



Τ.Ε.Ι. Κρήτης
Τμήμα Ηλεκτρονικής



Μοντελοποίηση, προσομοίωση και μελέτη σκίασης φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο λογισμικό Matlab

ΓΑΛΑΝΑΚΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ
ΒΕΡΔΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής
Ιωάννης Κατσιγιαννης

Χανιά
Σεπτέμβριος 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	3
1.1 Ο ήλιος	3
1.1.1 Η δομή του ήλιου	6
1.1.2 Οι κηλίδες	9
1.1.3 Οι προεξοχές και τα άλλα φαινόμενα	11
1.2 Η ηλιακή ακτινοβολία	13
1.2.1 Εισαγωγή	13
1.2.2 Η ενέργεια από τον ήλιο	13
1.3 Όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	18
2.1 Πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας	20
2.1.1 Τριοδιάστατη γεωμετρία	20
2.1.1.1 Γεωγραφικό μήκος και πλάτος	20
2.1.1.2 Ηλιακή απόκλιση	23
2.1.1.3 Ηλιακή ώρα και ωρολογιακή ώρα	25
2.1.1.4 Ωριαία γωνία του ήλιου	27
2.1.1.5 Υπολογισμός θέσης του ήλιου	28
2.1.1.6 Γωνία αζιμούθιου και κλίση συλλέκτη	29
2.1.1.7 Γωνία πρόσπτωσης	32
2.1.1.8 Γωνία ζενίθ του ήλιου	35
2.1.2 Ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας εκτός γήινης ατμόσφαιρας	36
2.1.2.1 Υπολογισμός εξωγήινης κάθετης ακτινοβολίας	36
2.1.2.2 Υπολογισμός εξωγήινης οριζόντιας ακτινοβολίας	38

2.1.2.3	Υπολογισμός πυκνότητας ενέργειας της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας	39
2.1.3	Τρόπος μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας εντός γήινης ατμόσφαιρας	40
2.1.3.1	Πυκνότητα ενέργειας της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης	40
2.1.3.2	Υπολογισμός άμεσης και διάχυτης ολικής ακτινοβολίας	42
2.1.3.3	Υπολογισμός πυκνότητας ενέργειας της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε Φ/Β συστοιχία	42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 44

3.1	Εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά συστήματα	44
3.2	Η δομή και τα μέρη του φωτοβολταϊκού συστήματος	45
3.3	Οι βασικοί τύποι φ/β συστημάτων	47
3.4	Τεχνολογίες φ/β	49
3.4.1	Εισαγωγή	49
3.4.2	Κατηγορίες φ/β στοιχείων με βάση το υλικό κατασκευής	50
3.5	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	56
3.5.1	Απόδοση ημιαγωγικών υλικών σε διάφορα φάσματα ηλιακής ακτινοβολίας	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Η ΙΣΧΥΣ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 61

4.1	Πρότυπες συνθήκες δοκιμής φ/β πλαισίων	61
4.2	Σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος φ/β στοιχείου	61
4.3	Μεταβολή της μέγιστης ισχύος σε συνάρτηση με την πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας G την θερμοκρασία T_a και το υλικό κατασκευής	63
4.4	Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φ/β στοιχείου	65
4.5	Υπολογισμός ισχύος εξόδου φ/β συστοιχίας	66

4.6	Υπολογισμός ισχύς εξόδου φ/β συστοιχίας για δεδομένη ηλιακή ακτινοβολία G και θερμοκρασία περιβάλλοντος T για συλλέκτη με σταθερή στήριξη(Matlab)	67
4.7	Υπολογισμός ισχύς εξόδου φ/β συστοιχίας για δεδομένη ηλιακή ακτινοβολία G και θερμοκρασία περιβάλλοντος T για συλλέκτη με σύστημα tracker (Matlab)	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΚΙΑΣΗ **90**

5.1	Εισαγωγή στη σκίαση	90
5.2	Βασικές κατηγορίες σκίασης	92
5.3	Η δίοδος bybass στα φ/β συστήματα	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΚΙΑΣΗΣ **101**

6.1	Υπολογισμός ελάχιστης απόστασης μεταξύ φ/β συστοιχιών	101
6.1.1	Υπολογισμός ελάχιστης απόστασης μεταξύ φ/β συστοιχιών για τα Χανιά	106
6.2	Υπολογισμός της γωνίας προφίλ	106
6.3	Υπολογισμός της σκίασης	107
6.4	Υπολογισμός της σκίασης για διάφορα σενάρια (Matlab)	108

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ **123**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α **132**

A.1	Κώδικας Matlab για τον υπολογισμό ισχύος και σκίασης Φ/B Συστοιχίας	132
-----	--	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **140**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εξέλιξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ραγδαία τα τελευταία χρόνια λόγω της εξάντλησης των φυσικών πόρων στον πλανήτη και την ανάγκη χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που δεν μολύνουν το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό όλο και περισσότερες έρευνες γίνονται πάνω στο τομέα των φωτοβολταϊκών.

Η παρακάτω πτυχιακή δημιουργήθηκε με σκόπο την μοντελοποίηση , προσομοίωση και μελέτη σκίασης φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο λογισμικό Matlab και αποτελεί έρευνα στα φ/β συστήματα. Επίσης αποτελεί ένα καλό «εργαλείο» εξικοίωσης προς όλους αυτούς που θέλουν να ασχοληθούν με τα φ/β συστήματα. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται γράφτηκε σε κώδικα Matlab και έχει την ικανότητα να υπολογίζει την ισχύ και τη σκίαση φ/β συστημάτων για οποιαδήποτε περιοχή του κόσμου με την εισαγωγή κατάλληλων δεδομένων.

Η ισχύς που υπολογίζεται αφορά φ/β συστήματα σταθερής στήριξης καθώς και φ/β συστήματα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου(Tracker). Όσο αναφορά τον υπολογισμό της σκίασης είναι εφικτός για φ/β συστοιχίες που είναι τοποθετημένες σε οριζόντιο επίπεδο.

ABSTRACT

The outcome of photovoltaic systems ,is drastic the last years due to the overuse of world natural resources ,and the need of use renewable energy resources that are eco friendly. For this reason most research is done on the topic of photovoltaic systems.

This project was created with aim to modelise , simulate and study the shading of photovoltaic arrays in Matlab Software and constitutes research in the F/B systems. Also it constitutes a good “tool” to all those that want deal with the F/B systems. The algorithm that is used was written in Matlab code and has the ability to calculate the Power and Shading in F/B systems for any region of world with the import of suitable data.

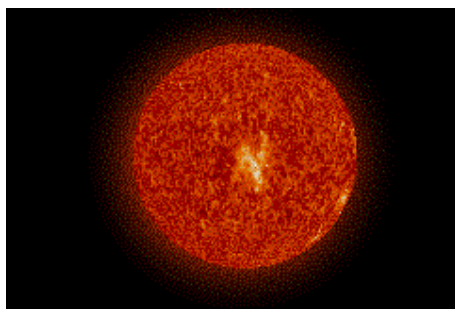
The Power which is calculated concerns stable F/B systems as well as F/B systems which follow the orbit of Sun (Tracker).The Shading is calculated only for F/B arrays that are placed in horizontal level.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

1.1 Ο ΗΛΙΟΣ

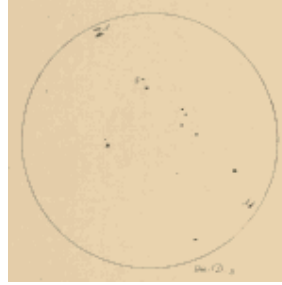
Ο ήλιος αποτελείται ως επί το πλείστον από το υδρογόνο (70%), το ήλιον (28%) και το υπόλοιπο 2% από βαρέα στοιχεία. Είναι επίσης ένα κίτρινος νάνος αστέρας. Είναι το μόνο αστέρι αρκετά κοντά στη Γη, ώστε να εξετάσουμε τα εξωτερικά και τα εσωτερικά στρώματά του λεπτομερώς. Ο Ήλιος είναι το μόνο άστρο που επηρεάζει φανερά τη ζωή μας, όχι μόνο την ημέρα αλλά και τη νύκτα, με ηλιοφάνεια αλλά και τις νεφοσκεπείς ημέρες. Ο ήλιος παράγει και ακτινοβολεί τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Σε κάθε δευτερόλεπτο που περνά, ο ήλιος εκπέμπει ενέργεια ίση με μερικές εκατοντάδες δισεκατομμύρια τρισεκατομμυρίων κιλοβατώρες. Και μας παρέχει σχεδόν όλη την ενέργεια που χρησιμοποιούμε στη Γη. Ακόμη και ο άνεμος και τα νέφη είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της ηλιακής ενέργειας στη Γη. Από την ηλιακή ακτινοβολία προέρχεται η αιολική ενέργεια, ο κύκλος του νερού, η βιολογική ενέργεια, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, ο άνθρακας και σχεδόν όλη η ενέργεια στο ηλιακό σύστημα. Εξαιρέση αποτελεί η πυρηνική ενέργεια που παράγεται από χημικά στοιχεία που δημιουργήθηκαν ως αποτέλεσμα εκρηκτικών φαινομένων που έγιναν κατά τον θάνατο ορισμένων μεγάλων άστρων. Είναι ένας συνηθισμένος νάνος αστέρας δεύτερης γενιάς που παράγει ενέργεια από σύντηξη υδρογόνου στο εσωτερικό του. Πιο συγκεκριμένα με την αλυσιδωτή αντίδραση πρωτονίου-πρωτονίου, με την οποία καταναλώνει το υδρογόνο του με ένα ρυθμό 4.000.000 τόνων, ανά δευτερόλεπτο, παράγοντας ήλιο. Ο ήλιος, οι πλανήτες, οι κομήτες και οι μετεωρίτες αποτελούνται από την ίδια αρχική ύλη με την ίδια περίπου αναλογία χημικών στοιχείων, με εξαίρεση τα ελαφρά στοιχεία, υδρογόνο και ήλιο που αφθονούν στον ήλιο και στους τέσσερις γίγαντες πλανήτες. Επειδή είναι άστρο δεύτερης γενιάς σημαίνει ότι κάποιο από το υλικό του προήλθαν από τα προηγούμενα αστέρια. Μερικά αστέρια στο γαλαξία μας είναι τόσο παλιά όσο το Σύμπαν περίπου, δηλαδή κοντά 13,7 δισεκατομμυρίων ετών. Αντίθετα, ο ήλιος μας είναι μόνο 4,6 δισεκατομμυρίων ετών. Τα πρώτα άστρα αποτελούνταν μόνο από υδρογόνο και ήλιο που προήλθαν αμέσως μετά τη Μεγάλη Έκρηξη. Αυτά τα άστρα ονομάζονται πρώτης γενιάς αστέρια. Αν και το υδρογόνο είναι επίσης το κύριο συστατικό του ήλιου, αυτός περιλαμβάνει και βαρύτερα στοιχεία, όπως ο άνθρακας, το άζωτο, και το οξυγόνο. Αυτά τα στοιχεία σχηματίστηκαν στο εσωτερικό της πρώτης γενιάς αστέρια που έζησαν και πέθαναν προτού ο ήλιος να γεννηθεί. Όταν αυτά τα ογκώδη, βραχύβια αστέρια κατανάλωσαν τα εσωτερικά καύσιμά τους, εξερράγησαν και εκτίναξαν τα βαρύτερα στοιχεία στο διαστρικό διάστημα. Ο ήλιος λοιπόν που σχηματίστηκε από αυτό το υλικό λέγεται αστέρι δεύτερης γενιάς.



Σχήμα 1.1: Εικόνα με τον ήλιο

Ο ήλιος και οι πλανήτες στο ηλιακό σύστημά μας σχηματίστηκαν όταν κατέρρευσε ένα περιστρεφόμενο νέφος σκόνης και αερίου στο διάστημα, ή έγινε συμπύκνωση, λόγω της βαρυτικής έλξης μεταξύ των σωματιδίων στο νέφος. Μια έκρηξη σουπερνόβας στην περιοχή αυτού του νεφελώματος μπορεί να είχε προκαλέσει την κατάρρευση, ή μια τυχαία διακύμανση στην πυκνότητα του νέφους και έτσι μπορεί να είχε αρχίσει τη διαδικασία σχηματισμού. Τα άτομα του νεφελώματος - που κινούνταν με χαοτικό τρόπο προς όλες τις κατευθύνσεις - κάποια στιγμή απέκτησαν τέτοια κατεύθυνση που έδωσε στο νέφος αυτό μια μικρή αλλά συγκεκριμένη φορά περιστροφής. Όταν η ταχύτητα της περιστροφής ήταν μικρή η βαρύτητα κατόρθωσε να τα τραβήξει προς το κέντρο όπου σχηματίστηκε το άστρο. Όταν όμως η ταχύτητα των μορίων ήταν μεγάλη συγκρατήθηκαν στις τροχιές τους κι έτσι, το ακανόνιστο διαστρικό νέφος πήρε σιγά-σιγά τη μορφή ενός περιστρεφόμενου αεριώδη δίσκου. Από τη μία άκρη ως την άλλη, ο περιστρεφόμενος δίσκος είχε διάμετρο δύο περίπου τρισεκατομμυρίων χιλιομέτρων, και με την πάροδο του χρόνου στα εξωτερικά του στρώματα δημιουργήθηκαν μικρότερες δίνες και ζώνες. Εκατομμύρια χρόνια πέρασαν από τότε και οι υπερθερμασμένες σφαίρες των πλανητών άρχισαν να κρυώνουν. Σιγά-σιγά η πίεση του ηλιακού φωτός έδιωξε μακριά τα υπολειπόμενα αέρια, ενώ τα υλικά που είχαν παραμείνει σε τροχιά γύρω από τους πλανήτες συμπυκνώθηκαν σχηματίζοντας τους δορυφόρους τους. Κοντά στον Ήλιο τα υλικά ήταν λιγότερα, και έτσι σχηματίστηκαν μικρότεροι πλανήτες. Πιο μακριά, οι μεγαλύτερες μάζες των πλανητών κατόρθωσαν να συγκρατήσουν τα ελαφρά αέρια από υδρογόνο και ήλιο που σχημάτιζαν το γενεσιουργό νεφέλωμα, και μετετράπησαν έτσι σε αεριώδεις γίγαντες. Τα αέρια και η σκόνη που απέμειναν όμως δεν κατέληξαν όλα στους πλανήτες, σχηματίζοντας έτσι τους αστεροειδείς και του κομήτες που παίζουν το ρόλο του 'αλήτη' ανάμεσα στις τροχιές των πλανητών. Στο μεταξύ, ο πυρήνας του νέφους είχε φτάσει τη θερμοκρασία των 15 εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου. Οι πυρηνικές αντιδράσεις είχαν ήδη αρχίσει να μεταστοιχειώνουν το υδρογόνο σε ήλιο και να μετατρέπουν, κάθε δευτερόλεπτο, 4 εκατομμύρια τόνους ύλης σε ενέργεια. Οι διάφορες ζώνες υλικών που είχαν σχηματιστεί γύρω από τον Ήλιο άρχισαν σιγά-σιγά να συμπύκνωσης και να συμπυκνώνονται, σχηματίζοντας μικρές και μεγάλες υπέρθερμες αεριώδεις σφαίρες που κουβαλούσαν πίσω τους, σαν τεράστιοι κομήτες, τα υπολείμματα των αερίων από τα οποία σχηματίστηκαν. Τα σχηματιζόμενα σώματα δεν απέκτησαν ποτέ

την κατάλληλη μάζα για να λάμψουν κάποτε σαν άστρα, κι έτσι το μέγλωμά τους σταμάτησε, παρέμειναν σκοτεινά και έγιναν πλανήτες. Όταν ο ήλιος έφθασε στο παρόν μέγεθός του - περίπου 4,6 δισεκατομμύρια έτη πριν - ήταν αρκετά καυτός στο εσωτερικό του για να ξεκινήσουν οι πυρηνικές αντιδράσεις που θα τον έκαναν να φλέγεται. Ο ήλιος όμως δεν μπορεί να λάμψει για πάντα, επειδή κάποτε θα καταναλώσει τα καύσιμά του. Οι πυρηνικές αντιδράσεις έχουν μετατρέψει μέχρι σήμερα περίπου το 37% του υδρογόνου σε ήλιο στο κέντρο του. Οι αστρονόμοι υπολογίζουν ότι ο πυρήνας του ήλιου θα τελειώσει το υδρογόνο σε περίπου 7 δισεκατομμύρια έτη. Σε όλους τους αστέρες άρα και στον ήλιο η ενέργεια παράγεται με την πυρηνική σύντηξη. Το υδρογόνο που υπάρχει στον πυρήνα του μέσω της πυρηνικής σύντηξης μετατρέπεται σε ήλιο. Στην αντίδραση αυτή πρωτόνια συγκρούονται και δημιουργούν πυρήνες ηλίου ενώ ταυτόχρονα απελευθερώνεται ενέργεια με τη μορφή ακτινών γ και νετρίνων. Η αντίδραση αυτή, που ονομάζεται αλυσίδα πρωτονίου-πρωτονίου (p-p), απελευθερώνει ενέργεια $4,2 \times 10^{-12}$ J για τη δημιουργία ενός πυρήνα ηλίου. Για να δικαιολογηθεί η φωτεινότητα του ήλιου θα πρέπει ηλιακή μάζα ίση με 140 τρισεκατομμύρια τόνους να μετατρέπεται σε ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός χρόνου. Η αλλιώς ο ήλιος μας εκπέμπει ενέργεια ίση με 386 δισεκατομμύρια Megawatts και κάθε δευτερόλεπτο 700.000.000 τόνοι υδρογόνου μετατρέπονται σε 695.000.000 τόνους ηλίου και 5.000.000 τόνους σε ενέργεια με τη μορφή ακτινών γάμμα. Καθώς ταξιδεύει προς την επιφάνεια η ακτινοβολία συνεχώς απορροφάται και επανεκπέμπεται σε ολοένα μικρότερη θερμοκρασία έτσι ώστε όταν φτάσει στην επιφάνεια να γίνει κυρίως ορατή ακτινοβολία. Για το 20% τουλάχιστον στο δρόμο της προς την επιφάνεια η ενέργεια φέρεται περισσότερο μέσω μετάδοσης παρά με ακτινοβολία. Όμως το υδρογόνο που χρησιμοποιείται βρίσκεται κοντά και μέσα στον πυρήνα του ηλίου, δηλαδή μόνο το 10% της ολικής του μάζας. Άρα η ενέργεια που ακτινοβολείται από τον ήλιο προέρχεται από τον πυρήνα του. Γι αυτό και ένα φωτόνιο που γεννήθηκε στον πυρήνα του ηλίου για να καταφέρει να φτάσει στην επιφάνειά του απαιτείται πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, λόγω των συνεχών συγκρούσεων του. Η ανάλυση δείχνει ότι οι ακτίνες που βλέπουμε σήμερα έχουν γεννηθεί πριν από εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια. Αν το υδρογόνο εξαντληθεί τότε θα αρχίσει σε αυτή τη φάση του ήλιου η σύντηξη ηλίου σε βαρύτερα στοιχεία. Φυσικά ο ρυθμός της παραγωγής της ενέργειας θα αλλάξει και όταν θα συμβεί αυτό η διάμετρος, η θερμοκρασία και η λαμπρότητα του ηλίου θα μεταβληθούν. Οι επιστήμονες εκτιμούν πως ο ήλιος θα συνεχίσει να παράγει ενέργεια από τη σύντηξη του υδρογόνου για 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ακόμα. Στον ήλιο βρίσκουμε στην φωτόσφαιρα σκοτεινές περιοχές ή κηλίδες με μια θερμοκρασία 3.000 βαθμών μόνο, σε αντίθεση με την φωτόσφαιρα που έχει 6.000 βαθμούς. Οι σκοτεινές κηλίδες έχουν έκταση εκατομμύρια χιλιόμετρα, εμφανίζονται σε ζεύγη ή ομάδες, δημιουργούν μαγνητικά πεδία ενώ διαρκούν αρκετές εβδομάδες. Ο επαναλαμβανόμενος 11-ετής κύκλος των κηλίδων ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά από τον Γαλιλαίο.



Σχήμα 1.2: Εικόνα του ήλιου με σκοτεινές κηλίδες στην επιφάνεια του

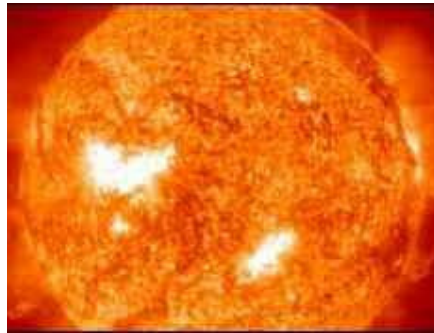
Ο ήλιος θα γίνεται σταθερά φωτεινότερος καθώς θα περνάει ο χρόνος και θα συσσωρεύεται στον πυρήνα του ολοένα και περισσότερο ήλιο. Όμως μπορεί το υδρογόνο να ελαττώνεται, αλλά ο πυρήνας του ήλιου πρέπει να συνεχίσει να έχει αρκετή πίεση ώστε να μην καταρρεύσει. Ο μόνος τρόπος που μπορεί να το κάνει είναι να αυξηθεί η θερμοκρασία του. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το ρυθμό με τον οποίο συμβαίνουν οι πυρηνικές αντιδράσεις και έτσι ο ήλιος γίνεται φωτεινότερος. Σε 3 δισεκατομμύρια έτη, ο ήλιος θα είναι αρκετά καυτός ώστε να εξατμιστούν οι ωκεανοί της Γης. Σε τέσσερα δισεκατομμύρια έτη από τότε, ο ήλιος θα έχει καταναλώσει όλο το υδρογόνο του και θα φουσκώσει σαν μπαλόνι, μετατρέπόμενος προς ένα γιγαντιαίο άστρο που θα καταπιεί τον Ερμή. Σε αυτό το σημείο της ζωής του, ο ήλιος θα είναι ένας ερυθρός γίγαντας. Ο ήλιος θα είναι τότε 2.000 φορές φωτεινότερος από ό,τι είναι τώρα, και αρκετά καυτός ώστε να λειώσει τους γήινους βράχους. Τότε το εξωτερικό ηλιακό σύστημα θα γίνει θερμότερο και πιο κατοικήσιμο. Τα παγωμένα φεγγάρια των γιγαντιαίων εξωτερικών πλανητών μπορούν να θερμανθούν αρκετά ώστε να καλυφθούν από νερό αντί με πάγο. Όταν ο ερυθρός γίγαντας ήλιος μας καταναλώσει και τα τελευταία του καύσιμα, δεν θα είναι σε θέση πλέον να υποστηρίξει το βάρος των εσωτερικών στρωμάτων του, και θα αρχίσουν να καταρρέουν προς τον πυρήνα, παράγοντας τελικά ένα μικρό, πυκνό, ψυχρό άστρο, που ονομάζεται λευκός νάνος. Ο ήλιος θα έχει έπειτα σχεδόν την ίδια

ακτίνα με τη Γη, αλλά αυτό θα είναι περισσότερο πυκνό και με περισσότερη μάζα από τη Γη. Ο ήλιος θα γίνει λευκό νάνο αστέρι περίπου σε 8 δισεκατομμύρια έτη από τώρα. Αφότου γίνει λευκός νάνος, τότε θα ψύχεται αργά-αργά για δισεκατομμύρια έτη. Τελικά όταν θα γίνει πάρα πολύ ψυχρός δεν θα εκπέμπει πλέον φως.

1.1.1 Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Ο ήλιος έχει διάφορα στρώματα, το πιο εσωτερικό του είναι ο πυρήνας, που είναι περίπου 400.000 χλμ σε διάμετρο και περιέχει περίπου το 60% της μάζας του ήλιου και λιγότερο από το 2% τον όγκο του. Εδώ πραγματοποιείται η πυρηνική τήξη, η θερμοκρασία φθάνει τους 15.000.000 βαθμούς Kelvin, η πίεση 250 δισεκατομμύρια ατμόσφαιρες και η πυκνότητα του είναι 150 φορές

μεγαλύτερη του νερού. Στο παρακάτω (σχήμα 2.3) διακρίνονται κάποιες περιοχές πιο λαμπρές - λευκές σχεδόν - από τον περίγυρο τους, που λέγονται πυρσοί και παρουσιάζουν μαγνητικές δραστηριότητες. Επίσης, συναντούμε ένα ακανόνιστο πεδίο από κόκκους με διάρκεια ζωής μερικών μόνο λεπτών. Η διάμετρος τους φτάνει τα 1.000 χιλιόμετρα και αποτελούν τις κορυφές ανοδικών ρευμάτων υπερθερμασμένων αερίων, που μοιάζουν με φουσαλίδες ατμού σε νερό που βράζει. Ορισμένες φορές τα μεγαλύτερα ενεργειακά ρεύματα δημιουργούν την υπερκοκκίαση, σχηματισμούς που έχουν διαμέτρους 35.000 χιλιομέτρων ή και την γιγαντιαία κοκκίωση που καλύπτει όλη την επιφάνεια του ήλιου.



Σχήμα 1.3: Εικόνα του ήλιου με κάποιες περιοχές πιο λαμπρές που λέγονται πυρσοί και παρουσιάζουν μαγνητικές δραστηριότητες

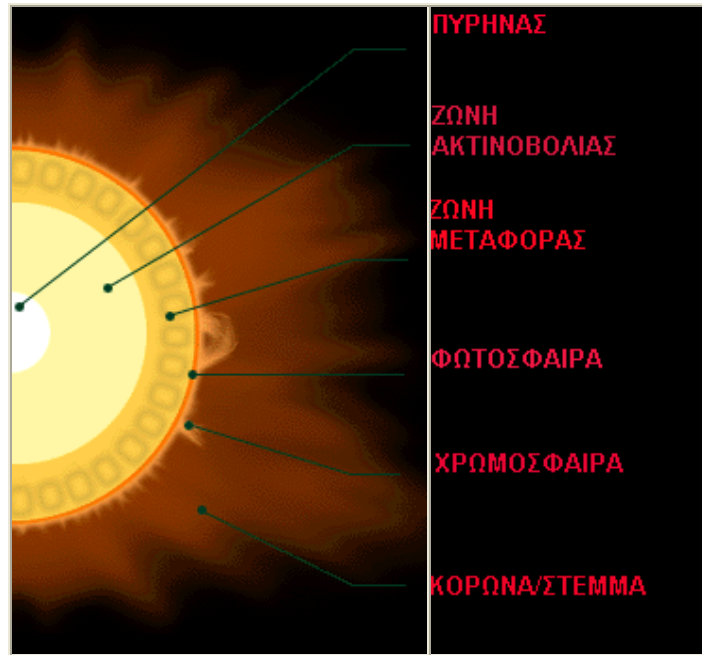
Το επόμενο στρώμα από τον πυρήνα, είναι η ζώνη της ακτινοβολίας. Ένας σφαιρικός φλοιός με πάχος το 40% της ηλιακής ακτίνας και η θερμοκρασία της είναι περίπου 2 έως 8.000.000 K. Είναι ένα στρώμα μέσω του οποίου η ενέργεια του πυρήνα, με τη μορφή ακτινοβολίας, μεταφέρεται μέσα από διαδοχικές απορροφήσεις και εκπομπές των φωτονίων με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τα ιόντα της ζώνης ακτινοβολίας. Τα φωτόνια αφού συνέχεια συγκρούονται φτάνουν με τυχαίο τρόπο μέχρι την επιφάνεια. Οι επιστήμονες θεωρούν ότι χρειάζονται, αυτά τα φωτόνια, περίπου 20 εκατομμύρια έτη για να ταξιδέψουν αυτήν την απόσταση. Στο επόμενο στρώμα που είναι το μεταφοράς, το πάχος φθάνει στο 15% της ακτίνας του ήλιου και επικρατούν θερμοκρασίες της τάξεως των 2.000.000 K. Είναι εκεί όπου οι πυρήνες του υδρογόνου και τα βαρύτερα στοιχεία συνδυάζονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια για να σχηματίσουν τα ουδέτερα άτομα ή ιόντα. Η παρουσία των οποίων είναι σε θέση να απορροφήσουν τα φωτόνια. Η μεταφορά πλέον της ενέργειας προς τα εξωτερικά στρώματα, γίνεται κυρίως με ανοδικά ρεύματα ύλης ενώ στο τέλος της ζώνης μεταφοράς πάλι έχουμε εκπομπές και απορροφήσεις φωτονίων. Στον ήλιο, νομίζουμε ότι αυτό το στρώμα είναι αρμόδιο για το σχηματισμό των μαγνητικών πεδίων, και έτσι αυτό έχει επιπτώσεις στη χρωμόσφαιρα και στη δραστηριότητα της κορώνας, αλλά οι λεπτομέρειες είναι ακόμα αβέβαιες. Τα εξωτερικά στρώματα του Ήλιου υφίστανται διαφορική περιστροφή: στον Ισημερινό η επιφάνεια κάνει μια περιστροφή κάθε 25.4 ημέρες. Πλησίον των πόλων είναι 36 ημέρες. Αυτή η παράξενη συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι ο Ήλιος δεν είναι στερεός

σαν τη Γη. Παρόμοια φαινόμενα συναντούμε και στους αεριώδεις πλανήτες. Η διαφορική περιστροφή φτάνει μέχρι το εσωτερικό του Ήλιου, αλλά ο πυρήνας του στρέφεται σαν να είναι στερεό σώμα.

Η δομή της ατμόσφαιρας του ήλιου μας είναι γνωστή. Πρώτα συναντάμε στο εσωτερικό της, την φωτόσφαιρα, αυτό το φωτεινό επιφανειακό στρώμα που βρίσκεται μεταξύ της αδιαφανούς ζώνης μεταφοράς και της χρωμόσφαιρας. Αυτό το λαμπρό ορατό στρώμα, έχει μέσο πάχος μόνο 2.000 χιλιόμετρα και από το οποίο η περισσότερη ενέργεια ακτινοβολείται στο διάστημα. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της φωτόσφαιρας είναι η κοκκώδης υφή, που καλείται φωτοσφαιρική κοκκίαση. Το φαινόμενο οφείλεται σε ανοδικά ρεύματα θερμών αερίων. Η θερμοκρασία της φωτόσφαιρας είναι περίπου 6.000 βαθμοί K στο βαθύτερο σημείο της και 4.000 βαθμοί K κοντά στην επιφάνεια. Από τις ηλιακές κηλίδες είμαστε σε θέση να ανιχνεύσουμε πόσο γρήγορα ο ήλιος περιστρέφεται. Κατά ένα ενδιαφέροντα τρόπο περιστρέφεται γρηγορότερα στον ισημερινό και πιο αργά στους πόλους, το γιατί κανένας δεν ξέρει. Έχει προταθεί εν τούτοις, ότι η διαφορική περιστροφή οφείλεται στη γρήγορη περιστροφή του πυρήνα του ήλιου. Την χρωμόσφαιρα την βλέπουμε με λαμπρό κόκκινο χρώμα σε περιόδους έκλειψης ηλίου και ανυψώνεται επάνω από τη φωτόσφαιρα μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα. Η θερμοκρασία της είναι μεταξύ 4.000 βαθμών K (στην περιοχή που βρίσκεται πλησιέστερα στη φωτόσφαιρα) έως 50.000 βαθμούς K. Η έντονη άνοδος στη θερμοκρασία οφείλεται στην πυκνότητα του υλικού που μειώνεται εκθετικά με το ύψος. Στο παρακάτω (σχήμα 2.4) βλέπουμε τα νήματα, τις τεράστιες προεξοχές που μοιάζουν με χείμαρρους υπερθερμασμένων αερίων, που εκτοξεύονται με τεράστιες ταχύτητες σε αποστάσεις εκατομμυρίων χιλιομέτρων στο διάστημα.



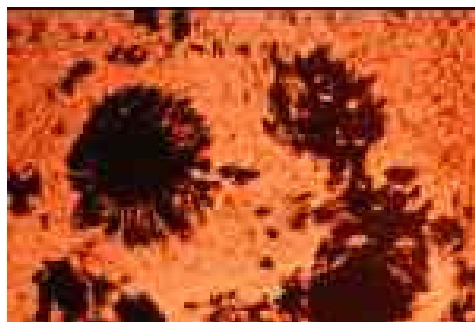
Σχήμα 1.4: Εικόνα του ήλιου με τα νήματα, τεράστιες προεξοχές που μοιάζουν με χείμαρρους υπερθερμασμένων αερίων



Σχήμα 1.5: Εικόνα με τη δομή του ήλιου

1.1.2 ΟΙ ΚΗΛΙΔΕΣ

Στην επιφάνεια του ήλιου - όπου ανεβαίνει αργά αργά υλικό από τον πυρήνα - με ειδικά φίλτρα μπορούμε να διακρίνουμε ένα ακανόνιστο πεδίο από κόκκους που διαρκούν λίγα λεπτά ή μερικές ώρες (σχήμα 2.6). Οι τελευταίες είναι ένα από τα φαινόμενα της ηλιακής δραστηριότητας: είναι οι γνωστές ηλιακές κηλίδες - σκοτεινές περιοχές πάνω στον ηλιακό δίσκο που φαίνονται έτσι μόνο αν συγκριθούν με το περιβάλλον τους - με θερμοκρασίες μικρότερες του περιβάλλοντος τους (μόνο 3.800 βαθμούς Κέλβιν ή τη μισή θερμοκρασία από τη τριγύρω τους περιοχή). Είναι πολύ μεγάλες - έκτασης 50.000 χιλιομέτρων και μοιάζουν με μαύρα σημάδια στο πρόσωπο του ήλιου. Σε κάθε ηλιακή κηλίδα διακρίνουμε τα εξής χαρακτηριστικά: 1) Τη σκιά: μαύρη κεντρική περιοχή. 2) Την παρασκιά: λιγότερο σκοτεινή ζώνη γύρω από τη σκιά. 3) Τα νήματα: διακρίνονται μέσα στην παρασκιά και έχουν κατεύθυνση ακτινική προς το κέντρο της σκιάς.



Σχήμα 1.6: Εικόνα του ήλιου με τις γνωστές ηλιακές κηλίδες

Οι κηλίδες εμφανίζονται σχεδόν πάντα σε ομάδες στην αρχή σαν μαύρες κουκίδες σε απόσταση 1.000χλμ μεταξύ τους η μια από την άλλη. Μετά απομακρύνονται και γρήγορα φτάνουν στο μέγιστο μέγεθός τους, στις περισσότερες περιπτώσεις διακρίνουμε σε κάθε ομάδα δυο κηλίδες που είναι σαφώς μεγαλύτερες από τις άλλες και βρίσκονται στο ίδιο περίπου ηλιακό πλάτος. Το μέγεθος μιας κηλίδας είναι περίπου 10.000χλμ ενώ το συνολικό μήκος μιας ομάδας στην οποία ανήκει είναι περίπου 100.000 χλμ..Ο χρόνος ζωής των κηλίδων είναι για τις πολύ μικρές μερικές μέρες ενώ για τις μεγαλύτερες κηλίδες ή ομάδες κηλίδων είναι μέχρι και 100 μέρες δηλαδή 4 ηλιακές περιστροφές. Στατιστικά πάντως το 95% του συνολικού αριθμού των ηλιακών κηλίδων έχει χρόνο ζωής μικρότερο από 11 μέρες. Οι κηλίδες συνήθως εμφανίζονται σε δυο ζώνες βόρεια και νότια από τον ηλιακό ισημερινό σε ηλιακό πλάτος ± 50 έως ± 350 . Η συχνότητα εμφάνισης και στα δυο ημισφαίρια είναι η ίδια. Ο αριθμός των κηλίδων και των ομάδων κηλίδων που εμφανίζονται μεταβάλλεται με τον χρόνο. Συγκεκριμένα η εμφάνιση των κηλίδων παρουσιάζει έναν 11ετή κύκλο δραστηριότητας δηλαδή ο αριθμός τους αυξάνεται και ελαττώνεται περιοδικά κάθε 11 χρόνια.

Το μαγνητικό πεδίο των κηλίδων είναι τεράστιο, χιλιάδες φορές ισχυρότερο του ήλιου (που έχει γενικά ασθενές μαγνητικό πεδίο). Το φαινόμενο αυτό των ηλιακών κηλίδων είναι περιοδικό, που κορυφώνεται και υποχωρεί κάθε 11 έτη. Την ανακάλυψη τους την οφείλουμε στον Γαλιλαίο το 1613. Επίσης, το μαγνητικό πεδίο μιας κηλίδας εξέρχεται από τη σκιά της και εισέρχεται στην επιφάνεια του ήλιου σε μια γειτονική κηλίδα αντίθετης πολικότητας . Για το λόγο αυτό η πολικότητα της προηγούμενης κηλίδας είναι συνήθως διαφορετική από της επόμενης. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι η πολικότητα των ηγούμενων κηλίδων στο βόριο ημισφαίριο είναι διαφορετική από αυτή στο νότιο ημισφαίριο. Η πολικότητα αυτή αντιστρέφεται κάθε 11 χρόνια περίπου με αποτέλεσμα ο κύκλος δραστηριότητας των ηλιακών κηλίδων να θεωρείται 22ετής πλέον και όχι 11ετής. Οι πρώτες κηλίδες ενός νέου κύκλου εμφανίζονται συνήθως σε μια πλατιά ζώνη που απέχει γύρω στις 400 από τον ηλιακό ισημερινό. Καθώς όμως ο κύκλος εξελίσσεται οι κηλίδες μετατοπίζονται προς τον ισημερινό και τελικά τον πλησιάζουν μετά από 11 περίπου χρόνια. Συγχρόνως τότε εμφανίζονται οι πρώτες κηλίδες του νέου κύκλου με αντίθετη πολικότητα. Οι επιστήμονες κατέγραψαν την κατανομή των κηλίδων κατά ηλιογραφικό πλάτος. Η κατανομή αυτή είναι γνωστή σαν διάγραμμα πεταλούδας. Η θεωρία που ερμηνεύει το διάγραμμα της πεταλούδας είναι αυτή του Babcock κι έχει ως εξής: Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται από την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων και τα χαρακτηριστικά τους προσδιορίζονται από τις τροχιές των φορτίων το μέγεθός τους και την ταχύτητα τους. Τα μαγνητικά πεδία του ήλιου δημιουργούνται στο οριακό στρώμα της ζώνης μεταφοράς με τη ζώνη ακτινοβολίας κάτω από τη φωτόσφαιρα. Ο ήλιος είναι ρευστός και η φωτόσφαιρά του δεν περιστρέφεται σαν ένα σώμα συγκεκριμένα στον ισημερινό η γωνιακή ταχύτητα είναι μεγαλύτερη. Αυτή η διαφορά περιστροφής συστρέφει τις μαγνητικές γραμμές των πεδίων που σε ορισμένες περιπτώσεις αναστρέφονται και δημιουργούν

κλειστούς βρόχους που βγαίνουν πάνω από την επιφάνεια. οι τοπικές ανωμαλίες εμποδίζουν την ελεύθερη κίνηση των ρευμάτων οπότε δεν ανεβαίνουν θερμά αέρια προς την επιφάνεια. αυτή η ανακοπή δημιουργεί σχετικά κρύες περιοχές στα σημεία όπου ο μαγνητικός βρόχος συναντά την επιφάνεια. για αυτό οι κηλίδες σχηματίζονται σε ζεύγη.

1.1.3 ΟΙ ΠΡΟΕΞΟΧΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΑΛΛΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Μια άλλη δραστηριότητα του ήλιου είναι το εντυπωσιακό φαινόμενο των προεξοχών. Οι προεξοχές είναι τεράστια νέφη ιονισμένου αερίου που εκτοξεύονται πάνω από την φωτόσφαιρα μέσα στο στέμμα. Το πιο βίαιο, όμως, είδος διαταραχών στον ήλιο είναι οι λευκές φωτοσφαιρικές εκλάμψεις που σχετίζονται με ισχυρά μαγνητικά πεδία και μπορούν να παρομοιαστούν με την έκρηξη δισεκατομμυρίων βομβών υδρογόνου. Τα πυρακτωμένα τους αέρια εκσφενδονίζονται σαν πύρινες γλώσσες που ξεδιπλώνονται και ορμούν στο διάστημα με τέτοια δύναμη, ώστε πολλές φορές αντί να ξαναπέσουν στον ήλιο χάνονται στο κενό. Οι χείμαρροι των υπερθερμασμένων αερίων εκσφενδονίζονται συνεχώς σε ύψη εκατοντάδων χιλιάδων χιλιομέτρων με τεράστιες ταχύτητες και μετακινούνται στην ηλιακή ατμόσφαιρα ακολουθώντας ορισμένες γραμμές μαγνητικών δυνάμεων, ενώ άλλοτε φαίνονται να υλοποιούνται από το τίποτε και να γκρεμίζονται καταστροφικά προς την επιφάνεια. Υπάρχουν επίσης οι στεμματικές συμπυκνώσεις και οι οπές. Είναι περιοχές του στέμματος με μεγάλη πυκνότητα και θερμοκρασία. Εκεί γίνεται έντονος ιονισμός των ατόμων και δημιουργία πλάσματος.

Η ηλιόσφαιρα είναι η απέραντη μαγνητική φουσαλίδα που περιέχει το ηλιακό σύστημα, τον ηλιακό άνεμο, και ολόκληρο το ηλιακό μαγνητικό πεδίο. Υπερβαίνει την τροχιά του Πλούτωνα. Ενώ η πυκνότητα των σωματιδίων στην ηλιόσφαιρα είναι πολύ χαμηλή (στην πραγματικότητα ο χώρος αυτός έχει πολύ καλύτερο κενό από ότι δημιουργείται σε ένα εργαστήριο), είναι γεμάτο σωματίδια που ενδιαφέρουν τους ηλιοσφαιρικούς επιστήμονες. Ο ηλιακός άνεμος κοντά στην επιφάνεια του ήλιου μας περιέχει εναλλασσόμενα ρεύματα υψηλής και χαμηλής ταχύτητας. Αυτά τα ρεύματα στρέφονται μαζί με τον ήλιο. Τα ρεύματα μεγάλης ταχύτητας δημιουργούνται στις στεφανιαίες οπές και επεκτείνονται προς τους ηλιακούς πόλους. Τα πιο αργά ρεύματα προέρχονται από κοντά του ισημερινού του ήλιου. Υπάρχουν συνθετικές διαφορές μεταξύ των υψηλής ταχύτητας και χαμηλής ταχύτητας ρευμάτων του ηλιακού ανέμου. Η ηλιόπαυση είναι το όνομα για το ασαφές όριο μεταξύ της ηλιόσφαιρας και του διαστρικού ανέμου έξω από το ηλιακό σύστημα. Καθώς ο ηλιακός άνεμος πλησιάζει την ηλιόπαυση, επιβραδύνεται ξαφνικά, διαμορφώνοντας ένα κρουστικό κύμα λήξης. Αυτό το κρουστικό κύμα λήξης του ηλιακού ανέμου επιταχύνει πολύ καλά τα σωματίδια. Μια ηλιακή έκλαμψη είναι μια τεράστια έκρηξη στην ηλιακή ατμόσφαιρα. Έχει σαν αποτέλεσμα ξαφνικές μεγάλες επιταχύνσεις των σωματιδίων, θερμαίνοντας το πλάσμα σε δεκάδες εκατομμυρίων βαθμών, καθώς και την έκρηξη μεγάλων ποσών ηλιακής μάζας.

Οι εκλάμψεις θεωρούνται πως προκύπτουν από την απότομη απελευθέρωση της ενέργειας που αποθηκεύεται στα μαγνητικά πεδία στη ζώνη γύρω από τις ηλιακές κηλίδες. Υπάρχουν δύο τύποι εκλάμψεων: ωστικές εκλάμψεις και βαθμιαίες εκλάμψεις. Οι ωστικές εκλάμψεις επιταχύνουν συνήθως ηλεκτρόνια, με μερικά πρωτόνια. Αυτές διαρκούν πολλά λεπτά ή μερικές ώρες και η πλειοψηφία τους εμφανίζεται κοντά στον ηλιακό ισημερινό. Οι ωστικές εκλάμψεις εμφανίζονται με ένα ρυθμό περίπου 1000 ετησίως κατά τη διάρκεια του ηλιακού μεγίστου. Οι βαθμιαίες εκλάμψεις επιταχύνουν ηλεκτρόνια, πρωτόνια, και βαριά ιόντα κοντά στην ταχύτητα του φωτός, και τα γεγονότα αυτά τείνουν να κρατήσουν για μέρες. Εμφανίζονται κυρίως κοντά στους πόλους του ήλιου και συμβαίνουν περίπου 100 φορές ανά έτος. Αυτή η επιτάχυνση των σωματιδίων των ηλιακών εκλάμψεων σε εξαιρετικά υψηλές ενέργειες περιλαμβάνει όλα τα διάφορα στοιχεία στην ηλιακή ατμόσφαιρα. Έτσι διεγείρονται τα άτομα πολλών στοιχείων, όπως ο άνθρακας, το άζωτο, το οξυγόνο, το νέο, το μαγνήσιο, το πυρίτιο, και ο σίδηρος, σχηματίζοντας ιόντα των στοιχείων. Αυτά είναι οι ηλιακές κοσμικές ακτίνες, που ονομάζονται επίσης και ηλιακά ενεργητικά σωματίδια (SEP).

Πίνακας 1.1: Φυσικά μεγέθη και στοιχεία για την περιγραφή του ήλιου

Μάζα (kg)	1.9891×10^{30}
Διάμετρος (Km)	1.392×10^6
Μεσή πυκνότητα	1.42 kg/m^3
Περίοδος περιστροφής (ημέρες)	25.38 days
Μέση επιφανειακή θερμοκρασία (k)	5800 k
Μέγιστη επιφανειακή θερμοκρασία (k)	7500 k
Ελάχιστη επιφανειακή θερμοκρασία (k)	4700 κ
Φασματικός τύπος	G2 V
Φωτεινότητα (Watts)	3.83×10^{26}
Απόλυτο ορατό φώς	4.8

1.2 Η ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

1.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

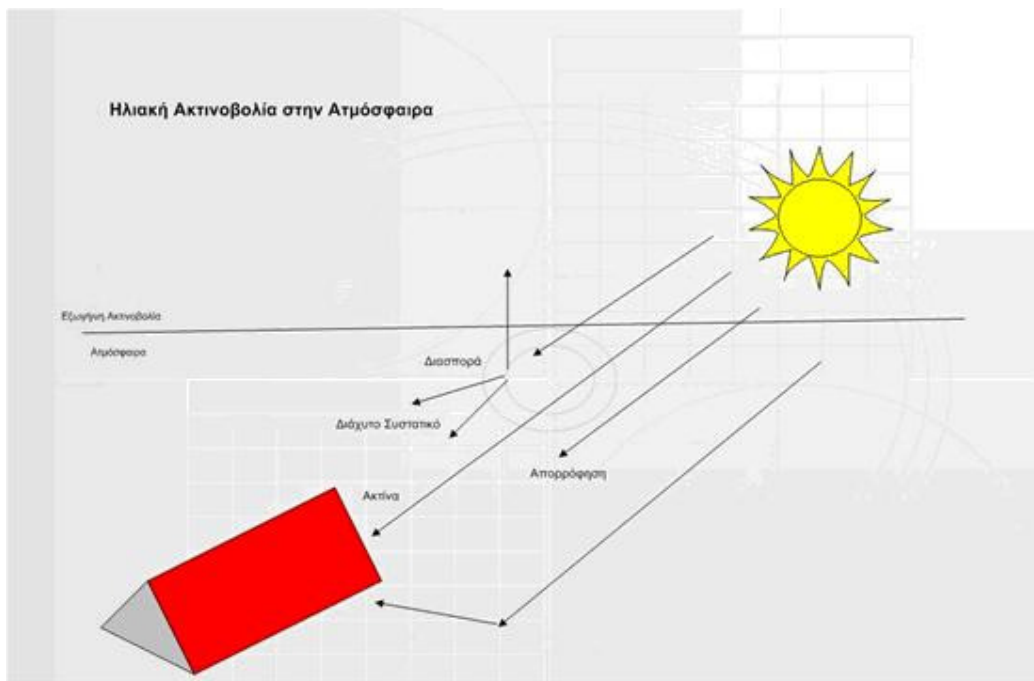
Η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται πάνω σ' έναν προσεκτικό υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Παρ' όλο που η ηλιακή ακτινοβολία έχει ήδη καταγραφεί σε διάφορες τοποθεσίες σε ολόκληρο τον κόσμο, πρέπει να αναλυθεί και να επεξεργαστεί πριν πραγματοποιηθεί ένας ακριβής υπολογισμός της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας για το φωτοβολταϊκό σύστημα που θα δημιουργηθεί.

1.2.2 Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ

Με μια καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μια τέλεια πηγή ακτινοβολίας σε μια θερμοκρασία κοντά στους 5.800 K. Η προσπίπτουσα ροή ενέργειας πάνω σε μια μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα είναι γνωστή ως η ηλιακή σταθερά:

$$S=1376 \text{ W/τ.μ.}$$

Γενικότερα, η ολική ισχύς από μια πηγή ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στη μονάδα επιφάνειας ονομάζεται **ένταση ακτινοβολίας**. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα ένα μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας αναιρείται λόγω της σκέδασης ή της απορρόφησης από τα μόρια του αέρα, τα σύννεφα και το υλικό που συνήθως αναφέρεται ως aerosols.

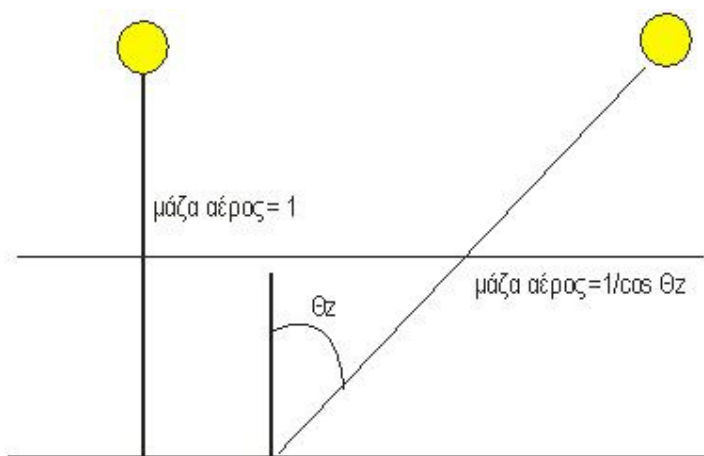


Σχήμα 1.7: Ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα

Η ακτινοβολία, η οποία δεν ανακλάται ή διασκορπίζεται και προσεγγίζει την επιφάνεια της γης άμεσα σε ευθεία γραμμή από τον ηλιακό δίσκο, ονομάζεται άμεση ή ακτινοβολία δέσμης. Η διασκορπισμένη ακτινοβολία η οποία προσεγγίζει το έδαφος ονομάζεται διαχεόμενη ακτινοβολία. Κάποια από τις ακτινοβολίες αυτές ίσως προσεγγίσει ένα δέκτη μετά την ανάκλασή της στο έδαφος, οπότε και ονομάζεται ανακλώμενη ισχύς από το έδαφος. Η ολική ακτινοβολία η οποία αποτελείται από αυτά τα τρία στοιχεία ονομάζεται σφαιρική.

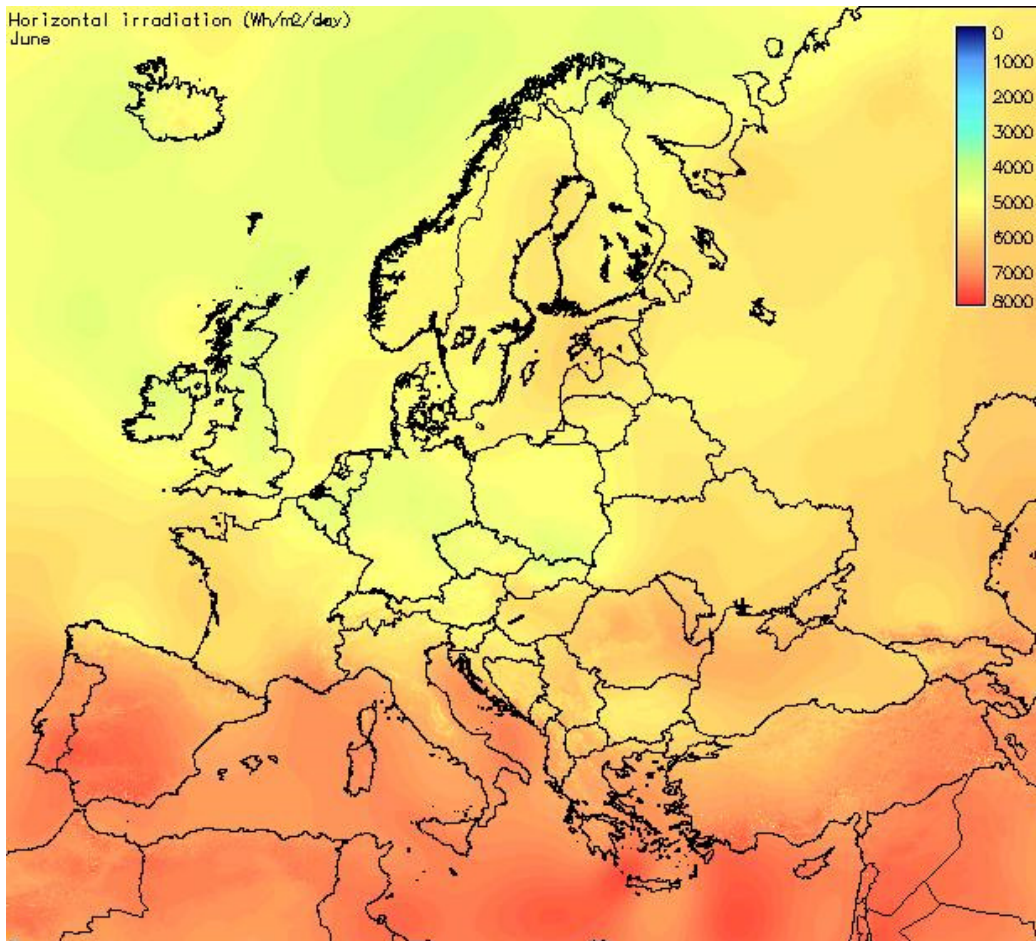
Η ποσότητα της ακτινοβολίας η οποία φτάνει στο έδαφος είναι φυσικά άκρως μεταβλητή. Επιπλέον πέρα από την όποια κανονική ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της φαινόμενης κίνησης του ήλιου, ακατάστατες μεταβολές (κάλυψη από σύννεφα) προκαλούνται από τις κλιματολογικές συνθήκες καθώς επίσης και τη γενικότερη σύνθεση της ατμόσφαιρας. Γι' αυτό το λόγο, η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος βασίζεται στη λήψη μετρούμενων δεδομένων που λαμβάνονται κοντά στην τοποθεσία της εγκατάστασης.

Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της καθαρής ατμόσφαιρας πάνω στο ηλιακό φως είναι η μάζα αέρος ίση προς το σχετικό μήκος της διαδρομής της απευθείας δέσμης διαμέσου της ατμόσφαιρας. Στη διάρκεια μιας ηλιόλουστης καλοκαιρινής ημέρας στο επίπεδο της θάλασσας, η ακτινοβολία από τον ήλιο, όταν βρίσκεται στο Ζενίθ, αντιστοιχεί σε μάζα αέρος 1 (συντεταγμένο σε AM 1).



Το εξωγήινο φάσμα δηλώνεται ως AMO, αυτό είναι σημαντικό για δορυφορικές εφαρμογές των ηλιακών ηλεκτρικών στοιχείων. Το AM1.5 είναι ένα τυπικό ηλιακό φάσμα πάνω στην επιφάνεια της γης σε μια καθαρή ημέρα, με ολική ένταση του 1 KW/m^2 , η οποία χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση των ηλιακών ηλεκτρικών στοιχείων και συστημάτων..

Μολονότι η ένταση μπορεί να φτάσει την τιμή του 1kW, η διαθέσιμη ένταση είναι συνήθως σημαντικά μικρότερη απ' αυτή της μέγιστης τιμής λόγω της περιστροφής της γης και των αντίξοων καιρικών συνθηκών. Η μέγιστη μέση ακτινοβολία σημειώνεται κοντά στο γεωγραφικό πλάτος των τροπικών του Καρκίνου και του Αιγόκερω, ενώ είναι μικρότερη στις περιοχές του ισημερινού λόγω της κάλυψης του από σύννεφα. Σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη η ηλιακή ακτινοβολία είναι φυσικά ασθενέστερη λόγω της μικρής ηλιακής ανύψωσης.



Σχήμα 1.8: Χάρτης με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

1.3 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στους θερμικούς αισθητήρες, των οποίων η ένδειξη οφείλεται στη θέρμανση της φωτιζόμενης (μαύρης) επιφάνειας, μιας πλάκας από ορισμένο υλικό και στους αισθητήρες ηλεκτρονικής διέγερσης, στους οποίους η μέτρηση οφείλεται στις ενεργειακές μεταβάσεις των ηλεκτρονίων του υλικού, κατά την απορρόφηση φωτονίων.

1) Θερμικοί ανιχνευτές (Thermal detectors)

Για μεγαλύτερη ευαισθησία των θερμικών αισθητήρων, φροντίζουμε η μάζα της πλάκας που απορροφά την ακτινοβολία να είναι μικρή, ώστε μικρά ποσά απορροφούμενης ενέργειας να προκαλούν μεγάλη μεταβολή στη θερμοκρασία της. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν α) το πυρανόμετρο, β) ο πυροηλεκτρικός κρύσταλλος και γ) τα βολόμετρα (μεταξύ των οποίων και το thermistor).

