



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης**

**ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**του**  
**ΠΟΤΗΡΑΚΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ**  
**ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκ. Καθηγητής**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**  
**ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκ. Καθηγητής**  
**ΔΟΥΛΑΜΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ, Επίκ. Καθηγητής**  
**ΝΙΚΟΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Λέκτορας**

**ΧΑΝΙΑ**  
**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2007**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται 3 μέθοδοι για την πρόβλεψη της ενέργειας που παρέχει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Το σύστημα αυτό περιέχει ένα φωτοβολταϊκό συλλέκτη, μπαταρίες, συσκευή ανάχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος και μια εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

Στην πρώτη από τις μεθόδους, οι ενεργειακές ροές υπολογίζονται από παραμέτρους του συλλέκτη, από τις μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και από τη μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία. Οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζονται με βάση στατιστικά μοντέλα.

Η δεύτερη μέθοδος υπολογίζει τη μέση μηνιαία ημερήσια παραγωγή του συστήματος χρησιμοποιώντας ένα στατιστικό μοντέλο, τις παραμέτρους του συλλέκτη, μηνιαίες μέσες μετεωρολογικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και τη μέση μηνιαία συνάρτηση χρησιμότητας. Γίνεται η υπόθεση ότι το φορτίο είναι σταθερό και 24ωρο.

Η τρίτη μέθοδος υπολογίζει τη μηνιαία μέση ενέργεια που δίνει το σύστημα στο φορτίο χρησιμοποιώντας παραμέτρους του συλλέκτη και μηνιαίες μέσες μετεωρολογικές τιμές. Η μέθοδος είναι βασισμένη σε στατιστικές τιμές της ακτινοβολίας, στη μέση ωριαία συνάρτηση χρησιμότητας και μπορεί να εφαρμοστεί για διάφορες απαιτήσεις του φορτίου και για διάφορες περιπτώσεις ηλιακής ακτινοβολίας.

Έχει αναπτυχθεί κατάλληλο λογισμικό και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση των τριών μεθόδων.

## **ABSTRACT**

Three methods are presented for the prediction of the long-term average conventional energy displaced by a photovoltaic system comprising a photovoltaic array, a storage battery, some power conditioning equipment with maximum power tracking capability and an auxiliary power facility.

The first of the methods estimates the energy flows from the knowledge of array test parameters, monthly average hourly ambient temperature and monthly average daily hemispherical radiation. Hourly average radiation values are estimated using a statistical model.

The second method estimates a monthly average daily electrical output using a statistical model, array parameters, monthly average meteorological data and the monthly average daily utilizability function. A constant 24 hr-per-day load consuming the energy produced is assumed.

The third method estimates the monthly average fraction of the load met by the system from array parameters and monthly average meteorological data. The method is based on radiation statistics, utilizability and can account for variability in the electrical demand as well as for the variability in solar radiation.

Appropriate software has been developed and the results are used to compare the three methods.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Η ενέργεια ως στόχος και ως προοπτική ανάπτυξης	1
1.2	Οι πηγές ενέργειας σήμερα	2
1.3	Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	3
1.4	Σκοπός της εργασίας	5
1.5	Δομή της εργασίας	6
1.6	Βιβλιογραφία	6

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1	Γενικά	7
2.2	Ηλιακή γεωμετρία	7
2.2.1	Τροχιά της γης	7
2.2.2	Χρήσιμες γωνίες	9
2.3	Ηλιακή ακτινοβολία	11
2.3.1	Στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία	11
2.3.2	Μηνιαίες μέσες τιμές της ακτινοβολίας	12
2.4	Βασικά μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος	13
2.4.1	Φωτοβολταϊκά στοιχεία, πλαίσια και συλλέκτες	13
2.4.2	Μετατροπέας ισχύος-Αντιστροφέας	13
2.4.3	Αποθηκευτικές μπαταρίες-Συσσωρευτές	14
2.4.4	Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος	14
2.4.5	Εξωτερική πηγή τροφοδοσίας	14
2.5	Βιβλιογραφία	15

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΡΟΩΝ (1<sup>η</sup> ΜΕΘΟΔΟΣ)

3.1	Γενικά	17
3.2	Ηλεκτρική παραγωγή φωτοβολταϊκού συλλέκτη	17
3.3	Μέση ωριαία ποσότητα ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη	19
3.4	Μέση ωριαία ενεργειακή ροή	22
3.5	Παράδειγμα χρήσης της μεθόδου	25
3.6	Βιβλιογραφία	31

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (2<sup>η</sup> ΜΕΘΟΔΟΣ)**

4.1	Γενικά	33
4.2	Μηνιαία μέση ημερήσια παραγωγή του συλλέκτη	33
4.3	Υπολογισμός παραπανίσιας ενέργειας	37
4.4	Αποθηκευτικές μπαταρίες	40
4.5	Παράδειγμα χρήσης της μεθόδου	41
4.6	Βιβλιογραφία	44

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΩΡΙΑΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (3<sup>η</sup> ΜΕΘΟΔΟΣ)**

5.1	Γενικά	45
5.2	Ηλεκτρική παραγωγή του φωτοβολταϊκού συλλέκτη	46
5.3	Απόδοση του συστήματος χωρίς αποθηκευτικές μπαταρίες	47
5.4	Επίδραση των αποθηκευτικών μπαταριών	49
5.5	Παράδειγμα χρήσης της μεθόδου	51
5.6	Βιβλιογραφία	56

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ**

6.1	Γενικά	57
6.2	Λογισμικό 1 <sup>ης</sup> μεθόδου	57
6.3	Λογισμικό 2 <sup>ης</sup> μεθόδου	59
6.4	Λογισμικό 3 <sup>ης</sup> μεθόδου	61
6.5	Βιβλιογραφία	67

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

7.1	Γενικά	69
7.2	Εφαρμογές	70
7.2.1	1 <sup>η</sup> Εφαρμογή	70
7.2.2	2 <sup>η</sup> Εφαρμογή	72
7.2.3	3 <sup>η</sup> Εφαρμογή	73
7.3	Σύγκριση των μεθόδων	75
7.3.1	Σύγκριση ως προς τα αποτελέσματα	75
7.3.2	Σύγκριση ως προς τον απαιτούμενο όγκο δεδομένων	78
7.3.3	Σύγκριση ως προς τον προγραμματισμό	78
7.4	Επιλογή μιας μεθόδου για συγκεκριμένη εφαρμογή	79



### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.1. Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΩΣ ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΩΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Η ενέργεια αποτέλεσε και αποτελεί τον κινητήριο μοχλό κάθε ανθρώπινης δραστηριότητας. Σε όλη την ιστορική του πορεία, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε με εφευρετικότητα τις δυνατότητες που του παρείχε απλόχερα η ίδια η φύση, τη δύναμη της φωτιάς, του νερού, του ανέμου και του ήλιου, με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών της διαβίωσής του.

Στους πιο πρόσφατους αιώνες, χρησιμοποίησε την ενέργεια από την καύση του κάρβουνου και του πετρελαίου και βρήκε τρόπο να την μετατρέπει στην περισσότερο εξευγενισμένη των μορφών της, τον ηλεκτρισμό. Στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, ένας νέος τρόπος παραγωγής ενέργειας ήρθε να δημιουργήσει ελπίδες, για ριζική επίλυση του παγκοσμίου ενεργειακού προβλήματος: η πυρηνική ενέργεια. Πολύ γρήγορα, όμως, δραματικά γεγονότα ήλθαν να επιβεβαιώσουν, χωρίς περιθώρια αμφισβήτησης, την αδυναμία μας να διασφαλίσουμε την ελεγχόμενη παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας.

Συνάμα, άρχισαν να επιβεβαιώνονται, με επιστημονικά τεκμηριωμένο τρόπο, οι προβλέψεις για σημαντικές επιβαρυντικές συνέπειες της μέχρι σήμερα συμπεριφοράς του ανθρώπου στο οικοσύστημα, εξαιτίας κυρίως της αλόγιστης χρήσης των συμβατικών καυσίμων και πολλών, φαινομενικά αθώων, τεχνολογικών προϊόντων.

Όλα τα μηνύματα έδειχναν καθαρά, ότι η συνέχιση της πορείας μας στο μέλλον επιβάλλει την αλλαγή της καθημερινής νοοτροπίας μας και αναθεώρηση των αξιών της ζωής, σε συνδυασμό με τον επαναπροσδιορισμό της έννοιας και των στόχων της τεχνολογικής ανάπτυξης. Είναι πολύ σημαντικό και επιπλέον εξαιρετικά χρήσιμο για την ορθή επιλογή των μέτρων περιβαλλοντικής αποκατάστασης, να συνειδητοποιήσουμε το εντυπωσιακά μεγάλο μέγεθος της χρονικής απόκρισης του φυσικού μας κόσμου, σε κλιματικές μεταβολές. Απαιτούνται δεκαετίες για να διαπιστωθούν τα πρώτα ενθαρρυντικά θετικά αποτελέσματα, των όποιων σημερινών διορθωτικών επεμβάσεων στο οικολογικό σύστημα. Η αποδοχή των ριζικών αυτών αλλαγών στον τρόπο ζωής μας καθώς και στην τροποποίηση του είδους και του τρόπου παραγωγής ενέργειας και στόχων της τεχνολογίας, είναι η πιο δύσκολη φάση

προσαρμογής μας στην νέα κατάσταση. Η ανησυχία και ο σκεπτικισμός των ολίγων οικολόγων, κάποτε, αποτελεί σήμερα καθημερινό προβληματισμό των περισσότερων.

Η διάσκεψη στο Ρίο, το καλοκαίρι του 1992, προσδιόρισε το πρόβλημα στις διαστάσεις του, προδιαγράφοντας άμεσες ενέργειες και επεμβάσεις. Τα επιστημονικά στοιχεία για την σχέση της βιομηχανικής δραστηριότητας με τις αρνητικές κλιματικές αλλαγές, την οικολογική υποβάθμιση και το δυσοίωνο μέλλον του πλανήτη μας, ήταν συντριπτικά. Παρά ταύτα, οι τρόποι αντιμετώπισης και ο έλεγχος εφαρμογής τους δεν βρήκαν όλες τις κυβερνήσεις σύμφωνες. Αιτία; Οι επαγόμενες συνέπειες από τον περιορισμό της δράσης της βιομηχανίας των ανεπτυγμένων χωρών. Ο στόχος να διατηρηθούν τα επίπεδα ρύπανσης μέχρι το 2000, σε αυτά του 1990, δεν φαίνεται, σήμερα, να έχει επιτευχθεί. Στην επόμενη, όμοια διάσκεψη, στο Κιότο της Ιαπωνίας, το Δεκέμβριο του 1997, καταβλήθηκε προσπάθεια για μια νέα συμφωνία, βασισμένη σε πιο δραστικά μέτρα, χωρίς τελικά να υπάρξει ομοφωνία.

Πάντως, παρά τις αντιδράσεις των ολίγων, αλλά ισχυρών αυτού του κόσμου, η ευαισθητοποίηση και η κινητοποίηση των πολιτών ολοένα και αυξάνει. Η εκφραζόμενη, ποικιλοτρόπως, πρόθεση αντιμετώπισης του θέματος σε διεθνή κλίμακα, δείχνει ότι συνειδητοποιούμε αργά, αλλά σταθερά, πως η τεχνολογία, ως καρπός ανώτερης πνευματικής εργασίας, πρέπει να έχει στόχο να θεραπεύει και να υπηρετεί τον άνθρωπο, με σεβασμό προς το οικοσύστημα που τον φιλοξενεί. Αυτό το οικοσύστημα, χώρος ανάπτυξης και διαβίωσης όλων των μορφών ζωής, δεν είναι υπόθεση μερικών ανθρώπινων γενεών. Χρειάστηκαν 5 δισεκατομμύρια χρόνια για να εξιδανικευτούν οι κλιματικές συνθήκες στον πλανήτη μας, σε τέτοιο βαθμό, που να συμβάλουν στη δημιουργία της ζωής.

Είναι γεγονός αδιαμφισβήτητο, η σημαντική συμβολή των πηγών ενέργειας μεγάλης ισχύος στην τεχνολογική πρόοδο, από την οποία προέκυψαν πολλά θετικά αποτελέσματα. Μέσα από την ιστορική αναγκαιότητα των συμβατικών καυσίμων ξεπήδησαν νέες και συνεχώς βελτιώνονται παλαιότερες μέθοδοι, εξευγενισμένης παραγωγής ενέργειας, χωρίς πρακτικά οικολογικές επιβαρύνσεις. Ο ήλιος και ο άνεμος θα έχουν τον πρώτο λόγο στις επόμενες δεκαετίες [1.1].

## **1.2. ΟΙ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΗΜΕΡΑ**

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στον φλοιό της γης, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και σε αυτές που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Στις πρώτες ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η χαρακτηριστικά μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια.



Οι δεύτερες, έχουν βασική τους προέλευση τον ήλιο. Η ακτινοβολούμενη από τον ήλιο ενέργεια, που φτάνει στην γη, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη μας, δίδει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας τις λίμνες και τα ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (ενέργεια κυμάτων). Απορροφούμενο από συνδυασμένα υλικά παράγει ηλεκτρισμό (φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας, η καύση δε των φυσικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα).

Οι κύριες πηγές ενέργειας, που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι:

#### ***Το κάρβουνο:***

Αποτέλεσε για πολλά χρόνια μέχρι σήμερα, την κύρια καύσιμη ύλη. Σε αυτό βασίστηκε κατά κύριο λόγο, η βιομηχανική επανάσταση. Μεγάλο μέρος της σημερινής παγκόσμιας βιομηχανικής παραγωγής βασίζεται στην ενέργεια από το την καύση ορυκτού άνθρακα.

#### ***Το πετρέλαιο:***

Η παγκόσμια παραγωγή και χρήση του πήρε εκρηκτικές διαστάσεις στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα και μάλιστα τα συμβατικά καύσιμα που προέρχονται από το πετρέλαιο καλύπτουν το 85 % της καταναλισκόμενης ενέργειας των ανεπτυγμένων χωρών. Εκτιμάται ότι τα υπάρχοντα αποθέματα των πετρελαϊκών πηγών θα επαρκέσουν ακόμα για 50 χρόνια.

#### ***Η πυρηνική ενέργεια:***

Από το 1945 και μετά προστέθηκε στις μεγάλης ισχύος πηγές ενέργειας, η πυρηνική, στην οποία αρχικά βασίστηκαν πολλές ελπίδες. Όμως μετά τα ατυχήματα στους σταθμούς της Πενσυλβανίας και του Τσερνομπίλ, η ανθρωπότητα τρομοκρατήθηκε συνειδητοποιώντας την ανικανότητα της να αντιμετωπίσει ένα ύπουλο και αόρατο εχθρό, που μόνιμα απειλεί με αφανισμό [1.1].

### **1.3. ΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχουν κύριο γενεσιουργό αιτία την ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση εκείνη που αφορά στην ενέργεια των παλιρροϊκών κινήσεων που οφείλονται στη βαρυτική δράση, κυρίως της σελήνης, πάνω στους υδάτινους όγκους που καλύπτουν την επιφάνεια της γης.

***Υδατόπτωση:***

Είναι ένας από τους πιο φυσικούς τρόπους παραγωγής μεγάλης ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας, με ανανεώσιμη συμπεριφορά. Έχει όμως περιορισμένη εφαρμογή και ταυτόχρονα το μειονέκτημα, σε πολλές περιπτώσεις, η δημιουργία των κατάλληλων εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης, να καταστρέφει εύφορες εκτάσεις, που σχετίζονται με την ύπαρξη του υδάτινου αυτού πλούτου. Καλύπτει, περίπου, το 7% της παγκόσμιας ενεργειακής παραγωγής.

***Ενέργεια κυμάτων ή παλιρροϊκών κινήσεων:***

Η παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ή παλιρροϊκές κινήσεις, έχει αξιοποιηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, κυρίως στις βόρειες θάλασσες. Στη Βρετανία της Γαλλίας λειτουργεί από το 1966 σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 240 MW.

***Βιομάζα:***

Η βιομάζα καλύπτει σήμερα το 14% της παγκοσμίως απαιτούμενης ενέργειας. Η καύση αποτελεί, ουσιαστικά, ουδέτερη διαδικασία από την άποψη του φαινομένου του θερμοκηπίου, αρκεί να μη διαταράσσεται η λεπτή ισορροπία στο φυσικό περιβάλλον.

***Γεωθερμική ενέργεια:***

Αφορά στην ενέργεια των θερμών νερών (ή ατμών του νερού), που αναβλύζουν μέσα από ηφαιστειακές διόδους ή ρήγματα του υπεδάφους. Βρίσκει εφαρμογές από την θέρμανση κτιρίων και θερμοκηπίων έως και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

***Αιολική ενέργεια:***

Η εγκατάσταση αιολικών συστημάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, με χρήση ανεμογεννητριών οριζοντίου ή κατακόρυφου άξονα πτερυγίων, βρίσκεται σε εντυπωσιακή εξέλιξη. Ειδικά σε περιοχές της Ελλάδας που το αιολικό δυναμικό, δηλαδή η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, είναι αυξημένο έχουν εγκατασταθεί αιολικά πάρκα με ισχύ από μερικές εκατοντάδες kW έως μερικά MW.

***Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια:***

Η φωτοβολταϊκή ενέργεια προέρχεται από την εκμετάλλευση της ιδιότητας που έχουν μερικά υλικά να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα όταν έρθουν σε επαφή με το φως του ήλιου (φωτορεύμα). Η τεχνολογία που αφορά αυτού του είδους την ενέργεια αναπτύχθηκε ραγδαία το δεύτερο μισό του 20<sup>ου</sup> αιώνα, παρά το ότι η παραπάνω ιδιότητα των υλικών είχε παρατηρηθεί πολύ νωρίτερα από τον Becquerel, το 1839. Αρχικά το κόστος κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ήταν αρκετά υψηλό και σε συνδυασμό με την σχετικά χαμηλή

απόδοση καθιστούσαν τα συστήματα αυτά ασύμφορα. Όμως κατά την δεκαετία του 1980 υπήρξε μια τάση μείωσης του κόστους και έτσι αναπτύχθηκαν νέες τεχνολογίες που οδήγησαν σε οικονομικότερα συστήματα. Αποτέλεσμα αυτής της μείωσης, η παγκοσμίως εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων, από 313.5 MW, το 1991, να φτάσει τα 3.8 GW, στο τέλος του 2004 [1.1].

#### 1.4. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3, το κόστος εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ακόμη αρκετά υψηλό ιδιαίτερα σε σύγκριση με την τιμή του πετρελαίου. Όμως μέσα στην επόμενη δεκαετία αναμένεται η τιμή της kWh από τις δύο παραπάνω πηγές να είναι άμεσα συγκρίσιμη. Αυτό, σε συνδυασμό με τις κρατικές επιχορηγήσεις που ήδη υπάρχουν, θα καταστήσουν τη φωτοβολταϊκή ενέργεια αρκετά δημοφιλή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, θα υπάρξει (και ήδη υπάρχει) η ανάγκη για λεπτομερείς οικονομοτεχνικές μελέτες που θα αφορούν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε συγκεκριμένες περιοχές. Αυτές οι μελέτες όμως, είναι αρκετά χρονοβόρες και επίπονες και χρειάζονται ένα αρκετά μεγάλο όγκο δεδομένων για να προβλέψουν με ακρίβεια την ηλεκτρική παραγωγή. Βέβαια, μπορεί στο τέλος τα αποτελέσματα της μελέτης να είναι αρνητικά και η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στην περιοχή για την οποία έγινε η μελέτη να κριθεί ασύμφορη.

Σκοπός λοιπόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιαστούν 3 απλουστευμένες μέθοδοι που θα δίνουν μια πρώτη εκτίμηση της ηλεκτρικής παραγωγής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με συγκεκριμένες παραμέτρους και για συγκεκριμένη περιοχή. Τα δεδομένα που απαιτούνται από τις μεθόδους αυτές είναι πολύ λιγότερα από αυτά των κανονικών μελετών και πρακτικά οι απαιτούμενοι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν «με το χέρι». Βέβαια για περισσότερη ευκολία και ταχύτητα αναπτύχθηκε λογισμικό που υλοποιεί τις τρεις προαναφερθείσες μεθόδους.

Άρα, δεδομένης μίας τοποθεσίας και χρησιμοποιώντας μία από τις τρεις μεθόδους που θα περιγραφούν, θα προκύψει μια εκτίμηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ενός υποτιθέμενου φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα θα αποτελέσουν μια πάρα πολύ σημαντική πληροφορία, που θα βοηθήσει τους υπεύθυνους να αποφασίσουν αν τελικά είναι συμφέρουσα η εγκατάσταση του συστήματος και αν θα προχωρήσουν σε μια λεπτομερή οικονομοτεχνική μελέτη.

### 1.5. ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο *δεύτερο κεφάλαιο* παρουσιάζονται γενικά στοιχεία και έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν κατά την περιγραφή των μεθόδων. Μεταξύ άλλων παρουσιάζονται τα βασικά μέρη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς και κάποιες γωνίες από την ηλιακή γεωμετρία.

Στο *τρίτο κεφάλαιο* παρουσιάζεται η πρώτη μέθοδος όπου γίνεται πρόβλεψη της μετατρεπόμενης ενέργειας μέσω των ωριαίων ενεργειακών ροών. Το *τέταρτο κεφάλαιο* περιέχει την *δεύτερη μέθοδο* όπου οι υπολογισμοί γίνονται μέσω της μηνιαίας μέσης ημερήσιας συνάρτησης χρησιμότητας ενώ στο *πέμπτο κεφάλαιο* παρουσιάζεται η *τρίτη μέθοδος* που υπολογίζει την μετατρεπόμενη ενέργεια μέσω της μηνιαίας μέσης ωριαίας συνάρτησης χρησιμότητας.

Στο *έκτο κεφάλαιο* παρουσιάζεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε και που υλοποιεί τις τρεις προαναφερθείσες μεθόδους. Επίσης δίνονται οδηγίες για τη χρήση αυτού του λογισμικού.

Στο *έβδομο κεφάλαιο* γίνεται σύγκριση των μεθόδων σύμφωνα με κάποια κριτήρια όπως είναι τα παραγόμενα αποτελέσματα.

### 1.6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, ‘Φωτοβολταϊκά Συστήματα’, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2006.

## ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

### 2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιασθούν κάποια γενικά στοιχεία τα οποία θα συναντώνται συχνά κατά την εξέταση των μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα θα δειχθούν μερικές βασικές σχέσεις της ηλιακής γεωμετρίας, θα οριστούν διάφορες χρήσιμες γωνίες που θα χρησιμοποιηθούν κατά κόρων και έπειτα θα γίνει αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία και τις μορφές της. Επίσης θα σχολιασθούν οι μηνιαίες μέσες τιμές της ακτινοβολίας, που είναι και η πληροφορία που παρέχουν οι περισσότεροι μετεωρολογικοί σταθμοί. Τέλος θα παρουσιασθούν τα βασικά μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και θα σημειωθεί που χρησιμεύει το καθένα από αυτά.

### 2.2. ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

#### 2.2.1. Τροχιά της γης

Μια πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η απόσταση και η ακριβής θέση του ήλιου ως προς το σημείο που βρίσκεται η εγκατάσταση. Η υψηλή σημαντικότητα αυτής της παραμέτρου είναι απόλυτα λογική μιας και ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία [2.2].

Η γη λοιπόν περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο με ελλειπτική τροχιά, κάνοντας μία περιστροφή κάθε 365.25 μέρες. Η εκκεντρότητα της έλλειψης είναι μικρή και η τροχιά είναι σχεδόν κυκλική. Το σημείο στο οποίο η γη είναι πλησιέστερα στον ήλιο, το περιήλιο συμβαίνει στις 2 Ιανουαρίου, στο οποίο σημείο η απόσταση είναι λίγο μεγαλύτερη από 147 εκατομμύρια χιλιόμετρα. Στην άλλη ακραία θέση στο αφήλιο το οποίο συμβαίνει στις 3

Ιουλίου, η γη απέχει περίπου 152 εκατομμύρια χιλιόμετρα από τον ήλιο. Αυτή η απόκλιση στην απόσταση περιγράφεται από την παρακάτω σχέση [2.2]:

$$d = 1.5 \cdot 10^8 \left\{ 1 + 0.017 \left[ \frac{360(n-93)}{365} \right] \right\} \quad (2.1)$$

όπου  $d$  είναι η απόσταση της γης από τον ήλιο (km) και  $n$  είναι ο αριθμός της ημέρας. Όπως θα δειχθεί στην συνέχεια, ο αριθμός της ημέρας θα χρησιμοποιηθεί και σε άλλες σχέσεις. Σε αυτό το σημείο θα γίνει η εισαγωγή του όρου «μέση ημέρα του μήνα». Στη σχέση (2.1) οι τιμές που δίνονται στον όρο  $n$  είναι αθροιστικές. Για παράδειγμα η 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου είναι  $n=1$  και η 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου είναι  $n=365$ . Όμως οι μέθοδοι που θα εξεταστούν στα επόμενα κεφάλαια αναφέρονται μόνο σε μια ημέρα του κάθε μήνα και θεωρούν όλες τις άλλες σαν πανομοιότυπες με αυτή. Από δω και στο εξής αυτή η ημέρα θα αναφέρεται ως η μέση ημέρα του μήνα και θα συμβολίζεται με  $\bar{n}$ . Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί δίνονται οι τιμές που μπορεί να πάρει ο παραπάνω όρος. Έχει επικρατήσει η κάθε τιμή να αντιπροσωπεύει το μέσο κάθε μήνα.

