



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Επίδραση εποχιακής μεταβολής μετεωρολογικών παραγόντων (ηλιοφάνειας, θερμοκρασίας) και διάρκειας ημέρας στην επιλογή βέλτιστης γωνίας κλίσης σε σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια

Φοιτητής: Κατσίγιαννης Γεώργιος
ΑΜ: 51203935

Επιβλέπων Καθηγητής

Τσεκούρας Γεώργιος
Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

The impact of seasonal variations in meteorological factors (sunlight, temperature) and daylight duration on the selection of the optimal tilt angle for fixed photovoltaic panels.

Student: Katsigiannis Georgios

Registration Number: 51203935

Supervisor

Tsekouras Georgios

Assistant Professor

ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2023

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Τσεκούρας Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής	Μορώνης Αντώνης, Καθηγητής	Κονταξής Παναγιώτης, Λέκτορας

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Κατσίγιαννης Γεώργιος,
09, 2023**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος Κατσίγιαννης Γεώργιος του Μιχαήλ, με αριθμό μητρώου 51203935 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών
Κατσίγιαννης Γεώργιος

Υπογραφή φοιτητή

Ευχαριστίες

Μετά από το ενδιαφέρον και επιτυχημένο ταξίδι μου στο τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών με εξειδίκευση στην Ενέργεια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, θέλω να εκφράσω με μεγάλη εκτίμηση και ευγνωμοσύνη τις ευχαριστίες μου προς τον Επίκουρο Καθηγητή Γεώργιο Τσεκούρα. Ο κ. Τσεκούρας όχι μόνο μου έδωσε την ευκαιρία να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία, αλλά μοιράστηκε επίσης την πολύτιμη γνώση και την εμπειρία του, παρέχοντάς μου κατευθύνσεις και συμβουλές που με βοήθησαν σημαντικά.

Επίσης, δεν μπορώ παρά να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλα τα μέλη του εκπαιδευτικού σώματος και τους διδάσκοντες του προγράμματος. Η αφοσίωση και η προσφορά τους διεύρυναν τις γνώσεις μου και με καθοδήγησαν με επιτυχία στην ακαδημαϊκή μου πορεία και επαγγελματική μου ανάπτυξη.

Τέλος, θέλω να εκφράσω ένα θερμό ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την ανεκτίμητη βοήθεια και την αμέριστη υποστήριξή τους. Η παρουσία και η εμπιστοσύνη σας με έκαναν να φτάσω ως εδώ.

Γεώργιος Κατσίγιαννης

Αθήνα 28/09/2023

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην εξερεύνηση της επίδρασης της εποχιακής μεταβολής μετεωρολογικών παραγόντων, όπως η ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία και η διάρκεια ημέρας, στη βέλτιστη γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Αρχικά, αναλύεται η σχέση ανάμεσα στους μετεωρολογικούς παράγοντες και την ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στα φωτοβολταϊκά πάνελ. Ακολούθως, εξετάζεται η επίδραση αυτής της εποχιακής δυναμικής στη βέλτιστη γωνία κλίσης των πλαισίων, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφοροποίηση των μετεωρολογικών συνθηκών.

Με βάση αναλύσεις δεδομένων και επιστημονικά μοντέλα, πραγματοποιείται μια εμπειριστατωμένη εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο η εποχιακή μεταβολή επηρεάζει τη βέλτιστη γωνία κλίσης, με έμφαση στις μεταβολές της ηλιοφάνειας, θερμοκρασίας και διάρκειας ημέρας, καθώς και στη συσχέτιση με το γεωγραφικό πλάτος.

Από τη σχετική μελέτη προκύπτει ότι η βέλτιστη κλίση των φωτοβολταϊκών πάνελ στην περιοχή της Αθήνας είναι μια πολυπαραγοντική μεταβλητή, όπου πολλοί παράγοντες συνδυάζονται για να καθορίσουν την κατάλληλη γωνία κλίσης. Ακόμη, διαπιστώνεται ότι η ηλιοφάνεια και το γεωγραφικό πλάτος παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της βέλτιστης κλίσης.

Στα πλαίσια εξασφάλισης αξιοπιστίας των δεδομένων και της σχετικής ανάλυσης, η παρούσα μελέτη ολοκληρώθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές μεταβολές που θα προκύψουν στα αποτελέσματα αν αποκλειστεί η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, χρησιμοποιηθεί διαφορετικό μοντέλο ανάλυσης και θεωρητικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας.

Λέξεις – κλειδιά

Εποχιακή Μεταβολή, Μετεωρολογικοί Παράγοντες, Βέλτιστη Γωνία Κλίσης

Abstract

The present diploma thesis focuses on exploring the impact of seasonal variations in meteorological factors, such as sunlight, temperature, and daylight duration, on the optimal tilt angle of photovoltaic panels.

Initially, the relationship between meteorological parameters and solar irradiance reaching the photovoltaic panels is analyzed. Subsequently, the effect of this seasonal dynamic on the optimal tilt angle of the panels is examined, taking into account the variations in meteorological conditions.

Through data analysis and scientific modeling, a comprehensive assessment is conducted on how seasonal variations influence the optimal tilt angle, with emphasis on changes in sunlight, temperature, and daylight duration, as well as in correlation with latitude.

The relevant study reveals that the optimal tilt of photovoltaic panels in the Athens region is a multifactorial variable, where multiple factors combine to determine the appropriate inclination angle. Moreover, it is observed that sunlight and latitude play an important role in determining the optimal slope.

In the context of ensuring the reliability of the data and of the respective analysis, this study was completed taking into account the possible changes that would arise in the results if the effect of ambient temperature was excluded, a different analysis model and theoretical values of solar radiation were used.

Keywords

Seasonal Variation, Meteorological Factors, Optimal Tilt Angle

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
Σκοπός και στόχοι.....	13
Δομή 13	
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Εισαγωγή στα Φ/Β.....	15
1.1 Χαρακτηριστικά ηλιακής ενέργειας.....	15
1.1.1 Ηλιακή ενέργεια.....	15
1.1.2 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου	16
1.1.3 Ποσότητα Ηλιακής Ακτινοβολίας	16
1.2 Δυνατότητα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.....	18
1.3 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών.....	19
1.3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	19
1.3.2 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού στοιχείου	21
1.3.3 Εξέλιξη των φωτοβολταϊκών	22
1.4 Είδη Φωτοβολταϊκών.....	26
1.4.1 Διάκριση βάσει σύνδεσης.....	27
1.4.2 Διάκριση βάσει γενιάς	27
1.4.3 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων	31
1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Φ/Β.....	32
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Βασικές αρχές ηλιακής γεωμετρίας	35
2.1 Η περιστροφή της γης σε σχέση με τον ήλιο.....	35
2.2 Βασικές γωνίες και ορισμοί της ηλιακής γεωμετρίας	36
2.2.1 Ο προσδιορισμός μιας τοποθεσίας πάνω στη γη.....	36
2.2.2 Ορισμοί και γωνίες ηλιακής γεωμετρίας.....	37
2.3 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας.....	43
2.4 Βέλτιστη γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού	53
2.5 Χωροταξική διάταξη φωτοβολταϊκών	54
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Βαθμός απόδοσης και κλίση φωτοβολταϊκών.....	59
3.1 Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας [1]	59
3.2 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου	61
3.2.1 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων	63
3.2.2 Παράγοντες βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου	64
3.3 Υπολογισμός βέλτιστης γωνίας μέσω κώδικα.....	68
3.3.1 Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου	68
3.3.2 Κώδικας εύρεσης βέλτιστης γωνίας κλίσης πάνελ.....	71
3.3.3 Ανάλυση γραμμών εντολών κώδικα.....	75
3.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	78
3.4.1 Μοντέλο Erbs et al	78
4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	85
4.1 Γενικά Συμπεράσματα	85
4.2 Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα	85
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....	87
Αναφορές.....	87
Παράρτημα Α	90

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Φασματική κατανομή ακτινοβολίας εκτός ατμοσφαιράς [8]	44
Πίνακας 2: Ενδεικτικές τιμές (ρ) – Πηγή: Εναλλακτικές μορφές ενέργειας: φωτοβολταϊκά συστήματα: αιολικά συστήματα: υβριδικά συστήματα / Βασίλειος Δ. Μπιτζιώνης, Δημήτριος Β. Μπιτζιώνης, Αθήνα, Τζιόλα, 2011. [10].....	50
Πίνακας 3: Πρότυπες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα [13].....	52
Πίνακας 4: Εποχιακή βέλτιστη κλίση φωτοβολταϊκού κατά κ. Δέρβου [9]	54
Πίνακας 5: Μηνιαία βέλτιστη κλίση φωτοβολταϊκού κατά κ. Μπιτζιώνη [10].....	54
Πίνακας 6: Μέγιστες τιμές εξόδου φωτοβολταϊκού ανά μήνα για τα έτη 1999 - 2008.....	78
Πίνακας 7: Βέλτιστες κλίσεις φωτοβολταϊκού για τη δεκαετία 1999 - 2008 ανά μήνα με τη χρήση μοντέλου Erbs et al	79
Πίνακας 8: Βέλτιστων κλίσεων α ανά μήνα και ανά έτος με χρήση του μοντέλου Erbs et al.....	79
Πίνακας 9: Έξοδος φωτοβολταϊκού ανά χρόνο για γωνία κλίσης α από 0° έως 89°	90
Πίνακας 10: Έξοδος φωτοβολταϊκού ανά μήνα για γωνία κλίσης α από 0° έως 89° για τη δεκαετία 1999-2008.....	91
Πίνακας 11: Έξοδος φωτοβολταϊκού ανά εποχή για γωνία κλίσης α από 0° έως 89° για τη δεκαετία 1999-2008.....	92
Πίνακας 12: Τιμές εξόδου φωτοβολταϊκού για γωνίες από $0 - 89$ για τη δεκαετία 1999-2008	93
Πίνακας 13: Βέλτιστες γωνίες ανά μήνα για τη δεκαετία 1999 – 2008 για κάθε παραμετροποίηση	94
Πίνακας 14: Βέλτιστες γωνίες ανά εποχή για τη δεκαετία 1999 – 2008 για κάθε παραμετροποίηση.....	94
Πίνακας 15: Βέλτιστες γωνίες ετήσια για τη δεκαετία 1999 – 2008 για κάθε παραμετροποίηση.....	94

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Μέγιστες τιμές εξόδου φωτοβολταϊκού ανά μήνα για τα έτη 1999 – 2008 με χρήση του μοντέλου Erbs et al	78
Διάγραμμα 2: Βέλτιστων κλίσεων α ανά μήνα και ανά έτος με χρήση του μοντέλου Erbs et al	80
Διάγραμμα 3: Έξοδος φωτοβολταϊκού ανά εποχή για τη δεκαετία 1999-2008 με τη χρήση του μοντέλου Erbs et al.....	80
Διάγραμμα 4: Έξοδος φωτοβολταϊκού για τη δεκαετία 1999 – 2008 για όλες τις μοίρες με τη χρήση του μοντέλου Erbs et al.....	81

Επίδραση εποχιακής μεταβολής μετεωρολογικών παραγόντων και διάρκειας ημέρας στην επιλογή βέλτιστης γωνίας κλίσης σε σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια

Διάγραμμα 5: Συγκριτική ανάλυση ανά μήνα για κάθε παραμετροποίηση 82

Διάγραμμα 6: Συγκριτική ανάλυση ανά εποχή για κάθε παραμετροποίηση 83

Διάγραμμα 7: Βέλτιστες γωνίες ετήσια συγκριτική ανάλυση για κάθε παραμετροποίηση..... 83

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη γη [22].....	16
Εικόνα 2 Επίδραση των Φ/Β στη μείωση του CO ₂ [2, p. 11].....	19
Εικόνα 3 Θέσεις εργασίας που σχετίζονται με τα Φ/Β [2, p. 5]	19
Εικόνα 4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο [23].....	20
Εικόνα 5 Στρώματα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου [25, p. 22]	21
Εικόνα 6 Επαφή p-n [25, p. 18].....	22
Εικόνα 7 Συνολική συνδεδεμένη ισχύς [2, p. 3]	24
Εικόνα 8 Νομοθεσία σχετικά με παραγωγή ηλεκτρισμού και ΑΠΕ.....	26
Εικόνα 9 Μορφές μονοκρυσταλλικών κυττάρων πυριτίου [24, p. 9].....	28
Εικόνα 10 Μορφές πολυκρυσταλλικών κυττάρων πυριτίου [24, p. 10]	29
Εικόνα 11 Μορφή άμορφου	30
Εικόνα 12 Παγκόσμια ετήσια παραγωγή ενέργειας ανά τύπο ΦΒ 1980-2021 [26].....	31
Εικόνα 13 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα [27].....	31
Εικόνα 14 Αυτόνομο υβριδικό μικροδίκτυο Γαϊδουρομάντρα Κύθνου [4, p. 40]	32
Εικόνα 15 Η κίνηση της Γης σε σχέση με τον Ήλιο Περιγραφή της εικόνας [9, p. 212]	35
Εικόνα 16 Ήλιος σε ελλειπτική τροχιά ως προς τη σταθερή Γη [9, p. 213]	36
Εικόνα 17 Σφαιρικές Συντεταγμένες [28]	37
Εικόνα 18 Αζιμούθιο Επιφάνειας (γ) [5, p. 9]	38
Εικόνα 19 Κάτοψη όπου φαίνεται το ηλιακό αζιμούθιο [5, p. 9].....	39
Εικόνα 20 Ετήσια κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο – Πηγή: [6, p. 9].....	40
Εικόνα 21 Ετήσιες αλλαγές στη θέση του ήλιου στο Βόρειο ημισφαίριο [6, p. 9].....	40
Εικόνα 22 Ζενιθιακή γωνία, κλίση, αζιμούθιο επιφάνειας και ηλιακό αζιμούθιο για κεκλιμένη επιφάνεια [29]	42
Εικόνα 23 Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας [6, p. 19].....	44
Εικόνα 24 Άμεση-Διάχυτη-Ολική ακτινοβολία – Πηγή: [30]	48
Εικόνα 25 Ενεργειακό ισοζύγιο γης	50
Εικόνα 26 Συνολική ακτινοβολία που δέχεται Φ/Β επιφάνεια - Πηγή: [12].....	50

Εικόνα 27 Εξάρτηση της μάζας αέρα (AM) από την θέση του ήλιου [31].....	51
Εικόνα 28 Ηλιακές ακτίνες εντός ατμόσφαιρας [13].....	52
Εικόνα 29 Σχεδίαση γραμμής σκιασμού στον ηλιακό χάρτη [33]	56
Εικόνα 30 Λόγος β / μ [33]	57
Εικόνα 31 Διάταξη $\Phi/$ [33].....	57
Εικόνα 32 Η εξίσωση της ώρας (E) σε λεπτά, συνάρτηση του χρόνου στο έτος [9, p. 221].....	59
Εικόνα 33 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας σε 4 χαρακτηριστικές ημέρες [1, p. 225].....	59
Εικόνα 34 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας σε 4 χαρακτηριστικές ημέρες σε συλλέκτη με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος [1, p. 225]	61
Εικόνα 35 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ΦB στοιχείου [18, p. 30].....	63
Εικόνα 36 Χαρακτηριστική καμπύλη I,P-V ΦB στοιχείου [18, p. 34].....	63
Εικόνα 37 Διάρκεια ζωής ενός τυπικού πάνελ [19].....	65
Εικόνα 38 Παραδείγματα διαφορετικής διάταξης ΦB κυψελών [20, p. 24].....	66
Εικόνα 39 Επιπτώσεις των διακυμάνσεων της ακτινοβολίας στο ρεύμα και την ισχύ εξόδου μιας φωτοβολταϊκής μονάδας [19].....	66
Εικόνα 40 Επίδραση της θερμοκρασίας κυψέλης στα χαρακτηριστικά I-V (α) και P-V (β) μιας Φ/B μονάδας 240 Wp [19].....	67
Εικόνα 41 Επίδραση της πυκνότητας σκόνης στην ηλιακή ακτινοβολία (α) & στην έξοδο φωτοβολταϊκών (β) [19]	68
Εικόνα 42 Datasheet φωτοβολταϊκού AS-5M [21]	70

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια αναγνωρίζεται παγκοσμίως η ανάγκη μείωσης των ρύπων, λόγω των επιπτώσεων τους στην κλιματική αλλαγή. Στο πλαίσιο των ανωτέρω, τόσο το ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο, όσο και αυτό των λοιπών χωρών προσαρμόζεται προς την κατεύθυνση μεγιστοποίησης της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα συνολικά ενεργειακά αποθέματα, μειώνοντας σταδιακά τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Το γεγονός ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα ανήκουν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ταυτόχρονα υπάρχει αφθονία ηλιακής ενέργειας στη χώρα μας, αποτέλεσαν το έναυσμα της πραγματοποιηθείσας μελέτης της παρούσας εργασίας. Ειδικότερα, πραγματοποιείται η μελέτη της επίδρασης της εποχιακής μεταβολής μετεωρολογικών παραγόντων, όπως η ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία και η διάρκεια της ημέρας, στην βέλτιστη επιλογή γωνίας κλίσης για σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η βασική αρχή είναι, εάν το πλαίσιο χρειάζεται να τοποθετηθεί με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος. Αυτή η αρχή πρόκειται να ελεγχθεί.

Οι μετεωρολογικοί παράγοντες παίζουν ζωτικό ρόλο στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ, καθώς επηρεάζουν την ποσότητα και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στα πάνελ. Η επιλογή της βέλτιστης γωνίας κλίσης για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην παραγωγή ενέργειας, καθώς αυξάνει την ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης μπορούν να συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενθαρρύνοντας την ευρύτερη χρήση της ηλιακής ενέργειας ως πηγής καθαρής και ανανεώσιμης ενέργειας.

Σκοπός και στόχοι

Στόχος αυτής της εργασίας είναι να διερευνήσει πως η εποχιακή μεταβολή των μετεωρολογικών παραγόντων επηρεάζει την επιλογή βέλτιστης γωνίας κλίσης για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Μέσω πειραματικών δεδομένων και αναλύσεων, παρουσιάζονται οι στρατηγικές προσαρμογής της γωνίας κλίσης, προκειμένου να γίνει η αποτελεσματική εκμετάλλευση της ενέργειας, του ηλίου κατά τη διάρκεια όλου του έτους.

