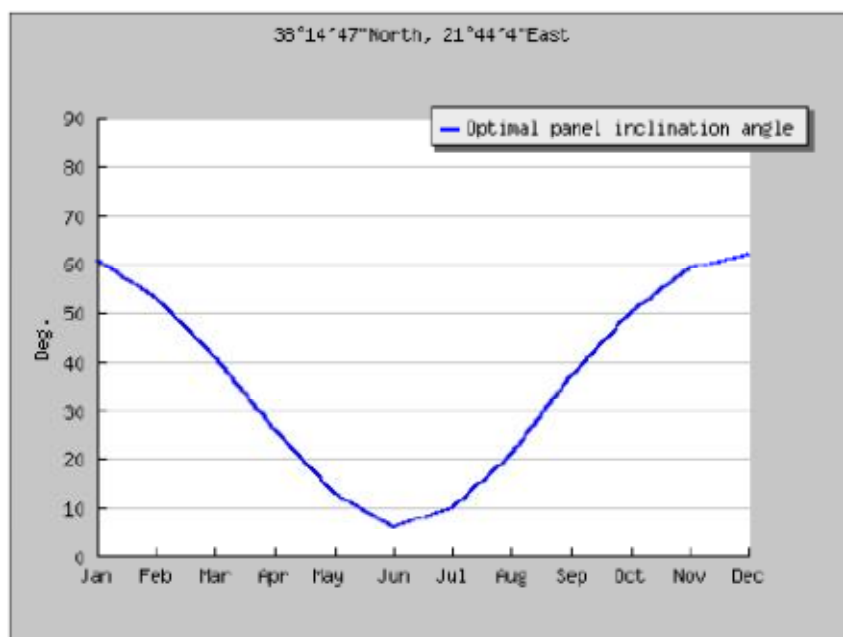
H(30): ολική ακτινοβολία υπό την βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης β°, (Wh/m²).

β_{opt}: βέλτιστη γωνία ανά μήνα.

Η βέλτιστη γωνία κλίσης των φ/β πλαισίων αντιστοιχεί στη μέγιστη ετήσια ενέργεια την οποία ένα φ/β σύστημα μπορεί να αποδώσει. Ο υπολογισμός της βέλτιστης γωνίας β°, με την χρήση του PVGIS έδειξε πώς για την περιοχή της Πάτρας βέλτιστη γωνία είναι η β=30°. Ο υπολογισμός της βέλτιστης γωνίας β° θα μπορούσε να γίνει επίσης κάνοντας χρήση των δεδομένων της NASA[33] για την ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο και μετατροπή της στο κεκλιμένο επίπεδο για διάφορες κλίσεις.



Σχήμα.5.1 Διάγραμμα ολικής ακτινοβολίας ανά μήνα για την Πάτρα α) στο οριζόντιο και β) σε κεκλιμένο επίπεδο κλίσης 30°



Σχήμα.5.2 Διάγραμμα βέλτιστης κλίσης ανά μήνα για την Πάτρα.

5.2.3 Εκτίμηση των ηλεκτρικών φορτίων με την χρήση του RETScreen [27].

Για τον καθορισμό της ημερήσιας αναγκαίας ενέργειας είναι απαραίτητο να συλλεχθούν πληροφορίες σχετικά με το είδος των συσκευών τις οποίες το φ/β σύστημα πρέπει να τροφοδοτήσει με ενέργεια. Ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

- Αναγνώριση όλων των ηλεκτρικών συσκευών που σχεδιάζεται να καλυφθούν από το φ/β σύστημα .
- Καταγραφή της κατανάλωσης σε (W), και του κύκλου φόρτισης της κάθε συσκευής.
- Εκτίμηση της ωριαίας χρήσης (hours) της συσκευής ανά ημέρα.
- Υπολογισμός της ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας ανά ημέρα (Wh/day) που προκύπτει για κάθε συσκευή.

Στους Πιν.5.2-5.4 παρουσιάζεται μια τυπική μελέτη για την ημερήσια κατανάλωση συσκευών που χρησιμοποιεί μια οικογένεια κατά την διάρκεια της ημέρας. Με την χρήση του προγράμματος διαστασιολόγησης, RETScreen International[27], έγινε υπολογισμός της ημερήσιας κατανάλωσης των φορτίων σε (Wh/d). Είναι προφανές πως η ζήτηση για ενέργεια διαφέρει από εποχή σε εποχή για αυτόν τον λόγο υπολογίστηκε η ημερήσια κατανάλωση των φορτίων σε (Wh/d), για τις εποχές Άνοιξη (Πιν.5.2), Καλοκαίρι (Πιν.5.3), Χειμώνας (Πιν.5.4).

Για ένα διώροφο σπίτι με τρία υπνοδωμάτια (γονείς και δύο παιδιά), δύο μπάνια, κουζίνα, καθιστικό, διάδρομο και γκαράζ ελήφθησαν υπόψη τα παρακάτω φορτία:

Πίνακας.5.2: Ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση κατά την Άνοιξη.

περιγραφή συσκευής	ποσότητα	ώρες λειτουργίας	ηλεκτρικό φορτίο(w)	κύκλος φόρτισης	Ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (kWh/d)
κουζίνα: Μεγάλο μάτι	1	0,2	2000	75%	300
κουζίνα: Μεσαίο μάτι	1	0,15	1500	75%	168,75
Ψυγείο με κατάψυξη 140 lt	1	24	300	40%	2880
ηλυντήριο ρούχων 60*/5h ρούχα	1	1	2800	60%	1680
ηλυντήριο πιάτων 55*/γεμάτο	1	1	1500	75%	1125
Θερμοσίφωνας 80 lt	1	0,3	3800	90%	1026
φούρνος μικροκυμάτων	1	0,05	360	90%	16,2
ηλεκτρική σκούπα	1	0,1	1000	100%	100
καφετιέρα	1	0,1	900	100%	90
τηλεόραση 32" LCD	1	3	150	100%	450
τηλεόραση 19" CRT	2	2	90	100%	360
παιγνιδομηχανή	1	2	194	100%	388
Στερεοφωνικό	1	1	30	100%	30
Η/Υ (pc+monitor 19") φορητός Υπολογιστής	2	3	250	87,50%	1312,5
	1	2	65	80%	104
πιστολάκι μαλλιών	1	0,07	750	100%	52,5
Απορροφητήρας	1	0,15	160	100%	24
Τοστιέρα	1	0,07	600	50%	21
κόρτα γραφείο	1	0,05	100	100%	5
κλιματιστικό (ψύξη 9000 Btu για 18/20 τ.μ)	3	0	850	60%	0
κλιματιστικό (ψύξη 12000 Btu για 25 τ.μ)	1	0	1200	60%	0
λάμπες φωτισμού δωματίων οικονομίας	3	2	18	100%	108
λάμπες φωτισμού εξωτερικού χώρου οικονομίας	5	3	18	100%	270
λάμπες κουζίνας-καθιστικού οικ.	6	3	23	100%	414
ανεμιστήρας δαπέδου	1	1	60	100%	60
σύνολο	40	49,24	18718		10984,95

Πίνακας.5.3: Ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση κατά το Καλοκαίρι.

περιγραφή συσκευής	ποσότητα	ώρες λειτουργίας	ηλεκτρικό φορτίο(w)	κύκλος φόρτισης	Ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο (kWh/d)
κουζίνα: Μεγάλο μάτι	1	0,2	2000	75%	300
κουζίνα: Μεσαίο μάτι	1	0,15	1500	75%	168,75
Ψυγείο με κατάψυξη 140 lt	1	24	300	50%	3600
ηλυντήριο ρούχων 60*/5h ρούχα	1	1	2800	60%	1680
ηλυντήριο πιάτων 55*/γεμάτο	1	1	1500	75%	1125
Θερμοσίφωνας 80 lt	1	0,3	3800	90%	1026
Φούρνος μικροκυμάτων	1	0,05	360	90%	16,2
ηλεκτρική σκούπα	1	0,1	1000	100%	100
καφετιέρα	1	0,1	900	100%	90
τηλεόραση 32" LCD	1	3	150	100%	450
τηλεόραση 19" CRT	2	1,5	90	100%	270
παιγνιδομηχανή	1	2	194	100%	388
Στερεοφωνικό	1	1	30	100%	30
Η/Υ (pc+monitor 19") φορητός Υπολογιστής	2	3	250	87,50%	1312,5
	1	2	65	80%	104
πιστολάκι μαλλιών	1	0,07	750	100%	52,5
Απορροφητήρας	1	0,15	160	100%	24
Τοστιέρα	1	0,07	600	50%	21
κόρτα γραφείο	1	0,05	100	100%	5
κλιματιστικό (ψύξη 9000 Btu για 18/20 τ.μ)	3	4	850	60%	6120
κλιματιστικό (ψύξη 12000 Btu για 25 τ.μ)	1	3	1200	60%	2160
λάμπες φωτισμού δωματίων οικονομίας	3	2	18	100%	108
λάμπες φωτισμού εξωτερικού χώρου οικονομίας	5	3	18	100%	270
λάμπες κουζίνας-καθιστικού οικ.	6	3	23	100%	414
ανεμιστήρας δαπέδου	1	1	60	100%	60
σύνολο	40	55,74	18718		19894,95

Πίνακας.5.4: Ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση κατά το Χειμώνα.