**Πίνακας 2.1:** Μέση ημέρα κάθε μήνα

Μήνας	Μέση ημέρα	Μήνας	Μέση ημέρα
Ιανουάριος	$\bar{n}=15$	Ιούλιος	$\bar{n}=197$
Φεβρουάριος	$\bar{n}=47$	Αύγουστος	$\bar{n}=228$
Μάρτιος	$\bar{n}=75$	Σεπτέμβριος	$\bar{n}=259$
Απρίλιος	$\bar{n}=106$	Οκτώβριος	$\bar{n}=289$
Μάιος	$\bar{n}=136$	Νοέμβριος	$\bar{n}=320$
Ιούνιος	$\bar{n}=168$	Δεκέμβριος	$\bar{n}=350$

Έτσι λοιπόν για παράδειγμα το μήνα Ιούνιο η απόσταση της γης από τον ήλιο είναι  $d= 338630137$  km. Αυτή η απόσταση θα θεωρείται σταθερή για όλο τον Ιούνιο ενώ στην πραγματικότητα ισχύει μόνο για τις 15 Ιουνίου.

### 2.2.2. Χρήσιμες γωνίες

Οι γωνίες που θα παρουσιασθούν παρακάτω βοηθούν (εκτός από την ακριβή γνώση της θέσης του ήλιου) στην επιλογή της κατάλληλης κλίσης του φωτοβολταϊκού συλλέκτη αλλά και στον υπολογισμό όρων ενέργειας που υπάρχουν στα επόμενα κεφάλαια.

Αρχικά θα παρουσιασθεί η γωνία ώρας,  $\omega$ . Αυτή είναι ο αριθμός των μοιρών που πρέπει να περιστραφεί η γη πριν ο ήλιος να είναι ακριβώς πάνω από τον τοπικό μεσημβρινό. Κάθε χρονική στιγμή, ο ήλιος είναι ακριβώς πάνω από μία συγκεκριμένη γραμμή γεωγραφικού πλάτους που ονομάζεται μεσημβρινός του ήλιου. Η διαφορά του τοπικού μεσημβρινού και του μεσημβρινού του ήλιου είναι η γωνία ώρας με θετικές τιμές να λαμβάνουν χώρα το πρωί πριν ο ήλιος να διασχίσει τον τοπικό μεσημβρινό.

Θεωρώντας ότι η γη περιστρέφεται  $360^\circ$  σε 24 ώρες η γωνία ώρας μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [2.2]:

$$\omega = \left[ \frac{15^\circ}{\text{ώρα}} \right] \cdot (\text{αριθμός}_\text{ωρών}_\text{πριν}_\text{το}_\text{ηλιακό}_\text{μεσημέρι}) \quad (2.2)$$

όπου το ηλιακό μεσημέρι είναι στις 12. Για παράδειγμα στις 11 π.μ. η γωνία ώρας θα είναι  $15^\circ$  αφού χρειάζεται μόνο μια ώρα για να έρθει το ηλιακό μεσημέρι.

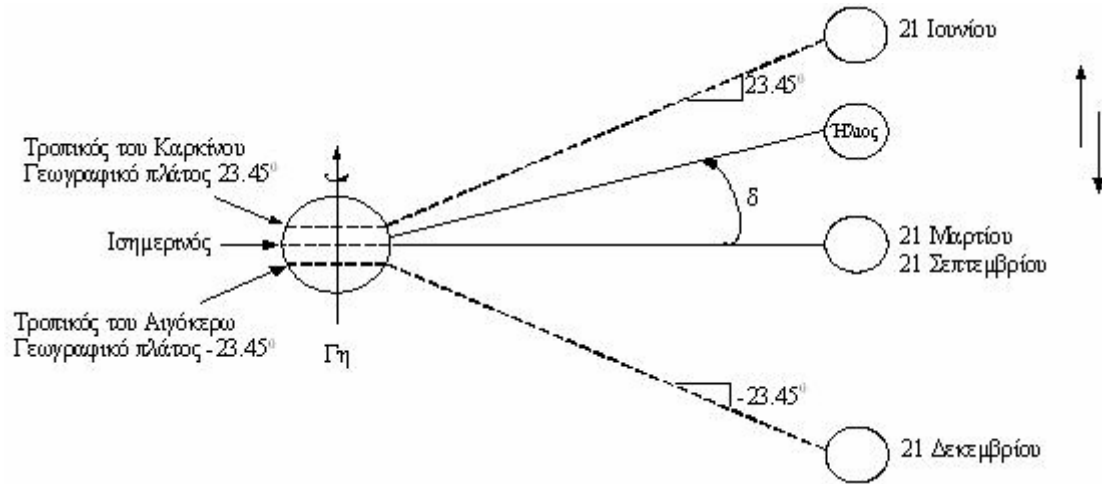
Μια ειδική περίπτωση γωνίας ώρας είναι η γωνία ηλιοβασιλέματος,  $\omega_s$ , δηλαδή η γωνία ώρας κατά το ηλιοβασίλεμα. Αυτή δίνεται από την παρακάτω σχέση [2.4]:

$$\omega_s = \cos^{-1} [-\tan \phi \cdot \tan \delta] \quad (2.3)$$

όπου  $\phi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας και  $\delta$  είναι η ηλιακή απόκλιση που θα εξεταστεί αμέσως μετά. Θα σημειωθεί εδώ ότι υπάρχει και η γωνία ώρας ηλιοβασιλέματος η οποία είναι σε σχέση με τον κεκλιμένο συλλέκτη ενός φωτοβολταϊκού και όχι ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Αυτή συμβολίζεται ως  $\omega'_s$  και ο τρόπος υπολογισμού της θα παρουσιασθεί στο επόμενο κεφάλαιο [2.4].

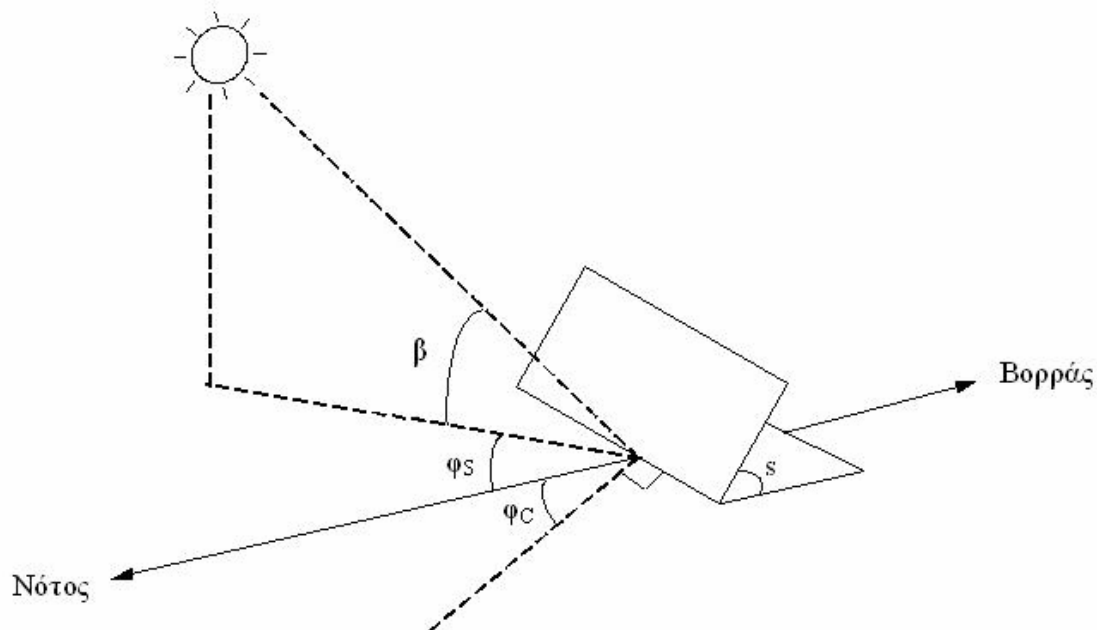
Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του επιπέδου του ισημερινού και της ευθείας γραμμής που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου ονομάζεται ηλιακή απόκλιση και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα  $\delta$  (Σχήμα 2.1). Η ηλιακή απόκλιση μεταβάλλεται από  $-23.45^\circ$  έως  $23.45^\circ$  (κατά το χειμερινό και καλοκαιρινό ηλιοστάσιο αντίστοιχα) και προσεγγίζεται με πολύ καλή ακρίβεια από μία απλή ημιτονοειδή συνάρτηση που υποθέτει έτος 365 ημερών και που τοποθετεί την εαρινή ισημερία τη μέρα  $n=81$ , δηλαδή [2.2]:

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360(n-81)}{365} \right] \quad (2.4)$$



Σχήμα 2.1: Απόκλιση του ήλιου

Δύο άλλες σημαντικές γωνίες που ωστόσο δεν θα χρειαστεί να υπολογιστούν πουθενά είναι η γωνία αζιμούθιου του ήλιου  $\varphi_s$  και η γωνία ύψους του ήλιου  $\beta$ . Αυτές οι δύο εξαρτώνται από το γεωγραφικό πλάτος, από τον αριθμό της ημέρας και, πολύ περισσότερο, από την ώρα της ημέρας. Εκτός από τη γωνία αζιμούθιου του ήλιου υπάρχει και η αντίστοιχη ενός φωτοβολταϊκού συλλέκτη. Αυτή συμβολίζεται ως  $\varphi_c$ . Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι προαναφερθείσες γωνίες [2.2].



Σχήμα 2.2: Αζιμουθιακή γωνία και γωνία ύψους του ήλιου



## 2.3. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας (solar irradiation) προέρχεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του ήλιου. Σαν αποτέλεσμα των αντιδράσεων αυτών μεγάλες ποσότητες υδρογόνου μετατρέπονται σε ήλιο με τη σύγχρονη απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και με συνέπεια την ελάττωση της μάζας του ήλιου με ένα ρυθμό 4.000.000 τόνους το δευτερόλεπτο. Σε αυτά τα ποσά ενέργειας που έφτασαν στη γη κατά το παρελθόν οφείλεται και η δημιουργία όλων των ποσοτήτων πετρελαίου και άνθρακα που υπάρχουν στο εσωτερικό της γης [2.3].

Αν μελετήσει κανείς το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας θα δει ότι εκτείνεται σε όλα τα μήκη κύματος. Αναλυτικότερα, το 44% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας ανήκει στο ορατό φάσμα (400 έως 700 nm), το 50% στο υπέρυθρο (>700 nm) και το υπόλοιπο 6% στο υπεριώδες (<400 nm). Από το σύνολο μηκών κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας μόνο το 75% μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προκαλέσει ηλεκτρικό ρεύμα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αυτό το ποσοστό περιλαμβάνει μικρά μήκη κύματος (με μεγάλες συχνότητες) δηλαδή μεγάλες ενέργειες φωτονίων.

Εκτός από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ο ήλιος εκπέμπει και μια ασθενή σωματιδιακή ακτινοβολία που αποτελείται από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια, κυρίως πρωτόνια και ηλεκτρόνια, και ονομάζεται ηλιακός άνεμος. Ο ηλιακός άνεμος δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον από πλευράς ενεργειακής εκμετάλλευσης.

### 2.3.1. Στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία

Η στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα συλλέκτη είναι συνδυασμός απευθείας ακτινοβολίας που περνά σε ευθεία γραμμή μέσω της ατμόσφαιρας στο συλλέκτη, διάχυτης ακτινοβολίας που έχει διασκορπιστεί στην ατμόσφαιρα και ανακλώμενης ακτινοβολίας που έχει αναπηδήσει από το έδαφος ή από άλλη επιφάνεια μπροστά από το συλλέκτη. Στους υπολογισμούς φωτοβολταϊκών ως μονάδες συνήθως προτιμώνται τα  $\text{watt/m}^2$ .

Από τις τρεις παραπάνω ακτινοβολίες μόνο η απευθείας μπορεί να υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Σημείο εκκίνησης των υπολογισμών είναι η εκτίμηση της εξωγήινης ηλιακής έντασης που περνά κάθετα από μια φανταστική επιφάνεια λίγο έξω από την ατμόσφαιρα της γης. Έπειτα με κατάλληλες σχέσεις υπολογίζεται πόση τελικά από την εξωγήινη ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια της γης και πόση στο συλλέκτη. Ο υπολογισμός τώρα της διάχυτης και ανακλώμενης ακτινοβολίας δεν είναι τόσο εύκολη υπόθεση. Το γεγονός όμως ότι οι δύο τελευταίες ηλιακές εντάσεις αποτελούν ένα σχετικά μικρό τμήμα

της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας διευκολύνει την κατάσταση μιας και ακόμα και χονδροειδή υπολογιστικά μοντέλα είναι συνήθως αποδεκτά.

Η δυσκολία υπολογισμού της διάχυτης ακτινοβολίας έγκειται στους παράγοντες που την προκαλούν. Έτσι λοιπόν η εισερχόμενη ακτινοβολία μπορεί να διασκορπιστεί από σωματίδια της ατμόσφαιρας και σταγονίδια νερού και μπορεί να ανακλαστεί από σύννεφα. Έπειτα μέρος της εισερχόμενης ακτινοβολίας ανακλάται από την επιφάνεια της γης πίσω στον ουρανό και διασκορπίζεται ξανά πίσω στη γη. Από όλη αυτή τη διαδικασία κάποιο μέρος της ακτινοβολίας θα καταλήξει στην επιφάνεια του συλλέκτη. Καθοριστικότερος παράγοντας για την ποσότητα αυτής της ακτινοβολίας είναι η κλίση του συλλέκτη. Μάλιστα όσο μικρότερη είναι η κλίση όσο δηλαδή τείνει ο συλλέκτης προς το οριζόντιο επίπεδο τόσο πιο πολύ διάχυτη ηλιακή ένταση δέχεται.

Η τελευταία συνιστώσα της ηλιακής έντασης που προσπίπτει σε ένα συλλέκτη είναι η ακτινοβολία που ανακλάται από επιφάνειες μπροστά από το πλαίσιο. Αυτή η αντανάκλαση μπορεί να παρέχει μια σημαντική αύξηση στην απόδοση, όπως για παράδειγμα σε μία λαμπερή μέρα με χιόνι ή με νερό μπροστά από το συλλέκτη, ή μπορεί η αντανάκλαση να είναι τόσο μικρή ώστε ίσως να μπορεί να αγνοηθεί. Οι υποθέσεις που απαιτούνται για να μοντελοποιηθεί η ανακλώμενη ηλιακή ένταση είναι σημαντικές, και οι προκύπτουσες εκτιμήσεις είναι πολύ χονδρικές. Το απλούστερο μοντέλο υποθέτει μια μεγάλη οριζόντια επιφάνεια μπροστά από το συλλέκτη, με μια αντανάκλαση  $\rho$  που προκαλεί αναπήδηση στην ανακλώμενη ακτινοβολία με ίση ένταση προς όλες τις κατευθύνσεις. Προφανώς, αυτή είναι μια πολύ απλοϊκή υπόθεση, ειδικά αν η επιφάνεια είναι λεία και φωτεινή.

Προσθέτοντας τις τρεις παραπάνω συνιστώσες θα προκύψει τελικά η συνολική ακτινοβολία πάνω στο συλλέκτη. Ωστόσο σχέσεις υπολογισμού για την κάθε συνιστώσα θα εξεταστούν στα επόμενα κεφάλαια κατά την παρουσίαση των μεθόδων [2.2].

### 2.3.2. Μηνιαίες μέσες τιμές της ακτινοβολίας

Ο υπολογισμός στιγμιαίων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος αν και θα ήταν ιδανικός δεν είναι απλή υπόθεση. Ένας πιο ρεαλιστικός τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν μακροχρόνιες μετρήσεις της ηλιακής έντασης σε οριζόντια επιφάνεια για τη συγκεκριμένη τοποθεσία που ενδιαφέρει. Τέτοιου είδους μετρήσεις γίνονται σε μετεωρολογικούς σταθμούς οι οποίοι έχουν στη διάθεση τους αρχεία με πληροφορίες αρκετών δεκαετιών. Η πιο συνηθισμένη όμως πληροφορία που θα χρησιμοποιηθεί και στα επόμενα κεφάλαια είναι η μηνιαία μέση ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο η οποία σε συνδυασμό με ένα μηνιαίο μέσο δείκτη καθαρότητας μπορεί να δώσει οποιαδήποτε άλλη τιμή ακτινοβολίας χρειάζεται. Ο δείκτης καθαρότητας δείχνει πόσο

ξάστερος είναι ο ουρανός. Αν έχει υψηλή τιμή τότε ο ουρανός είναι καθαρός και η περισσότερη ακτινοβολία είναι απευθείας ενώ αν έχει χαμηλή τιμή τότε υπάρχει συννεφιασμένος ουρανός με κατά το πλείστον διάχυτη ακτινοβολία [2.2].

## **2.4. ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

### **2.4.1. Φωτοβολταϊκά στοιχεία, πλαίσια και συλλέκτες**

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή κυψελίδες είναι η μικρότερη δομική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος πάνω στην οποία λαμβάνει χώρα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή η απευθείας μετατροπή μέρους της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην πράξη τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι από πυρίτιο, ένα υλικό που από πλευράς αγωγιμότητας κατατάσσεται στους ημιαγωγούς. Όμως καθώς ένα ατομικό φωτοβολταϊκό στοιχείο παράγει τάση μόνο περίπου 0.5V, δε μπορεί να έχει πρακτικές εφαρμογές. Για αυτό το λόγο ενώνονται σε σειρά πολλά στοιχεία για να σχηματιστεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται 36 φωτοβολταϊκά στοιχεία για να δώσουν ένα πλαίσιο των 12 V. Αν τώρα ενωθούν σε σειρά ή παράλληλα ένας ορισμένος αριθμός πλαισίων, προκύπτει ένας φωτοβολταϊκός συλλέκτης. Ο τρόπος που θα ενωθούν (εν σειρά ή παράλληλα) εξαρτάται από το αν χρειάζεται αύξηση της τάσης (εν σειρά) ή αν πρέπει να αυξηθεί το ρεύμα (παράλληλα) [2.2].

### **2.4.2. Μετατροπéας ισχύος-Αντιστροφέας**

Οι μετατροπéες (ac/dc) είναι ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος που μετατρέπουν το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα σε εναλλασσόμενο συγκεκριμένης τάσης και συχνότητας. Τέτοιου είδους συσκευές είναι απαραίτητες σε ένα σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των μπαταριών σε εναλλασσόμενο κατάλληλης τάσης ώστε να τροφοδοτήσουν το φορτίο.

Ειδικά για την περίπτωση των μπαταριών υπάρχουν οι ρυθμιστές τάσης. Αυτοί δεν είναι τίποτα άλλο παρά ac/dc μετατροπéες που έχουν ως σκοπό την ορθή φόρτιση της μπαταρίας εμποδίζοντάς τη να υπερφορτιστεί αλλά και να εκφορτιστεί πέρα του επιτρεπτού βάθους φόρτισης [2.1].

### 2.4.3. Αποθηκευτικές μπαταρίες-Συσσωρευτές

Όσον αφορά τον τρόπο αποθήκευσης της ενέργειας που παράγεται από το σύστημα αν και υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες (όπως πεπιεσμένος αέρας και παραγωγή υδρογόνου), τελικά σήμερα χρησιμοποιούνται μπαταρίες. Μάλιστα ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος τύπος είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά μεγέθη των τελευταίων είναι η ικανότητα αποθήκευσης τους η οποία ορίζεται σε μια ονομαστική τάση και σε κάποιο ρυθμό αποφόρτισης. Οι σωστές μονάδες μέτρησης της ικανότητας αποθήκευσης είναι οι Ah. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά τους υπολογισμούς σε αυτές τις μονάδες δε χρησιμοποιείται πουθενά ο όρος της τάσης που είναι συνεχώς αυξομειούμενος. Όμως χάριν ευκολίας και επειδή γενικά θα χρησιμοποιηθούν μέσες τιμές θα θεωρηθεί ότι η τάση παραμένει σταθερή. Έτσι οι μονάδες που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι Wh.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος που αναφέρεται στις μπαταρίες είναι το βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge). Αυτό ορίζεται ως το ποσοστό του αποθηκευμένου στη μπαταρία, ηλεκτρικού φορτίου, το οποίο αποδίδεται προς το σύστημα του φορτίου, κατά τη διάρκεια της φάσης εκφόρτισης ενός κύκλου λειτουργίας του συστήματος. Για παράδειγμα αν μια μπαταρία έχει ονομαστική τιμή χωρητικότητας (rated battery capacity) 200 Wh και βάθος αποφόρτισης 76%, τότε η αποτελεσματική χωρητικότητα (effective battery capacity) θα είναι  $200 \cdot 0.76 = 152$  Wh. Αυτή είναι και η τιμή που πρέπει να χρησιμοποιείται κατά τους υπολογισμούς [2.1, 2.2].

### 2.4.4. Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος

Όταν αναφέρεται ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να κάνει ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος, τότε εννοείται ότι διαθέτει κατάλληλο ηλεκτρονικό υποσύστημα που προσαρμόζει τη σύνθετη αντίσταση στην έξοδο του φωτοβολταϊκού συλλέκτη, ώστε η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς, να αφορά συνεχώς στο εκάστοτε σημείο μέγιστης ισχύος, υπό τη δεδομένη θερμοκρασία (συλλέκτη και μπαταριών) και την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συνήθως το υποσύστημα αυτό ενσωματώνεται στο μετατροπέα ισχύος. Βέβαια η χρήση του ενδείκνυται όταν δεν υπάρχουν στο σύστημα μπαταρίες χωρίς αυτό να είναι απόλυτο [2.1].

### 2.4.5. Εξωτερική πηγή τροφοδοσίας

Σε πολλές περιπτώσεις η ενέργεια που δίνει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα δεν αρκεί για να καλυφθεί η ζήτηση του φορτίου. Αν το σύστημα διαθέτει αποθηκευτικές μπαταρίες

τότε η παραπάνω απαιτούμενη ενέργεια αντλείται από αυτές, αλλιώς είναι απαραίτητη η ύπαρξη μιας εξωτερικής πηγής τροφοδοσίας. Αυτή τη δουλειά μπορεί να επιτελέσει μια βενζινοκίνητη γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Κατά το σχεδιασμό λοιπόν ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος η εξωτερική πηγή ενέργειας είναι ένα πρόσθετο κόστος που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Τέλος να σημειωθεί ότι ακόμα και με την ύπαρξη μπαταριών η ζήτηση του φορτίου μπορεί να είναι τόσο υψηλή ώστε η αποθηκευμένη ενέργεια να μην είναι αρκετή για τη συμπλήρωση της απαιτούμενης. Άρα και σε αυτή την περίπτωση κρίνεται απαραίτητη η ενεργειακή συμβολή μιας εξωτερικής πηγής [2.1].

## 2.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Ι.Ε Φραγκιαδάκης, ‘Φωτοβολταϊκά Συστήματα’, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη Θεσσαλονίκη, 2006.
- [2.2] Π.Σ Γεωργιάκης, ‘Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας’, Χανιά, Σεπτέμβριος 2006.
- [2.3] Α.Μ Ποτηράκης, ‘Ανάπτυξη Λογισμικού Διαστασιολόγησης Υβριδικών Συστημάτων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας’, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ιούλιος 2003.
- [2.4] Simple Procedure For Predicting Long Term Average Performance Of Non Concentrating And Of Concentrating Solar Collectors, Manuel Collares-Pereira, Ari Rabl, Solar Energy, Vol 23, pp. 235-253, 1979.

## **ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΩΡΙΑΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΡΟΩΝ (1<sup>η</sup> ΜΕΘΟΔΟΣ)**

### **3.1. ΓΕΝΙΚΑ**

Η μέθοδος που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο οφείλεται στους Tawanda Hove, TMI Alamsyah, K.Sopian και A.Sahrir [3.1]. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η πρόβλεψη της μέσης μακροπρόθεσμης ενέργειας που παράγει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Πιο συγκεκριμένα το σύστημα αυτό περιέχει ένα φωτοβολταϊκό συλλέκτη, αποθηκευτικές μπαταρίες, εξοπλισμό μετατροπής ενέργειας με δυνατότητα ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος και μια εξωτερική πηγή τροφοδοσίας. Όλες οι ωριαίες ενεργειακές ροές υπολογίζονται βάση των παραμέτρων του συλλέκτη, των μέσων ωριαίων θερμοκρασιών του περιβάλλοντος καθώς και των μέσων μηνιαίων ημερήσιων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε όλους τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται σαν σημείο αναφοράς η μέση ημέρα του μήνα. Η μετατροπή των μηνιαίων μέσων ημερήσιων τιμών της ακτινοβολίας σε αντίστοιχες ωριαίες τιμές γίνεται με στατιστικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό. Τέλος να αναφερθεί ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι συνδεδεμένο με ένα φορτίο που καταναλώνει την ενέργεια που παράγεται. Εδώ θα γίνει η παραδοχή ότι οι απαιτήσεις του φορτίου αυτού είναι σταθερές σε όλη τη διάρκεια της ημέρας.

### **3.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ**

Η αποτελεσματικότητα,  $\eta$ , ενός φωτοβολταϊκού συλλέκτη (ΦΣ) είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου και της ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη σύμφωνα με την παρακάτω σχέση [3.1]:

$$\eta = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_r) + \gamma \log_{10} I_{array}] \quad (3.1)$$

όπου  $\eta_r$  είναι η αποτελεσματικότητα του συλλέκτη που μετρήθηκε στη θερμοκρασία αναφοράς δηλαδή την  $T_r$ . Γενικά για τη δοκιμή και το χαρακτηρισμό ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου γίνονται δοκιμές σε κάποιες πρότυπες συνθήκες. Σε αυτές τις συνθήκες προκύπτουν και οι δύο παραπάνω όροι. Συνήθως η θερμοκρασία  $T_r$  είναι περίπου  $25^\circ\text{C}$ .  $\beta$  είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και θα θεωρηθεί ότι είναι σχετικά σταθερός για το εύρος των θερμοκρασιών που συναντώνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα,  $T_c$  είναι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου,  $\gamma$  είναι ένας συντελεστής που αφορά την ένταση της ακτινοβολίας και  $I_{array}$  είναι η ανά μονάδα επιφάνειας ποσότητα ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη. Επειδή έχει αποδειχθεί ότι ο όρος  $\gamma \log_{10} I_{array}$  δεν επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του συλλέκτη θα θεωρηθεί ότι ο συντελεστής  $\gamma$  ισούται με 0.