Δομή

Η εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά γενικά στην ηλιακή ενέργεια και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου αλλά και σε βασικές πληροφορίες σχετικά με τα φωτοβολταϊκά και τον τρόπο λειτουργίας τους, καθώς και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της ηλιακής γεωμετρίας και της κίνησης του ήλιου γύρω από τη γη. Επιπλέον, προσδιορίζεται η χωροταξική διάταξη των φωτοβολταϊκών. Στο τρίτο

κεφάλαιο, πραγματοποιείται η μελέτη του θέματος της παρούσας εργασίας. Αρχικά, αναλύονται θεωρητικά οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού, αλλά και οι καμπύλες I-V και P-V. Στη συνέχεια, γίνεται χρήση του αλγορίθμου με σκοπό εύρεσης της σχέσης μεταξύ μετεωρολογικών παραμέτρων και ποσότητας ακτινοβολίας με τη βέλτιστη κλίση σταθερών φωτοβολταϊκών. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εν λόγω μελέτης.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Εισαγωγή στα Φ/Β

Το παρόν κεφάλαιο αποσκοπεί στην εισαγωγή στη θεωρία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αρχικά γίνεται αναφορά στην ηλιακή ενέργεια όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της και τους τρόπους αξιοποίησής της. Εν συνεχεία, παρατίθεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, και ακολουθεί η ανάλυση αυτού, ενώ τέλος εξετάζεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και απεικονίζονται οι καμπύλες λειτουργίας του.

1.1 Χαρακτηριστικά ηλιακής ενέργειας

1.1.1 Ηλιακή ενέργεια

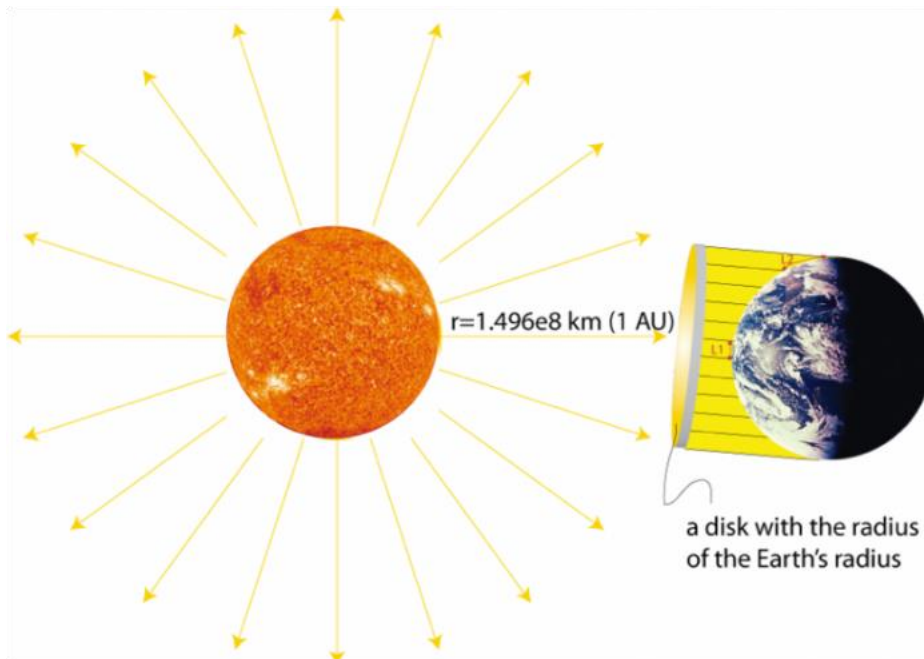
Ο ήλιος είναι μακράν η σημαντικότερη πηγή ενέργειας για τη ζωή στη γη. Η βαρύτητά του συγκρατεί το ηλιακό σύστημα, κρατώντας τους πλανήτες και άλλα αντικείμενα στις τροχιές τους. Επιπλέον, η ενέργεια του παράγεται στον πυρήνα από αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης, όπου άτομα υδρογόνου συντήκονται για να δημιουργήσουν ήλιο. Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας με τη μορφή φωτός και θερμότητας που εκπέμπεται στο διάστημα.

Το φως του ήλιου ταξιδεύει στο διάστημα με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και απαιτεί σχεδόν οχτώ (8) λεπτά και είκοσι (20) δευτερόλεπτα προκειμένου να διανύσει σχεδόν 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα, απόσταση που απέχει ο ήλιος από τη γη. Με άλλα λόγια, αυτή η ακτινοβολία ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός, η οποία είναι περίπου 299.792.458 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία περιλαμβάνει το ορατό φως, το υπεριώδες φως και το υπέρυθρο φως, μόλις φτάσει στην ατμόσφαιρα της γης αλληλοεπιδρά με τα αέρια και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας και μπορεί να απορροφηθεί ή να ανακλαστεί.

Από τη συνολική ηλιακή ενέργεια (343 W/m^2) (βλ. σχήμα¹) που διεισδύει στην ατμόσφαιρα κάθε χρόνο, η επιφάνεια της γης απορροφά μονάχα το 48% αυτής, δηλαδή της ηλιακής ενέργειας, η οποία είναι διαθέσιμη για την παραγωγή έργου. Αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται προς θέρμανση της επιφάνειας της γης και της χαμηλότερης ατμόσφαιρας, καθώς επίσης συμβάλλει καθοριστικά στην τήξη των πάγων και στην εξάτμιση του νερού και καταναλώνεται στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης στα φυτά. Αναφορικά με το εναπομείναν ποσοστό, δηλαδή το 52%, ένα μικρό μέρος (σχεδόν 4%) ανακλάται αμέσως από την επιφάνεια της γης και εκπέμπεται ξανά στο διάστημα, το 26% δεν φτάνει

¹Περίπου $1370 \text{ W/m}^2 = \text{ηλιακή σταθερά} / \text{Εμβαδόν διατομής της γης που ακτινοβολείται από τον Ήλιο} = \pi r^2 / \text{Επιφάνεια της γης} = 4\pi r^2 / \text{κλάσμα της ηλιακής σταθερός που δέχεται η γη} = \pi^2/4\pi^2 = 1/4 \times 1370 \text{ W/m}^2 = 343 \text{ W/m}^2$

στην επιφάνεια της γης, αλλά αντανακλάται από τα σύννεφα και τα σωματίδια της ατμόσφαιρας και το 19% απορροφάται από την ατμόσφαιρα και τη νεφελώδη μάζα [1].



Εικόνα 1 Ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη γη [22]

1.1.2 Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Ο όρος «Φαινόμενο του Θερμοκηπίου» αναφέρεται στη φυσική διαδικασία, η οποία απαιτείται για τη σταθεροποίηση της μέσης θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης στους δεκαπέντε (15) βαθμούς Κελσίου, θερμοκρασία η οποία διασφαλίζει και επιτρέπει την ύπαρξη ζωής στη γη. Ωστόσο, με το πέρασ των χρόνων, το εν λόγω φαινόμενο έχει ξεπεράσει κατά πολύ τα επιτρεπτά όρια και ο όρος φέρει και αρνητικές χροιές. Ένεκα των δραστηριοτήτων του ανθρώπου δημιουργούνται στρώματα αερίου, που εγκλωβίζουν την ηλιακή ακτινοβολία, κάνοντάς την να αντανακλάται από την επιφάνεια της γης και να διαχέεται στην ατμόσφαιρα, δίχως να την αφήνουν να εξέλθει στο διάστημα. Ως ακολούθως, το εν λόγω φαινόμενο επηρεάζει τη μέση θερμοκρασία της γης, καθώς οδηγεί στην αύξηση αυτής.

1.1.3 Ποσότητα Ηλιακής Ακτινοβολίας

Με τον όρο “ηλιακή ακτινοβολία” εννοούμε την ποσότητα ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της γης από τον ήλιο και μετριέται ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου, ήτοι το ποσό της ενέργειας, το οποίο διαπερνά μια ορισμένη επιφάνεια εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος.

Σημειώνεται ότι το Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2) αποτελεί τη μονάδα μέτρησης και για λόγους πρακτικότητας διαχωρίζεται σε:

1. Άμεση κανονική ακτινοβολία (DNI): Πρόκειται για το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνεται ανά μονάδα επιφάνειας που προέρχεται απευθείας από τον ήλιο, ανά μονάδα χρόνου, συνήθως μετρούμενο σε W/m^2 .
2. Διάχυτη ακτινοβολία (DHI): Είναι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που λαμβάνεται ανά μονάδα επιφάνειας, το οποίο έχει διασκορπιστεί από την ατμόσφαιρα, ανά μονάδα χρόνου, ως επί το πλείστον μετρούμενο σε W/m^2 .
3. Παγκόσμια Οριζόντια Ακτινοβολία (GHI): Πρόκειται για το συνολικό ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας, το οποίο λαμβάνεται ανά μονάδα επιφάνειας. Επισημαίνεται ότι η εν λόγω ακτινοβολία αποτελεί το άθροισμα των ως άνω αναφερθέντων ακτινοβολιών (άμεση κανονική ακτινοβολία και διάχυτη ακτινοβολία), ανά μονάδα χρόνου, συνήθως μετρούμενο σε W/m^2 .

Όλες αυτές οι μετρικές είναι σημαντικές για εφαρμογές ηλιακής ενέργειας. Για παράδειγμα ο DNI είναι ζωτικής σημασίας για μονάδες συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας (CSP), ο GHI για φωτοβολταϊκά και ο DHI για το σχεδιασμό φωτισμού.

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας, το οποίο καταλήγει στην επιφάνεια της γης:

1. Υψόμετρο: Όσο μεγαλύτερο είναι το υψόμετρο τόσο μικρότερη είναι η ατμοσφαιρική απορρόφηση και η διασπορά της ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να φτάνει στην επιφάνεια περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία.
2. Γεωγραφικό πλάτος: Όσο πιο κοντά στον ισημερινό τόσο πιο άμεση είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Συνεπώς, η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι μεγαλύτερη.
3. Ώρα της ημέρας: Το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη το ηλιακό μεσημέρι, όταν ο ήλιος βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κεφάλι.
4. Εποχή: Το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια είναι μεγαλύτερη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όταν οι ημέρες είναι μεγαλύτερες και ο ήλιος βρίσκεται ψηλότερα στον ουρανό.
5. Νεφοκάλυψη: Τα σύννεφα μπορούν να αντανακλούν, να απορροφούν ή να διασκορπίζουν την ηλιακή ακτινοβολία, με συνέπεια την μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια.

6. Ατμοσφαιρική ρύπανση: Οι ρύποι στον αέρα μπορούν να διασκορπίσουν και να απορροφήσουν την ηλιακή ακτινοβολία, με συνέπεια να προσπίπτει λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια.
7. Ατμοσφαιρικές συνθήκες: Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, μπορούν να επηρεάσουν την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια, απορροφώντας ή ανακλώντας την.
8. Η λευκαύγεια της γης, ή η ανακλαστικότητα, παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στο μέγεθος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια.

1.2 Δυνατότητα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας

Με τη χρήση των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) δίνεται η δυνατότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας από άμεση ή διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, λόγω της παροχής ενέργειας από τον ήλιο υπάρχει γενικότερα μια παραδοχή ότι η ενέργεια που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά είναι ως επί το πλείστον φιλική ως προς το περιβάλλον. Ωστόσο, η μη σταθερή και συνεχής απόδοση του Φ/Β λόγω έντονης συννεφιάς αρκετού χρονικού διαστήματος και λειτουργίας αυτού κατά το ήμισυ της ημέρας έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη παροχή ισχύος. Λόγω αυτού, η παροχή μόνο μέσω φωτοβολταϊκών για μεγάλα συνεχόμενα ηλεκτρικά φορτία είναι αδύνατη. Οπότε, είτε προτιμάται η χρήση μπαταριών ως αποθηκευτικό μέσο της φωτοβολταϊκής ενέργειας, είτε υβριδικά συστήματα με τη βοήθεια ανεμογεννητριών με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.

Η χρήση των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα, εκτός από τα περιβαλλοντικά οφέλη, μπορεί, επίσης, να προσφέρει μια σειρά από οικονομικά οφέλη. Ένα από τα κύρια οικονομικά οφέλη των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η μείωση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα μέσω του ήλιου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, δεν απαιτούν καύσιμα, γεγονός που συνεπάγεται ότι το κόστος λειτουργίας τους είναι πολύ χαμηλότερο από τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό δύναται να οδηγήσει στην μείωση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας για τους καταναλωτές. Ένα άλλο οικονομικό όφελος των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η δημιουργία θέσεων εργασίας. Η εγκατάσταση, η λειτουργία και η συντήρηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων απαιτούν εξειδικευμένους εργαζόμενους, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία θέσεων εργασίας στους τομείς των κατασκευών, των ηλεκτρολογικών και των μηχανικών. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν, επίσης, να δημιουργήσουν εισόδημα για τους ιδιοκτήτες ακινήτων που εγκαθιστούν φωτοβολταϊκά συστήματα στις στέγες ή στα οικόπεδά τους. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω της καθαρής μέτρησης, η οποία επιτρέπει στους ιδιοκτήτες ακινήτων να πωλούν την πλεονάζουσα

ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα ΦΒ συστήματά τους πίσω στο δίκτυο. Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να προσφέρουν οφέλη για την ενεργειακή ασφάλεια, μειώνοντας την εξάρτηση από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα. Τούτο δύναται να συμβάλει στη μείωση του εμπορικού ελλείμματος της χώρας και στην αύξηση της ενεργειακής ανεξαρτησίας.



Εικόνα 2 Επίδραση των Φ/Β στη μείωση του CO₂ [2, ρ. 11]

Εικόνα 3 Θέσεις εργασίας που σχετίζονται με τα Φ/Β [2, ρ. 5]

Συνολικά, η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα μπορεί να προσφέρει μια σειρά οικονομικών οφελών, συμπεριλαμβανομένης της εξοικονόμησης κόστους, της δημιουργίας θέσεων εργασίας, της δημιουργίας εισοδήματος και της ενεργειακής ασφάλειας, που μπορεί να ωφελήσει την οικονομία της χώρας. Με βάση τα παραπάνω, συνάγεται ότι υπάρχει η δυνατότητα παροχής επαρκούς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών για την κάλυψη τμήματος των ενεργειακών φορτίων. Περαιτέρω, μέσω της χρήσης και λειτουργίας των φωτοβολταϊκών δύναται να αντικατασταθούν ορισμένοι Σ.Π.Η.Ε που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα, στα οποία οφείλεται εν πολλοίς η ρύπανση του περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα είναι επιβλαβή για το οικοσύστημα. Άξιο επισημάνσεως αποτελεί, επίσης, το γεγονός ότι, η φωτοβολταϊκή ενέργεια δύναται να αποτελέσει βασικό μέρος για την κάλυψη μελλοντικών αναγκών, με την ελπίδα αντιμετώπισης ποσοστού του ενεργειακού προβλήματος από τη συνεχιζόμενη αύξηση των ρύπων λόγω χρήσης του πετρελαίου και των παραγωγών του, αλλά και λόγω της συνεχιζόμενης μείωσης των αποθεμάτων αυτών.

1.3 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών

1.3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

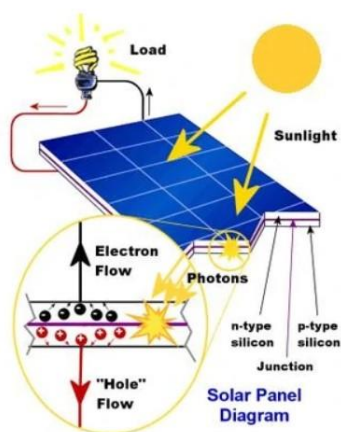
Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, όπως φαίνεται και από την *Εικόνα 4*, πρόκειται για τη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλιακή ενέργεια με τη χρήση είτε φ/β κυττάρου, είτε φ/β στοιχείου, είτε φ/β κυψέλης. Υπογραμμίζεται ότι, με τον όρο ηλιακό φως ορίζονται τα φωτόνια, τα οποία

χαρακτηρίζονται ως πακέτα ηλιακής ενέργειας. Τα ποσά ενέργειας των φωτονίων αντιστοιχούν σε διάφορα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Όσον αφορά τη διαδικασία της μετατροπής του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, τη στιγμή που τα φωτόνια προσπίπτουν σε κάποιο φ/β κύτταρο υπάρχουν οι εξής τρεις περιπτώσεις: είτε θα ανακλαστούν, είτε θα απορροφηθούν, είτε τέλος θα το διαπεράσουν. Στην περίπτωση όπου τα φωτόνια απορροφώνται από το φ/β κύτταρο αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του να κινηθούν και να δημιουργήσουν-πράξουν ηλεκτρικό ρεύμα.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο βασίζει την τεχνολογία του στις ιδιότητες των ημιαγωγών. Η χρήση ημιαγωγικών υλικών, όπως του πυριτίου, είτε πρόσμιξη αυτού με άλλα υλικά για τη δημιουργία φωτοβολταϊκών είναι κάτι σύνηθες. Η τεχνολογία των ημιαγωγών είναι σημαντική, καθώς όλη η τεχνολογική πρόοδος της ηλεκτρονικής και της πληροφορικής των τελευταίων δεκαετιών βασίζεται σε αυτά.

Για τη δημιουργία φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούνται δύο ειδών ημιαγωγοί: 1) οι ημιαγωγοί τύπου-N, οι οποίοι έχουν πληθώρα ελεύθερων ηλεκτρονίων και 2) οι ημιαγωγοί τύπου-P στους οποίους υπάρχει πληθώρα ελεύθερων οπών. Οι ημιαγωγοί αυτοί έχουν θετικό φορτίο, καθώς τα ηλεκτρόνια έχουν αφήσει τις θέσεις τους.