α) Πυρανόμετρο

Η αρχή λειτουργίας του (Σχήμα 1.9α), βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Η ακτινοβολία που προσπίπτει, στην ενεργό επιφάνεια (μαύρη), απορροφούμενη θερμαίνει την πλάκα αυτή. Έτσι, δημιουργείται διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ της εκτεθειμένης στο φως και μιας άλλης στο εσωτερικό, η οποία παραμένει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι μισές επαφές πολλών θερμοηλεκτρικών ζευγών (Thermocouples), συνδεδεμένων σε σειρά, είναι εντυπωμένες στην πάνω επιφάνεια, η οποία έχει υποστεί επεξεργασία αμαύρωσης, (π.χ. μαύρο βελούδου, velvet black) και οι άλλες μισές στην κάτω, η οποία αποτελεί σώμα θερμοκρασίας αναφοράς (αντιστάθμιση). Ο συνδυασμός πολλών (π.χ. 100) θερμοηλεκτρικών ζευγών, που φέρεται με το όνομα Thermopile, γίνεται με σκοπό η ολική τάση στα δύο ελεύθερα άκρα τους να είναι αρκετά μεγάλη (μερικά mV), ώστε να μετρείται με ένα βολτόμετρο. Η ενεργός επιφάνεια (μαύρη) περιβάλλεται από δύο ομόκεντρα κρυστάλλινα ημισφαιρία, για προστασία από την υγρασία και την ψύξη λόγω αέριων ρευμάτων.

β) Πυροηλεκτρικός κρύσταλλος

Η αρχή λειτουργίας του (Σχήμα 1.9δ) βασίζεται στην τροποποίηση της διπολικής ηλεκτρικής ροπής διηλεκτρικών υλικών, που ονομάζονται πυροηλεκτρικά (Πυροηλεκτρικό φαινόμενο). Η αύξηση της θερμοκρασίας του πυροηλεκτρικού υλικού οδηγεί σε εμφάνιση ηλεκτρίσης, δηλαδή, πόλωσης του υλικού λόγω θέρμανσης του. Χαρακτηρίζεται από σταθερή απόκριση (Ampere/Watt), σε ευρεία περιοχή μηκών κύματος, δηλαδή, απόκριση ανεξάρτητη του μήκους κύματος, λ κι αυτό τον καθιστά ιδανικό για καταγραφή φασμάτων, στην περιοχή ευαισθησίας του.

γ) Βολόμετρα ή αισθητήρες θερμοκρασίας με βάση την αντίσταση του υλικού

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός υλικού, με την θερμοκρασία του, λόγω απορρόφησης της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Για αυξημένη απόκριση του αισθητήρα, το υλικό του πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή απορροφητικότητα της ακτινοβολίας, σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων και μικρή θερμοχωρητικότητα. Κατασκευάζονται από ποικιλία υλικών, τόσο σε στοιχειακή (π.χ Si, Ge, Bi, Au) όσο και σε σύνθετη μορφή (Bi σε συνδυασμό με ίνες από νάυλον, Ge με προσμίξεις και ίνες νάυλον). Μια πολύ σημαντική κατηγορία βολομέτρων είναι τα μεταλλικά (π.χ. λευκοχρύσου ή πλατίνας Pt) και τα thermistors (ημιαγωγοί).

γ1) Thermistor

Είναι ένα βολόμετρο, του οποίου το βασικό υλικό αποτελείται από μεταλλικά οξειδία (οξειδία μαγνησίου, νικελίου, κοβαλτίου, χαλκού, σιδήρου και τιτανίου). Η χρήση τους περιορίζεται σε θερμοκρασίες κάτω των 300 °C, επειδή πάνω απ' τη θερμοκρασία αυτή μειώνεται η σταθερότητα της δομής τους. Μπορούν να κατασκευαστούν με διάφορες μορφές (με τη μορφή δίσκου, λεπτής φέτας, λεπιού, wafer, ράβδου) και σε μικρό μέγεθος, για καλή απόκριση στις μετρήσεις. Χαρακτηρίζονται από υψηλή διακριτική ικανότητα και δέκα (10) φορές πιο μεγάλη ευαισθησία από τα μεταλλικά βολόμετρα.

2) Αισθητήρες ηλεκτρονικής διέγερσης (Quantum detectors)

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται είτε στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή, την εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια ενός μετάλλου είτε στη διέγερση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, στην περίπτωση των ημιαγωγών.

α. Κατηγορία αισθητήρων που βασίζονται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Σ' αυτήν την κατηγορία ανήκουν : 1) Οι φωτοδιόδοι κενού ή φωτοκύτταρα. Αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια (άνοδο και κάθοδο), ενσωματωμένα σε μια διάταξη υψηλού κενού. Η κάθοδος, πάνω στην οποία προσπίπτει το φως, αποτελείται από υλικό χαμηλού έργου εξόδου των φωτοηλεκτρονίων. Η άνοδος βρίσκεται σε ορισμένο ηλεκτρικό δυναμικό σε σχέση με την κάθοδο, συλλέγοντας τα φωτοηλεκτρόνια. Η διάταξη χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μικρό χρόνο απόκρισης (Response time), μικρότερο των 10 ns. 2) Οι φωτοπολλαπλασιαστές. Στην περίπτωση ακτινοβολιών χαμηλής έντασης, χρησιμοποιούνται σύνθετες διατάξεις, που αποτελούνται από συνδυασμό πολλών φωτοδίοδων σε σειρά (κάθοδος - αντικάθοδοι - άνοδος). Η κάθοδος και οι αντικάθοδοι είναι επιχρισμένες από υλικό χαμηλού έργου εξόδου. Η κάθοδος, ειδικά διαμορφωμένη, αποτελεί το παράθυρο «εισόδου» της ακτινοβολίας, δημιουργώντας εσωτερικά, τα αρχικά ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια). Τα φωτοηλεκτρόνια επιταχυνόμενα προσπίπτουν στην πρώτη αντικάθοδο, παράγοντας το καθένα, ανάλογα με το υλικό και την εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση, μερικά δευτερογενή ηλεκτρόνια κ.ο.κ. Έτσι, στην άνοδο συλλέγεται μεγάλο πλήθος ηλεκτρονίων που αντιστοιχούν σ' ένα αρχικό φωτόνιο. Η διάταξη, δηλαδή, λειτουργεί ως αισθητήρας ακτινοβολίας χαμηλής εντάσεως, ενισχύοντας σταδιακά, το ασθενικό πρώτο ηλεκτρικό σήμα. Η ενίσχυση μπορεί να ξεπερνά τον παράγοντα 10^{10} (για κάθε φωτοηλεκτρόνιο).

β. Κατηγορία αισθητήρων που βασίζονται στη φωτοαγωγιμότητα του υλικού

Εδώ υπάγονται οι φωτοαγωγοί ή φωτοαντιστάσεις, οι φωτοδιόδοι και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. 1) Φωτοαγωγοί ή φωτοαντιστάσεις. Είναι ημιαγωγοί, ενδογενείς ή προσμειξεών, οι οποίοι εμφανίζουν έντονη φωτοαγωγιμότητα. Δηλαδή, η απορρόφηση φωτός στο ημιαγωγικό υλικό διεγείρει ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, αυξάνοντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ημιαγωγού. 2) Φωτοδιόδος ημιαγωγών. Είναι μια διόδος επαφής ημιαγωγών, που όταν φωτίζεται στο εσωτερικό της παράγονται επιπλέον ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής (Σχήμα 1.9β) τα οποία διαχωριζόμενα από το πεδίο επαφής

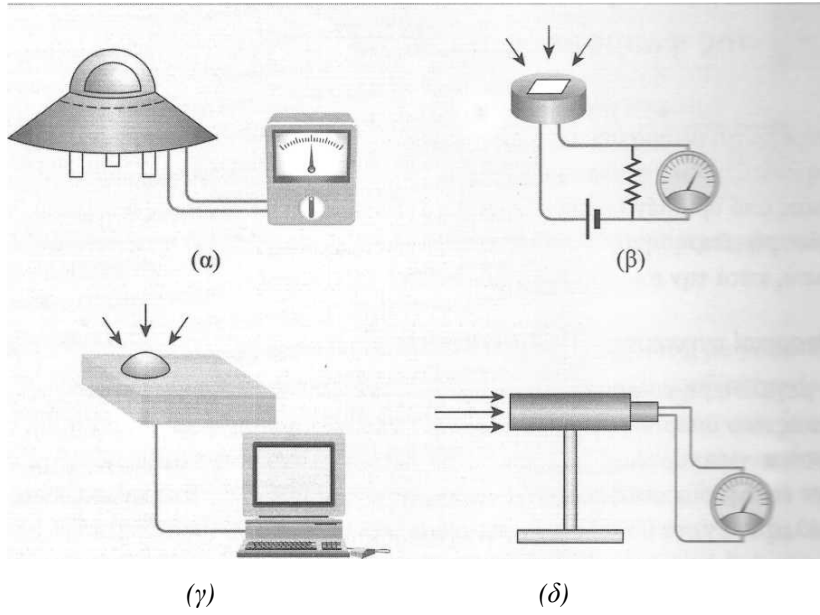
συμβάλλουν στη δημιουργία αυξημένου ηλεκτρικού ρεύματος, (στο κύκλωμα περιλαμβάνονται: η ηλεκτρική πηγή, η διόδος και μια αντίσταση). Η επιφάνεια τους είναι συνήθως πολύ μικρή, της τάξης του mm², ώστε να χαρακτηρίζονται από μικρή χωρητικότητα επαφής και άρα πολύ καλή χρονική απόκριση (Response time), της τάξης του 10⁻¹⁰s. Διακρίνονται σε διάφορους τύπους: σε φωτοδιόδους p-n, p-i-n, τύπου Schottky, χιονοστιβάδας και ετεροεπαφών. Για να λειτουργεί μια φωτοδίοδος, έτσι ώστε, το ρεύμα να είναι ανάλογο της ροής της ακτινοβολίας και ταυτόχρονα να χαρακτηρίζεται από μικρό χρόνο κίνησης φορέων (λειτουργία ταχείας απόκρισης), πολώνεται ανάστροφα. Αν δεν ενδιαφέρει η απαίτηση αυτή, η φωτοδίοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε λειτουργία φωτοβολταϊκού στοιχείου (Photovoltaic mode). 3) Φωτοβολταϊκή κυψελίδα ή φωτοβολταϊκό στοιχείο. (Η συντομογραφία ΦΒ αντιπροσωπεύει τη λέξη φωτοβολταϊκό-κά). Αποτελεί αντικείμενο αυτού του βιβλίου και θα αναφερθούμε σ' αυτό αναλυτικότερα, σε επόμενο κεφάλαιο. Εδώ επισημαίνουμε την διαφορετικότητα του με τη φωτοδίοδο. Αναφέρθηκε ότι η επιφάνεια της διόδου είναι πολύ μικρή. Αντίθετα, το ΦΒ στοιχείο χαρακτηρίζεται από όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια και ο λόγος είναι ότι προορίζεται για πηγή ηλεκτρικής ενέργειας κι όχι για αισθητήρα.

γ. Φασματογράφος

Διάταξη με την οποία αναλύεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μιας πηγής (ηλεκτρομαγνητικό φάσμα). Η ανάλυση βασίζεται στη χρήση είτε πρίσματος είτε οπτικών φραγμάτων (ανάκλασης ή διέλευσης).

δ. Φασματοραδιόμετρο -Φασματοφωτόμετρο

Είναι ένα φασματοσκόπιο εφοδιασμένο με μηχανισμούς κίνησης (Σχήμα 1.9γ), ώστε το φάσμα να σαρώνεται σ' όλο το λειτουργικό εύρος μηκών κύματος και να καταγράφεται σε ηλεκτρονική «μνήμη». Ο χρόνος καταγραφής του ηλιακού φάσματος είναι 1-2 min. Στο σημείο εισόδου του φασματογράφου τοποθετείται μια «σφαίρα ολοκλήρωσης», προκειμένου η προσπίπτουσα ακτινοβολία να καταγράφεται ανεξάρτητα από τη γωνία πρόσπτωσης.



Σχήμα 1.9: α) πυρανόμετρο β) φωτοдиодος γ) φασματοραδιόμετρο δ) πυροηλεκτρικός κρύσταλλος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

2.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (G_T)

Η G_T είναι η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο της Φ/Β συστοιχίας. Ολική ηλιακή ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνεται σε μία επιφάνεια. Τέλος πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας είναι ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια που ακτινοβολείται πέφτει σε μία επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Ο υπολογισμός της G_T βασίζεται στις μετρήσεις της πυκνότητας ισχύος της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας G που έχουν ληφθεί σε μια περιοχή, λαμβάνοντας όμως υπόψη και το γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η G_T δεν είναι ίση με την G, καθώς το επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας δεν ταυτίζεται συνήθως με το οριζόντιο επίπεδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της G_T με μια πολύπλοκη μεθοδολογία που λαμβάνει υπόψη:

1. Την τρισδιάστατη γεωμετρία που περιγράφει την κίνηση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας και λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό της ΦΒ συστοιχίας.
2. Την μεταβαλλόμενη ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ανώτατο σημείο της γήινης ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια του χρόνου.
3. Τον τρόπο μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της γήινης ατμόσφαιρας.

2.1.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

2.1.1.1 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΟΣ

Άξονας και πόλοι της Γης :

Η περιστροφική κίνηση της γης μοιάζει με την κίνηση που κάνει μια παιδική σβούρα. Γυρίζει δηλ. γύρω από ένα φανταστικό άξονα, που περνάει από το κέντρο της. Ο νοητός άξονας λέγεται άξονας της γης. Τα σημεία στα οποία ο άξονας τέμνει την επιφάνεια της γης λέγονται πόλοι της γης. Έτσι έχουμε το Β. Πόλο και το Ν. Πόλο.

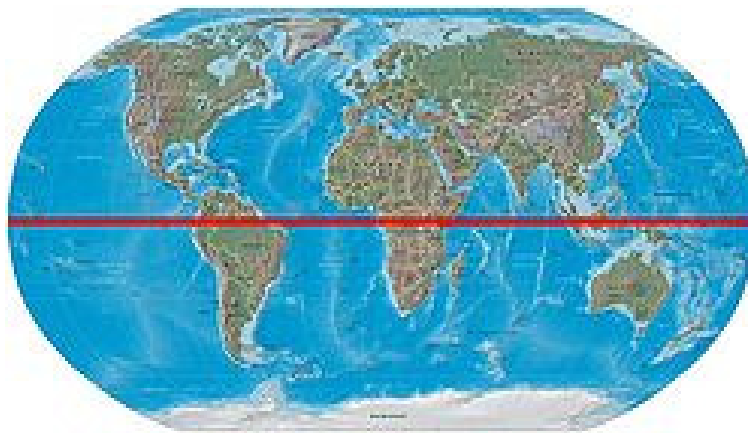
Ο Ισημερινός και οι Παράλληλοι :

Αν κόψουμε μια σφαίρα ακριβώς στη μέση και οριζόντια, θα έχουμε δυο ίσα τμήματα. Η τομή του θα είναι κύκλος και ο κύκλος αυτός θα είναι ο μεγαλύτερος απ' όλους. Ο κύκλος αυτός στη γη λέγεται Ισημερινός, γιατί οι τόποι απ' τους οποίους περνάει έχουν πάντοτε ίση μέρα και ίση νύχτα. Η γη έχει μόνο έναν Ισημερινό και τη χωρίζει σε δύο ημισφαίρια: το Β. ημισφαίριο και το Ν. Ημισφαίριο. Από τον Ισημερινό ως το Βόρειο πόλο μπορούμε να φέρουμε 90 κύκλους, που όσο πλησιάζουν τον πόλο μικραίνουν. Οι κύκλοι

αυτοί, επειδή είναι παράλληλοι προς τον Ισημερινό, λέγονται παράλληλοι κύκλοι και είναι αριθμημένοι από το 0 ως το 90. Το ίδιο μπορούμε να κάνουμε και για το Νότιο πόλο.

Από τους 180 παράλληλους κύκλους της γης, 4 είναι οι σπουδαιότεροι:

- Ο Βόρειος Τροπικός ή Τροπικός του Καρκίνου, που βρίσκεται στις 23°27' στα Β. του Ισημερινού.
- Ο Νότιος Τροπικός ή Τροπικός του Αιγόκερω, που βρίσκεται στις 23° 27' στα Ν. του Ισημερινού.
- Ο Βόρειος Πολικός, που βρίσκεται στις 66°33' στα Β. του Ισημερινού και
- Ο Νότιος Πολικός, που βρίσκεται στις 66°33' στα Ν. του Ισημερινού.



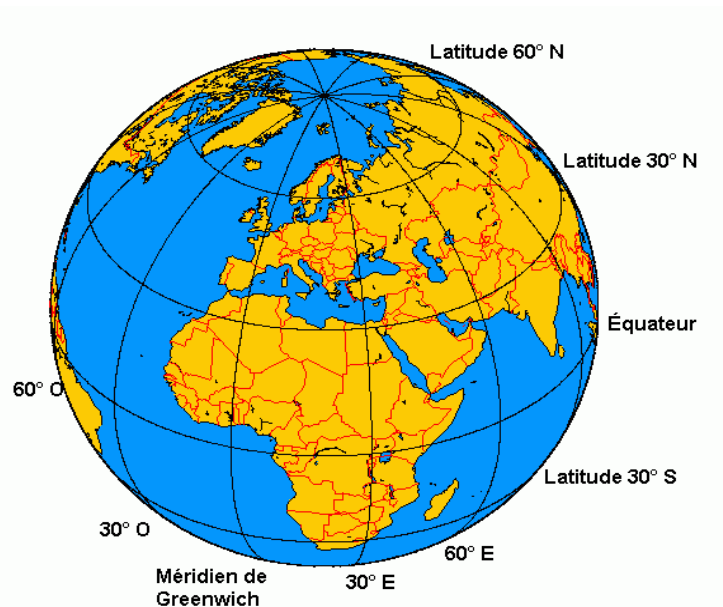
Σχήμα 2.1: Απεικόνιση του Ισημερινού της Γης

Γεωγραφικό πλάτος :

Εάν κόψουμε το σφαιροειδές της γης σε παράλληλες τομές ως προς το επίπεδο του Ισημερινού τότε οι κύκλοι όσο απομακρυνόμαστε από τον ισημερινό γίνονται όλο και μικρότεροι. Αν ορίσουμε πλάτος ίσο με μηδέν αυτό του ισημερινού και ανεβαίνουμε προς το βορρά τότε ο βόρειος πόλος θα έχει γεωγραφικό πλάτος 90° Βόρειο. Αντίθετα αν κατεβαίνουμε προς το Νότιο πόλο θα έχουμε νότια πλάτη μέχρι τις 90° Νότιο. Άρα γεωγραφικό πλάτος ενός τόπου είναι η απόσταση σε μοίρες (η 1 μοίρα έχει 60' και το 1' έχει 60'') του παράλληλου κύκλου που περνά από τον τόπο ως προς τον ισημερινό της γης (που είναι μέγιστος κύκλος με πλάτος 0°). Κάθε τόπος έχει το δικό του γεωγραφικό πλάτος και λέγεται βόρειο, αν ο τόπος είναι στο Β. Ημισφαίριο ή Νότιο, αν ο τόπος είναι στο Ν. Ημισφαίριο. Στους χάρτες το γεωγραφικό πλάτος σημειώνεται στα περιθώρια αριστερά και δεξιά με οριζόντιες ή καμπύλες γραμμές. Το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας είναι 37° 58' 27'' Β. ενώ της Θεσσαλονίκης είναι 40° 37' 48'' Β.

Μεσημβρινός :

Αν κόψουμε το σφαιροειδές στη μέση, όχι οριζόντια, αλλά κάθετα, θα έχουμε πάλι δυο ίσα τμήματα. Η τομή θα είναι κύκλος, ο κύκλος αυτός λέγεται μεσημβρινός, γιατί οι τόποι από τους οποίους περνάει έχουν την ίδια στιγμή μεσημβρία. Οι μεσημβρινοί είναι 360 και μια κι αρχίζουν από τους πόλους και είναι κάθετοι προς τον Ισημερινό είναι ίσοι μεταξύ τους. Αυτός που περνά από το αστεροσκοπείο Γκρήνουιτς (προάστιο του Λονδίνου) λέγεται πρώτος μεσημβρινός και χωρίζει τη γη σε δυο ημισφαίρια: το Ανατολικό και το δυτικό.



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση Μεσημβρινών της Γης

Γεωγραφικό μήκος :

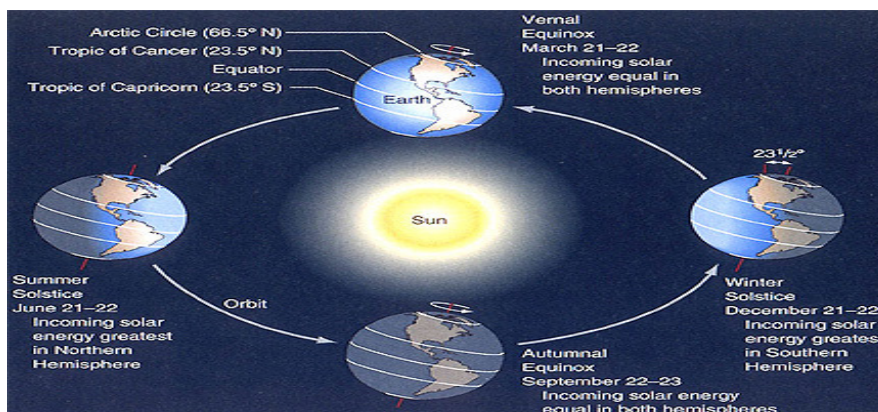
Η απόσταση ενός τόπου από τον πρώτο μεσημβρινό λέγεται γεωγραφικό μήκος και μετριέται με μοίρες. Κάθε τόπος έχει το δικό του γεωγραφικό μήκος και λέγεται Ανατολικό, αν ο τόπος είναι στο Α. ημισφαίριο ή Δυτικό αν ο τόπος είναι στο Δ. Ημισφαίριο. Η Αθήνα έχει γεωγραφικό μήκος $23^{\circ} 43' 48''$ Α, ενώ η Θεσσαλονίκη $22^{\circ} 58' 12''$ Α.

Γεωγραφικές συντεταγμένες :

Το γεωγραφικό πλάτος και το γεωγραφικό μήκος μας δίνουν με μεγάλη ακρίβεια τη θέση κάθε σημείου πάνω στη γη. Γι' αυτό λέγονται γεωγραφικές συντεταγμένες ή στίγμα ενός τόπου. Το στίγμα έχει μεγάλη σημασία για τα πλοία που ταξιδεύουν, τα αεροπλάνα που πετούν, τους οδοιπόρους κλπ.

2.1.1.2 ΗΛΙΑΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

Η ηλιακή απόκλιση όπως ξέρετε οφείλεται στο ότι ο άξονας της Γης έχει μια κλίση 23.5 μοιρών. Γι αυτό έχουμε τις εποχές. Όταν το βόρειο ημισφαίριο είναι πιο κοντά στον ήλιο, παίρνουμε το καλοκαίρι στο Βορρά. Έπειτα, έξι μήνες αργότερα, το βόρειο ημισφαίριο απομακρύνεται από τον ήλιο, και παίρνουμε το χειμώνα στο Βορρά (και το αντίθετο για το νότιο ημισφαίριο). Η απόκλιση είναι μια μέτρηση της γωνίας μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και του γήινου ισημερινού. Η απόκλιση του ήλιου αλλάζει κατά τη διάρκεια του έτους. Κατά τη διάρκεια της άνοιξης η απόκλιση του ήλιου είναι μηδέν. Έπειτα φθάνει στη μέγιστη απόκλιση 23.5° κατά τη διάρκεια του θερινού ηλιοστασίου και τελικά μειώνεται μέχρι -23.5° κατά την διάρκεια του χειμερινού ηλιοστασίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι χρονικά διαστήματα του Μάρτη και του Σεπτεμβρίου η ηλιακή ενέργεια που καταλήγει στη Γή είναι ίση και στα δύο ημισφαίρια. Κατά τη διάρκεια του θερινού ηλιοστασίου, μια περιοχή της γης βόρεια του αρκτικού κύκλου λαμβάνει 24 ώρες ημέρα. Αντίστοιχα η Ανταρκτική λαμβάνει 24 ώρες σκοτάδι.



Σχήμα 2.3: Απεικόνιση ηλιακής απόκλισης

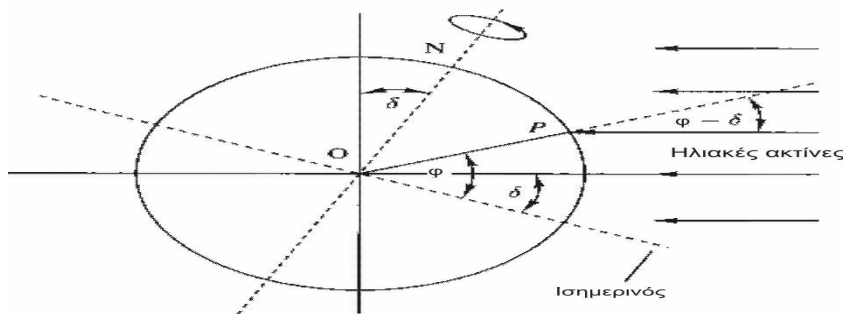
Υπολογισμός Ηλιακής απόκλισης :

Κατά τη διάρκεια ενός έτους, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης (δ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στη ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού. Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο. Οι ακραίες της τιμές είναι +23.45 μοίρες στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και -23,45 μοίρες στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι οι κυκλικές τροχιές που διαγράφονται βορειότερα στο ουρανό το καλοκαίρι, με νωρίτερη ανατολή και αργότερη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ το χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο.

Παράλληλα διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν σε διάφορες εποχές του έτους. Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σε ένα τόπο, είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια που δείχνει το μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα. Επίσης, ο αριθμός των ημερών με ηλιοφάνεια, στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα, καθώς και των ανήλιων ημερών, που ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα σε ολόκληρο το διάστημα της ημέρας.

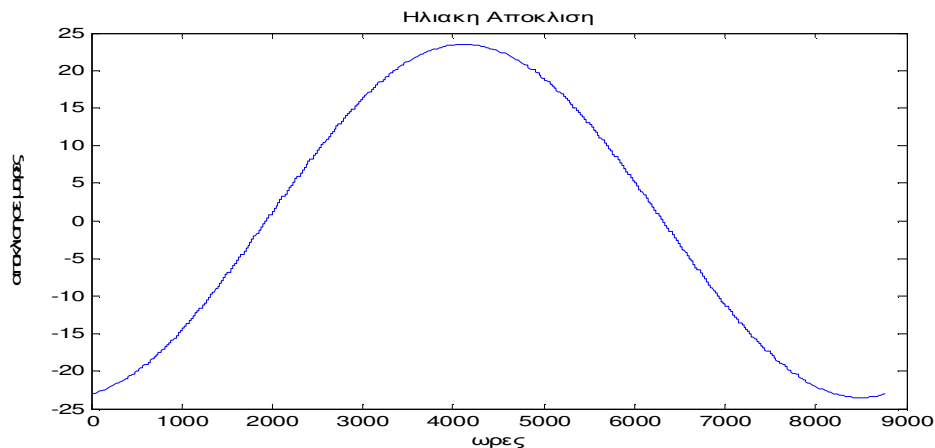
$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n_d)}{365}\right)$	2.1
---	-----

Όπου n_d είναι η μέρες του έτους.



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση υπολογισμού ηλιακής απόκλισης

Απο εξομοίωση του τύπου 2.1 στο Matlab προκύπτει :



Σχήμα 2.5: Γράφημα ηλιακής απόκλισης

Παρατηρείται ότι κατά το καλοκαίρι και το χειμώνα έχουμε μέγιστη ηλιακή απόκλιση. Επίσης το Σεπτέμβρη και το Μάρτη η ηλιακή απόκλιση μηδενίζεται.

2.1.1.3 ΗΛΙΑΚΗ ΩΡΑ ΚΑΙ ΩΡΟΛΟΓΙΑΚΗ ΩΡΑ

Για τους περισσότερους υπολογισμούς φωτοβολταϊκών συχνά ασχολούμαστε αποκλειστικά με την ηλιακή ώρα, όπου όλα μετρούνται σχετικά με το ηλιακό μεσημέρι (όταν ο ήλιος είναι στη γραμμή του γεωγραφικού μήκους). Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου χρειάζεται η τοπική ώρα, η οποία ονομάζεται ωρολογιακή ώρα. Υπάρχουν δύο διευθετήσεις που θα πρέπει να γίνουν προκειμένου να συνδεθεί η τοπική ωρολογιακή ώρα με την ηλιακή ώρα. Η πρώτη είναι η διευθέτηση του γεωγραφικού μήκους που έχει να κάνει με τον τρόπο με τον οποίο οι περιοχές του κόσμου διαιρούνται σε χρονικές ζώνες. Η δεύτερη διευθέτηση συνυπολογίζει τον ακανόνιστο τρόπο με τον οποίο η γη κινείται γύρω από τον ήλιο. Προφανώς, δεν είναι πρακτικό να βάζουμε τα ρολόγια μας να δείχνουν μεσημέρι όταν ο ήλιος είναι στη γραμμή του γεωγραφικού μας μήκους. Καθώς η γη περιστρέφεται 15 μοίρες την ώρα (4 λεπτά ανά μοίρα), για κάθε μία μοίρα διαφορά στο γεωγραφικό μήκος μεταξύ δύο τοποθεσιών, τα ρολόγια που δείχνουν την ηλιακή ώρα θα έπρεπε να διαφέρουν 4 λεπτά. Η μόνη ώρα που τα δύο ρολόγια θα έδειχναν την ίδια ώρα θα ήταν αν το ένα ήταν ακριβώς στο βορρά και το άλλο ακριβώς στο νότο. Για να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες που υπεισέρχονται λόγω του γεωγραφικού μήκους, η γη διαιρείται σε 24 χρονικές ζώνες της μίας ώρας, με κάθε χρονική ζώνη ιδεατά να εκτείνεται σε γεωγραφικό μήκος 15 μοίρες. Βέβαια, τα γεωπολιτικά όρια περιπλέκουν τα όρια μεταξύ δύο ζωνών. Κάθε χρονική ζώνη ορίζεται από ένα Μεσημβρινό Τοπικής Ώρας που τοποθετείται, ιδεατά, στο μέσο της ζώνης, με την αρχή αυτού του χρονικού συστήματος να περνά μέσω του Greenwich της Αγγλίας, σε γεωγραφικό μήκος 0 μοιρών. Οι μεσημβρινοί τοπικής ώρας για τις ΗΠΑ φαίνονται στον Πίνακα 2.1 .

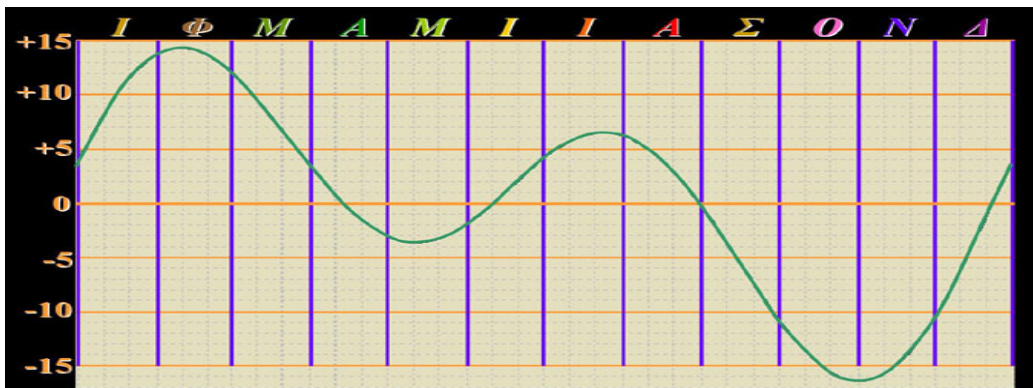
Πίνακας 2.1 : μεσημβρινοί τοπικής ώρας για τις ΗΠΑ

Χρονική Ζώνη	Μεσημβρινός τοπικής ώρας
Ανατολική	75°
Κεντρική	90°
Βουνά	105°
Ειρηνικός	120°
Ανατολική Αλάσκα	135°
Αλάσκα και Χαβάη	150°

Η διόρθωση του γεωγραφικού μήκους μεταξύ της τοπικής ώρας και της ηλιακής ώρας βασίζεται στο χρόνο που χρειάζεται ο ήλιος για να πάει από το μεσημβρινό τοπικής ώρας στο γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή. Αν είναι ηλιακό μεσημέρι στο μεσημβρινό τοπικής ώρας, θα είναι ηλιακό μεσημέρι 4 λεπτά αργότερα για κάθε μοίρα που ο παρατηρητής είναι δυτικά αυτού του μεσημβρινού. Για παράδειγμα, το San Francisco, με γεωγραφικό μήκος 122 μοίρες θα έχει ηλιακό μεσημέρι 8 λεπτά αργότερα από τη στιγμή που ο ήλιος

διασχίζει το μεσημβρινό τοπικής ώρας 12:00 της χρονικής ζώνης του Ειρηνικού. Η δεύτερη διευθέτηση μεταξύ της ηλιακής ώρας και της τοπικής ωρολογιακής ώρας είναι το αποτέλεσμα της ελλειπτικής τροχιάς της γης, η οποία προκαλεί το μήκος μίας ηλιακής μέρας (από το ένα ηλιακό μεσημέρι στο επόμενο ηλιακό μεσημέρι) να μεταβάλλεται στη διάρκεια του έτους. Καθώς η γη γυρίζει γύρω από την τροχιά της, η διαφορά μεταξύ μίας μέρας 24 ωρών και μίας ηλιακής μέρας μεταβάλλεται ακολουθώντας μια εξίσωση που είναι γνωστή ως η Εξίσωση της Ωρας:

$E_s = 3.82 \cdot (0.000075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \cdot \sin B - 0.014615 \cdot \cos 2B - 0.04089 \cdot \sin 2B)$	2.2
--	-----



Σχήμα 2.6: Γράφημα εξίσωση της ώρας

Η τιμή της παραμέτρου B υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση :

$B = \frac{360 \cdot (nd - 1)}{365}$	2.3
--------------------------------------	-----

Η ηλιακή ώρα t_s υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση :

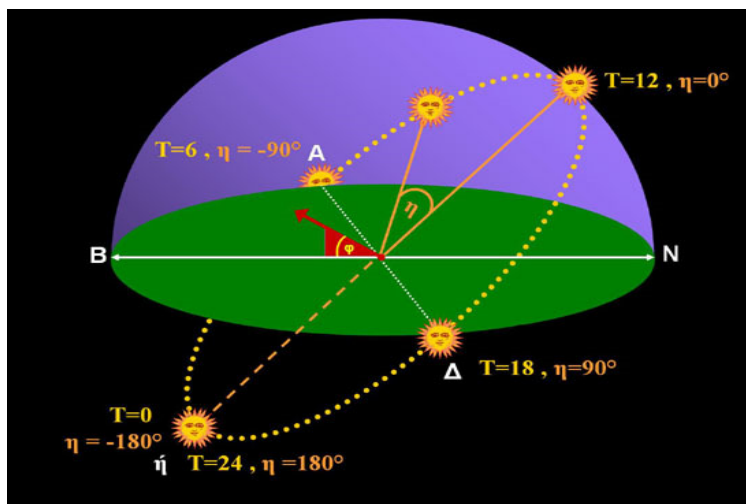
$t_s = t_c + \left(\frac{L_{loc} - L_{st}}{15} \right)$	2.4
--	-----

Όπου L_{loc} είναι το γεωγραφικό μήκος της τοποθεσίας εγκατάστασης και L_{st} είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού που ορίζει τη ζώνη ώρας της τοποθεσίας.

2.1.1.4 ΩΡΙΑΙΑ ΓΩΝΙΑ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ(ω)

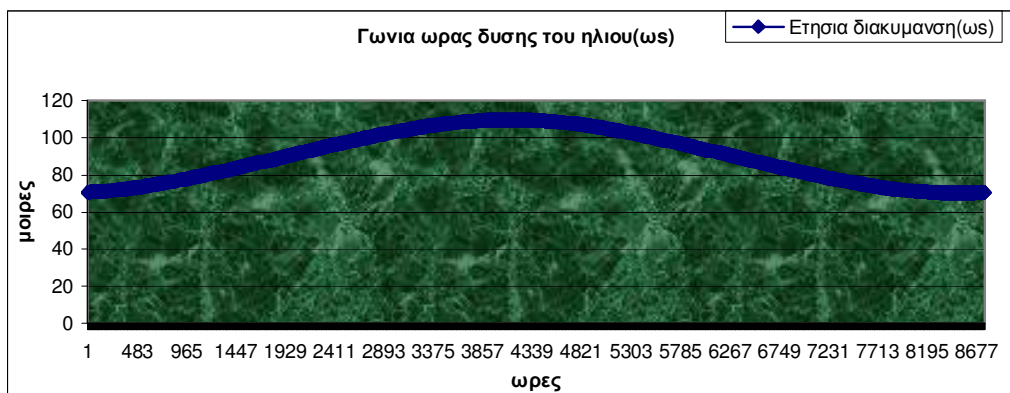
Η ηλιακή ώρα σχετίζεται με τη θέση του ήλιου στον ουρανό, η οποία περιγράφεται από τη γωνία ώρας (ω). Η γωνία ώρας έχει τιμή 0 στο ηλιακό μεσημέρι, αρνητική τιμή πριν το ηλιακό μεσημέρι και θετική τιμή μετά το ηλιακό μεσημέρι. Υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση, η οποία βασίζεται στο γεγονός ότι ο ήλιος μετακινείται στον ουρανό κατά 15 μοίρες σε μια ώρα.

$\omega = (t_s - 12) \cdot 15$	2.5
$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta)$	2.6



Σχήμα 2.7: Η ωριαία γωνία του Ήλιου

Παρατηρείται ότι η γωνία της ώρας δύσης του ήλιου μεταβάλλεται αισθητά ανά εποχή λόγω της ηλιακής απόκλισης. Επίσης η γωνία ώρας δύσης του ήλιου είναι μεγαλύτερη το καλοκαίρι με αποτέλεσμα η μέρα να διαρκεί περισσότερο σε σχέση με τις άλλες εποχές.

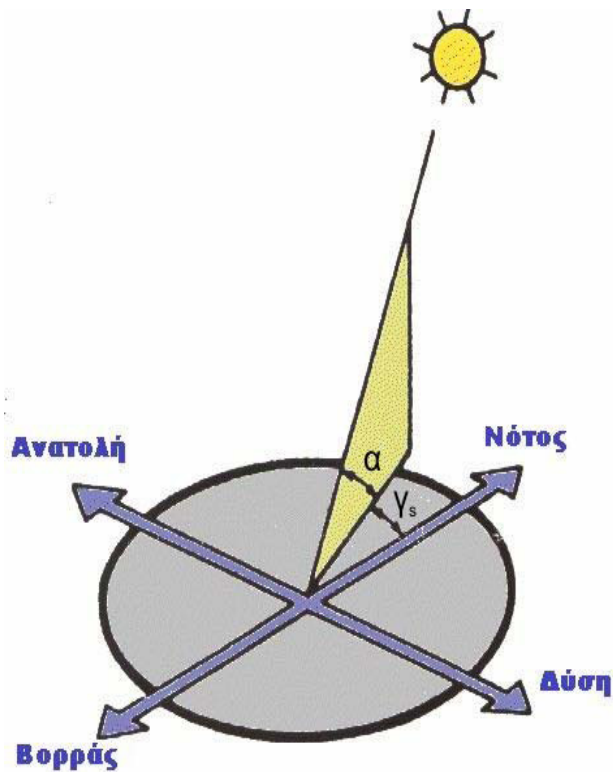


Σχήμα 2.8: Γράφημα ωριαίας γωνίας δύσης του ήλιου ανά μήνα

2.1.1.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες : το ύψος του ήλιου (α) και το αζιμούθιο του ήλιου (γ). Το ύψος του ήλιου (α) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στον ορίζοντα. Αζιμούθιο γ είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στη προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά - νότου. Ο όρος προέρχεται από την αραβική λέξη *as summut*, που σημαίνει κατεύθυνση. Προς τα δεξιά από τον νότο, το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές, και προς τα αριστερά αρνητικές τιμές. Κατά την διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό. Το αζιμούθιο είναι:

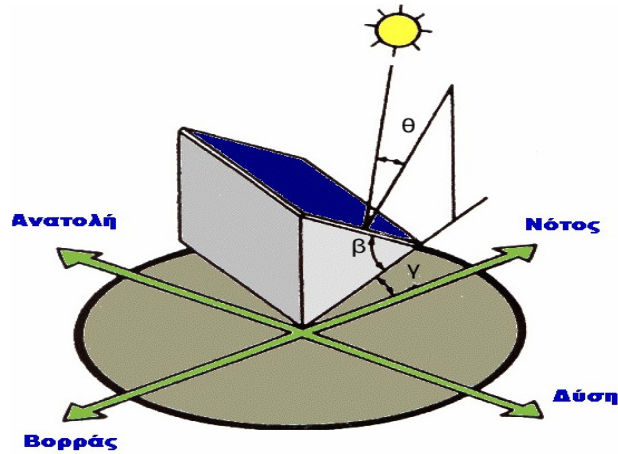
1. Για νότιο προσανατολισμό $\gamma=0$
2. Για γωνίες δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές.
3. Για γωνίες ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.



Σχήμα 2.9: Απεικόνιση γωνίας αζιμουθίου(γ_s) και γωνίας(α)

2.1.1.6 ΓΩΝΙΑ ΑΖΙΜΟΥΘΙΟΥ(γ) ΚΑΙ ΚΛΙΣΗ(β) ΣΥΛΛΕΚΤΗ

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως η θέση του ήλιου στον ουρανό, έτσι και ο προσανατολισμός ενός επιπέδου στην επιφάνεια της γης περιγράφεται από δύο γωνίες : την κλίση και την αζιμούθια γωνία. Η κλίση του συλλέκτη (β) είναι η διεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα και μπορεί να πάρει τιμές από 0 μέχρι 180 μοίρες. Για γωνίες $\beta > 90$ το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς τα κάτω. Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη (γ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από -180 μέχρι και +180 μοίρες. Η γωνία -180 (που συμπίπτει με την +180) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία -90 προς την ανατολή, η γωνία 0 προς το νότο και η γωνία +90 προς τη δύση. Στις συνηθισμένες περιπτώσεις οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, κατά τη διάρκεια του έτους. Οι επίπεδοι συλλέκτες χρησιμοποιούν την άμεση και τη διάχυτη ακτινοβολία και συνήθως τοποθετούνται υπό σταθερή κλίση και προσανατολισμό κατά τη διάρκεια του έτους. Η επιλογή του ευνοϊκού προσανατολισμού και της κλίσης του συλλέκτη είναι το σημαντικότερο μέτρο για τη βελτίωση του ηλιακού κέρδους. Η θέση του συλλέκτη (προσανατολισμός και κλίση) επηρεάζει την απόδοσή του κατά δύο τρόπους. Πρώτα επηρεάζει σημαντικά το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη. Ακόμα η θέση του συλλέκτη επηρεάζει τον συντελεστή διάβασης των διαφανών καλυμμάτων και τον συντελεστή απορρόφησης του απορροφητήρα, αφού οι δύο συντελεστές είναι συναρτήσεις της γωνίας, που η ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη. Γενικά η μεγαλύτερη ποσότητα της ηλιακής ενέργειας, λαμβάνεται σε μία Νότια προσανατολισμένη κλίση. Εάν η επιφάνεια του συλλέκτη δεν αντικρίζει ακριβώς το νότο, το ποσό της ωφέλιμης ενέργειας, μειώνεται ελαφρά σε μία γωνία 30 ανατολικά, δυτικά ή νότια. Η κλίση για συστήματα που λειτουργούν όλο το χρόνο είναι 45 μοίρες ενώ αντίθετα για συστήματα που λειτουργούν καλοκαιρινούς μήνες π.χ ξενοδοχεία η κλίση λαμβάνεται μικρότερη περίπου 25 μοίρες. Έτσι είναι δυνατόν να αξιολογηθεί ορθά η εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων (π.χ. ηλιακοί συλλέκτες) ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοσή τους.

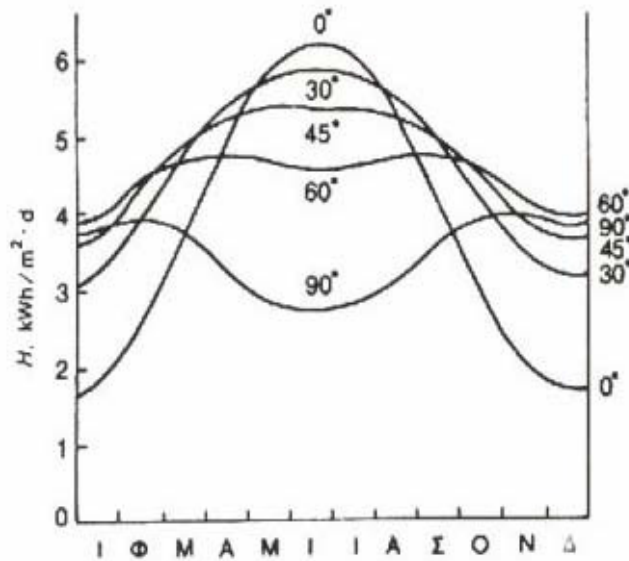


Σχήμα 2.10: Απεικόνιση γωνίας αζιμουθίου(γ) και κλίσης(β) συλλέκτη

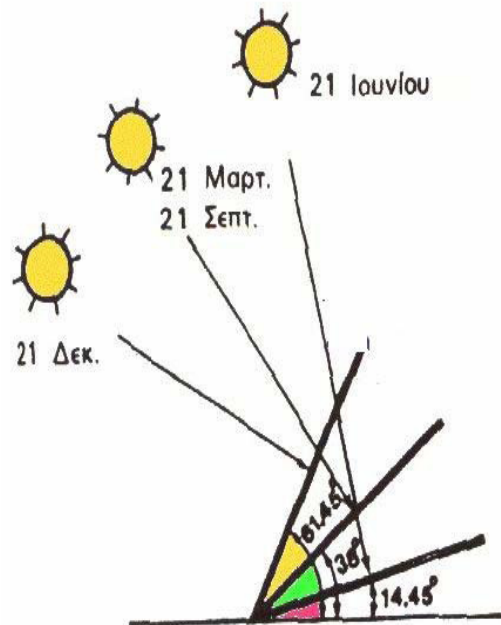
Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για τη διάρκεια του έτους, είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, και η αζιμούθια γωνία είναι 0 (προς το νότο). Λόγων όμως της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή (σχήμα 2.11). Έτσι, αν επιδιώκεται να παράγει το σύστημα όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια στη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται περίπου 10 ως 15 μοίρες μικρότερη από την παράλληλο του τόπου, ενώ για τον χειμώνα η κλίση επιλέγεται περίπου 10 ως 15 μοίρες μεγαλύτερη από την παράλληλο του τόπου. Στο (σχήμα 2.12) δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις χαρακτηριστικές ημερομηνίες του έτους. Συνοψίζοντας: 1) Η βέλτιστη γωνία κλίσης (β) θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (φ) ενώ 2) κατά την διάρκεια της θερινής περιόδου η βέλτιστη γωνία κλίσης (β) πρέπει να είναι περίπου 10-15 μοίρες μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (φ). 3) Τέλος κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου η βέλτιστη γωνία κλίσης (β) πρέπει να είναι περίπου 10-15 μοίρες μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (φ). Αν στο έδαφος υπάρχει επιφάνεια με μεγάλο συντελεστή ανάκλασης (π.χ. χιόνι) απαιτείται μεγαλύτερη κλίση. 4) Ο βέλτιστος προσανατολισμός αζιμούθιο (γ) είναι νότιος ($\gamma=0$), ενώ απόκλιση κατά 20-30 από νότο έχει μικρή επίδραση στην ετήσια συλλεγόμενη ενέργεια.

Επίσης πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι κατά τόπους μετεωρολογικές συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν την ολική διάχυτη και απευθείας ακτινοβολία καθώς και το albedo του εδάφους (ανακλαστικότητα του εδάφους). Για να προκύψει η βέλτιστη γωνία κλίσης πρέπει να καταγραφούν όλα αυτά τα μετεωρολογικά στοιχεία για αρκετά χρόνια και σε διαφορετικές γωνίες. Συνήθως όμως δεν είναι διαθέσιμες λόγω του μεγάλου κόστους των μετρήσεων, για το λόγο αυτό οι μετρήσεις γίνονται με έναν αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας (π.χ. πυρανόμετρο) σε οριζόντια θέση για το μέγιστο

χρονικό διάστημα. Μετά τη λήψη των μετρήσεων και κατάλληλη επεξεργασία προσδιορίζεται η βέλτιστη γωνία του συλλέκτη. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις για πλησιέστερη περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη το albedo του εδάφους.



Σχήμα 2.11: βέλτιστη κλίση συλλέκτη για κάθε εποχή



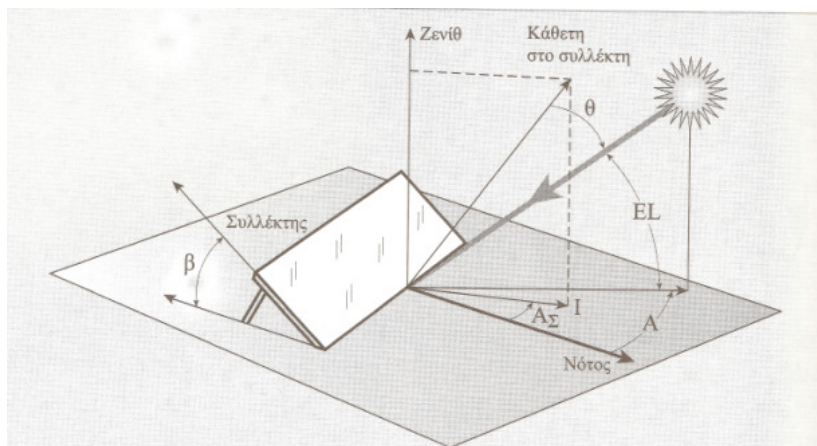
Σχήμα 2.12: βέλτιστη κλίση συλλέκτη

2.1.1.7 ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ(θ)

Η γωνία πρόσπτωσης θ μιας Φ/B συστοιχίας ορίζεται ως η γωνία μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στη Φ/B συστοιχία. Εάν είναι γνωστή η κλίση(β) και η γωνία αζιμουθίου(γ) μιας Φ/B συστοιχίας σε τοποθεσία γεωγραφικού πλάτους(φ) η γωνία πρόσπτωσης(θ) υπολογίζεται από την εξίσωση :

$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega$ $+ \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega$	2.7
--	-----

Προφανώς, η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω σε ένα επίπεδο συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς τη κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης (θ) είναι 0 μοίρες. Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έχουν κατασκευαστεί μηχανικές διατάξεις που επαναπροσανατολίζουν συνεχώς τον συλλέκτη (π.χ. με τη βοήθεια υπολογιστή ή φωτοκότταρων) ώστε η επιφάνεια του να αντικρίζει πάντα κάθετα τον ήλιο. Οι διατάξεις όμως αυτές είναι πολύπλοκες και δαπανηρές. Έτσι, η χρήση τους δικαιολογείται μόνον σε περιπτώσεις εφαρμογών, όπως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα.

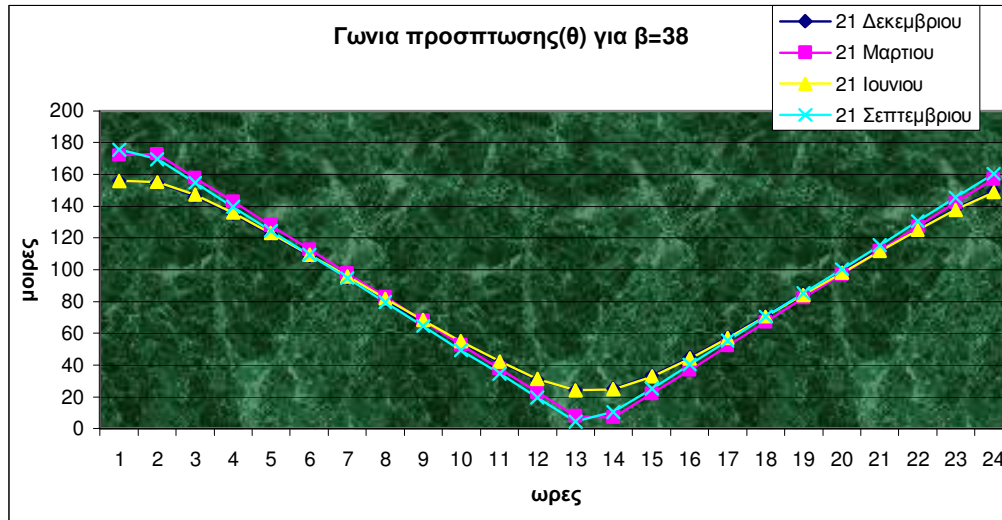


Σχήμα 2.13: Απεικόνιση γωνίας πρόσπτωσης θ

Απο εξομοίωση του τύπου 2.7 στο Matlab προκύπτει :

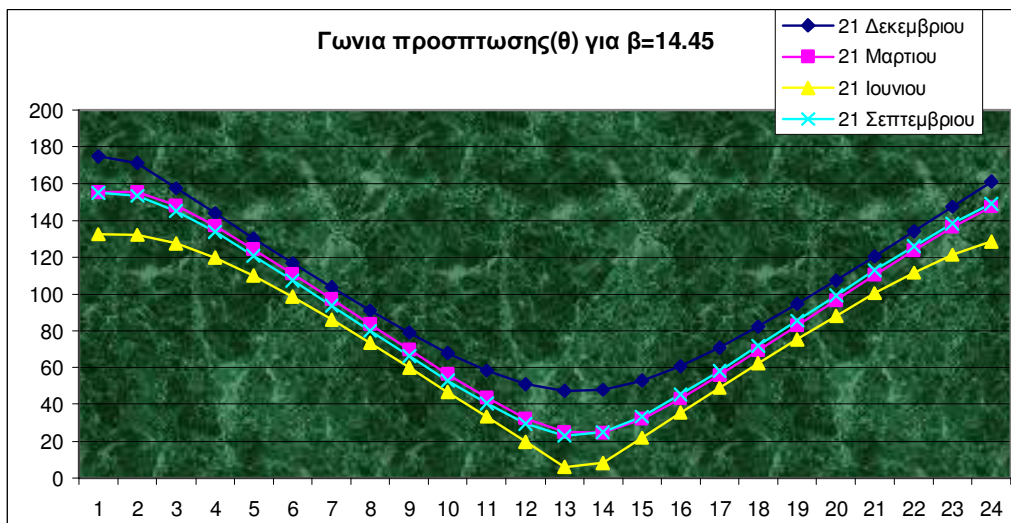
Παρατηρείται ότι για γωνία κλίσης(β)=38° η γωνία πρόσπτωσης(θ) τίνει στις 0° για τον μήνα του Μάρτη και Απρίλη με αποτέλεσμα η ηλιακή ακτινοβολία να κατευθύνεται κάθετα στον συλλέκτη. Παρατηρώντας το σχήμα(2.3) και (2.6) γίνεται κατανοητή η επίδραση της ηλιακής απόκλισης(δ) και της ηλιακής ώρας(T_s) πάνω στην γωνία πρόσπτωσης(θ). Η ηλιακή απόκλιση γίνεται

ιδιαίτερα κατανοητή τον Σεπτέμβρη και Μάρτη καθώς παίρνει τιμή $\delta=0$ και η ηλιακή ενέργεια που καταλήγει στη Γή είναι ίση και στα δύο ημισφαίρια. Από το (σχήμα 2.5) διακρίνεται ότι σε αυτούς τους δύο μήνες η γωνία πρόσπτωσης(θ) είναι ίση. Αξιοσημείωτο είναι ότι η γωνία πρόσπτωσης(θ) λαμβάνει ελάχιστη τιμή κατά την ηλιακή ώρα 12 σε όλους τους μήνες.



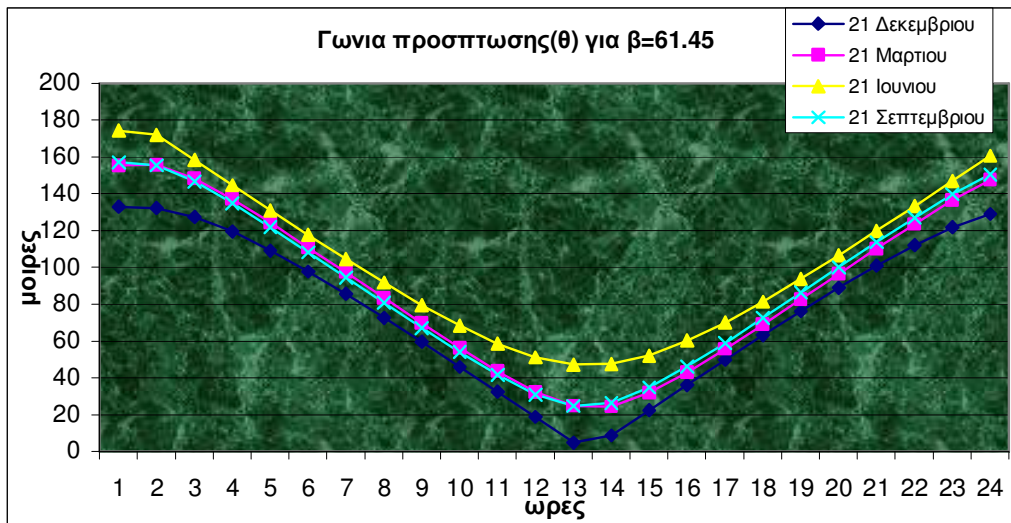
Σχήμα 2.14: Γράφημα γωνίας πρόσπτωσης(θ)

Παρατηρείται ότι για γωνία κλίσης(β)= 14.45° η γωνία πρόσπτωσης(θ) γίνεται 0° για τον μήνα του Ιουνίου με αποτέλεσμα η ηλιακή ακτινοβολία να κατευθύνεται κάθετα στον συλλέκτη.