Στη συνέχεια αφαιρώντας και προσθέτοντας τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στις 2 θερμοκρασίες της (3.1) αντίστοιχα, προκύπτει η παρακάτω σχέση [3.1]:

$$\eta = \eta_r [1 - \beta(T_c - T_a) - \beta(T_a - T_r)] \quad (3.2)$$

Κάνοντας ενεργειακή ισορροπία στην επιφάνεια του συλλέκτη σχηματίζεται η παρακάτω σχέση [3.1]:

$$\tau \alpha I_{array} = \eta I_{array} + U_L (T_c - T_a) \quad (3.3)$$

Δηλαδή η ηλιακή ενέργεια που αποκτά ο συλλέκτης ισούται με αυτήν που τελικά δίνει συν τις θερμικές απώλειες. Στην παραπάνω σχέση  $\alpha$  είναι η απορροφητικότητα και  $\tau$  ο συντελεστής μετάδοσης του συλλέκτη ενώ  $U_L$  είναι ο θερμικός συντελεστής απώλειας ανά μονάδα επιφάνειας μεταξύ του συλλέκτη και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Γνωρίζοντας τώρα ότι η αποτελεσματικότητα του συλλέκτη είναι της τάξεως του 0.17  $\tau \alpha$  η εξίσωση (3.3) μπορεί να γραφτεί ως εξής [3.1]:

$$T_c - T_a = 0.9(\tau \alpha / U_L) I_{array} \quad (3.4)$$

Ο όρος  $\tau \alpha / U_L$  μπορεί να καθοριστεί από μετρήσεις της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων, της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και της ηλιακής

ακτινοβολίας όταν επικρατούν **NOCT** (nominal operating cell temperature) συνθήκες. Αυτό πρακτικά σημαίνει  $I_{array}=800 \text{ W/m}^2$ ,  $T_a=20 \text{ }^\circ\text{C}$ , ταχύτητα ανέμου ίση με  $1 \text{ m/s}$  και  $\eta=0$ . Αντικαθιστώντας λοιπόν στην εξίσωση (3.3)  $T_{c,NOCT}$  αντί για  $T_c$ ,  $T_{a,NOCT}$  αντί για  $T_a$  και  $\eta=0$  προκύπτει η παρακάτω σχέση [3.1]:

$$\tau\alpha/U_L = (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT})/I_{array,NOCT} \quad (3.5)$$

Τώρα, υποθέτοντας ότι ο όρος  $\tau\alpha/U_L$  είναι σταθερός για το εύρος των θερμοκρασιών που ενδιαφέρουν, η εξίσωση (3.4) μαζί με τον όρο  $\tau\alpha/U_L$  που λαμβάνεται από την εξίσωση (3.5), χρησιμοποιούνται στην εξίσωση (3.2) και προκύπτει η εξίσωση [3.1]:

$$\eta = \eta_r \left[ 1 - 0.9\beta \frac{I_{array}}{I_{array,NOCT}} (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) - \beta(T_a - T_r) \right] \quad (3.6)$$

Τελικά η ηλεκτρική παραγωγή του συλλέκτη,  $\overline{E}$ , προκύπτει από την παρακάτω σχέση όπου  $A$  είναι η επιφάνεια του συλλέκτη:

$$\overline{E} = \eta A I_{array} \quad (3.7)$$

### 3.3. ΜΕΣΗ ΩΡΙΑΙΑ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

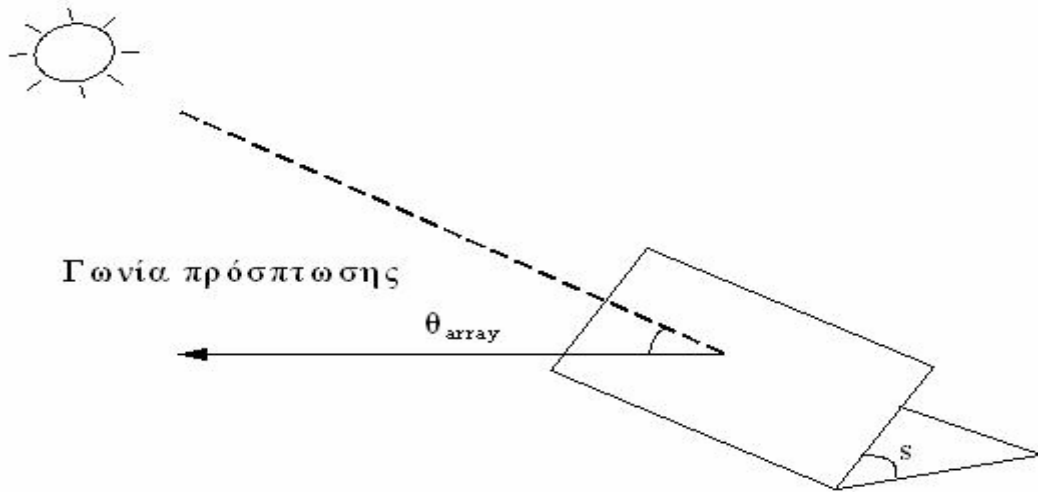
Η στιγμιαία ποσότητα ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη μπορεί να προσεγγιστεί από την παρακάτω σχέση όπου έχουν γίνει αρκετές απλοποιήσεις [3.1]:

$$I_{array} = I_{bn} \cos \theta_{array} + I_d \quad (3.8)$$

όπου  $I_{bn}$  είναι η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία,  $\theta_{array}$  είναι η γωνία πρόσπτωσης μεταξύ της πρόσπτωσης του συλλέκτη και της διεύθυνσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και  $I_d$  είναι η διάχυτη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία  $I_{bn}$  μπορεί να περιγραφεί με όρους της διάχυτης ακτινοβολίας και της ακτινοβολίας πάνω σε οριζόντιο



επίπεδο,  $I_h$ , ως  $I_{bn} = (I_h - I_d) / \cos \theta_z$ , όπου  $\theta_z$  είναι η ζενίθ γωνία. Αν τώρα θεωρηθεί ότι όλη η ακτινοβολία μίας ώρας είναι συγκεντρωμένη στο μισό της ώρας τότε η (3.8) δίνει την ωριαία ποσότητα ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη. Βασική προϋπόθεση όμως είναι η γωνία  $\theta_{array}$  (Σχήμα 3.1) να έχει μετρηθεί στη μέση της ώρας.



**Σχήμα 3.1:** Γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στον συλλέκτη

Όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο οι περισσότεροι μετεωρολογικοί σταθμοί παρέχουν τη μηνιαία μέση ημερήσια ακτινοβολία πάνω σε οριζόντιο επίπεδο,  $\overline{H_h}$  και τη μηνιαία μέση ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία,  $\overline{H_o}$ . Από τη γνώση της  $\overline{H_h}$  μπορεί να προκύψει η μηνιαία μέση ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία,  $\overline{H_d}$ , χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση [3.4]:

$$\overline{H_d} / \overline{H_h} = 1.390 - 4.027 \overline{K_h} + 5.531 \overline{K_h}^2 - 3.108 \overline{K_h}^3 \quad (3.9)$$

όπου  $\overline{K_h}$  είναι ο μηνιαίος μέσος δείκτης καθαρότητας και είναι ίσος με  $\overline{K_h} = \overline{H_h} / \overline{H_o}$ . Στη συνέχεια για να μετατραπούν οι παραπάνω μηνιαίες τιμές σε αντίστοιχες ωριαίες θα χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές μετατροπής  $r_h$  και  $r_d$  [3.2]. Έτσι προκύπτει:

$$\overline{i_h} = r_h \overline{H_h} \quad (3.10\alpha)$$

και

$$\overline{i_d} = r_d \overline{H_d} \quad (3.10\beta)$$

όπου τώρα  $\bar{i}_h$  και  $\bar{i}_d$  είναι η μηνιαία μέση ωριαία ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και η μηνιαία μέση ωριαία διάχυτη ακτινοβολία αντίστοιχα. Οι σχέσεις που δίνουν τους συντελεστές μετατροπής δίνονται παρακάτω [3.2]:

$$r_h = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (3.11)$$

και

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (3.12)$$

Στην (3.11) χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές  $a$  και  $b$  οι οποίοι είναι ίσοι με  $a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 1.047)$  και  $b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 1.047)$ . Η γωνία ώρας,  $\omega$ , και η γωνία ώρας ηλιοβασιλέματος,  $\omega_s$ , πρέπει να δίνονται σε ακτίνια.

Επιστρέφοντας στην εξίσωση (3.8) και αντικαθιστώντας τις μηνιαίες ημερήσιες τιμές από τις αντίστοιχες ωριαίες των εξισώσεων (3.10α) και (3.10β) προκύπτει τελικά η σχέση (3.13) που μας δίνει τη μηνιαία μέση ωριαία ποσότητα ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη [3.1].

$$\bar{i}_{array} = (\bar{i}_h - \bar{i}_d) \frac{\cos \theta_{array}}{\cos \theta_z} + \bar{i}_d \quad (3.13)$$

Η τελευταία μεταβλητή που πρέπει να υπολογιστεί είναι η  $\cos \theta_{array} / \cos \theta_z$ . Γενικά για μια τοποθεσία με γεωγραφικό πλάτος  $\phi$ , για κλίση του συλλέκτη  $s$  και με αζιμούθιο ίσο με το μηδέν υπάρχει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{\cos \theta_{array}}{\cos \theta_z} = \frac{\cos(\phi - s)(\cos \omega - \cos \omega'_s)}{\cos \phi (\cos \omega - \cos \omega_s)} \quad (3.14)$$

όπου  $\omega'_s$  είναι η γωνία ώρας ηλιοβασιλέματος για τον κεκλιμένο συλλέκτη και υπολογίζεται ως [3.3]:

$$\cos \omega'_s = \min(\cos \omega_s, -\tan(\phi - s) \tan \delta) \quad (3.15)$$

όπου  $\delta$  είναι η απόκλιση του ήλιου.

Επειδή όμως η εξεταζόμενη μέθοδος υποθέτει ότι το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας είναι ίσο με την κλίση του συλλέκτη η σχέση (3.15) δίνει  $\cos \omega'_s = 0$ .

Ακολουθώντας λοιπόν την παραπάνω διαδικασία θα προκύψουν οι ωριαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν έπειτα στις σχέσεις (3.7) και (3.6) και θα δώσουν τη ζητούμενη ηλεκτρική παραγωγή. Πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη και η αποτελεσματικότητα του συστήματος μετατροπής της ενέργειας  $\eta_c$ . Τελικά η (3.7) γίνεται:

$$\bar{E}_i = \eta_i \eta_c \bar{A} i_{array} \quad (3.16)$$

### 3.4. ΜΕΣΗ ΩΡΙΑΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΡΟΗ

Αρχικά θα σημειωθεί ξανά ότι το σύστημά μας αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό συλλέκτη ενωμένο, με ένα μετατροπέα ενέργειας, με αποθηκευτικές μπαταρίες και φυσικά με το φορτίο που θα καταναλώνει την ενέργεια που παράγεται (π.χ. ένα σπίτι). Επίσης υπάρχει και μια γεννήτρια που θα παράγει μόνο σε περιπτώσεις έλλειψης.

Οι ωριαίες ενεργειακές ροές που πρέπει να υπολογιστούν είναι:

- 1) Η εξαγόμενη από το συλλέκτη ενέργεια  $\bar{E}_i$  (από την προηγούμενη παράγραφο)
- 2) Η ενέργεια της μπαταρίας που αποθηκεύτηκε ή καταναλώθηκε την κάθε ώρα δηλαδή ο όρος  $B_{gain}$ .
- 3) Η ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε από το φορτίο δηλαδή ο όρος  $\bar{E}_{L,i}$ . Εδώ πρέπει να γίνει διαχωρισμός αυτού του όρου από τον όρο  $\bar{L}_i$  που αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απαιτεί το φορτίο. Ισχύει πάντα ότι  $\bar{E}_{L,i} \leq \bar{L}_i$ .
- 4) Η ενέργεια που χάθηκε επειδή οι μπαταρίες ήταν γεμάτες και επειδή όλες οι μπαταρίες έχουν απώλειες. Ο όρος που αντιστοιχεί εδώ είναι ο  $E_w$ .

Κατά τη διάρκεια των ωρών με μεγάλη ακτινοβολία, μέρος της ενέργειας του συλλέκτη χρησιμοποιείται για τις ανάγκες του φορτίου ενώ το υπόλοιπο για να φορτίσει τις μπαταρίες. Όμως δεν είναι ωφέλιμη όλη η ενέργεια που δίνεται στις μπαταρίες. Και αυτό γιατί υπάρχουν φαινόμενα εσωτερικής αντίστασης και ηλεκτρολυτικού ψεκασμού. Αυτές οι απώλειες μπορούν να περιγραφούν από τον όρο  $n_B$  που είναι η αποδοτικότητα της μπαταρίας

και ισούται με τον λόγο της ενέργειας που δόθηκε ως προς την ενέργεια που πραγματικά χρησιμοποιήθηκε. Αν τώρα οι μπαταρίες γεμίσουν τότε η ενέργεια που παράγεται δε μπορεί ούτε να αποθηκευτεί ούτε να χρησιμοποιηθεί και χάνεται οριστικά. Σύμφωνα με αυτά ο όρος  $E_w$  είναι η ενέργεια που έρχεται από το συλλέκτη μέσω του μετατροπέα μειωμένη από την ενέργεια που πραγματικά αποθηκεύτηκε στη μπαταρία και από την ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του φορτίου.

Στις ώρες που δεν υπάρχει επαρκής ακτινοβολία, η ενέργεια που έρχεται από το συλλέκτη είναι λιγότερη από αυτή που απαιτείται (δηλ. από την  $\bar{L}_i$ ). Έτσι η υπόλοιπη ενέργεια εξάγεται από τις μπαταρίες. Όμως γίνεται η υπόθεση ότι αντλείται από αυτές όση ενέργεια χρειάζεται ακριβώς. Έτσι δε χάνεται καθόλου ενέργεια.

Τέλος αν η ενέργεια των μπαταριών και η ενέργεια που δίνει ο συλλέκτης δεν είναι αρκετές για να ικανοποιήσουν το φορτίο τότε αρχίζει να λειτουργεί η εξωτερική γεννήτρια.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω οι μέσες ενεργειακές ροές μπορούν να περιγραφούν από τα παρακάτω.

Η ωριαία φόρτιση (ή αποφόρτιση) της μπαταρίας είναι [3.1]:

$$\begin{aligned} B_{gain} &= \min[n_B(\bar{E}_i - \bar{L}_i), (B_c - B_{level})] \quad \text{αν} \quad \bar{E}_i \geq \bar{L}_i \quad \text{ή} \\ B_{gain} &= -\min[\bar{L}_i - \bar{E}_i, B_{level}] \quad \text{αν} \quad \bar{E}_i < \bar{L}_i \end{aligned} \quad (3.17)$$

όπου  $B_c$  είναι η αποτελεσματική χωρητικότητα (δηλαδή έχοντας λάβει υπόψη το βάθος αποφόρτισης) της μπαταρίας και  $B_{level}$  είναι το επίπεδο πληρότητας της μπαταρίας στην αρχή κάθε ώρας για το οποίο μάλιστα ισχύει  $0 \leq B_{level} \leq B_c$ . Με λίγα λόγια η (3.17) μας λέει ότι αν η ενέργεια από το συλλέκτη είναι ίση ή περισσότερη από την απαιτούμενη η μπαταρία αποθηκεύει μια ποσότητα ενέργειας ίση με  $n_B(\bar{E}_i - \bar{L}_i)$ , η οποία όμως δε μπορεί να ξεπεράσει αυτή που μπορεί να χωρέσει δηλαδή  $(B_c - B_{level})$ . Από την άλλη πλευρά αν η ενέργεια του συλλέκτη δεν επαρκεί τότε αντλούμε από τη μπαταρία μια ποσότητα ίση με  $\bar{L}_i - \bar{E}_i$ , η οποία όμως δε μπορεί να είναι περισσότερη από  $B_{level}$ , δηλαδή από την ενέργεια που ήδη υπάρχει μέσα στη μπαταρία.

Η ωριαία ηλιακή ενέργεια που είναι διαθέσιμη στο φορτίο  $\bar{E}_{L,i}$ , μπορεί να γραφεί ως εξής [3.1]:

$$\bar{E}_{L,i} = \min[(\bar{E}_i - B_{gain} / n_B), \bar{L}_i] \quad \text{αν} \quad \bar{E}_i \geq \bar{L}_i \quad \text{ή}$$

$$\bar{E}_{L,i} = \min[(\bar{E}_i - B_{gain}), \bar{L}_i] \quad \text{αν } \bar{E}_i < \bar{L}_i \quad (3.18)$$

Για παράδειγμα, στην περίπτωση που υπάρχει παραπάνω ενέργεια, το μέρος που παίρνει το φορτίο (που δε μπορεί να ξεπεράσει σε ποσότητα την  $\bar{L}_i$ ) είναι ίσο με την ενέργεια του συλλέκτη μειωμένη κατά το ποσό που πραγματικά τροφοδοτήθηκε στη μπαταρία  $B_{gain} / n_B$ . Στην περίπτωση τώρα ελλείμματος η ενέργεια που δόθηκε στο φορτίο ή είναι αυτή από το συλλέκτη συν αυτή που αντλήθηκε από τη μπαταρία (το  $B_{gain}$  είναι τώρα αρνητικό) ή η απαιτούμενη  $\bar{L}_i$ .

Η ωριαία ενέργεια που χάθηκε,  $E_w$ , δίνεται ως [3.1]:

$$\begin{aligned} E_w &= \bar{E}_i - B_{gain} - \bar{E}_{L,i} \quad \text{αν } \bar{E}_i \geq \bar{L}_i \quad \text{ή} \\ E_w &= 0 \quad \text{αν } \bar{E}_i < \bar{L}_i \end{aligned} \quad (3.19)$$

Αρα αν η ενέργεια από το συλλέκτη είναι παραπάνω τότε η ενέργεια που χάνεται είναι ίση με αυτή του συλλέκτη μείον αυτή που αποθηκεύτηκε στην μπαταρία μέχρι να γεμίσει και μείον αυτή που δόθηκε στο φορτίο. Σε κάθε άλλη περίπτωση δεν υπάρχει απώλεια ενέργειας. Πρέπει να προσεχθεί ότι εδώ δε χρειάζεται να συνυπολογιστεί η ενέργεια που χάνεται λόγω των απωλειών της μπαταρίας αφού αυτή λήφθηκε υπόψη κατά τη φόρτιση της μπαταρίας.

Τέλος θα προστεθεί και ένας άλλος όρος ο οποίος θα χρησιμεύσει αργότερα. Είναι η ενέργεια που θα μπορούσε να είχε χαθεί αν δεν υπήρχαν καθόλου μπαταρίες  $\bar{D}_o$ . Αυτή δίνεται ως [3.1]:

$$\begin{aligned} \bar{D}_o &= \bar{E}_i - \bar{L}_i \quad \text{αν } \bar{E}_i \geq \bar{L}_i \quad \text{ή} \\ \bar{D}_o &= 0 \quad \text{αν } \bar{E}_i < \bar{L}_i \end{aligned} \quad (3.20)$$

Σε μια συγκεκριμένη μέρα οι ενεργειακές ροές πρέπει να ικανοποιούν την υπόθεση ότι η συνολικά αποθηκευμένη στις μπαταρίες ενέργεια  $\sum_1^{24h} B_{gain}$  συν την ενέργεια που δόθηκε στο φορτίο  $\sum_1^{24h} \bar{E}_{L,i}$  και συν την ενέργεια η οποία χάθηκε  $\sum_1^{24h} E_w$  πρέπει να ισούνται με την ενέργεια που δόθηκε από το συλλέκτη  $\sum_1^{24h} \bar{E}_i$ . Πρέπει λοιπόν να ικανοποιείται η παρακάτω εξίσωση [3.1]:

$$\sum_1^{24h} B_{gain} + \sum_1^{24h} \overline{E}_{L,i} + \sum_1^{24h} E_w = \sum_1^{24h} \overline{E}_i \quad (3.21)$$

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, η εξεταζόμενη μέθοδος υπολογίζει τις ενεργειακές ροές για τη μέση ημέρα του μήνα. Αυτό επιτρέπει να θεωρούνται όλες οι ημέρες ενός μήνα σαν πανομοιότυπες. Έτσι οι τιμές του επιπέδου της μπαταρίας αλλά και οι άλλες ενεργειακές ροές για μια συγκεκριμένη ώρα μίας ημέρας θα είναι ίδιες με τις αντίστοιχες της ίδιας ώρας για την επόμενη ημέρα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι  $\sum_1^{24h} B_{gain} = 0$ . Είναι δυνατό λοιπόν σύμφωνα με την τελευταία σχέση να βρεθεί ποιο θα πρέπει να είναι το σωστό επίπεδο πληρότητας των μπαταριών στην αρχή της ημέρας. Ο τρόπος εύρεσης του παρατίθεται στην επόμενη παράγραφο με ένα αλγόριθμο.

### 3.5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Σε αυτή την παράγραφο θα δειχθεί πως χρησιμοποιείται η μέθοδος που περιγράφηκε. Η προσομοίωση θα γίνει για μια περιοχή με γεωγραφικό πλάτος  $19.7^\circ$  (ή  $0.343$  ακτίνια) για το μήνα Ιούνιο. Σε αυτή την περίπτωση η μέση ημέρα ισούται με  $\overline{n}=168$ . Επίσης για αυτό το μήνα τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι  $\overline{H}_h=18.43 \text{ MJ/m}^2$  και  $\overline{K}_h=0.76$ . Άρα από τη σχέση (3.9) προκύπτει  $\overline{H}_d=3.23 \text{ MJ/m}^2$ . Τα υπόλοιπα δεδομένα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1:

**Πίνακας 3.1:** Παράμετροι του συστήματος

Αποτελεσματικότητα Αναφοράς ( $\eta_r$ )	0.1
Θερμοκρασία αναφοράς ( $T_r$ )	$25^\circ\text{C}$
Κλίση συλλέκτη (s)	0.343
$I_{array,NOCT}$	$800 \text{ W/m}^2$
Θερμοκρασιακός συντελεστής ( $\beta$ )	$0.0004/^\circ\text{C}$
$T_{a,NOCT}$	$20^\circ\text{C}$
$T_{c,NOCT}$	$46^\circ\text{C}$
Αποτελεσματικότητα μπαταρίας ( $n_B$ )	0.85
Αποτελεσματικότητα μετατροπέα ισχύος ( $n_c$ )	0.90
Ωριαία ζήτηση φορτίου ( $\overline{L}_i$ )	$2.5 \text{ MJ/h}$

Οι μέσες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, απαραίτητες για τον υπολογισμό της αποτελεσματικότητας του συλλέκτη είναι 7.2, 6.9, 6.7, 6.5, 6.4, 6.4, 7, 11, 13.9, 15.7, 17.1, 18.1, 18.8, 19.2, 19.3, 18.9, 17.6, 13.6, 10.8, 9, 8.8, 8.4, 7.9, 7.5, 11.4 σε βαθμούς Κελσίου αρχίζοντας από τη 1 το πρωί.

Μπορούν τώρα να αρχίσουν οι υπολογισμοί. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.10) έως (3.15), τις σχέσεις που δίνουν τις γωνίες ώρας και ηλιοβασιλέματος καθώς και την απόκλιση του ήλιου προκύπτει η ωριαία ποσότητα ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη. Ο Πίνακας 3.2 περιέχει όλες τις υπολογισμένες τιμές.

Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστούν η αποτελεσματικότητα του συλλέκτη και μετά οι ενεργειακές ροές. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις αντίστοιχες σχέσεις συμπληρώνεται ο Πίνακας 3.3.

Πριν συζητηθούν τα αποτελέσματα πρέπει να εξηγηθεί πως προκύπτει ο όρος  $B_{level}^+$  για κάθε ώρα και πως θα επιλεγεί η σωστή τιμή για την πρώτη ώρα της προσομοίωσης. Το  $B_{level}^+$  λοιπόν που ορίζεται σαν το επίπεδο πληρότητας της μπαταρίας στην αρχή της επόμενης ώρας προκύπτει από τον παρακάτω τύπο [3.1]:

$$B_{level}^+ = B_{level} + B_{gain} \quad (3.22)$$

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, στην μέθοδο που παρουσιάζεται δεν επιτρέπεται η τυχαία επιλογή της πρώτης τιμής του  $B_{level}$ . Αυτή η τιμή είναι μοναδική επειδή πρέπει να αναπαράγεται κάθε άλλη μέρα του μήνα για την ίδια ώρα. Ειδικότερα το  $B_{level}^+$  της πρώτης ώρας πρέπει να είναι πάντα ίσο με το  $B_{level}$  της τελευταίας συν το  $B_{gain}$  για αυτή την ώρα. Για να σιγουρευτεί λοιπόν ο σωστός υπολογισμός των ενεργειακών ροών προτείνεται ο παρακάτω αλγόριθμος [3.1] για την εύρεση του  $B_{level}$  της πρώτης ώρας.

1. Διάλεξε ένα τυχαίο αρχικό επίπεδο πληρότητας  $B_{level}$  (start) όπου δεν ξεπερνά τη χωρητικότητα της μπαταρίας.
2. Υπολόγισε το  $B_{gain}$  για αυτή την ώρα (3.16).
3. Υπολόγισε από την (3.21) το  $B_{level}^+$ .
4. Επανάλαβε τη διαδικασία για όλες τις άλλες ώρες της ημέρας.
5. Πρόσθεσε όλα τα  $B_{gain}$ .
6. Αν το άθροισμα είναι ίσο με 0 τότε συνέχισε την προσομοίωση κανονικά.

7. Αν το άθροισμα είναι διάφορο του 0 τότε βρες καινούργιο  $B_{level}(start)$  σύμφωνα με τη σχέση  $B_{level}(start) = \text{προηγούμενο } B_{level}(start) + \text{άθροισμα } B_{gain}$ .
8. Επανάλαβε τη διαδικασία μέχρι το άθροισμα  $B_{gain}$  να γίνει ίσο με 0.