περιγραφή συσκευής	Ποσότητα	ώρες λειτουργίας	ηλεκτρικό φορτίο (w)	κύκλος φόρτισης	Ημερήσια ηλεκτρικό φορτίο (wh/d)
κονζίνα: Μεγάλο μάτι	1	0,3	2000	75%	450
κονζίνα: Μικρό μάτι	1	0,2	1500	75%	225
ψυγείο με κατάψυξη 140 lt	1	24	300	30%	2160
πλυντήριο ρούχων 60°/5kg ρούχα	1	1	2800	60%	1680
πλυντήριο πιάτων 55°/νεμάσο	1	1	1500	75%	1125
θερμασίφωνα 80 lt	1	1	3800	90%	3420
φούρνος μικροκυμάτων	1	0,05	360	90%	16,2
ηλεκτρική σκούπα	1	0,1	1000	100%	100
καφετιέρα	1	0,1	900	100%	90
τηλεόραση 32" LCD	1	4	150	100%	600
τηλεόραση 19" CRT	2	3	90	100%	540
παιχνιδιομηχανή	1	2	194	100%	388
στερεοφωνικό	1	1	30	100%	30
η/γ (pc+monitor 19")	2	3	250	87,50%	1312,5
φορητός υπολογιστής	1	2	65	80%	104
πίστολα μαλλιών	1	0,1	750	100%	75
απορροφητήρας	1	0,3	160	100%	48
τοστιέρα	1	0,07	600	50%	21
πέδρα νκαράζ	1	0,05	100	100%	5
κυκλοφορητής σταθερών στροφών	1	4	20	100%	80
λάμπες φωτισμού εσωτερικών οικονομίας	3	2	18	100%	108
λάμπες φωτισμού εξωτερικού χώρου οικονομίας	5	1	18	100%	90
λάμπες κουζίνας-καθιστικού οικ	6	5	25	100%	690
σύνολο	36	55,27	16628		13357,7

Είναι προφανές ότι το προφίλ το φορτίων διαφέρει εκτός από εποχή σε εποχή και κατά την διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Για αυτό τον λόγο είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός του αρχικού υπολογισθέντος αριθμού του ημερήσιου ηλεκτρικού φορτίου Q_L (Wh/d), σε δύο μέρη έτσι ώστε να ισχύει η Εξίσ.5.1

$$Q_{Ltotal} = Q_{Lnight} + Q_{Lday} \quad (5.1)$$

Για την Άνοιξη προκύπτει:

$$Q_{Ltotal} = 10984.95 \text{ Wh/d}$$

Με φορτία ημέρας και νύχτας

$$Q_{Lday} = 4984.95 \text{ Wh/d και } Q_{Lnight} = 6000 \text{ Wh/d.}$$

Για το Καλοκαίρι προκύπτει:

$$Q_{Ltotal} = 19894.95 \text{ Wh/d}$$

Με φορτία ημέρας και νύχτας

$$Q_{Lday}=11500 \text{ Wh/d και } Q_{Lnight}=8394.95 \text{ Wh/d.}$$

Για το Χειμώνα προκύπτει:

$$Q_{Ltotal}=13357.7 \text{ Wh/d}$$

Με φορτία ημέρας και νύχτας

$$Q_{Lday}=4857.7 \text{ Wh/d και } Q_{Lnight}= 8500 \text{ Wh/d.}$$

5.2.4 Υπολογισμός διορθωτικών παραγόντων F και F'.

Κατά την μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος από το φ/β σύστημα στα φορτία (βλ.κεφ.4.3) και από το σύστημα συσσωρευτών στον μετατροπέα -DC/AC και τελικά στα φορτία παρατηρείται απώλεια ισχύος. Για αυτόν τον λόγο οι διορθωτικοί παράγοντες F και F', [28] υπολογίζονται ως εξής:

$$F = C_{TPV} \times C_{inverter-charger} \times C_{bat} \times C_{cables}$$

$$F' = C_{inverter-charger} \times C_{bat} \times C_{cables}$$

Όπου : C_{TPV} είναι ο συντελεστής μείωσης της ισχύος εξόδου του φ/β λόγω θερμοκρασίας του φ/β T_{pv} .

Υπολογίζεται για το Χειμώνα:

Με $T_a=14^\circ\text{C}$ και $I_T=700 \text{ W/m}^2$ η εξίσωση $T_{pv}=T_a + 0.03 \times I_T$ [44] δίνει $T_{pv}=14+0.03 \times 700= 21+14=35^\circ \text{C}$.

Σύμφωνα με την θερμοκρασιακή παράμετρο της ισχύος

$$\frac{1}{P_m} \frac{dP_m}{dT} \approx -0.4\%/^\circ\text{C}$$

Η σχετική μείωση της ισχύος είναι:

$$\frac{dP_m}{P_m} = 0.4\% \times (T_{pv} - 25^\circ\text{C}) = -0.4\% \times 10 = -4\%$$

Και για το Καλοκαίρι:

Με $T_a=35^\circ\text{C}$ και $I_T=1000\text{ W/m}^2$ ομοίως $T_{pv}=T_a + 0.03 \times 1000=30+35=65^\circ\text{C}$.

$$\frac{dP_m}{P_m} = 0.4\% \times (T_{pv} - 25^\circ\text{C}) = -0.4\% \times 40 = -16\%$$

$C_{TPV}(35^\circ)=96\%$ κατά των Χειμώνα και $C_{TPV}(65^\circ)=84\%$ το Καλοκαίρι.

$C_{\text{inverter-charger}}$ είναι ο συντελεστής μεταφοράς ενέργειας στο μετατροπέα και τον ελεγκτή φόρτισης, $C_{\text{inverter-charger}}=95\%$ σύμφωνα με την καμπύλη απόδοσης των σύγχρονων μετατροπέων DC/AC.(βλ.κεφ.4.6)

C_{bat} είναι ο συντελεστής μεταφοράς ενέργειας κατά την φόρτιση και εκφόρτιση των συσσωρευτών, υπολογίζεται σε $C_{\text{bat}}=85\%$.[34]

C_{cables} είναι ο συντελεστής μεταφοράς ενέργειας στις καλωδιώσεις $C_{\text{cables}}=98\%$. Η υπόθεση αυτή προέρχεται από την οδηγία για την ελαχιστοποίηση των απωλειών. [1] Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί ο διορθωτικός παράγοντας F και F' ως εξής:

$$\Pi_{ci} = 0.96 \times 0.95 \times 0.85 \times 0.98 = 0.76$$

$$\Pi_{ci}' = 0.95 \times 0.85 \times 0.98 = 0.79$$

Άρα οι συντελεστές διόρθωσης $F=1/0.76=1.3$, και $F'=1/0.79=1.2$ ωστόσο ο αριθμός διαφοροποιείται κατά το Καλοκαίρι όπως αναφέρεται παραπάνω διότι ο συντελεστής διόρθωσης της θερμοκρασίας του φ/β είναι της τάξεως του 84% άρα:

$$F=0.84 \times 0.95 \times 0.85 \times 0.98 = 0.66. \text{ Άρα } F=1/0.66=1.5 \text{ και } F'=1.2$$

5.2.5 Ανάπτυξη αλγορίθμου σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab για τον υπολογισμό της ελαχίστης απαιτούμενης ισχύος P_m και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L .

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος P_m (kWp) και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L (Ah), για το φ/β σύστημα το οποίο θα καλύψει τα

φορτία Q_L που υπολογίστηκαν παραπάνω αναπτύχθηκε αλγόριθμος σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab ο οποίος ακολουθεί τα εξής βήματα :

1. Υπολογισμός της ηλιακής απόκλισης δ° . (βλ.κεφ.1.1)
2. Υπολογισμός γωνιών ω_s και ω'_s . (βλ.κεφ.1.1)
3. Υπολογισμός της συνολικής ακτινοβολίας που δέχεται μια οριζόντια επιφάνεια στο όριο της ατμόσφαιρας, κατά τη διάρκεια μιας ημέρας H_o (kWh/m^2).
4. Υπολογισμός του μέσου μηνιαίου συντελεστής αιθριότητας \bar{K}_T . (βλ.κεφ.1.5)
5. Υπολογισμός του λόγου της μέσης μηνιαίας ημερήσιας διάχυτης ακτινοβολίας προς την αντίστοιχη ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$. [1] (βλ.κεφ.1.5)
6. Υπολογισμός του μέσου συντελεστή μετατροπής της άμεσης ακτινοβολίας στο οριζόντιο προς αυτή που προσπίπτει σε κεκλιμένες επιφάνειες γνωστής κλίσης R_b . (βλ.κεφ.1.5)
7. Υπολογισμός του μέσου συντελεστή μετατροπής της ακτινοβολίας από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο \bar{R} . (βλ.κεφ.1.5)
8. Υπολογισμός του d_{n-cr} για τα φορτία του συστήματος.(βλ.κεφ.4.1)
9. Υπολογισμός P_m , C_L με δύο μεθόδους, κλασική [1] και στατιστική [18].

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε σε MATLAB και παρουσιάζεται στην Εικ.5.2 χρησιμοποιεί τις συναρτήσεις `year=readnasadata(array)` και `hmonth=rephmonth(year)` (βλ.Κεφ.3.2).