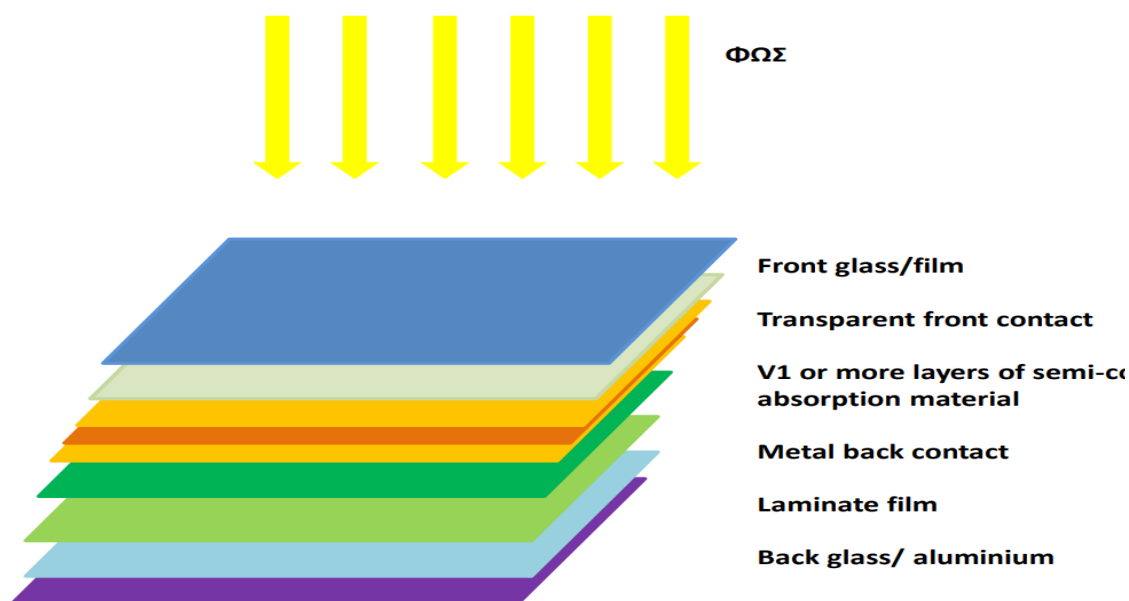
Κατά τη διάρκεια όπου το φωτόνιο διέρχεται από τον ημιαγωγό τύπου-N, με τη βοήθεια της ενέργειας του φωτονίου απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό και εν συνεχεία έλκονται από το θετικό φορτίο που υπάρχει στον ημιαγωγό τύπο-P. Ωστόσο, λόγω του μονωτικού υλικού που υπάρχει ενδιάμεσα από τους δύο ημιαγωγούς ο μοναδικός τρόπος διέλευσης των ηλεκτρονίων είναι με τη χρήση εξωτερικού φορτίου όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 4*.



Εικόνα 4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο [23]

1.3.2 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού στοιχείου

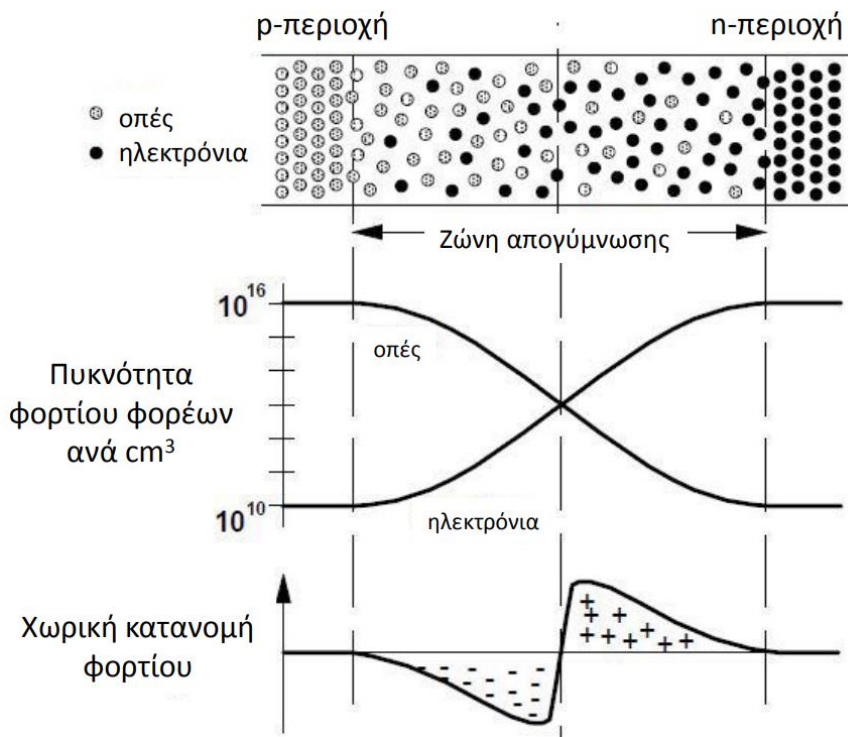
Η βασική λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού (Φ/Β) στοιχείου βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο δηλώνει ότι, όταν ορισμένα υλικά εκτίθενται στο φως, μπορούν να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα Φ/Β στοιχεία αποτελούνται από ημιαγωγικά υλικά, όπως το πυρίτιο, τα οποία έχουν υποστεί ειδική επεξεργασία για τη δημιουργία μιας επαφής p-n. Ειδικότερα, στην περίπτωση που το φως φτάνει στην επιφάνεια ενός φ/β στοιχείου, μπορεί να διεγείρει τα ηλεκτρόνια στο ημιαγωγικό υλικό, προκαλώντας τη μετακίνησή τους από μια κατάσταση χαμηλότερης σε υψηλότερης ενέργειας. Όταν αυτά τα διεγερμένα ηλεκτρόνια μετακινούνται από το στρώμα τύπου p (που αποτελείται από υλικό με έλλειψη ηλεκτρονίων) στο στρώμα τύπου n (που αποτελείται από υλικό με περίσσεια ηλεκτρονίων) δημιουργούν μια ροή ηλεκτρισμού ή ρεύμα.



Εικόνα 5 Στρώματα Φωτοβολταϊκού Στοιχείου [25, p. 22]

Η επαφή p-n είναι ένα όριο μεταξύ ενός ημιαγωγού τύπου p (προσμίξεων όπως το βόριο) και ενός ημιαγωγού τύπου n (προσμίξεων όπως ο φώσφορος). Το υλικό τύπου p έχει έλλειψη ηλεκτρονίων, ενώ το υλικό τύπου n έχει περίσσεια ηλεκτρονίων. Όταν σχηματίζεται μια ένωση p-n, τα πλεονάζοντα από το υλικό τύπου n ηλεκτρόνια θα διαχυθούν διά της ένωσης στο υλικό τύπου p και θα συνδυαστούν με οπές (απουσία ηλεκτρονίων), δημιουργώντας μια περιοχή εξάντλησης. Αυτή η περιοχή εξάντλησης λειτουργεί ως φράγμα και εμποδίζει την περαιτέρω διάχυση ηλεκτρονίων κατά μήκος της ένωσης. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται ένα ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο δημιουργεί διαφορά δυναμικού στην περιοχή εξάντλησης. Εκ της εν λόγω διαφοράς δυναμικού δημιουργείται μια δύναμη

που κατευθύνει τα ηλεκτρόνια από την πλευρά τύπου n στην πλευρά τύπου p και τις οπές από την πλευρά τύπου p στην πλευρά τύπου n. Η εν λόγω κίνηση τόσο των ηλεκτρονίων όσο και των οπών δημιουργεί ροή ηλεκτρικής ενέργειας και η επαφή p-n λειτουργεί ως στοιχείο ανόρθωσης.



Εικόνα 6 Επαφή p-n [25, p. 18]

Επομένως, η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βασίζεται :

- (1) στον τύπο του ημιαγωγικού υλικού που χρησιμοποιείται,
- (2) στην ποιότητα της ένωσης p-n και
- (3) στην ποσότητα του ηλιακού φωτός που απορροφάται.

1.3.3 Εξέλιξη των φωτοβολταϊκών

1.3.3.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η ιστορία των φωτοβολταϊκών συστημάτων χρονολογείται από τα τέλη του 19ου αιώνα, όταν το φ/β φαινόμενο, ήτοι η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, παρατηρήθηκε το πρώτον από τον Γάλλο φυσικό Alexandre Edmond Becquerel. Η πρώτη πρακτική εφαρμογή αυτού του φαινομένου ήταν η ανάπτυξη του φωτοβολταϊκού στοιχείου από την Bell Labs τη δεκαετία του 1950.

Οι πρώτες κυψέλες ήταν κατασκευασμένες από πυρίτιο, οι οποίες, παρά το γεγονός ότι ήταν σχετικά αναποτελεσματικές, άνοιξαν τον δρόμο για την ανάπτυξη πιο αποδοτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων τις επόμενες δεκαετίες. Ειδικότερα, στις δεκαετίες του 1960 και 1970, η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων αυξήθηκε, καθώς χρησιμοποιούνταν στην τροφοδοσία τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού και δορυφόρων από απόσταση. Ακολούθως, στη δεκαετία του 1980, η πρόοδος της τεχνολογίας οδήγησε στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών φωτοβολταϊκών κυψελών, που έκαναν τα φωτοβολταϊκά πάνελ πιο προσιτά και πρακτικά για χρήση σε σπίτια και επιχειρήσεις.

Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος ως μία από τις πλέον δημοφιλείς πηγές ανανεώσιμης ενέργειας. Η τάση που ακολουθείται από τα περισσότερα κράτη του κόσμου για μείωση του αποτυπώματος άνθρακα, την απεξάρτηση από τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας, καθώς και την εξοικονόμηση χρημάτων στο ενεργειακό κόστος, έχει οδηγήσει στην παροχή κινήτρων για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών πάνελ, αλλά και τη χρήση τους από ένα ευρύτερο φάσμα καταναλωτών, όπως νοικοκυριά και μικρές επιχειρήσεις.

1.3.3.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα

Η Ελλάδα, αν και έχει σχετικά νέα βιομηχανία Φ/Β, έχει παρατηρήσει αύξηση της χρήσης της φωτοβολταϊκής (Φ/Β) τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια. Μικρής κλίμακας, πειραματικά φωτοβολταϊκά συστήματα ήταν τα πρώτα που ανεγέρθηκαν στην χώρα μας τις δεκαετίες του 1980 και 1990. Κίνητρα, για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων, δόθηκαν για πρώτη φορά από την ελληνική κυβέρνηση τη δεκαετία του 2000, γεγονός που αύξησε σημαντικά τον αριθμό των φωτοβολταϊκών συστημάτων που εγκαταστάθηκαν. Εντούτοις, η κυβερνητική χρηματοδότηση, που αποτελούσε ιδιαίτερος σημαντικό κίνητρο για την εγκατάσταση Φ/Β, μειώθηκε ένεκα της παγκόσμιας χρηματοπιστωτικής κρίσης του 2008-2009 και της επακόλουθης οικονομικής ύφεσης στην Ελλάδα. Αποτέλεσμα τούτων ήταν η επέκταση της βιομηχανίας Φ/Β να σταματήσει.

Η βιομηχανία Φ/Β γνώρισε σημαντική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια κατόπιν της απόφασης της ελληνικής κυβέρνησης να αρχίσει να παρέχει εκ νέου κίνητρα για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Ο στόχος για το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΕΣΔΑΕ) της Ελλάδας ήταν η κατασκευή 3 GW φωτοβολταϊκών συστημάτων σε εθνικό επίπεδο έως το 2020. Ακόμη και αν ο στόχος δεν επιτεύχθηκε, ήταν κοντά, και ο τομέας των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα επεκτείνεται επί του παρόντος. Συγκεκριμένα, η μεγάλη αύξηση ξεκίνησε το 2020, οπότε η Ελλάδα αύξησε την εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή της ισχύ κατά περίπου 400 MW, ενώ το 2021 το σύνολο εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων ανήλθε στα 4,1 GW [2].

Συγκεκριμένα, ένας εκ των τιθέμενων από την Ελληνική Κυβέρνηση στόχων ήταν η κάλυψη του 10% των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έως το 2020 και του 20% έως το 2025. Η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα αναμένεται να επεκταθεί τα επόμενα χρόνια λόγω της αυξανόμενης δημοτικότητας των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



Εικόνα 7 Συνολική συνδεδεμένη ισχύς [2, p. 3]

Όσον αφορά την κατανομή των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα, η πλειονότητα αυτών είναι κατανομημένη στην ηπειρωτική χώρα, αλλά υπάρχει επίσης ένας σημαντικός αριθμός συστημάτων στα νησιά της χώρας. Η Κεντρική Μακεδονία, η Αττική και η Θεσσαλία είναι οι βασικές περιοχές με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Πολλά φωτοβολταϊκά συστήματα είναι εγκατεστημένα σε στέγες, αλλά τα επίγεια συστήματα αποτελούν την πλειονότητα των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα περισσότερα εκ των οποίων είναι κατανομημένα στην ηπειρωτική χώρα.

Στρατηγικό Σχέδιο 2023-2027

Στις 23 Δεκεμβρίου 2019, η χώρα μας κύρωσε το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) [3], το οποίο αντικατέστησε το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (“ΑΠΕ”) και το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την Ενέργεια. Το εν λόγω σχέδιο αποτελεί την εθνική στρατηγική πολιτική όσον αφορά την Ενέργεια και αποσκοπεί στο να επιτευχθούν οι στόχοι, οι οποίοι έχουν τεθεί σε ενωσιακό επίπεδο και αφορούν, μεταξύ άλλων, στην ενέργεια, μέχρι το 2030.

Ενδεικτικώς, οι προς επίτευξη στόχοι είναι οι ακόλουθοι: μείωση του ενεργειακού κόστους, βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης με σκοπό την μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας, τον σταδιακό περιορισμό του λιγνίτη μέχρι την κατάργησή του για την παραγωγή ενέργειας, την αυξημένη συμμετοχή των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας.

Αναφορικά με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, το ως άνω Εθνικό Σχέδιο προβλέπει ότι, έως το 2030 το ποσοστό συμμετοχής τους στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας πρέπει να ανέλθει κατ' ελάχιστον στο 35%, καθώς επίσης το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όσον αφορά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται να υπερβεί το 60%. Αναφορικά, δε, με την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσής, ο στόχος που τίθεται είναι μέχρι το έτος 2030 η κατανάλωση ενέργειας να είναι χαμηλότερη από αυτή του έτους 2017, η οποία θα αποτελεί βελτίωση κατά 38%.

Επίδραση εποχιακής μεταβολής μετεωρολογικών παραγόντων και διάρκειας ημέρας στην επιλογή βέλτιστης γωνίας κλίσης σε σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια

Νομοθεσία σχετικά με παραγωγή ηλεκτρισμού και ΑΠΕ



Εικόνα 8 Νομοθεσία σχετικά με παραγωγή ηλεκτρισμού και ΑΠΕ

1.4 Είδη Φωτοβολταϊκών

ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ:

Η διάκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών συστημάτων αναφέρεται συνήθως στον τρόπο σύνδεσης και στη γενιά. Ειδικότερα, η διάκριση των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης και συγκεκριμένα μεταξύ μονής σύνδεσης και πολλαπλών συνδέσεων εξαρτάται

από τον αριθμό στρωμάτων του ηλιακού πάνελ που προσλαμβάνουν το ηλιακό φως. Η, δε, διάκριση κατά γενιά εστιάζει στα υλικά και την αποδοτικότητα των ηλιακών συλλεκτών.

1.4.1 Διάκριση βάσει σύνδεσης

Η χρήση των ηλιακών κελιών μόνων τους είναι σπάνια, καθώς είθισται να ενώνονται κελιά με ταυτόσημες προδιαγραφές για την δημιουργία φ/β πάνελ, με σκοπό την παραγωγή αυξημένης ισχύος. Εν συνεχεία, η σύνδεση φ/β πάνελ οδηγούν στην δημιουργία φ/β σταθμών. Η σύνδεση των ηλιακών πάνελ δύναται να γίνει σε σειρά ή παράλληλα.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι σύνδεσης των ηλιακών συλλεκτών στο ηλεκτρικό δίκτυο ή σε άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Ακολουθούν μερικές κοινές επιλογές:

Σύνδεση σειράς: Σε αυτή τη διαμόρφωση, τα ηλιακά πάνελ συνδέονται σε σειρά, με τον θετικό ακροδέκτη ενός πάνελ συνδεδεμένο στον αρνητικό ακροδέκτη του επόμενου πάνελ. Αυτό αυξάνει την τάση του συστήματος αλλά δεν αλλάζει το ρεύμα.

Παράλληλη σύνδεση: Σε αυτή τη διαμόρφωση, οι ηλιακοί συλλέκτες συνδέονται παράλληλα, με τον θετικό ακροδέκτη του ενός πάνελ συνδεδεμένο στο θετικό ακροδέκτη του πίνακα που ακολουθεί και τον αρνητικό ακροδέκτη του ενός πίνακα συνδεδεμένο στον αρνητικό ακροδέκτη του επόμενου πάνελ. Αυτό αυξάνει το ρεύμα του συστήματος αλλά δεν αλλάζει την τάση.

- **Υβριδική σύνδεση:** Πρόκειται για έναν συνδυασμό σειριακών και παράλληλων συνδέσεων, στις οποίες ορισμένα από τα πάνελ συνδέονται σε σειρά ώστε να αυξήσουν την τάση και άλλα συνδέονται παράλληλα ώστε να αυξήσουν το ρεύμα.
- **Σύνδεση εκτός δικτύου:** Σε αυτήν τη διαμόρφωση, οι ηλιακοί συλλέκτες δεν συνδέονται καθόλου στο ηλεκτρικό δίκτυο, αλλά είναι συνδεδεμένοι σε τράπεζα μπαταριών ή άλλο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό επιτρέπει στους ηλιακούς συλλέκτες να τροφοδοτούν ένα σπίτι ή άλλη εγκατάσταση ακόμα και όταν το δίκτυο δεν είναι διαθέσιμο.

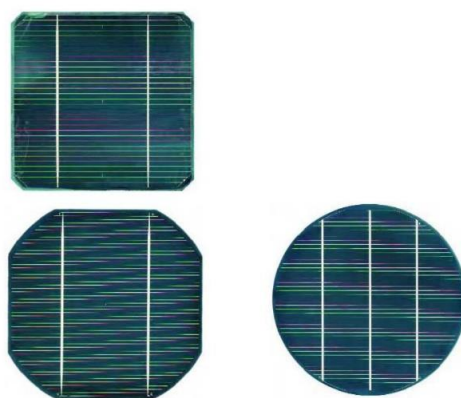
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι διαφορετικές εγκαταστάσεις ηλιακών πάνελ ενδέχεται να απαιτούν διαφορετικές διαμορφώσεις συνδεσιμότητας προκειμένου να λειτουργούν αποτελεσματικά και αποδοτικά.