Παρατηρώντας τώρα τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο συλλέκτης έδωσε ενέργεια ίση με 59.78 MJ (άθροισμα της στήλης  $\overline{E}_i$  του Πίνακα 3.3) τόση όση δόθηκε και στο φορτίο (άθροισμα της στήλης  $\overline{E}_{L,i}$  του Πίνακα 3.3). Η ενέργεια που χάθηκε λόγω πληρότητας των μπαταριών είναι ίση με 9.84 MJ, ενώ αν δεν είχαμε καθόλου μπαταρίες θα είχαμε χάσει 34.84 MJ (άθροισμα των στηλών  $E_w$  και  $\overline{D}_o$  του Πίνακα 3.3 αντίστοιχα). Βέβαια στο παράδειγμα που δόθηκε δε χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος εύρεσης του σωστού  $B_{level}$ . Ας δούμε λοιπόν πως αλλάζουν τα παραπάνω αποτελέσματα με τη χρήση του αλγορίθμου.

Το αρχικό  $B_{level}$  όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.3 την ώρα 5-6 π.μ. είναι ίσο με 10 MJ. Σύμφωνα με την εξίσωση (3.16) για αυτή την ώρα προκύπτει  $B_{gain} = -2.5$  MJ. Άρα το  $B_{level}^+$  για την επόμενη ώρα είναι 7.5 MJ,  $(10 + (-2.5))$ . Συνεχίζοντας τη διαδικασία για όλες τις ώρες και αθροίζοντας όλα τα  $B_{gain}$  προκύπτει ένα άθροισμα ίσο με -10 MJ. Επειδή λοιπόν αυτή η τιμή είναι διάφορη του μηδενός σύμφωνα με το βήμα 7 του αλγορίθμου η καινούργια τιμή  $B_{level}(start)$  είναι ίση με 0. Επαναλαμβάνοντας τον αλγόριθμο για μια ακόμη φορά το άθροισμα των  $B_{gain}$  θα γίνει ίσο με 0 και τα αθροίσματα των  $\overline{E}_{L,i}$  και  $E_w$  θα γίνουν 54.55 MJ και 5.23 MJ αντίστοιχα.



Πίνακας 3.2: Ακτινοβολία πάνω στο συλλέκτη

Χρόνος	$\omega$ (rad)	$\delta$ (rad)	$\phi$ (rad)	$\omega_s$ (rad)	$r_d$	$r_h$	$i_d$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$i_h$ (MJ/m <sup>2</sup> )	Εξ. (3.14)	$i_{array}$ (MJ/m <sup>2</sup> )
5-6	-1.702	0.408	-0.343	1.407	0	0	0	0	0	0
6-7	-1.440	0.408	-0.343	1.407	0	0	0	0	0	0
7-8	-1.178	0.408	-0.343	1.407	0.038	0.029	0.12	0.54	1.86	0.9
8-9	-0.916	0.408	-0.343	1.407	0.077	0.068	0.25	1.26	1.46	1.72
9-10	-0.655	0.408	-0.343	1.407	0.109	0.106	0.35	1.96	1.34	2.52
10-11	-0.393	0.408	-0.343	1.407	0.132	0.137	0.42	2.52	1.30	3.15
11-12	-0.131	0.408	-0.343	1.407	0.143	0.154	0.46	2.84	1.28	3.50
12-13	0.131	0.408	-0.343	1.407	0.143	0.154	0.46	2.84	1.28	3.50
13-14	0.393	0.408	-0.343	1.407	0.132	0.137	0.42	2.52	1.30	3.15
14-15	0.655	0.408	-0.343	1.407	0.109	0.106	0.35	1.96	1.34	2.52
15-16	0.916	0.408	-0.343	1.407	0.077	0.068	0.25	1.26	1.46	1.72
16-17	1.178	0.408	-0.343	1.407	0.038	0.029	0.12	0.54	1.86	0.90
17-18	1.440	0.408	-0.343	1.407	0	0	0	0	0	0
18-19	1.702	0.408	-0.343	1.407	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 3.3: Ωριαίες ενεργειακές ροές

$\eta$	$E_t$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$L_i$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$B_{level}^+$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$B_{gain}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$E_{L,i}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$E_w$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$E_o$ (MJ/m <sup>2</sup> )
0	0	2.5	10	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	7.5	-2.5	2.5	0	0
0.1	2.51	2.5	5	0.01	2.5	0	0.01
0.1	4.59	2.5	5.01	1.77	2.5	0.31	2.09
0.09	6.45	2.5	6.78	3.36	2.5	0.59	3.95
0.09	8.2	2.5	10.14	4.85	2.5	0.86	5.7
0.09	8.53	2.5	14.99	5.12	2.5	0.9	6.03
0.09	8.5	2.5	20.11	5.1	2.5	0.9	6
0.09	7.74	2.5	25.21	4.46	2.5	0.76	5.24
0.09	6.34	2.5	29.67	0.33	2.5	3.51	3.84
0.1	4.48	2.5	30	0	2.5	1.98	1.98
0.1	2.44	2.5	30	-0.06	2.5	0	0
0	0	2.5	29.94	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	27.44	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	24.94	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	22.44	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	19.94	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	17.44	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	14.94	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	12.44	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	9.94	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	7.44	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	4.94	-2.5	2.5	0	0
0	0	2.5	2.44	-2.44	2.44	0	0

Ενδεικτικός υπολογισμός αποτελεσματικότητας και ηλεκτρικής παραγωγής του συλλέκτη για την ώρα 7-8 π.μ.:

Αρχικά υπολογίζονται οι γωνίες  $\omega$ ,  $\delta$  και  $\omega_s$ . Σύμφωνα με τις σχέσεις (2.2) έως (2.4) προκύπτει:

$$\omega = (12 - 7.5) * 15 * \pi / 180 = 1.178 \text{ και}$$

$$\delta = 23.45 \sin((168 - 81) / 365) / 57.3 / 57.3 = 0.408 \text{ και}$$

$$\omega_s = \arccos(\tan(-0.343) \tan(0.408)) = 1.407$$

Έπειτα υπολογίζονται οι συντελεστές μετατροπής  $r_h$  και  $r_d$ . Από τους τύπους (3.11) και (3.12) προκύπτει:

$$r_d = (3.14 / 24) ((\cos(1.702) - \cos(1.407)) / (\sin(1.407) - 1.407 \cos(1.407))) = 0.038 \text{ και}$$

$$r_h = (3.14 / 24) (a + b \cos(1.702)) ((\cos(1.702) - \cos(1.407)) / (\sin(1.407) - 1.407 \cos(1.407))) = 0.029$$

Άρα από τις σχέσεις 3.10α και 3.10β προκύπτει:

$$\bar{i}_d = 3.22 * 0.038 = 0.12 \text{ MJ/m}^2 \text{ και}$$

$$\bar{i}_h = 18.43 * 0.029 = 0.54 \text{ MJ/m}^2$$

Από τη σχέση (3.14) προκύπτει:

$$\frac{\cos \theta_{array}}{\cos \theta_z} = \frac{\cos(0.343 - 0.343)(\cos(1.407))}{\cos(0.343)(\cos(1.178) - \cos(1.407))} = 1.86$$

Τελικά από τη σχέση (3.13):

$$\bar{i}_{array} = (0.54 - 0.12) * 1.86 + 0.12 = 0.90 \text{ MJ/m}^2$$

Η αποτελεσματικότητα δίνεται από τη σχέση (3.6):

$$\eta_i = 0.1 * (1 - 0.9 * 0.0004 * (0.9 / 2.88) * (46 - 20) - 0.0004 * (11 - 25)) = 0.10$$

Τέλος η ηλεκτρική παραγωγή του συλλέκτη από τη σχέση (3.7) για την ώρα 7-8 π.μ. είναι:

$$\overline{E}_i = 0.1 * 0.9 * 30 = 2.7 MJ$$

Έχοντας σαν δεδομένες τις αντίστοιχες ενεργειακές ροές για την προηγούμενη ώρα (6-7 π.μ.) προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα. Από τη σχέση (3.22)  $B_{level}^+ = 5 MJ/m^2$ , από την (3.17)  $B_{gain} = 0.01 MJ/m^2$ , από την (3.18)  $\overline{E}_{L,i} = 2.5 MJ/m^2$  και από την (3.19)  $E_w = 0 MJ/m^2$ . Αναλυτικότερα:

$$B_{level}^+ = 7.5 + (-2.5) = 5 MJ/m^2$$

$$B_{gain} = \min[0.85(2.51 - 2.5), (30 - 5)] = 0.01 MJ/m^2$$

$$\overline{E}_{L,i} = \min[(2.51 - 0.01/0.85), 2.5] = 2.5 MJ/m^2$$

$$E_w = 2.51 - 0.01 - 2.5 = 0 MJ/m^2$$

### 3.6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Tawanda Hove, 'A Method For Predicting Long Term Average Performance Of Photovoltaic Systems', Renewable Energy, December 1999.
- [3.2] M. Collares, A. Rabl, 'The Average Distribution Of Solar Radiation-Correlations Between Diffuse And Hemispherical And Between Daily And Hourly Insolation Values', Solar Energy Vol.22, pp. 155-164.'
- [3.3] M. Collares-Pereira, 'Derivation Of Method For Predicting Long Term Average Energy Delivery Of Solar Collectors', Solar Energy Vol. 23. pp. 223-233
- [3.4] Π.Σ Γεωργιάκης, 'Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας', Χανιά, Σεπτέμβριος 2006.

## **ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (2<sup>η</sup> ΜΕΘΟΔΟΣ)**

### **4.1. ΓΕΝΙΚΑ**

Η μέθοδος που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο οφείλεται στους M.D.Siegel, S.A.Klein και W.A.Beckman. Η κύρια διαφορά της με τη μέθοδο του τρίτου κεφαλαίου είναι ότι υπολογίζει ημερήσιες τιμές και όχι ωριαίες. Το φωτοβολταϊκό σύστημα που εξετάζεται αποτελείται από το συλλέκτη, από αποθηκευτικές μπαταρίες από ένα συνεχές σταθερό 24ωρο φορτίο και από το μετατροπέα ισχύος. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι όμοια με της προηγούμενης μεθόδου. Το καινούργιο στοιχείο που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό και το επόμενο κεφάλαιο είναι η συνάρτηση χρησιμότητας,  $\Phi$ , που αναπτύχθηκε από τον Klein και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παραπάνω παραγόμενης ενέργειας [4.1].

### **4.2. ΜΗΝΙΑΙΑ ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ**

Αρχικά μια πρώτη σχέση που δίνει την αποτελεσματικότητα του συλλέκτη είναι η παρακάτω [4.1]:

$$\eta = \eta_r (1 - \beta(T_c - T_r)) \quad (4.1)$$

Έπειτα αν γίνει ενεργειακή ισορροπία πάνω στο συλλέκτη θα προκύψει η παρακάτω σχέση [4.1]:

$$E = AI_{array} \tau \eta = AI_{array} \tau \alpha - AU_L (T_c - T_a) \quad (4.2)$$

όπου  $I_{array}$  εδώ είναι η στιγμιαία ποσότητα ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη. Αποβάλλοντας τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου  $T_c$  από τις εξισώσεις (4.1) και (4.2) και σημειώνοντας ότι ο συντελεστής θερμικών απωλειών  $U_L$  είναι πάντα μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από τον όρο  $I_{array}\tau\eta_r\beta$  παράγεται η ακόλουθη προσεγγιστική έκφραση για την αποτελεσματικότητα  $\eta$  [4.1]:

$$\eta = \eta_r \left[ 1 - \beta(T_a - T_r) - \frac{\beta\tau\alpha I_{array}}{U_L} \right] \quad (4.3)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τυπικές τιμές των παραμέτρων των φωτοβολταϊκών στοιχείων η σχέση (4.3) θα υποτιμήσει τη στιγμιαία αποτελεσματικότητα του συλλέκτη κατά μόλις 5%.

Η μηνιαία μέση ημερήσια ηλεκτρική ενέργεια που δίνει ο συλλέκτης,  $\bar{E}$ , μπορεί να βρεθεί ολοκληρώνοντας τη στιγμιαία ενέργεια για όλο το μήνα, και μετά διαιρώντας με τον αριθμό  $N$ , δηλαδή το πλήθος των ημερών ανά μήνα [4.1].

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \int^{month} E dt = \frac{1}{N} \int^{month} A\tau\eta I_{array} dt \quad (4.4)$$

Μια σχέση για την  $\bar{E}$  μπορεί να προκύψει αντικαθιστώντας στην (4.2) τις αντίστοιχες μηνιαίες τιμές των όρων  $\tau$ ,  $I_{array}$  και  $\eta$  [4.1]. Δηλαδή:

$$\bar{E} = A\tau\bar{H}_T\bar{\eta} \quad (4.5)$$

όπου  $\bar{H}_T$  είναι η μηνιαία μέση ημερήσια ανά μονάδα επιφάνειας ακτινοβολία πάνω στον κεκλιμένο συλλέκτη. Αργότερα θα δειχθεί πως μπορεί να προκύψει από μετεωρολογικά δεδομένα. Η μηνιαία μέση αποτελεσματικότητα δίνεται από την ακόλουθη σχέση [4.1]:

$$\bar{\eta} = \frac{\int^{month} \eta I_{array} dt}{\int^{month} I_{array} dt} = \left[ \frac{\eta_r}{N\bar{H}_T} \int^{month} I_{array} dt - \beta \int^{month} (T_a - T_r) I_{array} dt - \frac{\beta}{U_L} \int^{month} \tau\alpha I_{array}^2 dt \right] \quad (4.6)$$

Το πρώτο ολοκλήρωμα στο δεξιό μέλος της (4.6) είναι η συνολική μηνιαία ακτινοβολία πάνω στον κεκλιμένο συλλέκτη,  $\bar{H}_T N$ . Το δεύτερο ολοκλήρωμα είναι το

γινόμενο της  $\overline{H_T}N$  με την διαφορά της μέσης θερμοκρασίας περιβάλλοντος από τη θερμοκρασία αναφοράς. Τέλος το τρίτο ολοκλήρωμα μπορεί να υπολογιστεί από ένα μέσο γινόμενο του συντελεστή μεταφοράς και της απορροφητικότητας,  $(\overline{\tau\alpha})$  και από μια αδιάστατη μεταβλητή,  $V$ , που δίνεται από τον παρακάτω τύπο [4.1]:

$$V = \frac{n \int^{month} I_{array}^2 dt}{N \overline{H_T}^2} \quad (4.7)$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των ωρών ανά ημέρα. Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω προκύπτει μια τελική σχέση για τη μέση μηνιαία αποτελεσματικότητα του συλλέκτη [4.1].

$$\overline{\eta} = \eta_r \left[ 1 - \beta(T_a - T_r) - \frac{\beta(\overline{\tau\alpha})V\overline{H_T}}{nU_L} \right] \quad (4.8)$$

Για τον υπολογισμό της μεταβλητής  $V$  υπάρχουν πίνακες που περιέχουν μακροπρόθεσμες τιμές οι οποίες προήρθαν από αριθμητικές ολοκληρώσεις της εξίσωσης (4.7). Εδώ όμως θα δοθεί και μια προσεγγιστική αναλυτική σχέση υπολογισμού [4.1].

$$V = aX^2 + bX + c \quad (4.9)$$

όπου

$$X = \frac{\overline{R}/R_n}{(\omega'_s \cdot 1.548 \cdot \overline{K_h}) + ((1 - (1.548\overline{K_h}))\omega_s)} \quad (4.10)$$

και

$$a = 12.16\overline{K_h}^2 - 9.88\overline{K_h} + 0.80 \quad (4.11)$$

$$b = -1.90\overline{K_h}^2 - 9.78\overline{K_h} + 10.15 \quad (4.12)$$

$$c = 2.04\overline{K_h}^2 + 1.23\overline{K_h} - 0.58 \quad (4.13)$$

Στη σχέση (4.10),  $\overline{R}$  είναι ο λόγος της συνολικής μηνιαίας ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη ως προς την ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και  $R_n$  είναι ο λόγος της

ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη την ώρα του μεσημεριού ως προς την ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο για τη μέση ημέρα του μήνα. Σχέσεις που προσδιορίζουν τους 2 αυτούς όρους δίνονται παρακάτω [4.3]:

$$\bar{R} = (1 - \bar{H}_d / \bar{H}_h) \bar{R}_b + (\bar{H}_d / \bar{H}_h) (1 + \cos s) / 2 + \rho (1 - \cos s) / 2 \quad (4.14)$$

όπου το  $\bar{H}_d / \bar{H}_h$  δίνεται από τη σχέση (3.9),  $\rho$  είναι ο συντελεστής αντανάκλασης του εδάφους,  $s$  είναι η κλίση του συλλέκτη και  $\bar{R}_b$  είναι ο λόγος της μηνιαίας μέσης ημερήσιας απευθείας ακτινοβολίας πάνω σε κεκλιμένη επιφάνεια ως προς αυτή σε οριζόντια επιφάνεια. Ο  $\bar{R}_b$  ονομάζεται συντελεστής κλίσης της ηλιακής ακτινοβολίας και δίνεται από την ακόλουθη σχέση [4.2]:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi - s) \cos \delta \sin \omega'_s + \omega'_s \sin(\phi - s) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (4.15)$$

όπου κατά τα γνωστά οι γωνίες πρέπει να εισάγονται σε ακτίνια. Υπολογίζοντας λοιπόν το λόγο  $\bar{R}$  και έχοντας σαν δεδομένο από κάποιο μετεωρολογικό σταθμό την ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο  $\bar{H}_h$  μπορεί να υπολογιστεί η ακτινοβολία  $\bar{H}_T$  αφού  $\bar{R} = \bar{H}_T / \bar{H}_h$ .

Μια σχέση υπολογισμού του λόγου  $R_n$  είναι η ακόλουθη [4.3]:

$$R_n = \left( 1 - \frac{r_{d,n}}{r_{h,n}} \left( \frac{H_d}{H_h} \right) \right) R_{b,n} + \frac{r_{d,n}}{r_{h,n}} \left( \frac{H_d}{H_h} \right) \left( \frac{1 + \cos s}{2} \right) + \rho \left( \frac{1 - \cos s}{2} \right) \quad (4.16)$$

Οι όροι  $r_{d,n}$  και  $r_{h,n}$  παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όμως τώρα αναφέρονται μόνο για την ώρα του μεσημεριού (για αυτό φέρουν και το δείκτη  $n$ ) και δίνονται από τους παρακάτω τύπους [4.3]:

$$r_{d,n} = \left( \frac{\pi}{24} \right) \left( \frac{1 - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \right) \quad (4.17)$$

και

$$r_{h,n} = r_{d,n} [1.07 + 0.025 \sin(\omega_s - 60)] \quad (4.18)$$



Όμοια και ο όρος  $R_{b,n}$  εκφράζει τον  $\overline{R_b}$  για την ώρα του μεσημεριού και δίνεται από την παρακάτω σχέση [4.3]:

$$R_{b,n} = \frac{\cos(\phi - s) \cos \delta + \sin(\phi - s) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta + \sin \phi \sin \delta} \quad (4.19)$$

Ο λόγος  $H_d / H_h$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση όπου θεωρείται ότι  $\overline{K_h} = K_h$ .

$$H_d / H_h = 1.0045 + 0.04349K_h - 3.5227K_h^2 + 2.63K_h^3 \quad (4.20)$$

Χρησιμοποιώντας λοιπόν όλες τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζεται η μέση αποτελεσματικότητα του συλλέκτη και έπειτα από τη σχέση (4.5) η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Όμως εδώ πρέπει να ληφθεί υπόψη και η αποτελεσματικότητα του συστήματος μετατροπής της ισχύος  $\eta_c$ . Τελικά η συμβατική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ισούται με  $\eta_c \overline{E}$ .

### 4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΣΣΕΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η στιγμιαία ποσότητα ενέργειας που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να είναι παραπάνω από αυτήν που χρειάζεται το φορτίο. Αυτή η πρόσθετη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε μπαταρίες και να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη στιγμή ή μπορεί να χαθεί. Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιασθεί μια μέθοδος υπολογισμού της ενέργειας που χάνεται ή που ανατροφοδοτείται στο χωρίς μπαταρίες σύστημα στην περίπτωση ενός σταθερού φορτίου.

Όταν λοιπόν δεν υπάρχουν μπαταρίες αλλά ούτε και δυνατότητα ανατροφοδότησης ο ρυθμός που η ενέργεια χάνεται,  $D_o$ , είναι η διαφορά μεταξύ της στιγμιαίας ενέργειας που διατίθεται στο φορτίο,  $\eta_c E$ , και αυτής που απαιτεί το φορτίο  $L$  [4.1].

$$D_o = [\eta_c E - L]^+ = [\eta_c \eta \tau A I_{array} - L]^+ \quad (4.21)$$

Ο δείκτης ‘+’ δηλώνει ότι είναι αποδεκτές μόνο θετικές τιμές του όρου  $D_o$ . Η μέση τιμή  $\overline{D_o}$  θα προκύψει όπως πριν με ολοκλήρωση της (4.21) για όλο το μήνα και διαιρώντας με τον αριθμό των ημερών ανά μήνα [4.1]. Δηλαδή:

$$\overline{D_o} = \frac{\eta_c A}{N} \int^{month} \eta \tau \left[ I_{array} - \frac{L}{A \eta \tau \eta_c} \right]^+ dt \quad (4.22)$$

Θεωρώντας ότι στην (4.21) μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσες τιμές των  $\tau$  και  $\eta$ , παράγεται η παρακάτω σχέση [4.1]:

$$\overline{D_o} = A \overline{H_T} \overline{\eta \phi \tau \eta_c} \quad (4.23)$$

όπου  $\overline{\phi}$  είναι η μηνιαία-μέση ημερήσια χρησιμότητα, η οποία ορίζεται ως το κομμάτι εκείνο της συνολικής ακτινοβολίας που είναι πάνω από ένα κρίσιμο επίπεδο  $I_c$ . Δηλαδή:

$$\overline{\phi} = \frac{1}{N} \int^{month} \frac{[I_{array} - I_c]^+}{\overline{H_T}} dt \quad (4.24)$$

Το κρίσιμο επίπεδο ορίζεται ως η ποσότητα εκείνη της ακτινοβολίας η οποία δίνει ρυθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με την απαίτηση του φορτίου. Πιο συγκεκριμένα ορίζεται η παρακάτω σχέση [4.1] :

$$I_c = \frac{L}{A \eta \tau \eta_c} \quad (4.25)$$

Στη συνέχεια, θα δειχθεί η διαδικασία υπολογισμού της μέσης συνάρτησης χρησιμότητας  $\overline{\phi}$ . Στη βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί διαγράμματα που δίνουν τον παραπάνω όρο συναρτήσει του δείκτη καθαρότητας για πολλές περιπτώσεις. Ωστόσο υπάρχει και αναλυτικός τρόπος υπολογισμού ο οποίος και θα περιγραφεί εδώ. Η βασική σχέση υπολογισμού είναι η παρακάτω [4.3]:

$$\overline{\phi} = \exp \left( \left( A + B \left( R_n / \overline{R} \right) \right) \left( X_c + C X_c^2 \right) \right) \quad (4.26)$$

όπου A, B, C, είναι τρεις συντελεστές που μπορούν να προκύψουν από τα περιεχόμενα του Πίνακα 4.1:

**Πίνακας 4.1:** Συντελεστές της σχέσης (4.26)

$\overline{K}_h$	A	B	C
0.3	0.521	-2.007	0.005
0.4	0.100	-1.389	0.178
0.5	-0.750	-0.785	0.414
0.6	-1.112	-0.389	0.638
0.7	-1.564	0.115	1.158

ή από τις ακόλουθες σχέσεις [4.3]:

$$A = 2.943 - 9.271\overline{K}_h + 4.031\overline{K}_h^2 \quad (4.27\alpha)$$

$$B = -4.345 + 8.853\overline{K}_h - 3.602\overline{K}_h^2 \quad (4.27\beta)$$

$$C = -0.170 - 0.306\overline{K}_h + 2.936\overline{K}_h^2 \quad (4.27\gamma)$$

Αν προτιμηθεί να χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές από τον Πίνακα 4.1 αλλά για κάποια τιμή του δείκτη καθαρότητας που δε δίνεται τότε μπορεί να γίνει χρήση της γραμμικής παρεμβολής. Από την (4.26) έμεινε μόνο ο όρος  $X_c$  που ορίζεται ως ο λόγος του κρίσιμου σημείου ως προς την ακτινοβολία του μεσημεριού για μια μέση ημέρα του μήνα και προκύπτει από τον παρακάτω τύπο [4.3]:

$$X_c = \frac{I_c}{r_{t,n} R_n \overline{H}_h} = \frac{I_c}{r_{t,n} R_n \overline{K}_h \overline{H}_o} \quad (4.28)$$

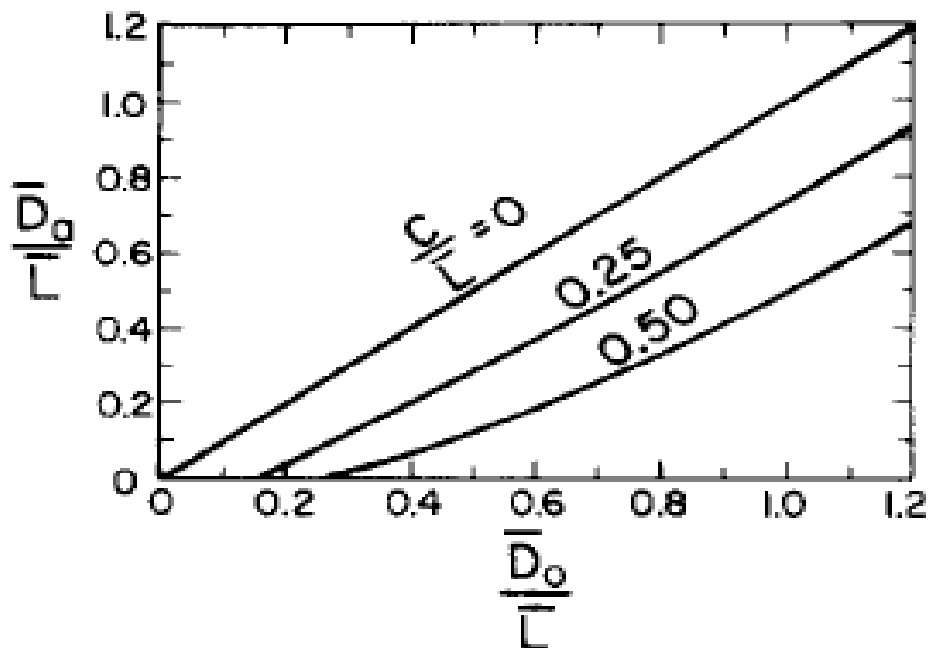
Ανακεφαλαιώνοντας, αν πρέπει να υπολογιστεί η συμβατική ηλεκτρική ενέργεια που δίνει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα που δε διαθέτει αποθηκευτικές μπαταρίες ή δυνατότητες ανατροφοδότησης τότε αρκεί να αφαιρεθεί από τη συμβατική παραγόμενη ενέργεια  $\eta_c \overline{E}$  ο όρος  $\overline{D}_o$ . Αν τώρα το σύστημα έχει δυνατότητες ανατροφοδότησης τότε η ποσότητα της ενέργειας που ανατροφοδοτείται είναι ίση με  $\overline{D}_o$ .