Με την κλασική μέθοδο τα P_m και C_L προσδιορίστηκαν ως εξής:

$$P_m = \frac{d_{n-cr} \times Q_L \times F}{PSH_m \times R_m} \quad \text{και} \quad C_L = \frac{d_{n-cr} \times Q_L \times F'}{V \times DOD}$$

Όπου:

d_{n-cr} : είναι ο παράγοντας αυτονομίας d , για τα μη κρίσιμα φορτία του συστήματος, φορτία δηλαδή που απαιτούν τροφοδότηση τουλάχιστον κατά το 95% του χρόνου, [6,30] (βλ.κεφ.4.1)

Q_L : η ημερήσια κατανάλωση των φορτίων

F και F' διορθωτικοί παράγοντες λόγω απωλειών

PSH_{min} : η ελάχιστη τιμή του PSH για τον μήνα που γίνεται η διαστασιολόγηση (βλ.κεφ.4.1.1)

V: η τάση των συσσωρευτών (V=24 V)

DOD: το βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών (βλ.κεφ.4.4)

R_m: χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο στο κεκλιμένο. (βλ.κεφ.1.5)

Στην στατιστική μέθοδο [18] χρησιμοποιείται διορθωτικός παράγοντας αντί του d, στις σχέσεις των P_m και C_L του προηγούμενου τρόπου:

$$P_{m,d} = P_m \times \left(1 + \frac{2 \times \sqrt{d_{n-cr} \times \sigma_{H(nj)}}}{H_m(nj)}\right) \text{ και } C_{L,d} = C_L \times \left(1 + \frac{2 \times \sqrt{d_{n-cr} \times \sigma_{H(nj)}}}{H_m(nj)}\right)$$

```
1 - month=input('dwse mhna:');
2 - pi=3.14159
3 - f=38*pi/180; %latitude
4 - if (month==4)
5 - n=105;
6 - q1=10984.95/1000; % sunoliko fortio Q gia thn anoiksi se kwh/d
7 - pshmin=min(april);
8 - hmonth=rephmonth(year);
9 - pshp=hmonth(4).mean;
10 - sh=hmonth(4).std;
11 - elseif (month==7)
12 - n=197;
13 - q1=19894.95/1000; % sunoliko fortio Q gia to kalokairi se kwh/d
14 - pshmin=min(july);
15 - hmonth=rephmonth(year);
16 - pshp=hmonth(7).mean;
17 - sh=hmonth(7).std;
18 - elseif (month==12)
19 - n=350;
20 - q1=13357.7/1000; % sunoliko fortio Q gia ton xeimvna se kwh/d
21 - pshmin=min(dec);
22 - hmonth=rephmonth(year);
23 - pshp=hmonth(12).mean;
24 - sh=hmonth(12).std;
25 - else
26 - fprintf('lathos mhnas\n');
27 - end
28 - delta=23.45*sin(2*pi*(284+n)/365)*pi/180; % δ
29 - bhta=30*pi/180; % β
30 - ws=acos(-tan(f)*tan(delta)); % ws
31 - wst=min(ws,acos(-tan(f-bhta)*tan(delta))); % ws'
32 - ho=((86400*1.367/pi)*(1+0.033*cos(2*pi*n/365))*(cos(f)*cos(delta)*sin(ws)+ws*sin(f)*sin(delta)))/3600;
33 - ktm=pshp/ho;
34 - hdh=1.39-4.03*ktm+5.53*ktm^2-3.11*ktm^3;
35 - Rbm=(cos(f-bhta)*cos(delta)*sin(wst)+wst*sin(f-bhta)*sin(delta))/(cos(f)*cos(delta)*sin(ws)+ws*sin(f)*sin(delta));
36 - Rm=(1-hdh)*Rbm+hdh*((1+cos(bhta))/2);
37 - d=-0.48*pshmin+4.58
38 - pm=(q1*1.3*d)/(pshp*Rm) %klasikh methodos
39 - DOD=0.8;
40 - V=24;
41 - CL=(d*q1*1.2)/(V*DOD) %klasikh methodos
42 - hm=pshp;
43 - Pmcor=(q1*1.3*(1+2*sh*sqrt(d)/hm))/(pshp*Rm) %statistikh methodos
44 - CLcor=(q1*1.2*(1+2*sh*sqrt(d)/hm))/(V*DOD) %statistikh methodos
```

Εικόνα.5.2. Αλγόριθμος σε γλώσσα MATLAB.

5.2.6 Δυναμική μέθοδος διαστασιολόγησης. [28]

Κάνοντας χρήση του προγράμματος της Ε. Καπλάνη [28], ανεπτυγμένο σε Matlab, γίνεται εφαρμογή μιας νέας δυναμικής μεθόδου διαστασιολόγησης [28] βασισμένη σε εξομοίωση για τον προσδιορισμό των ελάχιστων P_m και C_L , που απαιτούνται για την κάλυψη των φορτίων με προκαθορισμένο ποσοστό επιτυχίας $\geq 95\%$.

Η δυναμική αυτή μέθοδος [28] υπολογίζει τον βέλτιστο παράγοντα αυτονομίας d_{opt} , και τις ελάχιστες τιμές των P_m και C_L , και εξομοιώνει την συμπεριφορά του συστήματος, δηλαδή την ενέργεια που δίνει το φ/β σύστημα E_{pv} , την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών SOC (βλ.κεφ.4.), την κατανάλωση ενέργειας από τα φορτία και την περίσσεια ενέργειας, για τη διάρκεια όλου του μήνα, αλλά και όλου του έτους.

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ.

Η διαστασιολόγηση του φ/β συστήματος έγινε με βάση τρεις εποχές του χρόνου και ξεχωριστά με τις τρεις μεθόδους διαστασιολόγησης για την κάλυψη των φορτίων μιας τετραμελούς οικογένειας στην περιοχή της Πάτρας κατά την διάρκεια όλου του έτους.

5.3.1 Διαστασιολόγηση για τον Χειμώνα με βάση τον Δεκέμβριο.

Αναλυτικότερα για διαστασιολόγηση κατά το Χειμώνα χρησιμοποιήθηκε ο μήνας Δεκέμβριος με στοιχεία όπως:

$$Q_L=13358 \text{ (Wh/d)}$$

$$Q_{L\text{day}}=4857.7 \text{ Wh/d και } Q_{L\text{night}}=8500 \text{ Wh/d, } d_{n-cr}=4.54$$

$$F=1.3 \text{ και } F'=1.2, \beta=30^\circ, \text{ DOD}=80\%, V=24V, H_m=1.73 \text{ kWh/m}^2, R_m=1.5747$$

Τα αποτελέσματα για την ελάχιστη εγκατεστημένη ισχύ P_m και χωρητικότητα συσσωρευτών C_L , που έδωσε ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την κλασική[1] και

στατιστική[18] μέθοδο και διαστασιολόγηση με βάση το Δεκέμβριο παρουσιάζονται στον Πίν.5.6

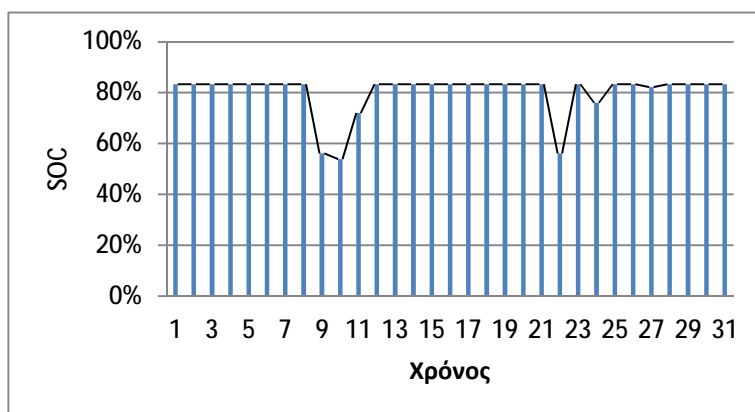
Με βάση το μήνα Δεκέμβριο και την χρήση του δυναμικού μοντέλου διαστασιολόγησης [28] υπολογίστηκαν οι ελάχιστες τιμές των P_m και C_L , που απαιτούνται για την κάλυψη των φορτίων $Q_{Lday} = 4857.7$ (Wh/d) και $Q_{Lnight} = 8500$ (Wh/d) (βλ.κεφ.5.2). Το πρόγραμμα εξομοίωσης [28] έδωσε παράγοντα αυτονομίας $d=3$ και τιμές $P_m=21829$ (Wp), $C_L=2539$ (Ah), με ποσοστό επιτυχίας 97% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των άλλων δύο μεθόδων. Για το μήνα Δεκέμβριο ελήφθησαν τα ακόλουθα αποτελέσματα: Πιν.5.7, Σχ.5.3, Σχ.5.4.

Πίνακας.5.6 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης με βάση τον μήνα Δεκέμβριο για τις τρεις μεθόδους.