1.4.2 Διάκριση βάσει γενιάς

Φωτοβολταϊκά Α΄ Γενιάς

- *Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (Mono-SI)*

Τα ηλιακά κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι πιθανώς ο παλαιότερος τύπος ηλιακών κυψελών και είναι κατασκευασμένα από έναν μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο (wafer) πυριτίου. Χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση μετατροπής φωτός (συνήθως ~15%, οι πρόσφατες εξελίξεις της SunPower διαθέτουν βελτιωμένη απόδοση έως και 22-24%) αλλά έχουν υψηλό αρχικό κόστος και μηχανική ευπάθεια (εύθραυστα). Τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου έχουν τυπικό μαύρο ή ιριδίζον μπλε χρώμα όταν διαθέτουν αντί-ανακλαστική (AR) επιστρώση ή γκρι όταν δε διαθέτουν. Το σχήμα τους είναι συνήθως κυκλικό ή σχεδόν κυκλικό και κάποιες φορές τετράγωνο. Εξαιτίας των κενών που αφήνουν μεταξύ τους λόγω σχήματος, στην περίπτωση που τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο, η χρήση τους δεν είναι συχνή στην κατασκευή φ/β πάνελ. Ωστόσο, αποτελούν μία καλή επιλογή για ενσωμάτωση σε κτίρια όπου απαιτείται μερική διαπερατότητα του φωτός.



Εικόνα 9 Μορφές μονοκρυσταλλικών κυττάρων πυριτίου [24, p. 9]

- Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (*Poly-SI*)

Τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου κατασκευάζονται με την τήξη του πυριτίου και τη στερεοποίησή του σε ορθογώνιες ράβδους οι οποίες στη συνέχεια κόβονται σε φέτες κατάλληλου πάχους (wafers). Εξαιτίας του τρόπου κατασκευής των πολυκρυσταλλικών κυττάρων ο οποίος απαιτεί μικρότερη ακρίβεια σε σύγκριση με τον αντίστοιχο των μονοκρυσταλλικών, τα καθιστά πιο οικονομικά αλλά ταυτόχρονα ελαφρώς λιγότερο αποδοτικά (~12%) και εύθραυστα. Το σχήμα τους είναι συνήθως τετραγωνικό και το χρώμα τους είναι είτε μπλε στην περίπτωση που διαθέτουν αντί-ανακλαστική (AR) επιστρώση είτε γκρι - ασημί στην περίπτωση που δεν διαθέτουν.



Εικόνα 10 Μορφές πολυκρυσταλλικών κυττάρων πυριτίου [24, p. 10]

Φωτοβολταϊκά Β΄ Γενιάς

- *Τεχνολογία Λεπού Υμενίου (TFSC)*

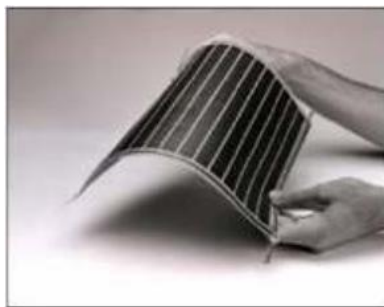
Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα λεπτού υμενίου παράγονται με την εναπόθεση ενός ή περισσότερων λεπτών υμενίων φ/β υλικού σε γυάλινο υπόστρωμα. Το εύρος πάχους ενός τέτοιου υμενίου είναι μεγάλο και κυμαίνεται από λίγα νανόμετρα ως δεκάδες μικρόμετρα. Τα εν λόγω κύτταρα έχουν μικρότερη απόδοση συγκριτικά με τα αντίστοιχα κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου (~ 5-7%) αλλά το κόστος τους είναι σημαντικά μικρότερο καθιστώντας τα ανταγωνιστικά.

Ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο υλικό διακρίνονται σε:

1. Άμορφου πυριτίου (amorphous-Si)
2. Τελλουριούχου καδμίου (CdTe)
3. Σεληνιούχου χαλκού-Ινδίου / Γαλλίου – Δισεληνιούχου

Επισημαίνεται ότι εκ των ως άνω τριών κατηγοριών φωτοβολταϊκών κυττάρων λεπτού υμενίου, μόνον τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου θεωρούνται φωτοβολταϊκά Β΄ Γενιάς. Οι ανωτέρω υπό (2) και (3) κατηγορίες εντάσσονται στα φωτοβολταϊκά Γ΄ Γενιάς, όπως θα αναλυθεί κατωτέρω.

Έτσι, όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά κύτταρα άμορφου πυριτίου αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή, καθότι μπορούν να γίνουν εύκαμπτα λόγω κατασκευής και να πάρουν διαφορετικά σχήματα με αποτέλεσμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως σε πολλές εφαρμογές (π.χ. υπολογιστές τσέπης).



Εικόνα 11 Μορφή άμορφου πυριτίου [24, ρ. 11]

Φωτοβολταϊκά Γ΄ Γενιάς

Τα φωτοβολταϊκά τρίτης γενιάς περιλαμβάνουν τεχνολογίες λεπτού υμενίου, οι περισσότερες εκ των οποίων βρίσκονται σε πρώιμα ερευνητικά στάδια. Αυτός είναι ο λόγος, άλλωστε, που η χρήση τους είναι περιορισμένη.

- *Τελλουριούχου καδμίου (CdTe)*

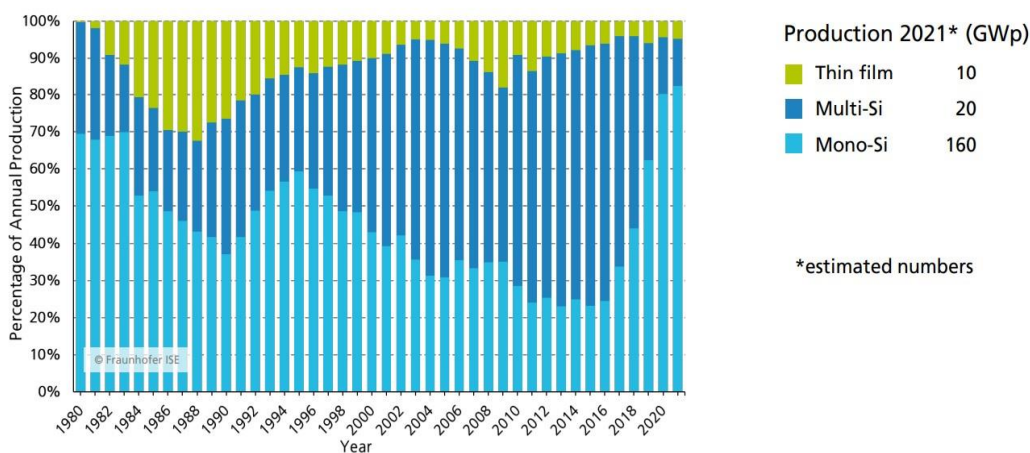
Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα λεπτού υμενίου τελλουριούχου καδμίου είναι αρκετά δημοφιλή λόγω του χαμηλού κόστους ανά kW-ώρα και της απόδοσής τους που φτάνει περίπου 16%. Πάρα ταύτα, υπάρχουν αρκετές περιβαλλοντικές ανησυχίες που σχετίζονται τόσο με την διαθεσιμότητα του τελλουρίου, καθώς είναι περιορισμένη όσο και με την τοξικότητα του καδμίου.

- *Σεληνιούχου χαλκού-Ινδίου / Γαλλίου – Δισεληνιούχου (CIGS)*

Αποτελεί μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες λεπτού υμενίου, καθώς δεν περιέχουν τοξικά υλικά, όπως το κάδμιο, και έχουν επιδείξει τις υψηλότερες επιδόσεις τις συγκεκριμένης τεχνολογίας αγγίζοντας το 20%.

- *Οργανικά / πολυμερή κελιά:*

Τα οργανικά υλικά αποτελούν μία σχετικά νέα τεχνολογία και είναι αρκετά ελκυστικά, καθώς μπορούν να εμπλακούν σε παραγωγή υψηλής απόδοσης καθώς επίσης, μπορούν να κατασκευαστούν σε διάφορα πάχη και σχήματα. Ωστόσο, η απόδοσή τους είναι λιγότερο αποτελεσματική, περίπου το 1/3 της τυπικής απόδοσης κυψελών Si, της τάξης του 5-6%, ενώ παράλληλα έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής.



Εικόνα 12 Παγκόσμια ετήσια παραγωγή ενέργειας ανά τύπο ΦΒ 1980-2021 [26]

1.4.3 Βασικοί τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων

Υπάρχουν τρεις τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων με βάση τη συνδεσιμότητα στο δίκτυο:

- *Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα:* Τα εν λόγω συστήματα δεν συνδέονται στο δίκτυο και ως εκ τούτου είναι κατάλληλα για περιοχές, που είναι απομακρυσμένες, όπου υπάρχει δυσκολία τόσο στη σύνδεση όσο και στην μεταφορά καυσίμων για τη χρήση γεννήτριας. Συχνά χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία μικρών συσκευών ή εξοπλισμού στη γεωργία, κτηνοτροφία, δημόσιο φωτισμό, τροφοδότηση απομακρυσμένων κατοικιών κ.ο.κ..



http://helixclima.gr/klimatismos_themansi/index.php?route=information/information&information_id=20

Εικόνα 13 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

[27]

- *Φωτοβολταϊκά συστήματα εντός δικτύου:* Τα συστήματα αυτά συνδέονται με το δίκτυο και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και επιχειρήσεις. Η

περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από αυτά τα συστήματα τροφοδοτείται πίσω στο δίκτυο και ο ιδιοκτήτης του σπιτιού λαμβάνει πιστώσεις στον λογαριασμό κοινής ωφέλειας.

- *Υβριδικά συστήματα:* Αυτά τα συστήματα είναι ένας συνδυασμός από διαφορετικούς τύπους ΑΠΕ και συμβατικών πηγών ενέργειας. Υπάρχουν πολλαπλοί συνδυασμοί και ο κατάλληλος σχεδιασμός αποτελεί κρίσιμο σημείο για την παραγωγικότητα και την ευστάθεια του συστήματος. Στα εν λόγω συστήματα, η ύπαρξη φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι κρίσιμης σημασίας.



Εικόνα 14 Αυτόνομο υβριδικό μικροδίκτυο Γαϊδουρομάντρα Κύθνου [4, p. 40]

1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Φ/Β

Πλεονεκτήματα

- *Ανανεώσιμη πηγή ενέργειας:* Τα φ/β συστήματα παράγουν ενέργεια από το ηλιακό φως, το οποίο αποτελεί μια καθαρή, ανεξάντλητη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Με άλλα λόγια, με την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επ' αόριστον, όσο ο ήλιος συνεχίζει να λάμπει.
- Δεν προκαλούν ρύπους, παρά μόνο στο κομμάτι της κατασκευής αυτών, η οποία ακόμη δεν είναι μη ρυπογόνο σαν διαδικασία.
- *Φιλικά προς το περιβάλλον:* Το περιβαλλοντικό όφελος των φ/β είναι αδιαμφισβήτητο. Έκαστη κιλοβατώρα (kWh), η οποία παράγεται από φ/β (αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο τη χρήση συμβατικών καυσίμων) οδηγεί σε περιορισμό της έκλυσης σχεδόν ενός (1) κιλού διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, στην Ελλάδα, όπου η μέση κατ' έτος προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο κυμαίνεται μεταξύ 1.300 και

1800 kWh/m², ένα φ/β σύστημα ονομαστικής ισχύος 3 kWp έχει την δυνατότητα παραγωγής 4.500 kWh/έτος, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η παραγωγή 4,5t CO₂ από λιγνίτη [4]

- Είναι αθόρυβα, γεγονός το οποίο είναι σημαντικό, ειδικά στην περίπτωση τοποθέτησής τους σε φυσικά περιβάλλοντα, για να μην διαταράσσεται η πανίδα.
- *Απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες περιοχές:* Η κατά τόπους παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φ/β συστήματα για την κάλυψη τοπικών αναγκών σε απομακρυσμένες περιοχές καθίσταται ολοένα και πιο βιώσιμη επιλογή. Ειδικότερα, με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται ταυτόχρονα η αποφυγή σημαντικών απωλειών ενέργειας κατά την μεταφορά και διανομή του ηλεκτρισμού και η εξοικονόμηση ενέργειας που αγγίζει το 10% συγκριτικά με τη συμβατική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του δικτύου [4]
- *Χαμηλή συντήρηση:* Τα ηλιακά πάνελ απαιτούν πολύ λίγη συντήρηση, καθώς δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη που μπορεί να σπάσουν ή να φθαρούν. Μόλις εγκατασταθούν, μπορούν να διαρκέσουν για δεκαετίες με ελάχιστη συντήρηση. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι πως μπορούν να τοποθετηθούν σε πολλά διαφορετικά μέρη και κατασκευές.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο μεμονωμένα, όσο και σε συνδυασμό με άλλες μορφές ενέργειας καθιστώντας τα μια από τις βασικότερες επιλογές ΑΠΕ προς χρήση.
- Τα Φ/Β είναι επεκτάσιμα σε περίπτωση μελλοντική ανάγκη όπου χρειάζεται αύξηση ισχύος.
- *Οικονομικά:* Τελευταίο και ίσως ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα, αποτελεί το γεγονός ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να μειώσουν σημαντικά τους λογαριασμούς ρεύματος, ιδιαίτερος σήμερα, που λόγω της ενεργειακής κρίσης το κόστος της ενέργειας είναι ιδιαίτερα υψηλό. Επιπλέον, το κόστος κτήσης / εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μειώνεται συνεχώς με την πάροδο των χρόνων, καθιστώντας το έτσι πιο προσιτό για τους οικιακούς καταναλωτές και τις επιχειρήσεις.

Μειονεκτήματα

- *Κόστος επένδυσης:* Το μεγάλο μειονέκτημα, όπως ισχύει και για τις περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (λ.χ. ανεμογεννήτριες), είναι το κόστος κατασκευής και εγκατάστασής τους. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό, καθώς δεν επιτρέπει την ευρεία ανάπτυξή τους, αν και σε βάθος χρόνου τα οικονομικά κέρδη από τη χρήση των φ/β είναι περισσότερα από το κόστος κατασκευής και εγκατάστασής τους.
- *Περιορισμός από τοποθεσία:* Τα ηλιακά πάνελ, αναλόγως της τεχνολογίας τους, καλύπτουν από πέντε (5) έως οχτώ (8) m² για κάθε KW εγκατεστημένης ισχύος και δύνανται να μετατρέπουν το 11% της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ως εκ τούτου, λόγω

της μικρής τους απόδοσης σε σχέση με την καλυπτόμενη επιφάνεια, απαιτείται η χρήση μεγάλων επιφανειών για την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος προκειμένου να παραχθεί ικανοποιητική ποσότητα ενέργειας. Επιπλέον, η μορφολογία του εδάφους, αλλά και οι καιρικές συνθήκες διαδραματίζουν ουσιώδη ρόλο στην επιλογή του χώρου εγκατάστασης αποκλείοντας, έτσι, αρκετές περιοχές.

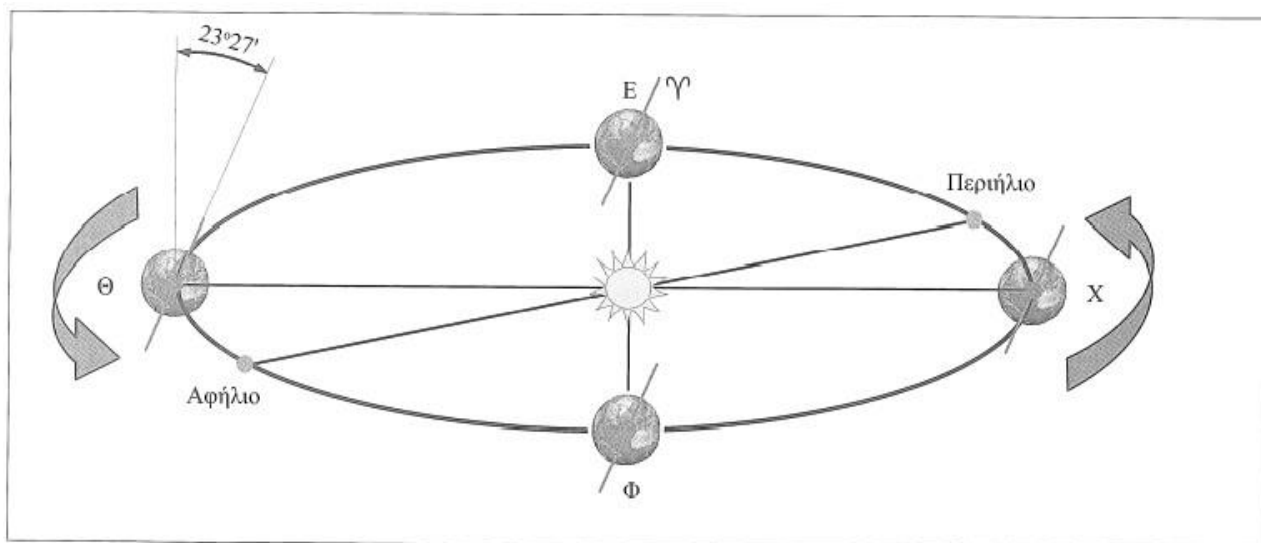
- *Περιορισμένη αποθήκευση ενέργειας:* Τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν. Ως ακολούθως, πρέπει να καταναλώνεται όταν παράγεται ή απαιτείται η πρόβλεψη εγκατάστασης μπαταριών αποθήκευσης.
- Σημαντικό μειονέκτημα είναι επίσης ότι είναι ευάλωτα στις καιρικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα σε περιόδους έντονης συννεφιάς έχουν μεγάλη μείωση της απόδοσής τους.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Βασικές αρχές ηλιακής γεωμετρίας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα σκιαγραφηθούν οι κινήσεις της γης ως προς τον ήλιο και τον εαυτό της. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει αναφορά στην κατανόηση της φαινομενικής κίνησης του ήλιου και της ηλιακής γεωμετρίας, καθώς είναι σημαντική για εφαρμογές, οι οποίες εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια. Επίσης θα οριστεί η θέση του ήλιου ως προς τη γη.