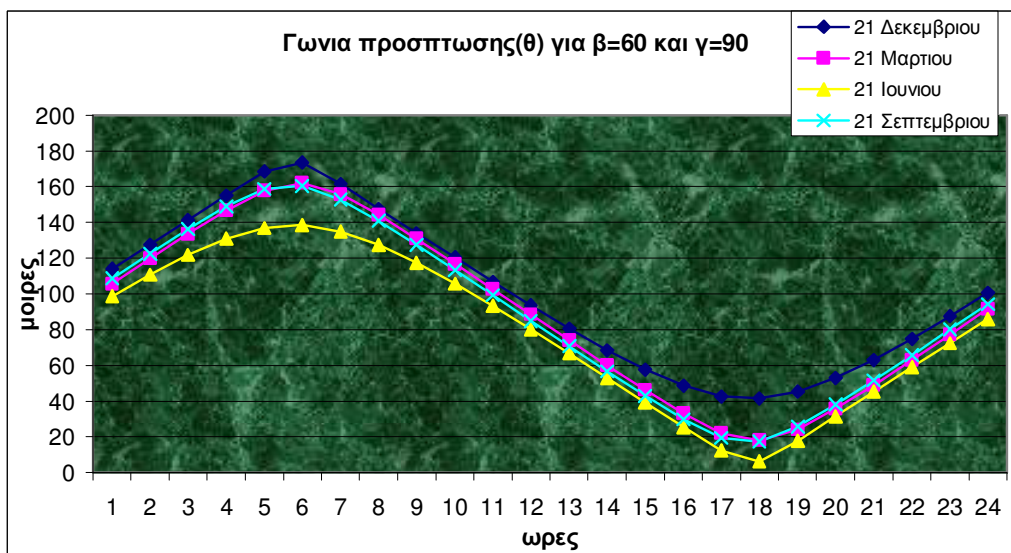
Σχήμα 2.15: Γράφημα γωνίας πρόσπτωσης(θ)

Παρατηρείται ότι για γωνία κλίσης(β)= 61.45° η γωνία πρόσπτωσης(θ) τίνει στις 0° για τον μήνα του Δεκέμβρη με αποτέλεσμα η ηλιακή ακτινοβολία να κατευθύνεται κάθετα στον συλλέκτη.



Σχήμα 2.16: Γράφημα γωνίας πρόσπτωσης(θ)

Παρατηρείται ότι για γωνία κλίσης(β)= 60° και γωνία αζιμουθίου του συλλέκτη (γ)= 90° (δηλαδή ο συλλέκτης να κοιτάει προς την δύση) επηρεάζουν άμεσα την γωνία πρόσπτωσης(θ).

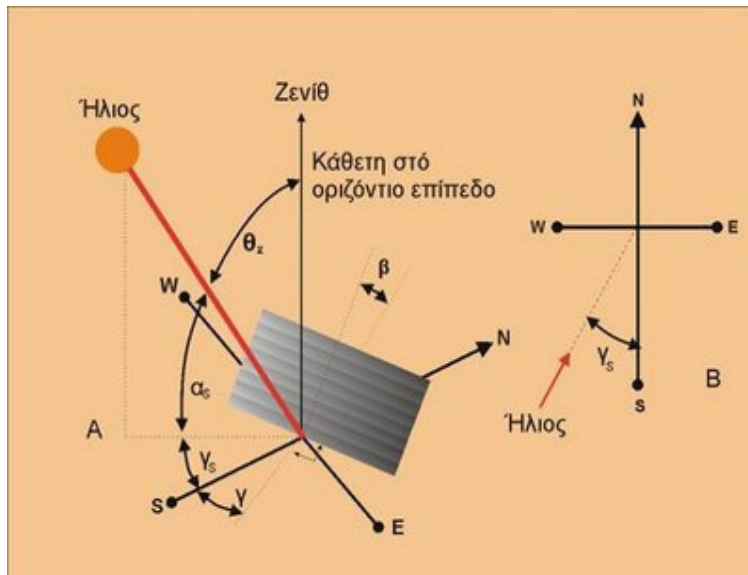


Σχήμα 2.17: Γράφημα γωνίας πρόσπτωσης(θ)

2.1.1.8 ΓΩΝΙΑ ΖΕΝΙΘ(Θz) ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

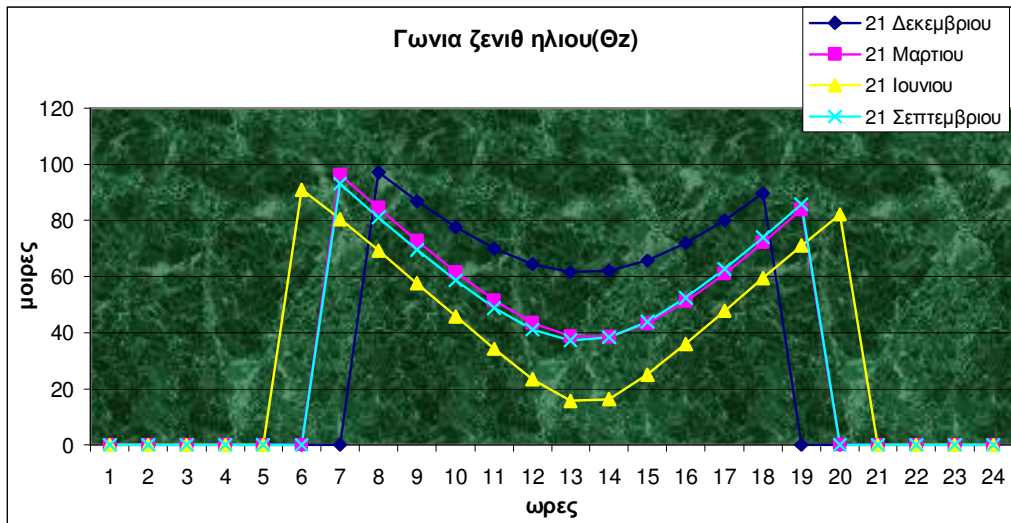
Η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση (ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου(Θz). Ζενίθ είναι το σημείο του ουρανού που συναντά η κατακόρυφος ενός τόπου, και ο όρος προέρχεται από την αραβική λέξη **Senit** που σημαίνει ευθεία οδός. Στο (σχήμα 2.18) απεικονίζονται οι γωνίες που χρειάζονται για να προσδιορισθεί η σχέση μεταξύ μιας επιφάνειας και της θέσης του ήλιου στον ουρανό. Η ηλιακή ενέργεια καθορίζεται από τη γωνιά ηλιακής ακτινοβολίας Θz ή γωνιά ζενίθ του ήλιου. Μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας και μιας επιφάνειας που σχηματίζει γωνιά Θz=0 και λαμβάνει τη μέγιστη ροή άμεσης ακτινοβολίας. Θέτοντας την κλίση(β) της Φ/Β συστοιχίας ίση με 0 μοίρες τότε η τιμή της Θz θα προκύψει από την εξίσωση 2.3 και θα είναι :

$\cos \theta_z = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta$	2.8
---	-----



Σχήμα 2.18: Απεικόνιση γωνίας(Θz)

Παρατηρείται ότι η ηλιακή απόκλιση(δ) επηρεάζει την γωνία ζενίθ του ήλιου(Θz) και τον Σεπτέμβριο και Μάρτη που η απόκλιση είναι 0 μοίρες η γωνία ζενίθ είναι ίση. Επίσης γίνεται κατανοητό ότι τον Ιούνιο η Θz παίρνει πολύ μικρότερες τιμές σε σχέση με το Δεκέμβριο. Επίσης το θερινό ηλιοστάσιο η Θz μεταβάλλεται νωρίτερα από ότι τους υπόλοιπους μήνες.



Σχήμα 2.19: Απεικόνιση γωνίας(Θz)

2.1.2 ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΕΚΤΟΣ ΓΗΙΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

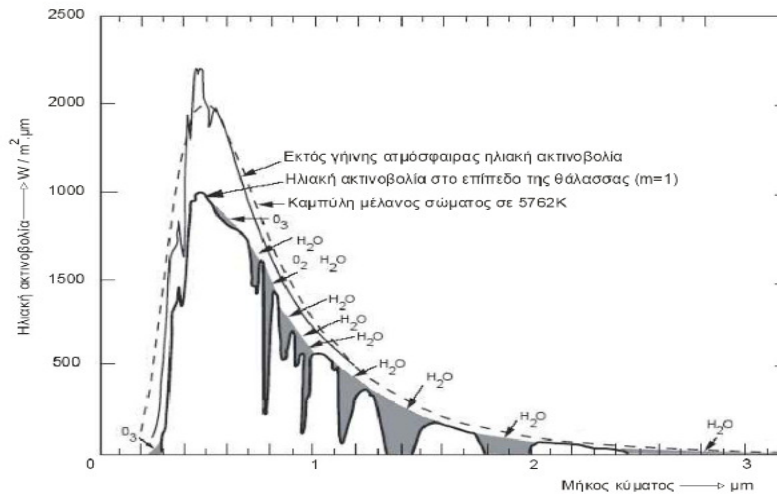
2.1.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΩΓΗΙΝΗΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

$G_{on} (kw/m^2)$

Η G_{on} αφορά τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ανώτατο σημείο της γήινης ατμόσφαιρας. Επειδή η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο είναι ελλειπτική, η εκτός γήινης ατμόσφαιρας ακτινοβολία σε επίπεδο κάθετο στις ηλιακές ακτίνες G_{on} , μεταβάλλεται στη διάρκεια του έτους αν και η ποσότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο ήλιος θεωρείται ότι παραμένει χρονικά σταθερή. Ο υπολογισμός της εξωγήινης κάθετης ακτινοβολίας $G_{on} (kw/m^2)$ που ορίζεται ως η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κάθετη στις ηλιακές ακτίνες, η οποία βρίσκεται στο ανώτατο σημείο της γήινης ατμόσφαιρας, γίνεται με την ακόλουθη σχέση:

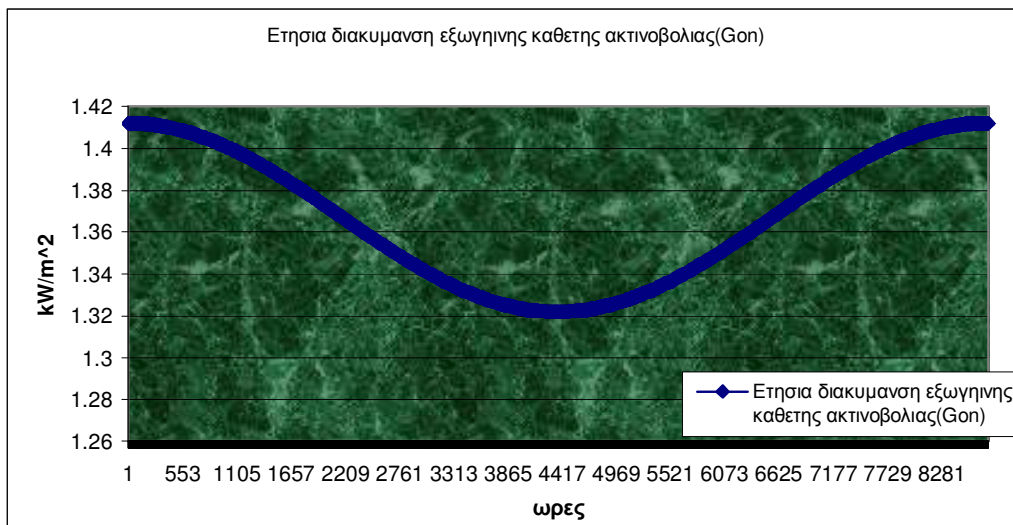
$G_{on} = G_{sc} \cdot (1 + 0.033 \cdot \cos(\frac{360 \cdot n_d}{365}))$	2.9
---	-----

Η φασματική κατανομή της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακής ακτινοβολίας μοιάζει αρκετά με εκείνη του μέλανος σώματος στην θερμοκρασία των 5762K, όπως φαίνεται στο (σχήμα 2.20) ενώ η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στο επίπεδο της θάλασσας είναι αρκετά μειωμένη.



Σχήμα 2.20: Φασματική κατανομή της εκτός γήινης ατμόσφαιρας, ηλιακής ακτινοβολίας

Παρατηρείται ότι τον Ιανουάριο η ισχύς της G_{on} έχει μέγιστη τιμή, παίρνει την ελάχιστη τιμή της τον Ιούνιο και γίνεται πάλι μέγιστη τον Δεκέμβριο.



Σχήμα 2.21: Ετήσια διακύμανση της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακής ακτινοβολίας

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει ανά μονάδα επιφάνειας και εκτός γήινης ατμόσφαιρας σε ένα επίπεδο που είναι κάθετο στις ηλιακές ακτίνες και βρίσκεται στη μέση απόσταση ήλιου - γης λέγεται ηλιακή σταθερά G_{sc} . Από πειραματικές μετρήσεις έχουν προταθεί διάφορες τιμές της ηλιακής σταθεράς. Μια τιμή που έχει προταθεί με αβεβαιότητα 1% είναι:

$G_{sc} = 1.367 \text{ kW} / \text{m}^2$	2.10
--	------

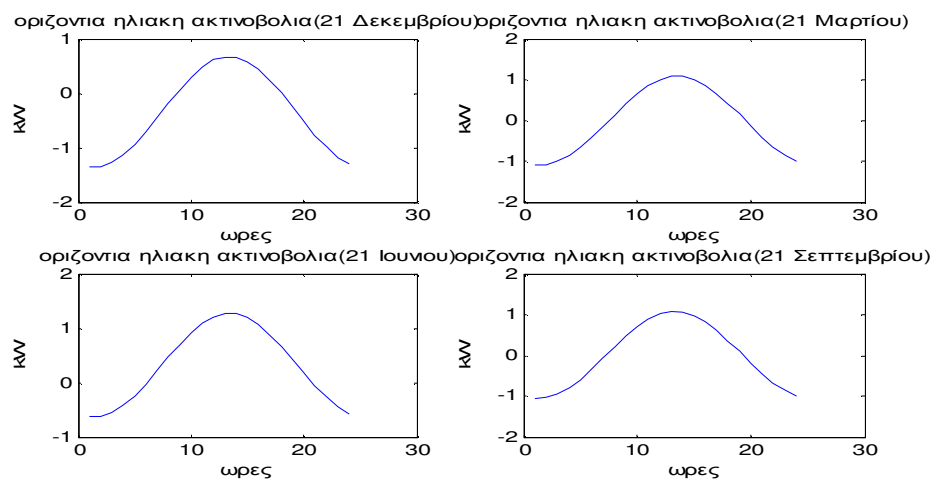
Στην περίπτωση του ηλιακού μας συστήματος, η ηλιακή σταθερά για τη γη, ορίζεται σε απόσταση 1 AU από τον ήλιο. Το 1970, προτάθηκε ως πρότυπη τιμή της ηλιακής σταθεράς, η $(1353 \pm 21) \text{ W/m}^2$. Μεταγενέστερες, περισσότερο ακριβείς, μετρήσεις από δορυφόρους έδωσαν, τιμές για την ηλιακή σταθερά, στην περιοχή $1363\text{-}1375 \text{ W/m}^2$. Η μέση τιμή τους, 1367 W/m^2 , χρησιμοποιείται πλέον διεθνώς, ως πρότυπη τιμή της ηλιακής σταθεράς για τη γη. Η μετρούμενη τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ γης και ήλιου, η οποία αλλάζει κατά τη διάρκεια του έτους, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Εξαρτάται επίσης, από την περιοδική εμφάνιση των ηλιακών κηλίδων (ενδεκαετής κύκλος) και από την περιστροφή του ήλιου γύρω απ' τον άξονα του, η οποία προκαλεί περιοδική απόκρυψη των κηλίδων. Η ηλιακή σταθερά αυξάνει καθώς αυξάνει η ηλικία του ηλιακού μας συστήματος. Έχει παρατηρηθεί ελάττωση της ακτίνας του ήλιου, που έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του.

2.1.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΩΓΗΙΝΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ G_o (kW/m^2)

Ο υπολογισμός της εξωγήινης οριζόντιας ακτινοβολίας G_o (σε kW/m^2), που ορίζεται ως η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια που βρίσκεται στο ανώτατο σημείο της γήινης ατμόσφαιρας, γίνεται με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$G_o = G_{om} \cdot \cos \theta_z = G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n_d}{365}\right)\right) \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta)$	2.11
---	------

Απο εξομοίωση του τύπου 2.11 στο Matlab προκύπτει :



Σχήμα 2.22: Γράφημα οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας

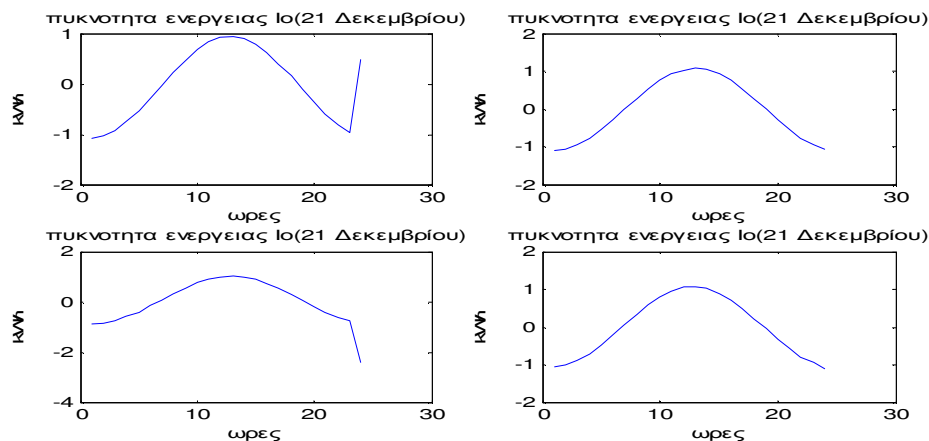
Παρατηρώντας την εξίσωση 2.11 και το γράφημα είναι εύκολο να διαπιστωθεί ότι η ηλιακή απόκλιση(δ) έχει άμεση επίδραση στις τιμές που λαμβάνει η εξωγήινη οριζόντια ακτινοβολίας G_o καθώς το γεωγραφικό πλάτος(φ) και η εξωγήινη κάθετη ακτινοβολία G_{on} παραμένουν σχεδόν αμετάβλητα. Επίσης ο Σεπτέμβρης και Ιούνιος που έχουν την ίδια ηλιακή απόκλιση τίνουν να έχουν και ίση εξωγήινη οριζόντια ακτινοβολίας G_o .

2.1.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΕΞΩΓΗΙΝΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ $I_o(kWh/m^2)$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση 2.11 για μια χρονική περίοδο μεταξύ των γωνιών ώρας ω_1 και ω_2 , που ορίζουν την αρχή και το τέλος της χρονικής περιόδου ($\omega_1 < \omega_2$), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας ενέργειας της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας $I_o(kwh/m^2)$ σε μια οριζόντια επιφάνεια στο ανώτατο σημείο της ατμόσφαιρας για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο:

$I_o = \frac{12}{\pi} \cdot G_{on} \cdot [\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{180} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta]$	2.12
---	------

Απο εξομοίωση του τύπου 2.12 στο Matlab



Σχήμα 2.23: Γράφημα πυκνότητας ενέργειας I_o

Παρατηρώντας την εξίσωση 2.12 και το γράφημα είναι εύκολο να διαπιστωθεί ότι η ηλιακή απόκλιση(δ) έχει άμεση επίδραση στις τιμές που λαμβάνει η πυκνότητα ενέργειας της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας $I_o(kwh/m^2)$. Το γεωγραφικό πλάτος(φ) και η εξωγήινη κάθετη ακτινοβολία G_{on} παραμένουν σχεδόν αμετάβλητα. Επίσης ο Σεπτέμβρης και Ιούνιος που έχουν την ίδια ηλιακή απόκλιση τίνουν να έχουν και ίση $I_o(kwh/m^2)$. Οι γωνίες του ήλου ω_1 και ω_2 διαφέρουν μεταξύ τους κατά 15 μοίρες και άρα μιας ηλιακής ώρας.

2.1.3 ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΕΝΤΟΣ ΓΗΙΝΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

2.1.3.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ I (kWh/m^2) ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΗΣ ΓΗΣ

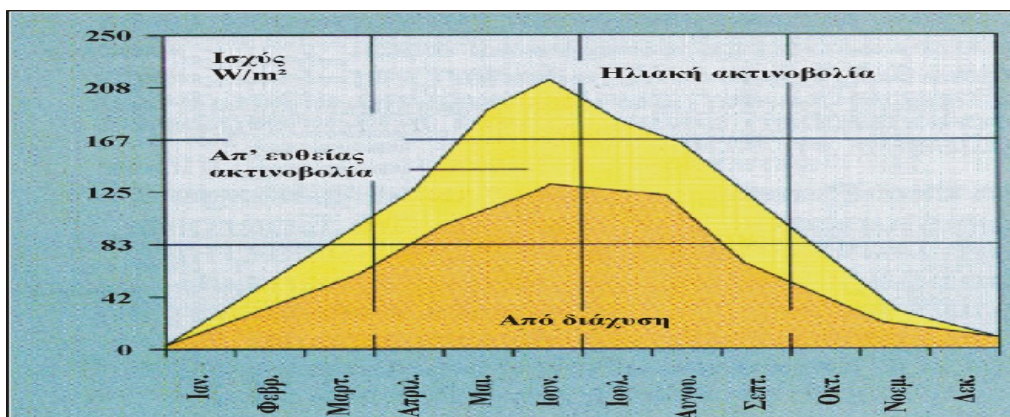
Θεωρώντας ότι οι μετρήσεις της πυκνότητας ισχύος της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας G γίνονται ανά σταθερά χρονικά διαστήματα διάρκειας Δt (σε h) και ότι η τιμή της G παραμένει σταθερή εντός του κάθε χρονικού διαστήματος η πυκνότητα ενέργειας της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας I δίνεται από τη σχέση:

$I = G \cdot \Delta t$	2.13
------------------------	------

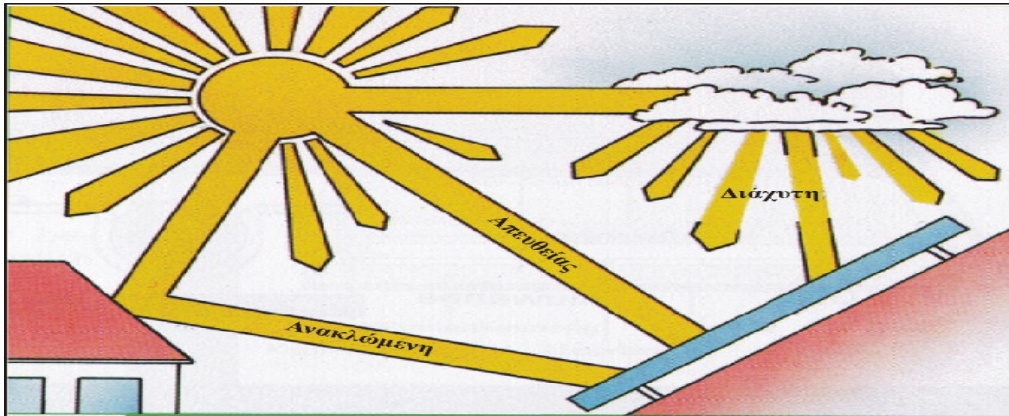
Η ποσότητα της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας I που φτάνει στην επιφάνεια της γης μπορεί να διαιρεθεί σε δύο συνιστώσες: την άμεση ακτινοβολία I_b και τη διάχυτη ακτινοβολία I_d . Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνεται χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης με αλλαγμένη διεύθυνση, αφού έχει υποστεί σκέδαση στην ατμόσφαιρα και ανάκλαση από το έδαφος. Επομένως η διάχυτη ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια της γης από όλο τον ουράνιο θόλο. Το άθροισμα της I_b και I_d μας δίνει την ολική ακτινοβολία I .

$I = I_b + I_d$	2.14
-----------------	------

Μετά τον προσδιορισμό της διάχυτης ακτινοβολίας I_d είναι εφικτός ο υπολογισμός της άμεσης ακτινοβολίας I_b .

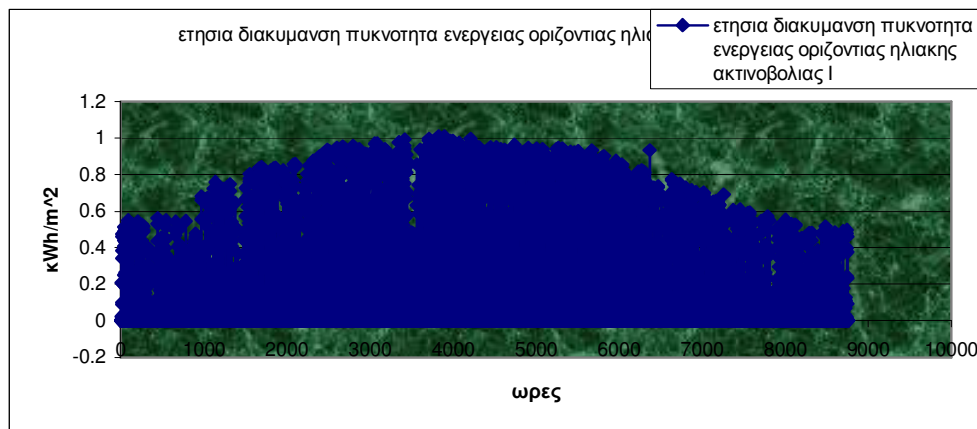


Σχήμα 2.24: Ανάλυση ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας



Σχήμα 2.25: Ανάλυση ηλιακής ακτινοβολίας

Παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου η τιμή της I (kWh/m^2) αυξάνεται ενώ τους υπόλοιπους μήνες παίρνει χαμηλότερες τιμές.



Σχήμα 2.26: Ετήσια διακύμανση της εκτός γήινης ατμόσφαιρας ηλιακής ακτινοβολίας

Οι μετρήσεις της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας I (kWh/m^2) λαμβάνονται στην επιφάνεια της γης. Απαιτείται λοιπόν ο υπολογισμός ενός δείκτη που προσδιορίζει το ποσό της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά διαπερνά την ατμόσφαιρα και φτάνει στην επιφάνεια της γης. Με άλλα λόγια οριαίος δείκτης αιθριότητας (K) καλείται ο λόγος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (I) προς την εκτός γήινης ατμόσφαιρας ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (I_0). Ο δείκτης αυτός μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα μέτρο της σχετικής διαπερατότητας της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία.

$K_T = \frac{I}{I_0}$	2.15
-----------------------	------

2.1.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΥΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η ανάλυση της ολικής ακτινοβολίας σε άμεση και διάχυτη πραγματοποιείται μέσω της συσχέτισης του Erbs που προσδιορίζει την διάχυτη ακτινοβολία I_d ως συνάρτηση του δείκτη αιθριότητας K_T :

$\frac{I_d}{I} = (1 - 0.09 \cdot K_T)$ για $K_T \leq 0.22$	2.16
$\frac{I_d}{I} = 0.9511 - 0.1604 \cdot K_T + 4.388 \cdot K_T^2 - 16.638 \cdot K_T^3 + 12.336 \cdot K_T^4$ για $0.22 < K_T \leq 0.80$	2.17
$\frac{I_d}{I} = 0.165$ για $K_T > 0.80$	2.18

Η άμεση ακτινοβολία υπολογίζεται από την εξίσωση $I_b = I - I_d$

2.1.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ I_T (kWh/m^2) ΣΕ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ

Για τον υπολογισμό της πυκνότητας ενέργειας της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας I_T (kWh/m^2) χρησιμοποιείται το μοντέλο ΗΚDR. Το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι η διάχυτη ακτινοβολία αποτελείται από τρεις συνιστώσες: μια ισότροπη συνιστώσα που προέρχεται από τον ορίζοντα.

Ο προσδιορισμός της πρώτης συνιστώσας γίνεται με τη βοήθεια του δείκτη R_b ο οποίος δίνει το λόγο της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια προς την άμεση ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια:

$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$	2.19
---	------

Η δεύτερη συνιστώσα του μοντέλου ΗΚDR περιγράφεται από το δείκτη ανισοτροπίας A_i , που είναι το μέτρο της ατμοσφαιρικής μετάδοσης της άμεσης ακτινοβολίας:

$A_i = \frac{I_b}{I_0}$	2.20
-------------------------	------

Η τρίτη συνιστώσα του μοντέλου ΗΚDR περιγράφεται από τον παράγοντα f , και βασίζεται στο γεγονός ότι περισσότερη ποσότητα διάχυτης ακτινοβολίας προέρχεται από τον οριζοντα παρά από το υπόλοιπο μέρος του ουράνιου θόλου. Η τιμή του παράγοντα f δίνεται από τη σχέση:

$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}}$	2.21
----------------------------	------

Η τελική εξίσωση του μοντέλου ΗΚDR είναι η ακόλουθη :

$I_T = (I_b + I_d \cdot A_i) \cdot R_b + I_d \cdot (1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \cdot [1 + f \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)] + I \cdot p_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$	2.22
--	------

Όπου p_g είναι η διάχυτη ανακλαστικότητα του εδάφους ή albedo.

Πίνακας 2.2: τιμές albedo για διάφορες κατηγορίες επιφανειών.

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής Ανάκλασης
Επιφάνεια νερού,Θάλασσα	0.05
Ασφαλτόστρωμα	0.07
Αγρός με σκοτεινόχρωμα χώμα	0.08
Πράσινος αγρός	0.15
Βραχώδη επιφάνεια	0.20
Επιφάνεια παλαιού τοιμέντου	0.24
Επιφάνεια νέου τοιμέντου	0.30
Χιόνι	0.60

Η τιμή της I_T (kWh / m^2) που προκύπτει και αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα διάρκειας Δt (σε h) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας G_T που προσπίπτει στο επίπεδο της Φ/β συστοιχίας :

$G_T = \frac{I_T}{\Delta t}$	2.23
------------------------------	------

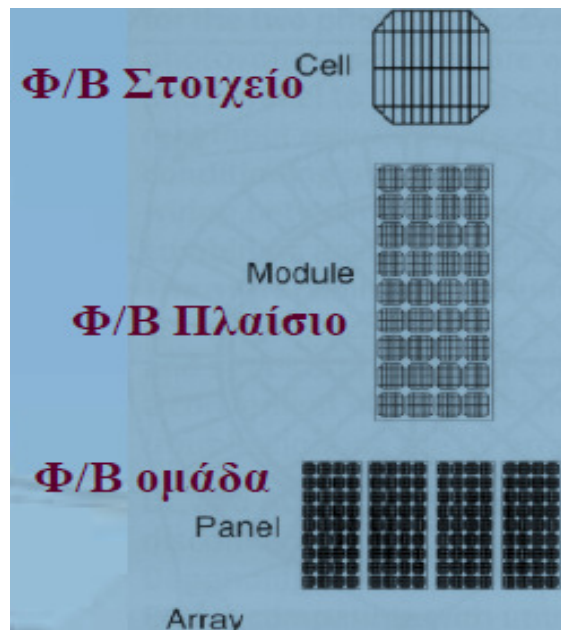
Η ανάλυση που προηγήθηκε αφορά Φ/β συστοιχίες μόνιμα στερεωμένες σε βάση που δεν μετακινείται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Αποτελούνται από διόδους ημιαγωγών (συνήθως πυριτίου), οι οποίες καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνουν διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και την πίσω όψη τους. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, και το ρεύμα που παράγεται είναι συνεχές. Ο βαθμός απόδοσης ενός Φ/β συστήματος σε πραγματικές συνθήκες μπορεί να φτάσει έως 14%. Σε ένα Φ/β σύστημα, η θεμελιώδης μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ενός Φ/β στοιχείου βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ 0.5V και 0.6V. Λόγω του ότι υπάρχουν πολύ λίγες συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν σε τόσο χαμηλές τάσεις, τα Φ/β στοιχεία συνδέονται σε σειρά και σχηματίζουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Τα Φ/β πλαίσια αποτελούν τις βασικές δομικές μονάδες ενός Φ/β συστήματος και αποτελούνται συνήθως από 36 Φ/β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά.



Σχήμα 3.1: Εικόνα με την δομή ενός Φ/Β συλλέκτη

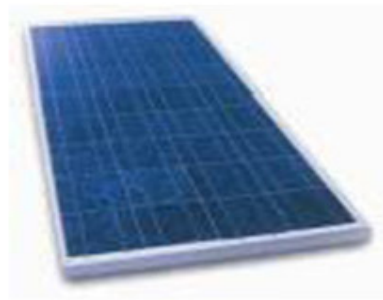
3.2 Η ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΤΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Φωτοβολταϊκό στοιχείο: Η ηλεκτρονική διάταξη που παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν δέχεται ακτινοβολία. Λέγεται ακόμα Φ/Β κώτταρο ή Φ/Β κυψέλη (PV cell).



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση Φ/Β κυψέλης

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο: Ένα σύνολο Φ/Β στοιχείων που είναι ηλεκτρονικά συνδεδεμένα. Αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της Φ/Β γεννήτριας (PV module).



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση Φ/Β πλαισίου

Πανέλο: Ένα ή περισσότερα Φ/Β πλαίσια, που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να εγκατασταθεί σε Φ/Β εγκατάσταση (PV panel).

Φωτοβολταϊκή συστοιχία: Μια ομάδα από Φ/Β πλαίσια ή πανέλα με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης (PV array).



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση Φ/Β συστοιχίας

Φωτοβολταϊκή γεννήτρια: Τα Φ/Β πλαίσια από (συνήθως 30 έως 36) ερμητικά σφραγισμένα Φ/Β στοιχεία μέσα σε ειδική διαφανή πλαστική ύλη, των οποίων η μπροστινή όψη προστατεύεται από ανθεκτικό γυαλί. Η κατασκευή αυτή που δεν ξεπερνά σε πάχος τα 4 με 5 χιλιοστά, τοποθετείται συνήθως σε πλαίσιο αλουμινίου. Τα στοιχεία εσωτερικά είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ανάλογα με την εφαρμογή.

Κατασκευή στήριξης: Τα Φ/Β πλαίσια προκειμένου να τοποθετηθούν / προσαρμοστούν στο σημείο εγκατάστασής τους εφοδιάζονται με ειδικές κατασκευές. Οι κατασκευές αυτές στήριξης πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια, όπως αντοχή στα φορτία που προέρχονται από το βάρος των πλαισίων και τους τοπικούς ανέμους, να μην προκαλούν σκίασμό στα πλαίσια, να επιτρέπουν την προσέγγιση στα πλαίσια, αλλά ταυτόχρονα να διασφαλίζουν την ασφάλειά τους.

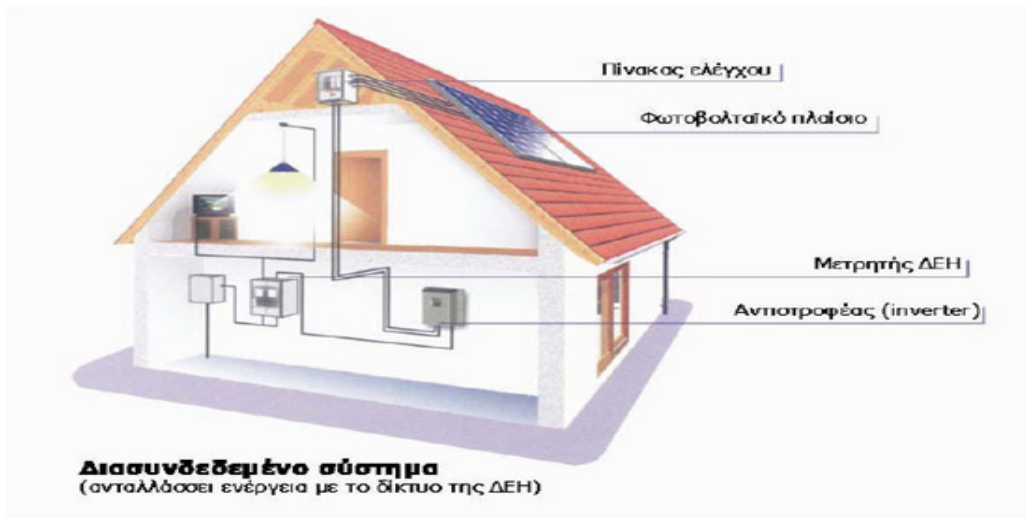
Συστήματα μετατροπής ισχύος (inverters): Τα Φ/Β πλαίσια παράγουν συνεχές ρεύμα ενώ τα φορτία καταναλώνουν εναλλασσόμενο ρεύμα. Για την μετατροπή της ισχύος στα Φ/Β συστήματα χρησιμοποιούνται αντιστροφείς (inverters) συνεχούς σε εναλλασσόμενο (DC/AC). Σκοπός των συστημάτων μετατροπής ισχύος είναι η κατάλληλη ρύθμιση των χαρακτηριστικών του παραγόμενου ρεύματος, ώστε να καταστεί δυνατή η τροφοδοσία των διάφορων καταναλώσεων. Τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή του αντιστροφέα είναι η αξιοπιστία η ενεργειακή απόδοση οι αρμονικές παραμορφώσεις το κόστος η συμβατότητα με τις τεχνικές απαιτήσεις της ΔΕΗ. Σε ένα τυπικό Φ/Β σύστημα ο αντιστροφέας (ή αντιστροφείς) τοποθετείται σε απόσταση από τα Φ/Β πλαίσια σε στεγασμένο χώρο. Στις περιπτώσεις αυτές οι καλωδιώσεις είναι συνεχούς ρεύματος.

Ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου προστασίας και λοιπά στοιχεία: Το Φ/Β σύστημα συμπληρώνουν οι ηλεκτρονικές διατάξεις ελέγχου, η γείωση, οι καλωδιώσεις (συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος) και σχετικό ηλεκτρολογικό υλικό, οι διατάξεις ασφαλείας, ο μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας και σύστημα παρακολούθησης της λειτουργίας του Φ/Β συστήματος. Η ΔΕΗ απαιτεί την ύπαρξη προστασίας απόζευξης του σταθμού μέσω διατάξεων του αντιστροφέα, ώστε ο σταθμός να αποσυνδέεται τόσο σε περίπτωση έλλειψης τάσης από το δίκτυο της ΔΕΗ, (προς αποφυγή του φαινομένου της νησιοδότησης) όσο και στην περίπτωση που η τάση και η συχνότητα αποκλίνουν των ακολούθων ορίων:

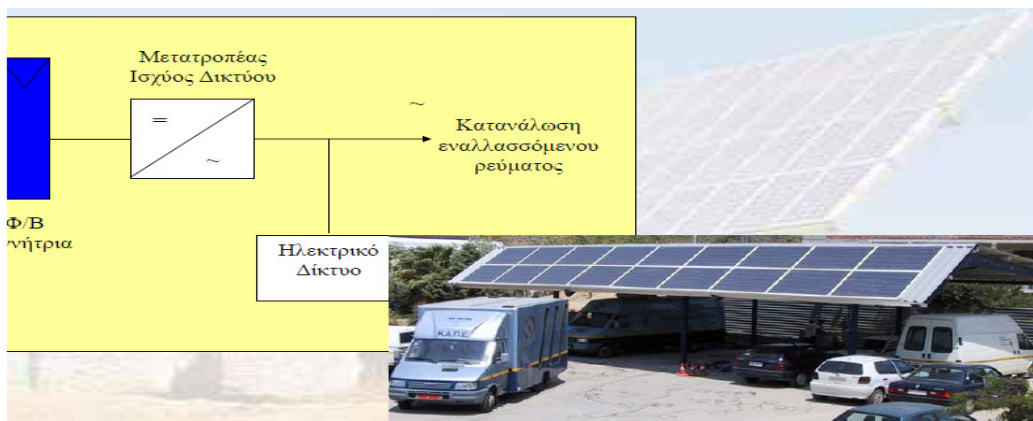
Τάση: από +15% έως -20% επί της ονομαστικής (230V) και συχνότητα: +0,5Hz της ονομαστικής (50Hz). Σε περίπτωση υπέρβασης των πιο πάνω ορίων ο αντιστροφέας θα τίθεται εκτός (αυτόματη απόζευξη) με τις ακόλουθες χρονικές ρυθμίσεις: Θέση εκτός του αντιστροφέα σε 0,5sec και επανάζευξη του αντιστροφέα μετά από 3min. Εάν κατά την λειτουργία του Φ/Β σταθμού διαπιστωθούν προβλήματα αρμονικών, έγχυσης συνεχούς τάσεως στο δίκτυο κλπ, θα πρέπει ο παραγωγός να λάβει μέτρα που θα του υποδείξει η ΔΕΗ.

3.3 ΟΙ ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα. Στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά, τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας εφ' όσον υπάρχει διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο. Στις περιπτώσεις όμως που η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά δεν επαρκεί για να καλύψει τα φορτία τότε το δίκτυο παρέχει τη συμπληρωματική ενέργεια. Έτσι στα διασυνδεδεμένα συστήματα υπάρχουν δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ένας μετράει την ενέργεια που δίνεται στο δίκτυο και ο άλλος την ενέργεια που παρέχει το δίκτυο. Επίσης στη περίπτωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν απαιτείται χρήση συσσωρευτών, γεγονός που ελαττώνει το αρχικό κόστος της εγκατάστασης καθώς και το κόστος συντήρησης.

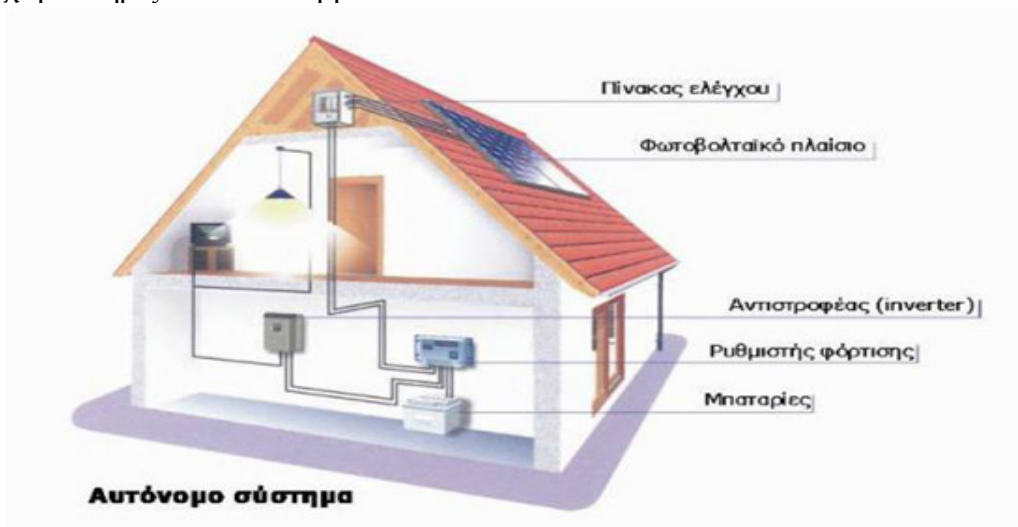


Σχήμα 3.2: Απεικόνιση διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος σε σπίτι

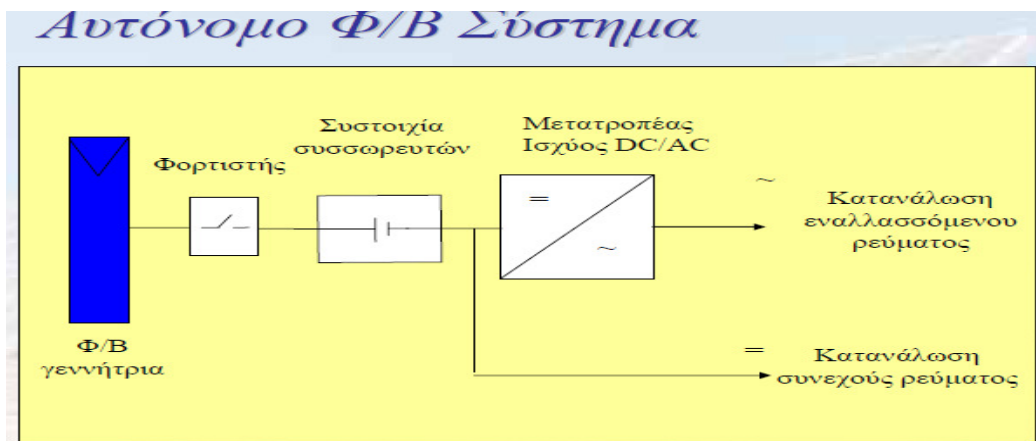


Σχήμα 3.3: Απεικόνιση διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος με μορφή απλού διαγράμματος

Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα. Σήμερα υπάρχει πληθώρα μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κεραίες τηλεπικοινωνιακών σταθμών, εξοχικά σπίτια, αντλίες άντλησης νερού, χιονοδρομικά κέντρα, τροχόσπιτα, φάρους, μετεωρολογικούς σταθμούς, υπαίθρια φωτιστικά σώματα, σκάφη και άλλα τα οποία καθίστανται ενεργειακά αυτόνομα. Βέβαια υπάρχουν συστοιχίες συσσωρευτών οι οποίες αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. ενώ σε περίπτωση που έχουμε φορτία εναλλασσομένου ρεύματος θα πρέπει να υπάρχει ένας αντιστροφέας στο σύστημα ο οποίος θα μετατρέπει την συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση. Όταν τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα συνδυασθούν και με άλλη ανανεώσιμη ή συμβατική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (ανεμογεννήτρια, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, κ.λ.π.) τότε χαρακτηρίζονται σαν υβριδικά.



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση αυτόνομου Φ/Β συστήματος σε σπίτι



Σχήμα 3.5: Απεικόνιση αυτόνομου Φ/Β συστήματος με μορφή απλού διαγράμματος

Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Πρόκειται για αυτόνομα συστήματα που αποτελούνται από τη Φ/Β συστοιχία σε συνδυασμό με άλλες πηγές ενέργειας όπως μια γεννήτρια πετρελαίου ή άλλη μορφή ΑΠΕ (π.χ. ανεμογεννήτρια).



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση υβριδικού Φ/Β συστήματος με μορφή απλού διαγράμματος

3.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ Φ/Β

3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για να κατασκευαστούν φωτοβολταϊκα στοιχεία στην βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Είναι ίσως και το μοναδικό υλικό που παράγεται με τόσο μαζικό τρόπο. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του πυριτίου είναι:

- Μπορεί να βρεθεί πάρα πολύ εύκολα στην φύση. Είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το οξυγόνο. Το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) (ή κοινώς η άμμος) και ο χαλαζίτης αποτελούν το 28% του φλοιού της γης. Είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον.
- Μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί. Επίσης είναι σχετικά εύκολο να μετατραπεί στην μονοκρυσταλλική του μορφή.
- Οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους 1250C κάτι που επιτρέπει την χρήση του πυριτίου σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτός είναι και ο λόγος που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου ανταπεξέρχονται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Πολύ σημαντικό στοιχείο, που συνέβαλε στην γρήγορη ανάπτυξη τα φωτοβολταϊκα στοιχεία τα τελευταία χρόνια, ήταν η ήδη αναπτυγμένη τεχνολογία, στην βιομηχανία της επεξεργασίας του πυριτίου, στον τομέα της ηλεκτρονικής (υπολογιστές, τηλεοράσεις κλπ). Το 2007 μάλιστα ήταν η πρώτη χρονιά που υπήρχε μεγαλύτερη ζήτηση (σε τόνους κρυσταλλικού πυριτίου) στην αγορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σχέση με αυτήν των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής.

3.4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

1)Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si) : Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Το μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκα στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέση απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας". Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, είναι της SunPower με απόδοση πλαισίου 18,5%. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση πλαισίου μονοκρυσταλλικού πυριτίου

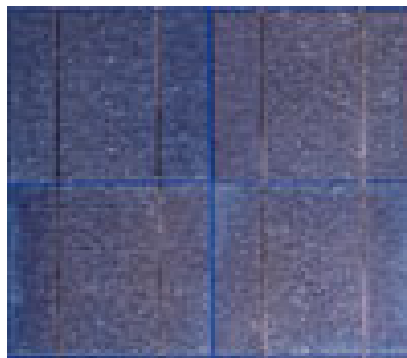
2) Φωτοβολταϊκα κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si) : Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η

απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.



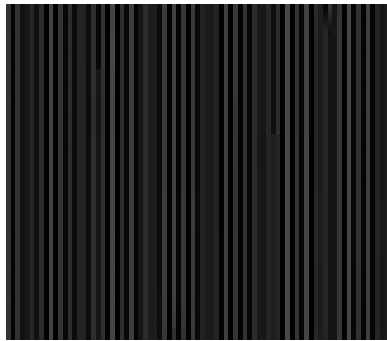
Σχήμα 3.7: Απεικόνιση πλαισίου από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

3) Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon) : Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αναπτύσσεται από την Evergreen Solar. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.



Σχήμα 3.8: Απεικόνιση πλαισίου ταινίας πυριτίου

4) Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe_2 ή CIS, με προσθήκη γαλλίου CIGS) : Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο). Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γαλλίου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ινδίο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.



Σχήμα 3.9: Απεικόνιση πλαισίου από δισεληνοϊνδιούχο χαλκό

5) Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si) : Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Ο χαρακτηρισμός *άμορφο φωτοβολταϊκό* προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκα thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά). Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκα στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον

δίνουν εγγύησεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.



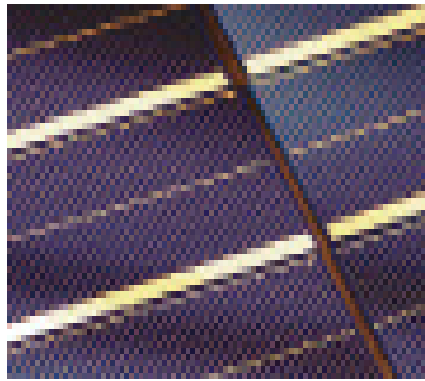
Σχήμα 3.10: Απεικόνιση πλαισίου από άμορφο πυρίτιο

6) Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe) : Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκα στοιχεία έχει φθάσει το 16%. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Σημαντικότερος κατασκευαστής για φωτοβολταϊκα στοιχεία CdTe είναι η First Solar. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Ήδη η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIPV Building Integrated Photovoltaic).



Σχήμα 3.11: Απεικόνιση πλαισίου από τελουριούχο κάδμιο

7) Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs) : Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσένιο δεν είναι σπάνιο αλλά έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκα στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκα στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.


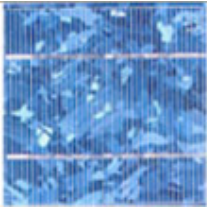
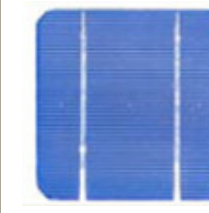



Σχήμα 3.12: Απεικόνιση πλαισίου από τελουριούχο κάδμιο

8) Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία : Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. - HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer). Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Κατασκευάζεται από την Sanyo Solar. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Αλλά πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκα στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το υβριδικο φωτοβολταϊκο είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

9) Άλλες τεχνολογίες : Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκα στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι: Α) Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si) Β) Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία

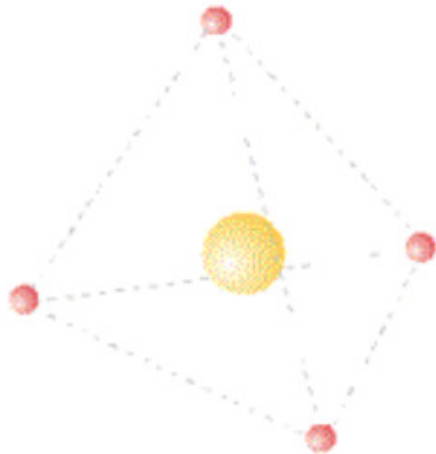
Πίνακας 3.1 : Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

Συγκριτικός Πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών				
Τύπος	Thin Film	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά	Υβριδικά
Εμφάνιση				
Απόδοση	Άμορφα: 5~7% CIS: 7~10% CdTe: 8~9%	11~14%	13~16%	16~17%
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	10~20 m²	8~10 m²	7~8 m²	6~7 m²
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά kWp)	1300~1400	1300	1300	1350
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά m ²)	65~140	130~160	160~185	190~225
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (kg CO ₂ ανά kWp)	1380~1485	1380	1380	1435

3.5 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

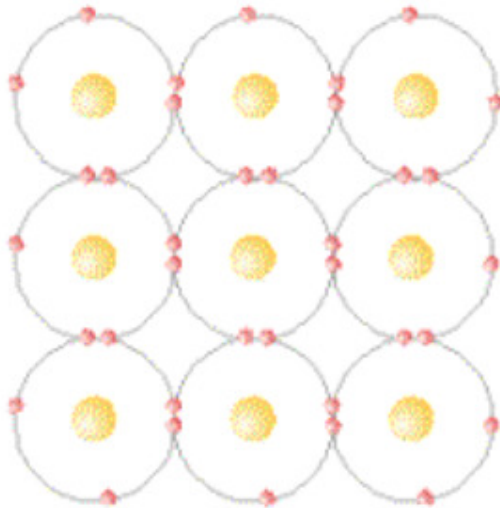
Βρισκόμαστε στη γειτονιά ενός αντιδραστήρα σύντηξης, στον Ήλιο μας, όπου, σε μια κόλαση φωτιάς, πυρήνες υδρογόνου μετατρέπονται σε πυρήνες ηλίου. Εξαιτίας της παραπάνω πυρηνικής αντίδρασης ο ήλιος μας χάνει 4,5 εκατομμύρια τόνους από τη μάζα του σε κάθε δευτερόλεπτο(!) και τη μετατρέπει σε ισοδύναμη ενέργεια, σύμφωνα με την αρχή της ισοδυναμίας μάζας - ενέργειας της Θεωρίας της Σχετικότητας. Η ισχύς που ακτινοβολεί ο Ήλιος προς όλες τις κατευθύνσεις είναι ίση με $4 \times 10^{26} \text{ W}$. Φυσικά η περισσότερη διασκορπίζεται στο αχανές σύμπαν και μόνο ένα πολύ μικρό μέρος φτάνει στη Γη. Συγκεκριμένα, σε κάθε τετραγωνικό μέτρο του πλανήτη μας προσπίπτει ισχύς μόνο 1 kW. Παρόλο το μικρό μέγεθος της ισχύος αυτής, η ενέργεια που δέχεται η Γη σε όλη της την επιφάνεια είναι 20.000 φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια που ξοδεύει όλη η ανθρωπότητα για τις ανάγκες της με οποιαδήποτε μορφή. Ένα τόσο μεγάλο ποσό ενέργειας είναι κρίμα να πάει χαμένο, για δύο βασικούς λόγους: διότι παρέχεται δωρεάν και δεν μολώνει το περιβάλλον. Μέχρι σήμερα εκμεταλλευόμαστε κατά ένα πολύ μικρό μέρος την ηλιακή ενέργεια μόνο ως θερμότητα. Χαρακτηριστική συσκευή είναι αυτή του ηλιακού θερμοσίφωνα. Δεν έχουμε, όμως, ανάγκη μόνο από ζεστό νερό. Το ζεστό νερό δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις ενεργειακές ανάγκες μας. Χρειαζόμαστε την ηλεκτρική ενέργεια όσο τίποτε άλλο. Για τον λόγο αυτό η επιστήμη αναζήτησε μεθόδους μετατροπής της ηλιακής ενέργειας κατευθείαν σε ηλεκτρική. Ήδη από τον προηγούμενο αιώνα, περίπου από το 1840, διαπιστώθηκε ότι αυτό είναι δυνατό με τη βοήθεια των ημιαγωγών.

Από τα στοιχεία τα κυριότερα ημιαγωγικά υλικά είναι το Γερμάνιο (Ge), το Πυρίτιο (Si) και το Σελήνιο (Se). Από αυτά το πιο σημαντικό είναι το πυρίτιο, γιατί βρίσκεται σε μεγαλύτερη αφθονία στη φύση (25%) μετά το Οξυγόνο (50%). Γι αυτό θα αναφερθούμε στο πυρίτιο και θα περιγράψουμε μερικές από τις ιδιότητές του. Από ηλεκτρικής απόψεως τα διάφορα σώματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τους αγωγούς, τους μονωτές και τους ημιαγωγούς. Οι ημιαγωγοί σε κατάλληλες συνθήκες εκδηλώνουν τις ιδιότητες των άλλων δύο κατηγοριών και μπορούν να λειτουργήσουν ως αγωγοί ή ως μονωτές. Όπως ξέρουμε, η ύλη αποτελείται από άτομα. Κάθε άτομο, με τη σειρά του, αποτελείται από τον πυρήνα και από τα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω από αυτόν, τοποθετημένα πάνω σε στοιβάδες. Από τα ηλεκτρόνια τα πιο απομακρυσμένα από τον πυρήνα, αυτά της εξωτερικής στοιβάδας, λέγονται ηλεκτρόνια σθένους και η αντιστοιχη στοιβάδα σθένους. Κάθε άτομο επιδιώκει να συμπληρώσει την εξωτερική του στοιβάδα με 8 ηλεκτρόνια. Το άτομο του πυριτίου στην στοιβάδα σθένους περιέχει 4 ηλεκτρόνια, που βρίσκονται στις κορυφές μιας κανονικής τριγωνικής πυραμίδας, στο κέντρο της οποίας βρίσκεται ο πυρήνας, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 3.13: Το άτομο του πυριτίου

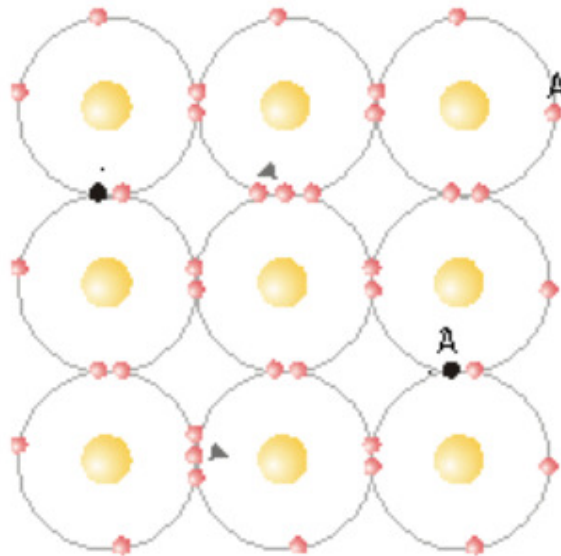
Για να συμπληρώσει τη στοιβάδα σθένους του με 8 ηλεκτρόνια, κάθε άτομο πυριτίου συνεργάζεται με άλλα 4 άτομα, που το περιβάλλουν στο χώρο και συνεισφέρουν ανά δύο από ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι σχηματίζεται το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου.