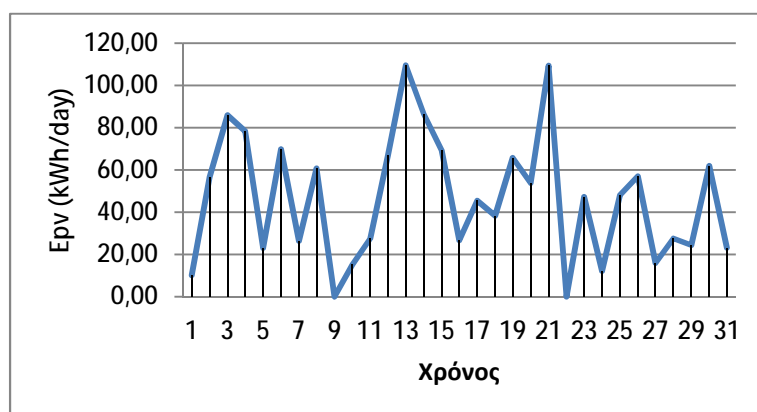
	P_m (Wp)	C_L (Ah)	Παράγοντας αυτονομίας d	Q_L (Wh/d)	Ποσοστό Επιτυχίας
Κλασική μέθοδος	32600	3790	$d_{ncr} = 4.54$	13358	95%
Στατιστική μέθοδος	25200	2930	$d_{ncr} = 4.54$	13358	95%
Δυναμική μέθοδος	21829	2539	$d_{opt} = 3$	13358 με $Q_{Lday} = 4857.7$ Wh/d και $Q_{Lnight} = 8500$ Wh/d	97%

Πίνακας.5.7. Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για την δυναμική μέθοδο με βάση το Δεκέμβριο.

Days	SOC	Ερν(kWh/day)
1	83%	10.12
2	83%	56.56
3	83%	85.80
4	83%	78.29
5	83%	22.98
6	83%	69.86
7	83%	26.35
8	83%	60.74
9	56%	0.00
10	54%	15.15
11	72%	27.52
12	83%	66.75
13	83%	109.46
14	83%	86.42
15	83%	69.22
16	83%	26.59
17	83%	45.36
18	83%	38.31
19	83%	65.64
20	83%	53.70
21	83%	109.39
22	56%	0.00
23	83%	47.24
24	76%	12.07
25	83%	48.04
26	83%	56.86
27	82%	15.89
28	83%	27.52
29	83%	24.34
30	83%	61.96
31	83%	23.15



Σχήμα.5.3. Κατάσταση φόρτισης SOC των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια του μήνα Δεκεμβρίου.



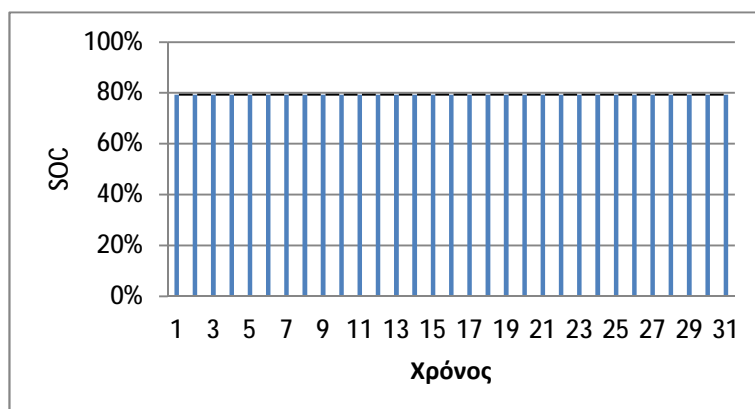
Σχήμα.5.4. Διάγραμμα εξομοίωσης της ενέργειας φ/β ανά ημέρα κατά τη διάρκεια του μήνα Δεκεμβρίου.

Σύμφωνα με τη διαστασιολόγηση κατά το μήνα Δεκέμβριο προέκυψε ότι οι τιμές των P_m και C_L της στατιστικής[18] μεθόδου είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της κλασικής[1] μεθόδου. Επιπλέον οι τιμές των P_m και C_L της δυναμικής μεθόδου[28] παρουσιάζουν μικρότερες τιμές από εκείνες των άλλων δύο μεθόδων διαστασιολόγησης (κλασικής, στατιστικής) που παράλληλα επαρκούν ώστε να καλύψουν με αυτονομία το σύστημα ακόμα και κατά τη διάρκεια ημερών με λιγοστή ή και καθόλου ηλιοφάνεια όπως η 9-10-11 ημέρα του μήνα Δεκεμβρίου (Σχ.5.4). Επίσης το ποσοστό επιτυχίας της δυναμικής μεθόδου (97%) είναι μεγαλύτερο των άλλων δύο μεθόδων διαστασιολόγησης (95%).

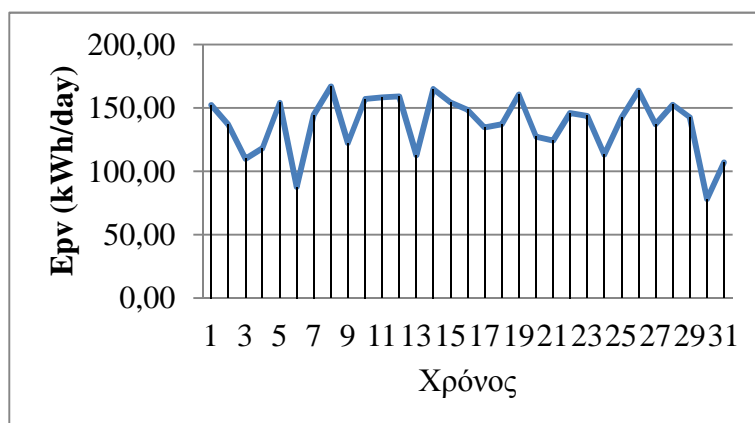
Με βάση τις τιμές που προέκυψαν με τη δυναμική μέθοδο και κατά τον μήνα Δεκέμβριο, το πρόγραμμα [28] εξομοιώνει τη συμπεριφορά του συστήματος και για τους υπόλοιπους μήνες του έτους. Στον Πίν.5.8 και στα Σχ.5.5.-5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εξομοίωσης για το Καλοκαίρι και ειδικότερα τον μήνα Ιούλιο όπου χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα φορτία με: $Q_{Ltotal} = 19894.95$ (Wh/d) και φορτία ημέρας και νύχτας, $Q_{Lday} = 11500$ (Wh/d) και $Q_{Lnight} = 8394.95$ (Wh/d), όπου και φαίνεται ότι το σύστημα λειτουργεί με επιτυχία καθ' όλη τη διάρκεια του μήνα.

Πίνακας.5.8 Αποτελέσματα δυναμικής μεθόδου διαστασιολόγησης Δεκεμβρίου κατά τον Ιούλιο.

Days	SOC	Ερν
1	0.79	152.23
2	0.79	136.99
3	0.79	109.95
4	0.79	118.23
5	0.79	154.18
6	0.79	87.61
7	0.79	144.51
8	0.79	167.02
9	0.79	122.24
10	0.79	157.19
11	0.79	158.30
12	0.79	159.04
13	0.79	112.56
14	0.79	164.90
15	0.79	154.32
16	0.79	148.45
17	0.79	134.69
18	0.79	137.15
19	0.79	160.55
20	0.79	127.28
21	0.79	124.29
22	0.79	146.00
23	0.79	143.80
24	0.79	113.17
25	0.79	142.40
26	0.79	163.77
27	0.79	137.21
28	0.79	152.54
29	0.79	142.78
30	0.79	78.14
31	0.79	107.03



Σχήμα.5.5. Κατάσταση φόρτισης SOC των συσσωρευτών κατά την διάρκεια του μήνα Ιουλίου, με διαστασιολόγηση του φ/β συστήματος με βάση το μήνα Δεκέμβριο.



Σχήμα.5.6. Διάγραμμα εξομοίωσης ενέργειας που παράγει το φ/β ανά ημέρα κατά την διάρκεια του μήνα Ιουλίου, με διαστασιολόγηση του φ/β συστήματος με βάση το μήνα Δεκέμβριο.

Όπως φαίνεται στον Πιν.5.8 και στα Σχ.5.5-5.6 η διαστασιολόγηση με βάση το μήνα Δεκέμβριο και τη δυναμική μέθοδο καλύπτει με αυτονομία το φ/β σύστημα με ποσοστό επιτυχίας 100% και κατά την διάρκεια του Καλοκαιριού και το μήνα Ιούλιο.

5.3.2 Διαστασιολόγηση για την Άνοιξη με βάση τον μήνα Απρίλιο.

Αναλυτικότερα για διαστασιολόγηση κατά την Άνοιξη χρησιμοποιήθηκε ο μήνας Απρίλιος με στοιχεία όπως:

$$Q_L=10985 \text{ (Wh/d)}$$

$$Q_{L\text{day}}=4984,95 \text{ Wh/d και } Q_{L\text{night}}= 6000 \text{ Wh/d., } d_{\text{ncr}}= 3.92$$

$$F=1.3 \text{ και } F'=1.2, \beta=30^\circ, \text{DOD}=80\%, V=24\text{V, } H_m=4.89 \text{ kWh/m}^2, R_m=1.02$$

Τα αποτελέσματα για την ελάχιστη εγκατεστημένη ισχύ P_m και χωρητικότητα συσσωρευτών C_L , που έδωσε ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την κλασική[1] και στατιστική[18] μέθοδο και διαστασιολόγηση με βάση τον Απρίλιο παρουσιάζονται στον Πίν.5.9

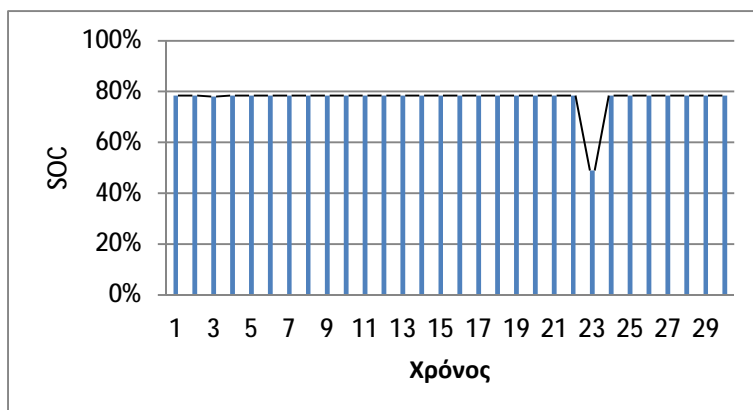
Με βάση το μήνα Απρίλιο και τη χρήση του δυναμικού μοντέλου διαστασιολόγησης [28] υπολογίστηκαν οι ελάχιστες τιμές των P_m και C_L , που απαιτούνται για την κάλυψη των φορτίων $Q_{L\text{day}}=4984,95 \text{ (Wh/d)}$ και $Q_{L\text{night}}= 6000 \text{ (Wh/d)}$ (βλ.κεφ.5.2). Το πρόγραμμα εξομοίωσης [28] έδωσε παράγοντα αυτονομίας $d=2$ και τιμές $P_m=5590 \text{ (Wp)}$, $C_L=1390 \text{ (Ah)}$, με ποσοστό επιτυχίας 96% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των άλλων δύο μεθόδων. Για τον μήνα Απρίλιο ελήφθησαν τα ακόλουθα αποτελέσματα: Πιν.5.10, Σχ.5.7, Σχ.5.8.