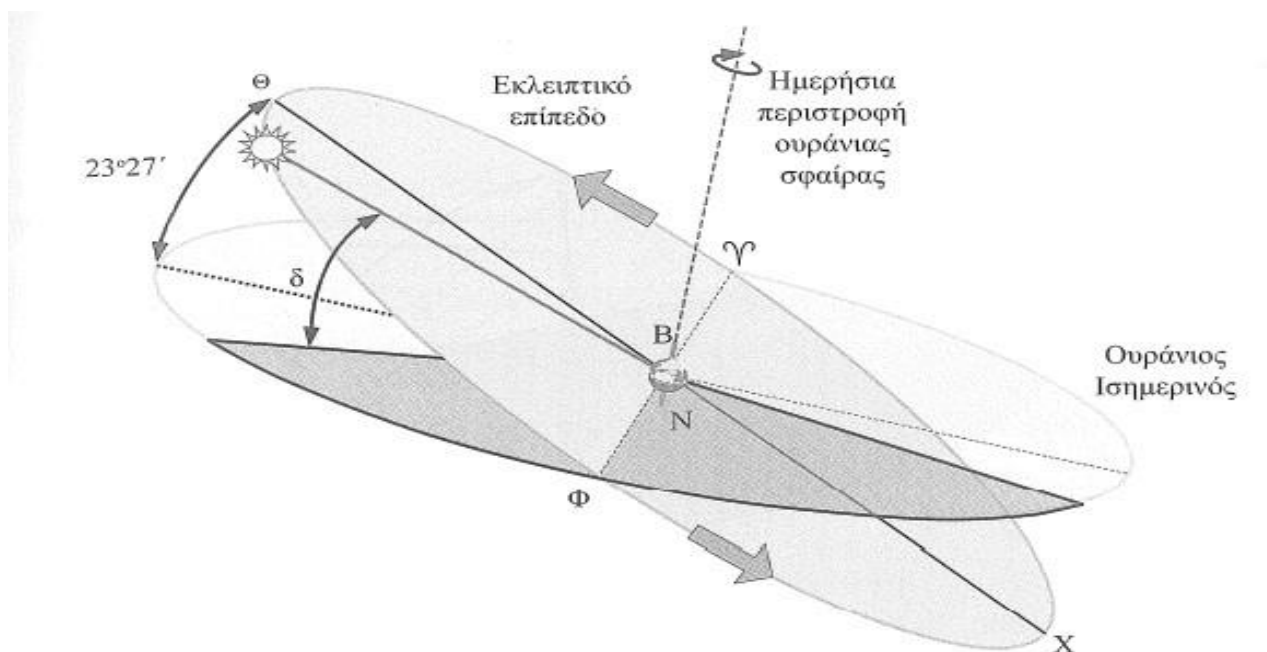
2.1 Η περιστροφή της γης σε σχέση με τον ήλιο

Πρώτη και βασική κίνηση της γης είναι η περιστροφική, όπερ σημαίνει ότι περιστρέφεται γύρωθεν του άξονα της και συγκεκριμένα τον πολικό άξονα, όπου είναι αυτός που τέμνει τον βόρειο με τον νότιο πόλο και είναι κάθετος του οριζόντιου άξονα. Η περιστροφή αυτή είναι υπεύθυνη για την εναλλαγή μεταξύ ημέρας και νύκτας, με διάρκεια περιστροφής ένα εικοσιτετράωρο (24 ώρες). Η δεύτερη βασική κίνηση του πλανήτη γη είναι η περιστροφή της γύρω από τον Ήλιο σε ελλειπτική τροχιά με το επίπεδο όπου περιλαμβάνει την τροχιά αυτή να ορίζεται ως εκλειπτικό επίπεδο με διάρκεια 365 ημερών, το οποίο ονομάζεται έτος. Όπως παρατηρείται και από την εικόνα 2.1, η ελλειπτική κίνηση του ήλιου έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή μεταβολή της απόστασης του κέντρου της γης με το αντίστοιχο του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους. Συνεπώς, η μικρότερη απόσταση μεταξύ των δύο κέντρων λέγεται περιήλιο και αφήλιο ορίζεται η μέγιστη απόσταση των δύο κέντρων στη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής της γης γύρω από τον ήλιο. Οι μεταβολές που υπάρχουν στη διάρκεια της ημέρας έναντι της νύκτας, σε ένα εικοσιτετράωρο, ανά ημέρα και στη διάρκεια του έτος οφείλονται στη ελλειπτική κίνηση της γης ως προς τον ήλιο.



Εικόνα 15 Η κίνηση της Γης σε σχέση με τον Ήλιο Περιγραφή της εικόνας [9, p. 212]

Ακόμη, ο πολικός άξονας δεν εφάπτεται με τον κάθετο άξονα στο εκλειπτικό επίπεδο, αλλά δημιουργείται μια γωνία μεταξύ αυτών με σταθερή τιμή $23^{\circ} 27' = 23,45^{\circ}$ και σταθερό προσανατολισμό ως προς το εκλειπτικό επίπεδο σε όλο το έτος. Σε αυτήν την ιδιότητα οφείλεται η εκάστοτε εποχή ανά ημισφαίριο. Η γη κάνει, επίσης, μια γυροσκοπική κίνηση λιγότερο γνωστή σε σχέση με τις δύο προηγούμενες, μια πλήρη γυροσκοπική κίνηση χρειάζονται 25.795 έτη για να ολοκληρωθεί και είναι γνωστή ως μετάπτωση. Η μετάπτωση προξενεί τη σταθερή, αλλά βραδυκίνητη μετακίνηση του βόρειου πόλου του ουρανού. Εντούτοις, για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών της ηλιακής ενέργειας από τον συλλέκτη λαμβάνεται ως δεδομένο ότι η γη είναι σταθερή και ο ήλιος περιστρέφεται σε ελλειπτική τροχιά γύρω από αυτήν.



Εικόνα 16 Ήλιος σε ελλειπτική τροχιά ως προς τη σταθερή Γη [9, p. 213]

2.2 Βασικές γωνίες και ορισμοί της ηλιακής γεωμετρίας

Στην παρακάτω ενότητα θα αποσαφηνιστούν σημαντικοί όροι, όπως οι γωνίες και οι βασικοί ορισμοί της ηλιακής γεωμετρίας, οι οποίοι θα συμβάλλουν στην κατανόηση τόσο αυτών, όσο και των μελλοντικών σχέσεων που περιέχουν αυτούς.

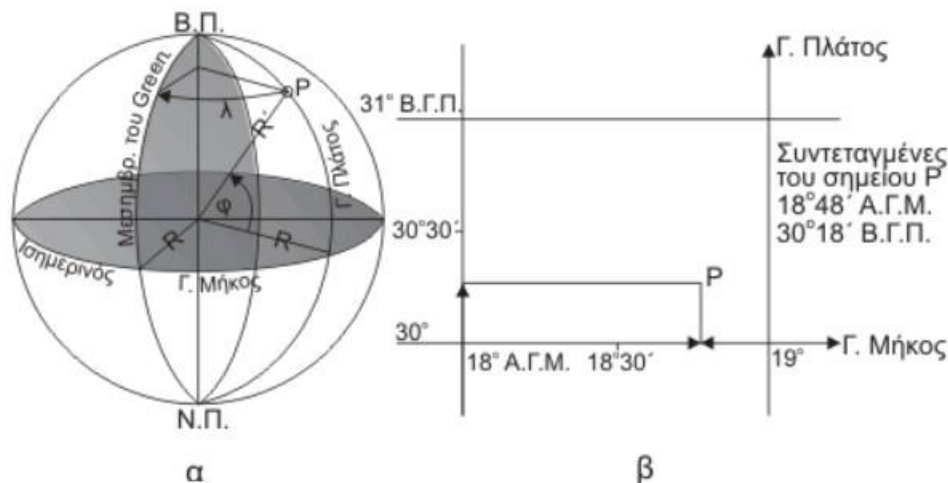
2.2.1 Ο προσδιορισμός μιας τοποθεσίας πάνω στη γη

Για τον καθορισμό μιας τοποθεσίας πάνω στη γη αποφασίστηκε πως θα χρησιμοποιείται ο προσδιορισμός μέσα από τη χρήση δύο σφαιρικών συντεταγμένων, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος αντίστοιχα με μονάδα μέτρησης τις μοίρες και ορίζοντας ως κέντρο μέτρησης των γωνιών αυτών το

κέντρο της γης. Ως επίπεδο αναφοράς θεωρείται το επίπεδο που βρίσκεται ο ισημερινός, το οποίο τέμνει κάθετα τον πολικό άξονα.

Το γεωγραφικό πλάτος (φ) ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται από την ακτίνα της γης που διέρχεται από τον ισημερινό και από την ακτίνα που διέρχεται από τον παράλληλο του. Οι τοποθεσίες οι οποίες βρίσκονται άνω του ισημερινού παίρνουν θετικό πρόσημο, ενώ οι τοποθεσίες κάτω από αυτών προσδιορίζονται με αρνητικό πρόσημο.

Καθώς με τη χρήση μόνο του γεωγραφικού πλάτους (φ) δεν θα μπορούσε να γίνει ακριβής προσδιορισμός οποιασδήποτε τοποθεσίας, γίνεται χρήση και του γεωγραφικού μήκους (α). Προτού οριστεί το γεωγραφικό μήκος όμως, θα πρέπει να γίνει αναφορά στην έννοια του μεσημβρινού. Έτσι, κάθε επίπεδο, εκ του οποίου δημιουργούνται δύο (2) ημικύκλια, τα οποία εκτείνονται και ενώνουν τον Βόρειο και τον Νότιο πόλο, και το οποίο (επίπεδο) τέμνει καθέτως το ισημερινό επίπεδο, ονομάζεται μεσημβρινός. Ως επίπεδο αναφοράς για το γεωγραφικό μήκος, χρησιμοποιείται ο μεσημβρινός ο οποίος διέρχεται από το Greenwich του Ηνωμένου Βασιλείου. Ως εκ τούτου, το γεωγραφικό μήκος (α) ορίζεται από τη γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του μεσημβρινού αναφοράς (πρώτου) και του μεσημβρινού του οποίου διέρχεται η εν λόγω τοποθεσία. Για τοποθεσίες δυτικότερα του μεσημβρινού Greenwich έχουμε θετικό πρόσημο, ενώ για ανατολικότερα αρνητικό.



Εικόνα 17 Σφαιρικές Συντεταγμένες [28]

2.2.2 Ορισμοί και γωνίες ηλιακής γεωμετρίας

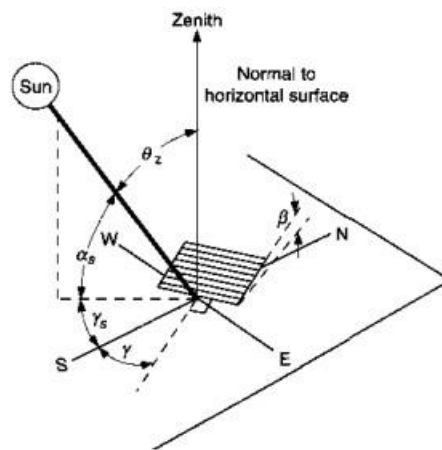
Γωνία Ζενίθ (θ_z)

Είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του τοπικού ζενίθ και της ευθείας παρατηρητή-ήλιου. Οι τιμές της κυμαίνονται: $0 < \theta_z < 90$.

Αζιμούθιο Επιφάνειας (γ)

Αζιμούθιο επιφάνειας (γ) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του τοπικού μεσημβρινού βορρά – νότου και την προβολή σε οριζόντιο επίπεδο της καθέτου επί του επιπέδου. Ο όρος αζιμούθιο έχει τις ρίζες του στην αραβική λέξη as summut, που σημαίνει κατεύθυνση. Το εύρος των τιμών του είναι $[-180^\circ, 180^\circ]$, ανατολικά από $0 \rightarrow 180^\circ$ και δυτικά από $0 \rightarrow -180^\circ$:

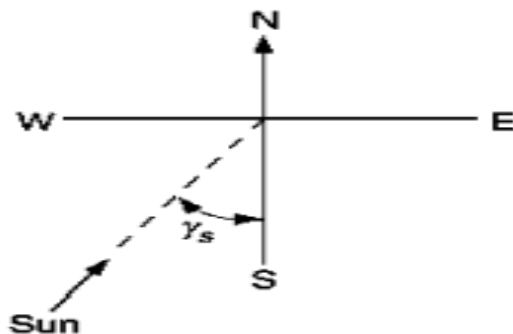
- $\gamma = -180^\circ$, βόρειος προσανατολισμός
- $\gamma = -90^\circ$, ανατολικός προσανατολισμός,
- $\gamma = 0^\circ$, νότιος προσανατολισμός,
- $\gamma = 90^\circ$, δυτικός προσανατολισμός &
- $\gamma = 180^\circ$, βόρειος προσανατολισμός.



Εικόνα 18 Αζιμούθιο Επιφάνειας (γ) [5, p. 9]

Αζιμούθιο Ήλιου (γ_s)

Ηλιακό αζιμούθιο (γ_s) είναι η οριζόντια γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά – νότου.



Εικόνα 19 Κάτοψη όπου φαίνεται το ηλιακό αζιμούθιο [5, p. 9]

Ηλιακή Ωρα (T_{SOLAR})

Η ηλιακή ώρα σχετίζεται με την τοπική ώρα, αλλά δεν ταυτίζονται, καθώς υπολογίζεται από την φαινομενική κίνηση του ήλιου.

$$\text{Τύπος: Ηλιακή Ωρα} = T_{LOCAL} + E + 4 \frac{min}{\circ} \cdot \quad (2.2.2.1)$$

Ωριαία Γωνία (ω)

Ωριαία Γωνία (ω) ορίζεται η γωνιακή απόσταση του ήλιου από το ηλιακό μεσημέρι. Ειδικότερα, εξαιτίας της περιστροφής της γης γύρω από τον άξονά της με ρυθμό $0,25^\circ / \text{min}$ προκύπτει γωνιακή μετατόπιση του ήλιου προς τα δυτικά ή τα ανατολικά σε σχέση με τον τοπικό μεσημβρινό. Προκύπτει από την εξίσωση

$$\omega = 15(t - 12) \quad (2.2.2.2)$$

και έχει θετικό πρόσημο κατά τις απογευματινές ώρες (μ.μ.) και αρνητικό τις πρωινές (π.μ.):

- $\omega=0^\circ$, στην 12η ηλιακή μεσημβρία (κάθε ώρα μεταβάλλεται κατά 15°),
- $\omega<0^\circ$, για π.μ. &
- $\omega>0$, για μ.μ..

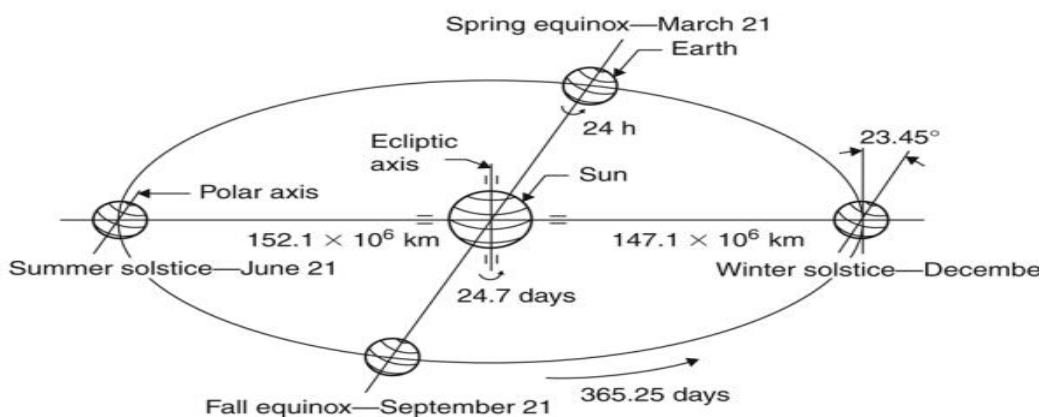
Ηλιακή Απόκλιση (δ)

Ηλιακή απόκλιση (δ) είναι η γωνία που δημιουργείται από την ευθεία που συνενώνει το κέντρο της γης, του ήλου και τον ισημερινό. Το εύρος τιμών του είναι $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$.

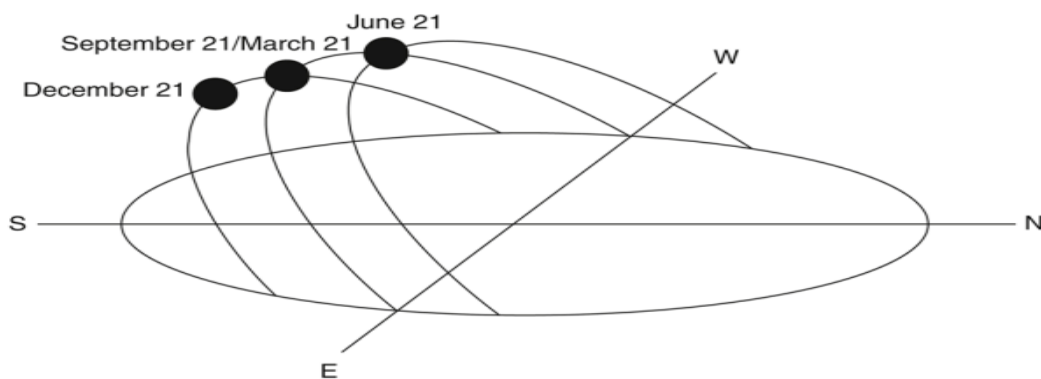
Υπολογίζεται βάσει της ακόλουθης συνάρτησης όπου $1 \leq DoY \leq 365$ η ημέρα του έτους:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + DoY)}{365}\right) \quad (2.2.2.3)$$

Οι διαφορετικές τιμές της απόκλισης του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια τους έτους έχουν ως αποτέλεσμα το καλοκαίρι στο βόρειο ημισφαίριο η μέρα να είναι μεγαλύτερη σε διάρκεια από τη νύχτα και το αντίθετο να συμβαίνει το χειμώνα.



Εικόνα 20 Ετήσια κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο – Πηγή: [6, p. 9]



Εικόνα 21 Ετήσιες αλλαγές στη θέση του ήλιου στο Βόρειο ημισφαίριο [6, p. 9]

Στην Εικόνα 20, φαίνεται ότι $\delta = 0$ τόσο κατά την εαρινή ισημερία (21 Μαρτίου), όσο και κατά την φθινοπωρινή ισημερία (21 Σεπτεμβρίου), όπου ο ήλιος ανατέλλει ακριβώς στην ανατολή και δύει στη δύση. Επιπρόσθετα, η υψηλότερη τιμή $\delta = 23,45$ είναι κατά το θερινό ηλιοστάσιο (21 Ιουνίου) και αντίστοιχα η χαμηλότερη $\delta = -23,45$ κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 Δεκεμβρίου). Στην Εικόνα 19 είναι φανερό ότι μεταξύ 22 Δεκεμβρίου και 21 Ιουνίου έκαστου έτους ο ήλιος ανατέλλει όλο και βορειότερο στον ανατολικό ορίζοντα και δύει όλο και βορειότερο στον δυτικό ορίζοντα.