Σχήμα 3.14: το κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου

Στους αγωγούς του ηλεκτρισμού τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ευκίνητα και σ' αυτήν την ευκινησία οφείλονται οι αγώγιμες ιδιότητες του υλικού. Αντίθετα στους μονωτές τα ηλεκτρόνια σθένους είναι πολύ ισχυρά συνδεδεμένα με τον πυρήνα και εδώ οφείλονται οι μονωτικές τους ιδιότητες. Στους ημιαγωγούς τα ηλεκτρόνια σθένους συνδέονται σχετικά χαλαρά με τον πυρήνα, χωρίς να έχουν την ευκινησία των ηλεκτρονίων των αγωγών. Αν όμως, ένα ηλεκτρόνιο πάρει με κάποιον τρόπο πρόσθετη ενέργεια, τότε μπορεί να σπάσει τους δεσμούς του με τον πυρήνα και να φύγει απ' αυτόν. Η

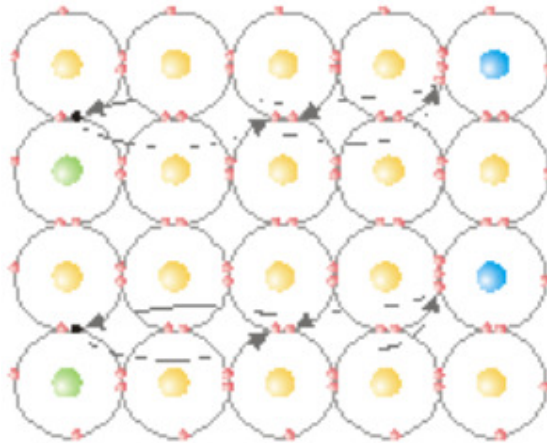
θέση από την οποία φεύγει το ηλεκτρόνιο είναι περιοχή με ηλεκτρονικό έλλειμμα, παρουσιάζει θετικό φορτίο ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου και ονομάζεται *οπή*, όπως φαίνεται στο σχήμα. Την πρόσθετη ενέργεια που πρέπει να πάρουν τα ηλεκτρόνια, για να φύγουν από το άτομο, μπορούμε να την προσφέρουμε με θερμότητα ή με φωτισμό. Το φως αποτελείται από μικρά σωματίδια, που λέγονται *φωτόνια* και τα οποία μεταφέρουν ενέργεια. Φωτίζοντας τον ημιαγωγό, κάποια από τα φωτόνια συγκρούονται με τα ηλεκτρόνια σθένους και μεταβιβάζουν σ' αυτά όλη τους την ενέργεια. Αν, λοιπόν, φωτίσουμε έναν κρύσταλλο πυριτίου, στο εσωτερικό του θα "δούμε" κάποια ηλεκτρόνια να εγκαταλείπουν τα αντίστοιχα άτομα και να προσκολλώνται σε άλλα. Στον κρύσταλλο θα υπάρχουν άτομα με 9 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα, που θα είναι αρνητικά φορτισμένα, και άτομα με 7 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα ή, ισοδύναμη πρόταση, με μια οπή στην εξωτερική στοιβάδα, που θα είναι θετικά φορτισμένα. Στο μεταξύ ελευθερώνονται κι άλλα ηλεκτρόνια που προσκολλώνται σε άτομα ή καταλαμβάνουν τη θέση μιας οπής που χάνεται. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι μια άτακτη μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών, η οποία όμως δεν ισοδυναμεί με ηλεκτρικό ρεύμα. Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η κατευθυνόμενη και προς συγκεκριμένη φορά μετακίνηση ηλεκτρονίων ή οπών. Την κατευθυνόμενη κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών την πετυχαίνουμε με τους ημιαγωγούς πρόσμιξης



Σχήμα 3.15: Άτακτη μετακίνηση ηλεκτρονίων και οπών

Ένας χημικά καθαρός ημιαγωγός δεν μπορεί να λειτουργήσει ως φωτοβολταϊκή γεννήτρια, εξαιτίας της άτακτης κίνησης των ηλεκτρονίων και των οπών στο κρυσταλλικό πλέγμα. Ας πάρουμε έναν κρύσταλλο Si και ας τον νοθεύσουμε με Φωσφόρο (P) από τη δεξιά και με Βόριο (B) από την αριστερή πλευρά του. Ο φωσφόρος και το βόριο έχουν στην εξωτερική στοιβάδα αντίστοιχα 5 και 3 ηλεκτρόνια. Το ποσοστό της νοθείας ανέρχεται

σε 10^{14} ως 10^{17} άτομα P ή B ανά κυβικό εκατοστό κρυστάλλου Si. Ας δούμε τα επακόλουθα της νοθείας, παρατηρώντας και το διπλανό σχήμα. Με την πρόσμιξη στο κρυσταλλικό πλέγμα κάποια άτομα Si αντικαθίστανται από άτομα P και B. Έτσι κάποια άτομα Si έχουν στη στοιβάδα σθένους 9 ηλεκτρόνια από την πλευρά που νοθεύσαμε με P και 7 ηλεκτρόνια από την πλευρά που νοθεύσαμε με B. Με άλλα λόγια, από την πλευρά του P έχουμε πλεονάζοντα ηλεκτρόνια στις στοιβάδες σθένους, ενώ από την πλευρά του B έχουμε ηλεκτρονικά ελλείμματα στις στοιβάδες σθένους, δηλαδή οπές. Όλος ο κρύσταλλος, όμως είναι ηλεκτρικά ουδέτερος. Αν φωτίσουμε τον νοθευμένο κρύσταλλο, από την πλευρά του P θα ελευθερωθούν ηλεκτρόνια, τα πλεονάζοντα, τα οποία με άλματα θα κινηθούν προς την πλευρά του B, για να καταλάβουν τα ηλεκτρονικά κενά, δηλ. τις οπές. Με αυτόν τον τρόπο θα διαπιστώσουμε στην περιοχή του B συσσώρευση ηλεκτρονίων, δηλ. αρνητικών φορτίων και στην περιοχή του P συσσώρευση οπών, δηλ. θετικών φορτίων. Έτσι πια μεταξύ των δύο νοθευμένων επιφανειών θα εκδηλωθεί ηλεκτρική τάση. Ο νοθευμένος κρύσταλλος του Si λειτουργεί ως ηλεκτρική πηγή με το θετικό πόλο από την πλευρά του P και αρνητικό από την πλευρά του B. Η σύνδεση των ακροδεκτών μιας λάμπας με τις δύο νοθευμένες περιοχές του κρυσταλλικού Si, θα συνοδεύεται από μετακίνηση ηλεκτρονίων, δηλ. από ηλεκτρικό ρεύμα

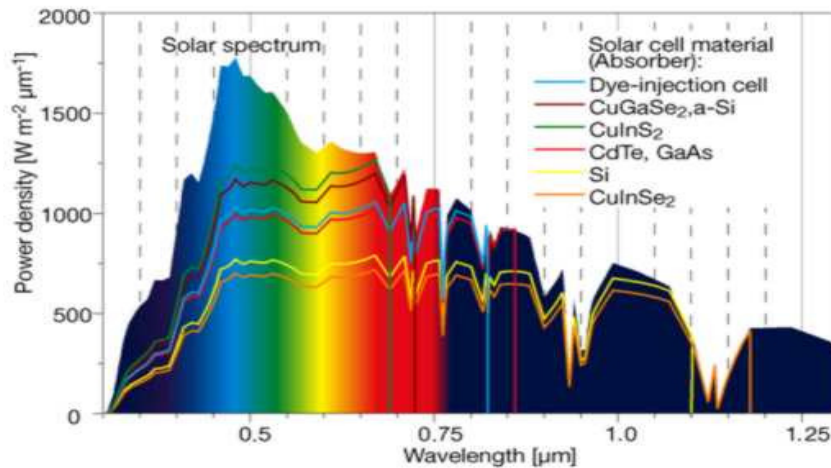


Σχήμα 3.16: Μετακίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση δηλαδή ηλεκτρικό ρεύμα

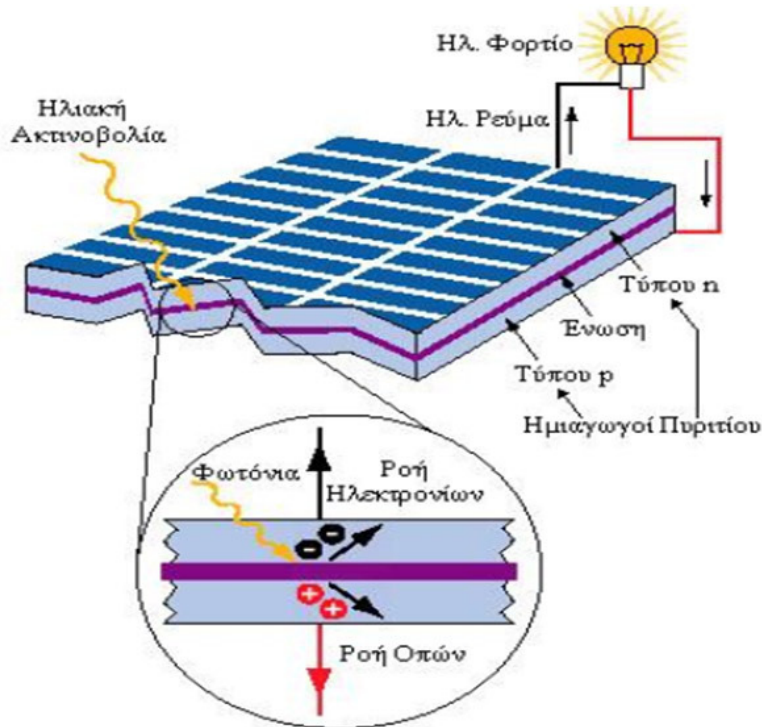
3.5.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Γιατί όμως δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε όλη την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια; Το κάθε ημιαγωγό υλικό αντιδρά σε διαφορετικά μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Κάποια υλικά αντιδρούν σε ευρύτερα φάσματα ακτινοβολίας από κάποια άλλα. Έτσι ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιούμε μπορούμε να εκμεταλλευτούμε μόνο εκείνο το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιδρά με

το συγκεκριμένο υλικό. Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια συμβολίζει τον συντελεστή απόδοσης του υλικού. Οι δύο βασικοί παράγοντες για την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού υλικού είναι το ενεργειακό χάσμα του υλικού και ο συντελεστής μετατροπής.



Σχήμα 3.17: Απόδοση Φ/Β υλικών σε διάφορα μήκη κύματος Η/Μ ακτινοβολίας



Σχήμα 3.18: Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ΙΣΧΥΣ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

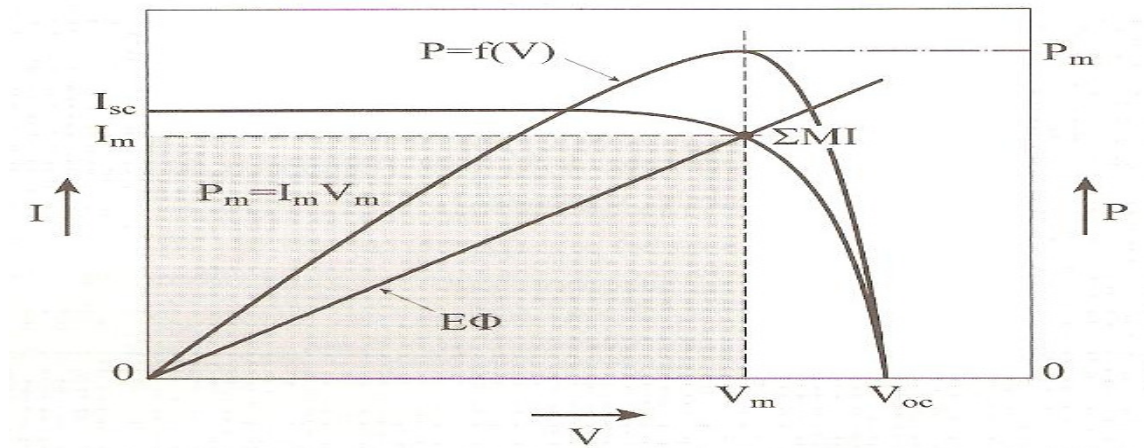
4.1 ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΔΟΚΙΜΗΣ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ

Η ταξινόμηση των Φ/β πλαισίων γίνεται ανάλογα με την ισχύ που αυτά αποδίδουν κάτω από τις πρότυπες συνθήκες δοκιμής(ΠΣΔ). Τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία ελέγχονται σε ένα εργαστηριακά παρασκευασμένο Φ/β στοιχείο καθώς επίσης και στο τελικά διατιθέμενο βιομηχανικό προϊόν είναι η ενεργειακή απόδοση η , ο παράγων πλήρωσης FF, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού (πυκνότητα ισχύος και φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας) και θερμοκρασίας του στοιχείου. Η γνώση των χαρακτηριστικών αυτών μεγεθών επιτρέπει τον έλεγχο της αποδοτικότητας του Φ/β στοιχείου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, που να αντιπροσωπεύουν τυπικές καταστάσεις εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό, καθορίστηκαν διεθνώς οι ακόλουθες πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών ενός Φ/β πλαισίου: 1) Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος $1\text{kW}/\text{m}^2$ και φάσματος αντίστοιχου του ηλιακού με AM1,5 (κάθετη πρόσπτωση). 2) Θερμοκρασία του Φ/β στοιχείου ίση με $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Στην πράξη τα Φ/β στοιχεία ενσωματωμένα στη μονάδα που ονομάζεται Φ/β πλαίσιο λειτουργούν κάτω από φυσικό ηλιακό φως του οποίου τα χαρακτηριστικά μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας καθόλου το έτος και η αποδιδόμενη ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και από τις ιδιαιτέρες κλιματικές συνθήκες του τόπου εγκατάστασης. Με βάση της πρότυπες συνθήκες εισάγεται η έννοια της ισχύος αιχμής P_p (peak power). Ως χαρακτηριστικό του Φ/β στοιχείου η δε μονάδα της στο S.I γράφεται emphaticά W_p . Με άλλα λόγια ισχύος αιχμής ενός Φ/β στοιχείου είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να αποδόσει κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου.

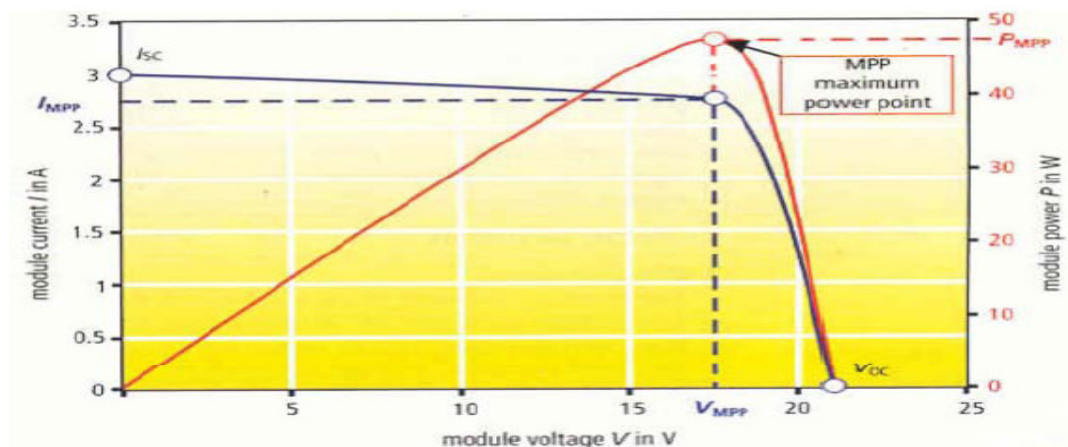
4.2 ΣΗΜΕΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Το Φ/β στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τις περισσότερες ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν σταθερή περίπου τάση στην περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των Φ/β στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά (και μη γραμμικά) σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα ακόμα και αν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή. Η μεταβολή της τάσης V σε συνάρτηση με την ένταση I ενός Φ/β στοιχείου ορίζει την καμπύλη I-V. Σε κατάσταση βραχυκύκλωσης του Φ/β στοιχείου η ένταση του ρεύματος παίρνει την μέγιστη της τιμή I_{sc} ενώ η τάση μηδενίζεται. Σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης του Φ/β στοιχείου η ένταση του ρεύματος

μηδενίζεται αλλά η τάση παίρνει την μέγιστη της τιμή V_{oc} . Επομένως στην βραχυκυκλωμένη και ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση η ισχύς P του Φ/β στοιχείου μηδενίζεται. Στο υπόλοιπο τμήμα της καμπύλης $I-V$ η ισχύς είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Επομένως υπάρχει ένα σημείο στη λειτουργία ενός Φ/β στοιχείου στο οποίο η αποδιδόμενη ισχύς P μεγιστοποιείται. Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς συμβολίζεται με P_m και αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης V_m και έντασης I_m . Είναι πολύ σημαντικό η λειτουργία ενός Φ/β συστήματος να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο σημείο μέγιστης ισχύος P_m έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση του.



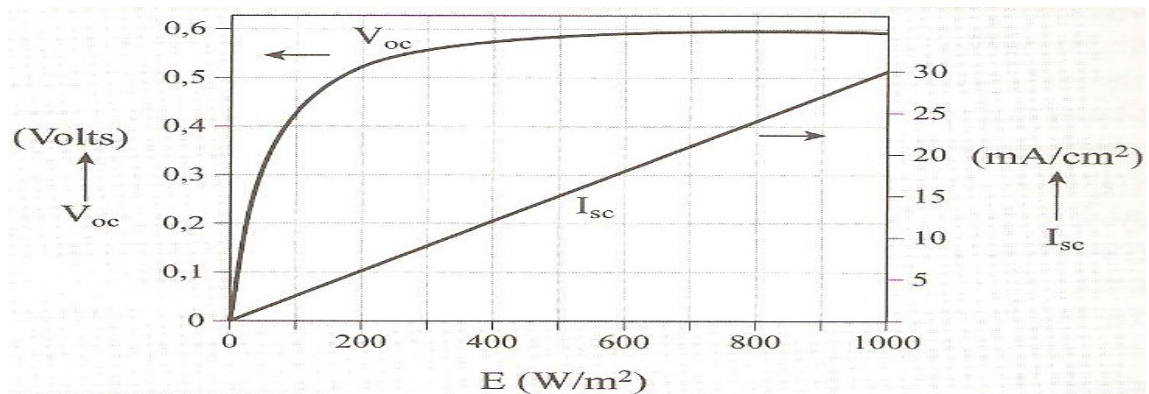
Σχήμα 4.1 :Γράφημα ανεστραμμένης $I-V$ Φ/β στοιχείου. Στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάστηκε η παρεχόμενη από αυτό και κάτω από σταθερό φωτισμό, ισχύς P , ως συνάρτηση της τάσης V στα άκρα του καταναλωτή.



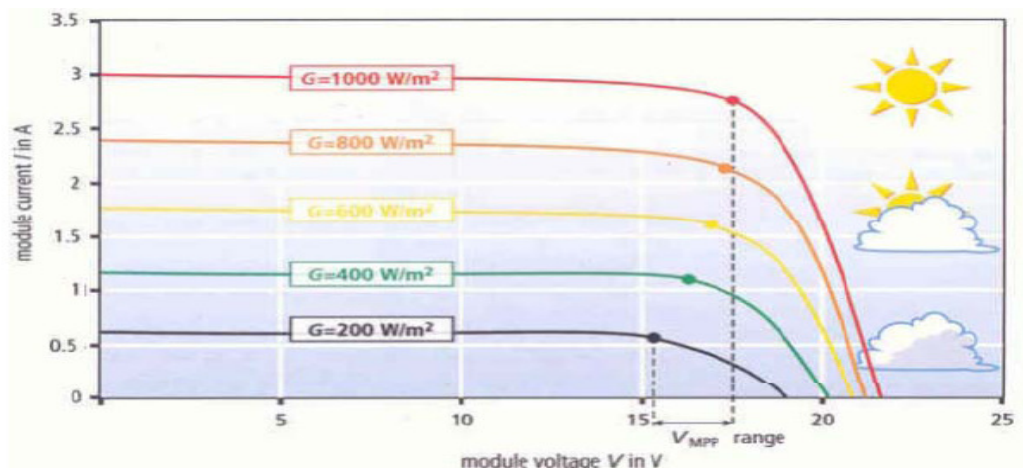
Σχήμα 4.2 :Γράφημα χαρακτηριστικής $I-V$ ενός Φ/β πλαισίου (καμπύλη αντιστοιχείς μορφή με στοιχείου)

4.3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΣ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ(G) ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (Tα) ΚΑΙ ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

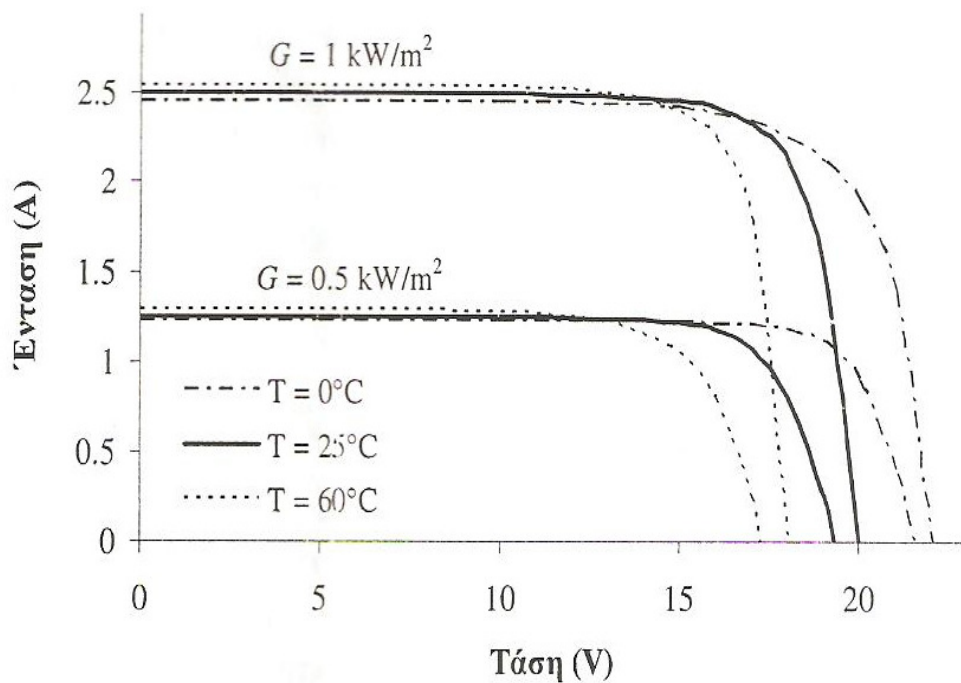
Οι καμπύλες I-V και P-V ενός φ/β πλαισίου έχουν αντίστοιχη μορφή με αυτές του Φ/β στοιχείου. Κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας η μορφή των καμπύλων αυτών επηρεάζεται. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η εξάρτηση της καμπύλης I-V ενός φ/β πλαισίου από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας G και τη θερμοκρασία T. Η ένταση βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι σχεδόν ανάλογη της πυκνότητας ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας G ενώ και η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} επηρεάζεται αυξητικά αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό από την άλλη πλευρά αύξηση της θερμοκρασίας Tα μειώνει την τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} ενώ η αύξηση της έντασης βραχυκύκλωσης I_{sc} που παρατηρείται με την αύξηση της θερμοκρασίας T είναι πολύ μικρότερη τάξης μεγέθους.



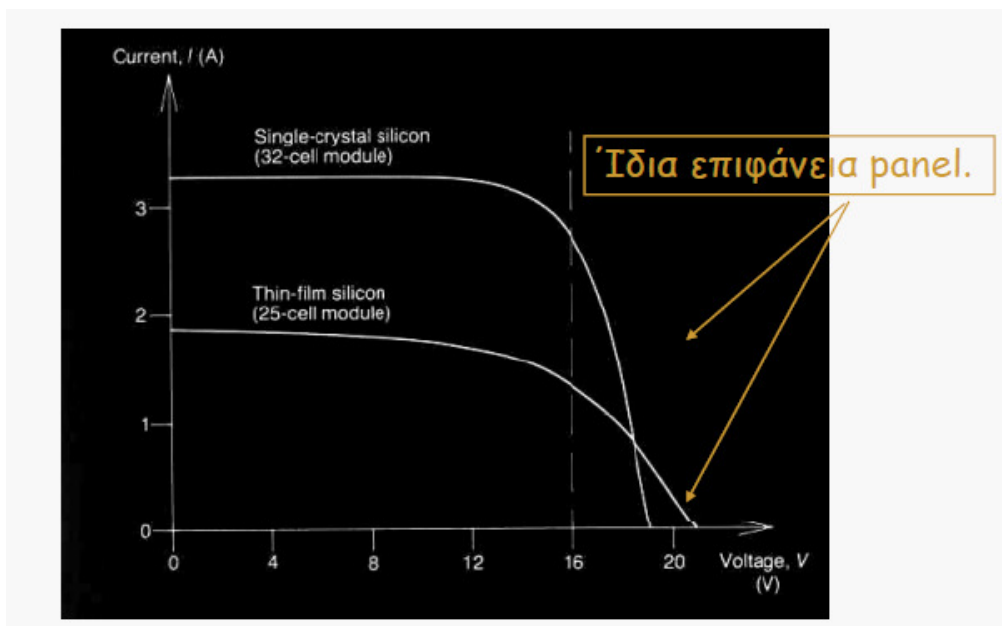
Σχήμα 4.3 :Γράφημα μεταβολής της τάσης του ανοικτού κυκλώματος και του ρεύματος βραχυκύκλωσης ενός Φ/β στοιχείου, ως συνάρτηση της πυκνότητας ισχύος της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας



Σχήμα 4.4 :Γράφημα επίδρασης ηλιακής ακτινοβολίας σε Φ/β πλαίσιο



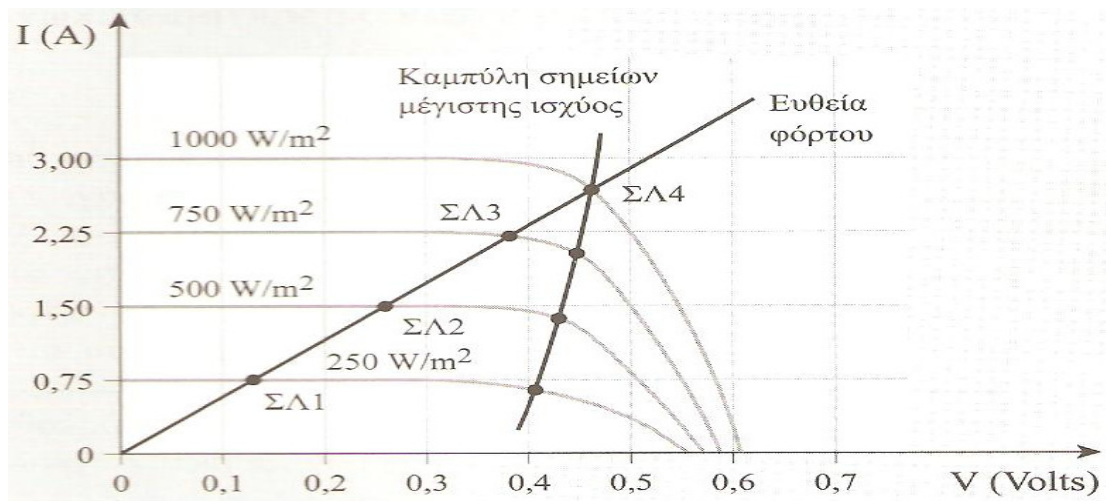
Σχήμα 4.5 :Γράφημα εξάρτηση της καμπύλης I-V ενός φ/β πλαισίου από την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία (Συνήθως η ισχύς μειώνεται κατά 0,45% / $^\circ\text{C}$)



Σχήμα 4.6 :Γράφημα εξάρτηση της καμπύλης I-V ενός φ/β πλαισίου από υλικό κατασκευής.

4.4 Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ I-V ΕΝΟΣ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Για τον έλεγχο της αποδοτικής λειτουργίας ενός Φ/β στοιχείου και για το σχεδιασμό των ηλεκτρονικών που συνδυάζονται με αυτό προσδιορίζουμε τα σημεία μέγιστης ισχύος τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του στοιχείου. Επιδιώκουμε το σημείο λειτουργίας του σε κάθε διαφορετική κατάσταση που θα προκύψει π.χ από μεταβολή της πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας E , να αποτελεί και το σημείο μέγιστης ισχύος, P_m για τη δεδομένη κατάσταση. Στις υπόλοιπες καμπύλες I-V τα δύο σημεία δεν συμπίπτουν για να συμβεί κάτι τέτοιο πρέπει να αλλάξει η ωμική αντίσταση, έτσι ώστε η νέα ευθεία φόρτου, να περνά από το αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος της νέας καμπύλης I-V. Το σημείο αυτό μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά αν παραστήσουμε γραφικά την παρεχόμενη από το Φ/β στοιχείο ηλεκτρική ισχύ, f , υπό δεδομένη πυκνότητα ισχύος E , πάνω σε μια μεταβλητή ηλεκτρική αντίσταση ως συνάρτηση της τάσης V , στα άκρα της αντίστασης. Παρουσιάζει ένα μέγιστο που όπως μπορείτε να διακρίνεται στο κοινό διάγραμμα των I-V και P-V εντοπίζεται στο «γόνατο» της καμπύλης I-V. Οι τιμές ρεύματος-τάσης, στο σημείο μέγιστης ισχύος, συμβολίζονται με I_m και V_m . Η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να δώσει το Φ/β στοιχείο υπό δεδομένη προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας E , ισούται με $P_m = I_m \cdot V_m$. Παρατηρείται όταν αλλάζει η ένταση ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα Φ/β στοιχείο που τροφοδοτεί μια ηλεκτρική αντίσταση, το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται. Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς αποδίδεται στην αντίσταση μόνο για ορισμένο επίπεδο ακτινοβολίας. Σε διαφορετικές τιμές αποδίδεται ισχύς μικρότερη από την αντίστοιχη μέγιστη ισχύ. Τα ΣΛ1,ΣΛ2,ΣΛ3 και ΣΛ4 : τέσσερα σημεία λειτουργίας, αντίστοιχα των τεσσάρων τιμών έντασης της ακτινοβολίας. Μόνο το ΣΛ4 συμπίπτει με το σημείο μέγιστης ισχύος της I-V, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας $E=1 \text{ kW} / \text{m}^2$.



Σχήμα 4.7 : καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου

4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

Η ισχύς εξόδου μιας Φ/β συστοιχίας P_{pv} (kW) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$P_{pv} = f_{pv} \cdot P_{stc} \cdot \frac{G_T}{G_{stc}} \cdot (1 + (T_c - T_{stc}) \cdot C_T)$	4.1
---	-----

Όπου f_{pv} είναι ο συνολικός συντελεστής απωλειών της φ/β συστοιχίας, P_{stc} είναι η ονομαστική ισχύς της φ/β συστοιχίας (σε kW_p) κάτω από ΠΣΔ, G_T είναι η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο της φ/β συστοιχίας (σε kW/m²), G_{stc} είναι η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κάτω από ΠΣΔ (σε kW/m²), T_c είναι η θερμοκρασία σε C° των φ/β στοιχείων, T_{stc} η θερμοκρασία κάτω από ΠΣΔ (25 C°) και C_T είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής των φ/β στοιχείων ο οποίος δείχνει τον τρόπο που μεταβάλλεται η απόδοση του φ/β στοιχείου σε σχέση με τη θερμοκρασία λειτουργίας του. Στους περισσότερους τύπους φ/β στοιχείων παρατηρείται μείωση της απόδοσης τους όταν η θερμοκρασία τους αυξάνεται. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής των τριών πιο συνηθισμένων τύπων Φ/β πλαισίων είναι: μονοκρυσταλλικού πυριτίου (-0.004), πολυκρυσταλλικού πυριτίου (-0.004) και άμορφου πυριτίου (-0.0011). Ο συνολικός συντελεστής απωλειών f_{pv} προσμετρά τις διαφοροποιήσεις ανάμεσα στην ονομαστική επίδοση και την πραγματική επίδοση ενός φ/β πλαισίου, και λαμβάνει υπόψη απώλειες όπως η κάλυψη του πλαισίου από σκόνη και η ηλικία του πλαισίου. Τυπικές τιμές συντελεστών απωλειών για το φ/β πλαίσιο είναι 0.90 λόγω κάλυψης του πλαισίου από σκόνη, 0.90 λόγω γήρανσης και 0.99 λόγω λοιπών απωλειών, επομένως η τιμή του f_{pv} που θεωρείται στην παρούσα διατριβή λαμβάνεται ίση με 0.80 που είναι ίση με το γινόμενο των τριών παρακάτω συντελεστών. Η θερμοκρασία T_c μπορεί να υπολογιστεί από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα T_a (σε C°) και την πυκνότητα ισχύος της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας G (σε kW/m²) χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$T_c = T_a + \frac{(NOCT - 20)}{0.8} \cdot G$	4.2
---	-----

Όπου NOCT είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του φ/β στοιχείου. Η NOCT αποτελεί τη συμβατική θερμοκρασία λειτουργίας, ενός φ/β στοιχείου σε συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης, υπό πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 0.8 (kW/m²), η θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα 20 C° και ταχύτητα ανέμου 1 m/s. Τυπική τιμή της NOCT είναι η 48 C°.

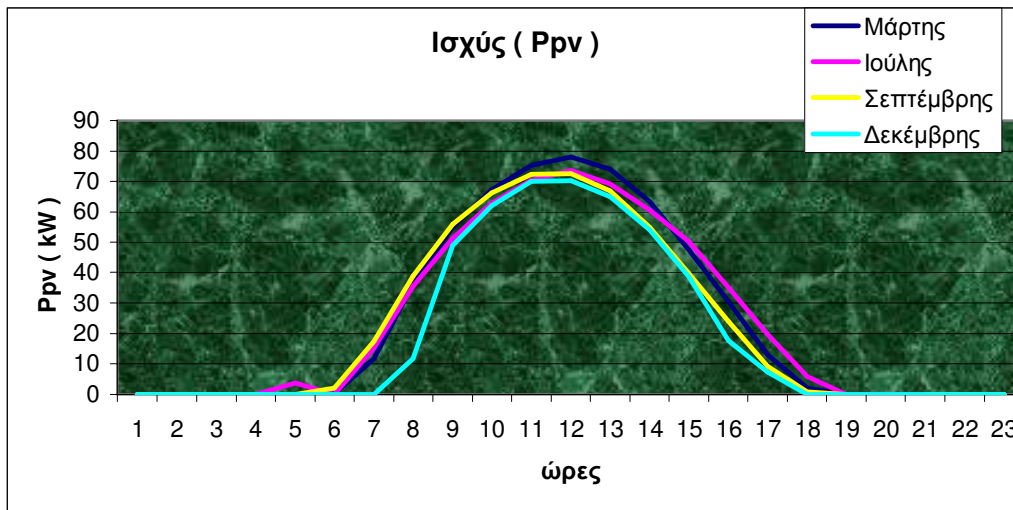
Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο συνολικός συντελεστής απωλειών f_{pv} δεν ταυτίζεται με τον συντελεστή απόδοσης του ϕ/β πλαισίου. Η ακολουθούμενη μεθοδολογία υπολογισμού της ισχύος εξόδου P_{pv} μιας ϕ/β συστοιχίας λαμβάνει υπόψη την ονομαστική ισχύ του ϕ/β πλαισίου κάτω από ΠΣΔ και όχι την επιφάνεια που αυτό καταλαμβάνει. Δυο ϕ/β πλαίσια που καταλαμβάνουν την ίδια επιφάνεια και έχουν διαφορετικούς συντελεστές απόδοσης θα έχουν και διαφορετική ονομαστική ισχύ. Επομένως δεν είναι απαραίτητη η γνώση του συντελεστή απόδοσης του ϕ/β πλαισίου. Ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο που χρειάζεται να τονιστεί είναι ότι η ϕ/β συστοιχίες που μοντελοποιούνται στην παρούσα διατριβή περιλαμβάνουν ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος. Η ύπαρξη της διάταξης αυτής αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για να δώσει η εξίσωση της ισχύος εξόδου μιας ϕ/ω συστοιχίας ακριβή αποτελέσματα. Η μόνη παράμετρος της εξίσωσης που μεταβάλλεται σε ωριαία βάση είναι η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας G_T .

4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ Φ/β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΓΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ G ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ T ΓΙΑ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΗ ΣΤΗΡΙΞΗ (MATLAB)

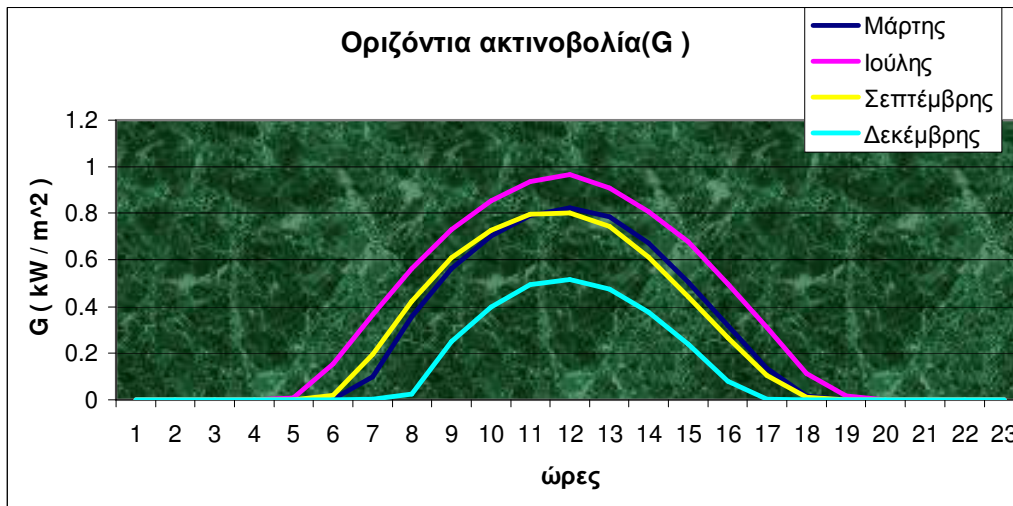
Το παρακάτω σενάριο αναφέρεται σε γεωγραφικό πλάτος 38 μοιρών ,προσανατολισμό του συλλέκτη στο νότο και βέλτιστη κλίση συλλέκτη ίση με το γεωγραφικό πλάτος. Είναι ένα ρεαλιστικό σενάριο και αποτελεί την καλύτερη δυνατή ρύθμιση μιας Φ/β συστοιχίας ώστε να αποδίδει μέγιστη ισχύ στην διάρκεια ενός έτους για την Ελλάδα.

Για την εξαγωγή των παρακάτω αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε στο Matlab ισχύς αιχμής $P_{stc}=100KW$.

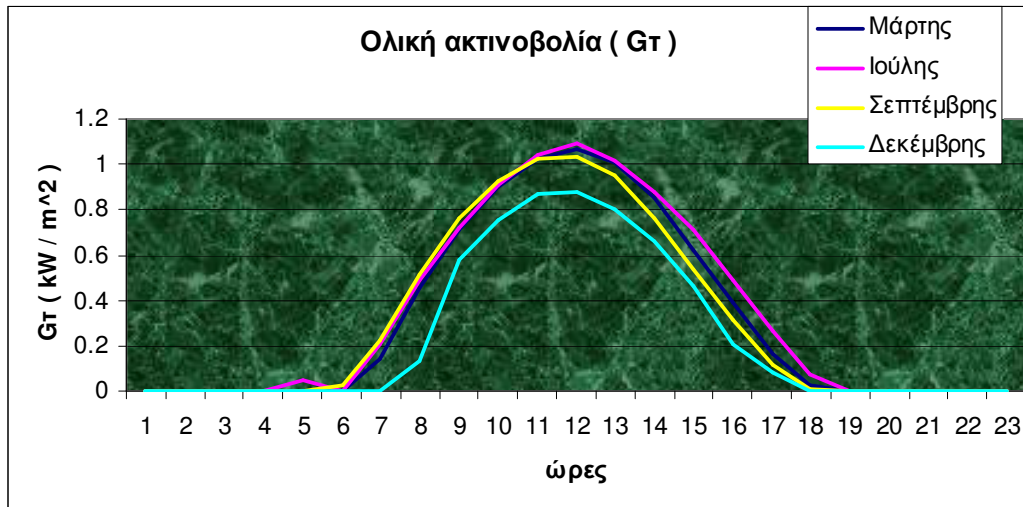
Παρατηρείται ότι για κλίση $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ που είναι η ετήσια βέλτιστη κλίση ιδανική για τον Μάρτη και Σεπτέμβρη η ισχύς είναι ιδιαίτερα υψηλή τους μηνές αυτούς. Η οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία G είναι μέγιστη την καλοκαιρινή περίοδο παρόλο αυτά όμως η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_T τον μήνα Ιούλη δεν έχει μεγάλη απόκλιση από τους άλλους μήνες λόγω των πολλαπλών παραμέτρων που την επηρεάζουν(πχ κλίση). Παρατηρείται ότι η G_T αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα για την απολαβή μέγιστης ισχύος. Τον Μάρτη ,τον Ιούλη και τον Σεπτέμβρη η ισχύς της Φ/β συστοιχίας θα είναι περίπου στα ίδια επίπεδα όπως και η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_T . Η υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος τον μήνα Ιούλη η οποία επηρεάζει την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του ϕ/β πλαισίου μειώνει την τάση ανοιχτοκύκλωσης με άμεση συνέπεια η παραγόμενη ισχύς να είναι μειωμένη κατά ένα μικρό ποσοστό το μήνα αυτό. Το Δεκέμβρη παρατηρείται η χαμηλότερη ισχύς εξαιτίας της χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας G και G_T αντίστοιχα. Η χαμηλή θερμοκρασία του περιβάλλοντος και κατά συνθήκη του πλαισίου αυξάνουν ελάχιστα την ισχύ εξόδου τον μήνα αυτό.



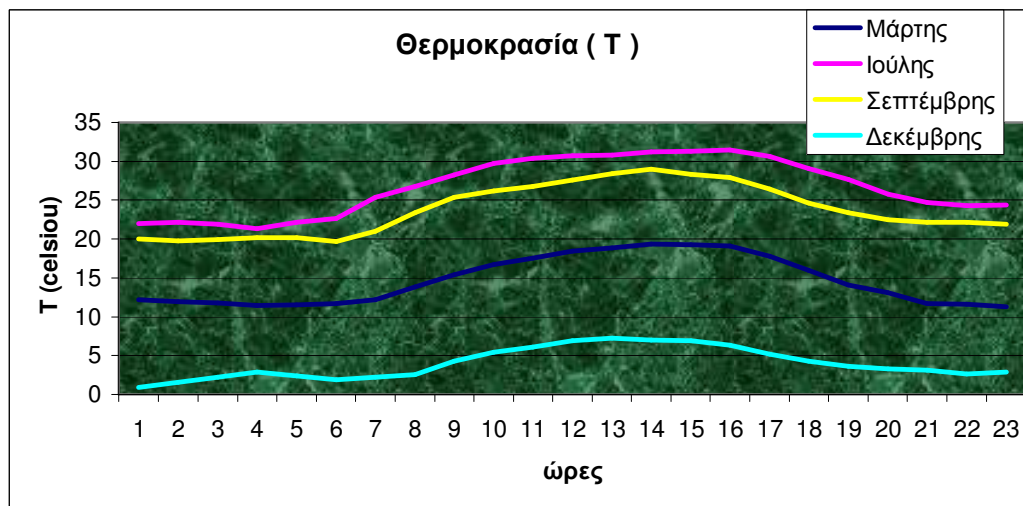
Σχήμα 4.8 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση β=38 και γ=0



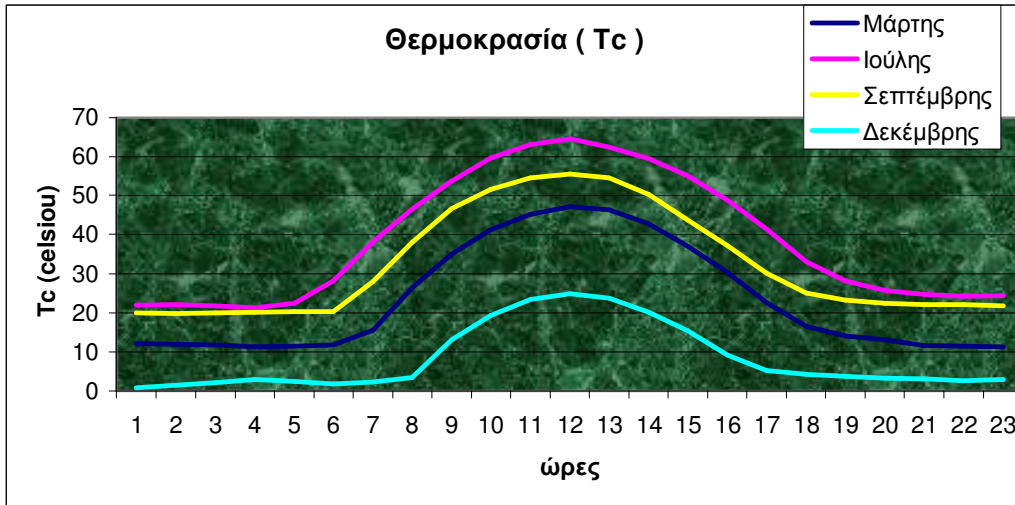
Σχήμα 4.9 :Γράφημα οριζόντιας ολικής ακτινοβολίας G



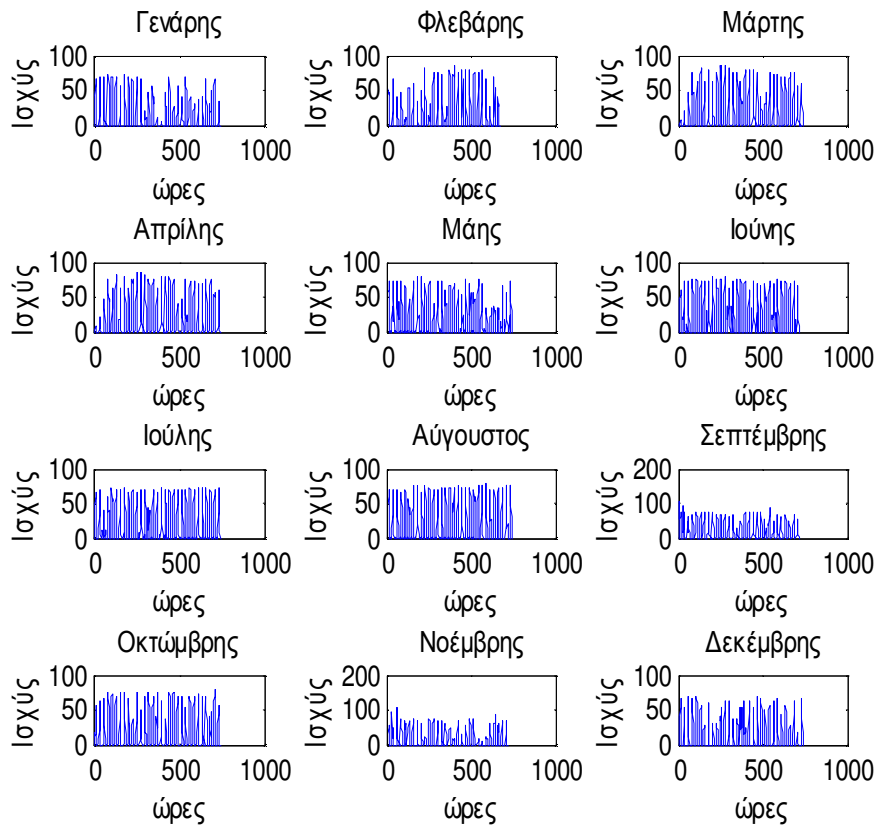
Σχήμα 4.10 :Γράφημα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας Gt για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$



Σχήμα 4.11 :Γράφημα θερμοκρασίας T για συγκεκριμένες μέρες του έτους



Σχήμα 4.12 :Γράφημα θερμοκρασίας Tc για συγκεκριμένες μέρες του έτους



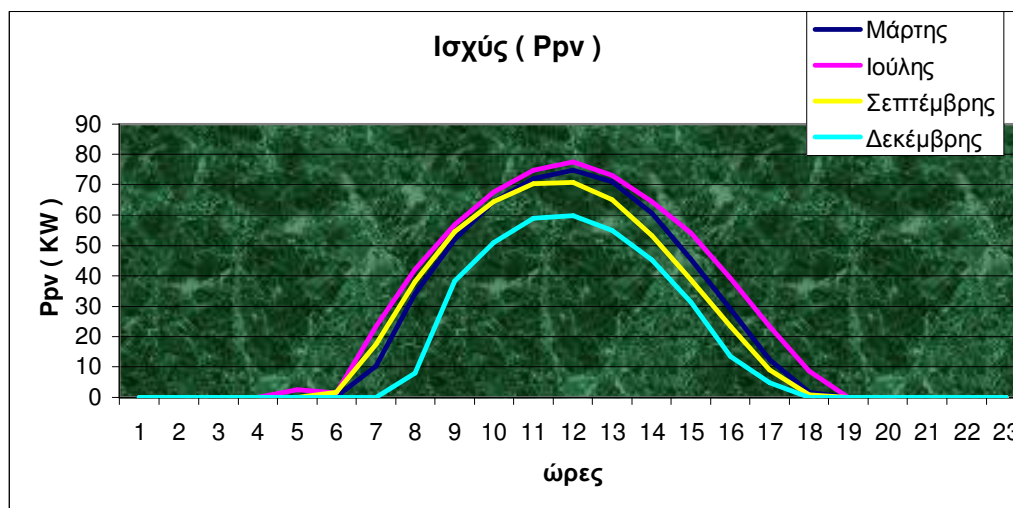
Σχήμα 4.13 :Γράφημα ισχύος Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$

Στον παρακάτω πίνακα η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_t παίρνει μέγιστες τιμές με άμεση συνέπεια η ισχύς να γίνεται και αυτή μέγιστη. Οι γωνίες πρόσπτωσης είναι πολύ μικρές και η άμεση ακτινοβολία του ήλιου είναι σχεδόν κάθετη με το συλλέκτη.

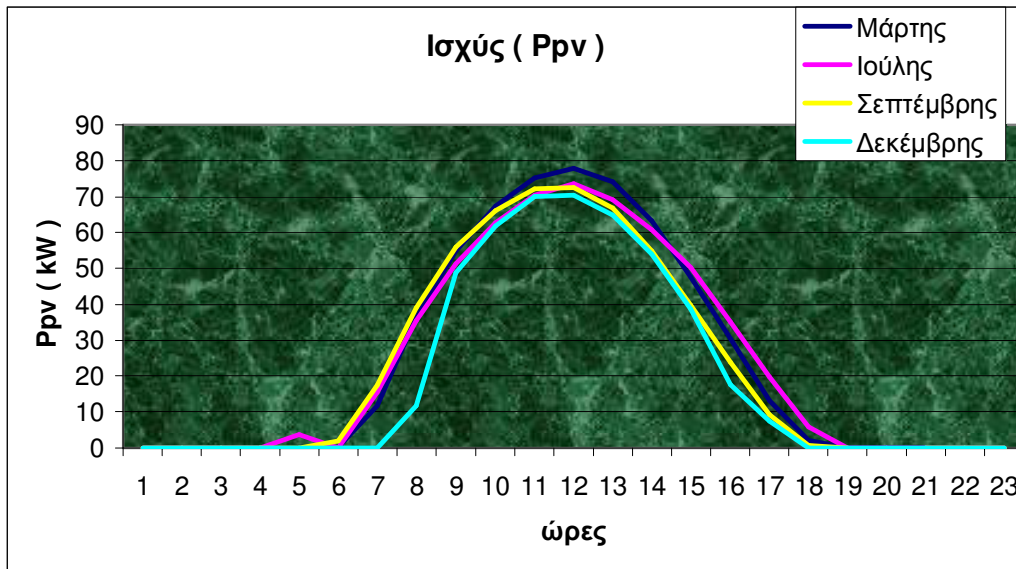
Πίνακας 4.1 :Μέγιστη ισχύς του έτους για διαφορετικές κλίσεις

Ώρες	Μέρες	Μήνες	Κλίση β μοίρες	Θ μοίρες	G_t kW/m^2	Ισχύς kW
13:00	70	Μάρτης	38	7,70	1,12	85,93
12:00	160	Ιούλης	23	9,58	1,20	82,88
12:00	48	Φλεβάρης	53	9,57	1,13	86,10

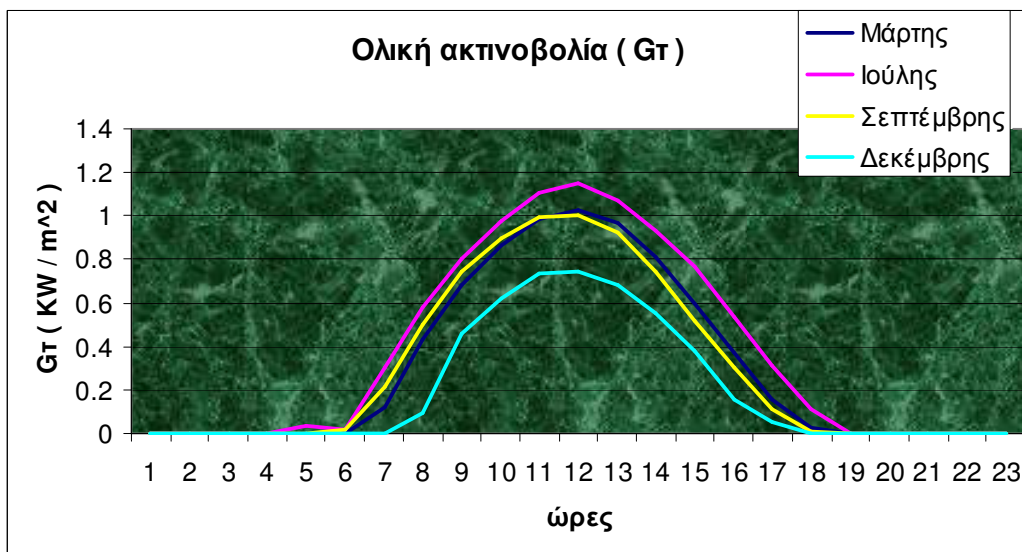
Παρατηρείται ότι για κλίση $\beta=23$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ που είναι η ετήσια βέλτιστη κλίση ιδανική για το καλοκαίρι η ισχύς είναι ιδιαίτερα υψηλή τους μηνές αυτούς. Η ισχύς είναι περίπου ίση με 80 kW για τον Ιούλη και φέρεται ξεκάθαρα η αύξηση που έχει ενώ για κλίση συλλέκτη $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ ήταν κοντά στα 70 kW. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_t παρατηρείται αυξημένη για τον μήνα του Ιουλίου απόλυτα λογικό καθώς είναι και ο κυριότερος παράγοντας που ευθύνεται για την αύξηση της ισχύς. Στους υπόλοιπους μήνες η ισχύς και η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_t μειώνονται αισθητά καθώς η κλίση του συλλέκτη είναι βέλτιστη μόνο για την καλοκαιρινή περίοδο.