Πίνακας.5.9 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης Απριλίου για τις τρεις μεθόδους.

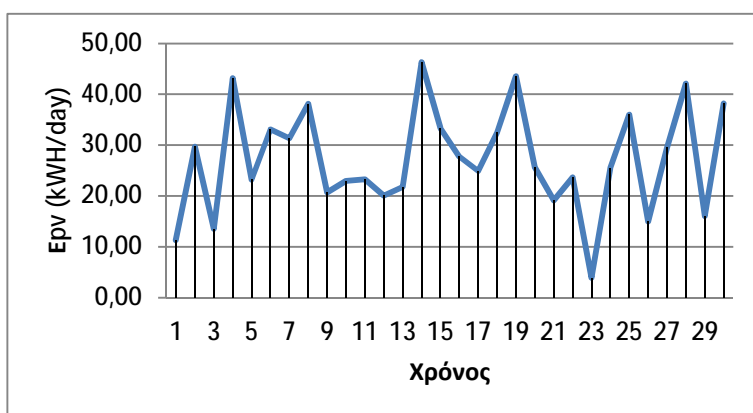
	P_m (Wp)	C_L (Ah)	Παράγοντας αυτονομίας d	Q_L (Wh/d)	Ποσοστό Επιτυχίας
Κλασική μέθοδος	10800	2600	$d_{\text{ncr}}= 3.92$	10985	95%
Στατιστική μέθοδος	6700	1600	$d_{\text{ncr}}= 3.92$	10985	95%
Δυναμική μέθοδος	5590	1390	$d_{\text{opt}}= 2$	10985 και $Q_{L\text{day}}=4984,95 \text{ (Wh/d)}$ και $Q_{L\text{night}}= 6000 \text{ (Wh/d)}$	96%

Πίνακας.5.10. Αποτελέσματα διαστασιολόγησης Απριλίου.

Days	SOC	Ερν
1	78%	11.33
2	78%	29.68
3	78%	13.53
4	78%	43.18
5	78%	23.21
6	78%	33.08
7	78%	31.36
8	78%	38.15
9	78%	20.66
10	78%	22.96
11	78%	23.27
12	78%	20.05
13	78%	21.73
14	78%	46.33
15	78%	33.37
16	78%	27.77
17	78%	24.88
18	78%	32.45
19	78%	43.55
20	78%	25.59
21	78%	19.13
22	78%	23.68
23	49%	3.86
24	78%	25.48
25	78%	36.00
26	78%	14.95
27	78%	29.52
28	78%	42.12
29	78%	16.02
30	78%	38.22



Σχήμα.5.7. Κατάσταση φόρτισης SOC των συσσωρευτών κατά την διάρκεια του μήνα Απρίλιο με διαστασιολόγηση του φ/β συστήματος με βάση το μήνα Απρίλιο.



Σχήμα.5.8. Διάγραμμα εξομοίωσης ενέργειας που παράγει το φ/β ανά ημέρα κατά την διάρκεια του μήνα Απριλίου με διαστασιολόγηση του φ/β συστήματος με βάση το μήνα Απρίλιο.

Σύμφωνα με την διαστασιολόγηση κατά το μήνα Απρίλιο προέκυψε ότι οι τιμές των P_m και C_L της στατιστικής[18] μεθόδου είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της κλασικής[1] μεθόδου. Επιπλέον οι τιμές της δυναμικής μεθόδου[28] παρουσιάζουν μικρότερες τιμές από εκείνες των άλλων δύο μεθόδων διαστασιολόγησης (κλασικής, στατιστικής) που παράλληλα επαρκούν ώστε να καλύψουν με αυτονομία το σύστημα ακόμα και κατά την διάρκεια ημερών με λιγοστή ή και καθόλου ηλιοφάνεια. Επίσης όπως φαίνεται στον Πιν.5.10 και στα Σχ.5.7-5.8 η διαστασιολόγηση με βάση το μήνα Απρίλιο και κατά την δυναμική μέθοδο καλύπτει με αυτονομία το φ/β σύστημα με ποσοστό επιτυχίας 96% κατά τη διάρκεια της Άνοιξης και το μήνα Απρίλιο ποσοστό μεγαλύτερο των άλλων δύο μεθόδων διαστασιολόγησης (95%).

5.3.3 Διαστασιολόγηση για το Καλοκαίρι με βάση τον μήνα Ιούλιο.

Αναλυτικότερα για διαστασιολόγηση κατά το Καλοκαίρι χρησιμοποιήθηκε ο μήνας Ιούλιος με στοιχεία όπως:

$$Q_L=19895 \text{ (Wh/d)}$$

$$Q_{L\text{day}}=11500 \text{ Wh/d και } Q_{L\text{night}}=8394,95 \text{ Wh/d. } d_{\text{ncr}}= 2.65$$

$$F=1.5 \text{ και } F'=1.2, \beta=30^\circ, \text{DOD}=80\%, V=24V, H_m=6.95 \text{ kWh/m}^2, R_m=0.9$$

Τα αποτελέσματα για την ελάχιστη εγκατεστημένη ισχύ P_m και χωρητικότητα συσσωρευτών C_L , που έδωσε ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την κλασική[1] και στατιστική[18] μέθοδο και διαστασιολόγηση με βάση τον Ιούλιο παρουσιάζονται στον Πίν.5.11

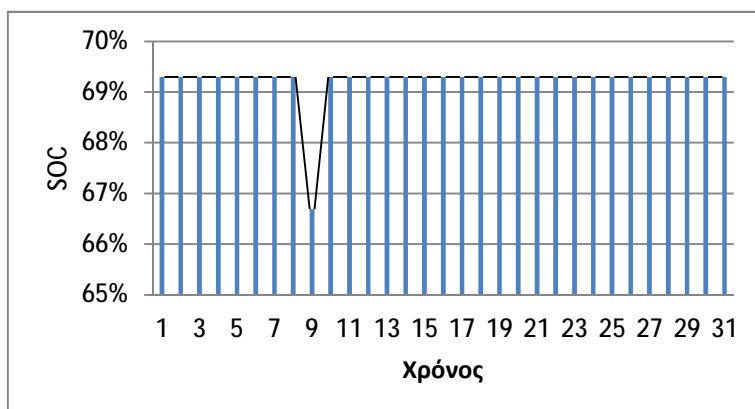
Με βάση το μήνα Ιούλιο και τη χρήση του δυναμικού μοντέλου διαστασιολόγησης [28] υπολογίστηκαν οι ελάχιστες τιμές των P_m και C_L , που απαιτούνται για την κάλυψη των φορτίων $Q_{Lday} = 11500$ (Wh/d) και $Q_{Lnight} = 8394,95$ (Wh/d) (βλ.κεφ.5.2). Το πρόγραμμα εξομοίωσης [28] έδωσε παράγοντα αυτονομίας $d=2$ και τιμές $P_m=5456$ (Wp), $C_L=1710$ (Ah), με ποσοστό επιτυχίας 99% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των άλλων δύο μεθόδων. Για το μήνα Ιούλιο ελήφθησαν τα ακόλουθα αποτελέσματα: Πιν.5.12, Σχ.5.9, Σχ.5.10.

Πίνακας.5.11 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης Ιουλίου για τις τρεις μεθόδους.

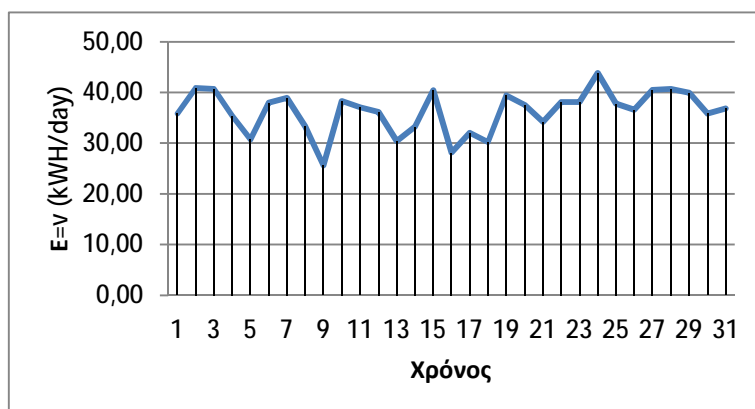
	P_m (Wp)	C_L (Ah)	Παράγοντας αυτονομίας d	Q_L (Wh/d)	Ποσοστό Επιτυχίας
Κλασική μέθοδος	10515	3200	$d_{ncr} = 2.65$	19895	95%
Στατιστική μέθοδος	5680	1780	$d_{ncr} = 2.65$	19895	95%
Δυναμική μέθοδος	5456	1710	$d_{opt} = 2$	19895 και $Q_{Lday} = 11500$ (Wh/d) και $Q_{Lnight} = 8394,95$ (Wh/d)	99%

Πίνακας.5.12. Αποτελέσματα διαστασιολόγησης Ιουλίου.