#### 4.4. ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Σε ένα σύστημα με μπαταρίες η μέση μηνιαία ημερήσια ενέργεια που αποθηκεύεται  $\bar{B}_{in}$  είναι ίση με την ενέργεια που θα είχε χαθεί αν δεν υπήρχαν μπαταρίες,  $\bar{D}_o$ , μειωμένη κατά την ενέργεια που πραγματικά χάθηκε,  $\bar{D}_a$ , από τη στιγμή που γέμισαν οι μπαταρίες [4.1].

$$\bar{B}_{in} = \bar{D}_o - \bar{D}_a \quad (4.29)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ούτε το  $\bar{B}_{in}$  ούτε το  $\bar{D}_a$  μπορούν απευθείας να υπολογιστούν. Ωστόσο μπορούν να συσχετιστούν εμπειρικά με την αποτελεσματική χωρητικότητα της μπαταρίας  $B_c$ , το  $\bar{D}_o$  και το μέσο ημερήσιο φορτίο  $\bar{L}$ . Η αποτελεσματική χωρητικότητα προκύπτει ως το γινόμενο της χωρητικότητας της μπαταρίας και του επιτρεπόμενου βάθους αποφόρτισης. Χρησιμοποιώντας αποτελέσματα προσομοιώσεων από το TRNSYS για συστήματα που έχουν συνεχές 24ωρο φορτίο, αναπτύχθηκε μια σχέση για το λόγο  $\bar{D}_a / \bar{L}$  συναρτήσει των λόγων  $B_c / \bar{L}$  και  $\bar{D}_o / \bar{L}$ . Αυτή η σχέση φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1: Για τον καθορισμό της παραπανίσιας ενέργειας που χάνεται

Το γράφημα αυτό δημιουργήθηκε με συγκεκριμένες παραμέτρους μπαταρίας και φορτίου αλλά και για συγκεκριμένη τοποθεσία. Όμως μετά αποδείχθηκε ότι δεν υπάρχει ευαισθησία μόνο στις συγκεκριμένες παραμέτρους και άρα το γράφημα είναι γενικής χρησιμότητας.

Όπως έχει ήδη σημειωθεί, σε ένα σύστημα με μπαταρίες κάποιο μέρος της ενέργειας χάνεται λόγω εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας και λόγω ηλεκτρολυτικού ψεκασμού. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ο συντελεστής  $\eta_B$  που αφορά τη μπαταρία και λαμβάνει υπόψη του τις παραπάνω απώλειες. Έτσι χρησιμοποιώντας το συντελεστή αυτό θα προκύψει η παρακάτω σχέση για τη μέση μηνιαία ημερήσια ενέργεια που έδωσε η μπαταρία κατά την αποφόρτισή της [4.1].

$$\overline{B}_{out} = \eta_B \overline{B}_{in} \quad (4.30)$$

Τελικά λαμβάνοντας υπόψη όλες τις προηγούμενες σχέσεις, η μέση μηνιαία ημερήσια συμβατική ποσότητα ενέργειας που δίνει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα που έχει αποθηκευτικές μπαταρίες είναι [4.1]:

$$\overline{E}_L = \eta_c \overline{E} - \overline{D}_o + \overline{B}_{out} \quad (4.31)$$

#### 4.5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιασθεί ένα παράδειγμα που θα βοηθήσει στην κατανόηση των όσων προηγήθηκαν. Οι Πίνακες 4.2-4.3 περιέχουν τις παραμέτρους του συστήματος καθώς και τα μετεωρολογικά δεδομένα για μια συγκεκριμένη περιοχή.

**Πίνακας 4.2:** Παράμετροι συλλέκτη

Γεωγραφικό Πλάτος (φ)	Κλίση Συλλέκτη	Επιφάνεια Συλλέκτη	$U_L$	$(\tau\alpha)$	$\eta_r$	$\beta$	$T_r$
$43^\circ$	$23^\circ$	$1\text{m}^2$	$20\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$	0.95	0.12	$0.004/^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C}$

**Πίνακας 4.3:** Μετεωρολογικά δεδομένα και άλλες παράμετροι

L	$\eta_c$	$\overline{H}_T$	$T_a$	$\overline{K}_h$	$B_c$	$\eta_B$
14 W	0.9	$2520 \text{ W-hr/m}^2$	$-8.4^\circ\text{C}$	0.45	$152 \text{ W-hr}$	0.85

Αρχικά από τις σχέσεις (2.2), (2.4) και (3.15) προκύπτει ότι  $\omega'_s = \omega_s = 1.20$  radians και  $\delta = 0.3712$  radians. Έπειτα χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.14) έως (4.20) καθώς και την (3.9) προκύπτει:

$$r_{d,n} = \left( \frac{\pi}{24} \right) \left( \frac{1 - \cos(1.20)}{\sin(1.20) - 1.20 \cos(1.20)} \right) = 0.168$$

$$r_{h,n} = r_{d,n} [1.07 + 0.025 \sin(1.20 - 1.05)] = 0.18$$

$$R_{b,n} = \frac{\cos(0.75 - 0.4) \cos(-0.3712) + \sin(0.75 - 0.4) \sin(-0.3712)}{\cos 0.75 \cos(-0.3712) + \sin 0.75 \sin(-0.3712)} = 1.73$$

$$\overline{R}_b = \frac{\cos(0.75 - 0.4) \cos(-0.3712) \sin 1.2 + 1.2 \sin(0.75 - 0.4) \sin(-0.3712)}{\cos 0.75 \cos(-0.3712) \sin 1.2 + 1.2 \sin 0.75 \sin(-0.3712)} = 1.97$$

$$\overline{H}_d / \overline{H}_h = 1.390 - 4.027 \cdot 0.45 + 5.531 \cdot 0.45^2 - 3.108 \cdot 0.45^3 = 0.413$$

$$\overline{R} = (1 - 0.413) \cdot 1.97 + (0.413)(1 + \cos 0.4) / 2 = 1.53$$

$$H_d / H_h = 1.0045 + 0.04349 \cdot 0.45 - 3.5227 \cdot 0.45^2 + 2.63 \cdot 0.45^3 = 0.55$$

$$R_n = \left( 1 - \frac{0.168}{0.18} (0.55) \right) 1.73 + \frac{0.168}{0.18} (0.55) \left( \frac{1 + \cos 0.4}{2} \right) = 1.34$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις εξισώσεις (4.14) και (4.16) θεωρήθηκε συντελεστής ανάκλασης  $\rho$  ίσο με το 0. Το επόμενο βήμα είναι να υπολογιστεί η αποτελεσματικότητα του συλλέκτη. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τις εξισώσεις (4.8) έως (4.13) προκύπτει:

$$X = \frac{1.53 / 1.34}{(1.2 \cdot 1.548 \cdot 0.45) + ((1 - (1.548 \cdot 0.45)) 1.2)} = 1.163$$

$$a = 12.16 \cdot 0.45^2 - 9.88 \cdot 0.45 + 0.80 = -1.1836$$

$$b = -1.90 \cdot 0.45^2 - 9.78 \cdot 0.45 + 10.15 = 5.364$$

$$c = 2.04 \cdot 0.45^2 + 1.23 \cdot 0.45 - 0.58 = 0.3866$$

$$V = -1.1836 \cdot 1.163^2 + 5.364 \cdot 1.163 + 0.3866 = 4.40$$

Και τελικά:

$$\bar{\eta} = 0.12 \cdot \left[ 1 - 0.004(-8.4 - 0) - \frac{0.004 \cdot 0.95 \cdot 4.4 \cdot 2252}{24 \cdot 20} \right] = 0.114$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.5) παρατηρείται ότι το σύστημα παράγει **287 W-hr** κάθε μέρα από τις οποίες μόνο οι **258 W-hr** είναι διαθέσιμες για το φορτίο (λόγω του συντελεστή  $\eta_c$  ).

$$\bar{E} = 1 \cdot 1 \cdot 2520 \cdot 0.114 = 287 \text{ W-hr και } \eta_c \bar{E} = 258 \text{ W-hr}$$

Τώρα θα υπολογιστεί η χρησιμότητα. Πρώτα πρέπει να βρεθεί το κρίσιμο επίπεδο το οποίο δίνεται από τη σχέση (4.25).

$$I_c = \frac{14}{1 \cdot 0.114 \cdot 1 \cdot 0.9} = 136 \text{ W/m}^2$$

Έπειτα από τις σχέσεις (4.27α,β,γ) προκύπτουν:

$$A = 2.943 - 9.271 \cdot 0.45 + 4.031 \cdot 0.45^2 = -0.413$$

$$B = -4.345 + 8.853 \cdot 0.45 - 3.602 \cdot 0.45^2 = -1.09$$

$$C = -0.170 - 0.306 \cdot 0.45 + 2.936 \cdot 0.45^2 = 0.28$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.28) με  $\bar{H}_h = \bar{H}_T / \bar{R} = 2520 / 1.53 = 1647$  προκύπτει:

$$X_c = \frac{136}{0.18 \cdot 1.336 \cdot 1647} = 0.356$$

Και τελικά από τη σχέση (4.26):

$$\bar{\phi} = \exp\left((-0.413 + (-1.09)(1.336/1.53))\right)(0.356 + 0.28 \cdot 0.356^2) = 0.6$$

Τώρα μπορεί να υπολογιστεί το  $\bar{D}_o$  χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.23):

$$\bar{D}_o = 1 \cdot 2520 \cdot 0.114 \cdot 0.9 \cdot 0.6 = 155 \text{ W-hr}$$

Έμεινε ο όρος  $\bar{D}_a$ . Για να υπολογιστεί, χρειάζονται οι λόγοι  $C/\bar{L}_o$  και  $\bar{D}_o/\bar{L}_o$  οι οποίοι είναι:

$$C/\bar{L}_o = 152/24 \cdot 14 = 0.45 \quad \text{και} \quad \bar{D}_o/\bar{L}_o = 155/24 \cdot 14 = 0.46$$

Με τις 2 αυτές τιμές προκύπτει από το Σχήμα 4.1 μία τιμή  $\bar{D}_a/\bar{L}_o = 0.13$  και από αυτήν,  $\bar{D}_a = 44 \text{ W-hr}$ .

Τελικά η μηνιαία μέση ημερήσια ενέργεια που παραδίδεται στο φορτίο υπολογίζεται από τη σχέση (4.31) και είναι:

$$\bar{E}_L = 258 - 155 + 0.85(155 - 44) = 197 \text{ W-hr}$$

Για αυτό το μήνα λοιπόν η ημερήσια ζήτηση ενέργειας είναι 336 W-hr από τις οποίες οι 197 W-hr δίνονται από το φωτοβολταϊκό σύστημα με μπαταρίες, ενώ οι υπόλοιπες 139 W-hr από μια εξωτερική πηγή ενέργειας (π.χ. μια γεννήτρια). Ακόμα και με τη χρήση μπαταρίας 44 W-hr ενέργειας χάνονται λόγω πληρότητας της μπαταρίας και άλλες 17 W-hr στη φόρτιση και αποφόρτιση της μπαταρίας.

#### 4.6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] M. D. Siegel, S. A. Klein, W. A. Beckman, 'A Simplified Method For Estimating The Monthly Average Performance Of Photovoltaic Systems', Solar Energy, Vol. 26, pp. 413-418.
- [4.2] Π.Σ Γεωργιλάκης, 'Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας', Χανιά, Σεπτέμβριος 2006.
- [4.3] S. A. Klein, 'Calculation Of Flat-Plate Collector Utilizability', Solar Energy, Vol. 21. pp. 393-402



## ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΩΡΙΑΙΑΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (3<sup>η</sup> ΜΕΘΟΔΟΣ)

### 5.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η μέθοδος που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο στηρίζεται κατά το ήμισυ στη μέθοδο **PV-F chart**. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τους Klein και Beckman οι οποίοι χρησιμοποίησαν στοιχεία από προηγούμενη δουλειά των Siegel, Evans και Clark. Μέσα από 3 βασικά βήματα είναι δυνατός υπολογισμός της μακροπρόθεσμης απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με ή χωρίς μπαταρίες και με ή χωρίς δυνατότητες ανατροφοδότησης. Τα 3 αυτά βήματα είναι τα παρακάτω:

- Εκτίμηση της μηνιαίας μέσης ωριαίας ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στον κεκλιμένο συλλέκτη.
- Υπολογισμός της μηνιαίας μέσης ωριαίας συνάρτησης χρησιμότητας (αυτό το βήμα είναι που διαφοροποιεί αυτή τη μέθοδο από τη μέθοδο του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου).
- Χρήση των μηνιαίων μέσων ωριαίων θερμοκρασιών του περιβάλλοντος για την πρόβλεψη της απόδοσης του φωτοβολταϊκού.

Όπως και οι 2 προηγούμενες μέθοδοι έτσι και αυτή χρησιμοποιεί σαν δεδομένα μηνιαίες τιμές της ακτινοβολίας σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο καθώς και μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Αφού λοιπόν εκτιμηθεί η ηλεκτρική παραγωγή του συστήματος και για να ληφθεί υπόψη η επιρροή των αποθηκευτικών μπαταριών στην ενέργεια που παίρνει τελικά το φορτίο θα χρησιμοποιηθεί μια ανάλυση που οφείλεται στον Klein. Στην ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται εκτός των άλλων και ο μηνιαίος μέσος λόγος του φορτίου. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος, σε αντίθεση με τις προηγούμενες δύο, μπορεί να δώσει σωστά αποτελέσματα ακόμα και αν το φορτίο που καταναλώνει την παραγόμενη ενέργεια μεταβάλλεται κάθε ώρα. Είναι απαραίτητη όμως εκτός από τις ωριαίες τιμές και η γνώση μιας μέσης ημερήσιας τιμής [5.1, 5.2].

## 5.2. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Κατά τα γνωστά η μηνιαία μέση ωριαία ηλεκτρική παραγωγή του συλλέκτη για μια συγκεκριμένη ώρα της ημέρας δίνεται από την παρακάτω σχέση [5.1]:

$$\bar{E}_i = \eta_i \bar{A} \bar{i}_{array} \quad (5.1)$$

Η αποτελεσματικότητα του συλλέκτη για κάθε ώρα μπορεί να βρεθεί από την παρακάτω έκφραση [5.1]:

$$\eta_i = \eta_r \eta_c \left[ 1 + \frac{\beta_{mp}}{\eta_r} (\bar{T}_{a,i} - T_r) + \frac{\beta_{mp} \bar{i}_{array}}{\eta_r} \frac{\tau \alpha}{U_L} (1 - \eta_r) Z_i \right] \quad (5.2)$$

όπου όλα είναι γνωστά από προηγούμενα κεφάλαια εκτός από τους συντελεστές  $Z_i$  και  $\beta_{mp}$ . Ο δεύτερος είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια με τη διαφορά ότι έχει μετρηθεί στο σημείο μέγιστης ισχύος. Συνήθως ο  $\beta_{mp}$  είναι μιας τάξης μεγέθους μικρότερος από αυτόν των προηγούμενων κεφαλαίων. Γενικότερα τώρα, υπάρχουν 4 συνθήκες μέτρησης του συντελεστή  $\beta$ . Αυτές είναι για ρεύμα βραχυκύκλωσης, για ρεύμα μέγιστης ισχύος, για τάση βραχυκύκλωσης και για τάση μέγιστης ισχύος.

Ο συντελεστής  $Z_i$  μπορεί να προκύψει από την εμπειρική έκφραση που δίνεται παρακάτω [5.1]:

$$Z_i = \left( \frac{\bar{i}_o}{\bar{i}_{array}} \right)^2 (a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3) \quad (5.3)$$

όπου  $\bar{i}_o$  είναι η μηνιαία μέση ωριαία εξωγήινη ακτινοβολία. Οι συντελεστές στην παρένθεση δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} a_1 &= R_b^2 + \rho(1 - \cos s) R_b + \rho^2 (1 - \cos s)^2 / 4 \\ a_2 &= R_b (1 + \cos s - 2R_b) + \rho(1 + \cos s - 2R_b)(1 - \cos s) / 2 \\ a_3 &= [(1 - \cos s) / 2 - R_b]^2 \\ b_1 &= -0.1551 + 0.9226 \bar{k}_h \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$b_2 = 0.1456 + 0.0544 \ln \bar{k}_h \quad (5.4)$$

$$b_3 = \bar{k}_h (0.2769 - 0.3184 \bar{k}_h)$$

όπου  $\bar{k}_h$  είναι ο μηνιαίος μέσος ωριαίος δείκτης καθαρότητας που κατά αντιστοιχία με τον  $\bar{K}_h$  ισούται με  $\bar{k}_h = \bar{i}_h / \bar{i}_o$ . Όπως δείχθηκε στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο,  $\bar{i}_h$  είναι η μηνιαία μέση ωριαία ποσότητα ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο.

Η ακτινοβολία  $\bar{i}_{array}$  μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση [5.1]:

$$\bar{i}_{array} = \bar{K}_h \bar{H}_o \left[ \left( r_t - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_h} r_d \right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_h} r_d \left( \frac{1 + \cos s}{2} \right) + \rho r_t \left( \frac{1 - \cos s}{2} \right) \right] \quad (5.5)$$

### 5.3. ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Αρχικά θα περιγραφεί ο υπολογισμός της ωριαίας συνάρτησης χρησιμότητας αφού σημειωθεί ξανά ότι αυτή ορίζεται ως το κομμάτι εκείνο της παραγόμενης ενέργειας που υπερέρχει του απαιτούμενου φορτίου [5.1].

$$\bar{\phi}_i = \begin{cases} 0 \rightarrow \text{if} (X_{c,t} \leq X_m) \\ (1 - X_{c,t} / X_m)^2 \rightarrow \text{if} (X_m = 2) \\ \left| |g| - \left[ g^2 + (1 + 2g)(1 - X_{c,t} / X_m)^2 \right]^{1/2} \right| \rightarrow \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.6)$$

όπου  $X_{c,t}$  είναι ο μηνιαίος μέσος κρίσιμος λόγος της απαίτησης του φορτίου ως προς την ηλεκτρική παραγωγή για μια συγκεκριμένη ώρα ( $L_i / \bar{E}_i$ ), ενώ ο  $X_m$  δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [5.1]:

$$X_m = 1.85 + 0.169 \bar{R} / \bar{k}_h^2 - 0.0696 \cos s / \bar{k}_h^2 - 0.981 \bar{k}_h / \cos^2 \delta \quad (5.7)$$

Στην εξίσωση (5.6) υπάρχει και ο όρος  $g$  που δίνεται από την παρακάτω σχέση [5.1]:

$$g = (X_m - 1) / (2 - X_m) \quad (5.8)$$

Αφού λοιπόν υπολογιστεί η ωριαία συνάρτηση χρησιμότητας μπορεί έπειτα να βρεθεί ποια θα είναι η πλεονάζουσα του φορτίου ενέργεια. Έτσι ο γνωστός από το προηγούμενο κεφάλαιο όρος  $\bar{D}_{o,i}$  δίνεται τώρα από την παρακάτω σχέση [5.1]:

$$\bar{D}_{o,i} = \bar{E}_i \bar{\phi}_i \quad (5.9)$$

Στην περαιτέρω ανάλυση θα χρειαστεί και η ενέργεια που λαμβάνει το φορτίο. Προφανώς αυτή είναι [5.1]:

$$\bar{E}_{L,i} = \bar{E}_i (1 - \bar{\phi}_i) \quad (5.10)$$

Προσθέτοντας τις τιμές των εξισώσεων (5.9) και (5.10) για όλες τις ώρες της ημέρας και διαιρώντας με τον αριθμό των ωρών προκύπτουν οι μηνιαίες μέσες ημερήσιες τιμές των παραπάνω όρων. Δηλαδή:

$$\bar{D}_o = \frac{1}{24} \sum_i \bar{D}_{o,i} \quad (5.11)$$

και

$$\bar{E}_L = \frac{1}{24} \sum_i \bar{E}_{L,i} \quad (5.12)$$

Τελικά το μηνιαίο μέσο ποσοστό της ενέργειας που παραδίδεται από το χωρίς μπαταρίες σύστημα είναι [5.1]:

$$f_o = \bar{E}_L / \bar{L} \quad (5.13)$$

Θα σημειωθεί εδώ ότι η χρήση της ωριαίας συνάρτησης χρησιμότητας προϋποθέτει ότι η στιγμιαία ενεργειακή απαίτηση του φορτίου ισούται πάντα με την αντίστοιχη μηνιαία μέση ωριαία απαίτηση (που πρακτικά σημαίνει ότι το κρίσιμο επίπεδο είναι σταθερό). Στην πραγματικότητα όμως η απαίτηση του φορτίου αλλάζει από λεπτό σε λεπτό και από μέρα σε

μέρα οδηγώντας στην υποεκτίμηση της συνάρτησης χρησιμότητας. Ευτυχώς όμως έρευνες πάνω σε αυτό το θέμα έδειξαν ότι αυτή η υποεκτίμηση είναι αρκετά μικρή και ότι η γνώση των μηνιαίων μέσων τιμών του φορτίου είναι αρκετή για τους υπολογισμούς.

#### 5.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα περιγραφεί ο υπολογισμός της ποσότητας  $\Delta f_s$  που ορίζεται ως η αύξηση του ποσοστού της ενέργειας που λαμβάνει το φορτίο επειδή χρησιμοποιήθηκαν μπαταρίες [5.2]:

$$\Delta f_s = f - f_o \quad (5.14)$$

όπου  $f$  είναι το ποσοστό της ενέργειας που λαμβάνει το φορτίο από το σύστημα με μπαταρίες.

Για να προκύψει μια σχέση υπολογισμού του ποσοστού  $\Delta f_s$  θα πρέπει να βρεθούν φυσικοί περιορισμοί, ούτως ώστε να περιοριστεί το εύρος των πιθανών τιμών που μπορεί να πάρει. Μια ειδική περίπτωση είναι αν όλη η πλεονάζουσα ενέργεια του χωρίς μπαταρίες συστήματος μπορούσε να αποθηκευτεί. Τότε η αναμενόμενη τιμή  $\Delta f_s$  θα ήταν  $\bar{D}_o / \bar{L}$  πολλαπλασιασμένη με την αποτελεσματικότητα της μπαταρίας. Έτσι θα προέκυπτε η παρακάτω σχέση [5.2]:

$$d_o = \eta_b \bar{D}_o / \bar{L} \quad (5.15)$$

Αν τώρα η τιμή  $d_o$  είναι αρκετά μικρότερη από την τιμή  $B_c / \bar{L}$  (λόγος της χωρητικότητας της μπαταρίας ως προς το μέσο φορτίο) τότε η μπαταρία ποτέ δε θα γεμίζει και άρα δε θα χάνεται καθόλου ενέργεια. Ασχέτως όμως από τη χωρητικότητα της μπαταρίας η οριακή περίπτωση συμβαίνει καθώς το  $d_o$  τείνει στο 0:

$$\lim_{d_o \rightarrow 0} \Delta f_s = 0 \quad (5.16)$$

Από την άλλη πλευρά μια μέγιστη τιμή του ποσοστού  $\Delta f_s$  προκύπτει για μεγάλες τιμές του  $d_o$  όπου η τιμή της προς αποθήκευση ενέργειας γίνεται πολύ μεγάλη σε σχέση με το φορτίο:

$$\Delta f_{\max} = \lim_{d_o \rightarrow \infty} \Delta f_s \quad (5.17)$$

Όμως το  $\Delta f_s$  δε μπορεί να είναι μεγαλύτερο του  $1 - f_o$  επειδή το ποσοστό δε μπορεί να υπερέρχει της μονάδας. Άρα:

$$\lim_{d_o \rightarrow \infty} \Delta f_s \leq 1 - f_o \quad (5.18)$$

Για καλές τιμές του  $d_o$  (δηλαδή μεγάλες τιμές), όλο το φορτίο θα ικανοποιείται από την ενέργεια που παράγει ο συλλέκτης. Η μπαταρία θα χρησιμεύει μόνο το βράδυ και η τιμή του ποσοστού  $\Delta f_s$  θα έχει σαν όριο το λόγο  $B_c / \bar{L}$ .

$$\lim_{d_o \rightarrow \infty} \Delta f_s \leq B_c / \bar{L} \quad (5.19)$$

Στη συνέχεια συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.18) και (5.19) παράγεται μια οριακή τιμή του ποσοστού  $\Delta f_s$  καθώς το  $d_o$  γίνεται πολύ μεγάλο:

$$\Delta f_{\max} = \min(1 - f_o, B_c / \bar{L}) \quad (5.20)$$

Τελικά μια εξίσωση που λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς που περιγράφηκαν παραπάνω για μεγάλες και μικρές τιμές του  $d_o$  είναι η εξής [5.2]:

$$\Delta f_s = \frac{1}{2A_o} \left\{ d_o + \Delta f_{\max} - \left[ (d_o + \Delta f_{\max})^2 - 4A_o d_o \Delta f_{\max} \right]^{1/2} \right\} \quad (5.21)$$

Η παράμετρος  $A_o$  που είναι ο μοναδικός βαθμός ελευθερίας της παραπάνω εξίσωσης μπορεί να αλλάζει για να δούμε πως πλησιάζει το  $\Delta f_s$  το  $\Delta f_{\max}$  καθώς το  $d_o$  αυξάνεται. Ειδικά όταν  $A_o = 1$  η (5.21) δίνει [5.2]:

$$\Delta f_{s, A_o=1} = \min(d_o, \Delta f_{\max}) \quad (5.22)$$

το οποίο είναι ακριβώς το αναμενόμενο αποτέλεσμα για άπειρη χωρητικότητα μπαταρίας. Γενικά τώρα ρυθμίζοντας ανάλογα την τιμή του  $A_o$  η εξίσωση (5.21) είναι κατάλληλη για όλων των ειδών τις μπαταρίες και για όλες τις πιθανές τιμές  $d_o$ . Αυτό που λείπει είναι μια εξίσωση που να συσχετίζει όλα τα παραπάνω [5.2]:

$$A_o = 1.315 - 0.1059 \frac{f_o \bar{L}}{C} - \frac{0.1847}{\bar{K}_h} \quad (5.23)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση (5.23) είναι μια εμπειρική σχέση βασισμένη σε δεδομένα από ωριαίες προσομοιώσεις του προγράμματος TRNSYS (διάρκειας 73 χρόνων) και χρησιμοποιώντας 15 διαφορετικά προφίλ φορτίων για 3 διαφορετικές περιοχές. Είναι κατάλληλη για μπαταρίες με αποθηκευτική ικανότητα από 0 έως  $2\bar{L}$ .