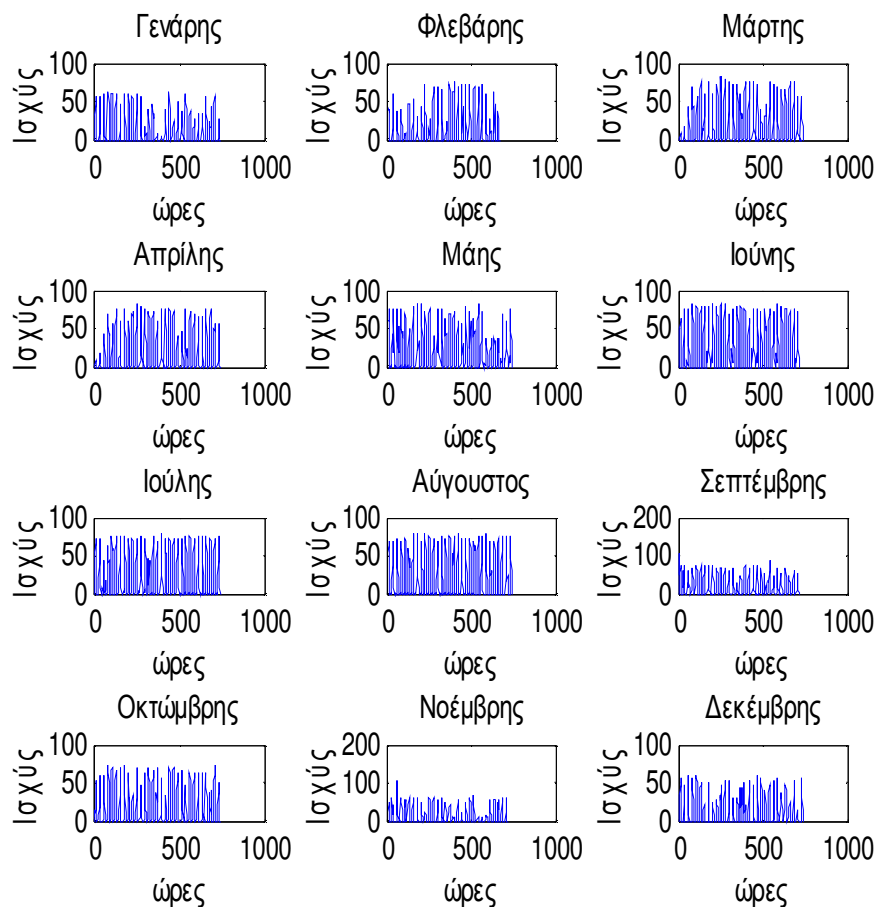
Σχήμα 4.14 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=23$ και $\gamma=0$



Σχήμα 4.15 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$

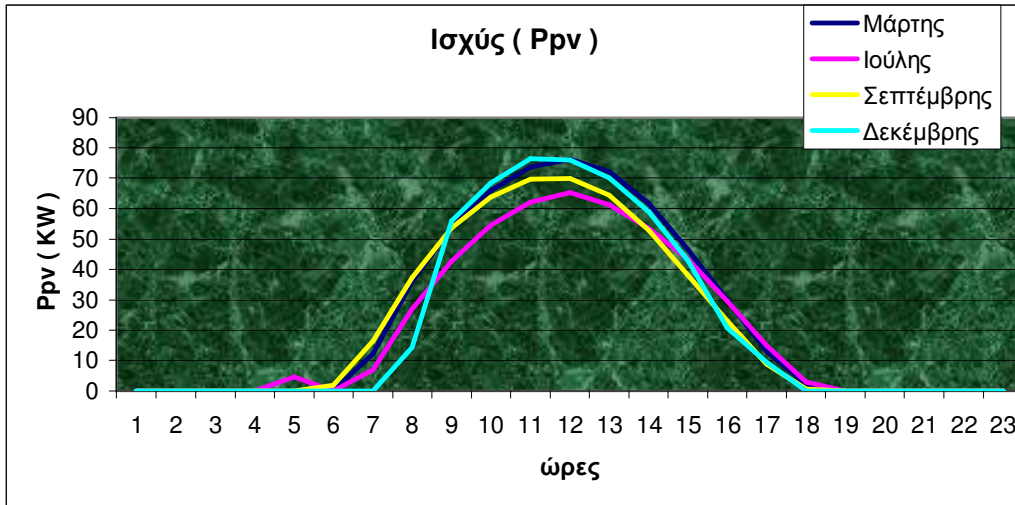


Σχήμα 4.16 :Γράφημα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας G_T για κλίση $\beta=23$ και $\gamma=0$

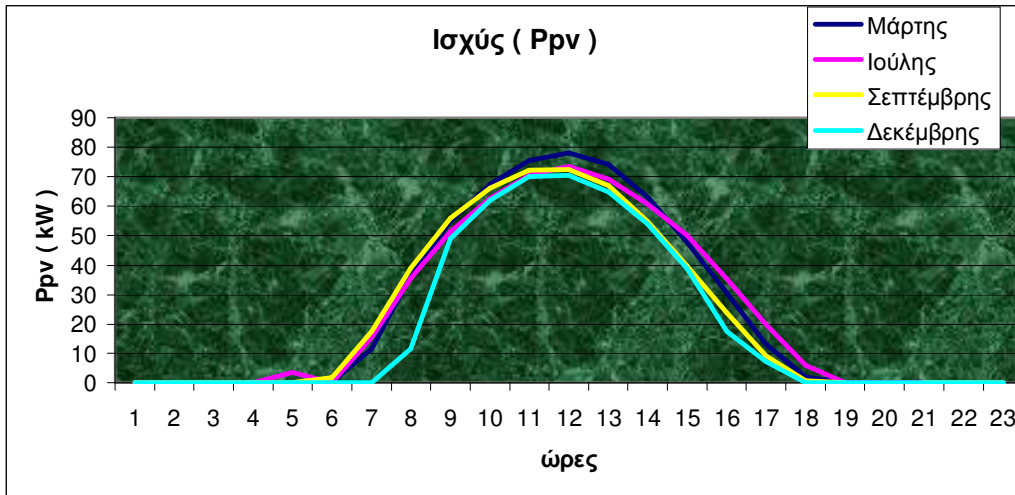


Σχήμα 4.17 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=23$ και $\gamma=0$ (Matlab)

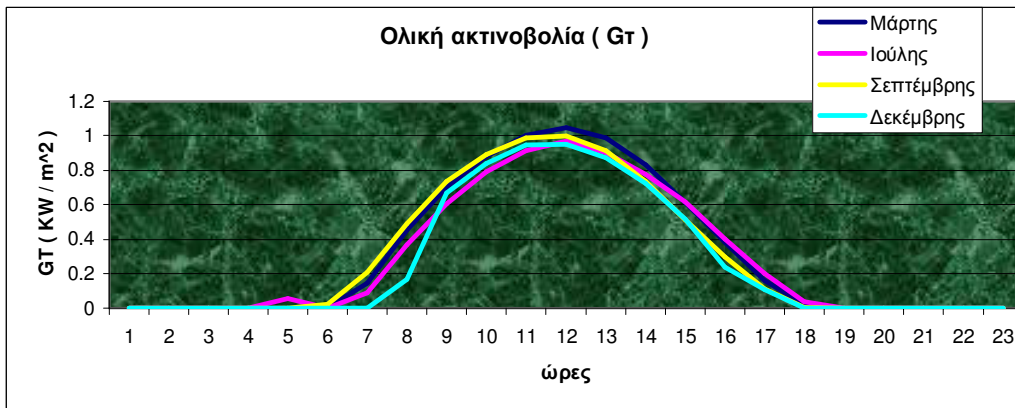
Παρατηρείται ότι για κλίση $\beta=53$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ που είναι η ετήσια βέλτιστη κλίση ιδανική για την χειμερινή περίοδο η ισχύς είναι ιδιαίτερα υψηλή τους μηνές αυτούς. Η ισχύς τίνει στα 80 kW για τον Δεκέμβρη και φένεται ξεκάθαρα η αύξηση που έχει ενώ για κλίση συλλέκτη $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ ήταν ίση με 70 kW και για κλίση συλλέκτη $\beta=23$ και $\gamma=0$ ήταν ίση με 60 kW . Η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_t παρατηρείται αυξημένη για τον μήνα του Δεκέμβρη(τίνει κοντά στο 1 kW) απόλυτα λογικό καθώς είναι και ο κυριότερος παράγοντας που ευθύνεται για την αύξηση της ισχύς. Στους καλοκαιρινούς μήνες η ισχύς και η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_t μειώνονται αισθητά καθώς η κλίση του συλλέκτη είναι βέλτιστη μόνο για την χειμερινή περίοδο. Ο συνδυασμός της χαμηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος και κατά συνέπεια του πλαισίου και της υψηλής ολικής ηλιακής ακτινοβολίας G_t έχουν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία υψηλής τάσης ανοιχτοκύκλωσης και υψηλού ρεύματος βραχυκύκλωσης αντίστοιχα, που συνεπάγεται με υψηλή ισχύ εξόδου.



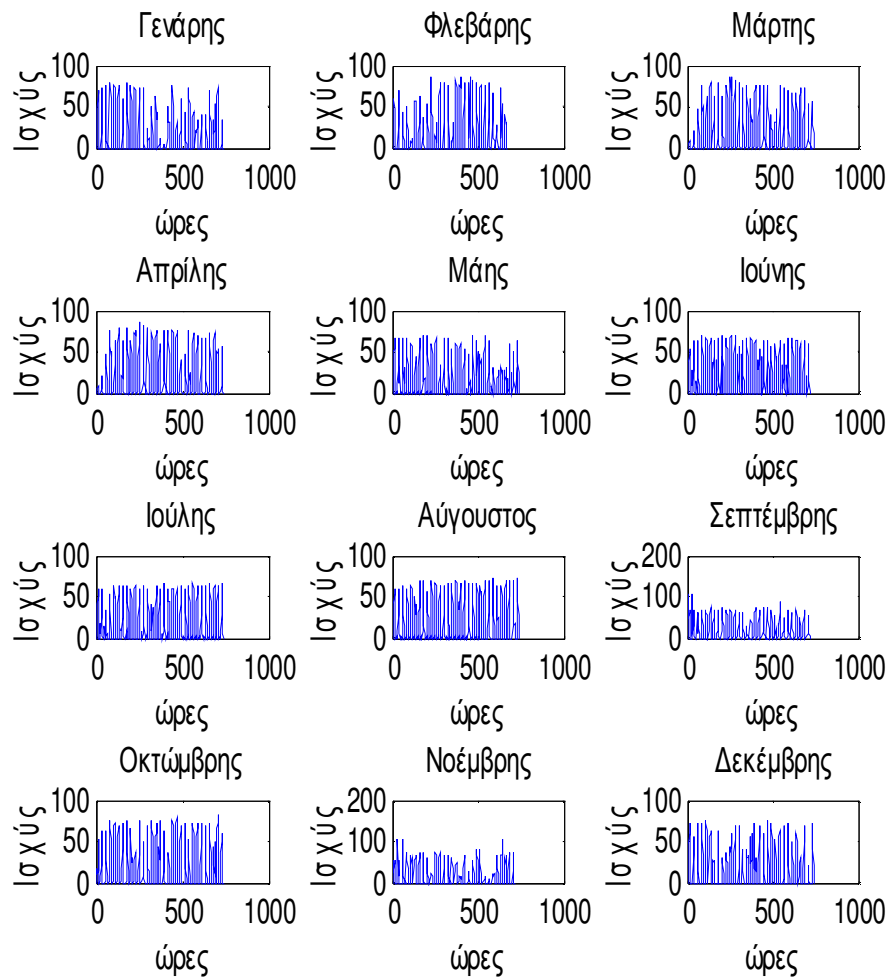
Σχήμα 4.18 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=53$ και $\gamma=0$



Σχήμα 4.19 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$

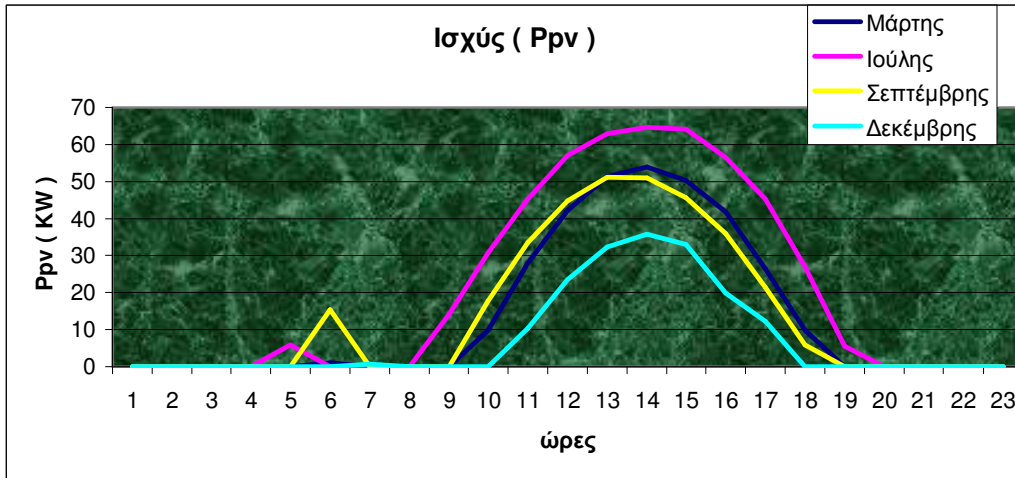


Σχήμα 4.20 :Γράφημα ολικής ακτινοβολίας Gt για κλίση $\beta=53$ και $\gamma=0$

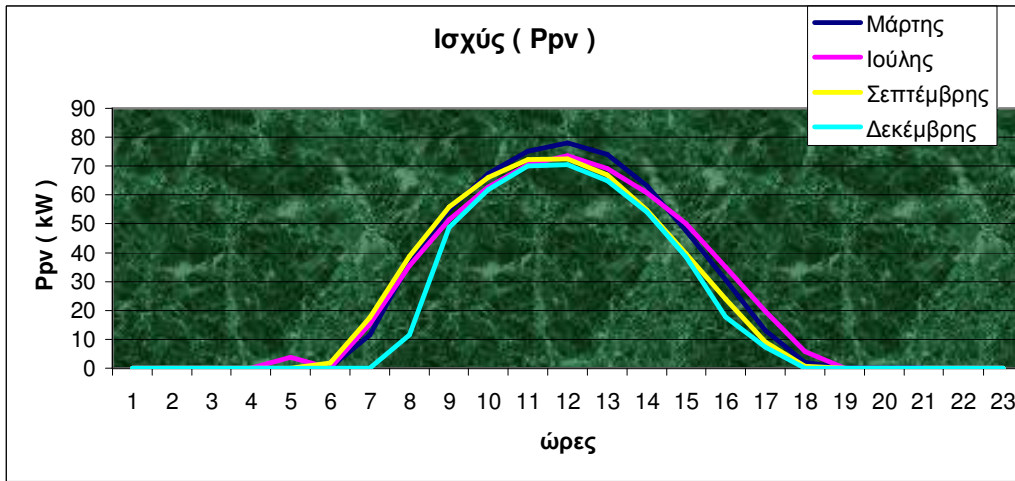


Σχήμα 4.21 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=53$ και $\gamma=0$ (Matlab)

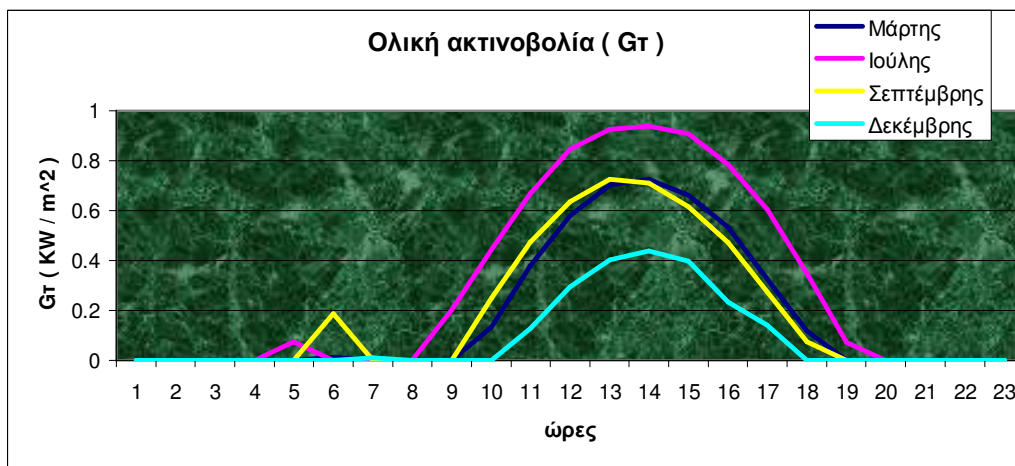
Παρατηρείται ότι για κλίση $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=90$ (δύση-υπερβαίνουμε το όριο των 30 μοιρών που έχει ελάχιστη επίδραση στην ισχύ της Φ/β συστοιχίας) η ισχύς έχει σημαντική πτώση σε όλους τους μήνες. Το καλοκαίρι έχει την μικρότερη πτώση και ο χειμώνας την μεγαλύτερη. Τον χειμώνα ο ήλιος καθυστερεί να ανατέλει και δύει πιο γρήγορα από ότι το καλοκαίρι με αποτέλεσμα να έχει και την μεγαλύτερη πτώση ισχύς σε ένα προσανατολισμένο συλλέκτη στη δύση. Εξαιτίας του προσανατολισμού του συλλέκτη στην δύση η Φ/β συστοιχία καθυστερεί να εκτεθεί στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια το χρονικό διάστημα που παράγεται η ισχύς μετατοπίζεται προς το απόγευμα. Η καμπύλη έχει πολύ μικρότερο εύρος τιμών και η ισχύς παράγεται για μικρό χρονικό διάστημα.



Σχήμα 4.22 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=90$

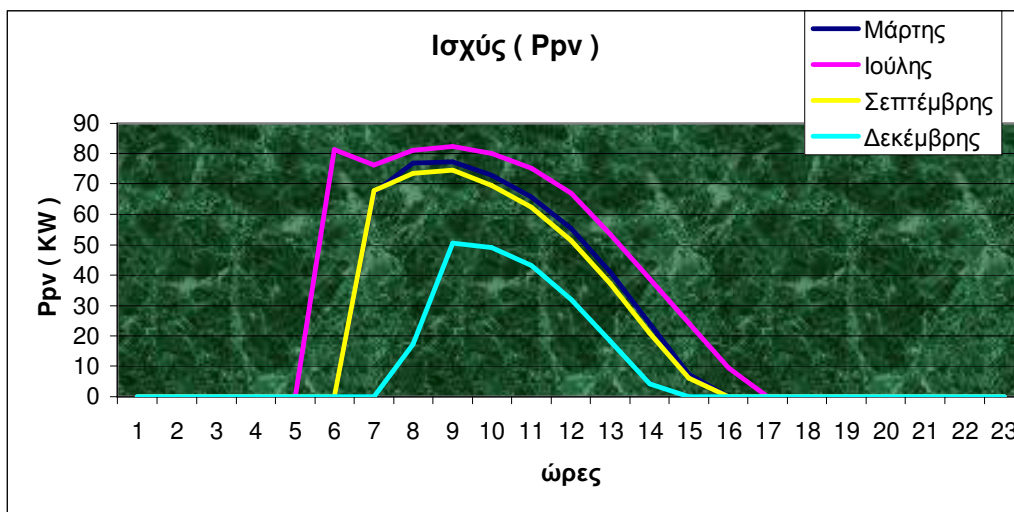


Σχήμα 4.23 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$

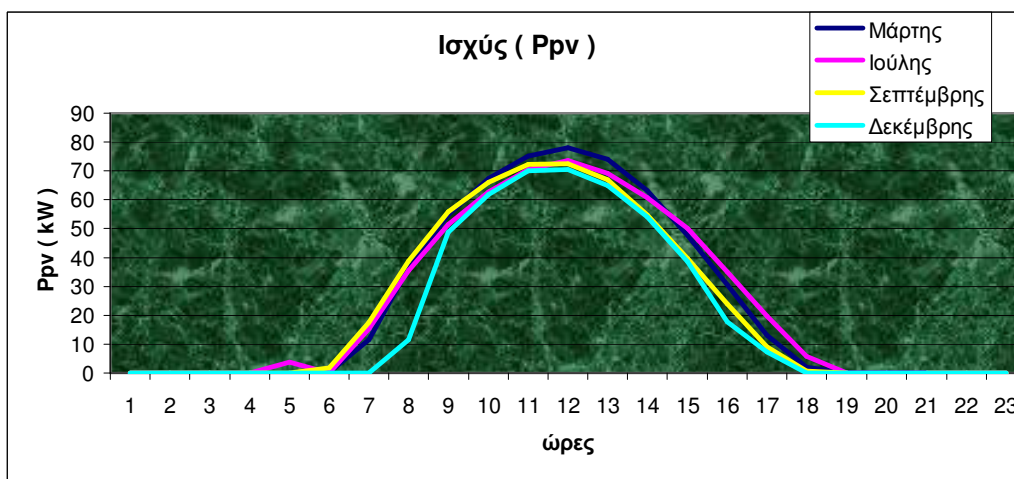


Σχήμα 4.24 :Γράφημα ολικής ακτινοβολίας Gt για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=90$

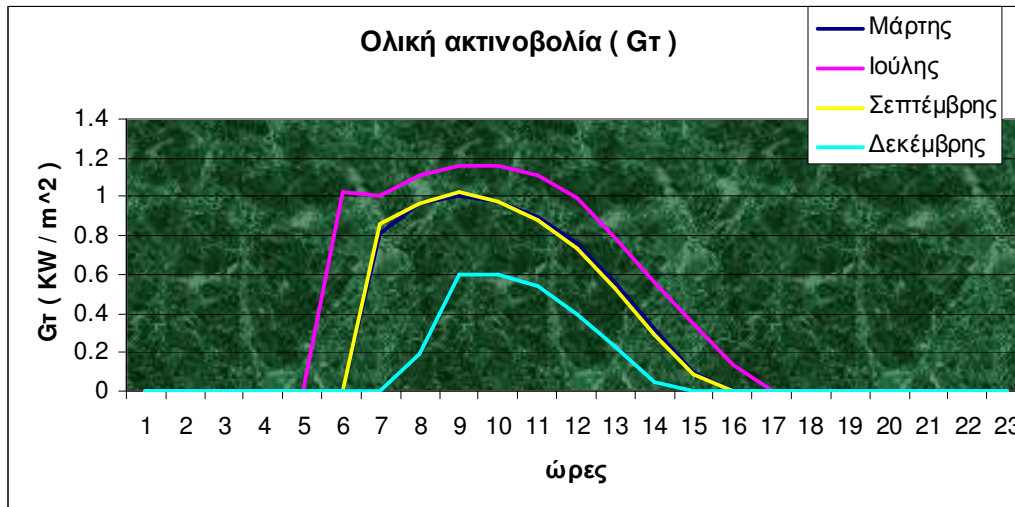
Παρατηρείται ότι για κλίση $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=-90$ (ανατολή-υπερβαίνουμε το όριο των 30 μοιρών που έχει ελάχιστη επίδραση) η ισχύς έχει σημαντική πτώση σε όλους τους μήνες. Εξαιτίας του προσανατολισμού του συλλέκτη στην ανατολή αλλάζουν οι ώρες από τις οποίες αρχίζει να παράγει ισχύ στην έξοδο. Η ισχύς που παράγεται ευνοείται ιδιαίτερα τις πρωινές ώρες που ο συλλέκτης είναι προσανατολισμένος στην ανατολή. Η γωνία πρόσπτωσης ελαχιστοποιείται και η άμεση ακτινοβολία που δέχεται ο συλλέκτης μεγιστοποιείται τις πρωινές ώρες. Η καμπύλη έχει πολύ μικρότερο εύρος τιμών και η ισχύς παράγεται για μικρό χρονικό διάστημα και κατά συνέπεια η συνολική ενέργεια που παράγεται είναι λιγότερη από μια Φ/β συστοιχία στραμμένη στο νότο.



Σχήμα 4.25 :Γράφημα ισχύς Φ/β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=-90$

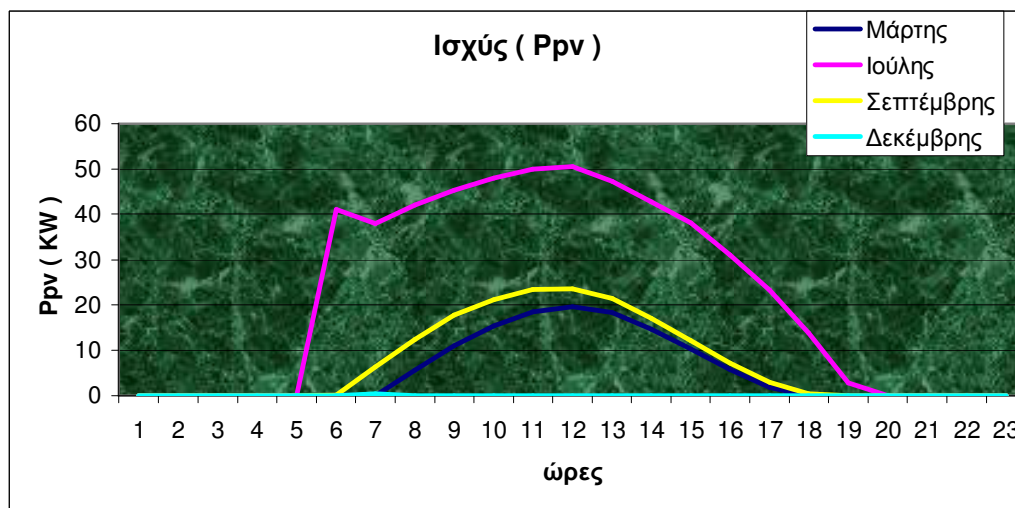


Σχήμα 4.26 :Γράφημα ισχύς Φ/β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$

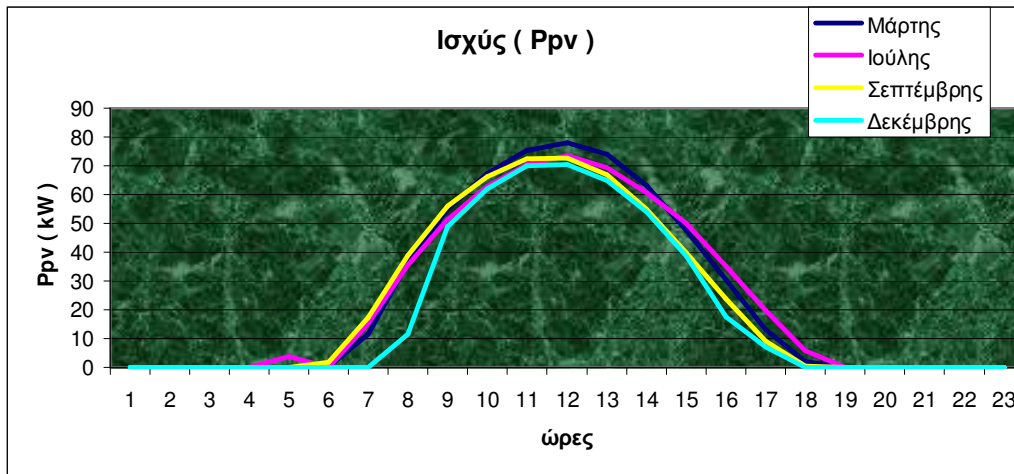


Σχήμα 4.27 :Γράφημα ολικής ακτινοβολίας G_T για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=-90$

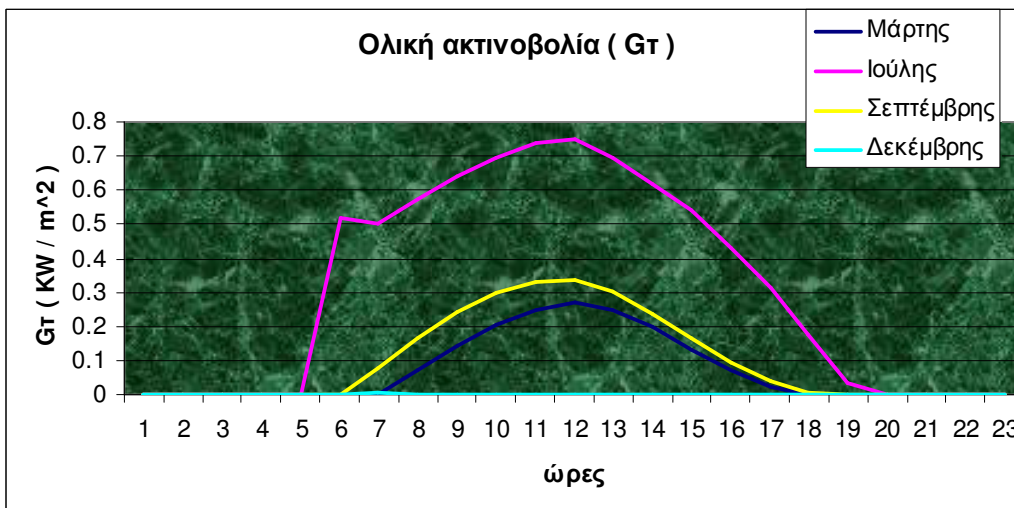
Παρατηρείται ότι για κλίση $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=-180$ (βορράς-υπερβαίνουμε το όριο των 30 μοιρών που έχει ελάχιστη επίδραση στην ισχύ) η ισχύς έχει μεγάλη πτώση σε όλους τους μήνες. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα χρονικά διαστήματα που παράγει ισχύ η Φ/β συστοιχία είναι περίπου ίσα με τα αντίστοιχα που ήταν για κλίση συλλέκτη $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$. Μεγάλο μειονέκτημα δεν παύει όμως να είναι η πολύ χαμηλές τιμές ισχύος που οφείλονται στην πολύ χαμηλή ολική ηλιακή ακτινοβολία G_T . Το πιο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η ισχύς κατά την χειμερινή περίοδο μηδενίζεται και οφείλεται στο ότι η ολική ηλιακή ακτινοβολία είναι και αυτή περίπου ίση με μηδέν.



Σχήμα 4.28 :Γράφημα ισχύς Φ/β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=-180$ η 180 μοίρες

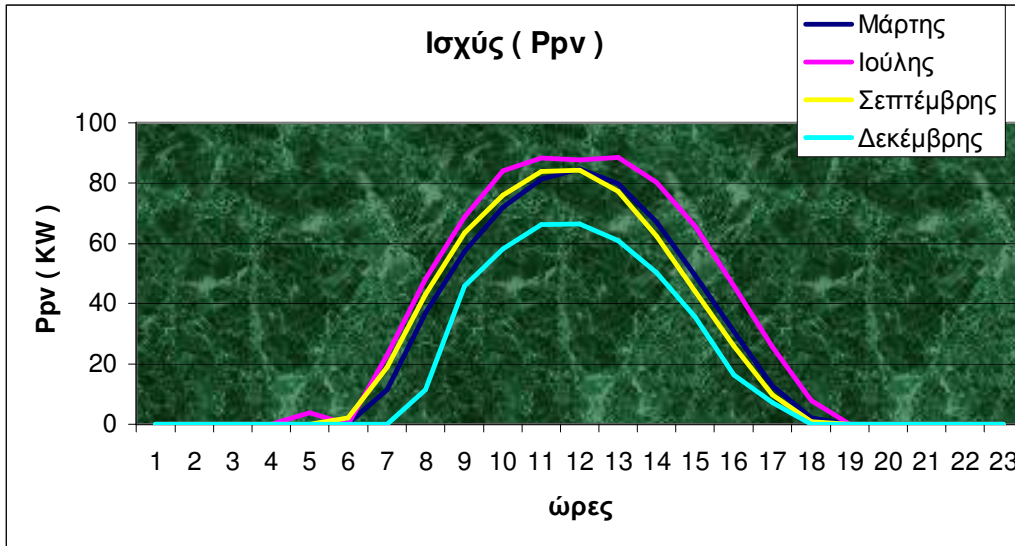


Σχήμα 4.29 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$

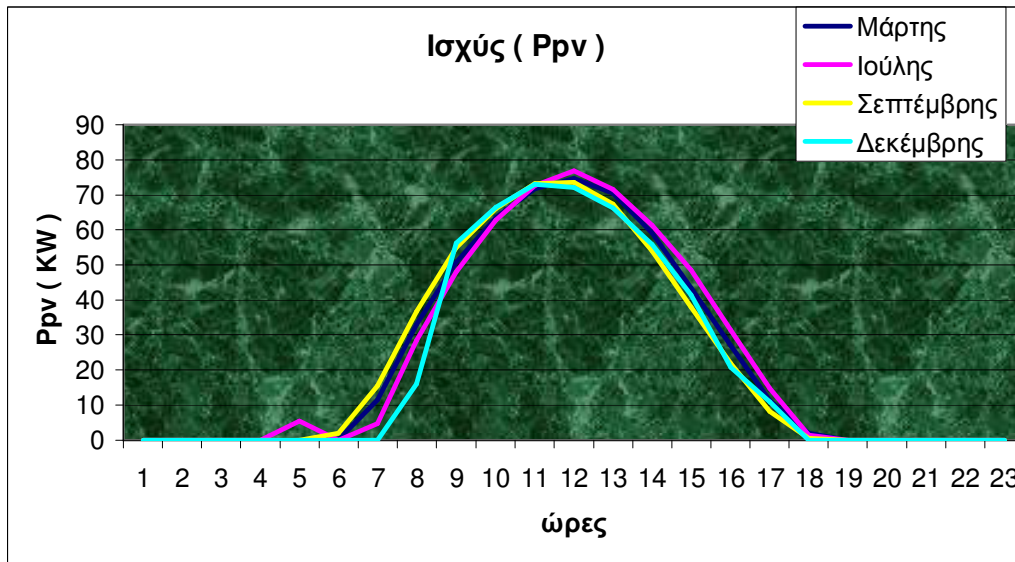


Σχήμα 4.30 :Γράφημα ολικής ακτινοβολίας G_t για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=-180$ η 180 μοίρες

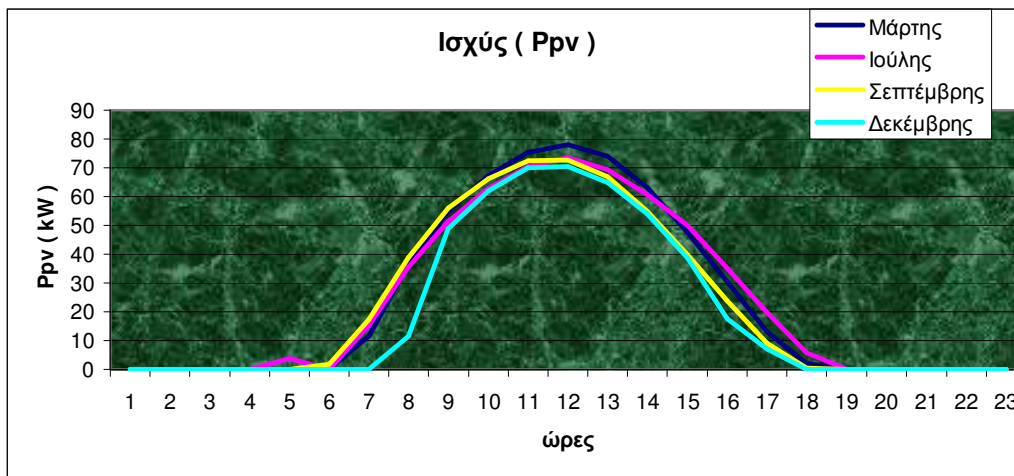
Παρατηρείται ότι για κλίση $\beta=38$ γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ και τιμή ανακλαστικότητας εδάφους ίση με 0.60(χιόνι) η ισχύς κατά την καλοκαιρινή περίοδο καθώς και για τον μήνα του Μάρτη και Σεπτέμβρη αυξάνει ενώ τον Δεκέμβρη μειώνεται ελάχιστα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με αύξηση της γωνίας β του συλλέκτη πχ στις 70 μοίρες φένεται ότι η ισχύς τον μήνα Δεκέμβρη αυξάνει αισθητά. Με τον τρόπο αυτό ο συλλέκτης έχει την δυνατότητα να απορροφάει μεγαλύτερα ποσά ανακλώμενης ακτινοβολίας που προέρχονται από το χιόνι(ιδιαίτερα μεγάλος συντελεστής ανακλαστικότητας ίσος με 0.60)



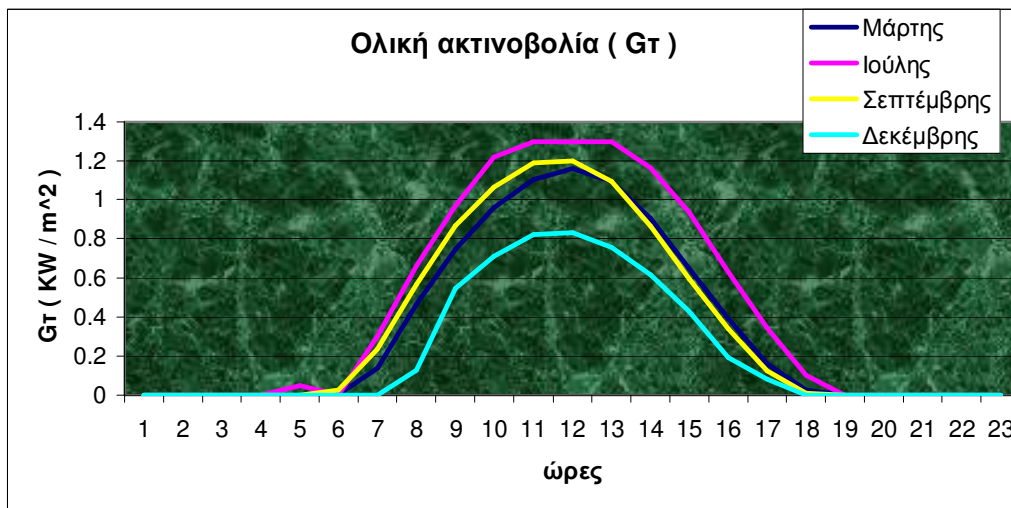
Σχήμα 4.31 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για τιμή ανακλαστικότητα ιση με 0.60(χιόνι)



Σχήμα 4.32 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=70$ και $\gamma=0$ για τιμή ανακλαστικότητα ιση με 0.60(χιόνι)



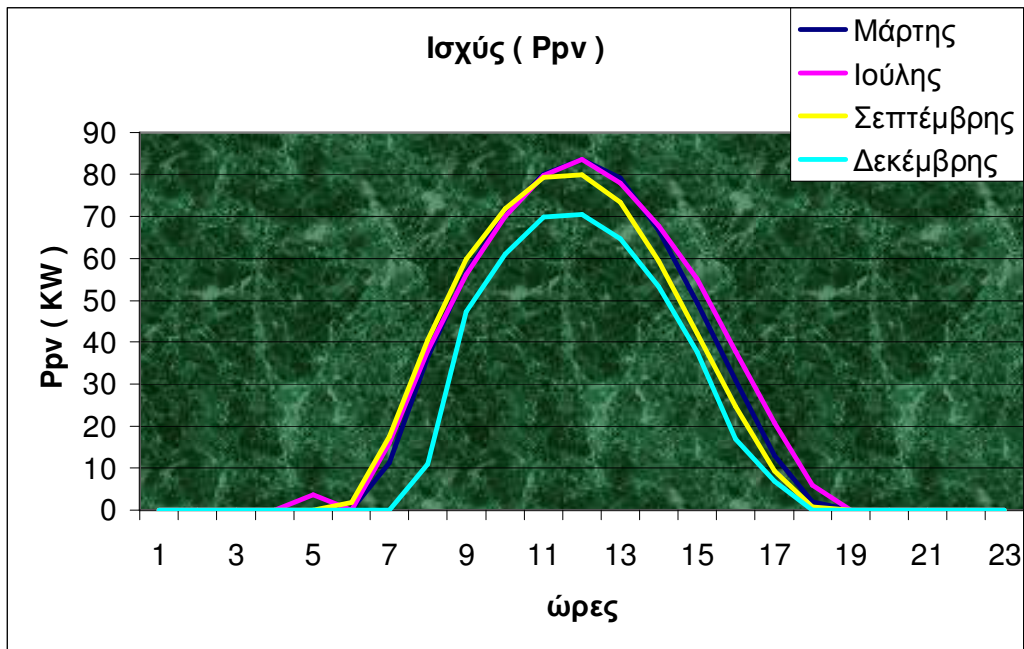
Σχήμα 4.33 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για τιμή ανακλαστικότητας ίση με 0.20



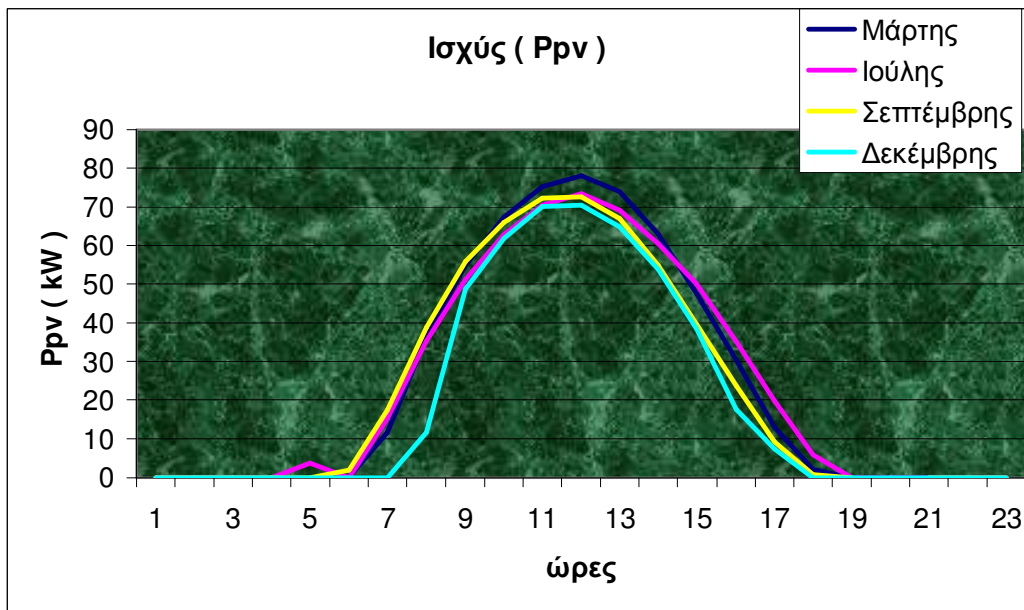
Σχήμα 4.34 :Γράφημα ολικής ακτινοβολίας G_t για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για τιμή ανακλαστικότητας ίση με 0.60(χιόνι)

Από τα παρακάτω γραφήματα φαίνεται ότι το άμορφο πυρίτιο συμπεριφέρεται καλύτερα από το μονοκρυσταλλικό και ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στην Ελλάδα. Αν και το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει απόδοση από 15-18% ενώ το άμορφο μόλις 6-8% οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκα thin films πυριτίου είναι καλύτερες για περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει

διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά). Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκα στοιχεία.



Σχήμα 4.35 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για άμορφο πυρίτιο ίσο με -0.0011

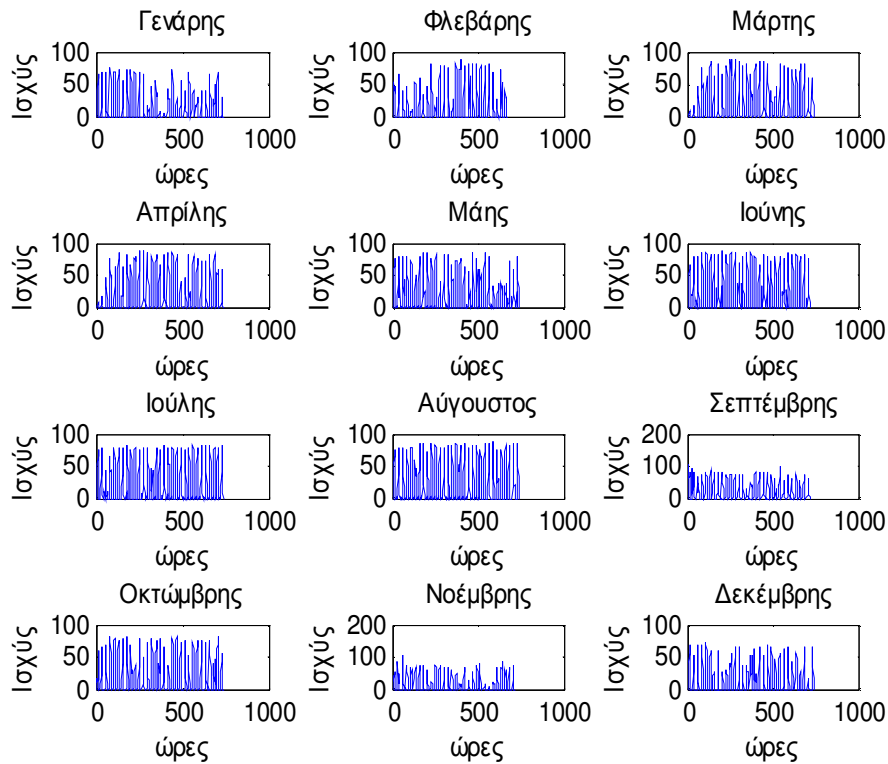


Σχήμα 4.36 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για μονοκρυσταλλικό πυρίτιο -0.004

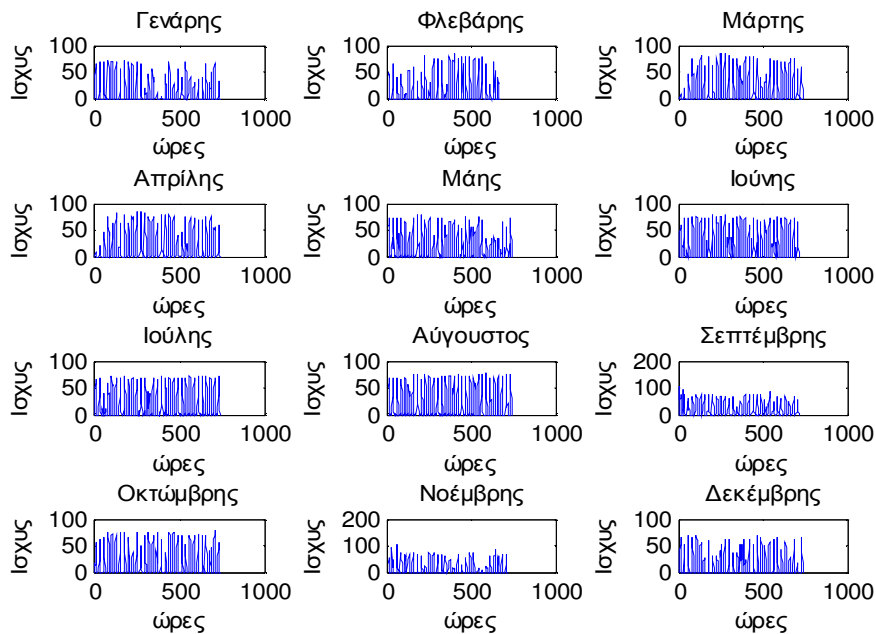
Πίνακας 4.2 : Συνολική ετήσια ενέργεια για διαφορετικό τύπο πυρίτιου

Άμορφο πυρίτιο (θερμοκρασιακός συντελεστής -0.0011)		Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (θερμοκρασιακός συντελεστής -0.004)	
Κλίση	Ετήσια συνολική ενέργεια(MWh)	Κλίση	Ετήσια συνολική ενέργεια (MWh)
23	158,74	23	150,80
33	161,28	33	153,44
53	153,14	53	146,31

Σύγκριση ισχύς Φ/β συστοιχίας μεταξύ μονοκρυσταλλικού πυρίτιου και άμορφου :



Σχήμα 4.37 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για άμορφο πυρίτιο ίσο με -0.0011 (Matlab)



Σχήμα 4.38 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για μονοκρυσταλλικό πυρίτιο ίσο με -0.004 (Matlab)

Συμπέρασμα: Για κλίση συλλέκτη $\beta=33$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ έχουμε την καλύτερη δυνατή παραγωγή ενέργειας σε ένα έτος. Το σύστημα της Φ/β συστοιχίας βρίσκεται σε βέλτιστη κλίση για όλους τους μήνες τους έτους και τα αποτελέσματα είναι περισσότερο ικανοποιητικά από τις άλλες κλίσεις. Το καλοκαίρι για βέλτιστη κλίση 23 μοιρών παρουσιάζει καλύτερη συνολική ενέργεια από ότι ο χειμώνας για την δικία του βέλτιστη κλίση 53 μοιρών το οποίο δικαιολογείται καθώς η καλοκαιρινή περίοδος είναι πιο παραγωγική και η οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία G είναι ιδιαίτερα υψηλή σε σχέση με το χειμώνα και επηρεάζει έμμεσα την αποδιδόμενη ισχύ.

Πίνακας 4.3 : Συνολική ετήσια ενέργεια για διαφορετικές κλίσεις

Κλίση (μοίρες)	Αζιμούθιο (μοίρες)	Συνολική ετήσια ενέργεια (MWh)
23	0	150,80
28	0	152,59
33	0	153,44
38	0	153,27
43	0	152,02
48	0	149,70
53	0	146,31

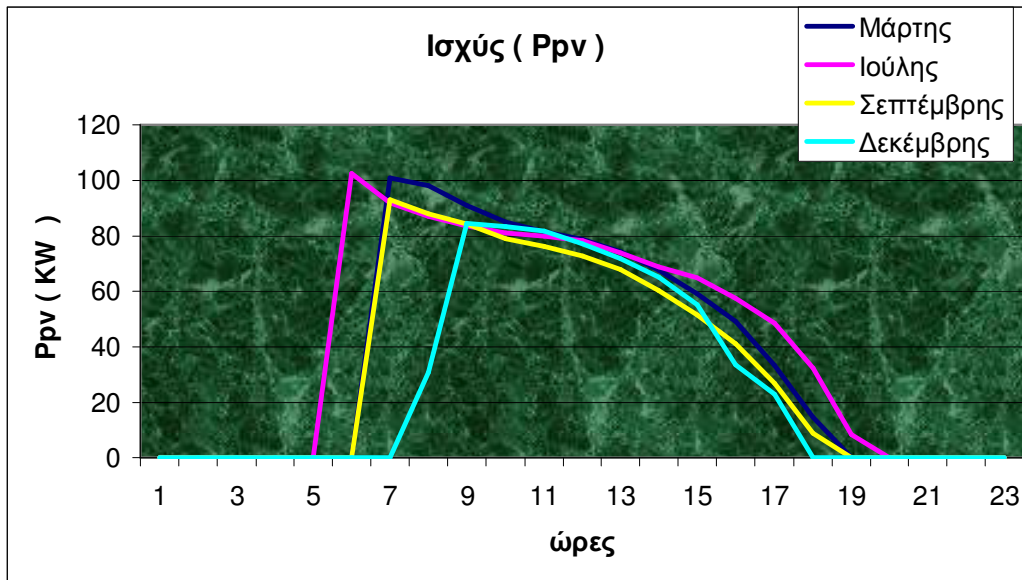
Τα συμπεράσματα αναφέρονται σε Φ/Β συστοιχίες μόνιμα στερεωμένες σε βάση που δεν μετακινείται, στις οποίες η κλίση β και η γωνία αζιμουθίου γ παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια του έτους. Ένας πρακτικός κανόνας σχετικά με τη χωροθέτηση Φ/Β συστοιχιών αυτού του τύπου, έτσι ώστε η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να είναι μέγιστη, προτείνει την υιοθέτηση κλίσης ίσης με το γεωγραφικό πλάτος ϕ της τοποθεσίας της Φ/Β συστοιχίας και γωνίας αζιμουθίου ίσης με το μηδέν.

4.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΓΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ G ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ T ΓΙΑ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ TRACKER (MATLAB)

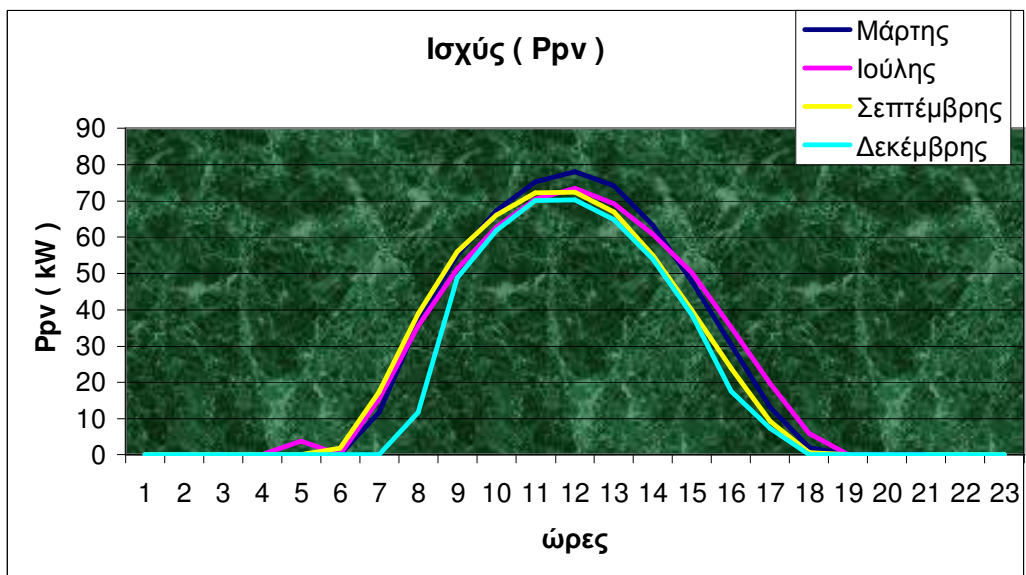
Για την εξαγωγή των παρακάτω αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε στο Matlab ισχύ αιχμής $P_{stc}=100KW$.

Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει το σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου δύο αξόνων είναι η κλίση β του συλλέκτη να είναι ίση με τη γωνία ζενίθ του ήλιου Θ_z και η γωνία αζιμουθίου γ του συλλέκτη να είναι ίση με τη γωνία αζιμουθίου του ήλιου γ_s καθ' όλη τη διάρκεια της μέρας. Παρατηρώντας τους παρακάτω τύπους (2.7) (2.19) (2.22) (2.23) γίνεται αντιληπτό ότι η νέα κλίση β και η γωνία αζιμουθίου του συλλέκτη που προκύπτουν για σύστημα δύο αξόνων (Tracker) επιδρούν έμμεσα και αυξάνουν την ολική ακτινοβολία G_t , με συνέπεια την αύξηση της συνολικής ισχύς P_{pv} . Στο γεγονός αυτό συμβάλει και η γωνία πρόσπτωσης θ η οποία είναι μηδενική στο σύστημα δύο αξόνων και οι ακτίνες του ήλιου είναι κάθετες στο κάτοπτρο.

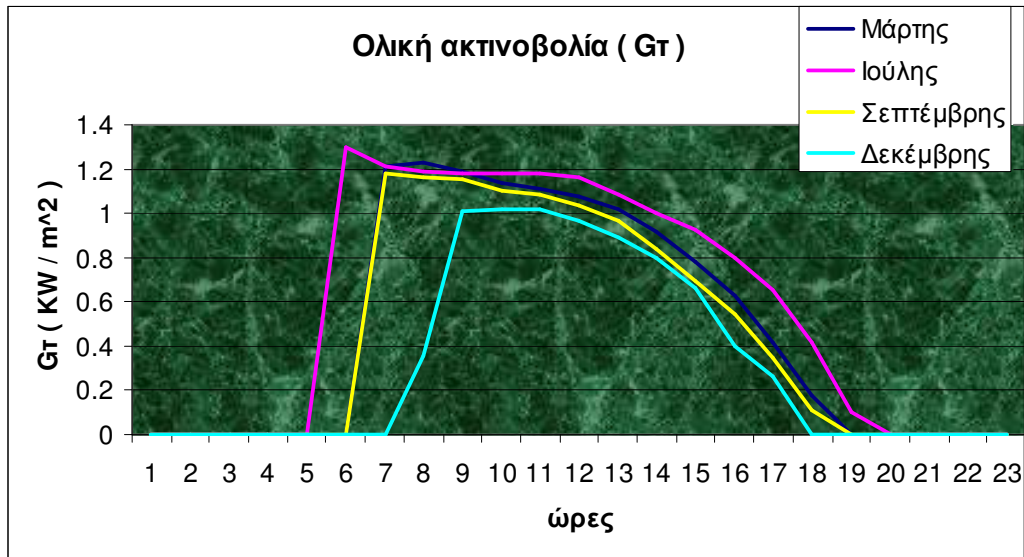
Παρατηρείται για σύστημα δύο αξόνων ότι η ισχύς αυξάνεται σε όλες τις εποχές του χρόνου σε σύγκριση με το σύστημα σταθερής στήριξης το οποίο έχει βέλτιστη κλίση $\beta=38$ και προσανατολισμό νότιο $\gamma=0$. Η αύξηση της ισχύς στο σύστημα Tracker οφείλεται τόσο στην αύξηση της ολικής ακτινοβολίας G_t όσο και στο ότι η γωνία πρόσπτωσης θ μηδενίζει και η ακτίνες του ήλιου είναι κάθετες στο συλλέκτη για όλη τη διάρκεια της μέρας. Διακρίνεται στην ανατολή και τη δύση του ηλίου πολύ υψηλή ισχύ. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το σύστημα δύο αξόνων ακολουθεί την τροχιά του ήλιου από την ανατολή μέχρι την δύση με αποτέλεσμα οι ακτίνες του ήλιου να είναι διαρκώς κάθετες στο συλλέκτη. Έτσι δικαιολογείται η διαφορετικότητα στις παρακάτω καμπύλες ισχύος.



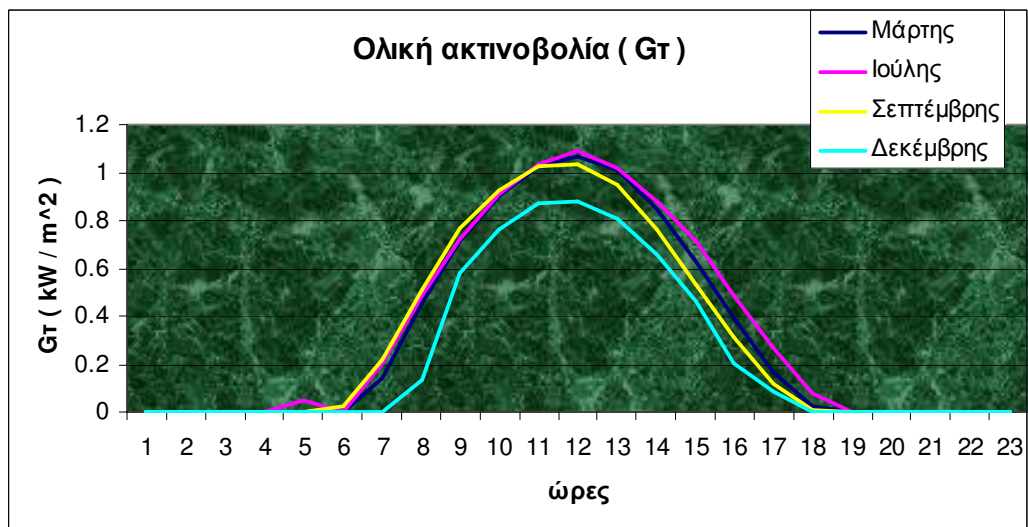
Σχήμα 4.39 : Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για σύστημα Tracker



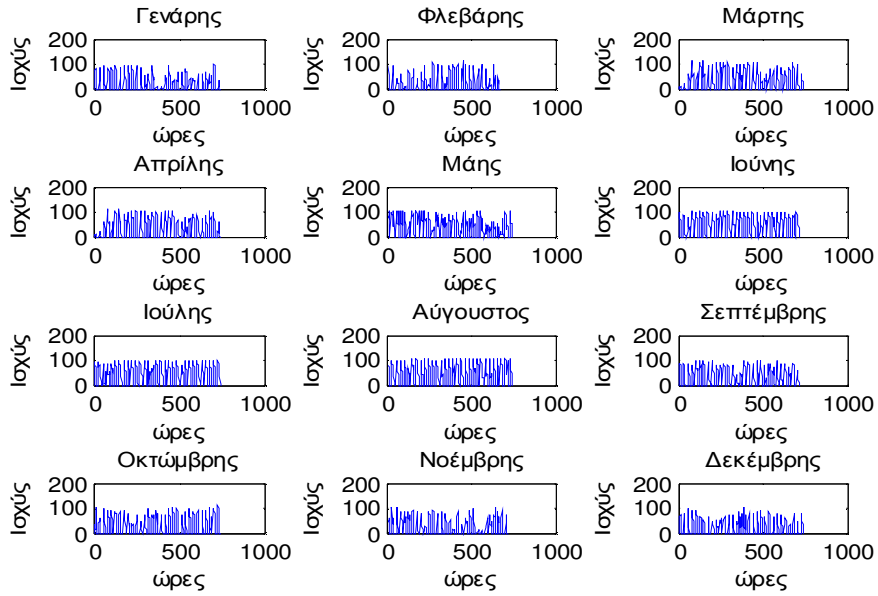
Σχήμα 4.40 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για φ/β συστοιχίες σταθερής στήριξης.