Days	SOC	Ερν
1	69%	35.82
2	69%	40.91
3	69%	40.72
4	69%	35.37
5	69%	30.74
6	69%	38.01
7	69%	38.91
8	69%	33.34
9	67%	25.63
10	69%	38.27
11	69%	37.02
12	69%	36.16
13	69%	30.39
14	69%	33.24
15	69%	40.43
16	69%	28.16
17	69%	32.06
18	69%	30.19
19	69%	39.46
20	69%	37.53
21	69%	34.21
22	69%	38.11
23	69%	38.13
24	69%	43.85
25	69%	37.80
26	69%	36.56
27	69%	40.48
28	69%	40.67
29	69%	39.93
30	69%	35.84
31	69%	36.85



Σχήμα.5.9. Κατάσταση φόρτισης SOC των συσσωρευτών κατά την διάρκεια του μήνα Ιουλίου με διαστασιολόγηση του φ/β συστήματος με βάση το μήνα Ιούλιο.



Σχήμα.5.10. Διάγραμμα εξομοίωσης ενέργειας που παράγει το φ/β ανά ημέρα κατά την διάρκεια του μήνα Ιουλίου με διαστασιολόγηση του φ/β συστήματος με βάση το μήνα Ιούλιο.

Σύμφωνα με την διαστασιολόγηση κατά το μήνα Ιούλιο προέκυψε ότι οι τιμές των P_m και C_L της στατιστικής[18] μεθόδου είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της κλασικής[1] μεθόδου. Επιπλέον οι τιμές της δυναμικής μεθόδου[28] παρουσιάζουν μικρότερες τιμές από εκείνες των άλλων δύο μεθόδων διαστασιολόγησης (κλασικής, στατιστικής) που παράλληλα επαρκούν ώστε να καλύψουν με αυτονομία το σύστημα ακόμα και κατά την διάρκεια ημερών με λιγοστή ή και καθόλου ηλιοφάνεια. Επίσης όπως φαίνεται στον Πιν.5.12 και στα Σχ.5.9-5.10 η διαστασιολόγηση με βάση το μήνα Ιούλιο και κατά τη δυναμική μέθοδο καλύπτει με αυτονομία το φ/β σύστημα με ποσοστό επιτυχίας 99% κατά τη διάρκεια του Καλοκαιριού και τον μήνα Ιούλιο μεγαλύτερο των άλλων δύο μεθόδων διαστασιολόγησης (95%).

Στην επόμενη ενότητα ακολουθεί επαλήθευση της διαστασιολόγησης που έγινε με τη χρήση άλλου προγράμματος, και συγκεκριμένα του PVGIS [43] για αυτόνομα φ/β συστήματα.

5.4 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ PVGIS.

Με την χρήση του προγράμματος PVGIS[43] που βασίζεται σε μέθοδο εξομοίωσης, έγινε επαλήθευση της αυτονομίας που προσδίδουν οι τρεις μέθοδοι με βάση τη διαστασιολόγηση που προηγήθηκε και ελήφθησαν τα εξής αποτελέσματα:

5.4.1 Επαλήθευση της αυτονομίας για διαστασιολόγηση με βάση τον Δεκέμβριο και για τις τρεις μεθόδους.

Για διαστασιολόγηση με βάση το μήνα Δεκέμβριο και την κάθε μέθοδο διαστασιολόγησης, έγινε εξομοίωση της λειτουργίας του συστήματος για όλους τους μήνες του έτους. Τα δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα PVGIS[43] είναι τα αντίστοιχα P_m και C_L της κάθε μεθόδου διαστασιολόγησης όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η κατανάλωση από τα φορτία Q_L δίδεται ξεχωριστά ανά μήνα σύμφωνα με τον υπολογισμό των Q_L που έγινε προηγουμένως.

Πίνακας.5.13. Αποτελέσματα για τις τρεις μεθόδους διαστασιολόγησης με βάση το Δεκέμβριο.

	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ			ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ			ΚΛΑΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ		
	Pm=21829 Wp		Cl=2539 Ah	Pm=25200 Wp		Cl=2930 Ah	Pm=32600 Wp		Cl=3790 Ah
Μήνες	E _{pv}	Ff	Fe	E _{pv}	Ff	Fe	E _{pv}	Ff	Fe
Ιανουάριος*	13307	92	0	13307	94	0	13308	97	0
Φεβρουάριος*	13388	96	0	13388	98	0	13388	100	0
Μάρτιος**	10987	100	0	10987	100	0	10988	100	0
Απρίλιος**	10992	100	0	10992	100	0	10991	100	0
Μάιος**	10985	100	0	10985	100	0	10985	100	0
Ιούνιος***	19912	100	0	19913	100	0	19915	100	0
Ιούλιος***	19872	100	0	19871	100	0	19869	100	0
Αύγουστος***	19898	100	0	19898	100	0	19899	100	0
Σεπτέμβριος**	10978	99	0	10978	99	0	10978	99	0
Οκτώβριος**	10958	99	0	10958	99	0	10956	100	0
Νοέμβριος**	10980	95	0	10980	95	0	10980	97	0
Δεκέμβριος*	13361	86	0	13361	89	0	13361	96	0

E_{pv}: Σύνολο παραγόμενης ενέργειας ανά ημέρα (Wh/day)

Ff: Ποσοστό ημερών με πλήρη φόρτιση συσσωρευτών (%)

Fe: Ποσοστό ημερών με πλήρη εκφόρτιση συσσωρευτών (%)

* Q_L Χειμώνα =13358 Wh

** Q_L Άνοιξη-Φθινόπωρο =10985 Wh

*** Q_L Καλοκαίρι =19895 Wh

Συμπερασματικά είναι φανερό πως και οι τρεις μέθοδοι καλύπτουν τα φορτία με επιτυχία $\geq 95\%$ που είχε προκαθοριστεί κατά τον υπολογισμό. Επίσης η στατιστική μεθοδολογία δίνει μικρότερες τιμές των P_m και C_L από τις αντίστοιχες της κλασικής[1] μεθοδολογίας ενώ με τη δυναμική μεθοδολογία προτείνεται η μικρότερη εγκατεστημένη ισχύς P_m και χωρητικότητα συσσωρευτών C_L με τις οποίες επιτυγχάνεται κάλυψη των φορτίων σε ποσοστό 100% αφού Fe=0% κατά τη διάρκεια του έτους για μη κρίσιμα φορτία.(βλ.κεφ.4)

5.4.2 Επαλήθευση της αυτονομίας για διαστασιολόγηση με βάση τον Απρίλιο για τις τρεις μεθόδους.

Για διαστασιολόγηση με βάση το μήνα Απρίλιο και τη κάθε μέθοδο διαστασιολόγησης, έγινε εξομοίωση της λειτουργίας του συστήματος για όλους τους μήνες του έτους. Τα δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα PVGIS[43] είναι τα αντίστοιχα P_m και C_L τις κάθε μεθόδου διαστασιολόγησης όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η κατανάλωση από τα φορτία Q_L δίδεται ξεχωριστά ανά μήνα σύμφωνα με τον υπολογισμό των Q_L που έγινε προηγουμένως.

Πίνακας.5.13. Αποτελέσματα για τις τρεις μεθόδους διαστασιολόγησης με βάση τον Απρίλιο.

	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ			ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ			ΚΛΑΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ		
	Pm=5590 Wp		Cl=1390 Ah	Pm=6700 Wp		Cl=1600 Ah	Pm=10800 Wp		Cl=2600 Ah
Μήνες	E _{pv}	Ff	Fe	E _{pv}	Ff	Fe	E _{pv}	Ff	Fe
Ιανουάριος*	12061	26	31	12918	38	11	13309	70	0
Φεβρουάριος*	13104	49	14	13397	62	5	13401	86	0
Μάρτιος**	10986	80	0	10986	88	0	10985	94	0
Απρίλιος**	10996	92	0	10996	93	0	10995	99	0
Μάιος**	10985	99	0	10985	100	0	10986	100	0
Ιούνιος***	19945	93	1	19929	97	0	19911	100	0
Ιούλιος***	19890	100	0	19887	100	0	19879	100	0
Αύγουστος***	19886	100	0	19890	100	0	19896	100	0
Σεπτέμβριος**	10970	95	0	10971	96	0	10973	98	0
Οκτώβριος**	10934	79	0	10940	88	0	10961	94	0
Νοέμβριος**	10788	67	6	11005	75	0	10982	87	0
Δεκέμβριος*	11151	16	40	12205	29	23	13343	58	0

E_{pv}: Σύνολο παραγόμενης ενέργειας ανά ημέρα (Wh/day)

Ff: Ποσοστό ημερών με πλήρη φόρτιση συσσωρευτών (%)