Προσδιορισμός θέσης του ήλιου (β)

Είναι η διεδρη γωνία η οποία σχηματίζεται μεταξύ μιας επίπεδης επιφάνειας και στον ορίζοντα και έχει εύρος τιμών $0^\circ \leq \alpha_s \leq 180^\circ$:

$$\sin\beta = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega = \cos\theta_z \quad (2.2.2.4)$$

$$\text{Με ύψος του ήλιου } \beta = \text{asin}(\sin(\beta)) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2.2.2.5)$$

- $\beta = 0^\circ$, οριζόντιο επίπεδο,
- $\beta = 90^\circ$, κατακόρυφο επίπεδο &
- $\beta > 90^\circ$, το επίπεδο είναι στραμμένο προς τα κάτω.

Όπου

δ = ηλιακή απόκλιση

φ = γεωγραφικό πλάτος της περιοχής

ω = ηλιακή ωριαία γωνία

θ_z = η γωνία της προσπίπτουσας δέσμης ως προς το τοπικό ζενίθ

Οι γωνίες β και θ_z είναι συμπληρωματικές

Γωνία Πρόσπτωσης (θ)

Γωνία Πρόσπτωσης (θ) είναι η γωνία μεταξύ των προσπιπτουσών ακτινοβολιών του ήλιου και της καθέτου στην επιφάνεια. Υπολογίζεται βάσει της ακόλουθης εξίσωσης και όπως προκύπτει εξαρτάται και από τις άλλες γωνίες:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\beta - \sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (2.2.2.6)$$

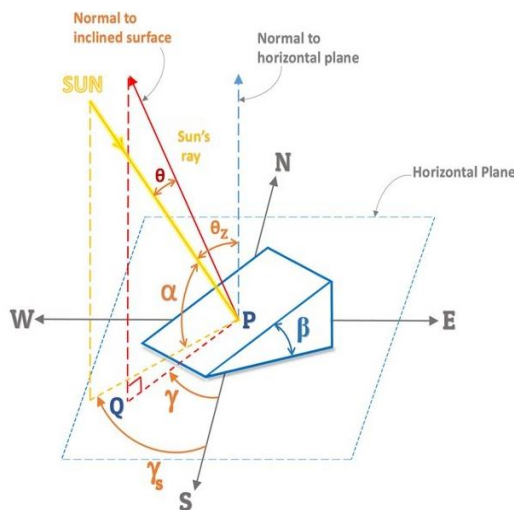
Στην περίπτωση:

- κατακόρυφου επιπέδου όπου $\beta = 90^\circ$, η παραπάνω συνάρτηση διαμορφώνεται ως ακολούθως:
$$\cos\theta = -\sin\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \sin\varphi \cdot \cos\omega \cdot \cos\gamma + \cos\delta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega \quad (2.2.2.7)$$
- οριζόντιου επιπέδου όπου $\beta = 0^\circ$ η γωνία πρόσπτωσης (θ) = γωνία ζενίθ (θ_z), η παραπάνω συνάρτηση διαμορφώνεται ως ακολούθως:

$$\cos\theta = \cos\theta_z = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega \quad (2.2.2.8)$$

- επιφανειών υπό κλίση στο βόρειο ημισφαίριο, οι οποίες στρέφονται προς το νότο $\gamma=0^\circ$, η παραπάνω συνάρτηση διαμορφώνεται ως ακολούθως:

$$\cos\theta = \sin\delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\omega \quad (2.2.2.9)$$



Εικόνα 22 Ζενιθιακή γωνία, κλίση, αζιμούθιο επιφάνειας και ηλιακό αζιμούθιο για κεκλιμένη επιφάνεια [29]

Γωνία ημέρας (B)

Είναι η γωνία που υπολογίζεται ανάλογα της ημέρας του έτους από τον τύπο

$$B = 360^\circ \cdot \frac{DoY-1}{365} \quad (2.2.2.10)$$

Όπου

DoY= Ημέρα του έτους

Εκκεντρότητα του Ήλιου (E₀)

Μέσα από τις σειρές Fourier του Spencer ο τύπος (2.2.2.11) μπορεί να υπολογίσει τις μεταβολές στην απόσταση γης – ήλιου για διάφορες μέρες του έτους. Ο παράγοντας αυτός ονομάζεται εκκεντρότητα του ήλιου.

$$E_0 = 1,0001 + 0,034221 \cdot \cos B + 0,00128 \cdot \sin B + 0,000719 \cdot \cos 2B + 0,000077 \cdot \sin 2B \quad (2.2.2.11)$$

Όπου

B= Γωνία ημέρας

2.3 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, ο ήλιος αποτελεί μία αστείρευτη πηγή ενέργειας για τη γη, καθώς διατελεί ως μία τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) θερμοκρασίας 5777 K. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο, συμπεριλαμβανομένου του ορατού φωτός, της υπεριώδους ακτινοβολίας και της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η μονάδα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας (W/m^2). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει ξεκάθαρο πως η ηλιακή ακτινοβολία είναι διαφορετική στον ήλιο, στο διάστημα, έξω από την ατμόσφαιρα της γης και εν τέλει στην επιφάνειά της.

Ακτινοβολία εκτός Ατμόσφαιρας γης

Αν $G_{EXTRA\ TERRESTIAL}$ είναι η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) εκτός της ατμόσφαιρας και η $G_{SOLAR\ CONSTANT}$ η ηλιακή σταθερά, η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ένα επίπεδο εκτός της ατμόσφαιρας της γης σε κάθετο προς τις ακτίνες επίπεδο, μπορεί να υπολογιστεί βάσει της ακόλουθης συνάρτησης:

$$G_{EXTRA\ TERRESTRIAL} = G_{SC} \left[1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360^\circ \cdot DoY}{365} \right) \right] \quad (2.3.1)$$

$$H \quad G_{EXTRA\ TERRESTRIAL} = E_0 \cdot G_{SC} = G_{GLOBAL,oa} \quad (2.3.2)$$

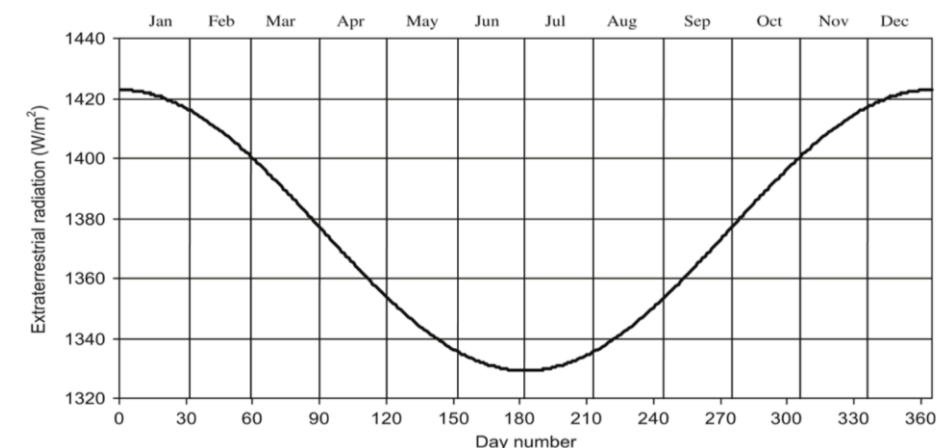
όπου,

G_{SC} : Η ηλιακή σταθερά ($1367\ W/m^2$) από 1991 και εντεύθεν

$G_{EXTRA\ TERRESTRIAL}$: Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) έξω από την ατμόσφαιρα της γης σε κάθετη επιφάνεια για τη συγκεκριμένη ημέρα του έτους (DoY)

DoY: Η ημέρα του έτους για την οποία υπολογίζεται η πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας

E_0 : Η εκκεντρότητα του ήλιου



Εικόνα 23 Μεταβολή ηλιακής ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας [6, p. 19]

Η ηλιακή σταθερά (G_{sc}) είναι η ποσότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται η εξωτερική ατμόσφαιρα σε μια μέση απόσταση της γης από τον ήλιο. Ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας που λαμβάνεται ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου και συνήθως μετριέται σε Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2). Η ηλιακή σταθερά είναι μια θεμελιώδης τιμή στους υπολογισμούς της ηλιακής ενέργειας, καθώς αντιπροσωπεύει το συνολικό ποσό ενέργειας που λαμβάνεται από τον ήλιο στην εξωτερική ατμόσφαιρα. Η τελευταία τιμή της G_{sc} , όπως προκύπτει από πρόσφατα δορυφορικά δεδομένα και υιοθετήθηκε από το Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας, είναι $1367 W/m^2$. Η τιμή αυτή κυμαίνεται λόγω της μεταβαλλόμενης απόστασης μεταξύ γης - ήλιου με επίπτωση στην ηλιακή ακτινοβολία. Το μέγιστο της ηλιακής σταθεράς παρατηρείται τον Ιανουάριο και το ελάχιστο τον Ιούλιο [7].

Όπως φαίνεται και στον ακόλουθο Πίνακα, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο απλώνεται από τις ακτίνες X έως τα μικροκύματα με περίπου 39% να αφορά την περιοχή του ορατού, 53% του υπέρυθρου και 8% του υπεριώδους φωτός [8].

Πίνακας 1: Φασματική κατανομή ακτινοβολίας εκτός ατμοσφαιρας [8]

Περιοχή φάσματος	Φασματική ζώνη μήκους κύματος λ , μm	Κλάσμα ηλιακής εκπομπής, %
Ακτίνες X	$\lambda < 0,01$	0,00005
Ακραίο υπεριώδες	$0,01 < \lambda < 0,10$	0,0003
Μακρινό υπεριώδες	$0,10 < \lambda < 0,20$	0,01
Υπεριώδες UV-C	$0,20 < \lambda < 0,28$	0,5
Υπεριώδες UV-B	$0,28 < \lambda < 0,32$	1,3
Υπεριώδες UV-A	$0,32 < \lambda < 0,39$	6,2
Ορατό	$0,39 < \lambda < 0,76$	39,0
Κοντινό υπέρυθρο	$0,76 < \lambda < 4,0$	52,0
Θερμικό υπέρυθρο	$4,0 < \lambda < 100,0$	0,9
Μακρινό υπέρυθρο	$100,0 < \lambda < 1000,0$	0,09

Η $G_{GLOBAL,h,oa}$ είναι η ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επίπεδο παράλληλο στο οριζόντιο του εδάφους:

$$G_{GLOBAL,h,oa} = G_{GLOBAL,oa} \cdot \sin(\beta) \quad (2.3.3)$$

όπου,

$$G_{GLOBAL,oa}: \quad G_{EXTRA\ TERRESTIAL}: \quad (2.3.2)$$

$\sin(\beta)$ Ο προσδιορισμός του ηλιακού ύψους (2.2.2.4)

Αν χρειάζεται η παραπάνω εξίσωση να εκφραστεί στο πεδίο του χρόνου, η ωριαία μέση ηλιακή ακτινοβολία (I_{oh}) που πέφτει σε οριζόντιο επίπεδο κάθε ώρα δίνεται από τη σχέση:

$$I_{oh} = \frac{12}{\pi} G_{ET} \left[\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{\pi}{180} \cdot (\omega_2 - \omega_1) \cdot \sin\delta \cdot \sin\varphi \right] \quad (2.3.4)$$

όπου,

ω_1 : Η ωριαία γωνία του ήλιου στην αρχή της ώρας

ω_2 : Η ωριαία γωνία του ήλιου στο τέλος της ώρας

Η πρώτη τιμή που λαμβάνει το ω_1 είναι η ωριαία γωνία της ανατολής του ήλιου. Αντίστοιχα, η τελευταία του ω_2 είναι η ωριαία γωνία της δύσης του ήλιου.

Ακτινοβολία ατμόσφαιρας γης [9]

Η φασματική κατανομή του ήλιου τροποποιείται ενεργειακά πριν φτάσει στη γη. Ειδικότερα, όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα και κατευθύνεται προς την επιφάνεια της γης, η έντασή της ελαττώνεται, καθώς τα φωτόνια σκεδάζονται στα μόρια του αέρα και στα αιωρήματα, όπως οι υδρατμοί, η σκόνη και ο καπνός. Επίσης, ποσοστό της ακτινοβολίας απορροφάται από διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας, όπως O_3 , H_2O και CO_2 .

Η ηλιακή ακτινοβολία διακρίνεται σε άμεση κανονική, διάχυτη και Παγκόσμια οριζόντια ακτινοβολία. Αντίστοιχα ταξινομούνται και οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας:

Direct / beam radiation B – είναι η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη χωρίς σκέδαση και μετράται σε κάθετο επίπεδο στη διεύθυνση γης – ήλιου. Η άμεση ακτινοβολία εξαρτάται από τις συνιστώσες που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο σημείο της παρούσας διπλωματικής όπως:

1. απόσταση ήλιου – γης,
2. απόκλιση του ήλιου,
3. ύψος του ήλιου,

4. γεωγραφικό πλάτος του σημείου μέτρησης,
5. το υψόμετρο του σημείου μέτρησης &
6. την κλίση του εδάφους στο σημείο μέτρησης

αλλά και από την απορρόφηση και τη διάχυση της ακτινοβολίας εντός της ατμόσφαιρας.

Η στιγμιαία μονάδα μέτρησης της άμεσης ακτινοβολίας είναι το Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2) και συμβολίζεται με $G_{BEAM,h}$ στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ στο επίπεδο με κλίση, με $G_{BEAM,i}$. Στην περίπτωση της ωριαίας ή ημερήσιας μέτρησης της ενέργειας, έναντι του συμβόλου G χρησιμοποιείται το σύμβολο I και H αντίστοιχα.

Ο τύπος για τον υπολογισμό της συνολικής συνιστώσας της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος

$$G_{BEAM} = G_{GLOBAL,h} \cdot \frac{1-K_d}{\sin(\beta)} \quad (2.3.5)$$

Με την συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο

$$G_{BEAM,h} = G_{BEAM} \cdot \sin\beta = G_{GLOBAL,h} \cdot (1 - K_d) \quad (2.3.6)$$

Όσον αφορά την άμεση ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται από τον τύπο

$$G_{BEAM,i} = G_{BEAM,h} \frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin\beta} = G_{GLOBAL,h} \cdot (1 - K_d) \cdot \frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin\beta} \quad (2.3.7)$$

όπου,

G_{BEAM} :	Η συνολική συνιστώσα της άμεσης ακτινοβολίας στο έδαφος
$G_{BEAM,h}$:	Η συνιστώσα της άμεσης ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο
$G_{GLOBAL,h}$:	Η ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, επί του εδάφους
K_d	Το κλάσμα διάχυσης της ακτινοβολίας (2.3.16), (2.3.17)
$G_{BEAM,i}$:	Η συνιστώσα της άμεσης ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη
β	Ύψος του ήλιου (2.2.2.5)
α	Γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο

Diffusion radiation D - είναι το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας που υφίσταται σκέδαση και φτάνει στη γη μετά από διασκορπισμό και αλλαγή κατεύθυνσης εντός της ατμόσφαιρας. Η διάχυτη ακτινοβολία εξαρτάται από:

- Το ύψος του ήλιου,
- Το υψόμετρο του σημείου μέτρησης &
- Τη λευκαύγεια του εδάφους στο σημείο μέτρησης,
- Το ποσό και το είδος των νεφών που αναπτύσσονται στην ατμόσφαιρα.

Η στιγμιαία μονάδα μέτρησης της άμεσης ακτινοβολίας είναι το Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2) και συμβολίζεται με G_{DIFF} και όπως για την άμεση ακτινοβολία, η ωριαία μέτρηση με I_{DIFF} .

Ο τύπος για τον υπολογισμό της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο είναι

$$G_{DIFF,h} = G_{GLOBAL,h} - G_{BEAM,h} \quad (2.3.8)$$

Όσον αφορά τη διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται από τον τύπο

$$G_{DIFF,i} = G_{DIFF,h} \frac{(1+\cos\alpha)}{2} \quad (2.3.9)$$

όπου,

$G_{DIFF,h}$:	Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, επί του εδάφους
$G_{GLOBAL,h}$:	Η ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης
$G_{BEAM,h}$:	Η άμεση ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, επί του εδάφους
$G_{DIFF,i}$	Η συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη
α	Γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο

Global radiation G_{GLOBAL} – αποτελεί τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία, ήτοι την άμεση και την έμμεση / σκεδασμένη/ανακλώμενη ακτινοβολία. Η στιγμιαία μονάδα μέτρησης της ολικής ακτινοβολίας είναι το Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2) και συμβολίζεται με $G_{GLOBAL,h}$ όταν μετράται σε οριζόντιο επίπεδο και $G_{GLOBAL,i}$ στην περίπτωση κεκλιμένου επιπέδου. Το όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρησή της ονομάζεται πυρηλιόμετρο.

Για την περίπτωση κεκλιμένου επιπέδου υπολογίζεται βάσει της ακόλουθης συνάρτησης:

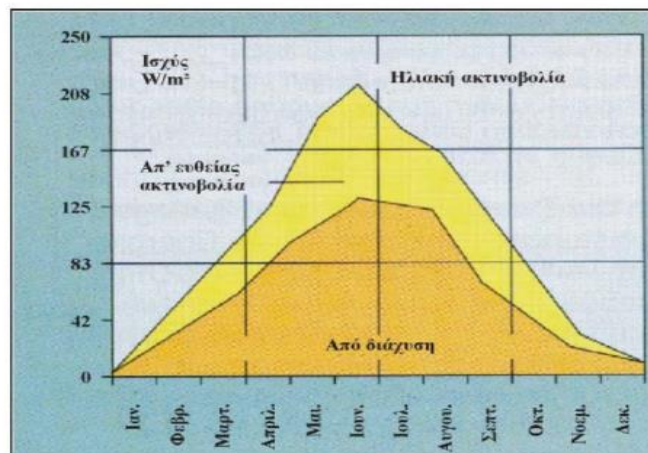
$$G_{GLOBAL,i} = G_{BEAM,i} + G_{DIFF,i} \quad (2.3.10)$$

όπου,

$G_{GLOBAL,i}$: Η συνολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

$G_{BEAM,i}$: Η άμεση ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

$G_{DIFF,i}$: Η διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο



Εικόνα 24 Άμεση-Διάχυτη-Ολική ακτινοβολία – Πηγή: [30]

Στο παρακάτω σχήμα διακρίνονται συγκεντρωτικά τα τρία μεγέθη κατά τη διάρκεια ενός χρόνου βάσει πειραματικών στοιχείων στην περιοχή της Αθήνας:

Όπως και παραπάνω, το σύμβολο I χρησιμοποιείται για την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία για μία ώρα. Επιπλέον, οι ακόλουθοι δείκτες χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τα ακόλουθα μεγέθη:

- o_a : ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας,
- $beam$: άμεση ακτινοβολία,
- $diff$: διάχυτη ακτινοβολία,
- h : ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια
- i : ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο

Στις περιπτώσεις, που κανένας από τους παραπάνω δείκτες δεν χρησιμοποιείται, θεωρείται ότι αναφέρεται σε ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο.