## 5.5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Σε αυτή την παράγραφο θα εξεταστούν 2 παραδείγματα. Στο πρώτο θα γίνει υπολογισμός της μηνιαίας μέσης ηλεκτρικής παραγωγής ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σύμφωνα με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε ενώ στο δεύτερο θαδειχθεί η επίδραση των μπαταριών στους υπολογισμούς.

### 1<sup>ο</sup> Παράδειγμα:

Όλα τα δεδομένα του συστήματος και της τοποθεσίας δίνονται στους Πίνακες 5.1 και 5.2. Επειδή η πλήρης λύση είναι αρκετά μεγάλη σε έκταση εδώ θα γίνει ενδεικτικός υπολογισμός όλων των μεταβλητών του προβλήματος για την ώρα 10-11 π.μ. Όλα τα υπόλοιπα δεδομένα θα παρουσιαστούν έτοιμα.

Πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη. Για να γίνει αυτό χρειάζονται οι συντελεστές  $r_h$  και  $r_d$  καθώς και ο συντελεστής κλίσης  $\bar{R}_b$ . Από τις σχέσεις (4.15), (3.11) και (3.12) προκύπτουν  $\bar{R}_b=1.347$ ,  $r_h=0.129$  και  $r_d=0.123$ . Οι γωνίες  $\omega_s$ ,  $\omega'_s$  και  $\delta$  υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.3), (2.4) και (3.15) και είναι ίσες με  $\omega_s=\omega'_s=1.535$  rad και  $\delta=-0.0422$  rad. Επίσης από τη σχέση (3.9) προκύπτει  $\bar{H}_d/\bar{H}_h=0.448$ . Τελικά από τη σχέση (5.5) η ακτινοβολία πάνω στο συλλέκτη είναι:

$$\bar{i}_{array} = 0.481 \cdot 27.4 \left[ (0.129 - 0.448 \cdot 0.123) 1.347 + 0.448 \cdot 0.123 \left( \frac{1 + \cos 35}{2} \right) + 0.2 \cdot 0.129 \left( \frac{1 - \cos 35}{2} \right) \right] = 2.0 \text{ MJ/m}^2$$

**Πίνακας 5.1:** Παράμετροι συλλέκτη

T <sub>NOCT</sub>	T <sub>r</sub>	η <sub>r</sub>	η <sub>c</sub>	A	β	s	ρ	U <sub>L</sub>
46 °C	25 °C	0.104	0.9	1.708 m <sup>2</sup>	-0.0005	35°	0.2	30.7 W/m <sup>2</sup> °C

**Πίνακας 5.2:** Μετεωρολογικά δεδομένα και άλλες παράμετροι

φ	$\overline{H}_h$	$\overline{H}_o$	$\overline{K}_h$	B <sub>c</sub>	η <sub>B</sub>	$\overline{L}$
40°	13.2 MJ/m <sup>2</sup>	27.4 MJ/m <sup>2</sup>	0.481	1200 W-hr	0.8	100 W

Τώρα θα υπολογιστεί η αποτελεσματικότητα του συλλέκτη. Χρειάζονται όμως οι μέσες ωριαίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος οι οποίες αρχίζοντας από τις 6 το πρωί είναι 4,5,5,6,8,10,11,12,12,11,10 και 9 °C. Από τις σχέσεις (5.3) και (5.4) προκύπτουν:

$$a_1 = 1.347^2 + 0.2(1 - \cos 35)1.347 + 0.2^2(1 - \cos 35)^2 / 4 = 1.92$$

$$a_2 = 1.347(1 + \cos 35 - 1.347) + 0.2(1 + \cos 35 - 2 \cdot 1.347)(1 - \cos 35) / 2 = -1.12$$

$$a_3 = \left[ (1 - \cos 35) / 2 - 1.347 \right]^2 = 1.63$$

$$b_1 = -0.1551 + 0.9226 \cdot 0.504 = 0.31$$

$$b_2 = 0.1456 + 0.0544 \ln 0.504 = 0.108$$

$$b_3 = 0.504(0.2769 - 0.3184 \cdot 0.504) = 0.059$$

Όπου χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $\bar{k}_h = \overline{K}_h \cdot r_d / r_a = 0.504$ . Για να προκύψει ο συντελεστής  $Z_i$  χρειάζεται ο λόγος  $(\bar{i}_o / \bar{i}_{array})$  ο οποίος είναι ίσος με  $(\bar{i}_o / \bar{i}_{array}) = \overline{H}_h \cdot r_d / \overline{K}_h$ . Άρα από την (5.3) προκύπτει:

$$Z_i = \left( \frac{13.2 \cdot 0.129}{0.481} \right)^2 (1.92 \cdot 0.31 - 1.12 \cdot 0.108 + 1.63 \cdot 0.059) = 1.525$$

Τελικά η αποτελεσματικότητα είναι ίση με:



$$\eta_i = 0.104 \cdot 0.9 \left[ 1 - \frac{0.0005}{0.104} (8 - 25) + \frac{0.0005 \cdot 2 \cdot 10^6}{0.104 \cdot 30.7 \cdot 3600} (1 - 0.104) 1.525 \right] = 0.090$$

Έτσι λοιπόν η μηνιαία μέση ηλεκτρική παραγωγή του συλλέκτη για την ώρα 10 με 11 π.μ. σύμφωνα με τη σχέση (5.1) είναι:

$$\bar{E}_i = 0.09 \cdot 4 \cdot 0.427 \cdot 2 \cdot 10^6 / 3600 = 85.4 \text{ Watt}$$

Τώρα θα υπολογιστεί η συνάρτηση χρησιμότητας. Για το σκοπό αυτό χρειάζεται ο κρίσιμος λόγος  $X_{c,i}$ , ο λόγος  $\bar{R}$ , ο συντελεστής  $X_m$  και ο συντελεστής  $g$ . Έτσι προκύπτουν  $X_{c,i} = 100/85.4 = 1.166$ ,  $\bar{R} = 2/(13.2 \cdot 0.129) = 1.17$  και από τις σχέσεις (5.7) και (5.8):

$$X_m = 1.85 + 0.169 \cdot 1.17 / 0.505^2 - 0.0696 \cos 35 / 0.0505^2 - 0.981 \cdot 0.505 / \cos^2(-2.4) = 1.907$$

και

$$g = (1.907 - 1) / (2 - 1.907) = 9.76$$

Επειδή τώρα ούτε  $X_{c,i} \geq X_m$  αλλά ούτε και  $X_m = 2$  τότε από τη σχέση (5.6) προκύπτει:

$$\bar{\phi}_i = \left| 9.76 - \left[ 9.76^2 + (1 + 9.76)(1 - 1.166/1.907)^2 \right]^{1/2} \right| = 0.159$$

Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για όλες τις ώρες παράγονται τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.3.

Παρατηρείται λοιπόν ότι η μηνιαία μέση παραγωγή για μια ημέρα του μήνα είναι 664 W-hr και το μηνιαίο μέσο φορτίο είναι 600 W-hr. Από τις 600 απαιτούμενες W-hr μόνο οι 422 δίνονται απευθείας από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Επίσης υπάρχει μια απώλεια 242 W-hr.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα 1<sup>ου</sup> παραδείγματος

Ωρα	$\bar{T}_{a,i}$ (°C)	$\bar{i}_{array}$ (MJ)	$Z_i$	$\eta_i$	$\bar{E}_i$ (Wh)	$L_i$ (Wh)	$X_{c,t}$	$\bar{\phi}_i$	$\bar{D}_{o,i}$ (Wh)	$\bar{E}_{L,i}$ (Wh)
6-7	4	0.15	2.228	0.102	7	0	0.000	1.000	7	0
7-8	5	0.60	1.906	0.099	28	0	0.000	1.000	28	0
8-9	5	1.11	1.728	0.096	50	0	0.000	1.000	50	0
9-10	6	1.61	1.604	0.093	71	100	1.412	0.087	6	65
10-11	8	2.00	1.525	0.090	86	100	1.166	0.159	14	72
11-12	10	2.22	1.486	0.088	93	100	1.072	0.193	18	75
12-1	11	2.22	1.486	0.088	93	100	1.077	0.191	18	75
1-2	12	2.00	1.525	0.088	84	100	1.189	0.149	13	71
2-3	12	1.61	1.604	0.090	69	100	1.454	0.075	5	64
3-4	11	1.11	1.728	0.093	49	0	0.000	1.000	49	0
4-5	10	0.60	1.906	0.096	27	0	0.000	1.000	27	0
5-6	9	0.15	2.228	0.100	7	0	0.000	1.000	7	0
Σύνολο					664	600			242	422

2<sup>ο</sup> Παράδειγμα:

Δουλεύοντας όπως στο προηγούμενο παράδειγμα παράγονται τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.4 που αφορούν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα σε μια νέα τοποθεσία.

Πίνακας 5.4: Ωριαίες ενεργειακές ροές 2<sup>ου</sup> παραδείγματος

Ωρα	Φορτίο(W)	$\bar{i}_{array}$ (W/m <sup>2</sup> )	$X_{c,t}$	$\bar{\phi}_i$	$\bar{E}_{L,i}$ (W-hr)	$\bar{D}_{o,i}$ (W-hr)
8-9	10614	150.8	1.246	0.343	5600	2922
9-10	11314	259.2	0.782	0.465	7746	6572
10-11	12096	348.9	0.621	0.528	9195	10052
11-12	12904	399.5	0.579	0.545	10147	11879
12-13	13686	399.5	0.614	0.524	10623	11414
13-14	14386	348.9	0.739	0.463	10464	8812
14-15	14958	259.2	1.034	0.354	9339	5014
15-16	15362	150.8	1.835	0.191	6774	1563

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (5.11) και (5.12) προκύπτουν  $\overline{D}_o = 2426 \text{ W}$  και  $\overline{E}_L = 2912 \text{ W}$ . Έτσι από την (5.13) και γνωρίζοντας ότι το μέσο φορτίο ανά ώρα είναι  $12500 \text{ W}$  το ποσοστό της ενέργειας που παίρνει το φορτίο είναι:

$$f_o = 2912 / 12500 = 0.233$$

Μπορεί τώρα να υπολογιστεί η επίδραση των αποθηκευτικών μπαταριών. Η αποθηκευτική ικανότητα είναι  $C=140 \text{ W-hr}$ . Άρα:

$$B_c / \overline{L} = 140 / (12500 \cdot 24) = 0.467$$

Από τις σχέσεις (5.15) και (5.20) προκύπτει:

$$d_o = 0.87 \cdot 2426 / 12500 = 0.169$$

και

$$\Delta f_{\max} = \min[(1 - 0.233), 0.467] = 0.467$$

Όπου χρησιμοποιήθηκε αποτελεσματικότητα μπαταρίας ίση με  $\eta_B=0.87$ . Έπειτα από τις σχέσεις (5.21) και (5.23) προκύπτει:

$$A_o = 1.315 - 0.1059 \frac{0.233}{0.88 \cdot 0.467} - \frac{0.1847}{0.396} = 0.79$$

και

$$\Delta f_s = \frac{1}{2 \cdot 0.79} \left\{ 0.169 + 0.467 - \left[ (0.169 + 0.467)^2 - 4 \cdot 0.79 \cdot 0.467 \cdot 0.169 \right]^{1/2} \right\} = 0.153$$

Όπου χρησιμοποιήθηκε δείκτης καθαρότητας ίσος με  $\overline{K}_h=0.396$ . Τελικά το ποσοστό της ενέργειας που παίρνει το φορτίο από το σύστημα με μπαταρίες είναι:

$$f = \Delta f_s + f_o = 0.233 + 0.153 = 0.386$$

Άρα η ενέργεια που δόθηκε στο φορτίο από το σύστημα με μπαταρίες είναι  $E_L = f \cdot \bar{L} = 0.386 \cdot 12500 = 4825 \text{ Wh}$ . Παρατηρείται η αύξηση της ποσότητας αυτής σε σχέση με τις 2912 Wh του συστήματος χωρίς μπαταρίες.

## 5.6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] Literature Review Of Uncertainty Of Analysis Methods (PV F-Chart Method Program), Report To The Commission On Environmental Quality.
- [5.2] D. R. Clark, S. A. Klein, W. A. Beckman, 'A Method For Estimating The Performance Of Photovoltaic Systems', Solar Energy Vol. 33, No. 6, pp. 551-556.
- [5.3] Π. Σ Γεωργιάκης, 'Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας', Χανιά, Σεπτέμβριος 2006.

## ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ

### 6.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει λόγος για το λογισμικό που αναπτύχθηκε και που υλοποιεί τις εξεταζόμενες μεθόδους. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της Matlab. Για κάθε μία από τις τρεις μεθόδους θα παρουσιασθούν τα δεδομένα που περιέχουν τα αρχεία εισόδου και πως πρέπει αυτά τα δεδομένα να εισάγονται. Επίσης θα παρουσιασθούν και τα αποτελέσματα που παράγει ο κάθε κώδικας.

Πριν γίνει η αναλυτική περιγραφή του λογισμικού θα σημειωθούν κάποια βασικά στοιχεία. Για να τρέξει η Matlab κάποιο λογισμικό θα πρέπει να αποθηκευτούν στον φάκελο «work» όλα τα αρχεία εισόδου καθώς και το αρχείο που περιέχει τον κύριο κώδικα. Ο φάκελος αυτός βρίσκεται στο σκληρό δίσκο, εκεί που είναι εγκατεστημένη η Matlab. Η σειρά τώρα με την οποία εισάγονται δεδομένα στα αρχεία εισόδου είναι αυστηρά καθορισμένη και αυτό γιατί στον κυρίως κώδικα οι εντολές που διαβάζουν αρχεία βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις. Για να αποφευχθούν λοιπόν λάθη στα αποτελέσματα θα πρέπει ο χρήστης να εισάγει τα δεδομένα όπως ακριβώς παρουσιάζονται παρακάτω. Τέλος να αναφερθεί ότι εκτός από τη σωστή θέση των δεδομένων πολύ σημαντικό είναι να εισάγονται και οι σωστές μονάδες. Για παράδειγμα ο κώδικας έχει αναπτυχθεί για να διαβάζει τις γωνίες σε ακτίνια και όχι σε μοίρες.

### 6.2. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 1<sup>ης</sup> ΜΕΘΟΔΟΥ (ΚΕΦ.3)

Ο κώδικας που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της πρώτης εξεταζόμενης μεθόδου είναι μια ακολουθία πράξεων σύμφωνα με την αντίστοιχη θεωρία. Αποτελείται από 4 αρχεία όπου το πρώτο (M\_1) περιέχει τον κύριο κώδικα και τα υπόλοιπα 3 (M\_1\_1, M\_1\_2, M\_1\_3) είναι αρχεία δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα:

Αρχείο M\_1\_1:

Το αρχείο αυτό περιέχει τα ακόλουθα δεδομένα με τη σειρά που εμφανίζονται.

- 
- 1) Ημέρα του έτους,  $\bar{n}$  (π.χ. για το μήνα Ιανουάριο αυτή είναι ίση με 15 ενώ για το μήνα Ιούνιο είναι ίση με 168).
  - 2) Γεωγραφικό πλάτος τοποθεσίας,  $\phi$ , σε ακτίνια.
  - 3) Μηνιαία μέση ημερήσια διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία,  $\overline{H_d}$ , σε W-hr/m<sup>2</sup>.
  - 4) Μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο,  $\overline{H_h}$ , σε W-hr/m<sup>2</sup>.
  - 5) Θερμοκρασίες περιβάλλοντος,  $T_a$ , σε °C για τις 24 ώρες της ημέρας αρχίζοντας από τις 5 το πρωί.
- 

Αρχείο M\_1\_2:

Το αρχείο αυτό περιέχει τα ακόλουθα δεδομένα με τη σειρά που εμφανίζονται.

- 
- 1) Αποτελεσματικότητα αναφοράς του συλλέκτη,  $\eta_r$ .
  - 2) Θερμοκρασία αναφοράς φωτοβολταϊκών στοιχείων,  $T_r$ , σε °C.
  - 3) Ωριαία ακτινοβολία πάνω στο συλλέκτη σε NOCT συνθήκες,  $I_{array,NOCT}$ , σε W/m<sup>2</sup>.
  - 4) Θερμοκρασιακός συντελεστής,  $\beta$ , σε 1/°C.
  - 5) Θερμοκρασία περιβάλλοντος σε NOCT συνθήκες,  $T_{a,NOCT}$ , σε °C.
  - 6) Θερμοκρασία φωτοβολταϊκών στοιχείων σε NOCT συνθήκες,  $T_{c,NOCT}$ , σε °C.
  - 7) Εμβαδόν συλλέκτη,  $A$ , σε m<sup>2</sup>.
  - 8) Αποτελεσματικότητα του συστήματος μετατροπής της ενέργειας,  $\eta_c$ .
- 

Αρχείο M\_1\_3:

Το αρχείο αυτό περιέχει τα ακόλουθα δεδομένα με τη σειρά που εμφανίζονται.

- 
- 1) Ωριαία απαίτηση του φορτίου,  $\bar{L}_i$ , σε W-hr.
  - 2) Επίπεδο πληρότητας της μπαταρίας στην αρχή της προσομοίωσης,  $B_{level}(start)$ , σε W-hr (πάντα μεγαλύτερη του μηδενός και πάντα μικρότερη της χωρητικότητας της μπαταρίας).
  - 3) Αποτελεσματική χωρητικότητα της μπαταρίας,  $B_c$ , σε W-hr.
  - 4) Αποδοτικότητα της μπαταρίας,  $n_B$ .
- 

Αφού λοιπόν εισαχθούν τα παραπάνω δεδομένα και αφού πληκτρολογηθούν οι χαρακτήρες M\_1 στο command window της Matlab θα προκύψουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Η ενέργεια που χάθηκε οριστικά λόγω έλλειψης μπαταριών,  $\sum_1^{24h} \bar{D}_{o,i}$ , σε W-hr.
- Η ενέργεια που είναι διαθέσιμη στο φορτίο,  $\sum_1^{24h} \bar{E}_i$ , σε W-hr.
- Η ενέργεια που πήρε το φορτίο με τη χρήση μπαταριών,  $\sum_1^{24h} \bar{E}_{L,i}$  σε W-hr.
- Η ενέργεια που χάθηκε οριστικά με τη χρήση μπαταριών,  $\sum_1^{24h} E_w$ , σε W-hr.

Παρατηρείται ότι το πρώτο από τα αρχεία εισόδου περιέχει δεδομένα που αφορούν την τοποθεσία που θα γίνει εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς και μετεωρολογικές πληροφορίες. Το δεύτερο περιέχει τις παραμέτρους του συστήματος ενώ το τρίτο το προφίλ του φορτίου καθώς και τις παραμέτρους των αποθηκευτικών μπαταριών. Όλα αυτά ισχύουν και για τις άλλες δύο μεθόδους.

### 6.3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 2<sup>ης</sup> ΜΕΘΟΔΟΥ (ΚΕΦ.4)

Ο κώδικας που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της δεύτερης εξεταζόμενης μεθόδου είναι μια ακολουθία πράξεων σύμφωνα με την αντίστοιχη θεωρία. Παίρνει σαν είσοδο δεδομένα από 3 αρχεία (M\_2\_1, M\_2\_2, M\_2\_3) ενώ το αρχείο με όνομα M\_2 περιέχει τον κύριο κώδικα. Σε κάποιο σημείο απαιτείται από το χρήστη να δώσει μια τιμή από το Σχήμα 4.1 της θεωρίας.

Αρχείο M\_2\_1:

Το αρχείο M\_2\_1 περιέχει τα παρακάτω δεδομένα. Η σειρά που παρουσιάζονται εδώ είναι και η σειρά που πρέπει να τηρήσει ο χρήστης.

- 
- 1) Ημέρα έτους,  $\bar{n}$ .
  - 2) Γεωγραφικό πλάτος τοποθεσίας,  $\phi$ , σε ακτίνια.
  - 3) Κλίση φωτοβολταϊκού,  $s$ , σε ακτίνια.
  - 4) Μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο,  $\overline{H_h}$ , σε W-hr/m<sup>2</sup>.
  - 5) Μέσος δείκτης καθαρότητας,  $\overline{K_h}$ .
  - 6) Μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $T_a$ , σε °C.
- 

#### Αρχείο M\_2\_2:

Το αρχείο M\_2\_2 περιέχει τα ακόλουθα:

- 
- 1) Θερμοκρασία αναφοράς,  $T_r$  σε °C.
  - 2) Θερμοκρασιακός συντελεστής,  $\beta$ , σε 1/°C.
  - 3) Αποδοτικότητα αναφοράς,  $\eta_r$ .
  - 4) Συντελεστής θερμικών απωλειών,  $U_L$ , σε W/m<sup>2</sup> °C.
  - 5) Γινόμενο συντελεστών μεταφοράς και απορροφητικότητας,  $\overline{\tau\alpha}$ .
  - 6) Εμβαδόν συλλέκτη,  $A$ , σε m<sup>2</sup>.
  - 7) Συντελεστής μεταφοράς,  $\tau$ .
  - 8) Αποδοτικότητα συστήματος μετατροπής της ενέργειας,  $\eta_c$ .
- 

#### Αρχείο M\_2\_3:

Το αρχείο M\_2\_3 περιέχει τα παρακάτω:

- 
- 1) Ωριαία απαίτηση φορτίου,  $L$ , σε W-hr.
  - 2) Βάθος αποφόρτισης μπαταρίας.
  - 3) Χωρητικότητα μπαταρίας,  $B_c$ , σε W-hr.
  - 4) Αποδοτικότητα μπαταρίας,  $n_B$ .
-



Η τιμή  $\bar{D}_a / \bar{L}_o$  προκύπτει από το Σχήμα 4.1 ανάλογα με τις τιμές των μεταβλητών  $C / \bar{L}_o$  και  $\bar{D}_o / \bar{L}_o$ .

Αφού λοιπόν τοποθετηθούν προσεκτικά τα δεδομένα στις καθορισμένες θέσεις τους θα πρέπει να πληκτρολογηθούν οι χαρακτήρες M\_2 στο command window της Matlab. Μετά θα ζητηθεί από τον κώδικα μία τιμή της μεταβλητής  $\bar{D}_a / \bar{L}_o$  που προκύπτει από το Σχήμα 4.1 (βλ. Θεωρία)[6.2]. Μόλις γίνει αυτό θα προκύψουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Η ενέργεια που είναι διαθέσιμη στο φορτίο,  $\bar{E}$ , σε W-hr.
- Η ενέργεια που χάθηκε οριστικά από το χωρίς μπαταρίες σύστημα,  $\bar{D}_o$ , σε W-hr.
- Η ενέργεια που χάθηκε από το σύστημα με μπαταρίες,  $\bar{D}_a$ , σε W-hr.
- Η ενέργεια που δόθηκε στο φορτίο από το σύστημα με μπαταρίες,  $\bar{E}_L$ , σε W-hr.
- Οι τιμές των μεταβλητών  $\bar{D}_o / \bar{L}_o$  και  $C / \bar{L}_o$  που είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό της μεταβλητής  $\bar{D}_a / \bar{L}_o$

#### 6.4. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 3<sup>ης</sup> ΜΕΘΟΔΟΥ (ΚΕΦ.5)

Όπως και στις προηγούμενες μεθόδους έτσι και εδώ ο κώδικας που αναπτύχθηκε είναι μια ακολουθία πράξεων σύμφωνα με τη θεωρία. Αποτελείται από 6 αρχεία τα οποία χρησιμοποιούνται σε 2 διαφορετικές φάσεις. Όπως θα εξηγηθεί τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης θα βοηθήσουν στη διαστασιολόγηση κάποιων μεταβλητών που αποτελούν δεδομένα των αρχείων εισόδου της δεύτερης φάσης. Τα αρχεία εισόδου είναι τα M\_3\_1, M\_3\_2, M\_3\_3 και M\_3\_10 ενώ τα αρχεία που περιέχουν τον κυρίως κώδικα είναι τα M\_3 (για τη δεύτερη φάση) και M\_3\_0 (για την πρώτη φάση). Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή των 2 φάσεων.