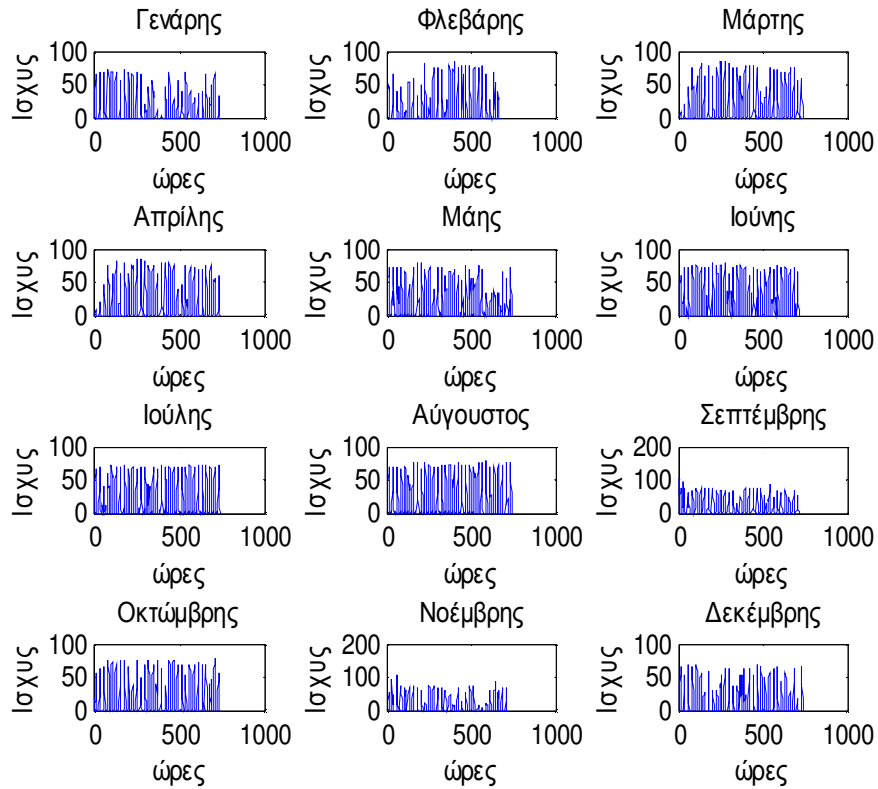
Σχήμα 4.41 :Γράφημα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας Gt για σύστημα δύο αξόνων(Tracker)



Σχήμα 4.42 :Γράφημα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας Gt για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για ϕ/β συστοιχίες σταθερής στήριξης



Σχήμα 4.43 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για $\phi=38$ για σύστημα Tracker



Σχήμα 4.44 :Γράφημα ισχύς Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για ϕ/β συστοιχίες σταθερής στήριξης

Παρατηρείται όπως είναι αναμενόμενο ότι το σύστημα δύο αξόνων(Tracker) αποδίδει πολύ καλύτερα από το σύστημα σταθερής στήριξης.

Πίνακας 4.4 : Συνολική ετήσια ενέργεια για σύστημα Tracker και σύστημα σταθερής στήριξης φ/β συστοιχιών

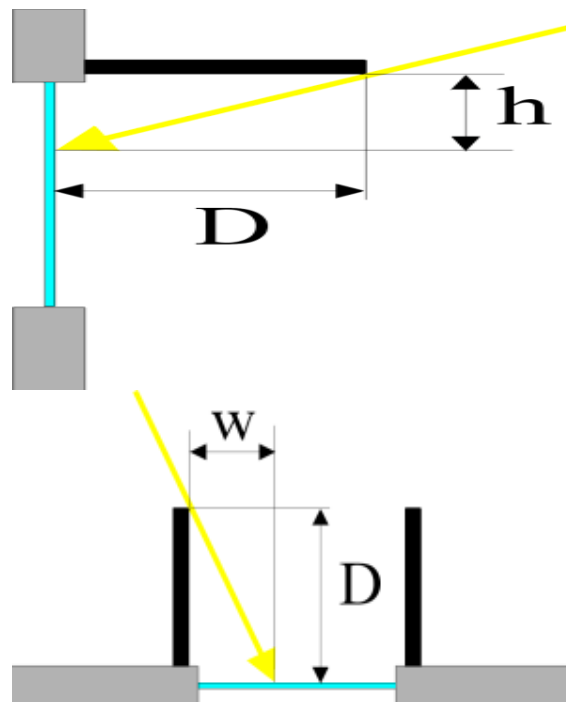
Κλίση(μοίρες)	Αζιμούθιο(μοίρες)	Συνολική ετήσια ενέργεια (MWh)
$\beta=\Theta z$	$\gamma=\gamma s$	238,55
$\beta=38$	$\gamma=0$	153,27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΚΙΑΣΗ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΚΙΑΣΗ

Η ανάλυση της σκίασης είναι ένα από τα πιο σημαντικά βήματα στην σχεδίαση και την ανάλυση συστημάτων ηλιακής ενέργειας. Στα Φ/β συστήματα είναι πολύ σημαντικό η ανάλυση της σκίασης που προκαλείται από περιφερειακά αντικείμενα. Σε ειδικές περιπτώσεις όπως η ανάλυση η ο σχεδιασμός BIPV(building integrated PV systems) συστημάτων είναι πολύ σημαντικό να γίνεται ακριβής υπολογισμός και ανάλυση της σκίασης πάνω στα συστήματα αυτά. Παρόμοια ανάλυση απαιτείται κατά τον σχεδιασμό σπιτιών με συστήματα ηλιακής ενέργειας και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο προσεκτικός σχεδιασμός των προεξοχών σε κάθε περίπτωση. Οι υπολογισμοί της σκίασης μπορούν να γίνουν με απλές εξισώσεις και πιο συγκεκριμένα όταν το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι απλό. Ειδικά εργαλεία με γραφικό περιβάλλον όπως το Pilkington χρησιμοποιούνται για την λύση απλών υπολογισμών. Για την αντιμετώπιση πιο πολύπλοκων προβλημάτων υπάρχουν αρκετά υπολογιστικά εργαλεία εκ των οποίων κάποια παρέχουν την δυνατότητα 3D εξομοίωσης. Σε περίπτωση που η σκίαση δεν μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές βελτίωσης. Γενικά για απλές περιπτώσεις ο υπολογισμός της σκίασης δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολος για συγκεκριμένες μέρες και ώρες. Παρακάτω βρίσκονται κάποιες εξισώσεις για τον υπολογισμό της σκίασης στις πιο συνηθισμένες περιπτώσεις για πρακτική μηχανική.



Σχήμα 5.1 : Οριζόντιες και κάθετες συσκευές σκίασης

$h = \frac{D \cdot \tan a}{\cos(\varphi - \psi)}$	5.1
---	-----

$w = D \cdot \tan(\varphi - \psi)$	5.2
------------------------------------	-----

$\gamma = \arctan\left(\frac{\tan a}{\cos(\varphi - \psi)}\right)$	5.3
--	-----

Όπου h, D είναι γεωμετρικά μεγέθη της οριζόντιας συσκευής σκίασης, a είναι το ύψος του ήλιου, φ είναι η γωνία αζιμουθίου του ήλιου, ψ η γωνία αζιμουθίου του επιπέδου και w είναι το γεωμετρικό μέγεθος της κάθετης συσκευής σκίασης.

Οι απώλειες λόγω σκίασης είναι αναπόφευκτες αλλά τουλάχιστον μπορούν να ελαχιστοποιηθούν. Η καλύτερη χρονική στιγμή για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο είναι να γίνει κατάλληλη μελέτη κατά την φάση σχεδιασμού του Φ/β συστήματος. Τα κρυσταλλικά πλαίσια όταν τοποθετούνται πρέπει να είναι πάντα τοποθετημένα οριζόντια και ποτέ κάθετα. Το κάθε κρυσταλλικό πλαίσιο περιλαμβάνει δυο bypass διόδους που είναι ενεργές κατά την διάρκεια σκίασης. Όταν η κάτω σειρά του πλαισίου έχει σκίαση και τα πλαίσια είναι τοποθετημένα οριζόντια το πλαίσιο εξακολουθεί να βρίσκεται σε λειτουργία με κάποιο ποσοστό ισχύος της τάξης 50% η λιγότερο. Αυτό οφείλεται στο ότι μόνο η μια bypass διάδος είναι ενεργή. Στην αντίθετη περίπτωση δηλαδή όταν τα πλαίσια είναι τοποθετημένα κάθετα και η χαμηλότερη σειρά είναι υπό σκιά κατά ένα μεγάλο μέρος η ολοκληρωτικά τότε και οι δύο διόδοι είναι ενεργοί και το ποσοστό ισχύος εξόδου είναι κοντά στο μηδέν. Επίσης τα πλαίσια της συστοιχίας τα οποία βρίσκονται υπό συνθήκη σκίασης περισσότερο από τα άλλα μέρη της συστοιχίας θα πρέπει να συνδεθούν σε διαφορετικές ομάδες εάν είναι εφικτό. Αυτό θα εμποδίσει επιπλέον απώλειες σε ολόκληρο το σύστημα καθώς η σκίαση θα επηρεάζει μόνο ένα μέρος της συστοιχίας. Σε περιπτώσεις που η σκίαση δεν μπορεί να αποφευχθεί η χρήση άμορφου πλαισίου πυριτίου είναι πιο κατάλληλη και αυτό οφείλεται στο ότι το συγκεκριμένο υλικό έχει την ικανότητα να αποδίδει περισσότερο σε συνθήκες σκίασης.

Είναι αξιοσημείωτο ότι σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως φαίνεται παρακάτω με το παράδειγμα της στέγης της εκκλησίας, μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε της απώλειες λόγω σκίασης με προσεκτική σχεδίαση της συστοιχίας.

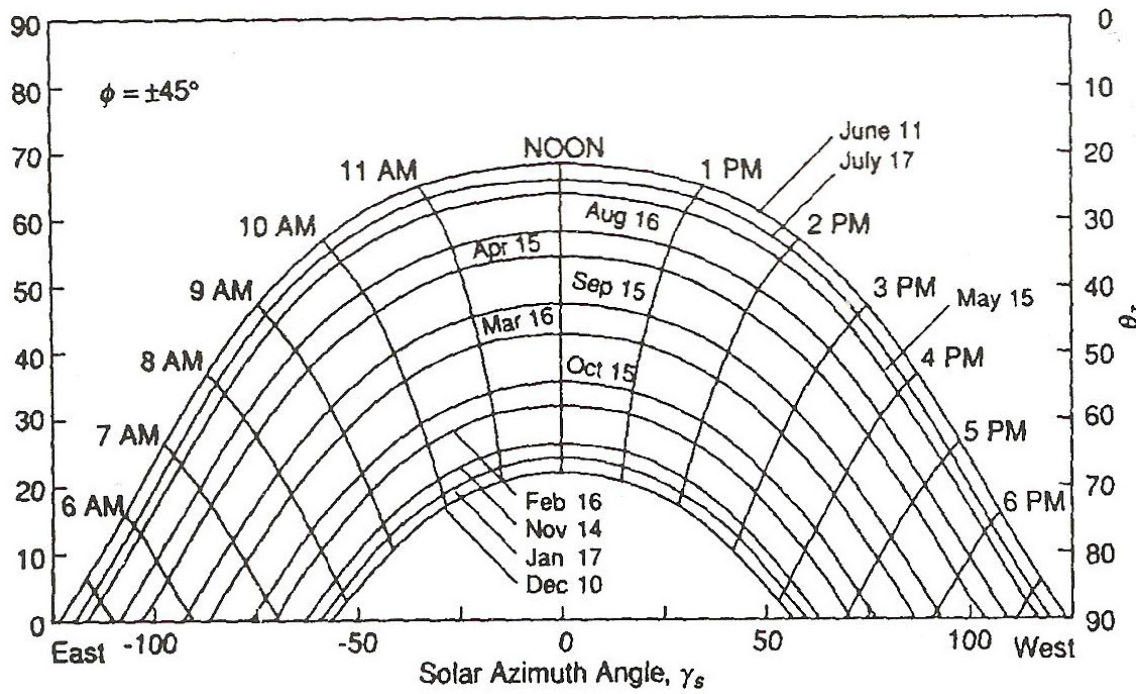


Σχήμα 5.2: Προσανατολισμός των πλασιών σε σειρές σε στέγη εκκλησίας

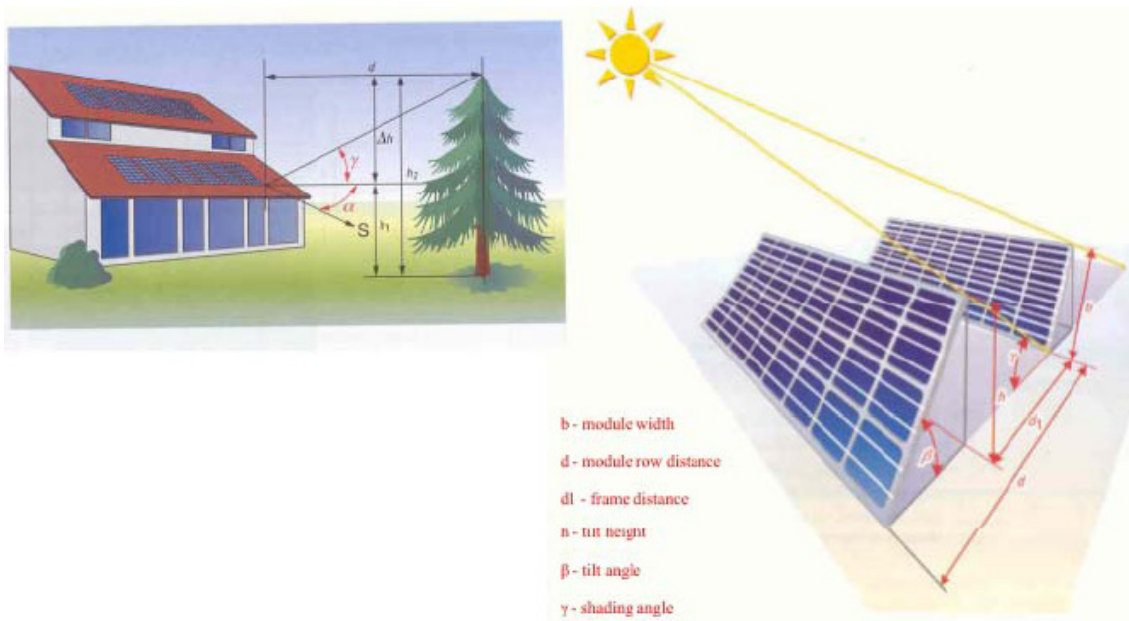
5.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΚΙΑΣΗΣ

Τα κύρια προβλήματα που δημιουργεί η σκίαση χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία βασίζεται στην σκίαση που προκαλείται από δέντρα κτήρια ή άλλα αντικείμενα τα οποία βρίσκονται κοντά στον συλλέκτη. Σε περίπτωση που οι γεωμετρίες των αντικειμένων αυτών είναι ακανόνιστες και κατά συνέπεια δύσκολες προσδιορίσιμες, για να βρεθεί η σκίαση απαιτούνται πολύπλοκοι υπολογισμοί. Ειδικά διαγράμματα χρησιμοποιούνται με την θέση του ήλιου στον ουρανό.(πχ διαγράμματα με την γωνία ύψους του ήλιου σε συνάρτηση με τη γωνία αζιμουθίου του ήλιου και τη γωνία ζενίθ έτσι ώστε να διακρίνεται πότε το <<μονοπάτι>> μεταξύ του ήλιου και του συλλέκτη παρεμποδίζεται. Η δεύτερη κατηγορία βασίζεται στην σκίαση που προκαλείται από την πρώτη κάθε φορά Φ/β συστοιχία στην άμεσως επόμενη συστοιχία. Τέλος η τρίτη κατηγορία συμπεριλαμβάνει την σκίαση που προκαλείται από προεξοχές κτηρίων και τοίχων. Σε περίπτωση που οι γεωμετρίες των αντικειμένων αυτών είναι προσδιορίσιμες η σκίαση μπορεί να υπολογιστεί με κάποιους λογικούς υπολογισμούς.

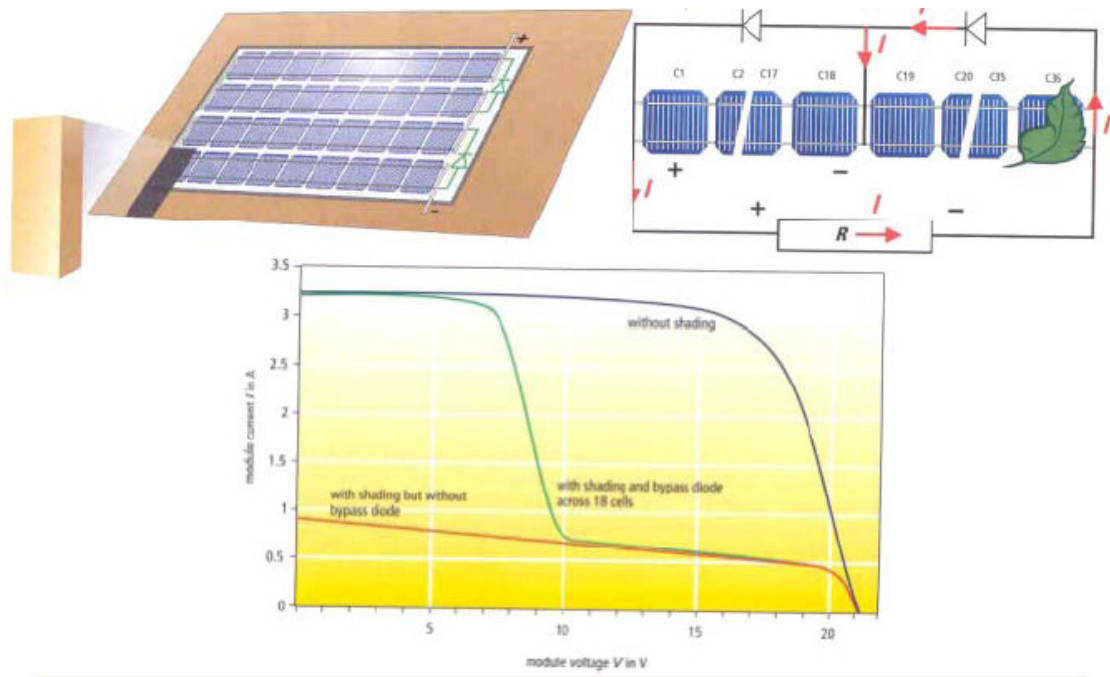
Τα διαγράμματα διαδρομής του ήλιου, όπως αυτό του σχήματος 5.3 , όχι μόνο βοηθούν να γίνει αντιληπτή η θέση του ήλιου κάθε χρονική στιγμή, αλλά έχουν ακόμα μία πολύ σημαντική πρακτική εφαρμογή στην προσπάθεια πρόβλεψης της σκίασης μία τοποθεσίας, το οποίο είναι πολύ σημαντικό θέμα στα φωτοβολταϊκά, τα οποία είναι πολύ ευαίσθητα στη σκίαση. Η ιδέα είναι απλή. Αυτό που χρειάζεται είναι ένα σκίτσο των γωνιών αζιμουθίου και ύψους για τα δένδρα, τα κτίρια, και τα άλλα εμπόδια κατά μήκος του νότιου οριζοντα, τα οποία μπορούν να σχεδιαστούν πάνω σε ένα διάγραμμα διαδρομής του ήλιου. Τα τμήματα του διαγράμματος διαδρομής του ήλιου που καλύπτονται από τα εμπόδια δείχνουν χρονικές περιόδους όπου ο ήλιος θα είναι πίσω από το εμπόδιο και η τοποθεσία θα είναι σκιασμένη.



Σχήμα 5.3 : Διάγραμμα με την θέση του ήλιου στον ουρανό για διαφορετικές εποχές και ώρες του έτους



Σχήμα 5.4 : Σκίαση που προκαλείται από δέντρο και φ/β συστοιχία σε άλλη φ/β συστοιχία



Σχήμα 5.5: Γράφημα τάσης και ρεύματος σε συνάρτηση με την σκίαση για Φ/β υστοίχια

5.3 Η ΔΙΟΔΟΣ BYPASS ΣΤΑ Φ/β ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

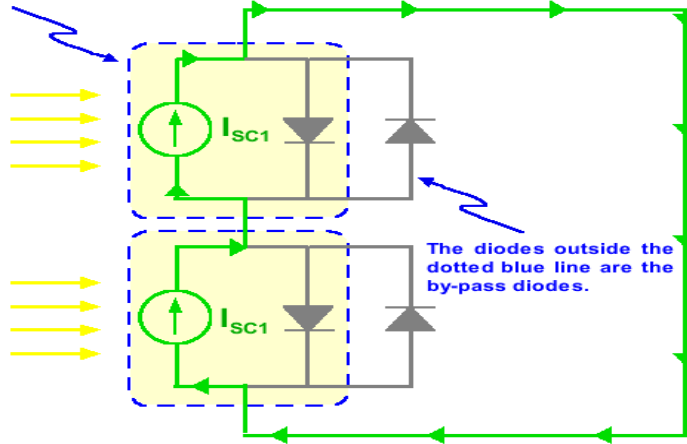
Τα καταστρεπτικά αποτελέσματα της υψηλής θερμοκρασίας μπορούν να παρακαμφθούν μέσω της χρήσης μιας διόδου παράκαμψης. Μια διόδος παράκαμψης συνδέεται παράλληλα, αλλά με την αντίθετη πολικότητα, σε ένα ηλιακό κύτταρο όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Κάτω από συνθήκες κανονικής λειτουργίας, κάθε ηλιακό κύτταρο θα είναι ορθά πολωμένο και επομένως η διόδος παράκαμψης θα είναι ανάστροφα πολωμένη και θα δημιουργείται ένα ανοικτό κύκλωμα. Εντούτοις, εάν ένα ηλιακό κελί είναι ανάστροφα πολωμένο εξαιτίας κακού συνδυασμού στο ρεύμα του κλειστού κυκλώματος μεταξύ διάφορων σειρών συνδεδεμένων κελιών, τότε η διόδος παράκαμψης άγει, επιτρέποντας τη ροή του ρεύματος από τα κακά ηλιακά κελιά (σκίαση) προς το εξωτερικό κύκλωμα αποφεύγοντας τη ροή προς τα ορθά πολωμένα καλά κελιά. Η μέγιστη ανάστροφη τάση στο κακό κελί (σκιασμένο) μειώνεται και γίνεται ίση με την τάση μιας απλής διόδου με αποτέλεσμα να περιορίζει το ρεύμα και κατά συνέπεια να εμποδίζει την αύξηση θερμοκρασίας. Η λειτουργία της διόδου παράκαμψης και της επίδρασή της σε μια καμπύλη IV φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

SERIES CONNECTED SOLAR CELLS WITH BYPASS DIODES

- Matched currents at short circuit
- Mismatched currents at short circuit
- Matched currents at open circuit
- Mismatched currents at open circuit

At short circuit conditions and with matched currents, the voltage across both the solar cells and the bypass diodes is zero. The bypass diodes have no effect.

The circuit elements contained within the blue dotted lines model a solar cell. The current source is the light generated current, I_{SC} .

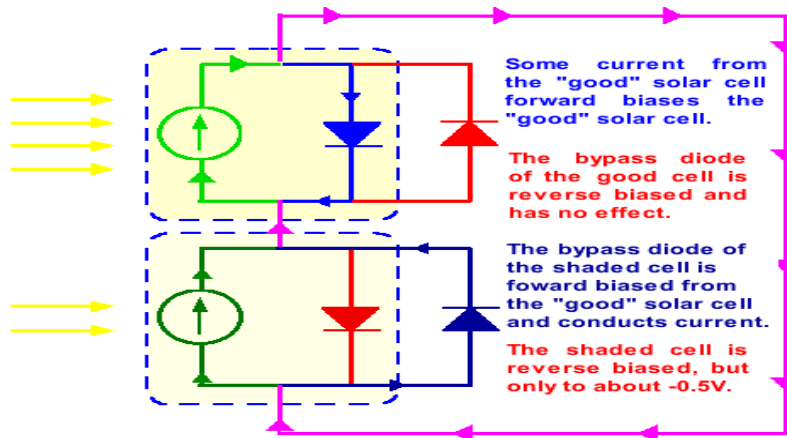


Σχήμα 5.6: Για κλειστό κύκλωμα χωρίς σκίαση οι διόδοι Bypass έχουν μηδενική τιμή και δεν επιδρούν στο κλειστό κύκλωμα των κελιών.

SERIES CONNECTED SOLAR CELLS WITH BYPASS DIODES

- Matched currents at short circuit
- Mismatched currents at short circuit
- Matched currents at open circuit
- Mismatched currents at open circuit

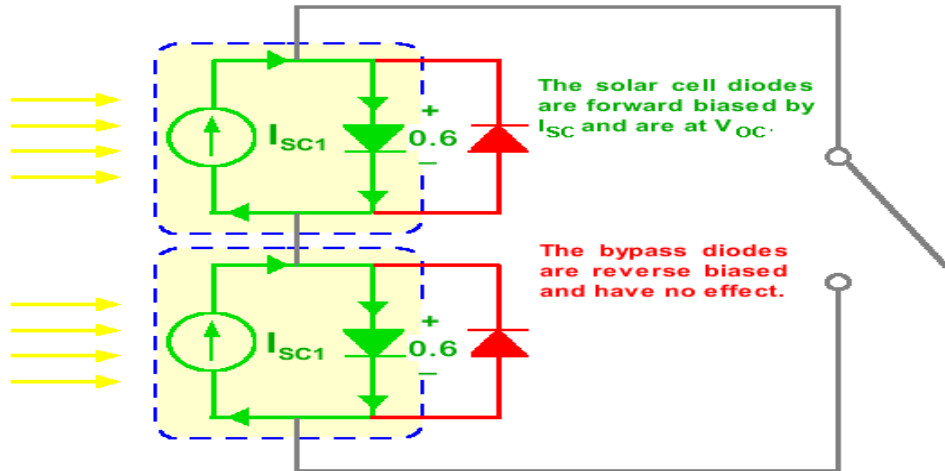
At short circuit with mismatched I_{SC} some current flows across the "good" solar cell junction, forward biasing the "good" solar cell. This voltage in turn forward biases the by-pass diode of the shaded cell, allowing it to conduct current.



Σχήμα 5.7: Για κλειστό κύκλωμα με σκίαση η διόδος Bypass του σκιασμένου κελιού άγει και προστατεύει το κύκλωμα.

SERIES CONNECTED SOLAR CELLS WITH BYPASS DIODES

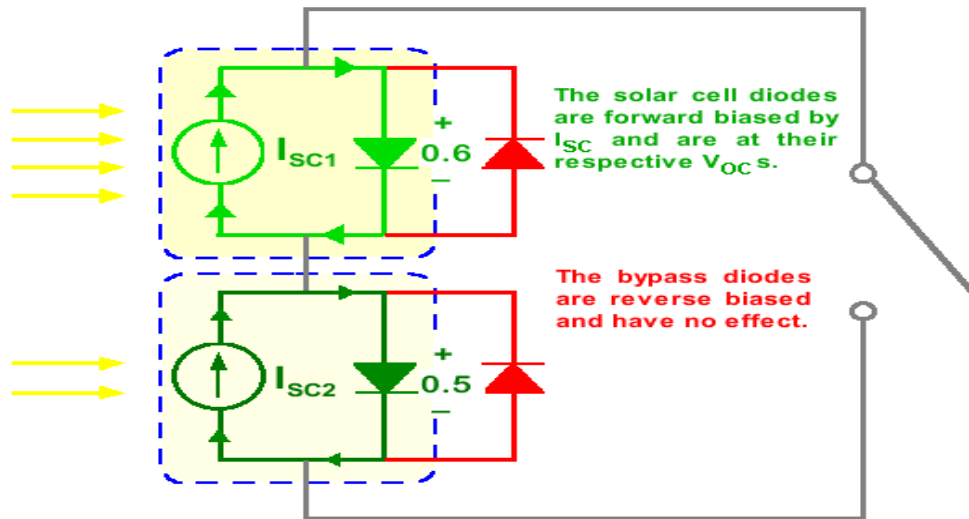
- Matched currents at short circuit
 - Mismatched currents at short circuit
 - Matched currents at open circuit
 - Mismatched currents at open circuit
- At open circuit conditions and with matched currents, the short circuit current from each solar cell forward biases the solar cell. The bypass diodes are reverse biased and have no effect on the circuit.



Σχήμα 5.8: Για ανοιχτό κύκλωμα χωρίς σκίαση και τα δύο ηλιακά κελιά πολώνονται ορθά

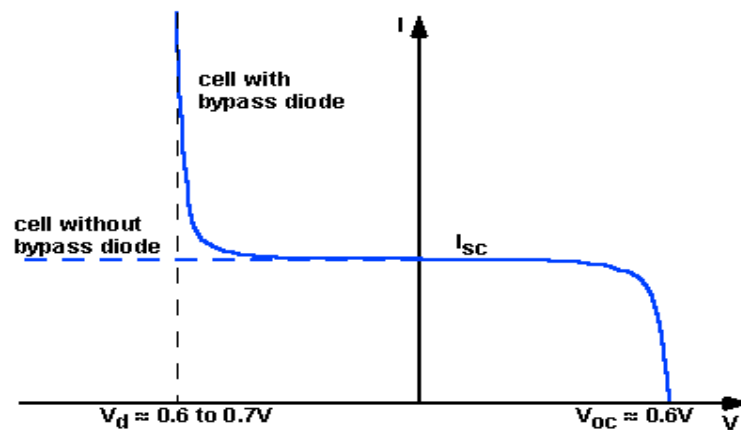
SERIES CONNECTED SOLAR CELLS WITH BYPASS DIODES

- Matched currents at short circuit
 - Mismatched currents at short circuit
 - Matched currents at open circuit
 - Mismatched currents at open circuit
- At open circuit conditions and with mismatched currents, the shaded solar cell has a reduced V_{OC} . The by-pass diodes are reverse biased and have no effect.

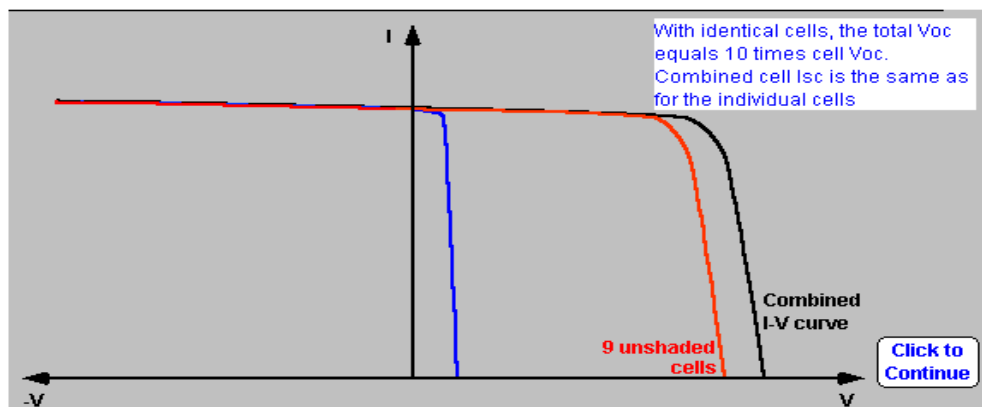


Σχήμα 5.9: Για ανοιχτό κύκλωμα με σκίαση παρατηρείται πτώση τάσης $V_{oc} = 0.5V$ στο σκιασμένο κελί.

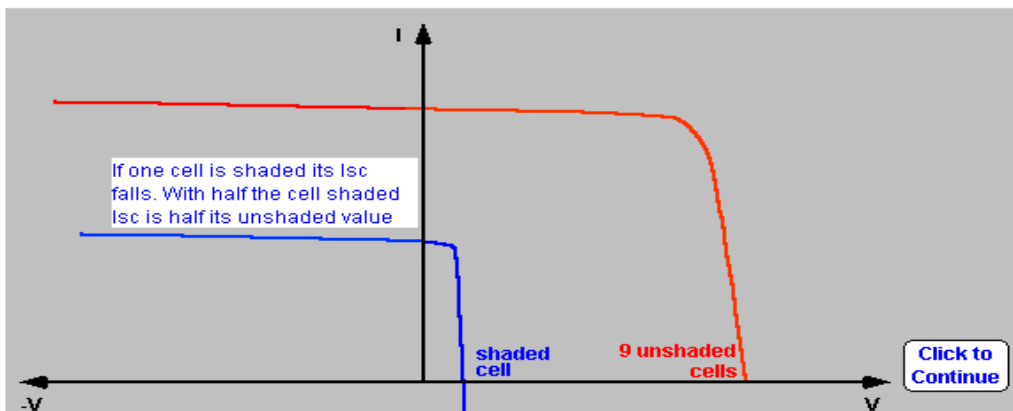
Η επίδραση μιας διόδου παράκαμψης σε μια καμπύλη IV μπορεί να καθοριστεί βρίσκοντας πρώτα την καμπύλη IV ενός ηλιακού κελιού με μια δίοδο παράκαμψης και έπειτα να συνδυάζοντας την καμπύλη IV με άλλες καμπύλες ηλιακών κελιών. Η δίοδος παράκαμψης επιδρά στο ηλιακό κελί μόνο σαν ανάστροφα πολωμένη. Εάν η ανάστροφη πολωμένη τάση είναι μεγαλύτερη από την τάση κατώφλιου του ηλιακού κελιού, κατόπιν η δίοδος ενεργοποιείται και άγει ρεύμα. Η συνδυασμένη IV καμπύλη παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήματα.



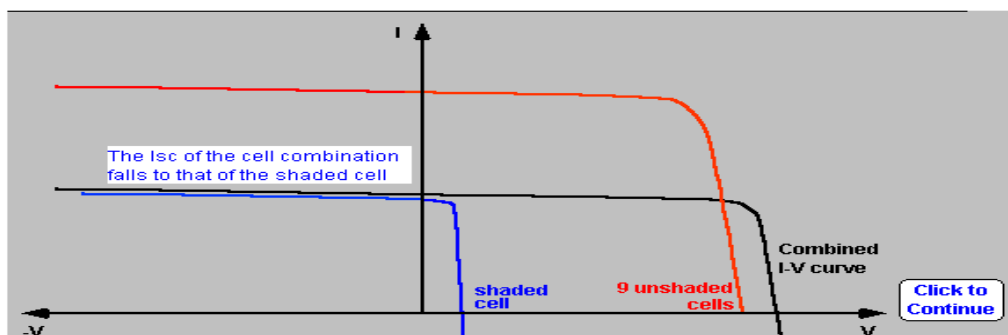
Σχήμα 5.10: Καμπύλη I-V σε ένα ηλιακό κελί με δίοδο Bypass



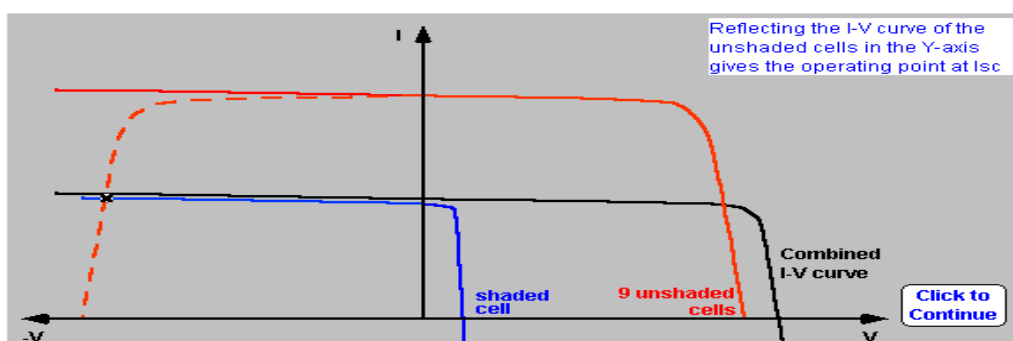
Σχήμα 5.11: Καμπύλη I-V (δέκα, εννέα και ενός) ηλιακών κελιών χωρίς δίοδο Bypass και χωρίς σκίαση.



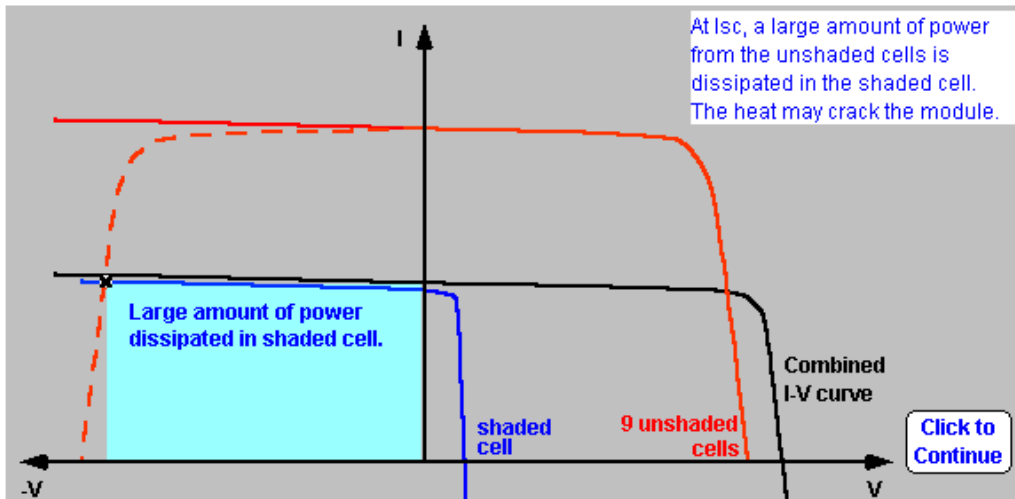
Σχήμα 5.12: Καμπύλη I-V (εννέα και ενός) ηλιακών κελιών χωρίς δίοδο Bypass και το ένα κελί να σκιάζεται.



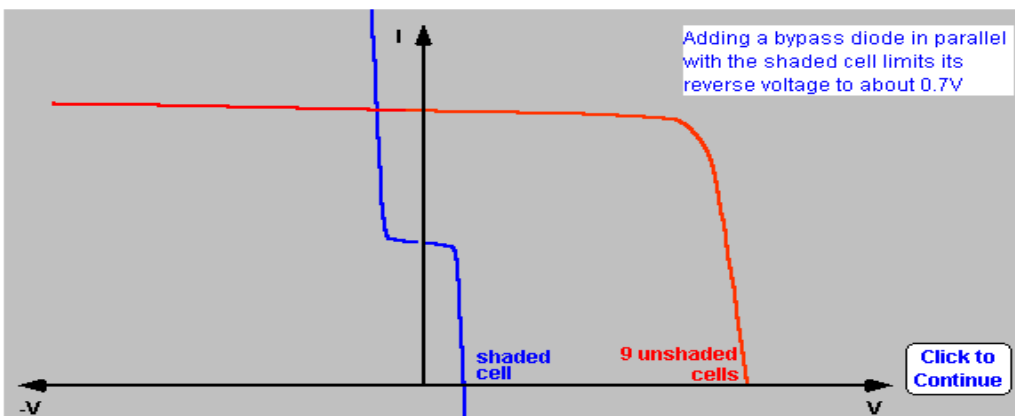
Σχήμα 5.13: Καμπύλη I-V (δέκα, εννέα και ενός) ηλιακών κελιών χωρίς δίοδο Bypass και το ένα κελί να σκιάζεται.



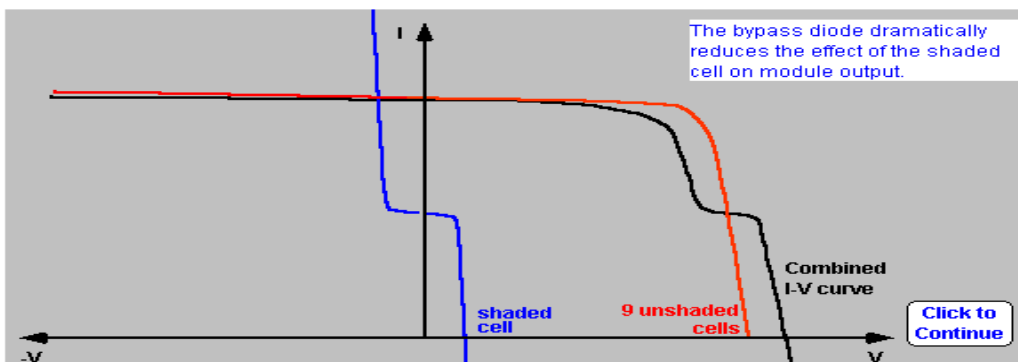
Σχήμα 5.14: Καμπύλη I-V (δέκα, εννέα και ενός) ηλιακών κελιών χωρίς δίοδο Bypass και το ένα κελί να σκιάζεται. Επιπλέον εύρεση σημείου λειτουργίας.



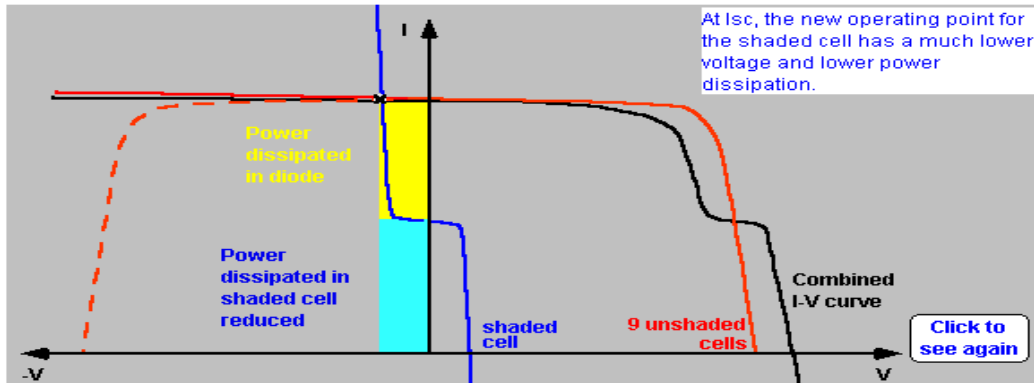
Σχήμα 5.15: Καμπύλη I-V (δέκα, εννέα και ενός) ηλιακών κελιών χωρίς δίοδο Bypass και το ένα κελί να σκιάζεται. Το φαινόμενο προκαλεί αύξηση θερμοκρασίας στο πλαίσιο.



Σχήμα 5.16: Καμπύλες I-V (εννέα και ενός) ηλιακών κελιών με δίοδο Bypass παράλληλα στο κελί που σκιάζεται. Μείωση της ανάστροφης τάσης στα 0.7V

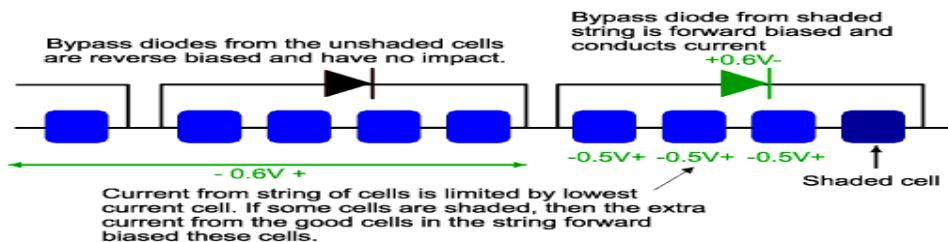


Σχήμα 5.17: Καμπύλες I-V (δέκα, εννέα και ενός) ηλιακών κελιών με δίοδο Bypass παράλληλα στο κελί που σκιάζεται. Η δίοδος Bypass επαναφέρει την ισχύ εξόδου για τα δέκα ηλιακά κελιά (εκ των οποίων το ένα σκιασμένο) σε φυσιολογικά επίπεδα.



Σχήμα 5.18 : Καμπύλες I-V (δέκα , εννέα και ενός) ηλιακών κελιών με δίοδο Bypass παράλληλα στο κελί που σκιάζεται. Η τάση και η ισχύς μειώνεται στο σκιασμένο ηλιακό κελί.

Στην πράξη, όμως, μια δίοδος παράκαμψης ανά ηλιακό κελί είναι γενικά πάρα πολύ ακριβή και αντ' αυτού οι διόδους παράκαμψης τοποθετούνται συνήθως σε ομάδες ηλιακών κελιών. Η τάση σε ολόκληρο το σκιασμένο ηλιακό κελί είναι ίση με την ορθά πολωμένη τάση στις άλλες σειρές κελιών σειράς που μοιράζονται την ίδια δίοδο παράκαμψης συν την τάση της διόδου παράκαμψης. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα . Η τάση στα ηλιακά κελιά που δεν σκιάζονται εξαρτάται από το βαθμό σκίασης στα κατώτερα ηλιακά κελιά του πάνελ. Παραδειγματος χάριν, εάν το ηλιακό κελί είναι εντελώς σκιασμένο, τότε τα ηλιακά κελιά που δεν σκιάζονται θα πολωθούν ορθά από το δικό τους κλειστό κύκλωμα ρεύματος και η τάση θα είναι 0.6V. Εάν το κακό κελί είναι μόνο μερικώς σκιασμένο, μια ποσότητα ρεύματος (όχι όλο το ρεύμα) από τα καλά ηλιακά κελιά (χωρίς σκίαση) θα μπορεί να ρέει διαμέσου του κυκλώματος, και το υπόλοιπο ρεύμα θα χρησιμοποιηθεί για να πολώσει ορθά τα σημεία ένωσης του κάθε ηλιακού κελιού, προκαλώντας μια μικρότερη ορθά πολωμένη τάση διαμέσου κάθε ηλιακού κελιού. Η μέγιστη ισχύς σε ένα σκιασμένο ηλιακό κελί είναι περίπου ίση με την παραγωγική ικανότητα όλων των κελιών στην ομάδα. Το μέγιστο μέγεθος ομάδας ανά δίοδο, χωρίς να προκαλεί ζημιά, είναι περίπου 15 κελιά ανά δίοδο παράκαμψης, για τα κελιά πυριτίου. Επομένως για μια κανονική ενότητα 36 κελιών 2 διόδους παράκαμψης χρησιμοποιούνται για να εξασφαλίσουν ότι η ενότητα δεν θα απειλείται από υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 5.19 : Η τάση στα μη σκιασμένα κελιά εξαρτάται από το βαθμό σκίασης του σκιασμένου κελιού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΚΙΑΣΗΣ

6.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ

Η τοποθέτηση των συστοιχιών ενός φ/β σταθμού, η μια πίσω από την άλλη γίνεται λαμβάνοντας υπόψη κατά κύριο λόγο τη σκίαση που θα προκαλέσει η νοτιότερη στην αμέσως επόμενη αν η απόσταση μεταξύ τους γίνει μικρότερη μιας χαρακτηριστικής. Γενικά η σκίαση μέρους της χαμηλότερης σειράς φ/β πλαισίου της συστοιχίας μηδενίζει την ενεργειακή της απόδοση. Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθούν δίοδοι παράκαμψης σε κάθε φ/β πλαίσιο. Άρα απαιτείται ο προσεκτικός σχεδιασμός της χωροθέτησης των συστοιχιών προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ημερήσια ενεργειακή απολαβή από το φ/β συγκρότημα για όλο το έτος ενώ ταυτόχρονα το σύνολο των συστοιχιών να καταλαμβάνει κατά το δυνατόν μικρότερη έκταση.

Αρχικά ας θεωρήσουμε την περίπτωση τοποθέτησης συστοιχιών σε οριζόντια επιφάνεια. Η εκ του προχείρου τοποθέτηση των διαδοχικών συστοιχιών σε απόσταση τη μια από την άλλη ίση με το μήκος της μακρύτερης μεσημεριανής σκιάς μέσα στο έτος (22 Δεκεμβρίου) δεν είναι ενδεδειγμένη. Η λύση αυτή είναι ενεργειακά ασύμφορη διότι πριν και μετά το μεσημέρι αυτό και για πολλές μέρες πριν και μετά την μέρα αυτή η σκιά της καλύπτει μέρος της επόμενης συστοιχίας περιορίζοντας σημαντικά την αποδοτικότητα της. Για να προσδιοριστεί κατά γενικό τρόπο η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των συστοιχιών διερευνάται στην συνέχεια ποια είναι η κατάλληλη τιμή της απόστασης αυτής ώστε παρότι κάποιο χρονικό διάστημα μετά την ανατολή και αντίστοιχο πριν τη δύση η πίσω συστοιχία σκιάζεται από την αμέσως νοτιότερη. Το ποσοστό μείωσης της εκμετάλλευσης της ημερήσιας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην συστοιχία να μην ξεπερνά δεδομένη στιγμή 5% . Μετά το θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου) το ύψος του ήλιου μειώνετε και άρα στις ίδιες ώρες κάθε επόμενη μέρα το μήκος της σκιάς πίσω από αντικείμενα είναι μεγαλύτερο.

Αν τα φ/β πλαίσια σε κάθε πάνελ της φ/β συστοιχίας είναι συνδεδεμένα σε σειρά η σκίαση του χαμηλότερου εξ αυτών από τις νοτιότερες συστοιχίες κατά τις πρώτες πρωινές και τελευταίες απογευματινές ώρες της ημέρας κατά το χειμώνα προκαλεί διακοπή της λειτουργίας όλου του πάνελ και πιθανόν όλης της συστοιχίας. Προκειμένου να περιοριστεί το αποτέλεσμα αυτό συνδέεται σε καθένα φ/β πλαίσιο της χαμηλότερης σειράς της συστοιχίας μια δίοδος παράκαμψης. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιείται το ετήσιο ποσοστό μείωσης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας λόγω σκίασης της φ/β συστοιχίας από την αμέσως νοτιότερη της. Την 22 Δεκεμβρίου η μη εκμεταλλεύσιμη φ/β ενέργεια ημερησίως παίρνει την μέγιστη τιμή της. Στη

συνέχεια η ενεργειακή απώλεια ελαττώνεται σταδιακά μέχρι μηδενισμού της. Τα σχήματα 6.1 α και β δείχνουν την τυπική ημερήσια αλλαγή της κατεύθυνσης και του μήκους της σκιάς ενός στύλου Σ κατά την χειμερινή και θερινή περίοδο. Τα σχήματα 6.1 γ δείχνει τα σκιαζόμενα σημεία στο έδαφος από την ανατολή μέχρι την δύση μέσα σε μια μέρα του χειμώνα. Η σκιά ελαττώνεται από την ανατολή μέχρι το μεσημέρι και αυξάνεται καθώς ο ήλιος κινείται προς τη δύση (κίνηση κατά τη φορά των βελών στο σχήμα).

Γίνεται λοιπόν φανερό ότι απαιτείται να καθοριστεί η βέλτιστη επιλογή μεταξύ της απόστασης των συστοιχιών και της απώλειας μέρους της ημερήσιας ηλιακής ενέργειας. Απαιτείται να καθοριστεί ένα κριτήριο αποδεκτής μέσα στην ημέρα ενεργειακής απώλειας λόγω σκίασης. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι λεπτομέρειες της χωροθέτησης των ϕ/β συστοιχιών απαιτεί την γνώση του κατάλληλου λόγου $r = \frac{d}{h}$ του διακένου

μεταξύ των διαδοχικών συστοιχιών προς το ύψος των συστοιχιών σε συνάρτηση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Για το σκοπό αυτό υπολογίζουμε την ενέργεια που προσφέρει ο ήλιος ημερησίως για κάθε μέρα του χρόνου σε κεκλιμένο συλλέκτη καθώς και την ενέργεια που προσφέρει στον ίδιο συλλέκτη αν δεχτούμε ότι ένα διάστημα μετά την ανατολή και αντίστοιχο πριν τη δύση ο συλλέκτης σκιάζεται από τον αμέσως έμπροσθεν. Χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις κίνησης του ήλιου καθώς και σχέσεις για τον προσδιορισμό της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του πάχους της ατμόσφαιρας στις διάφορες θέσεις του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας.

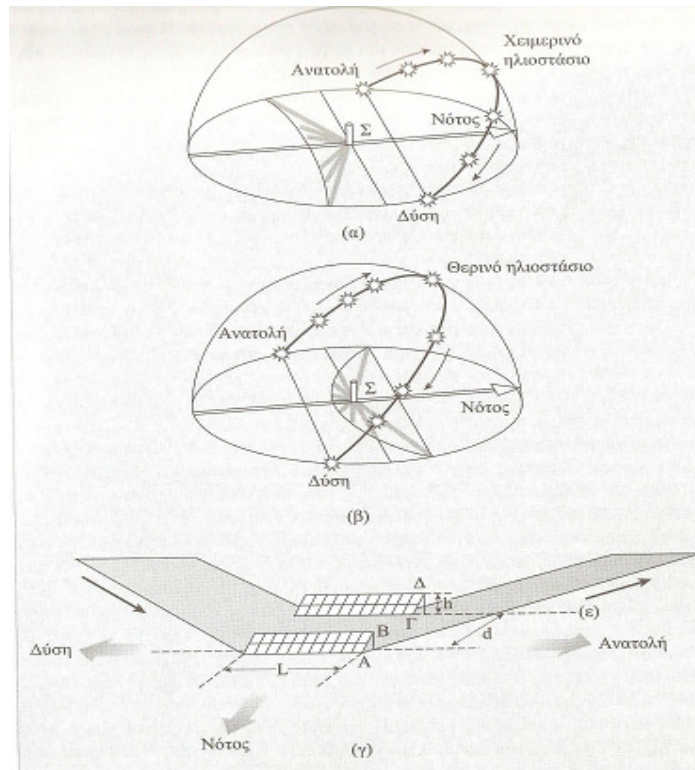
Με αυτό το απλό μαθηματικό μοντέλο υπολογίζεται το ποσοστό μη αξιοποιήσιμης ηλιακής ενέργειας όταν ο συλλέκτης σκιάζεται για διαφορετικά διαστήματα κατά την 22 Δεκεμβρίου. Καθορίζουμε τότε το όριο αποδεκτού ελάχιστου ποσοστού μη αξιοποιήσιμης ηλιακής ενέργειας σε συνάρτηση με το λόγο $r = \frac{d}{h}$ για κλίση συλλεκτών ίση με την αντίστοιχη για βέλτιστη απόδοση των ϕ/β πλαισίων κατά το χειμώνα. Οι υπολογισμοί γίνονται για δύο επίπεδα αποδεκτού ποσοστού μη αξιοποιήσιμης ηλιακής ενέργειας 5% και 10%. Καθώς αυξάνει το γεωγραφικό πλάτος του τόπου ο λόγος r αυξάνει έντονα και συνακόλουθα μειώνεται το πλήθος των εγκαταστημένων σε διαδοχικές σειρές ϕ/β πλαισίων ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας εγκατάστασης. Με βάση αυτό το κριτήριο προσδιορίζεται ο κατάλληλος για τον τόπο και σε κάθε περίπτωση ο λόγος r κατασκευάζεται το διάγραμμα του σχήματος 6.2. Το διάγραμμα αυτό μας δίνει την δυνατότητα να προσδιορίσουμε για κάθε τόπο (διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη) τον κατάλληλο λόγο r . Πχ στο Ηράκλειο Κρήτης ($\lambda=35.5$) διαπιστώνουμε ότι αντιστοιχεί $r=2.9$ και $r=2.5$ για ποσοστό 5% και 10% μη αξιοποιήσιμης ενέργειας αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι αν η κατακόρυφη προβολή κάθε συστοιχίας στη χειμερινή θέση είναι $h=1\text{m}$ τότε το διάκενο μεταξύ των συστοιχιών σε κλίση $\lambda+15$ ισούται με $d=2.9\text{m}$ $d=2.5\text{m}$ αντίστοιχα.

Το σχήμα 6.1 γ έχει κατασκευαστεί λαμβάνοντας υπόψη τον κατάλληλο λόγο r για τον τόπο εγκατάστασης και για ποσοστό ενεργειακών απωλειών 5%. Από την ανατολή μέχρι να φτάσει η σκιά από βορειότερα σημεία, στη γραμμή(ε) που περνά από το Γ η πίσω συστοιχία σκιάζεται. Αντίστοιχα η ίδια συστοιχία σκιάζεται όταν ο ήλιος πλησιάζει στην δύση του από τη στιγμή που η σκιά περάσει τη γραμμή(ε) και μέχρι ο ήλιος να δύση.