Fe: Ποσοστό ημερών με πλήρη εκφόρτιση συσσωρευτών (%)

* Q_L Χειμώνα =13358 Wh

** Q_L Άνοιξη-Φθινόπωρο =10985 Wh

*** Q_L Καλοκαίρι =19895 Wh

Σύμφωνα με τις τρεις μεθόδους διαστασιολόγησης για το μήνα Απρίλιο φαίνεται πως και με τις τρεις μεθόδους διαστασιολόγησης έχουμε αυτονομία 100%. Επίσης παρατηρείται πως με βάση τη διαστασιολόγηση που έγινε για το μήνα

Απρίλιο καλύπτονται και οι υπόλοιποι μήνες της Άνοιξης και του Καλοκαιριού. Κατά τους Χειμερινούς μήνες παρατηρείται ότι το σύστημα δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των φορτίων με ενέργεια με την στατιστική[18] και δυναμική μεθοδολογία[28]. Για αυτό τον λόγο, αν επιλεγεί διαστασιολόγηση με βάση τον μήνα Απρίλιο ο καταναλωτής θα πρέπει να χρησιμοποιεί και κάποια άλλη μορφή ενέργειας σαν εφεδρεία έτσι ώστε να καλύψει τις ανάγκες των φορτίων με ηλεκτρική ενέργεια εάν χρησιμοποιήσει διαστασιολόγηση με τη στατιστική η δυναμική μεθοδολογία.

5.4.3 Επαλήθευση της αυτονομίας για διαστασιολόγηση με βάση τον Ιούλιο και για τις τρεις μεθόδους.

Για διαστασιολόγηση με βάση τον μήνα Ιούλιο και την κάθε μέθοδο διαστασιολόγησης, έγινε εξομοίωση της λειτουργίας του συστήματος για όλους τους μήνες του έτους. Τα δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα PVGIS[43] είναι τα αντίστοιχα P_m και C_L της κάθε μεθόδου διαστασιολόγησης όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η κατανάλωση από τα φορτία Q_L δίδεται ξεχωριστά ανά μήνα σύμφωνα με τον υπολογισμό των Q_L που έγινε προηγουμένως.

Πίνακας.5.15. Αποτελέσματα και για τις τρεις μεθόδους με βάση τον Ιούλιο.

	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ			ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ			ΚΛΑΣΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ		
	Pm=5456 Wp		Cl=1710 Ah	Pm=5680 Wp		Cl=1780 Ah	Pm=10515 Wp		Cl=3200 Ah
Μήνες	E _{pv}	F _f	F _e	E _{pv}	F _f	F _e	E _{pv}	F _f	F _e
Ιανουάριος*	12191	19	33	12464	22	23	13315	69	0
Φεβρουάριος*	13311	44	13	13402	47	9	13403	85	0
Μάρτιος**	10986	79	0	10986	81	0	10958	93	0
Απρίλιος**	10996	92	0	10996	92	0	10968	99	0
Μάιος**	10985	99	0	10985	99	0	10959	100	0
Ιούνιος***	19948	92	0	19944	93	0	19911	100	0
Ιούλιος***	19890	100	0	19890	100	0	19879	100	0
Αύγουστος***	19886	100	0	19886	100	0	19896	100	0
Σεπτέμβριος**	10970	95	0	10970	95	0	10946	97	0
Οκτώβριος**	10933	77	0	10934	79	0	10933	94	0
Νοέμβριος**	10844	65	3	10899	67	1	10957	87	0
Δεκέμβριος*	11206	10	35	11482	14	33	13334	58	0

E_{pv}: Σύνολο παραγόμενης ενέργειας ανά ημέρα (Wh/day)

Ff: Ποσοστό ημερών με πλήρη φόρτιση συσσωρευτών (%)

Fe: Ποσοστό ημερών με πλήρη εκφόρτιση συσσωρευτών (%)

* Q_L Χειμώνα =13358 Wh

** Q_L Άνοιξη-Φθινόπωρο =10985 Wh

*** Q_L Καλοκαίρι =19895 Wh

Σύμφωνα με τις τρεις μεθόδους διαστασιολόγησης για τον μήνα Ιούλιο φαίνεται πως και με τις τρεις μεθόδους διαστασιολόγησης έχουμε αυτονομία 100% κατά τον Ιούλιο όπου και έγινε η διαστασιολόγηση. Επίσης παρατηρείται πως με βάση την διαστασιολόγηση που έγινε για τον μήνα Ιούλιο καλύπτονται και οι υπόλοιποι μήνες του Καλοκαιριού, της Άνοιξης και του Φθινοπώρου. Επίσης παρατηρείται πως κατά τους Χειμερινούς μήνες το σύστημα δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των φορτίων με ενέργεια κατά την στατιστική[18] και δυναμική μεθοδολογία[28]. Για αυτό τον λόγο, αν επιλεγεί διαστασιολόγηση με βάση το μήνα Ιούλιο ο καταναλωτής θα πρέπει να χρησιμοποιεί και κάποια άλλη μορφή ενέργειας σαν εφεδρεία έτσι ώστε να καλύψει τις ανάγκες των φορτίων με ηλεκτρική ενέργεια εάν χρησιμοποιήσει διαστασιολόγηση με τη στατιστική η δυναμική μεθοδολογία.

6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας εφαρμόστηκε ένα δυναμικό μοντέλο διαστασιολόγησης αυτόνομου φ/β συστήματος που έχει αναπτυχθεί από τους Ε. Καπλάνη και Σ. Καπλάνης στην εργασία [28] για την εκτίμηση της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος αιχμής και χωρητικότητας συσσωρευτών με στόχο την αυτονομία λειτουργίας κατά την διάρκεια του έτους και με βάση το προκαθορισμένο ποσοστό αστοχίας .

Η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς P_m και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L που προέκυψαν από την προσέγγιση αυτή συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές των P_m και C_L που υπολογίστηκαν με βάση την στατιστική μέθοδο των Σ. Καπλάνης και Ε. Καπλάνη [18] και την κλασική μέθοδο[1] διαστασιολόγησης που αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία.

Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5 η δυναμική μέθοδος δίνει μικρότερες τιμές P_m και C_L από τις άλλες δύο μεθόδους για το ίδιο προκαθορισμένο ποσοστό αστοχίας ($\leq 5\%$) ή μικρότερο.

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος P_m και χωρητικότητας συσσωρευτών C_L που προέκυψαν μελετήθηκαν οι διαφορετικές τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας για μια σειρά ετών. Χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων της NASA[33] καθώς περιλαμβάνει τιμές της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας για μια μεγάλη σειρά ετών και για πόλεις της Ελλάδας με διαφορετικές γεωγραφικές συντεταγμένες.

Μετά από επεξεργασία και ανάλυση των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας εξήχθησαν στατιστικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στις μεθόδους διαστασιολόγησης.

Γίνεται εφαρμογή της κλασικής και της στατιστικής μεθόδου διαστασιολόγησης φ/β συστημάτων καθώς επίσης και της δυναμικής μεθόδου όπου υπολογίστηκαν η βέλτιστη εγκατεστημένη ισχύς P_m και χωρητικότητα συσσωρευτών C_L , οι οποίες απαιτούνται έτσι ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες για κατανάλωση

ενέργειας από τα φορτία κατά ποσοστό $\geq 95\%$ κατά τη διάρκειας του έτους για μία κατοικία τετραμελούς οικογένειας.

Ο υπολογισμός της ημερήσιας κατανάλωσης, Q_L από τα φορτία έγινε με βάση τις διαφορετικές εποχές του έτους (Χειμώνας, Άνοιξη-Φθινόπωρο, Καλοκαίρι), διότι οι ανάγκες για κατανάλωση ενέργειας διαφέρουν από εποχή σε εποχή (βλ.κεφ.5.3). Όπως παρατηρήθηκε η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας από τα φορτία κατά την περίοδο του Καλοκαιριού είναι μεγαλύτερη και ακολουθούν ο Χειμώνας και η Άνοιξη-Φθινόπωρο. Επίσης για την δυναμική μεθοδολογία διαστασιολόγησης φ/β συστημάτων [28] έγινε διαχωρισμός της ημερήσιας κατανάλωσης από τα φορτία σε φορτία Q_{Lday} και Q_{Lnight} , (ημέρας-νύχτας).

Κατά την μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος από το φ/β σύστημα στα φορτία (βλ.κεφ.4.3) και από το σύστημα συσσωρευτών στον μετατροπέα -DC/AC και τελικά στα φορτία παρατηρείται απώλεια ισχύος. Για αυτόν τον λόγο έγινε υπολογισμός διορθωτικών παραγόντων F και F' , [28]. Για τον υπολογισμό των διορθωτικών παραγόντων F και F' , συμπεριελήφθησαν οι συντελεστές μείωσης της ισχύος λόγω θερμοκρασίας του φ/β C_{TPV} , ο συντελεστής μεταφοράς ενέργειας στον μετατροπέα και τον ελεγκτή φόρτισης $C_{inverter-charger}$, ο συντελεστής μεταφοράς ενέργειας κατά την φόρτιση και εκφόρτιση των συσσωρευτών C_{bat} και ο συντελεστής μεταφοράς ενέργειας στις καλωδιώσεις C_{cables} .(βλ.κεφ.5.3.1). Ωστόσο ο παράγοντας γήρανσης του φ/β [44] $C_{pv-ageing}$, και ο παράγοντας γήρανσης του συστήματος των συσσωρευτών [44] $C_{bat-ageing}$, είναι δύο πολύ σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να μελετηθούν έτσι ώστε να διερευνηθεί η επίπτωση τους στην απόδοση του φ/β συστήματος.