##### 1<sup>η</sup> Φάση:

Στην πρώτη φάση χρησιμοποιούνται τα αρχεία M\_3\_0 και M\_3\_10. Το δεύτερο περιέχει τα παρακάτω δεδομένα:

- 
- 1) Ημέρα του έτους,  $\bar{n}$ .
  - 2) Γεωγραφικό πλάτος τοποθεσίας,  $\phi$ , σε ακτίνια.
  - 3) Κλίση φωτοβολταϊκού,  $s$ , σε ακτίνια.
  - 4) Μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο,  $\overline{H_h}$ , σε W-hr/m<sup>2</sup>.
  - 5) Μέσος δείκτης καθαρότητας,  $\overline{K_h}$ .
  - 6) Συντελεστής αντανάκλασης εδάφους,  $\rho$ .
- 

Αφού λοιπόν εισαχθούν τα παραπάνω δεδομένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το αρχείο M\_3\_0. Τα αποτελέσματα που θα παράγονται είναι οι τιμές της μηνιαίας μέσης ωριαίας ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη. Η πρώτη φάση τελειώνει επιλέγοντας τις θετικές μόνο τιμές του παραπάνω όρου μιας και οι αρνητικές τιμές δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η χρησιμότητα της παραπάνω διαδικασίας θα φανεί καλύτερα στην περιγραφή της δεύτερης φάσης όπου θα δειχθεί πως ακριβώς χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

## 2<sup>η</sup> φάση:

Η δεύτερη φάση είναι αυτή που θα δώσει τα τελικά αποτελέσματα κάνοντας χρήση των αρχείων M\_3\_1, M\_3\_2, M\_3\_3 καθώς και του M\_3. Πριν γίνει η περιγραφή θα σημειωθεί ξανά ότι κατά τον υπολογισμό της ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη χρησιμοποιείται η γωνία ώρας  $\omega$ . Αυτή η γωνία είναι διαφορετική για κάθε ώρα και μάλιστα εξαρτάται από το πόσες ώρες απομένουν μέχρι να φτάσει το ηλιακό μεσημέρι. Κατά την υλοποίηση λοιπόν του κυρίως κώδικα χρησιμοποιήθηκε ένα διάνυσμα **A** 24 στοιχείων που περιέχει τις ώρες της ημέρας. Επειδή όμως δεν υπάρχει όλες τις ώρες ηλεκτρική παραγωγή το διάνυσμα **A** πρέπει κάθε φορά να προσαρμόζεται ανάλογα. Εδώ φαίνεται η χρησιμότητα της πρώτης φάσης που δείχνει ποιες ώρες υπήρξε τελικά ηλεκτρική παραγωγή και ουσιαστικά ποιο πρέπει να είναι το μέγεθος του διανύσματος **A**. Προφανώς θα πρέπει να προσαρμόζονται ανάλογα και όλοι οι άλλοι όροι που παίρνουν ωριαίες τιμές. Όλα αυτά γίνονται πιο κατανοητά με το παράδειγμα που παρατίθεται στο τέλος του κεφαλαίου. Ας δούμε τώρα τη μορφή και το περιεχόμενο των αρχείων της δεύτερης φάσης.

## Αρχείο M\_3\_1:

Το αρχείο M\_3\_1 περιέχει τα παρακάτω δεδομένα με τη σειρά που εμφανίζονται:

- 
- 1) Μέγεθος του διανύσματος  $A$ .
  - 2) Τιμές του διανύσματος  $A$ .
  - 3) Ημέρα του έτους,  $\bar{n}$ .
  - 4) Γεωγραφικό πλάτος τοποθεσίας,  $\phi$ , σε ακτίνια.
  - 5) Κλίση του φωτοβολταϊκού,  $s$ , σε ακτίνια.
  - 6) Μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο,  $\overline{H_h}$ , σε W-hr/m<sup>2</sup>.
  - 7) Μέσος δείκτης καθαρότητας,  $\overline{K_h}$ .
  - 8) Θερμοκρασίες περιβάλλοντος,  $T_a$ , σε °C.
  - 9) Συντελεστής αντανάκλασης εδάφους,  $\rho$ .
- 

#### Αρχείο M\_3\_2:

Το αρχείο M\_3\_2 περιέχει τα παρακάτω:

- 
- 1) Θερμοκρασιακός συντελεστής,  $\beta$ , σε 1/°C.
  - 2) Αποδοτικότητα αναφοράς,  $\eta_r$ .
  - 3) Αποτελεσματικότητα του συστήματος μετατροπής της ενέργειας,  $\eta_c$ .
  - 4) Συντελεστής θερμικών απωλειών,  $U_L$ , σε W/m<sup>2</sup> °C.
  - 5) Θερμοκρασία αναφοράς,  $T_r$ , σε °C.
  - 6) Συντελεστής μεταφοράς,  $\tau$ .
  - 7) Συντελεστής απορροφητικότητας,  $\alpha$ .
  - 8) Εμβαδόν συλλέκτη,  $A$ , σε m<sup>2</sup>.
- 

#### Αρχείο M\_3\_3:

Τέλος έμεινε το αρχείο M\_3\_3 που περιέχει τις τιμές του φορτίου καθώς και τις παραμέτρους των αποθηκευτικών μπαταριών. Όπως ειπώθηκε στη θεωρία, η τρίτη μέθοδος δουλεύει και με ωριαία μεταβλητό φορτίο αλλά είναι απαραίτητη και η γνώση μιας μέσης τιμής (στοιχείο νούμερο 4). Έτσι:

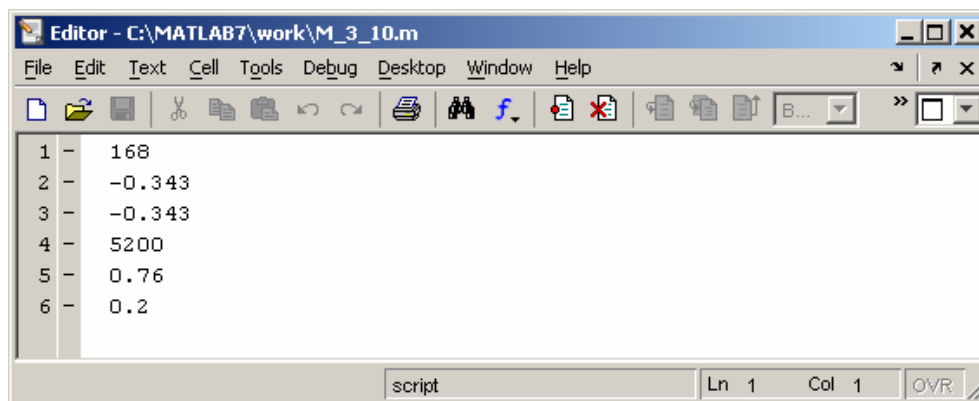
- 
- 1) Ωριαία απαίτηση του φορτίου,  $\bar{L}_i$ , σε W-hr.
  - 2) Αποτελεσματική χωρητικότητα της μπαταρίας,  $B_c$ , σε W-hr.
  - 3) Αποδοτικότητα μπαταρίας,  $n_B$ .
  - 4) Μέσο ημερήσιο ωριαίο φορτίο,  $\bar{L}$ , σε W-hr.
- 

Αφού λοιπόν εισαχθούν τα παραπάνω δεδομένα και αφού πληκτρολογηθούν οι χαρακτήρες M\_3 στο command window της Matlab θα προκύψουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Η ενέργεια που χάθηκε οριστικά λόγω έλλειψης μπαταριών,  $\sum_1^{24h} \bar{D}_{o,i}$ , σε W-hr.
- Η ενέργεια που είναι διαθέσιμη στο φορτίο,  $\sum_1^{24h} \bar{E}_i$ , σε W-hr.
- Η ενέργεια που πήρε το φορτίο με τη χρήση μπαταριών σε W-hr.
- Η ενέργεια που χάθηκε οριστικά με τη χρήση μπαταριών σε W-hr.

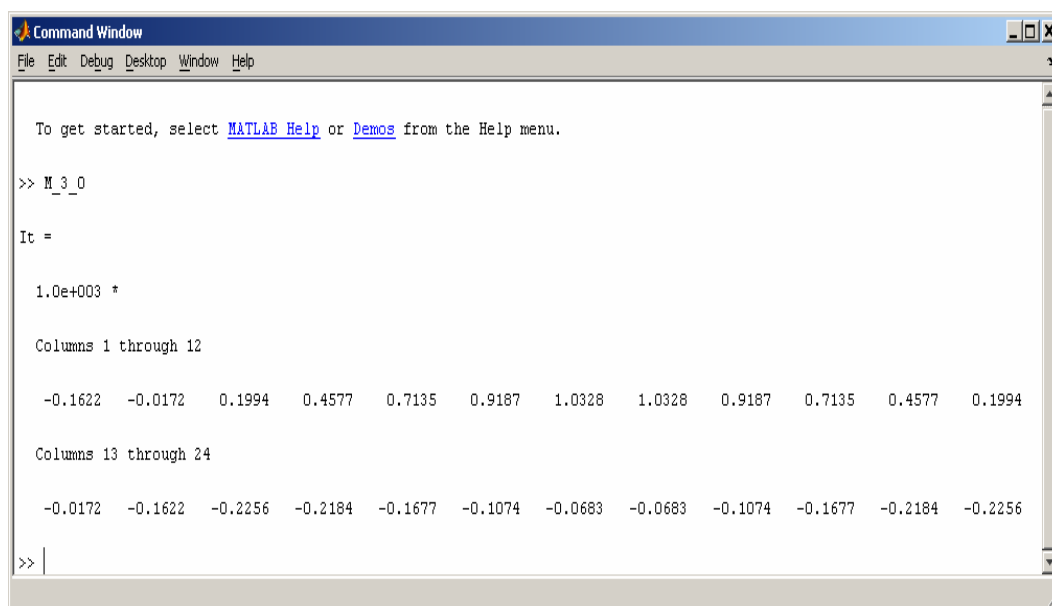
Στη συνέχεια ακολουθεί ένα παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση των όσων προηγήθηκαν [6.1].

Αρχικά δίνεται η μορφή του αρχείου M\_3\_10 όπως ακριβώς είναι στη Matlab.



Εικόνα 6.1: Μορφή αρχείου M\_3\_10 στη Mat lab

Μετά χρησιμοποιώντας τον κώδικα που βρίσκεται στο αρχείο M\_3\_0 παράγονται τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης που θα χρησιμοποιηθούν στη διαστασιολόγηση του διανύσματος A. Ο συμβολισμός της μηνιαίας μέσης ωριαίας ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη είναι όπως δείχθηκε στην θεωρία  $\bar{I}_{array}$ . Όμως κατά την ανάπτυξη του κώδικα και για χάριν ευκολίας αυτή συμβολίστηκε ως It.



**Εικόνα 6.2:** Αποτελέσματα αρχείου M\_3\_0 στη Mat lab

Παρατηρείται εδώ ότι από τις 24 τιμές μόνο οι 10 είναι θετικές. Άρα το διάνυσμα A θα έχει 10 τιμές. Πρέπει όμως να επιλεγθούν οι σωστές. Η γενική μορφή του διανύσματος είναι η παρακάτω:

---

```
A=[5.5 6.5 7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5 17.5 18.5 19.5 20.5 21.5 22.5 23.5 0.5 1.5 2.5 3.5 4.5]
```

---

Επιλέχθηκαν μόνο τα στοιχεία που αντιστοιχούν σε θετική ακτινοβολία. Δηλαδή οι τιμές A[3] έως A[12]. Τελικά:

---

```
A=[7.5 8.5 9.5 10.5 11.5 12.5 13.5 14.5 15.5 16.5]
```

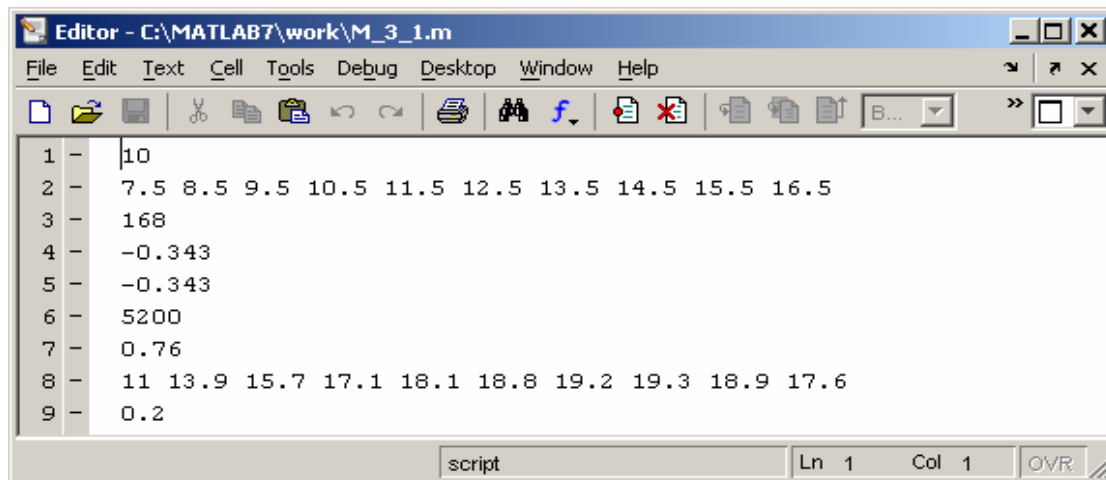
---

Αυτή είναι και η μορφή που το διάνυσμα A εισάγεται στο αρχείο M\_3\_1 όπως φαίνεται παρακάτω.

Αρχείο M\_3\_1:

Το αρχείο αυτό όπως δείχθηκε πριν περιέχει και ωριαίες τιμές θερμοκρασίας. Πρέπει να προσεχθεί λοιπόν οι τιμές που δίνονται να αντιστοιχούν στα στοιχεία του διανύσματος A. Για παράδειγμα για την ώρα 7 με 8 το πρωί η θερμοκρασία είναι 11 °C (όπως ειπώθηκε στη

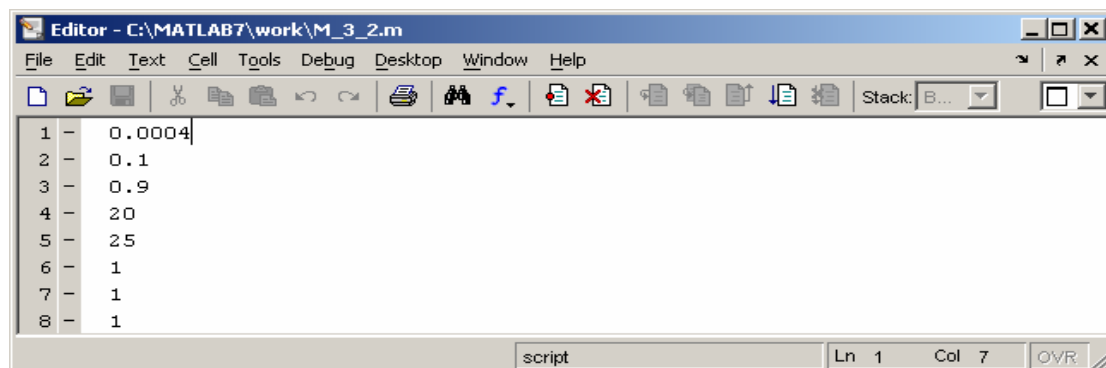
θεωρία, υποτίθεται ότι όλη η ακτινοβολία μιας ώρας είναι συγκεντρωμένη στο μισό της ώρας, για αυτό και οι αντίστοιχες τιμές του διανύσματος A είναι 7.5, 8.5 κτλ). Έτσι:



Εικόνα 6.3: Μορφή αρχείου M\_3\_1 στη Mat lab

Αρχείο M\_3\_2:

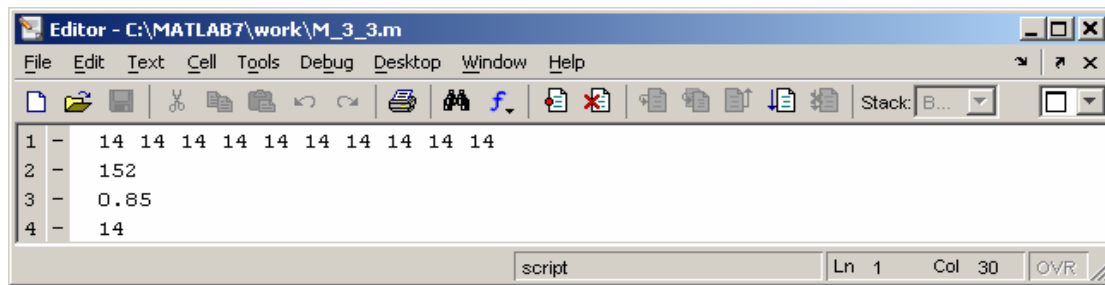
Όμοια με προηγούμενος:



Εικόνα 6.4: Μορφή αρχείου M\_3\_2 στη Mat lab

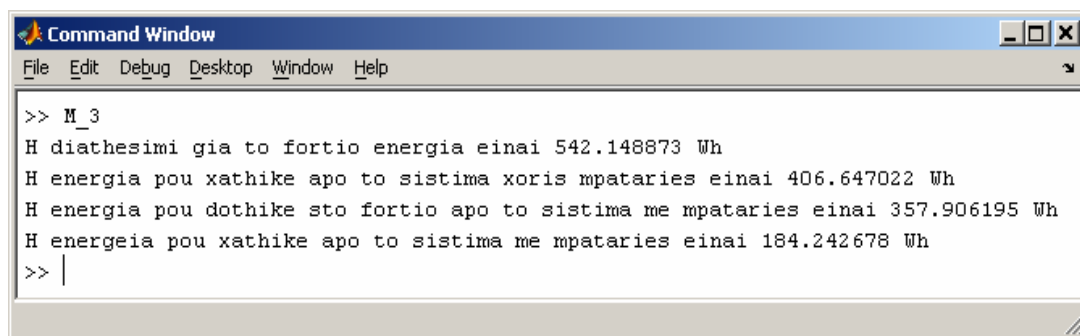
Αρχείο M\_3\_3:

Και αυτό το αρχείο περιέχει ωριαίες τιμές. Πρέπει να προσεχθεί λοιπόν να δοθεί ο σωστός αριθμός στοιχείων.



**Εικόνα 6.5:** Μορφή αρχείου M\_3\_3 στη Mat lab

Τέλος χρησιμοποιώντας το αρχείο M\_3 παράγονται τα τελικά αποτελέσματα που είναι τα παρακάτω:



**Εικόνα 6.6:** Αποτελέσματα αρχείου M\_3 στην Mat lab

## 6.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] Literature Review Of Uncertainty Of Analysis Methods (PV F-Chart Method Program), Report To The Commission On Environmental Quality.
- [6.2] D. R. Clark, S. A. Klein, W. A. Beckman, 'A Method For Estimating The Performance Of Photovoltaic Systems', Solar Energy Vol. 33, No. 6, pp. 551-556.

## ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1. ΓΕΝΙΚΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η σύγκριση των μεθόδων. Αρχικά θα παρουσιαστούν 3 εφαρμογές όπου χρησιμοποιείται το λογισμικό που αναπτύχθηκε και δεδομένα που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία. Τα κριτήρια σύγκρισης είναι τα παρακάτω:

- Σύγκριση ως προς τα αποτελέσματα
- Σύγκριση ως προς τον απαιτούμενο όγκο δεδομένων
- Σύγκριση ως προς τον προγραμματισμό

Θα σημειωθεί εδώ ότι η σύγκριση ως προς τα αποτελέσματα είναι κάπως τυπική αφού και οι τρεις μέθοδοι που εξετάστηκαν είναι δοκιμασμένες από τους ερευνητές που τις ανέπτυξαν. Απλά εδώ η σύγκριση γίνεται για να υπάρχει μια γενικότερη σκοπιά και για την καλύτερη κατανόηση από τον αναγνώστη. Στις παραγράφους που ακολουθούν αρχικά θα δίνονται τα δεδομένα κάθε εφαρμογής και αμέσως μετά τα αποτελέσματα που παρήγαγε κάθε μέθοδος. Πληροφορίες ως προς το πώς παράγονται τα αποτελέσματα και πώς χρησιμοποιείται το λογισμικό παρέχονται στο έκτο κεφάλαιο. Τέλος προσοχή πρέπει να δοθεί στις παραδοχές της κάθε μεθόδου. Για παράδειγμα, στην πρώτη μέθοδο υποτίθεται ότι οι συλλέκτες έχουν κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας που θα εγκατασταθεί το σύστημα. Αυτή η παραδοχή πρέπει να τηρηθεί και στις άλλες δύο μεθόδους, παρότι αυτές δουλεύουν και για κλίση συλλέκτη διαφορετική του γεωγραφικού πλάτους.



## 7.2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται παρακάτω προέκυψαν από τη βιβλιογραφία. Επειδή όμως ήταν δύσκολο να βρεθούν κατάλληλες για χρήση μετεωρολογικές τιμές (ειδικότερα μέσες ωριαίες τιμές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος) που να αφορούν διαφορετικές τοποθεσίες, αποφασίστηκε να κρατηθεί σταθερό το γεωγραφικό πλάτος και να αλλάζει κάθε φορά ο μήνας, οι τιμές του φορτίου και η χωρητικότητα των αποθηκευτικών μπαταριών. Το γεωγραφικό πλάτος που χρησιμοποιήθηκε αντιστοιχεί στην περιοχή του Gweru της Zimbabwe ενώ οι μήνες του χρόνου για τους οποίους έγιναν οι εφαρμογές είναι ο Απρίλιος, ο Ιούνιος και ο Αύγουστος [7.3].

### 7.2.1. 1<sup>η</sup> Εφαρμογή

Στην πρώτη εφαρμογή χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά τοποθεσίας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1. Εκτός από αυτά, χρειάζονται και οι μέσες ωριαίες θερμοκρασίες οι οποίες αρχίζοντας από τη μια το πρωί είναι 7.2, 6.9, 6.7, 6.5, 6.4, 6.4, 7, 11, 13.9, 15.7, 17.1, 18.1, 18.8, 19.2, 19.3, 18.9, 17.6, 13.6, 10.8, 9, 8.8, 8.4, 7.9, 7.5 °C ενώ η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι 11.4 °C.

**Πίνακας 7.1:** Χαρακτηριστικά τοποθεσίας 1<sup>ης</sup> εφαρμογής

Χαρακτηριστικά Τοποθεσίας	
Μέσος δείκτης καθαρότητας	$\overline{K_h}=0.76$
Συντελεστής αντανάκλασης του εδάφους	$\rho=0.2$
Μέση ημέρα του έτους (Ιούνιος)	$\overline{n}=168$
Γεωγραφικό πλάτος τοποθεσίας	$\phi=-0.343 \text{ rad}$
Μηνιαία μέση ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία	$\overline{H_d}=898 \text{ (Wh/m}^2\text{)}$
Μηνιαία μέση ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο	$\overline{H_h}=5200 \text{ (Wh/m}^2\text{)}$

Για το φορτίο τώρα είναι γνωστό ότι η σταθερή ωριαία του τιμή είναι 14 Wh. Προφανώς και η μέση τιμή θα είναι ισόποση. Οι αποθηκευτικές μπαταρίες έχουν ονομαστική χωρητικότητα 200 Wh με βαθμό απόδοσης  $n_B=0.85$ . Επειδή όμως το βάθος αποφόρτισης είναι 76%, η αποτελεσματική τιμή της χωρητικότητας είναι 152 Wh. Στον Πίνακα 7.2 δίνονται τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος.

**Πίνακας 7.2:** Χαρακτηριστικά φωτοβ. συστήματος 1<sup>ης</sup> εφαρμογής

<b>Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού συστήματος</b>	
Αποτελεσματικότητα αναφοράς	$\eta_r = 0.1$
Αποδοτικότητα συστήματος μετατροπής της ενέργειας	$\eta_c = 0.9$
Ωριαία ακτινοβολία στο συλλέκτη σε NOCT συνθήκες	$I_{array,NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$
Εμβαδόν συλλέκτη	$A = 1 \text{ m}^2$
Συντελεστής θερμικών απωλειών	$U_L = 20 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C} \quad (\overline{\tau\alpha} = 1, \tau = 1)$
Θερμοκρασία αναφοράς φωτοβολταϊκών στοιχείων	$T_r = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία περιβάλλοντος σε NOCT συνθήκες	$T_{a,NOCT} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία φωτοβολταϊκών στοιχείων σε NOCT συνθήκες	$T_{c,NOCT} = 46 \text{ }^\circ\text{C}$
Θερμοκρασιακός συντελεστής	$\beta = 0.004 / ^\circ\text{C} \quad (\beta_{mp} = 0.0005 / ^\circ\text{C})$

Χρησιμοποιώντας όλες τις παραπάνω τιμές και το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.3. Αυτός περιέχει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από κάθε μέθοδο όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Θα σημειωθεί εδώ ότι οι τιμές που υπολογίζονται αφορούν τη μέση ημέρα του μήνα. Για παράδειγμα, διαθέσιμη ενέργεια 545 Wh σημαίνει ότι κατά μέσο όρο παράγονται 545 Wh την ημέρα για το συγκεκριμένο μήνα.

**Πίνακας 7.3:** Αποτελέσματα 1<sup>ης</sup> εφαρμογής.

	1 <sup>η</sup> Μέθοδος	2 <sup>η</sup> Μέθοδος	3 <sup>η</sup> Μέθοδος
Διαθέσιμη ενέργεια στο φορτίο (Wh).	545	517	519
Ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε από το σύστημα με μπαταρίες (Wh).	292	328	287
Ενέργεια που χάθηκε από το σύστημα χωρίς μπαταρίες (Wh).	405	366	384
Ενέργεια που χάθηκε από το σύστημα με μπαταρίες (Wh).	253	189	232

### 7.2.2. 2<sup>η</sup> Εφαρμογή

Όμοια με τα προηγούμενα οι μέσες ωριαίες θερμοκρασίες αρχίζοντας από τη μία το πρωί είναι 9.1, 8.8, 8.4, 8.2, 6.1, 8, 9.2, 13.4, 16, 17.9, 19.4, 20.6, 21.4, 21.9, 22.4, 21.8, 20.8, 17.5, 13.9, 12.4, 11.6, 10.9, 10.3 και 9.7 °C ενώ η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι 14.2 °C. Στον Πίνακα 7.4 δίνονται τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας.