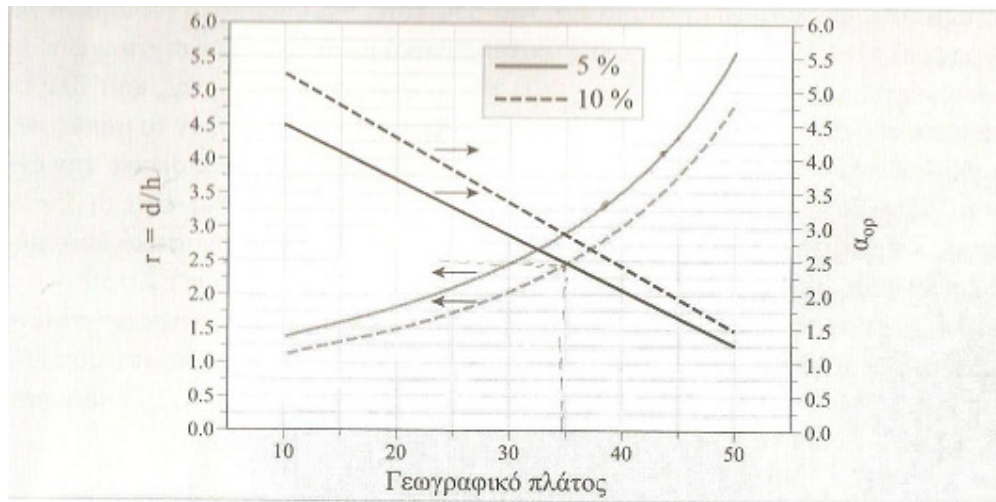
Το σχήμα 6.3 α δείχνει τη θέση της σκιάς μιας συστοιχίας στη βορειότερη της τη στιγμή που το ποσοστό χαμένης ηλιακής ενέργειας έχει γίνει όσο του κριτηρίου. Η γωνία των ηλιακών ακτινών με το οριζόντιο επίπεδο εκείνη τη στιγμή είναι E_{Lor} (οριακό ύψος του ήλιου). Η γωνία a_{op} που αποτελεί την αντίστοιχη της διέδρου μεταξύ του επιπέδου της σκιάς της άνω πλευράς της συστοιχίας και του οριζόντιου επιπέδου πάνω στον μεσημβρινό του τόπου προσδιορίζεται από την σχέση $\varepsilon_{\text{φα}_{op}} = \frac{1}{r}$.

Οι προηγούμενοι υπολογισμοί αναφέρονται σε φ/β πεδίο με διαδοχικές συστοιχίες απείρου μήκους. Αν θεωρήσουμε διαδοχικές συστοιχίες από το νότο προς το βορρά πεπερασμένου μήκους τοποθετημένες στην ορισμένη απόσταση μεταξύ τους με βάση το κριτήριο $\pi\chi$ του 5% τότε για κάθε τόπο(ορισμένο γεωγραφικό πλάτος λ) υπάρχει ένα χαρακτηριστικό μέγιστο μήκος συστοιχιών L τέτοιο ώστε η κάθε σειρά να μην σκιάζει την αμέσως βορειότερη της καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. $\pi\chi$ για το Ηράκλειο της Κρήτης ($\lambda=35.5$ μοίρες) αν το μήκος των διαδοχικών συστοιχιών είναι $L=2.8\text{m}$ και τοποθετηθούν η μια πίσω από την άλλη με βάση το λόγο $r=2.9$ (αντίστοιχο για απώλεια σκίασης 5%) τότε οι βορειότερες συστοιχίες δεν σκιάζονται ποτέ μέσα στο έτος. Το χαρακτηριστικό αυτό μήκος συστοιχίας κυμαίνεται από περίπου δύο μέτρα για $\lambda=10$ μοίρες μέχρι περίπου 4 μέτρα για $\lambda=50$ μοίρες.

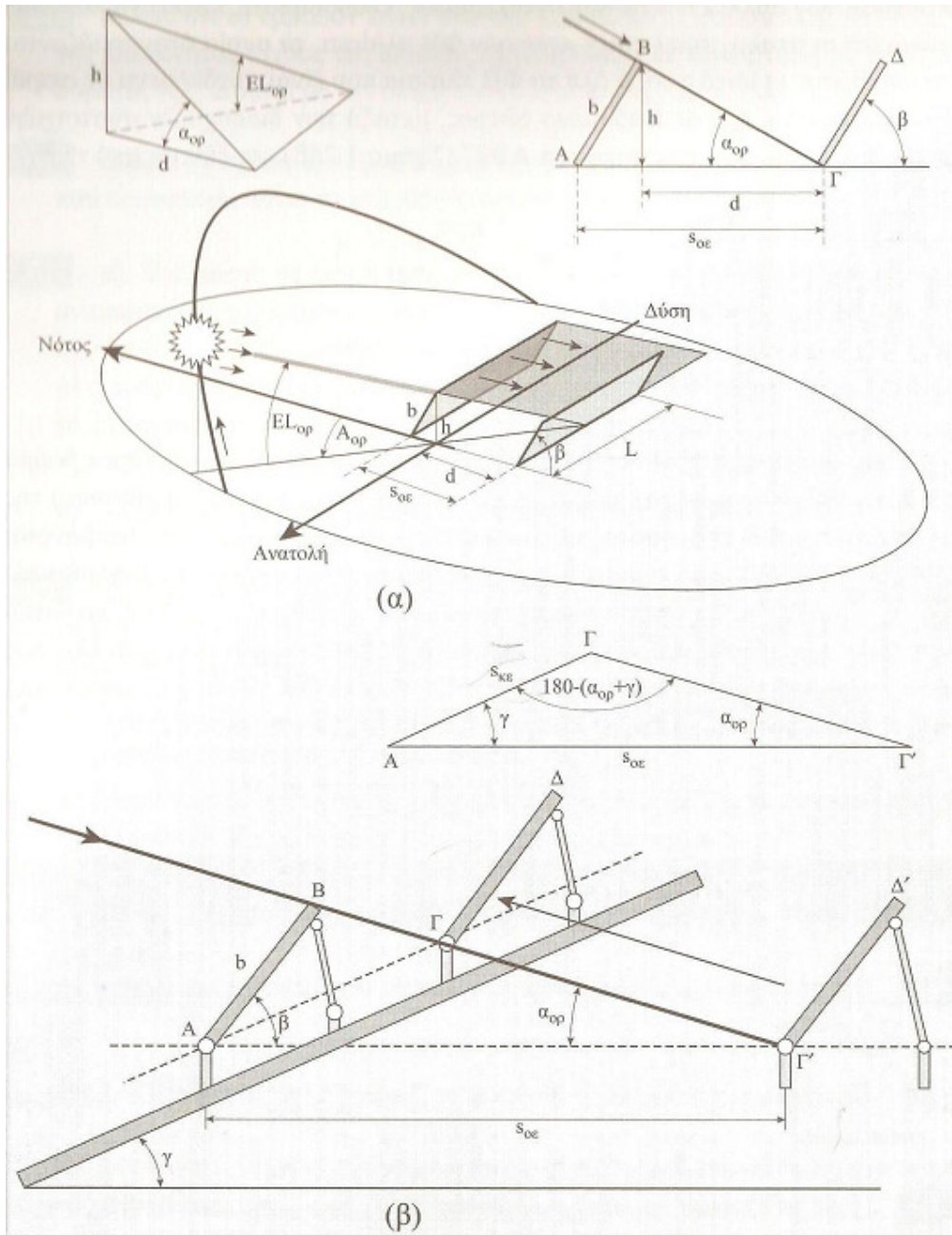
Με καθορισμένο το λόγο r για το συγκεκριμένο τόπο η οριζόντια απόσταση S_{oe} (οριζόντιο έδαφος) που αποτελεί την επαναλαμβανόμενη απόσταση τοποθέτησης συστοιχιών απείρου μήκους(άνω δεξιά στο σχήμα 6.3 α) δίδεται από τη σχέση $S_{oe} = r \cdot h + b \cdot \sigma\nu\beta$ όπου b το πλάτος της συστοιχίας και β η γωνία κλίσης της συστοιχίας.



Σχήμα 6.1 : Διαμόρφωση της σκιάς ενός στύλου Σ κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής και θερινής μέρας.



Σχήμα 6.2 : Γραφικές παραστάσεις του λόγου r και της οριακής γωνίας $\alpha_{ορ}$ οι οποίες αφορούν σε ποσοστό μη αξιοποιήσιμης ηλιακής ενέργειας σε σχέση με την διαθέσιμη.



Σχήμα 6.3 : Απεικόνιση φ/β συστοιχιών α) σε οριζόντιο έδαφος και β) σε κεκλιμένο έδαφος.

6.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΧΑΝΙΑ

Ο υπολογισμός της ελάχιστης απόστασης γίνεται με τον παρακάτω τύπο :

$Soe = r \cdot h + b \cdot \sigma\nu\nu\beta$	6.1
---	-----

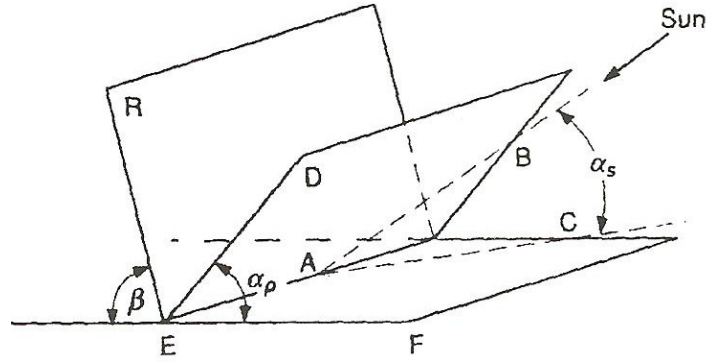
Όπου $r=2.8$ για ποσοστό μη αξιοποιήσιμης ενέργειας 5% (σχήμα 6.2) , $b=2.10m$ το πλάτος της ϕ/β συστοιχίας , $\beta=30$ μοίρες όπου αποτελεί την κλίση της συστοιχίας και $h = b \cdot \eta\mu\beta = 2.10 \cdot \eta\mu 30 = 1.05m$ το ύψος(σχήμα 6.3 α δεξιά) . Άρα $Soe = r \cdot h + b \cdot \sigma\nu\nu\beta = 4.75m$ όπου αποτελεί την ελάχιστη απόσταση για 5%.

Όπου $r=2.4$ για ποσοστό μη αξιοποιήσιμης ενέργειας 10%(σχήμα 6.2) , $b=2.10m$ το πλάτος της ϕ/β συστοιχίας , $\beta=30$ μοίρες όπου αποτελεί την κλίση της συστοιχίας , $h = b \cdot \eta\mu\beta = 2.10 \cdot \eta\mu 30 = 1.05m$ το ύψος(σχήμα 6.3 α δεξιά) . Άρα $Soe = r \cdot h + b \cdot \sigma\nu\nu\beta = 4.33m$ όπου αποτελεί την ελάχιστη απόσταση για 10%.

6.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΦΙΛ

Η γωνία προφίλ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και του Φ/β συλλέκτη του οποίου η επιφάνεια έχει γωνία αζιμουθίου γ . Με άλλα λόγια είναι η γωνία που πρέπει να περιστραφεί ένα αρχικά οριζόντιο επίπεδο πάνω σε ένα άξονα ώστε να κοιτάει προς τον ήλιο. Η γωνία ύψους του ήλιου a_s και η γωνία προφίλ a_p μπορούν να παρατηρηθούν στο παρακάτω σχήμα(6.4). Το επίπεδο AEDB περιλαμβάνει τον ήλιο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η γωνία προφίλ a_p και η γωνία ύψους του ήλιου a_s γίνονται ίσες όταν ο ήλιος γίνει κάθετος στο επίπεδο του συλλέκτη.(πχ μια τέτοια περίπτωση αποτελεί το ηλιακό μεσημέρι για μια επιφάνεια που έχει γωνία αζιμουθίου ίση με 0 ή 180 μοίρες) Η γωνία προφίλ είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον υπολογισμό της σκίασης που προέρχεται από προεξοχές και πρόστεγα και μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$\tan a_p = \frac{\tan a_s}{\cos(\gamma_s - \gamma)}$	6.2
---	-----



Σχῆμα 6.4 : Απεικόνιση γωνίας ύψους του ἡλίου a_s και γωνίας προφίλ a_p

Το παρακάτω παράδειγμα χρησιμοποιείται για να γίνει ακόμα πιο κατανοητή η γωνία προφίλ a_p .

Παράδειγμα: Υπολογίστε την γωνία ύψους του ἡλίου a_s , την γωνία ζενίθ του ἡλίου θ_z και την γωνία προφίλ a_p για Φ/β συλλέκτη προσανατολισμένο 25 μοίρες προς τα δυτικά στις 4 PM ηλιακή ώρα στις 16 Μαρτίου για γεωγραφικό πλάτος 43 μοιρών.

Λύση: Η γωνία ύψους του ἡλίου μας αναφέρεται μόνο για την χρονική διάρκεια της μέρας. Για της 16 του Μάρτη η ηλιακή απόκλιση θα είναι $\delta = -2.4$ μοίρες. Στις 4:00 PM η γωνία ώρας θα είναι $\omega = 60$ μοίρες. Για τον υπολογισμό της a_s ισχύει ο τύπος : $\cos \theta_z = \sin(90 - \theta_z) = \sin a_s \Rightarrow$

$\sin a_s = \cos 43 \cdot \cos(-2.4) \cdot \cos(60) + \sin 43 \cdot \sin(-2.4) = 0.337 \Rightarrow a_s = 19.7$ μοίρες. Η γωνία αζιμουθίου του ἡλίου θα είναι :

$\tan \gamma_s = \frac{\sin 60}{\sin 43 \cdot \cos 60 - \cos 43 \cdot \tan(-2.4)} = 2.330 \Rightarrow \gamma_s = 66.8$ μοίρες. Η γωνία προφίλ για τον συλλέκτη θα είναι : $\tan a_p = \frac{\tan 19.7}{\cos(66.8 - 25)} = 0.480 \Rightarrow a_p = 25.7$ μοίρες.

6.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει πολλαπλές σειρές ϕ/β συστοιχιών. Οι συλλέκτες έχουν μήκος 2.10m με κλίση 60 μοιρών με νότιο προσανατολισμό. Τη χρονική στιγμή που η γωνία προφίλ γίνεται 25 μοίρες (βλέπε εξίσωση 6.2) υπολογίζεται το ποσοστό σκίασης που προκαλεί η μπροστινή ϕ/β συστοιχία στην πίσω.

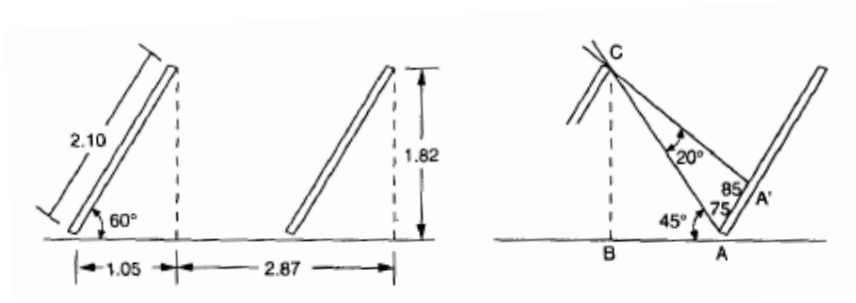
Στο παρακάτω διάγραμμα η γωνία BAC είναι $\tan^{-1}(\frac{1.82}{2.87 - 1.05}) = 45^\circ$ και εφόσον η γωνία προφίλ a_p είναι 25 μοίρες δηλαδή $BAC > a_p$ προκύπτει σκίαση και υπολογίζεται με την παρακάτω μεθοδολογία :

Η απόσταση AA' υπολογίζεται με τους παρακάτω τύπους

$$AC = \frac{1.82}{\sin 45} = 2.57m. \quad CAA' = 180 - 45 - 60 = 75 \rightarrow CA'A = 180 - 75 - 45 - \alpha_p = 85^\circ.$$

Από τον κανόνα των ημιτόνων προκύπτει $AA' = \frac{2.57 \cdot \sin 20}{\sin 85} = 0.88m$. Η

σκίαση θα είναι $Fraction = \frac{0.88}{2.10} = 0.42$ ή 42%.

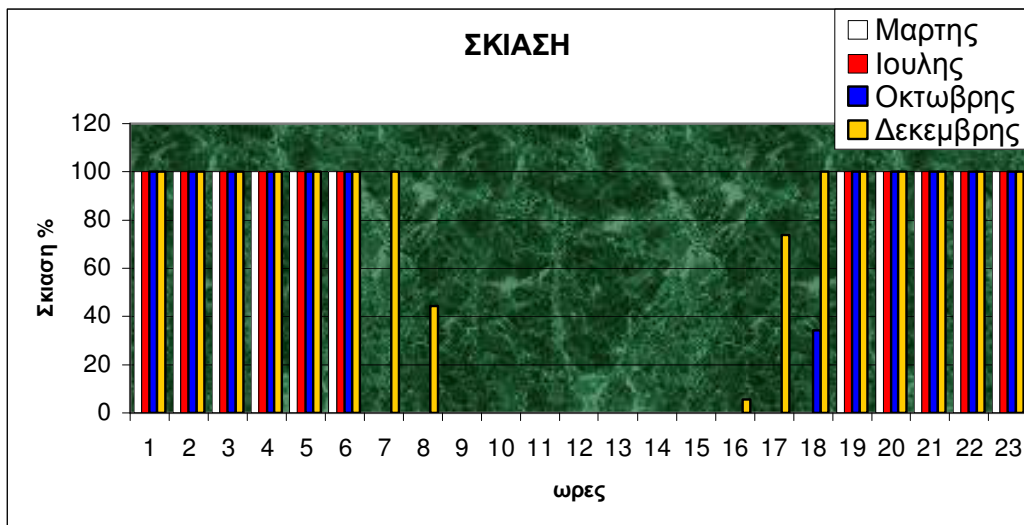


Σχήμα 6.5: Απεικόνιση σχήματος υπολογισμού σκίασης

6.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΕΝΑΡΙΑ (ΜΑΤΛΑΒ)

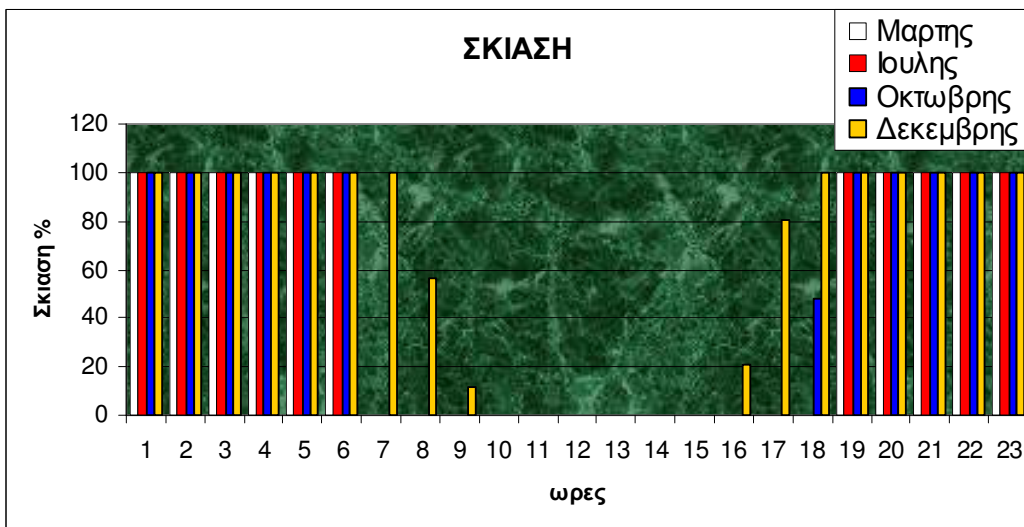
Το παρακάτω σενάριο αναφέρεται για ποσοστό μη αξιοποιήσιμης ενέργειας 5% (4.75m για χανιά) σε γεωγραφικό πλάτος 35 μοιρών ,προσανατολισμό του συλλέκτη στο νότο και βέλτιστη κλίση συλλέκτη 30 μοιρών περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος. Είναι ένα ρεαλιστικό σενάριο και αποτελεί την καλύτερη δυνατή ρύθμιση μιας Φ/Β συστοιχίας ώστε να εμφανίζει την καλύτερη σχέση χώρου απόδοσης για τα χανιά.

Στο συγκεκριμένο σενάριο παρατηρείται σκίαση μόνο κατά την χειμερινή περίοδο και πιο συγκεκριμένα κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου. Η εμφάνιση σκίασης την χειμερινή περίοδο οφείλεται στην διαφορετικότητα της κίνησης του ήλιου για κάθε εποχή. Τις υπόλοιπες εποχές δεν παρατηρείται σκίαση με μοναδική εξαίρεση το φθινόπωρο με σκίαση(30%) κατά την δύση του ηλίου.



Σχημα 6.5 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για τα χανιά για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

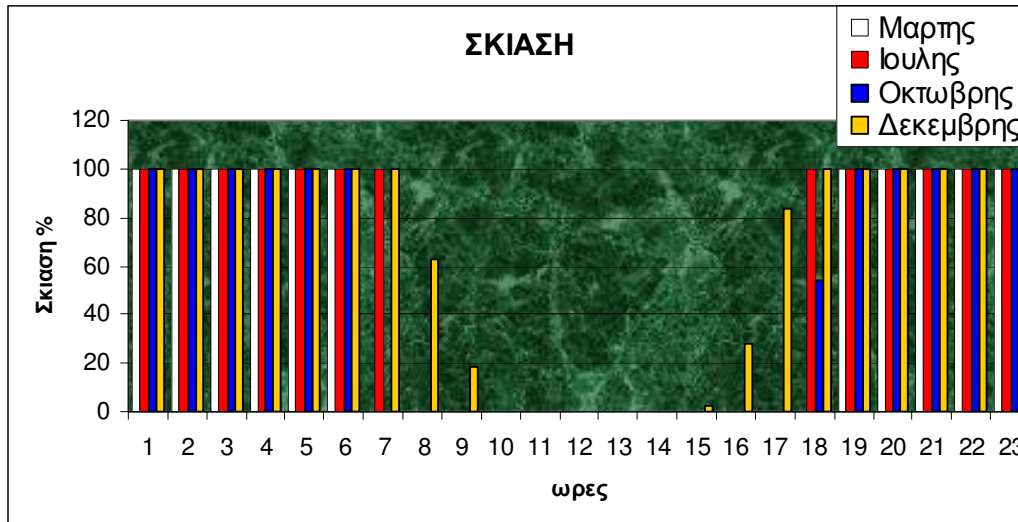
Στο παρακάτω γράφημα για σκίαση 5% σε γεωγραφικό πλάτος 35 μοιρών ,προσανατολισμό του συλλέκτη στο νότο και κλίση συλλέκτη 45 μοιρών παρατηρείται αύξηση της σκίασης κατά την χειμερινή περίοδο σε περισσότερες ώρες της μέρας . Τις υπόλοιπες εποχές δεν παρατηρείται σκίαση με μοναδική εξαίρεση το φθινόπωρο με σκίαση(45%) κατά την δύση του ηλίου.



Σχημα 6.6 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για τα χανιά για κλίση συλλέκτη 45 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

Στο παρακάτω γράφημα για σκίαση 5% σε γεωγραφικό πλάτος 35 μοιρών ,προσανατολισμό του συλλέκτη στο νότο και κλίση συλλέκτη 60 μοιρών

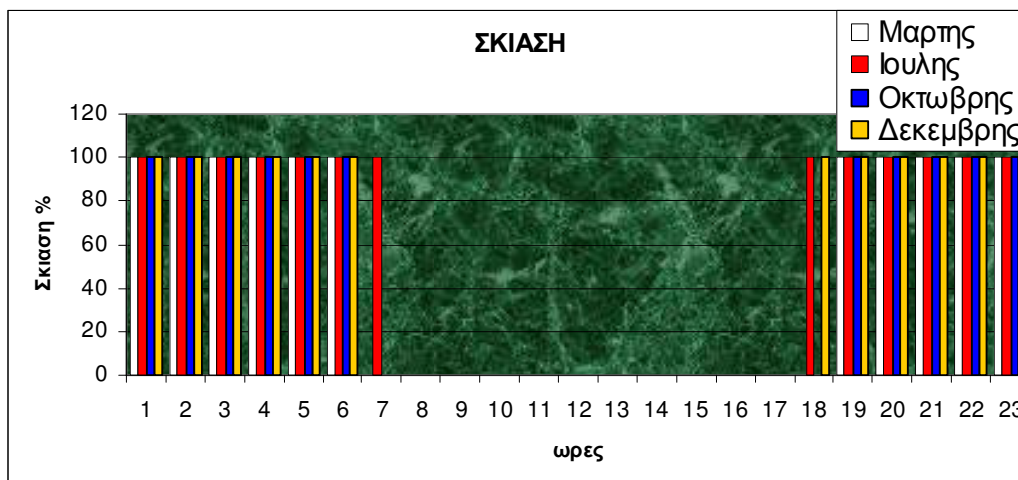
παρατηρείται αύξηση της σκίασης κατά την χειμερινή περίοδο σε περισσότερες ώρες της μέρας σε σύγκριση με το γράφημα για κλίση συλλέκτη 45 μοιρών . Επίσης την καλοκαιρινή περίοδο εμφανίζεται ολική σκίαση στις 7 το πρωί και στις 6 το βράδυ το οποίο δεν υφίσταται για κλίση συλλέκτη 30 και 45 μοιρών.



Σχημα 6.7 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για τα χανιά για κλίση συλλέκτη 60 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

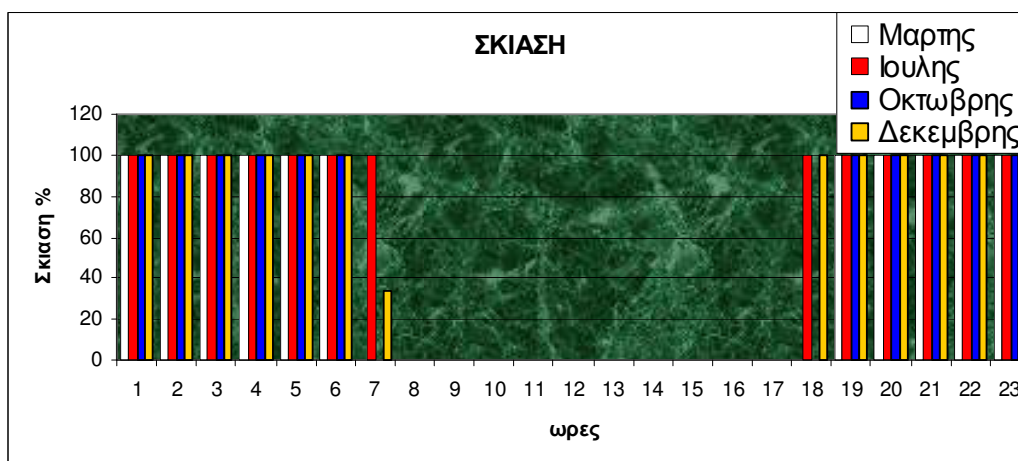
Εφαρμόζοντας το βασικό σενάριο για τα χανιά σε διάφορα γεωγραφικά πλάτη απο 0 μοίρες έως 60 μοίρες :

Για γεωγραφικό πλάτος 0 μοιρών(ισημερινός) παρατηρείται αύξηση της σκίασης στις 7 το πρωί και στις 6 το βράδυ για την καλοκαιρινή περίοδο σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Το καλοκαίρι η μέρα είναι μικρότερη στον ισημερινό από ότι στο βόρειο ημισφαίριο και ο ήλιος διανύει μικρότερη τροχιά. Σε αντίθεση κατά τη χειμερινή περίοδο η μέρα είναι μεγαλύτερη στον ισημερινό, ο ήλιος βρίσκεται σε ψηλότερο σημείο με αποτέλεσμα να μην αντιμετωπίζονται προβλήματα σκίασης.



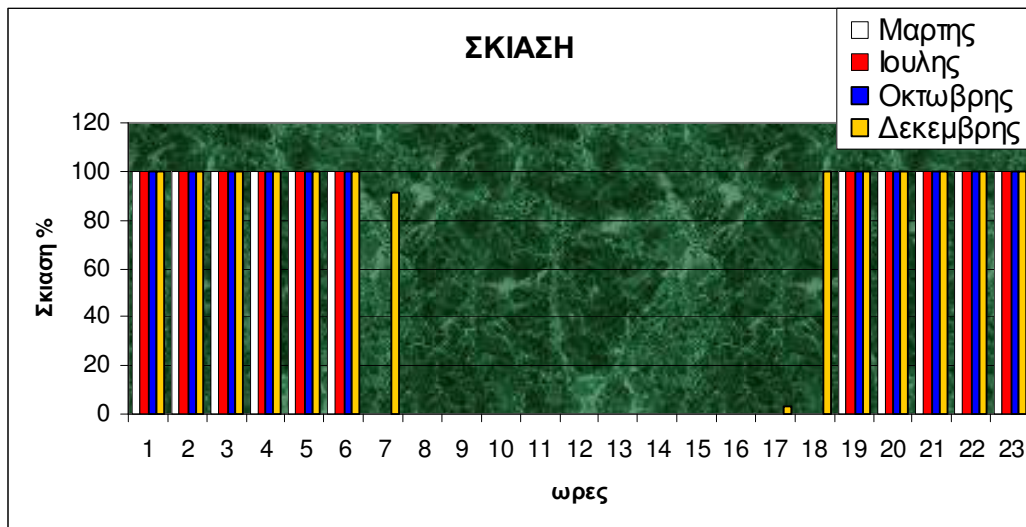
Σχημα 6.8 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=0$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

Για γεωγραφικό πλάτος 10 μοιρών (κοντά στον ισημερινό) παρατηρείται αύξηση της σκίασης στις 7 το πρωί και στις 6 το βράδυ για την καλοκαιρινή περίοδο σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Το καλοκαίρι η μέρα είναι μικρότερη στον ισημερινό από ότι στο βόρειο ημισφαίριο και ο ήλιος διανύει μικρότερη τροχιά. Σε αντίθεση κατά τη χειμερινή περίοδο η μέρα είναι μεγαλύτερη στον ισημερινό, ο ήλιος βρίσκεται σε ψηλότερο σημείο με αποτέλεσμα να μην αντιμετωπίζονται προβλήματα σκίασης. Επιπλέον εμφανίζεται ένα πολύ μικρό ποσοστό σκίασης κατά την χειμερινή περίοδο καθώς μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος κατά 10 μοίρες και η θέση του ήλιου βρίσκεται πιο χαμηλά ως προς τη τοποθεσία των ϕ/β συστοιχιών(γεωγραφικόπλάτος 10 μοίρες).



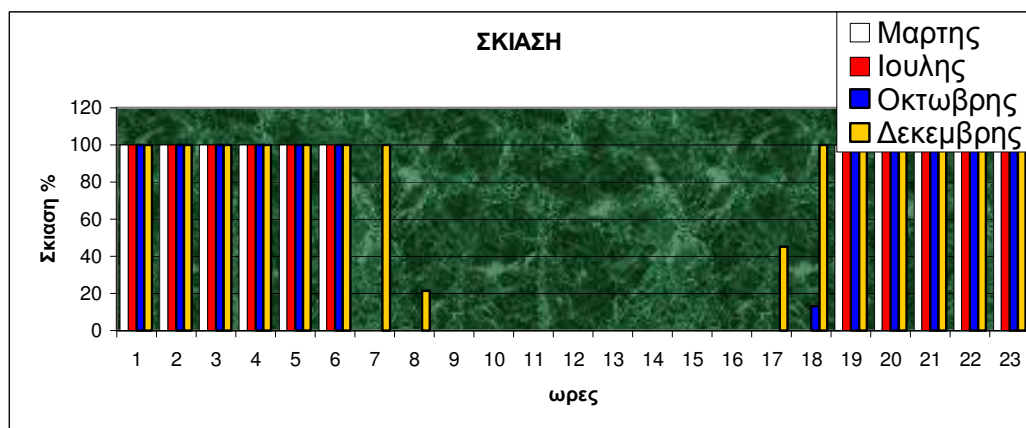
Σχημα 6.9 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=10$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

Για γεωγραφικό πλάτος 20 μοιρών το ποσοστό σκίασης αυξάνεται κατά την χειμερινή περίοδο καθώς μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος κατά 20 μοίρες και η θέση του ήλιου βρίσκεται πιο χαμηλά ως προς τη τοποθεσία των φ/β συστοιχιών(γεωγραφικόπλάτος 20 μοίρες). Λόγο του γεωγραφικού πλάτους που μεγαλώνει συνεχώς όσο κινούμαστε στο βόρειο ημισφαίριο παρατηρείται μείωση της σκίασης το καλοκαίρι.



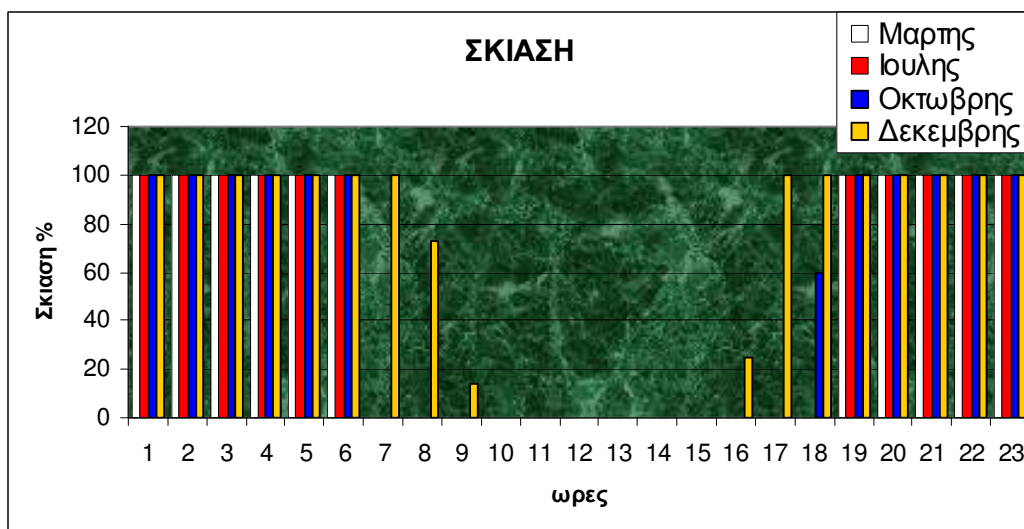
Σχημα 6.10 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος φ=20 μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

Για γεωγραφικό πλάτος 30 μοιρών το ποσοστό σκίασης αυξάνεται κατά την χειμερινή περίοδο καθώς μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος κατά 30 μοίρες και η θέση του ήλιου βρίσκεται πιο χαμηλά ως προς τη τοποθεσία των φ/β συστοιχιών(γεωγραφικόπλάτος 30 μοίρες).



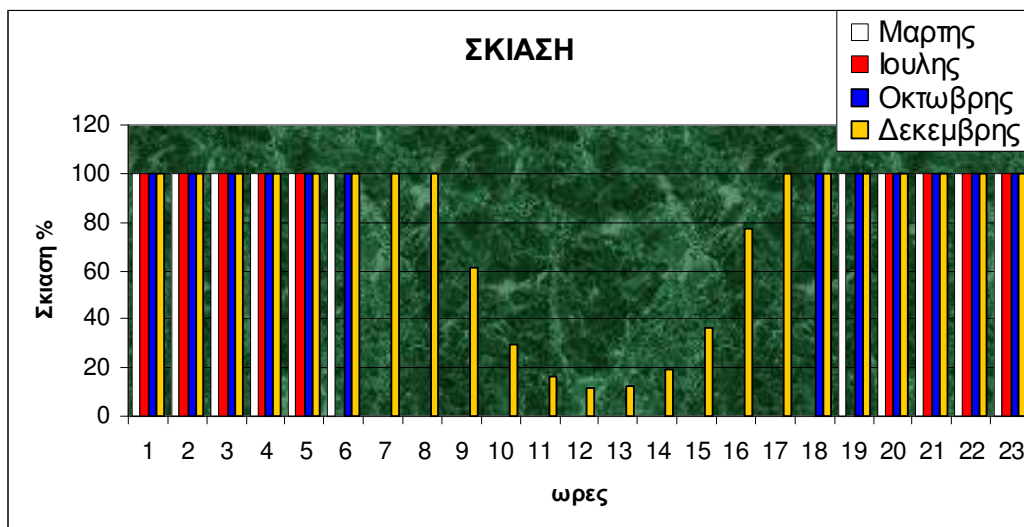
Σχημα 6.11 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος φ=30 μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

Για γεωγραφικό πλάτος 40 μοιρών το ποσοστό σκίασης αυξάνεται κατά την χειμερινή περίοδο καθώς μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος κατά 40 μοίρες και η θέση του ήλιου βρίσκεται πιο χαμηλά ως προς τη τοποθεσία των φ/β συστοιχιών(γεωγραφικόπλάτος 40 μοίρες).



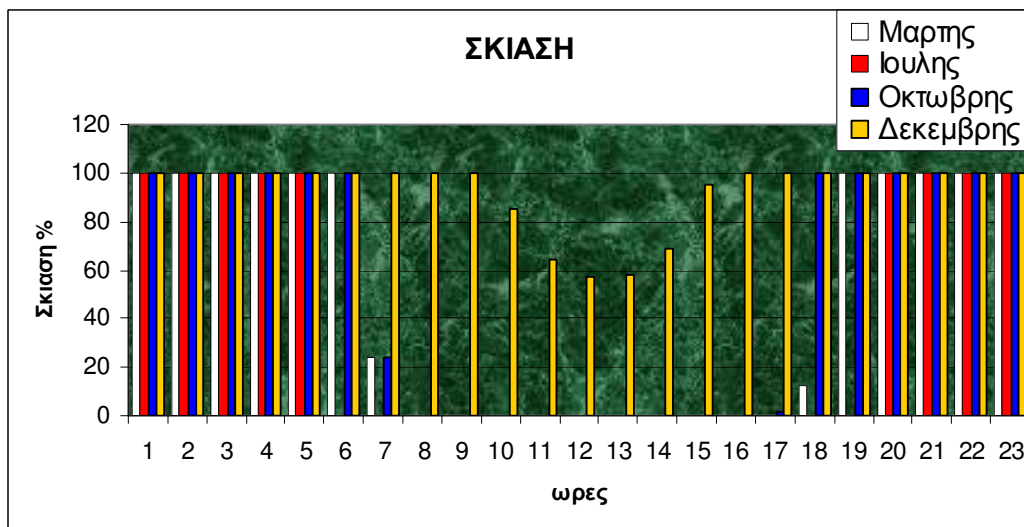
Σχημα 6.12: Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος φ=40 μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

Για γεωγραφικό πλάτος 50 μοιρών το ποσοστό σκίασης αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό κατά την χειμερινή περίοδο καθώς μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος κατά 50 μοίρες και η θέση του ήλιου βρίσκεται πιο χαμηλά ως προς την τοποθεσία των φ/β συστοιχιών(γεωγραφικόπλάτος 50 μοίρες). Επιπλέον είναι αισθητή η αύξηση της σκίασης το φθινόπωρο. Στο γεωγραφικό πλάτος των 50 μοιρών δηλαδή για περιοχές της βόρειας ευρώπης η σκίαση ελαχιστοποιείται την καλοκαιρινή περίοδο.



Σχημα 6.13 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος φ=50 μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

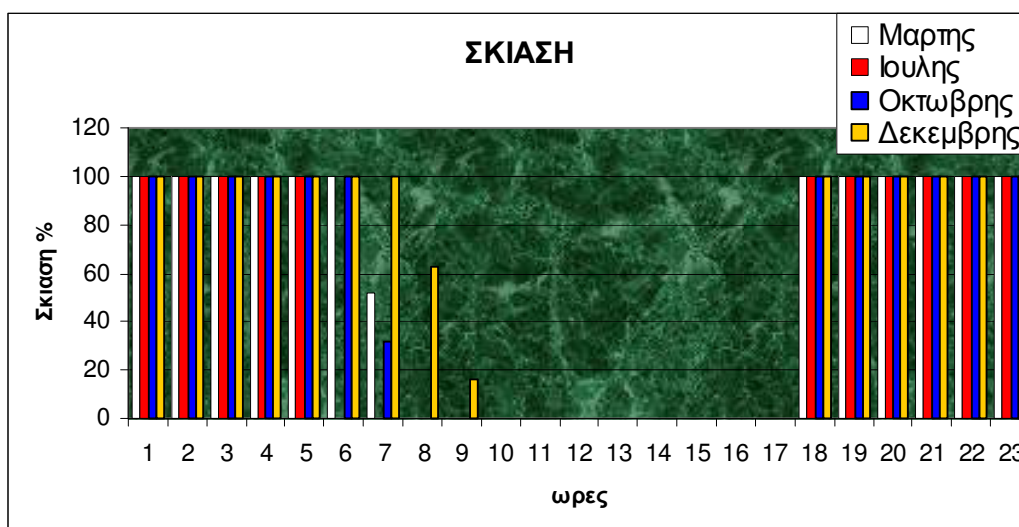
Για γεωγραφικό πλάτος 60 μοιρών το ποσοστό σκίασης αυξάνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό κατά την χειμερινή περίοδο καθώς μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος κατά 60 μοίρες και η θέση του ήλιου βρίσκεται πιο χαμηλά ως προς τη τοποθεσία των φ/β συστοιχιών(γεωγραφικό πλάτος 60 μοίρες). Επιπλέον είναι αισθητή η αύξηση της σκίασης την άνοιξη και το φθινόπωρο. Στο γεωγραφικό πλάτος των 60 μοιρών δηλαδή για περιοχές της βόρειας ευρώπης η σκίαση ελαχιστοποιείται την καλοκαιρινή περίοδο.



Σχημα 6.14 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος φ=60 μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

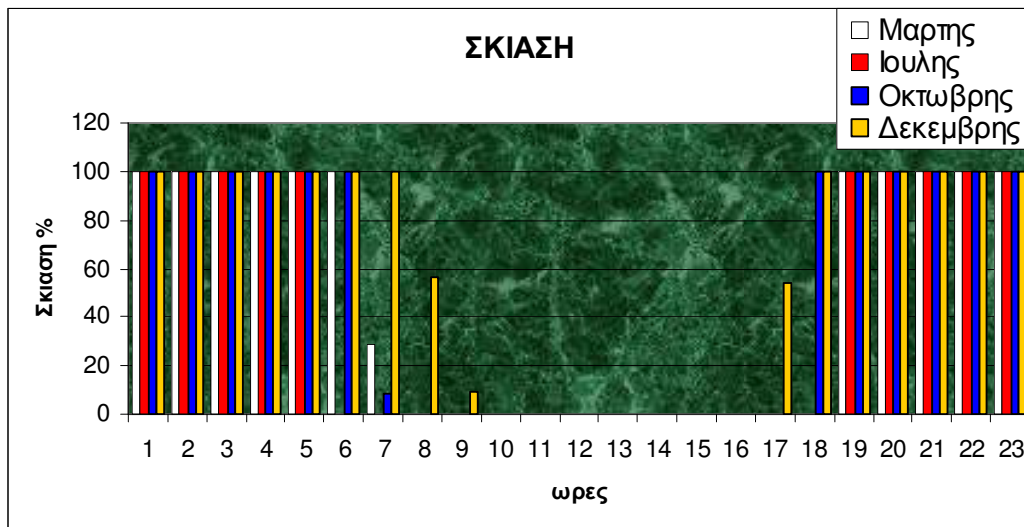
Εφαρμόζοντας το βασικό σενάριο για τα χανία σε διαφορετικά αζιμούθια από -30 έως 30 μοίρες :

Για αζιμούθιο -30 μοιρών η φ/β συστοιχία έχει προσανατολισμό νοτιοανατολικά και παρατηρείται αύξηση της σκίασης στις 6 το βράδυ για όλες τις εποχές σε σύγκριση με το βασικό σενάριο(Χανιά). Κατά τη δύση του ήλιου η ακτίνες του προσπίπτουν στο πίσω μέρος της φ/β συστοιχίας. Τις πρωινές ώρες παρατηρείται αύξηση της σκίασης για όλες τις εποχές εκτός από το καλοκαίρι. Σε αντίθεση κατά την καλοκαιρινή περίοδο τα ποσοστά της σκίασης βελτιώνονται αισθητά για τις πρωινές ώρες και ιδιαίτερα στις 6 το πρωί όπου η σκίαση είναι μηδενική. Τπ γεγονός αυτό οφείλεται στον προσανατολισμό της φ/β συστοιχίας που είναι τοποθετημένη νοτιοανατολικά.



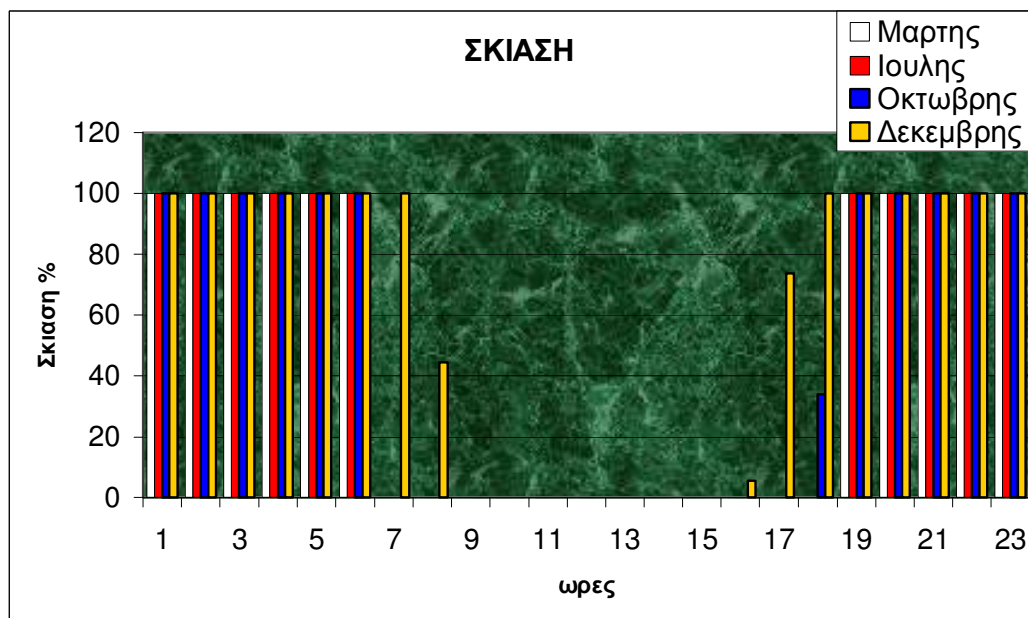
Σχημα 6.15: Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νοτιοανατολικό προσανατολισμό($\gamma=-30$ μοίρες).

Για αζιμούθιο -15 μοιρών η φ/β συστοιχία έχει προσανατολισμό νοτιοανατολικά και παρατηρείται αύξηση της σκίασης στις 6 το βράδυ για το φθινόπωρο και το χειμώνα σε σύγκριση με το βασικό σενάριο(χανιά). Τα ποσοστά σκίασης για χειμώνα είναι μειωμένα σε σύγκριση με το αζιμούθιο των - 30 μοιρών αλλά όμως παραμένουν αυξημένα σε σύγκριση με το βασικό σενάριο.



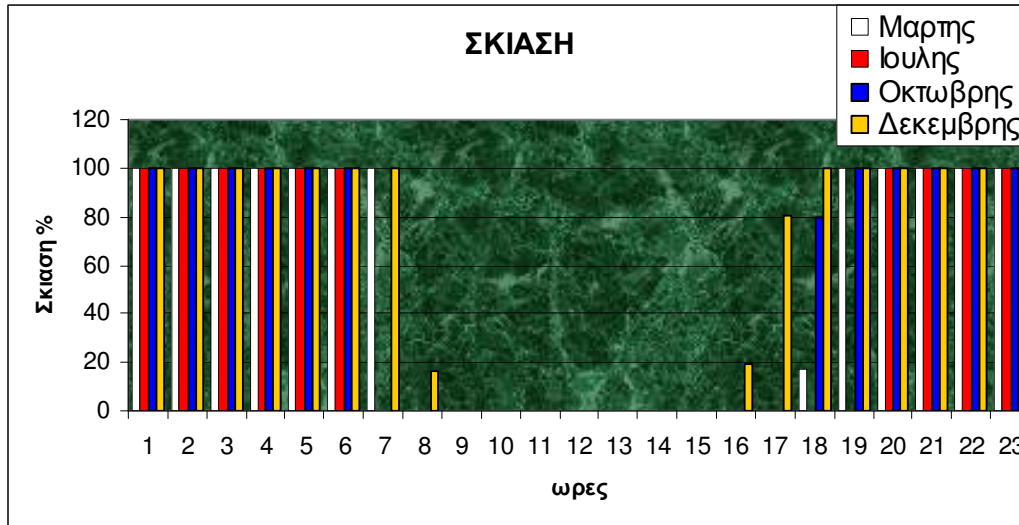
Σχημα 6.16: Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νοτιοανατολικό προσανατολισμό ($\gamma=-15$ μοίρες).

Για αζιμούθιο 0 μοιρών η ϕ/β συστοιχία έχει προσανατολισμό νότιο και παρατηρείται μείωση της σκίασης για την χειμερινή περίοδο. Είναι ένα ρεαλιστικό σενάριο και αποτελεί την καλύτερη δυνατή ρύθμιση μιας Φ/B συστοιχίας ώστε να εμφανίζεται η μικρότερη δυνατή σκίαση στη διάρκεια ενός έτους για τα χανιά.



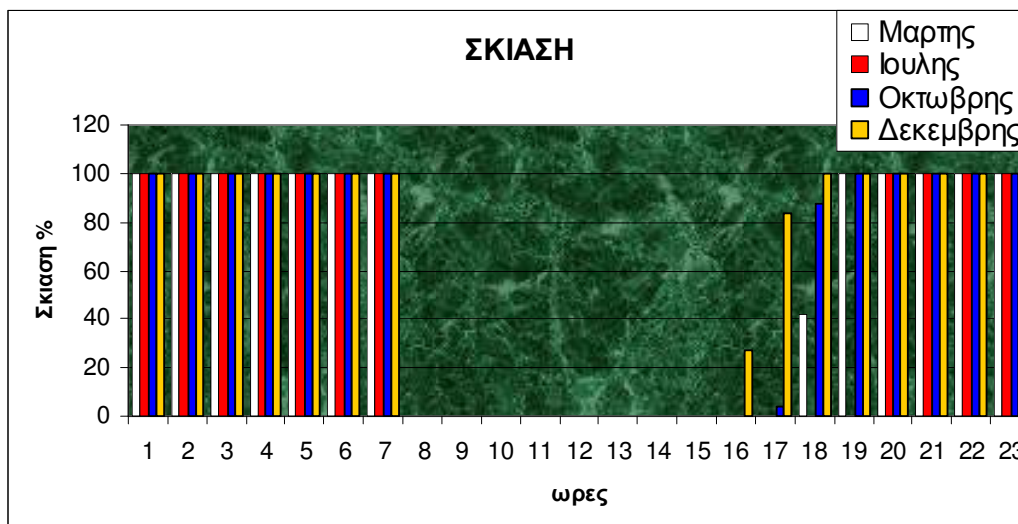
Σχημα 6.17: Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νότιο προσανατολισμό.

Για αζιμούθιο 15 μοιρών η φ/β συστοιχία έχει προσανατολισμό νοτιοδυτικό και παρατηρείται μείωση της σκίασης στις 7 το βράδυ για το καλοκαίρι σε σύγκριση με το βασικό σενάριο(χανιά) επειδή στη δύση του ήλιου οι ακτίνες του προσπίπτουν στο μπροστινό μέρος της φ/β συστοιχίας. Τις πρωινές ώρες και πιο συγκεκριμένα στις 7 το πρωί παρατηρείται αύξηση της σκίασης. Εκτός από το χειμώνα παρουσιάζεται σκίαση και στην άνοιξη σε αντίθεση με το βασικό σενάριο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον προσανατολισμό της φ/β συστοιχίας που είναι τοποθετημένη νοτιοδυτικά.



Σχημα 6.18: Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νοτιοδυτικό προσανατολισμό($\gamma=15$ μοίρες).

Για αζιμούθιο 30 μοιρών η φ/β συστοιχία έχει προσανατολισμό νοτιοδυτικό και παρατηρείται αύξηση της σκίασης για όλες τις εποχές στις πρωινές ώρες κατά την ανατολή του ήλιου(7 ώρα) σε σύγκριση με το βασικό σενάριο(χανιά).

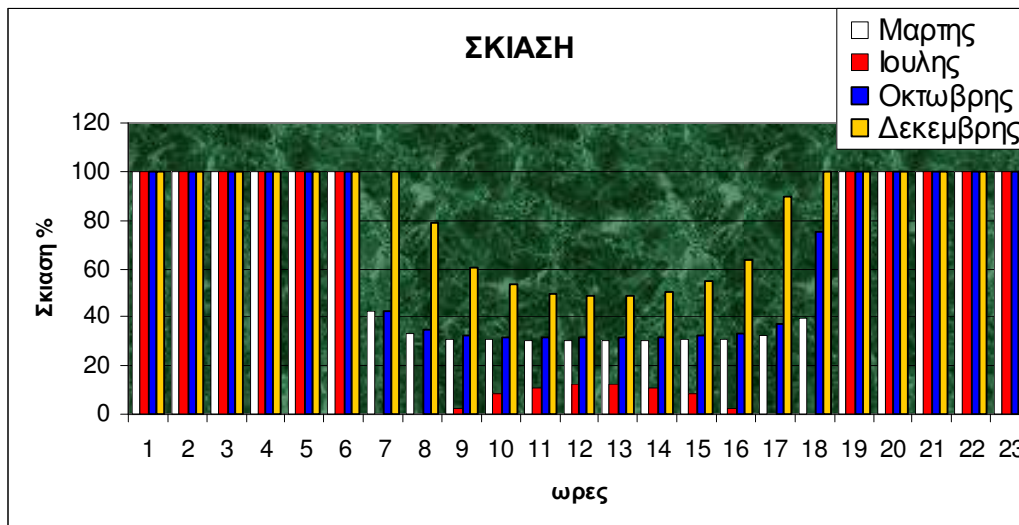


Σχημα 6.19 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και νοτιοδυτικό προσανατολισμό($\gamma=30$ μοίρες).

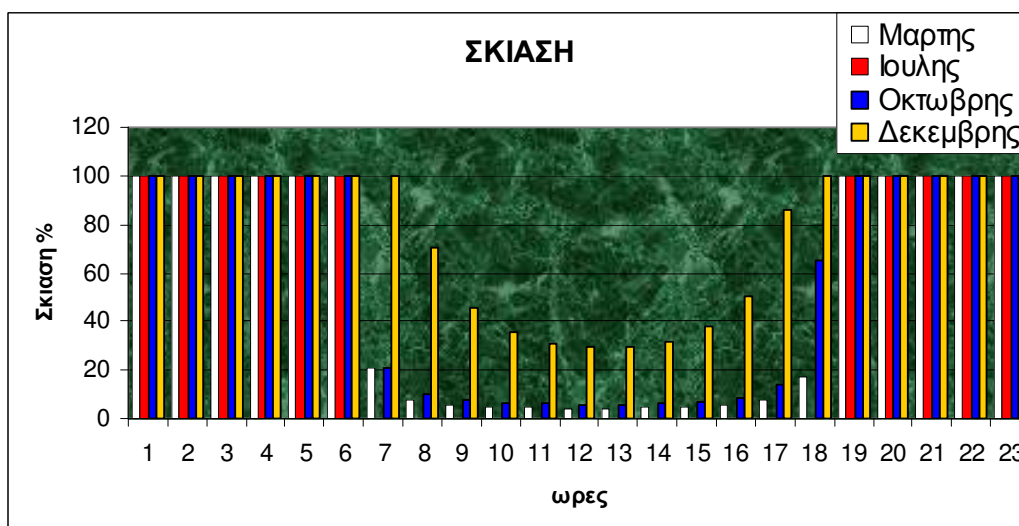
Για τα παρακάτω γραφήματα γίνεται κατανοητό ότι μεγαλώνοντας την απόσταση μεταξύ ϕ/β συστοιχιών η σκίαση μειώνεται με ραγδαίους ρυθμούς για όλες τις εποχές εκτός από τη καλοκαιρινή περίοδο. Το καλοκαίρι ο ήλιος βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο του ουρανού σε σχέση με τις άλλες εποχές για αυτό δεν επηρεάζεται όσο οι άλλοι μήνες από την απόσταση. Κατά συνέπεια η απόσταση είναι ο κυριότερος παράγοντας ως προς τη ρύθμιση της σκίασης.

Όσο αναφορά το βασικό σενάριο του 5% της μη αξιοποιήσιμης ενέργειας(4.75m για χανιά) είναι φανερό ότι η σχέση απόδοσης σκίασης είναι σαφώς καλύτερη σε σύγκριση με το το βασικό σενάριο του 10% της μη αξιοποιήσιμης ενέργειας(4.33m για χανιά) με μοναδικό μειονέκτημα την χρησιμοποίηση μεγαλύτερης έκτασης στο σενάριο του 5%.

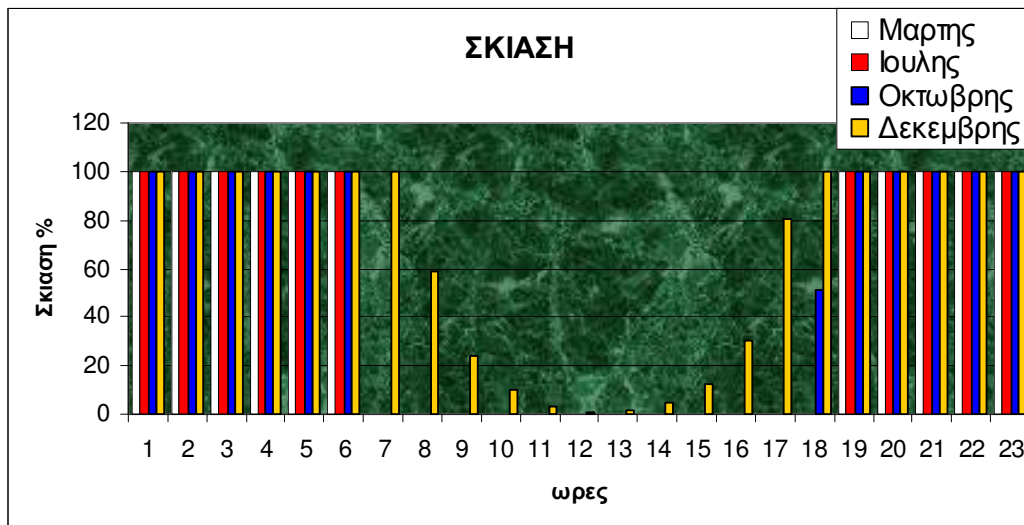
Για απόσταση μεγαλύτερη των 4.75 μέτρων ανάμεσα στις ϕ/β συστοιχίες το ποσοστό της σκίασης μειώνεται με πολύ αργό ρυθμό. Για απόσταση μικρότερη των 4.75 μέτρων ανάμεσα στις ϕ/β συστοιχίες το ποσοστό της σκίασης είναι μεγάλο με αποτέλεσμα να χάνουμε σε απόδοση. Συμπέρασμα ότι από στα 4.33 μέτρα και στα 4.75 μέτρα έχουμε την καλύτερη σχέση χώρου απόδοσης.