Όταν η επιφάνεια διάδοσης που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία είναι κεκλιμένη, προστίθεται και ένας ακόμα παράγοντας στην ολική ακτινοβολία, αν και με μικρό σχετικά ποσοστό, η ανάκλαση σε παρακείμενα αντικείμενα (Albedo).

Albedo [10] (R_p / ρ)– είναι η ηλιακή ακτινοβολία που αντανακλάται από την επιφάνεια της γης και επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις, ήτοι λευκαύγεια. Η ανακλώμενη ακτινοβολία εξαρτάται από τα επίπεδα ανάκλασης της προσπίπτουσας επιφάνειας και ορίζεται ως το πηλίκο της ανακλώμενης ισχύος προς την προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ στη θέση της επιφάνειας που προκαλεί την ανάκλαση.

$$\rho_{ALBEDO} = \frac{G_p}{G_o} \rightarrow G_p = \rho_{ALBEDO} \cdot G_{GLOBAL,h} \quad (2.3.11)$$

Η ανακλώμενη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο είναι ίση με

$$G_{ALBEDO,i} = \frac{(1-\cos\alpha)}{2} \cdot \rho_{ALBEDO} \cdot G_{GLOBAL,h} \quad (2.3.12)$$

όπου

- $G_{ALBEDO,i}$: Η ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας
- $G_{GLOBAL,h}$: Η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας
- ρ_{ALBEDO} : Ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους
- α : Γωνία κλίσης του συλλέκτη ως προς το οριζόντιο επίπεδο

Έχει παρατηρηθεί ότι [11]:

- Η μέση λευκαύγεια της γης χωρίς νέφη είναι 15%.
- Η μέση λευκαύγεια της γης με νεφοσκεπή ουρανό είναι 50%.
- Άρα, η μέση λευκαύγεια της γης είναι 32,5%.

Ο συντελεστής ανακλαστικότητας (ρ) λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 (πλήρης απορρόφηση) και 1 (πλήρης ανάκλαση), ενώ η συνήθης τιμή του είναι $\rho = 0,20$. Ενδεικτικές τιμές ανάκλασης παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα:

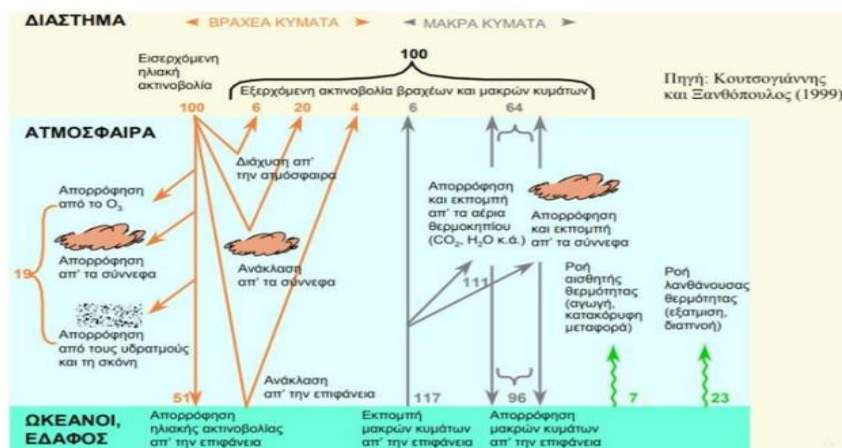
Επίδραση εποχιακής μεταβολής μετεωρολογικών παραγόντων και διάρκειας ημέρας στην επιλογή βέλτιστης γωνίας κλίσης σε σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια

Πίνακας 2: Ενδεικτικές τιμές (ρ) – Πηγή: Εναλλακτικές μορφές ενέργειας: φωτοβολταϊκά συστήματα: αιολικά συστήματα: υβριδικά συστήματα / Βασίλειος Δ. Μπιτζιώνης, Δημήτριος Β. Μπιτζιώνης, Αθήνα, Τζιόλα, 2011. [10]

α/α	Επιφάνεια	Συντελεστής ανάκλασης (ρ)
1.	Καθαρό (φρέσκο) χιόνι	0,80 – 0,95
2.	Βρώμικο (παλιό) χιόνι	0,40 – 0,70
3.	Πάγος	0,20 – 0,40
4.	Ήρεμη θάλασσα	0,03 – 0,30
5.	Άμμος	0,20 – 0,45
6.	Γρασίδι	0,15 – 0,25
7.	Δάσος	0,15 – 0,20
8.	Τσιμέντο	0,10 – 0,35
9.	Άσφαλτος	0,05 – 0,20

Συνεπώς, η τροποποιημένη σχέση της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο είναι:

$$G_{GLOBAL,i} = G_{BEAM,i} + G_{DIFF,i} + G_{ALBEDO,i} \quad (2.3.13)$$



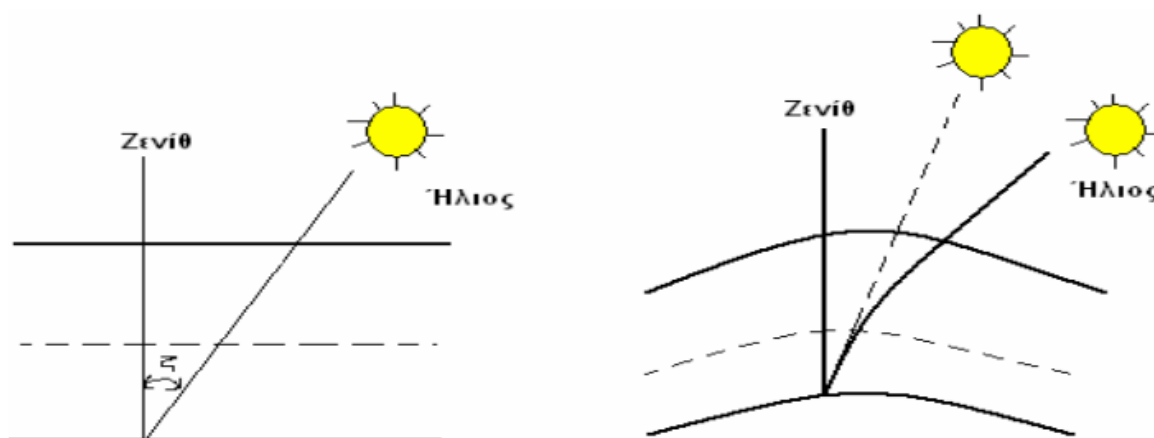
Εικόνα 25 Ενεργειακό ισοζύγιο γης



Εικόνα 26 Συνολική ακτινοβολία που δέχεται Φ/Β επιφάνεια - Πηγή: [12]

Επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία

Το μέγεθος της μείωσης της ακτινοβολίας όταν εισέρχεται στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής που θα διανύσει το ηλιακό φως εντός της ατμόσφαιρας και μετράται από τη μάζα αέρα (air mass). Όσο μεγαλύτερη η απόσταση που διανύουν οι ηλιακές ακτίνες, τόσο μικρότερη η ένταση της ενέργειας που φτάνει στη γη. Με άλλα λόγια, η μάζα αέρα εκφράζει το πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα λόγω της καμπυλότητας της γης, σε σχέση με την κατακόρυφη διαδρομή στην οποία η καμπυλότητα δεν λαμβάνεται υπ' όψιν.



Εικόνα 27 Εξάρτηση της μάζας αέρα (AM) από την θέση του ήλιου [31]

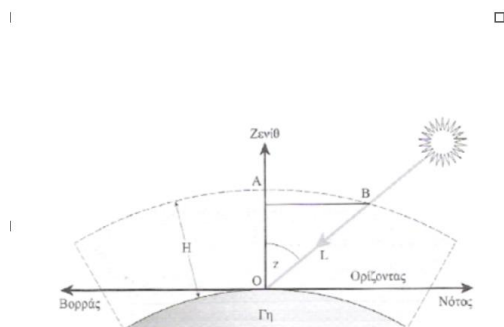
Η μάζα αέρα (AM) ορίζεται ως ο λόγος της διαδρομής των ηλιακών ακτινών μέσα στην ατμόσφαιρα προς το πάχος της ατμόσφαιρας:

$$AM = \frac{1}{\cos(90-\gamma_s)} \quad (2.3.14)$$

όπου γ_s ηλιακό αζιμούθιο.

Η ηλιακή σταθερά ($G_{\text{SOLAR CONSTANT}}$) στην κλίμακα της μάζας αέρα (AM) εκφράζεται ως $AM=0$ και αντιπροσωπεύει την πλήρη απουσία ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα, όταν $AM=0$ η ηλιακή ακτινοβολία βρίσκεται στο διάστημα σε απόσταση ίση με την μέση απόσταση γης – ήλιου. Αντίστοιχα, ως πρότυπο μήκος διαδρομής ορίζεται η κάθετη κίνηση των ηλιακών ακτινών (ζενίθ) εντός της ατμόσφαιρας με κατάληξη την επιφάνεια της θάλασσας, όπου $AM=1$ [13].

Στον ακόλουθο Πίνακα, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι πυκνότητες ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες συνθήκες μάζας αέρα.



Εικόνα 28 Ηλιακές ακτίνες εντός ατμόσφαιρας [13]

Τιμή Μάζας Αέρα	Συμβατικές Συνθήκες	Ισχύς (W/m ²)	Μέση Ενέργεια Φωτονίων (eV)
AM0	Στο διάστημα έξω από την ατμόσφαιρα	1367	1,48
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	1000	1,32
AM2	Απόσταση του ήλιου 60° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	880	1,38
AM3	Απόσταση του ήλιου 70,5° από το ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας. Ξηρή ατμόσφαιρα	750	1,21

Πίνακας 3: Πρότυπες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα [13]

Στην πρότυπη διαδρομή (AM=1) και αφού έχει ήδη συνυπολογιστεί το φαινόμενο της απορρόφησης, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 1000 W/m² και αποτελεί εν γένει μία αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που δέχεται μία επιφάνεια σε ιδανικές συνθήκες, όπως μεσημέρι, καλοκαίρι, καθαρός ουρανός κ.ο.κ.. [10] Πολλές φορές, η εν λόγω ακτινοβολία συναντάται και με τον όρο ακτινοβολία ενός ήλιου ή ενός πλήρους ήλιου και στην περίπτωση των Φ/Β ως ισχύος αιχμής και λαμβάνεται ως η ονομαστική ισχύς αυτών.

Πέραν των ανωτέρω γεωμετρικών επιδράσεων που υφίσταται η ηλιακή ακτινοβολία πριν φτάσει στο έδαφος, ένας ακόμα πολύ σημαντικός παράγοντας είναι ο δείκτης αιθριότητας K_t της ατμόσφαιρας ο οποίος υπολογίζεται βάσει του ακόλουθου τύπου

$$K_t = \frac{G_{GLOBAL,h}}{G_{GLOBAL,h,oa}} \quad (2.3.15)$$

όπου

$G_{GLOBAL,h}$: Η ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος σε οριζόντιο επίπεδο

$G_{GLOBAL,h,oa}$: Η ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας σε ένα οριζόντιο επίπεδο, παράλληλο προ το έδαφος (2.3.3)

Ο συγκεκριμένος δείκτης είναι αρκετά σημαντικός, καθότι συμπυκνώνει όλους εκείνους τους λόγους που επιδρούν στη μείωση της ποσότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που αγγίζει την επιφάνεια της γης.

Με άλλα λόγια, συνοψίζει την επίδραση της ατμόσφαιρας (απορρόφηση, σκέδαση) στις ακτίνες του ήλιου. [14]

Ειδικότερα, ο Erbs (Erbs et al,1982) διαπίστωσε ότι το ποσοστό διάχυτης προς ολική ακτινοβολία σχετίζεται άμεσα με τον δείκτη αιθριότητας K_t . Όσο πιο καθαρή είναι η ατμόσφαιρα και ο καιρός αίθριος, τόσο μικρότερη το ποσοστό της ολικής ακτινοβολίας που διαχέεται, ήτοι λιγότερη διάχυτη ενέργεια. Παρόλα αυτά, ακόμα και σε μία ηλιόλουστη μέρα υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία της τάξεως του 10%, η οποία οφείλεται κυρίως στους υδρατμούς της ατμόσφαιρας. [9]

Στη συνέχεια οι Erbs et al. [15] χρησιμοποίησαν μια βάση δεδομένων που αποκτήθηκε από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς των ΗΠΑ και κατέληξαν στην ακόλουθη σχέση:

$$K_d = \begin{cases} 1.0 - 0.09K_t, & K_t \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604K_t + 4.388K_t^2 - 16.638K_t^3 + 12.336K_t^4, & \text{για } 0.22 < K_t \leq 0.80 \\ 0.165, & K_t > 0.80 \end{cases} \quad (2.3.16)$$

Αντίστοιχα, η Καρατάσου [16] χρησιμοποιώντας δεδομένα ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας από το Πανεπιστήμιο Αθηνών, στην Πεντέλη (39.049ο Β, 23.863ο Α και 500μ. από την επιφάνεια της θάλασσας), για την περίοδο από τον Ιανουάριο 1996 έως το Δεκέμβριο 1998, κατέληξε στην ακόλουθη σχέση:

$$K_d = \begin{cases} 1.4926K_t^3 - 2.4156K_t^2 - 0.05K_t + 0.9995, & K_t \leq 0.78 \\ 0.20, & K_t > 0.78 \end{cases} \quad (2.3.17)$$

2.4 Βέλτιστη γωνία κλίσης φωτοβολταϊκού

Σύμφωνα με τον κ. Δέρβο [9], ο τρόπος εγκατάστασης ενός απλού σταθερού ηλιακού συλλέκτη μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους για τη μεγαλύτερη δυνατή συλλογή ηλιακής ενέργειας.

1. Ο πρώτος τρόπος είναι να τοποθετηθούν ο συλλέκτης σταθερής γωνίας προς τον Ισημερινό (προς το Νότο για το Βόρειο ημισφαίριο) με κλίση περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Αυτός ο τρόπος είναι κατάλληλος για ομοιόμορφη συλλογή ηλιακής ενέργειας κατά τη διάρκεια όλου του έτους.
2. Ο δεύτερος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές γωνίες κλίσης για τον συλλέκτη. Κατά τη χειμερινή περίοδο, η κλίση θα πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής επαυξημένη κατά 10° . Κατά τη θερινή περίοδο, η κλίση θα

πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής ελαττωμένη κατά 10° . Αυτό επιτρέπει τη βέλτιστη απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας ανάλογα με την εποχή του χρόνου.

3. Εναλλακτικά, μπορείτε να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα που προσαρμόζεται σε τρεις διαφορετικές γωνίες κλίσης των πλαισίων, ανάλογα με την εποχή, για ακόμα μεγαλύτερη συλλογή της ηλιακής ενέργειας.

Πίνακας 4: Εποχιακή βέλτιστη κλίση φωτοβολταϊκού κατά κ. Δέρβου [9]

ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΧΕΙΜΕΡΙΝΗ	ΕΑΡΙΝΗ ΙΣΗΜΕΡΙΑ	ΘΕΡΙΝΗ	ΦΘΙΝΟΠΩΡΙΝΗ ΙΣΗΜΕΡΙΑ
ΔΙΑΡΚΕΙΑ	15/10 - 29/2	1/3 – 11/4	12/4 – 2/9	3/9 – 14/10
ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΚΛΙΣΗ	$\alpha = \phi + 10^\circ$ $\theta = 0$	$\alpha = \phi$ $\theta = 0$	$\alpha = \phi - 10^\circ$ $\theta = 0$	$\alpha = \phi$ $\theta = 0$

Με βάση τους πίνακες από το βιβλίο του κ. Μπιζιώνη, [10] “Εναλλακτικές μορφές ενέργειας”, η ετήσια μόνιμη βέλτιστη κλίση ενός πλαισίου για την περιοχή της Αθήνας είναι οι 28° , όπως αναφέρεται στον πίνακα 1-IV. Ωστόσο, η ανά μήνα βέλτιστη κλίση για την Αθήνα με βάση τον πίνακα 1-III αναγράφεται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5: Μηνιαία βέλτιστη κλίση φωτοβολταϊκού κατά κ. Μπιζιώνη [10]

ΑΘΗΝΑ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
α	60,0	50,0	38,0	21,0	6,0	0,0	0,0	15,0	33,0	48,0	57,0	62,0

2.5 Χωροταξική διάταξη φωτοβολταϊκών

Η έννοια της χωροταξικής διάταξης των φ/β αναφέρεται στην εξέταση του τρόπου με τον οποίο διάφοροι παράγοντες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, οι καιρικές συνθήκες καθώς και τα φυσικά εμπόδια, επηρεάζουν τη συνολική απόδοσή τους. Ο βασικός στόχος της παραπάνω διάταξης είναι να προσδιοριστεί η βέλτιστη τοποθέτηση και ο προσανατολισμός των ηλιακών συλλεκτών, με σκοπό την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κυριότεροι παράγοντες απωλειών ενέργειας των Φ/Β λόγω διάταξης είναι οι ακόλουθοι:

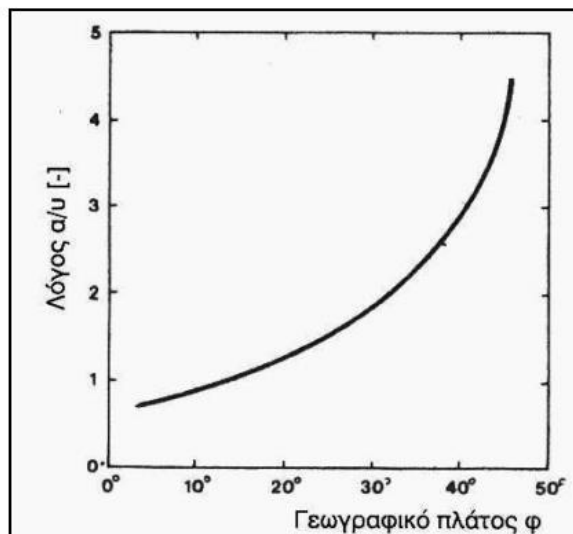
- i. Σκιάσεις φυσικών εμποδίων.