**Πίνακας 7.4:** Χαρακτηριστικά τοποθεσίας 2<sup>ης</sup> εφαρμογής

Χαρακτηριστικά Τοποθεσίας	
Μέσος δείκτης καθαρότητας	$\overline{K_h}=0.76$
Συντελεστής αντανάκλασης του εδάφους	$\rho=0.2$
Μέση ημέρα του έτους (Αύγουστος)	$\overline{n}=228$
Γεωγραφικό πλάτος τοποθεσίας	$\phi=-0.343 \text{ rad}$
Μηνιαία μέση ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία	$\overline{H_d}=1080 \text{ (Wh/m}^2\text{)}$
Μηνιαία μέση ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο	$\overline{H_h}=6177 \text{ (Wh/m}^2\text{)}$

Το φορτίο τώρα έχει σταθερή ωριαία τιμή 100 Wh. Προφανώς και η μέση τιμή θα είναι ισόποση. Οι αποθηκευτικές μπαταρίες έχουν ονομαστική χωρητικότητα 750 Wh με βαθμό απόδοσης  $n_b=0.85$ . Επειδή όμως το βάθος αποφόρτισης είναι 76%, η αποτελεσματική τιμή της χωρητικότητας είναι 570 Wh. Στον Πίνακα 7.5 δίνονται τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος.

**Πίνακας 7.5:** Χαρακτηριστικά φωτοβ. συστήματος 2<sup>ης</sup> εφαρμογής

Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού συστήματος	
Αποτελεσματικότητα αναφοράς	$\eta_r=0.1$
Αποδοτικότητα συστήματος μετατροπής της ενέργειας	$\eta_c=0.9$
Ωριαία ακτινοβολία στο συλλέκτη σε NOCT συνθήκες	$I_{array,NOCT}=800 \text{ W/m}^2$
Εμβαδόν συλλέκτη	$A=1 \text{ m}^2$
Συντελεστής θερμικών απωλειών	$U_L=20 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ (}\overline{\tau\alpha}=1, \tau=1\text{)}$
Θερμοκρασία αναφοράς φωτοβολταϊκών στοιχείων	$T_r=25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασία περιβάλλοντος σε NOCT συνθήκες	$T_{a,NOCT}=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασία φωτοβολταϊκών στοιχείων σε NOCT συνθήκες	$T_{c,NOCT}=46 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασιακός συντελεστής	$\beta=0.004/^{\circ}\text{C} \text{ (}\beta_{mp}=0.0005/^{\circ}\text{C)}$

Χρησιμοποιώντας όλες τις παραπάνω τιμές και το αντίστοιχο λογισμικό που έχει αναπτυχθεί συμπληρώνεται ο Πίνακας 7.6.

**Πίνακας 7.6:** Αποτελέσματα 2<sup>ης</sup> εφαρμογής

	1 <sup>η</sup> Μέθοδος	2 <sup>η</sup> Μέθοδος	3 <sup>η</sup> Μέθοδος
Διαθέσιμη ενέργεια στο φορτίο (Wh).	1437	1318	1374
Ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε από το σύστημα με μπαταρίες (Wh).	1365	1265	1300
Ενέργεια που χάθηκε από το σύστημα χωρίς μπαταρίες (Wh).	482	350	493
Ενέργεια που χάθηκε από το σύστημα με μπαταρίες (Wh).	72	52	73

### 7.2.3. 3<sup>η</sup> Εφαρμογή

Όμοια με τα προηγούμενα οι μέσες ωριαίες θερμοκρασίες για το μήνα Απρίλιο αρχίζοντας από τη μία το πρωί είναι 15.5, 13.1, 12.9, 12.7, 12.7, 12.6, 14, 16.9, 19.1, 20.8, 22, 22.9, 23.5, 23.9, 23.9, 23.5, 22.4, 19.8, 17, 15.7, 15.1, 14.6, 14.2 και 13.9 °C ενώ η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι 17.6 °C. Στον Πίνακα 7.7 που ακολουθεί δίνονται τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας.

**Πίνακας 7.7:** Χαρακτηριστικά τοποθεσίας 3<sup>ης</sup> εφαρμογής

Χαρακτηριστικά Τοποθεσίας	
Μέσος δείκτης καθαρότητας	$\overline{K_h}=0.68$
Συντελεστής αντανάκλασης του εδάφους	$\rho=0.2$
Μέση ημέρα του έτους (Απρίλιος)	$\overline{n}=106$
Γεωγραφικό πλάτος τοποθεσίας	$\phi=-0.343 \text{ rad}$
Μηνιαία μέση ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία	$\overline{H_d}=1491 \text{ (Wh/m}^2\text{)}$
Μηνιαία μέση ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο	$\overline{H_h}=5953 \text{ (Wh/m}^2\text{)}$

Η ωριαία σταθερή τιμή του φορτίου είναι 200 Wh. Προφανώς και η μέση τιμή θα είναι ισόποση. Οι αποθηκευτικές μπαταρίες έχουν ονομαστική χωρητικότητα 3160 Wh με βαθμό απόδοσης  $n_B=0.85$ . Επειδή όμως το βάθος αποφόρτισης είναι 76%, η

αποτελεσματική τιμή της χωρητικότητας είναι 2400 Wh. Στη συνέχεια ακολουθούν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος. Θα σημειωθεί εδώ ότι οι τιμές του φορτίου και της χωρητικότητας των μπαταριών δεν επιλέγονται τυχαία. Πρέπει να είναι τέτοιες ώστε το πηλίκο τους ( $C/\bar{L}_o$ ) να εμπίπτει σε μια από τις 3 περιπτώσεις του Σχήματος 4.1 που αφορά τη δεύτερη μέθοδο.

**Πίνακας 7.8:** Χαρακτηριστικά φωτοβ. συστήματος 3<sup>ης</sup> εφαρμογής

Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού συστήματος	
Αποτελεσματικότητα αναφοράς	$\eta_r=0.1$
Αποδοτικότητα συστήματος μετατροπής της ενέργειας	$\eta_c=0.9$
Ωριαία ακτινοβολία στο συλλέκτη σε NOCT συνθήκες	$I_{array,NOCT}=800 \text{ W/m}^2$
Εμβαδόν συλλέκτη	$A=1 \text{ m}^2$
Συντελεστής θερμικών απωλειών	$U_L=20 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ ( $\overline{\tau\alpha}=1, \tau=1$ )
Θερμοκρασία αναφοράς φωτοβολταϊκών στοιχείων	$T_r=25 \text{ }^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία περιβάλλοντος σε NOCT συνθήκες	$T_{a,NOCT}=20 \text{ }^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία φωτοβολταϊκών στοιχείων σε NOCT συνθήκες	$T_{c,NOCT}=46 \text{ }^\circ\text{C}$
Θερμοκρασιακός συντελεστής	$\beta=0.004/^\circ\text{C}$ ( $\beta_{mp}=0.0005/^\circ\text{C}$ )

Τέλος χρησιμοποιώντας όλες τις παραπάνω τιμές και το αντίστοιχο λογισμικό που έχει αναπτυχθεί προκύπτει ο Πίνακας 7.9.

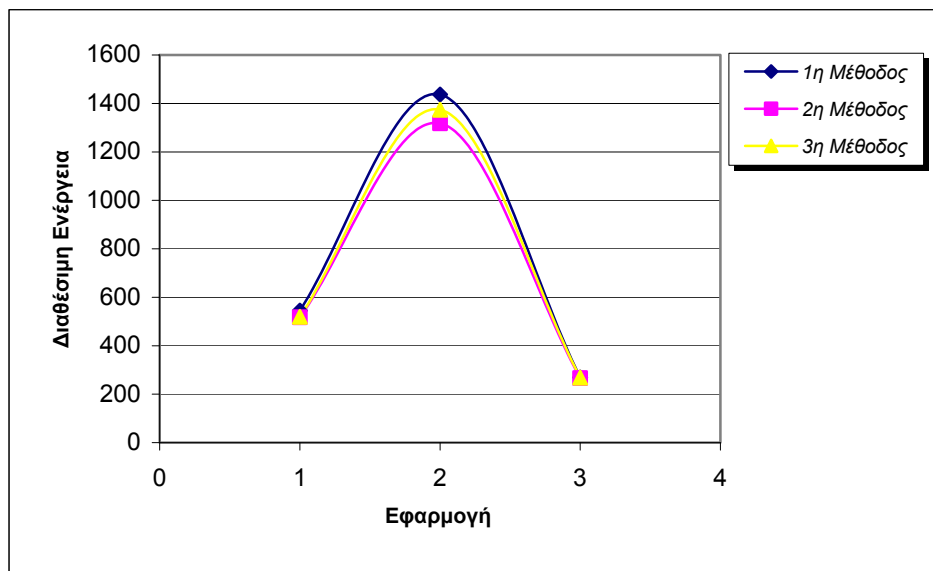
**Πίνακας 7.9:** Αποτελέσματα 3<sup>ης</sup> εφαρμογής.

	1 <sup>η</sup> Μέθοδος	2 <sup>η</sup> Μέθοδος	3 <sup>η</sup> Μέθοδος
Διαθέσιμη ενέργεια στο φορτίο (Wh).	269	266	268
Ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε από το σύστημα με μπαταρίες (Wh).	269	266	268
Ενέργεια που χάθηκε από το σύστημα χωρίς μπαταρίες (Wh).	0	0	0
Ενέργεια που χάθηκε από το σύστημα με μπαταρίες (Wh).	0	0	0

### 7.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

#### 7.3.1. Σύγκριση ως προς τα αποτελέσματα

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει ο σχολιασμός και η σύγκριση των αποτελεσμάτων του λογισμικού των τριών μεθόδων. Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι οι τιμές που προκύπτουν είναι παρόμοιες με μεγαλύτερη διαφορά για το ίδιο μέγεθος να είναι η διαθέσιμη ενέργεια που δίνει η δεύτερη και η πρώτη μέθοδος στον Πίνακα 7.2. Όμως για να γίνει καλύτερος σχολιασμός τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα Σχήματα 7.1 έως 7.4.

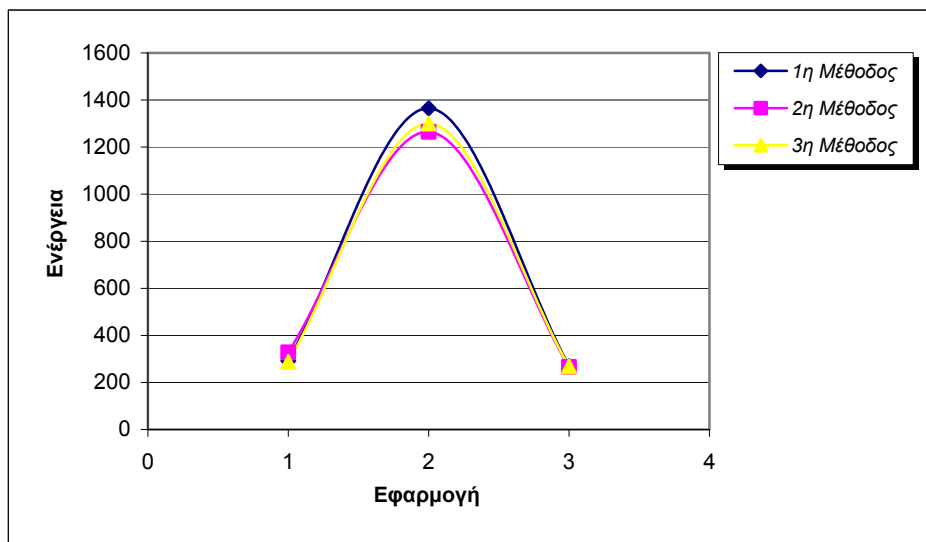


**Σχήμα 7.1:** Τιμές της διαθέσιμης για το φορτίο ενέργειας.

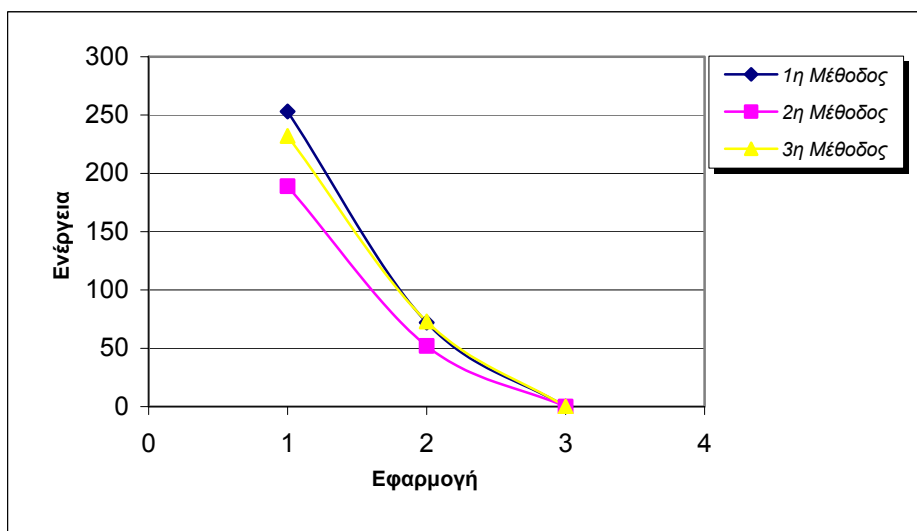
Στο Σχήμα 7.1 φαίνεται ότι οι τρεις μέθοδοι δίνουν παραπλήσιες τιμές για τη διαθέσιμη ενέργεια. Οι όποιες διαφορές που υπάρχουν οφείλονται στο διαφορετικό τρόπο υπολογισμού της εκάστοτε μεταβλητής. Ειδικά η δεύτερη μέθοδος διαφέρει ριζικά από τις άλλες δύο αφού υπολογίζει απευθείας ημερήσιες τιμές και όχι ωριαίες, χρησιμοποιώντας ένα μέσο μηνιαίο δείκτη αποτελεσματικότητας. Από την άλλη πλευρά, η τρίτη μέθοδος διαφέρει από την πρώτη επειδή χρησιμοποιεί μια εντελώς διαφορετική σχέση υπολογισμού του παραπάνω δείκτη. Ειδικά οι όροι  $Z_i$  και  $\beta_{mp}$  της τρίτης μεθόδου είναι αυτοί που υπογραμμίζουν τη διαφορά.

Στο Σχήμα 7.2 γίνεται σύγκριση των τιμών της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε από το σύστημα με μπαταρίες. Παρατηρείται και εδώ ότι οι τιμές έχουν μικρή απόκλιση. Ειδικά για τη δεύτερη μέθοδο, οι αποκλίσεις οφείλονται στον μη άμεσο τρόπο υπολογισμού της

ενέργειας που χάνεται ( $\bar{D}_a$ ) από το σύστημα με μπαταρίες. Όπως δείχθηκε στη θεωρία, αυτή προκύπτει από μια συσχέτιση με τον όρο ( $\bar{D}_o$ ) και την αποτελεσματική χωρητικότητα της μπαταρίας και όχι αναλυτικά από τις ωριαίες ροές όπως γίνεται στην πρώτη μέθοδο. Ανάλογες και πιο καθαρές (λόγω του τρόπου υπολογισμού του  $\bar{D}_a$ ) εμφανίζονται να είναι και οι αποκλίσεις στο διάγραμμα που παρουσιάζει την ενέργεια που χάθηκε από το σύστημα με μπαταρίες.

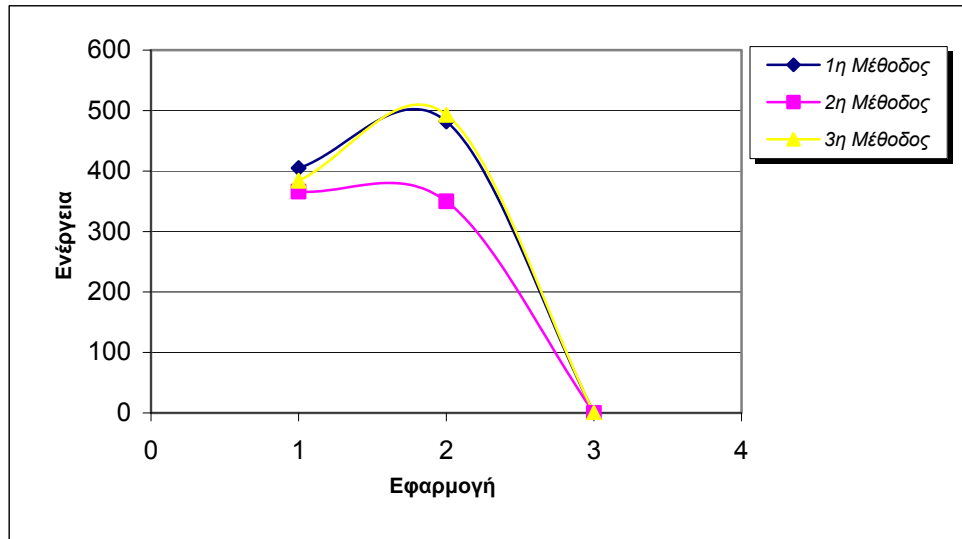


**Σχήμα 7.2:** Τιμές της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε από το σύστημα με μπαταρίες.



**Σχήμα 7.3:** Τιμές της ενέργειας που χάθηκε από το σύστημα με μπαταρίες.

Τέλος παρουσιάζεται το γράφημα της ενέργειας που χάθηκε από το σύστημα με μπαταρίες (Σχήμα 7.4). Οι διαφορές στις υπολογισμένες τιμές οφείλονται εδώ στην χρήση της συνάρτησης χρησιμότητας ( $\bar{\phi}$ ) από τη δεύτερη και τρίτη μέθοδο.



**Σχήμα 7.4:** Τιμές της ενέργειας που χάθηκε από το σύστημα χωρίς μπαταρίες.

Γενικά λοιπόν οι εξεταζόμενες μέθοδοι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Εξάλλου δεν πρέπει να υπάρχουν μεγάλες απαιτήσεις ακρίβειας μιας και οι μέθοδοι έχουν χαρακτηριστεί ως ‘απλουστευμένες’. Τέλος να σημειωθεί ότι οι ερευνητές που ανέπτυξαν τις μεθόδους σύγκριναν τα αποτελέσματα με αυτά που προκύπτουν από προσομοιώσεις του προγράμματος TRNSYS. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία [7.2], τα συμπεράσματα των συγκρίσεων είναι θετικά και για τις τρεις μεθόδους. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.10 τιμές του ποσοστού της ενέργειας ( $f$ ) που δόθηκε από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα στην Βοστώνη όπως προέκυψαν από την τρίτη μέθοδο και από το TRNSYS.

**Πίνακας 7.10:** Ποσοστό ενέργειας που δόθηκε στο φορτίο

Μήνας	3 <sup>η</sup> Μέθοδος	TRNSYS
Ιανουάριος	0.39	0.40
Φεβρουάριος	0.49	0.51
Μάρτιος	0.56	0.58
Απρίλιος	0.62	0.61
Μάιος	0.66	0.68
Ιούνιος	0.68	0.75
Ιούλιος	0.67	0.7
Αύγουστος	0.63	0.68
Σεπτέμβριος	0.64	0.68
Οκτώβριος	0.56	0.54
Νοέμβριος	0.37	0.40
Δεκέμβριος	0.34	0.35



### 7.3.2. Σύγκριση ως προς τον απαιτούμενο όγκο δεδομένων

Είναι προφανές πως τη μεγαλύτερη απαίτηση σε όγκο δεδομένων έχουν η πρώτη και η τρίτη μέθοδος. Αυτό ισχύει επειδή υπολογίζουν ωριαίες τιμές ενέργειας και άρα χρειάζονται δεδομένα που να αφορούν και τις 24 ώρες της ημέρας. Πιο συγκεκριμένα, για τη χρήση των δύο αυτών μεθόδων χρειάζονται 24 τιμές για τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Τα υπόλοιπα μετεωρολογικά δεδομένα είναι κοινά και για τις τρεις μεθόδους με εξαίρεση την πρώτη που θέλουμε μια μέση τιμή για τη διάχυτη ακτινοβολία, ενώ στις άλλες 2, αυτή υπολογίζεται μέσω του μηνιαίου δείκτη καθαρότητας. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, τα παραπάνω δεδομένα δίνονται από μετεωρολογικούς σταθμούς.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους του φωτοβολταϊκού, αυτά είναι κοινά για όλες τις μεθόδους με μόνη εξαίρεση το θερμοκρασιακό συντελεστή μέγιστης ισχύος ( $\beta_{mp}$ ) που χρησιμοποιεί η τρίτη μέθοδος.

Τέλος, η τρίτη μέθοδος απαιτεί περισσότερες πληροφορίες για το φορτίο. Αυτό ισχύει επειδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και αν η ενεργειακή απαίτηση αλλάζει από ώρα σε ώρα. Έτσι μπορεί να χρειαστούν έως και 24 τιμές. Όμως ας μην ξεχνάμε ότι για τον υπολογισμό της επίδρασης των μπαταριών χρειάζεται και μια μέση ωριαία τιμή του φορτίου.

### 7.3.3. Σύγκριση ως προς τον προγραμματισμό

Η ανάπτυξη του λογισμικού των τριών μεθόδων ήταν σχετικά εύκολη μιας και ήταν μια ακολουθία πράξεων. Αυτό φαίνεται και από τις γραμμές του κώδικα της κάθε μεθόδου. Στην τρίτη και πρώτη μέθοδο χρειάστηκε να αναπτυχθούν και κάποιες επαναληπτικές ρουτίνες είτε για τον υπολογισμό κάποιων μεταβλητών (όπως το  $B_{level}$  start στην πρώτη μέθοδο) είτε για να γίνει έλεγχος κάποιων τιμών ούτως ώστε να μην είναι αρνητικές.

Αν έπρεπε τώρα να επιλεγεί η μέθοδος με τα περισσότερα δύσκολα σημεία, αυτή είναι η τρίτη. Η πρώτη δυσκολία είναι κατά τον υπολογισμό του  $A_o$  και ειδικότερα όταν  $A_o=1$ . Όπως ειπώθηκε στη θεωρία, σε αυτήν την περίπτωση η εξίσωση υπολογισμού της παραπάνω παραμέτρου αλλάζει. Αλλά τι σημαίνει  $A_o=1$ ; Τι γίνεται στην περίπτωση που αντί για μονάδα ισούται με 0.99; Οποιαδήποτε στρογγυλοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα. Τελικά όποια τιμή είναι πάνω από 0.9 θεωρείται ίση με τη μονάδα και η σχέση υπολογισμού του  $A_o$  αλλάζει. Η δεύτερη δυσκολία είναι κατά τον υπολογισμό της ακτινοβολίας πάνω στο συλλέκτη και ειδικότερα όταν αυτή λαμβάνει αρνητικές τιμές. Δυστυχώς, δε γίνεται να θεωρηθούν αυτές οι τιμές ίσες με το 0 όπως έγινε στην πρώτη μέθοδο γιατί σε μετέπειτα πράξεις ο όρος της ακτινοβολίας υπάρχει στον παρονομαστή κάποιων κλασμάτων. Έτσι όπως

περιγράφηκε στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο το λογισμικό της τρίτης μεθόδου χωρίζεται σε 2 φάσεις όπου στην πρώτη απορρίπτονται οι όποιες αρνητικές τιμές μειώνοντας το μέγεθος του διανύσματος A.

#### 7.4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΙΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η επιλογή μιας μεθόδου εξαρτάται κυρίως από τις παραδοχές που έχουν γίνει κατά την δημιουργία της. Επειδή λοιπόν οι μέθοδοι είναι εξίσου καλές, ο μόνος περιορισμός είναι τα δεδομένα (μετεωρολογικά και άλλα) που χρειάζονται. Για διευκόλυνση παρουσιάζονται παρακάτω οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται κατά την επιλογή κάθε μεθόδου.

Μπορεί να επιλεγθεί η πρώτη μέθοδος όταν:

- Είναι γνωστές οι τιμές της περιβαλλοντικής θερμοκρασίας για τις 24 ώρες της ημέρας.
- Το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας είναι ίσο με την κλίση του συλλέκτη.
- Είναι γνωστή μια μέση ζήτηση του φορτίου η οποία είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του 24ώρου.

Μπορεί να επιλεγθεί η δεύτερη μέθοδος όταν:

- Είναι γνωστή η μηνιαία μέση ημερήσια θερμοκρασία του περιβάλλοντος
- Το γεωγραφικό πλάτος δεν είναι απαραίτητα ίσο με την κλίση του συλλέκτη.
- Είναι γνωστή μια μέση ζήτηση του φορτίου η οποία είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του 24ώρου.

Μπορεί να επιλεγθεί η τρίτη μέθοδος όταν:

- Είναι γνωστές οι τιμές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος για τις 24 ώρες της ημέρας.
- Το γεωγραφικό πλάτος δεν είναι απαραίτητα ίσο με την κλίση του συλλέκτη.
- Η ζήτηση του φορτίου δεν είναι απαραίτητα σταθερή σε όλη τη διάρκεια της ημέρας.
- Όταν υπάρχει αξιοσημείωτη ανακλώμενη ακτινοβολία (π.χ. στις περιοχές που έχει χιονίσει και ο συντελεστής  $\rho$  είναι αυξημένος).

## 7.5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [7.1] Literature Review Of Uncertainty Of Analysis Methods (PV F-Chart Method Program), Report To The Commission On Environmental Quality.
- [7.2] D. R. Clark, S. A. Klein, W. A. Beckman, 'A Method For Estimating The Performance Of Photovoltaic Systems', Solar Energy Vol. 33, No. 6, pp. 551-556.
- [7.3] Tawanda Hove, 'A Method For Predicting Long Term Average Performance Of Photovoltaic Systems', Renewable Energy, December 1999.