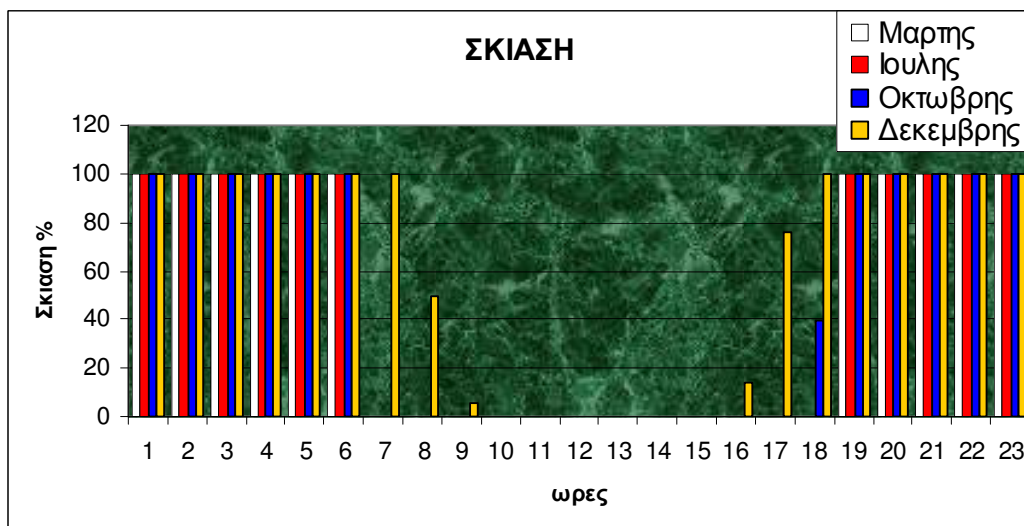
Σχημα 6.20 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $Soe=1.82m$.



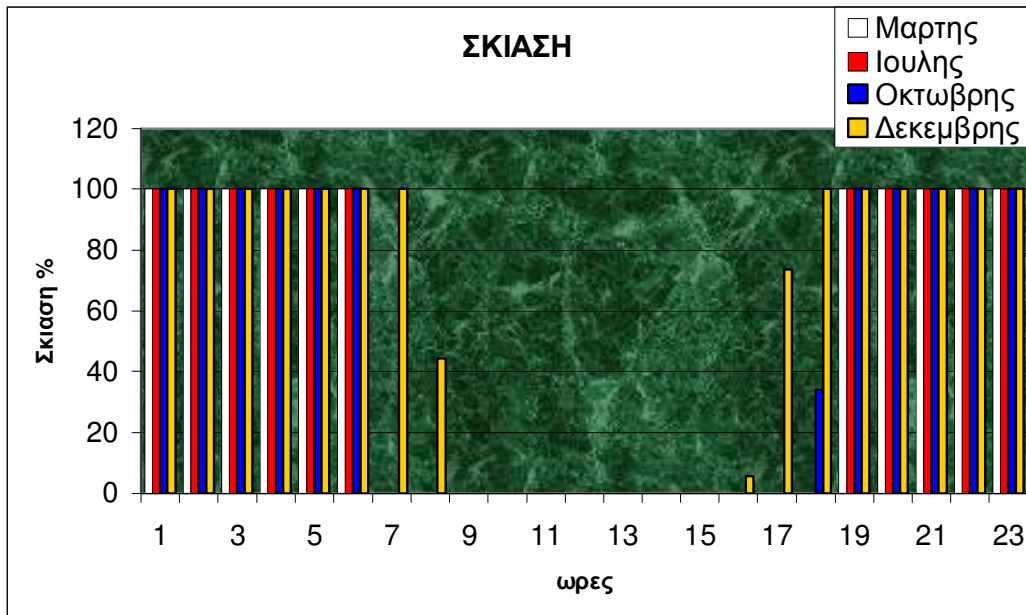
Σχημα 6.21 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $Soe=2.5m$.



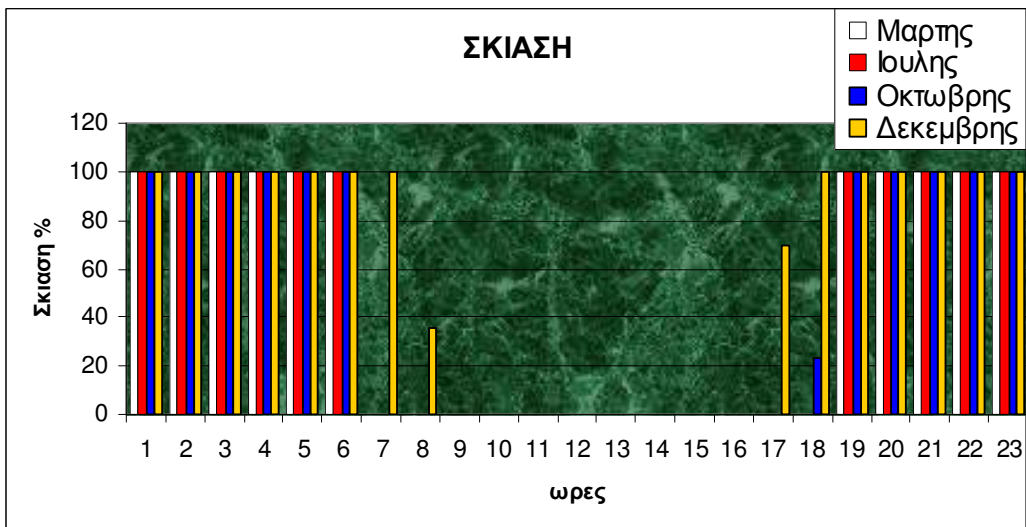
Σχημα 6.22 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $Soe=3.5m$.



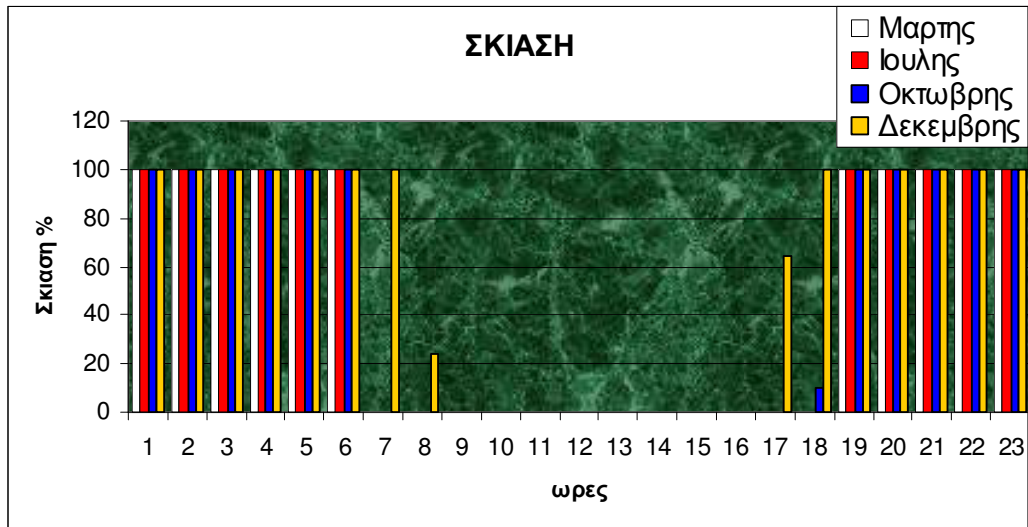
Σχημα 6.23 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $Soe=4.33m$.



Σχημα 6.24 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $Soe=4.75m$.



Σχημα 6.25 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $Soe=5.5m$.

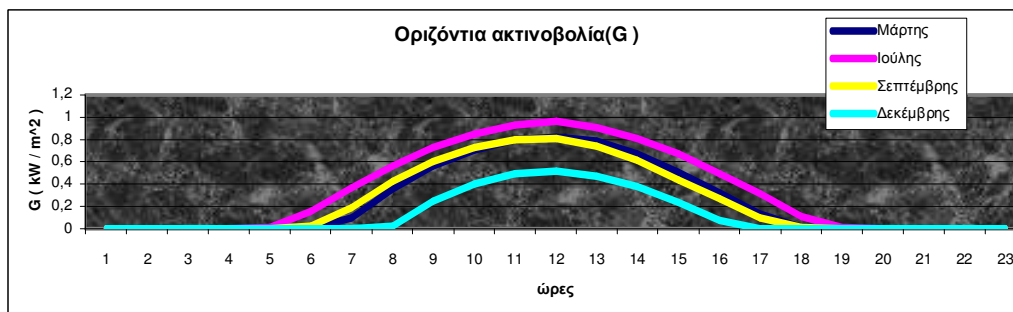


Σχημα 6.26 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $S_{oe}=6.5m$.

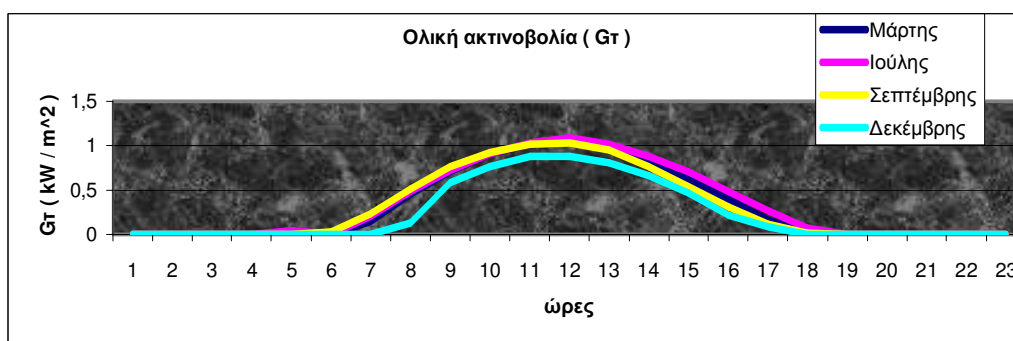
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1) Η ολική ακτινοβολία εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την οριζόντια ακτινοβολία G , όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1 και 7.2.



Σχήμα 7.1 :Γράφημα οριζόντιας ολικής ακτινοβολίας G



Σχήμα 7.2 :Γράφημα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας G_t για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$

2) Η γωνία πρόσπτωσης Θ επηρεάζει άμεσα την ισχύ εξόδου. Όσο πιο μικρή είναι η γωνία πρόσπτωσης Θ και άρα τόσο πιο κάθετες οι ακτίνες του ήλιου στο συλλέκτη τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ισχύς εξόδου P_{pv} . Φέρεται στο παρακάτω πίνακα 8.1.

3) Η ολική ηλιακή ακτινοβολία G_t επηρεάζει άμεσα και σε μεγάλο βαθμό την ισχύ εξόδου των φ/β συστοιχιών. Όσο μεγαλύτερη είναι η G_t τόσο μεγαλύτερη ισχύ θα παράγει η φ/β συστοιχία όπως φαίνεται στο πίνακα 8.1 που η G_t είναι μέγιστη.

Πίνακας 7.1 :Μέγιστη ισχύς του έτους για διαφορετικές κλίσεις

Ώρες	Μέρες	Μήνες	Κλίση(μοίρες)	Θ (μοίρες)	$G_t(kW/m^2)$	Ισχύς(kW/m^2)
13:00	70	Μάρτις	38	7,70	1,12	85,93
12:00	160	Ιούνης	23	9,58	1,20	82,88
12:00	48	Φλεβάρης	53	9,57	1,13	86,10

- 4) Για κλίση $\beta=23$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ που είναι η βέλτιστη κλίση για το καλοκαίρι η ισχύς είναι ιδιαίτερα υψηλή τους μήνες αυτούς.
- 5) Για κλίση $\beta=53$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ που είναι η βέλτιστη κλίση για την χειμερινή περίοδο η ισχύς είναι ιδιαίτερα υψηλή τους μήνες αυτούς.
- 6) Για κλίση $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=90$ (δύση-υπερβαίνουμε το όριο των 30 μοιρών που έχει ελάχιστη επίδραση στην ισχύ της Φ/β συστοιχίας) η ισχύς έχει σημαντική πτώση σε όλους τους μήνες. . Εξαιτίας του προσανατολισμού του συλλέκτη στην δύση η Φ/β συστοιχία καθυστερεί να εκτεθεί στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια το χρονικό διάστημα που παράγεται η ισχύς μετατοπίζεται προς το απόγευμα.
- 7) Για κλίση $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=-90$ (ανατολή-υπερβαίνουμε το όριο των 30 μοιρών που έχει ελάχιστη επίδραση) η ισχύς έχει σημαντική πτώση σε όλους τους μήνες. Η ισχύς που παράγεται ενοείται ιδιαίτερα τις πρωινές ώρες που ο συλλέκτης είναι προσανατολισμένος στην ανατολή.
- 8) Για κλίση $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=-180$ (βορράς-υπερβαίνουμε το όριο των 30 μοιρών που έχει ελάχιστη επίδραση στην ισχύ) η ισχύς έχει μεγάλη πτώση σε όλους τους μήνες. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα χρονικά διαστήματα που παράγει ισχύ η Φ/β συστοιχία είναι περίπου ίσα με τα αντίστοιχα που ήταν για κλίση συλλέκτη $\beta=38$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η ισχύς κατά την χειμερινή περίοδο μηδενίζεται και οφείλεται στο ότι η ολική ηλιακή ακτινοβολία είναι και αυτή περίπου ίση με μηδέν.
- 9) Για κλίση $\beta=38$ γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ και τιμή ανακλαστικότητας εδάφους ίση με 0.60 (χιόνι) η ισχύς κατά την καλοκαιρινή περίοδο καθώς και για τον μήνα του Μάρτη και Σεπτεμβρίου αυξάνει ενώ τον Δεκέμβριο μειώνεται ελάχιστα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με αύξηση της γωνίας β του συλλέκτη πχ στις 70 μοίρες φέεται ότι η ισχύς τον μήνα Δεκέμβριο αυξάνει αισθητά. Με τον τρόπο αυτό ο συλλέκτης έχει την δυνατότητα να αποροφάει μεγαλύτερα ποσά ανακλώμενης ακτινοβολίας που προέρχονται από το χιόνι (ιδιαίτερα μεγάλος συντελεστής ανακλαστικότητας ίσος με 0.60).
- 10) Για κλίση συλλέκτη $\beta=33$ και γωνία αζιμουθίου $\gamma=0$ έχουμε την καλύτερη δυνατή παραγωγή ενέργειας σε ένα έτος για την Ελλάδα. Το σύστημα της Φ/β συστοιχίας βρίσκεται σε βέλτιστη κλίση για όλους τους μήνες τους έτους και τα αποτελέσματα είναι περισσότερο ικανοποιητικά από τις άλλες κλίσεις. Το καλοκαίρι για βέλτιστη κλίση 23 μοιρών παρουσιάζει καλύτερη συνολική ενέργεια από ότι ο χειμώνας για την δικία του βέλτιστη κλίση 53 μοιρών το οποίο δικαιολογείται καθώς η καλοκαιρινή περίοδος είναι πιο παραγωγική και η οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία G είναι ιδιαίτερα υψηλή σε σχέση με το χειμώνα και επηρεάζει έμμεσα την αποδιδόμενη ισχύ. Φέεται στον πίνακα 8.2.

Πίνακας 7.2 : Συνολική ετήσια ενέργεια για διαφορετικές κλίσεις

Κλίση(μοίρες)	Αζιμούθιο(μοίρες)	Συνολική ετήσια ενέργεια (MWh)
23	0	150,80
28	0	152,59
33	0	153,44
38	0	153,27
43	0	152,02
48	0	149,70
53	0	146,31

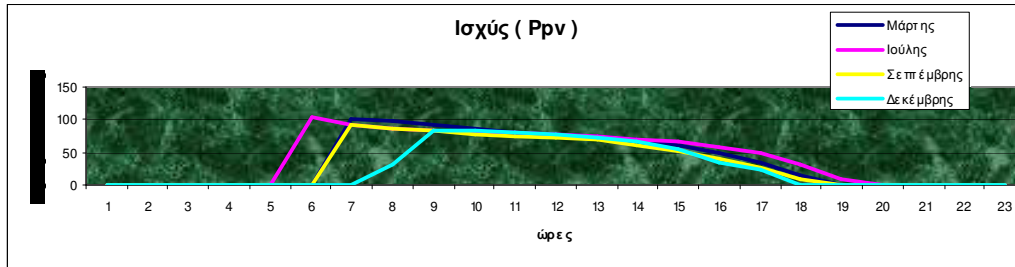
11) Από τα παρακάτω πίνακα φαίνεται ότι το άμορφο πυρίτιο συμπεριφέρεται καλύτερα από το μονοκρυσταλλικό και ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες στην Ελλάδα. Αν και το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει απόδοση από 15-18% ενώ το άμορφο μόλις 6-8% οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκα thin films πυριτίου είναι καλύτερες για περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες.

Πίνακας 7.3 : Συνολική ετήσια ενέργεια για διαφορετικό τύπο πυριτίου

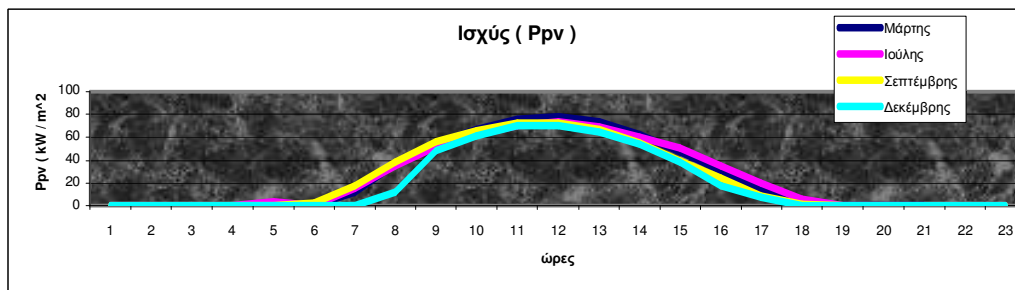
Άμορφο πυρίτιο (θερμοκρασιακός συντελεστής -0.0011)		Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (θερμοκρασιακός συντελεστής -0.004)	
Κλίση	Ετήσια συνολική ενέργεια	Κλίση	Ετήσια συνολική ενέργεια
23	158,74	23	150,80
33	161,28	33	153,44
53	153,14	53	146,31

12) Για σύστημα δύο αξόνων η ισχύς αυξάνεται σε όλες τις εποχές του χρόνου σε σύγκριση με το σύστημα σταθερής στήριξης το οποίο έχει βέλτιστη κλίση $\beta=38$ και προσανατολισμό νότιο $\gamma=0$. Η αύξηση της ισχύς στο σύστημα Tracker οφείλεται τόσο στην αύξηση της ολικής ακτινοβολίας G_t όσο και στο ότι η γωνία πρόσπτωσης θ μηδενίζει και η ακτίνες του ήλιου είναι κάθετες στο συλλέκτη για όλη τη διάρκεια της μέρας. Διακρίνεται στην ανατολή και τη δύση του ηλίου πολύ υψηλή ισχύ. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το σύστημα δύο αξόνων ακολουθεί την τροχιά του ήλιου από την ανατολή μέχρι την δύση με αποτέλεσμα οι ακτίνες του ήλιου να είναι διαρκώς κάθετες στο

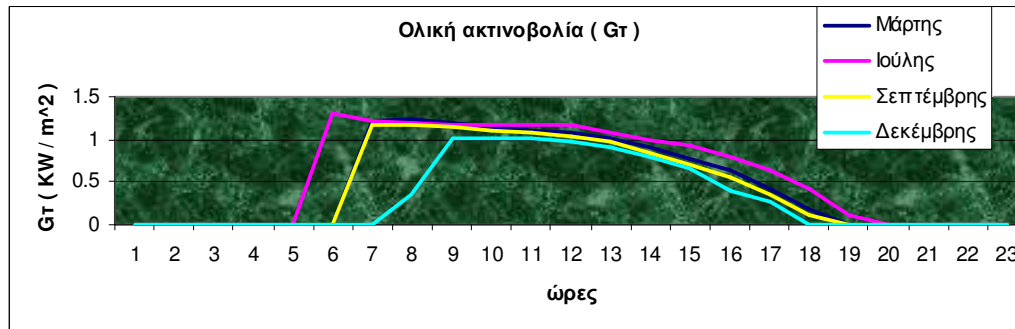
συλλέκτη. Έτσι δικαιολογείται η διαφορετικότητα στις παρακάτω καμπύλες ισχύος.



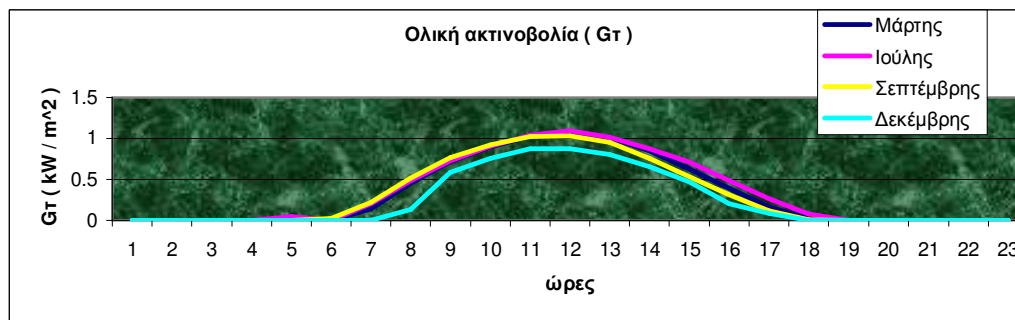
Σχήμα 7.3 : Γράφημα ισχύος Φ/Β συστοιχίας για σύστημα Tracker



Σχήμα 7.4 :Γράφημα ισχύος Φ/Β συστοιχίας για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για φ/β συστοιχίες σταθερής στήριξης.



Σχήμα 7.5:Γράφημα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας G_t για σύστημα δύο αξόνων(Tracker)



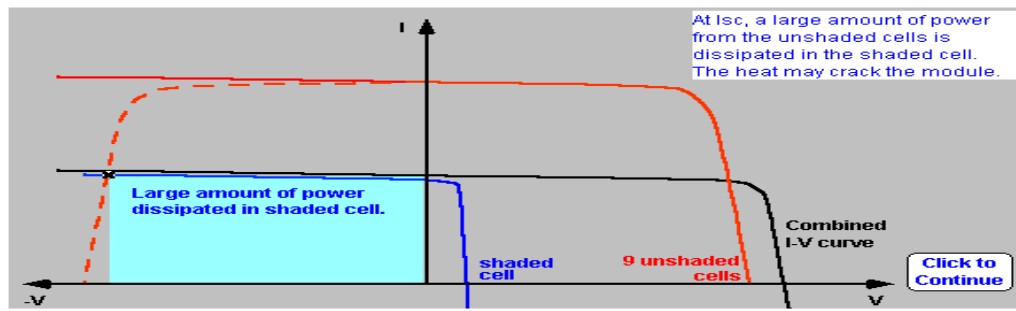
Σχήμα 7.6 :Γράφημα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας G_t για κλίση $\beta=38$ και $\gamma=0$ για φ/β συστοιχίες σταθερής στήριξης

13) Παρατηρείται όπως είναι αναμενόμενο ότι το σύστημα δύο αξόνων(Tracker) αποδίδει πολύ καλύτερα από το σύστημα σταθερής στήριξης, όπως φαίνεται στον πίνακα 7.4.

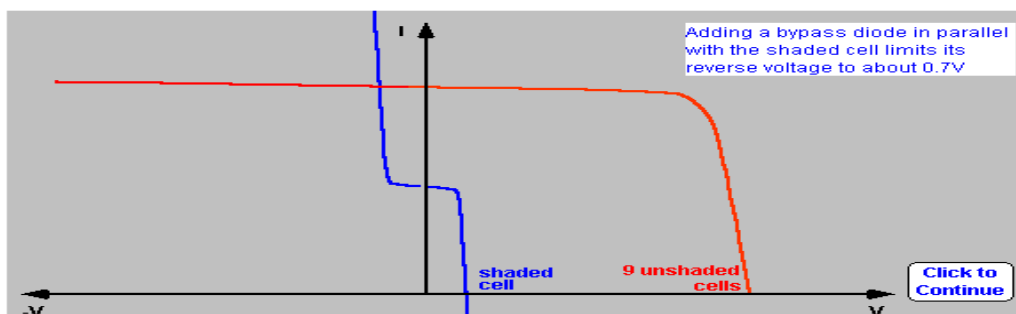
Πίνακας 7.4 : Συνολική ετήσια ενέργεια για σύστημα Tracker και σύστημα σταθερής στήριξης φ/β συστοιχιών

Κλίση(μοίρες)	Αζιμούθιο(μοίρες)	Συνολική ετήσια ενέργεια (MWh)
$\beta=\Theta_z$	$\gamma=\gamma_s$	238,55
$\beta=38$	$\gamma=0$	153,27

14) Η διόδος Bypass προστατεύει τα ηλιακά κελιά από την υψηλή θερμοκρασία που προκαλείται σε συνθήκες σκίασης.



Σχήμα 7.7 : Καμπύλη I-V (δέκα, εννέα και ενός) ηλιακών κελιών χωρίς διόδο Bypass και το ένα κελί να σκιάζεται. Το φαινόμενο προκαλεί αύξηση θερμοκρασίας στο πλαίσιο.



Σχήμα : 7.8 : Καμπύλες I-V (εννέα και ενός) ηλιακών κελιών με διόδο Bypass παράλληλα στο κελί που σκιάζεται . Μείωση της ανάστροφης τάσης στα 0.7V

15) Α) Στα Χανιά($\varphi=35$) για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών και προσανατολισμό νότιο($\gamma=0$) παρατηρείται σκίαση μόνο κατά την χειμερινή περίοδο και πιο συγκεκριμένα κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου. Η εμφάνιση σκίασης την χειμερινή περίοδο οφείλεται στην διαφορετικότητα της κίνησης του ήλιου για κάθε εποχή. Τις υπόλοιπες εποχές δεν παρατηρείται σκίαση με μοναδική εξαίρεση το φθινόπωρο με σκίαση(30%) κατά την δύση του ηλίου.

Β) Για κλίση συλλέκτη 45 μοιρών παρατηρείται αύξηση της σκίασης κατά την χειμερινή περίοδο σε περισσότερες ώρες της μέρας . Τις υπόλοιπες εποχές δεν παρατηρείται σκίαση με μοναδική εξαίρεση το φθινόπωρο με σκίαση(45%) κατά την δύση του ηλίου.

Γ) Για κλίση συλλέκτη 60 μοιρών παρατηρείται αύξηση της σκίασης κατά την χειμερινή περίοδο σε περισσότερες ώρες της μέρας σε σύγκριση με τη κλίση συλλέκτη 45 μοιρών . Επίσης την καλοκαιρινή περίοδο εμφανίζεται ολική σκίαση στις 7 το πρωί και στις 6 το βράδυ το οποίο δεν υφίσταται για κλίση συλλέκτη 30 και 45 μοιρών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ : Άρα η καλύτερη κλίση συλλέκτη για τα Χανιά είναι 30 μοίρες.

16) Α) Για γεωγραφικό πλάτος 0 μοιρών(ισημερινός) παρατηρείται αύξηση της σκίασης στις 7 το πρωί και στις 6 το βράδυ για την καλοκαιρινή περίοδο σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Το καλοκαίρι η μέρα είναι μικρότερη στον ισημερινό από ότι στο βόρειο ημισφαίριο και ο ήλιος διανύει μικρότερη τροχιά. Σε αντίθεση κατά τη χειμερινή περίοδο η μέρα είναι μεγαλύτερη στον ισημερινό, ο ήλιος βρίσκεται σε ψηλότερο σημείο με αποτέλεσμα να μην αντιμετωπίζονται προβλήματα σκίασης.

Β) Για γεωγραφικό πλάτος 10 μοιρών (κοντά στον ισημερινό) παρατηρείται αύξηση της σκίασης στις 7 το πρωί και στις 6 το βράδυ για την καλοκαιρινή περίοδο σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Το καλοκαίρι η μέρα είναι μικρότερη στον ισημερινό από ότι στο βόρειο ημισφαίριο και ο ήλιος διανύει μικρότερη τροχιά. Σε αντίθεση κατά τη χειμερινή περίοδο η μέρα είναι μεγαλύτερη στον ισημερινό, ο ήλιος βρίσκεται σε ψηλότερο σημείο με αποτέλεσμα να μην αντιμετωπίζονται προβλήματα σκίασης. Επιπλέον εμφανίζεται ένα πολύ μικρό ποσοστό σκίασης κατά την χειμερινή περίοδο καθώς μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος κατά 10 μοίρες και η θέση του ηλίου βρίσκεται πιο χαμηλά ως προς τη τοποθεσία των φ/β συστοιχιών(γεωγραφικόπλάτος 10 μοίρες).

Γ) Για γεωγραφικό πλάτος 20 μοιρών το ποσοστό σκίασης αυξάνεται κατά την χειμερινή περίοδο καθώς μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος κατά 20 μοίρες και η θέση του ηλίου βρίσκεται πιο χαμηλά ως προς τη τοποθεσία των φ/β συστοιχιών(γεωγραφικόπλάτος 20 μοίρες). Λόγο του γεωγραφικού πλάτους που μεγαλώνει συνεχώς όσο κινούμαστε προς το βόρειο ημισφαίριο παρατηρείται μείωση της σκίασης το καλοκαίρι.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ : Άρα όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος καθώς κινούμαστε βορειότερα η σκίαση αυξάνει το χειμώνα και ελαχιστοποιείται την καλοκαιρινή περίοδο.

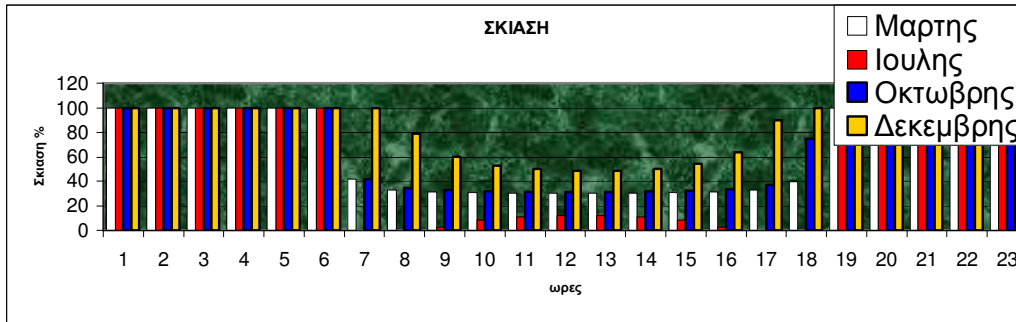
17) Α) Για αζιμούθιο -30 μοιρών η φ/β συστοιχία έχει προσανατολισμό νοτιοανατολικά και παρατηρείται αύξηση της σκίασης στις 6 το βράδυ για όλες τις εποχές σε σύγκριση με το βασικό σενάριο(χανιά). Κατά τη δύση του ήλιου η ακτίνες του προσπίπτουν στο πίσω μέρος της φ/β συστοιχίας. Τις πρωινές ώρες παρατηρείται αύξηση της σκίασης για όλες τις εποχές εκτός από το καλοκαίρι. Σε αντίθεση κατά την καλοκαιρινή περίοδο τα ποσοστά της σκίασης βελτιώνονται αισθητά για τις πρωινές ώρες και ιδιαίτερα στις 6 το πρωί όπου η σκίαση είναι μηδενική. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον προσανατολισμό της φ/β συστοιχίας που είναι τοποθετημένη νοτιοανατολικά.

Β) Για αζιμούθιο 30 μοιρών η φ/β συστοιχία έχει προσανατολισμό νοτιοδυτικό και παρατηρείται αύξηση της σκίασης για όλες τις εποχές στις πρωινές ώρες κατά την ανατολή του ήλιου(7 ώρα) σε σύγκριση με το βασικό σενάριο(χανιά).

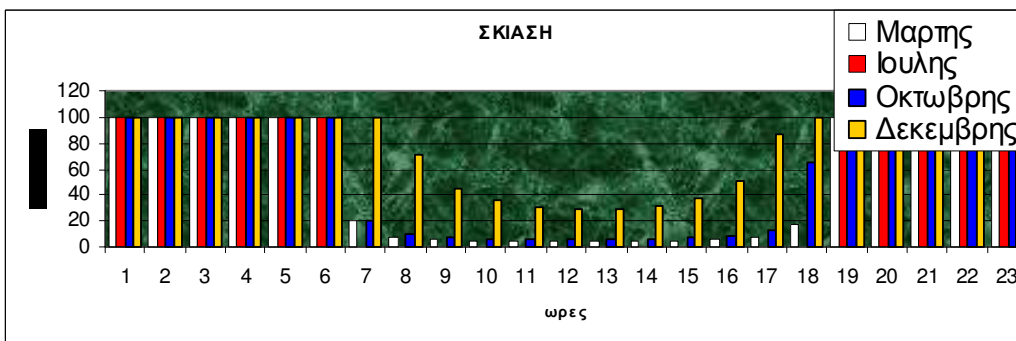
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ : Για αζιμούθιο 0 μοιρών η φ/β συστοιχία έχει προσανατολισμό νότιο και παρατηρείται μείωση της σκίασης για την χειμερινή περίοδο . Είναι ένα ρεαλιστικό σενάριο και αποτελεί την καλύτερη δυνατή ρύθμιση μιας Φ/Β συστοιχίας ώστε να εμφανίζεται η μικρότερη δυνατή σκίαση στη διάρκεια ενός έτους για τα χανιά. Επίσης παρατηρείται ότι για αζιμούθιο -15 μοιρών και 15 μοιρών τα ποσοστά σκίασης κυμαίνονται περίπου ίδια με τα ποσοστά σκίασης για αζιμούθιο ίσο με μηδέν.

Για τα παρακάτω γραφήματα γίνεται κατανοητό ότι μεγαλώνοντας την απόσταση μεταξύ φ/β συστοιχιών η σκίαση μειώνεται με ραγδαίους ρυθμούς για όλες τις εποχές εκτός από τη καλοκαιρινή περίοδο. Το καλοκαίρι ο ήλιος βρίσκεται στο ψηλότερο σημείο του ουρανού σε σχέση με τις άλλες εποχές για αυτό δεν επηρεάζεται όσο οι άλλοι μήνες από την απόσταση. Κατά συνέπεια η απόσταση είναι ο κυριότερος παράγοντας ως προς τη ρύθμιση της σκίασης. Όσο αναφορά το βασικό σενάριο του 5% της μη αξιοποιήσιμης ενέργειας(4.75m για χανιά) είναι φανερό ότι η σχέση απόδοσης σκίασης είναι σαφώς καλύτερη σε σύγκριση με το το βασικό σενάριο του 10% της μη αξιοποιήσιμης ενέργειας(4.33m για χανιά) με μοναδικό μειονέκτημα την χρησιμοποίηση μεγαλύτερης έκτασης στο σενάριο του 5%. Για απόσταση μεγαλύτερη των 4.75 μέτρων ανάμεσα στις φ/β συστοιχίες το ποσοστό της σκίασης μειώνεται με πολύ αργό ρυθμό. Για απόσταση μικρότερη των 4.75 μέτρων ανάμεσα στις φ/β συστοιχίες το ποσοστό της σκίασης είναι μεγάλο με αποτέλεσμα να χάνουμε σε απόδοση.

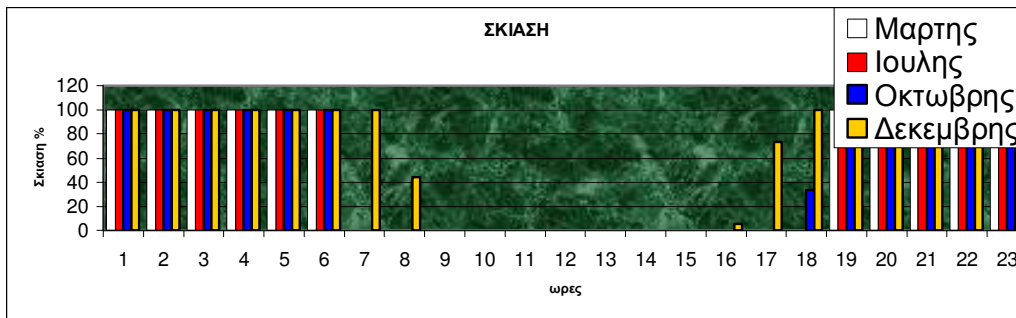
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ : ότι από στα 4.33 μέτρα και στα 4.75 μέτρα έχουμε την καλύτερη σχέση χώρου απόδοσης.



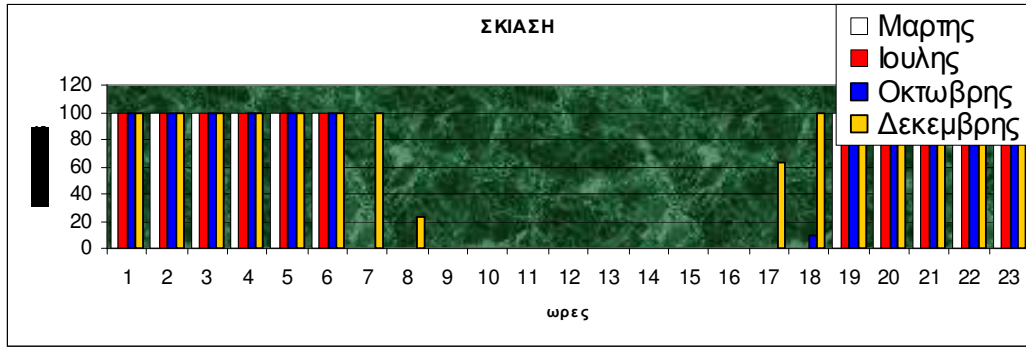
Σχημα 7.9 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $Soe=1.82m$.



Σχημα 7.10 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $Soe=2.5m$.



Σχημα 7.11 : Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $Soe=4.75m$.



Σχημα 7.12: Απεικόνιση γραφήματος σκίασης για γεωγραφικό πλάτος $\phi=35$ μοίρες για κλίση συλλέκτη 30 μοιρών , νότιο προσανατολισμό και απόσταση συστοιχιών $Soe=6.5m$.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

A.1 ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΑΤΛΑΒ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΣΚΙΑΣΗΣ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΣΚΙΑΣΗΣ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

```
gp=input('dose geografiko platos gp: ');
b=input('dose tin klisi b: ');
azim=input('dose gwnia azimuthiou: ');
[Lioc]=24;
[Lst]=30;
Pg= input('dose timi anaklastikotitas analoga me to eidos epifaneias
');
Fpv=0.80 ;
Gstc=1;
Tstc=25;
Ct=input('dose timi tipou piritiou: ');
NOCT=48;
Distance= input('dose timi apostasis metaksi seirwn(>=1.82)se metra:
');
Series=input('dose arithmo seirwn(>=1): ');
Frame=input('dose arithmo plaision se kathe seira(>100): ');
Power=input('dose isxi ana plaisio(se Kw): ');
Height=input('dose ipsos ana plaisio(se m): ');
Amplitude=input('dose platos ana plaisio: ');
Pstc=100 ;
FRACTION=ones(8760,1)*100;

for j=1:8760;
    load G ;
    load Ta ;

Nd(j,1)=ceil(j/24);
Tc(j,1)= -((Nd(j,1)-1)*24)-(j-1);
B(j,1)=(360*(Nd(j,1)-1))/365 ;
d(j,1)=23.45*sind((360*(284+Nd(j,1)))/365) ;
Es(j,1)=3.82*(0.000075+0.001868*cosd(B(j,1))-0.032077*sind(B(j,1))-
0.014615*cosd(2*B(j,1))-0.04089*sind(2*B(j,1))) ;
Ts(j,1)=Tc(j,1)+((Lioc-Lst)/15)+Es(j,1) ;
w(j,1)=(Ts(j,1)-12)*15 ;
ws(j,1)=acosd((-tand(gp))*tand(d(j,1)));
cosdtheta(j,1)=sind(d(j,1))*sind(gp)*cosd(b)-
sind(d(j,1))*cosd(gp)*sind(b)*cosd(azim)+cosd(d(j,1))*cosd(gp)*cosd(b)
)*cosd(w(j,1))+cosd(d(j,1))*sind(gp)*sind(b)*cosd(azim)*cosd(w(j,1))+
cosd(d(j,1))*sind(b)*sind(azim)*sind(w(j,1)) ;
cosdthetaz(j,1)=cosd(gp)*cosd(d(j,1))*cosd(w(j,1))+sind(gp)*sind(d(j,
1)) ;
Gon(j,1)=1.367*(1+0.033*cosd(((360*Nd(j,1))/365))) ;
Go(j,1)=Gon(j,1)* cosdthetaz(j,1) ;
theta(j,1)=acosd(cosdtheta(j,1));
if Go(j,1)<0;
    Go(j,1)=0;
end
end
```



```

for j=1:8760;
    if j~=8760 ;
w1(j,1)=w(j,1) ;
w2(j,1)=w(j+1,1) ;
        else
w1(j,1)=w(j,1) ;
w2(j,1)=w(1,1) ;
            end

Io(j,1)=((12/pi)*Gon(j,1))*(cosd(gp))*cosd(d(j,1))*(sind(w2(j,1))-
sind(w1(j,1)))+(pi*(w2(j,1)-w1(j,1)))/180)*sind(gp)*sind(d(j,1)) ;
I(j,1)=G(j,1) ;
Kt(j,1)=I(j,1)/Io(j,1) ;
    if Kt(j,1)<=0;
Kt(j,1)=0 ;
        elseif Kt(j,1)>1 ;
Kt(j,1)=1;
            end

        if Kt<=0.22 ;
IdprosI(j,1)=1-0.09*Kt(j,1) ;
            elseif Kt>0.22 & Kt<=0.80 ;
IdprosI(j,1)=0.9511-(0.1604*Kt)+(4.388*Kt^2)-
(16.638*Kt^3)+(12.336*Kt^4);
            else Kt>0.80 ;
IdprosI(j,1)=0.165 ;
            end

Id(j,1)=IdprosI(j,1)*I(j,1) ;
Ib(j,1)=I(j,1)-Id(j,1) ;
Rb(j,1)=cosdtheta(j,1)/cosdthetaz(j,1) ;
Ai(j,1)=Ib(j,1)/Io(j,1) ;
    if Io(j,1)>0;
f(j,1)=sqrt(Ib(j,1)/Io(j,1));
        else
f(j,1)=0 ;
            end

It(j,1)=((Ib(j,1)+(Id(j,1)*Ai(j,1)))*Rb(j,1))+(Id(j,1)*(I(j,1)-
Ai(j,1)))*((I(j,1)+cosd(B(j,1)))/2)*(I(j,1)+(f(j,1)*sind(B(j,1)/2)^3)
)+(I(j,1)*Pg*((I(j,1)-cosd(B(j,1)))/2)) ;
    if It(j,1)>1.3 ;
        It(j,1)=1.3 ;
    end

    if It(j,1)<0 ;
        It(j,1)=0 ;
    end

Gt(j,1)=It(j,1) ;
Td(j,1)=Ta(j,1)+((NOCT-20)/0.8)*G(j,1); wn
Ppv(j,1)=Fpv*Pstc*(Gt(j,1)/Gstc)*(1+((Td(j,1)-Tstc)*Ct)) ;
Iomin=min(Io);
Iomax=max(Io);
Ppvmin=min(Ppv);
Ppvmax=max(Ppv);

    if Series>=2 ;

```

```

if I(j,1)>0;
    ThetaZ(j,1)=acosd(cosdthetaz(j,1)) ;
    As(j,1)=90-ThetaZ(j,1) ;
    if As(j,1)<0
        As(j,1)=0;
    end

    azims(j,1)=sign(w(j,1))*abs(acosd(((cosdthetaz(j,1)*sind(gp))-
sind(d(j,1)))/(sind(ThetaZ(j,1))*cosd(gp)))) ;
    tanAp(j,1)=tand(As(j,1))/(cosd(azims(j,1)-azim));
    Ap(j,1)=atand(tanAp(j,1));
    if Distance < 1.82;
        FRACTION(j,1)=100;
    else BAC(j,1)=atand((Height*sind(b))/(Distance-Height*cosd(b))) ;
        if BAC(j,1)>Ap(j,1) ;
            AC(j,1)=(Height*sind(b))/sind(BAC(j,1));
            CAAm(j,1)=180-BAC(j,1)-b ;
            CAMA(j,1)=180-CAAm(j,1)-(BAC(j,1)-Ap(j,1)) ;
            AAm(j,1)=(AC(j,1)*sind(BAC(j,1)-Ap(j,1)))/sind(CAMa(j,1));
            FRACTION(j,1)=(AAm(j,1)/Height)*100 ;
        else FRACTION(j,1)=0;
        end
        if FRACTION(j,1)<0
            FRACTION(j,1)=0;
        elseif FRACTION(j,1)>100
            FRACTION(j,1)=100;
        end
    end
end
end
end
end

pinakas=Ppv(1:744);
subplot(4,3,1);
plot(pinakas);
title('Γενάρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(745:1416);
subplot(4,3,2);
plot(pinakas) ;
title('Φλεβάρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(1417:2160);
subplot(4,3,3);
plot(pinakas);
title('Μάρτις')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(1417:2160);
subplot(4,3,4);
plot(pinakas);
title('Απρίλης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(2881:3624);
subplot(4,3,5);
plot(pinakas);
title('Μάης')

```

```

ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(3625:4344);
subplot(4,3,6);
plot(pinakas);
title('Ιούνης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(4345:5088);
subplot(4,3,7);
plot(pinakas);
title('Ιούλης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(5089:5832);
subplot(4,3,8);
plot(pinakas);
title('Αύγουστος')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(5833:6552);
subplot(4,3,9);
plot(pinakas);
title('Σεπτέμβρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(6553:7296);
subplot(4,3,10);
plot(pinakas);
title('Οκτώμβρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(7297:8016);
subplot(4,3,11);
plot(pinakas);
title('Νοέμβρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(8017:8760);
subplot(4,3,12);
plot(pinakas);
title('Δεκέμβρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')

```

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ TRACKER

```

gp=input('dose geografiko platos gp: ');
[Lioc]=24;
[Lst]=30;
Pg= input('dose timi anaklastikotitas analoga me to eidos epifaneias
');
Fpv=0.80 ;
Gstc=1;
Tstc=25;
Ct=input('dose timi tipou piritiou: ');
NOCT=48;

```

```

Distance= input('dose timi apostasis metaksi seirwn(>=1.82)se metra:
');
Series=input('dose arithmo seirwn(>=1): ');
Frame=input('dose arithmo plasion se kathe seira(>100): ');
Power=input('dose isxi ana plaisio(se Kw): ');
Height=input('dose ipsos ana plaisio(se m): ');
Amplitude=input('dose platos ana plaisio: ');
Pstc=100 ;
FRACTION=ones(8760,1)*100;

for j=1:8760;
    load G ;
    load Ta ;

Nd(j,1)=ceil(j/24);
Tc(j,1)= -((Nd(j,1)-1)*24)-(j-1));
B(j,1)=(360*(Nd(j,1)-1))/365 ;
d(j,1)=23.45*sind((360*(284+Nd(j,1)))/365) ;
Es(j,1)=3.82*(0.000075+0.001868*cosd(B(j,1))-0.032077*sind(B(j,1))-
0.014615*cosd(2*B(j,1))-0.04089*sind(2*B(j,1))) ;
Ts(j,1)=Tc(j,1)+((Lioc-Lst)/15)+Es(j,1) ;
w(j,1)=(Ts(j,1)-12)*15 ;
ws(j,1)=acosd((-tand(gp))*tand(d(j,1)));
cosdthetaz(j,1)=cosd(gp)*cosd(d(j,1))*cosd(w(j,1))+sind(gp)*sind(d(j,
1)) ;
ThetaZ(j,1)=acosd(cosdthetaz(j,1)) ;
b(j,1)=ThetaZ(j,1);
azims(j,1)=sign(w(j,1))*abs(acosd(((cosdthetaz(j,1)*sind(gp))-
sind(d(j,1)))/(sind(ThetaZ(j,1))*cosd(gp))));
azim(j,1)=azims(j,1);
cosdtheta(j,1)=sind(d(j,1))*sind(gp)*cosd(b(j,1))-
sind(d(j,1))*cosd(gp)*sind(b(j,1))*cosd(azim(j,1))+cosd(d(j,1))*cosd(
gp)*cosd(b(j,1))*cosd(w(j,1))+cosd(d(j,1))*sind(gp)*sind(b(j,1))*cosd
(azim(j,1))*cosd(w(j,1))+cosd(d(j,1))*sind(b(j,1))*sind(azim(j,1))*si
nd(w(j,1)) ;
Gon(j,1)=1.367*(1+0.033*cosd(((360*Nd(j,1))/365))) ;
Go(j,1)=Gon(j,1)* cosdthetaz(j,1) ;
theta(j,1)=acosd(cosdtheta(j,1));

    if Go(j,1)<0;
        Go(j,1)=0;
    end
end

for j=1:8760;
    if j~=8760 ;
w1(j,1)=w(j,1) ;
w2(j,1)=w(j+1,1) ;
    else
w1(j,1)=w(j,1) ;
w2(j,1)=w(1,1) ;
    end

Io(j,1)=((12/pi)*Gon(j,1))*(cosd(gp))*cosd(d(j,1))*(sind(w2(j,1))-
sind(w1(j,1)))+(pi*(w2(j,1)-w1(j,1)))/180)*sind(gp)*sind(d(j,1)) ;
I(j,1)=G(j,1) ;
Kt(j,1)=I(j,1)/Io(j,1) ;
    if Kt(j,1)<=0;
Kt(j,1)=0 ;
    elseif Kt(j,1)>1 ;

```

```

Kt(j,1)=1;
end

    if Kt<=0.22 ;
IdprosI(j,1)=1-0.09*Kt(j,1) ;
    elseif Kt>0.22 & Kt<=0.80 ;
IdprosI(j,1)=0.9511-(0.1604*Kt)+(4.388*Kt^2)-
(16.638*Kt^3)+(12.336*Kt^4);
    else Kt>0.80 ;
IdprosI(j,1)=0.165 ;
end

Id(j,1)=IdprosI(j,1)*I(j,1) ;
Ib(j,1)=I(j,1)-Id(j,1) ;
Rb(j,1)=cosdtheta(j,1)/cosdthetaz(j,1) ;
Ai(j,1)=Ib(j,1)/Io(j,1) ;
    if Io(j,1)>0;
f(j,1)=sqrt(Ib(j,1)/Io(j,1));
    else
f(j,1)=0 ;
end

It(j,1)=((Ib(j,1)+(Id(j,1)*Ai(j,1)))*Rb(j,1))+(Id(j,1)*(I(j,1)-
Ai(j,1)))*((I(j,1)+cosd(B(j,1)))/2)*(I(j,1)+(f(j,1)*sind(B(j,1)/2)^3)
)+(I(j,1)*Pg*((I(j,1)-cosd(B(j,1)))/2)) ;
    if It(j,1)>1.3 ;
        It(j,1)=1.3 ;
    end

    if It(j,1)<0 ;
        It(j,1)=0 ;
    end

Gt(j,1)=It(j,1) ;
Td(j,1)=Ta(j,1)+((NOCT-20)/0.8)*G(j,1); wn
Ppv(j,1)=Fpv*Pstc*(Gt(j,1)/Gstc)*(1+((Td(j,1)-Tstc)*Ct)) ;
Iomin=min(Io);
Iomax=max(Io);
Ppvmin=min(Ppv);
Ppvmax=max(Ppv);

    if Series>=2 ;

        if I(j,1)>0;
            ThetaZ(j,1)=acosd(cosdthetaz(j,1)) ;
            As(j,1)=90-ThetaZ(j,1) ;
            if As(j,1)<0
                As(j,1)=0;
            end

            azims(j,1)=sign(w(j,1))*abs(acosd(((cosdthetaz(j,1)*sind(gp))-
sind(d(j,1)))/(sind(ThetaZ(j,1))*cosd(gp)))) ;
            tanAp(j,1)=tand(As(j,1))/(cosd(azims(j,1)-azim));
            Ap(j,1)=atand(tanAp(j,1));
            if Distance < 1.82;
                FRACTION(j,1)=100;
            else BAC(j,1)=atand((Height*sind(b))/(Distance-Height*cosd(b))) ;
                if BAC(j,1)>Ap(j,1) ;
                    AC(j,1)=(Height*sind(b))/sind(BAC(j,1));
                    CAAM(j,1)=180-BAC(j,1)-b ;
                end
            end
        end
    end

```

```

        CAmA(j,1)=180-CAAm(j,1)-(BAC(j,1)-Ap(j,1)) ;
        AAm(j,1)=(AC(j,1)*sind(BAC(j,1)-Ap(j,1)))/sind(CAmA(j,1));
        FRACTION(j,1)=(AAm(j,1)/Height)*100 ;
    else FRACTION(j,1)=0;
    end
    if FRACTION(j,1)<0
        FRACTION(j,1)=0;
    elseif FRACTION(j,1)>100
        FRACTION(j,1)=100;
    end
end
end
end
end

pinakas=Ppv(1:744);
subplot(4,3,1);
plot(pinakas);
title('Γενάρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel('μέρες')
pinakas=Ppv(745:1416);
subplot(4,3,2);
plot(pinakas) ;
title('Φλεβάρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel('μέρες')
pinakas=Ppv(1417:2160);
subplot(4,3,3);
plot(pinakas);
title('Μάρτις')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel('μέρες')
pinakas=Ppv(1417:2160);
subplot(4,3,4);
plot(pinakas);
title('Απρίλης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel('μέρες')
pinakas=Ppv(2881:3624);
subplot(4,3,5);
plot(pinakas);
title('Μάης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel('μέρες')
pinakas=Ppv(3625:4344);
subplot(4,3,6);
plot(pinakas);
title('Ιούνης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel('μέρες')
pinakas=Ppv(4345:5088);
subplot(4,3,7);
plot(pinakas);
title('Ιούλης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel('μέρες')
pinakas=Ppv(5089:5832);
subplot(4,3,8);
plot(pinakas);
title('Αύγουστος')

```

```
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(5833:6552);
subplot(4,3,9);
plot(pinakas);
title('Σεπτέμβρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(6553:7296);
subplot(4,3,10);
plot(pinakas);
title('Οκτώμβρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(7297:8016);
subplot(4,3,11);
plot(pinakas);
title('Νοέμβρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
pinakas=Ppv(8017:8760);
subplot(4,3,12);
plot(pinakas);
title('Δεκέμβρης')
ylabel('Ισχύς σε Watt')
xlabel ('μέρες')
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦ : 1

- [1] <http://www.physics4u.gr/planets/sun.html> , Accessed on 2/2/2009
- [2] http://www.photovoltaicenergy.gr/res/index.php?option=com_content&task=view&id=64&Itemid=70 , Accessed on 2/2/2009
- [3] Ι.Ε.Φραγκιαδάκης, “Φωτοβολταικά Συστήματα“ Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2004.

ΚΕΦ : 2

- [1] <http://www.livepedia.gr/index.php/Γη> , Accessed on 10/2/2009
- [2] <http://el.wikipedia.org/wiki/Ισημερινός> , Accessed on 10/2/2009
- [3] Παύλου Σ. Γεωργιάκη, “Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας “, Σεπτέμβριος 2006
- [4] <http://www.sundials.gr/reading.htm> , Accessed on 12/2/2009
- [5] http://imarinakiss.webs.com/solar_geometry.pdf , Accessed on 13/2/2009
- [6] http://imarinakiss.webs.com/solar_geometry.pdf , Accessed on 13/2/2009
- [7] Ιωάννη Α. Κατσιγιαννη, “Βελτιστοποίηση δομής και οικονομική αξιολόγηση απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας “Χανιά , Ιούνιος 2008

ΚΕΦ : 3

- [1] http://www.telematica.gr/Tech/PV/pv_detail_gr.html , Accessed on 3/3/2009
- [2] http://www.telematica.gr/Tech/PV/types_gr.html , Accessed on 3/3/2009
- [3] http://www.selasenergy.gr/fv_systems.php , Accessed on 10/3/2009
- [4] <http://www.selasenergy.gr/fundamentals.php#bookmark1> Accessed on 10/3/2009
- [5] <http://www.compasolar.gr/photovoltaic.htm> , Accessed on 15/3/2009
- [6] <http://nirsepes.eu/docs/Tselepis.pdf> , Δρ.Ευστάθιος Τσελεπής , “εφαρμογές φωτοβολταικών στα κτήρια “, Δεκεμβρίου 2007
- [7] Ιωάννη Α. Κατσιγιαννη, “Βελτιστοποίηση δομής και οικονομική αξιολόγηση απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας “Χανιά , Ιούνιος 2008

ΚΕΦ: 4

- [1] Ιωάννη Α. Κατοίγιαννη, “Βελτιστοποίηση δομής και οικονομική αξιολόγηση απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας” Χανιά, Ιούνιος 2008
- [2] <http://www.global-energy.eu/dat/C1E0DF19/file.pdf?633877874805937500>, Χάρης Δημουλιάς, “Στοιχεία για την σχεδίαση φ/β συστημάτων συνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο”, Accessed on 20/4/2009
- [3] Ι.Ε.Φραγκιαδάκης, “Φωτοβολταϊκά Συστήματα” Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2004.

ΚΕΦ : 5

- [1] <http://www.pvresources.com/>, Accessed on 1/5/2009
- [2] <http://pvcadrom.pveducation.org/MODULE/Bypass.htm>, Accessed on 10/5/2009

ΚΕΦ : 6

- [1] John A. Duffie & William A. Beckman, “Solar engineering of thermal processes second edition” A Wiley-interscience Publication
- [2] Ι.Ε.Φραγκιαδάκης, “Φωτοβολταϊκά Συστήματα” Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 2004.