Συμπερασματικά η διαστασιολόγηση ενός φ/β συστήματος εξαρτάται από τις ανάγκες του καταναλωτή. Δηλαδή ανάλογα με τον τρόπο που επιθυμεί να αξιοποιήσει την παραγόμενη από το φ/β σύστημα ενέργεια, επιλέγει και την περίοδο κατά την οποία θα πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση. Αν για παράδειγμα η διαστασιολόγηση απευθύνεται σε κάποιον καταναλωτή που είναι ιδιοκτήτης εξοχικής κατοικίας που επισκέπτεται κυρίως κατά την περίοδο του Καλοκαιριού, θα ήταν προτιμότερο να επιλεγεί διαστασιολόγηση με βάση το Καλοκαίρι όπου και παρατηρείται η ελάχιστη αναγκαία εγκατεστημένη ισχύς P_m και χωρητικότητα συσσωρευτών C_L , οι οποίες απαιτούνται έτσι ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες των

φορτίων με αυτονομία σε ποσοστό $\geq 95\%$. Η επιλογή αυτή θα μείωνε το κόστος εγκατάστασης του φ/β συστήματος σε αρκετά μεγάλο βαθμό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σ. Ν. Καπλάνης, Ήπιες Μορφές Ενέργειας 3, Μηχανική των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων, Εκδόσεις ΙΩΝ 2004.
2. Ι. Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα 3η Έκδοση, Εκδόσεις ΖΗΤΗ 2009.
3. Σ. Δ. Πέρδιος, Φωτοβολταϊκές Εγκαταστάσεις 3η Έκδοση, Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ-4Μ, 2011.
4. Κ. Καγκαράκης, Φωτοβολταϊκή τεχνολογία, Εκδόσεις Συμμετρία 1992.
5. T. Markvart, Solar Electricity, John Wiley & Sons, LTD, Second edition 2001.
6. R. Messenger and J. Ventre, Photovoltaic Systems Engineering, CRC Press 2000.
7. A. Luque and S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Wiley publishers, 2002.
8. R. Foster, M. Ghassemi and A. Cota, Solar Energy, Renewable Energy and the Environment, CRC Press, 2009.
9. L. V. Breakers, Photovoltaic plants- Technical Application No 10. ABB Sace, Bergamo Italy, 2010.
10. Διαδικτυακός τόπος SMA Ελλάς <http://www.sma-hellas.com/el.html>.
11. J Aleksic; et al. (2002). "Temperature and Flow Visualization in a Simulation of the Czochralski Process Using Temperature-Sensitive Liquid Crystals". Ann. of NY Academy of Sci. 972: 158. Journal of Applied Physics 101, pages 1-7,2011
12. Σ. Ν. Καπλάνης, Ήπιες Μορφές Ενέργειας 2, Ηλιακή μηχανική Εκδόσεις ΙΩΝ 2004
13. Myung-Su Kim, Understanding Organic Photovoltaic Cells: Electrode, Nanostructure, Reliability, and Performance , ProQuest, 2009

14. Διαδικτυακός τόπος, Energy Efficiency and Renewable Energy Network
<https://www.eeren.gov>
15. B. Sørensen, Renewable Energy: Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy & Planning Aspects , Academic Press, 2010
16. N. Amin, Potential Low Cost, High Efficiency Solar Photovoltaic Technology: Cadmium Telluride (CdTe) Thin Film Solar Cells , LAP Lambert Acad. Publ., 2011
17. Διαδικτυακός τόπος, National Renewable Energy Laboratory (NREL)
<http://www.nrel.gov/pv/>
18. S .Kaplani E Kaplani, A comparison of a new PV-sizing approach for stand-alone systems with conventional methodologies. Proceeding of IASTED International Conference EuroPES' (2006), 26-28 June, Thodes, Greece, pp. 332-337.
19. E. Lorenzo, Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems, Progensa, 1994
20. A. Goetzberger, V. U. Hoffmann , Photovoltaic Solar Energy Generation vol 112, Springer Series in Optical Sciences , Springer, 2005
21. Markvart, Tom and Castaner, Luis (eds.) (2004) Solar cells: materials, manufacture and operation, Oxford, UK, Elsevier, 556pp.
22. M. D. Archer, R. Hill, Clean Electricity from Photovoltaics Series on Photoconversion of Solar Energy , Imperial College Press, 2001
23. T. Voravate, D. F. Barnes, V. Susan Bogach , Assessing Markets for Renewable Energy, World Bank Publications, 2000
24. S. R. Wenham, Applied Photovoltaics, Earthscan, 2007
25. R. J. Komp , Practical photovoltaics: electricity from solar cells, Aatec Publications, 1995
26. Duffie, J.A. & Beckman, W.A.,(1991). Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, 2nd ed., USA
27. Διαδικτυακός τόπος, RETScreen International, Photovoltaic Project Analysis, 2011, Available from: www.etscreen.net
28. Kaplani, E & Kaplani, S. (2012). A stochastic simulation model for reliable PV system sizing providing for solar radiation fluctuations. Applied Energy, vol.97 pp. 970-981.

29. Kaplanis, S & Kaplani, E. (2007). A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation $I(h;n_j)$ values. *Renewable Energy*, vol32 pp.1414-1425.
30. Pipattanasomporn M, et al., Securing critical loads in a PV-based micro grid with a multi-agent system, *Renewable Energy*. 2012
31. Abela M.A Chenlo F., Choosing the right inverter for grid connected PV systems. *Renewable Energy world*, Mar-Apr 2004.
32. Balouktsis A et al. Sizing stand- alone photovoltaic systems. *Int J Photoenergy* 2006:1-8. doi:10.1155/ijp/2006/73650.]
33. Διαδικτυακός τόπος NASA, <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.
34. Harrington and Dunlop, "Battery Charge Controller Characteristics in Photovoltaic Systems", Proceedings of the 7th Annual Battery Conference on Advances and Applications, Long Beach, California, January 21, 1992.
35. ELEG620: Solar Electric Systems Spring 2008 C. Honsberg page1-23
36. Κατάλογος εταιρίας SUNLIGHT Creating energy AGM VRLA batteries
37. S. Grunwald et all, "Photovoltaic Wire", UL subject 4703, Underwriters Laboratories, Jun, 2005
38. I. Hirtz, "Requirements for Cables for PV Systems", DKE WG 411.2.3, Feb, 2008
39. Διαδικτυακός τόπος Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cellStuart
40. R. Wenham, et all, (2007), « Applied Photovoltaics », Earthscan, Second Edition
41. Kyoto Protocol, <http://unfccc.int/resourse/docs/convkp/kpeng.pdf>, 1988.
42. Διαδικτυακός τόπος NREL, www.nrel.gov (Kaznerski,2009)
43. Διαδικτυακός τόπος Joint Research centre (JRC), Institute for Energy and transport, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmeps/eu_opt/pvgis_solar_optimum_gr.png.
44. Kaplanis S, Kaplani E. (2011) Energy performance and degradation over 20 years performance of BP c-Si PV modules. *Simulation Modelling Practice and Theory* 2011;19:1201–11.
45. V. Benda, (2012), Photovoltaic Cells and Modules physics and technology. Proc Innovation week on Renewable Energy Systems, TEI of Patras, Greece, 1-12 July 2012.

46. Κατάλογος εταιρίας BP solar 230W Photovoltaic module.
47. Διαδικτυακός τόπος Kipp & Zonen, <http://www.kippzonen.com/>
48. E. Kaplani.(2012). Design and performance consideration in stand-alone PV powered telecommunication systems. Journal of Engineering Science and Technology Review Vol.5 (1), pp.1-6
49. E. Kaplani. (2012). Detection of Degradation effects in field-aged c-Si solar cells through IR thermography and digital image processing. International Journal of Photoenergy, Vol.2012, Art.id 396792, pp.1-11.
50. E. Kaplani. (2012). Degradation effects in sc-Si PV modules subjected to natural and induced Ageing after several years of field operation. Journal of Engineering Science and Technology Review, Vol.5 (4). pp.18-23.
51. E. Kaplani & S Kaplanis. (2013). PV Systems Engineering and Sizing Chapter in Book: Renewable Energy Systems: Theory, Innovation and Intelligent applications. Ed. S. Kaplanis, E. Kaplani. NOVA Science Publishes, NY.
52. E. Kaplani & S Kaplanis. (2012). Prediction of Solar radiation intensity for cost-effective PV sizing and intelligent energy buildings. Chapter in book: Solar Power, Ed. Radv Rugescu, InTech, Croatia.
53. Διαδικτυακός τόπος: <http://cleantechnica.com/2013/04/11/total-global-solar-pv-capacity-approaching-100-gw/>
54. Άρθρο από την Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων. Πράσινη Βίβλος, Ευρωπαϊκή στρατηγική για αειφόρο, ανταγωνιστική και ασφαλή ενέργεια. Βρυξέλες, 8.3.2006 pp.1-25.
55. M. Köntges et al. The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro-cracks. Institute for Solar Energy Research Hamelin (ISFH), Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal, Germany. April 2011, pp.1131-1137.
56. Διαδικτυακός τόπος: <http://www.meteorologia.gr/>