- ii. Σκιάσεις της ίδιας της εγκατάστασης.
- iii. Μεταφορά ενέργειας (DC-AC).

Η ελαχιστοποίηση της σκίασης είναι ζωτικής σημασίας για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας, καθότι η σκίαση μειώνει την ποσότητα του ηλιακού φωτός που φτάνει στα φωτοβολταϊκά κύτταρα, μειώνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος. Ως ακολούθως, στις περιπτώσεις διάταξης των φ/β με κλίση, θα πρέπει πρωτίστως να υπολογιστούν οι επιφάνειες που δε σκιάζονται από φυσικά εμπόδια, όπως από κοντινές κατασκευές ή δέντρα. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για τον εντοπισμό τους αναφέρονται παρακάτω:

1. Βρίσκεται το κέντρο του τόπου εγκατάστασης της Φ/Β συστοιχίας.
2. Εντοπίζεται η ανατολή.
3. Με τη χρήση ταχύμετρου βρίσκεται το ύψος όλων των εμποδίων που βρίσκονται ανατολικά σε μοίρες.
4. Χρησιμοποιείται ηλιακός χάρτης, προκειμένου να σημειωθούν τα ευρήματα του βήματος (3).
5. Περιστρέφεται ο μελετητής 15° προς το βορρά και επαναλαμβάνονται τα δύο προηγούμενα βήματα.
6. Αναπαράγεται η διαδικασία που περιγράφεται στο (3), (4) & (5) έως ότου φτάσει κοιτώντας δυτικά.
7. Ενώνονται τα σημεία που έχουν εντοπιστεί στα προηγούμενα βήματα εντοπίζοντας με αυτόν τον τρόπο την περιοχή σκίασης.

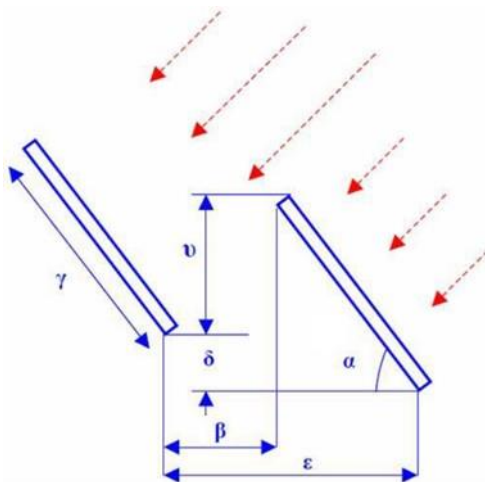
Ανάλογα με το ύψος κάλυψης που θα βρεθεί από τη παραπάνω σχέση και χρησιμοποιώντας την ακόλουθη καμπύλη, εντοπίζεται η ελεύθερη απόσταση (β) μεταξύ δύο Φ/B



Εικόνα 30 Λόγος β / α [33]

Η ελάχιστη απόσταση (ϵ) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω συνάρτηση:

$$\epsilon = \beta + \gamma \cdot \cos \alpha \quad (2.5.2)$$



Εικόνα 31 Διάταξη Φ/B [33]

Τέλος, ο καθορισμός του απαιτούμενου εμβαδού της έκτασης για την τοποθέτηση Φ/B (S_E) δίνεται από την ακόλουθη συνάρτηση:

$$S_E = S_0 \cdot \frac{\epsilon}{\gamma \cdot \cos \alpha} \quad (2.5.3)$$

$$S_0 = S\pi \cdot N \cdot \cos \alpha \quad (2.5.4)$$

όπου,

Επίδραση εποχιακής μεταβολής μετεωρολογικών παραγόντων και διάρκειας ημέρας στην επιλογή βέλτιστης γωνίας κλίσης σε σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια

S_0 : Εμβαδόν οριζόντιας έκτασης όλων των Φ/Β (m^2)

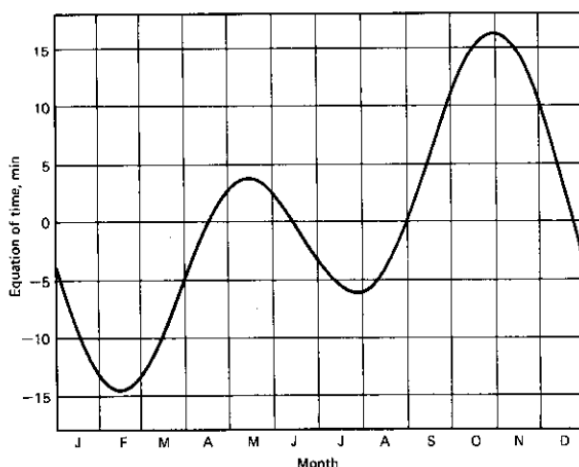
S_p : Εμβαδόν Φ/Β πλαισίου (m^2)

N : Πλήθος Φ/Β στοιχείων

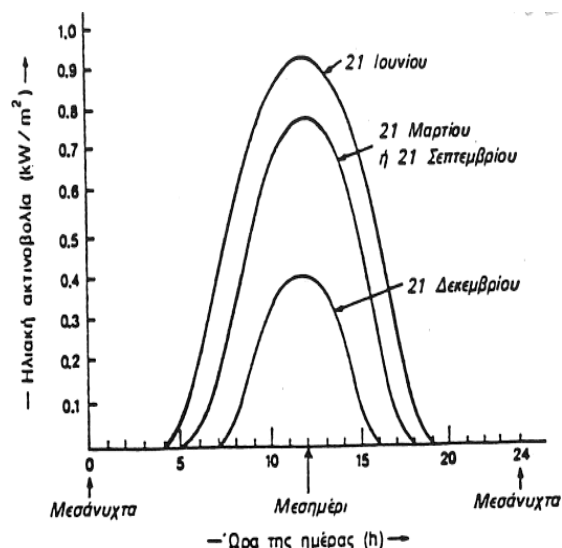
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Βαθμός απόδοσης και κλίση φωτοβολταϊκών

3.1 Διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας [1]

Όπως έχει γίνει αντιληπτό ήδη από τα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής, η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας, όσο και κατά τη διάρκεια του έτους δεν είναι σταθερή (βλ. ακόλουθο σχήμα).



Εικόνα 32 Η εξίσωση της ώρας (E) σε λεπτά, συνάρτηση του χρόνου στο έτος [9, p. 221]



Εικόνα 33 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας σε 4 χαρακτηριστικές ημέρες [1, p. 225]

Στο παραπάνω σχήμα είναι εμφανές ότι η μέγιστη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείται κατά το “ηλιακό μεσημέρι“, δηλαδή τη στιγμή που ο ήλιος περνά από τον μεσημβρινό του παρατηρητή. Ο ηλιακός

χρόνος (T_{SOLAR}) δε συμπίπτει απαραίτητα με την τοπική ώρα (T_{LOCAL}) και η διαφορά τους εξαρτάται από τον μεσημβρινό που περνά ο ήλιος σε σχέση με τον μεσημβρινό της τοπικής ώρας αλλά και από την διορθωτική εξίσωση της ώρας (E)²:

$$T_{SOLAR} - T_{LOCAL} = 4 \cdot (L_{st} - L_{ioc}) + E \quad (3.1.1)$$

όπου,

L_{st} : Γεωγραφικό μήκος μεσημβρινού τοπικής ώρας ζώνης (°)

L_{ioc} : Γεωγραφικό μήκος τοποθεσίας (°)

E : Η εξίσωση της ώρας (min) συναρτήσει του χρόνου στο έτος

και

$$E = 229,2 \cdot \left(0,000075 + 0,001868 \cdot \cos \left[(\text{DoY} - 1) \cdot \frac{360}{365} \right] - 0,032077 \cdot \sin \left[(\text{DoY} - 1) \cdot \frac{360}{365} \right] - 0,014615 \cdot \cos \left[2 \cdot (\text{DoY} - 1) \cdot \frac{360}{365} \right] - 0,04089 \cdot \sin \left[2 \cdot (\text{DoY} - 1) \cdot \frac{360}{365} \right] \right) \quad (3.1.2)$$

όπου,

n : Η ημέρα του έτους με $\text{DoY} = 1$ την 1^η Ιανουαρίου

Η γη χωρίζεται σε 24 ζώνες ώρας και ως εκ τούτου μια ζώνη ώρας καλύπτει ακριβώς 15° γεωγραφικού μήκους. Επομένως, το γεωγραφικό μήκος μεσημβρινού της τοπικής ώρας ζώνης (L_{st}) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

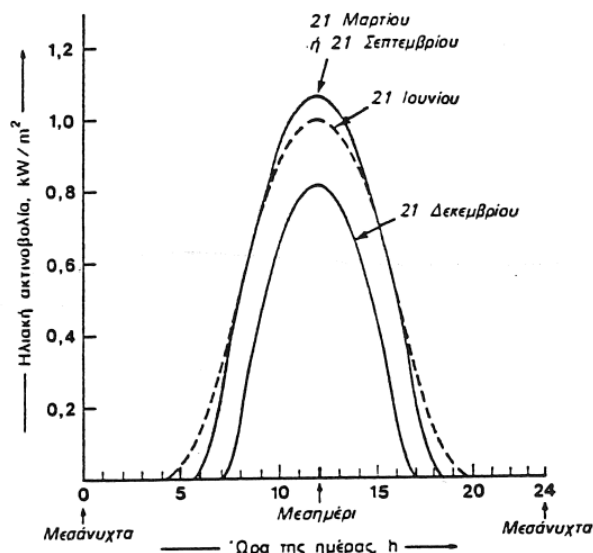
$$L_{st} = 15 \cdot T_{LOCAL} \quad (3.1.3)$$

Συνοψίζοντας,

$$T_{SOLAR} = T_{LOCAL} + \frac{[4 \cdot (15 \cdot T_{LOCAL} - L_{ioc})]}{60} + \frac{E}{60} \quad (3.1.4)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, αντίστοιχη είναι και η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ημέρα που προσπίπτει σε ηλιακό συλλέκτη με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της εγκατάστασης και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

²Ο ήλιος χρειάζεται 4 λεπτά για να καλύψει μία μοίρα γεωγραφικού μήκους.



Εικόνα 34 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας σε 4 χαρακτηριστικές ημέρες σε συλλέκτη με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος [1, p. 225]

3.2 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου

Η απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου αναφέρεται στο ποσοστό του ηλιακού φωτός που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου (η) εκφράζεται ως ποσοστό και ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί (P_m) προς το γινόμενο της επιφάνειας του Φ/Β (A) και της έντασης της ακτινοβολίας (G):

$$\eta = \frac{P_m}{A \cdot G} = \frac{V_m \cdot I_m}{A \cdot G} \quad (3.2.1)$$

όπου,

V_m : Η τιμή μέγιστης ισχύος (V)

I_m : Η τιμή μέγιστης έντασης (A)

A : Επιφάνεια Φ/Β πλαισίου (m^2)

G : Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2)

Όπως προκύπτει από την παραπάνω σχέση, η απόδοση αυξάνεται με την αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος και μειώνεται με την αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Το παραπάνω είναι εμφανές και από τη χαρακτηριστική καμπύλη έντασης-τάσης I-V (I-V curve).

Η καμπύλη I-V αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ του ρεύματος που παράγεται από το Φ/Β στοιχείο και της τάσης στην οποία παράγεται αυτό το ρεύμα. Αυτή η καμπύλη προκύπτει με τη μέτρηση του ρεύματος και της τάσης εξόδου του Φ/Β στοιχείου σε διαφορετικά επίπεδα ηλιακής έντασης και θερμοκρασίας. Το εμβαδόν του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου που σχηματίζεται από τις πλευρές I_m και V_m δίνει το σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ) στο οποίο το Φ/Β στοιχείο παράγει τη μέγιστη ισχύ εξόδου και αναφέρεται ως ονομαστική ισχύς της ηλιακής συστοιχίας. Το εμβαδόν του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου που βρίσκεται εξωτερικά της καμπύλης I-V και σχηματίζεται από τα σημεία I_{sc} και V_{oc} , μας δίνει τη μέγιστη ισχύ εξόδου του Φ/Β στοιχείου υπό ιδανικές συνθήκες σταθερού ρεύματος.

Το ηλικό των δύο προαναφερθέντων εμβαδών εκφράζει τον συντελεστή πλήρωσης (FF), δηλαδή το κατά πόσο ένα Φ/Β στοιχείο πλησιάζει προς την ιδανική συμπεριφορά και λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Όσο πιο κοντά κυμαίνεται στη μονάδα, τόσο πιο έντονα προσεγγίζει την ιδανική συμπεριφορά σταθερής πηγής ρεύματος:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (3.2.2)$$

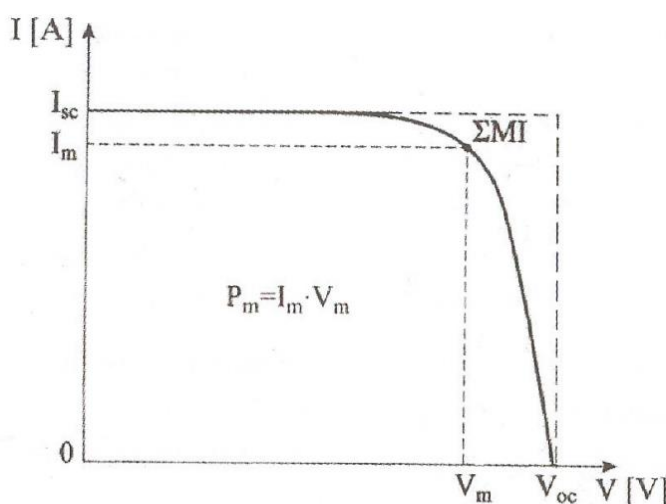
Ο βαθμός απόδοσης βάσει της παραπάνω σχέσης, διαμορφώνεται ως ακολούθως:

$$\eta = \frac{P_m}{A \cdot G} = \frac{V_m \cdot I_m}{A \cdot G} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{A \cdot G} \quad (3.2.3)$$

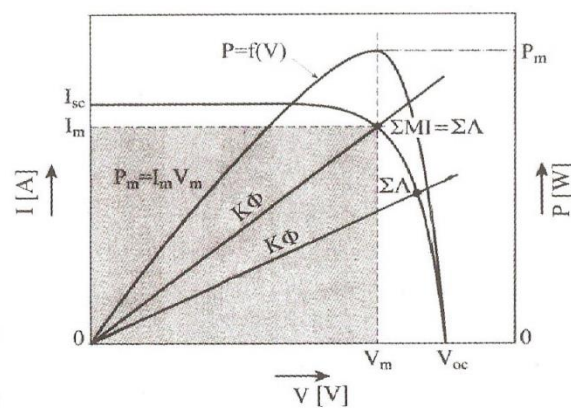
Η απόδοση αυτή είναι πάντοτε μικρότερη από τη μέγιστη θεωρητική που το 1961 υπολόγισαν οι Αμερικανοί εφευρέτες William Shockley και Hans Queisser και ονομάστηκε όριο Shockley-Queisser [17]. Το όριο Shockley-Queisser αντιπροσωπεύει τη μέγιστη θεωρητική απόδοση ενός μεμονωμένου Φ/Β στοιχείου επαφής p-n υπό άμεσο ηλιακό φως και μηδενική πόλωση και ανέρχεται σε 33,7%. Με άλλα λόγια, από τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει σε ένα Φ/Β (περίπου 1.000 W/m²) μόνο 337 W/m² μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό.

Πέραν της καμπύλης I-V θα χρειαστεί και η καμπύλη ισχύος τάσης P-V (P-V curve), η οποία αναπαριστά τη σχέση μεταξύ της ισχύος εξόδου του ηλιακού συλλέκτη και της τάσης στην οποία

παράγεται αυτή η ισχύς. Η καμπύλη P-V προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των τιμών ρεύματος και τάσης σε κάθε σημείο της καμπύλης I-V. Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα, με τη χρήση της καμπύλης P-V του Φ/Β στοιχείου προσδιορίζεται το σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ) του Φ/Β στοιχείου, δηλαδή το σημείο στο οποίο το Φ/Β στοιχείο παράγει τη μέγιστη ισχύ εξόδου. Επίσης, εξίσου σημαντική η καμπύλη φορτίου (ΚΦ) στους άξονες P-V. Το σημείο στο οποίο τέμνονται οι δύο καμπύλες ονομάζεται σημείο λειτουργίας (ΣΛ) του συστήματος και καθορίζει το ρεύμα και την τάση της αντίστασης. Στόχος είναι να ταυτίζονται τα σημεία (ΣΛ) και (ΣΜΙ), ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία του Φ/Β στοιχείου με το φορτίο.



Εικόνα 35 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ΦΒ στοιχείου [18, p. 30]



Εικόνα 36 Χαρακτηριστική καμπύλη I,P-V ΦΒ στοιχείου [18, p. 34]

3.2.1 Πρότυπες συνθήκες ελέγχου των χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Για λόγους συγκρισιμότητας διαφορετικών Φ/Β στοιχείων υπό τις ίδιες συνθήκες, ορίστηκαν οι φερόμενες ως Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου, γνωστές με τα λατινικά αρχικά STC των λέξεων Standard Test Conditions. Οι συνθήκες STC ορίζονται ως εξής:

- ✓ Ηλιακή ακτινοβολία 1000 W/m^2 ,
- ✓ Θερμοκρασία κυψέλης 25°C &
- ✓ Μάζα αέρα AM 1,5.

Πάρα ταύτα, οι περισσότεροι κατασκευαστές επικαλούνται και τα δεδομένα ισχύος στις λεγόμενες συνθήκες NOC (Normal Operation Condition) σύμφωνα με τις οποίες ισχύουν τα ακόλουθα:

- ✓ Ηλιακή ακτινοβολία 800 W/m^2 ,
- ✓ Θερμοκρασία αέρα 20°C ,
- ✓ Ταχύτητα ανέμου = 1 m/s &
- ✓ Μάζα αέρα AM 1,5.

Η σχέση που ορίζει τη θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων ενός πλαισίου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται βάσει του τύπου Evans ως ακολούθως:

$$T_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ}} = T_{\text{ΑΕΡΟΣ}} + [(T_{\text{NOC}} - 20)/80] \cdot H_0 \quad (3.2.1.1)$$

όπου,

$T_{\text{ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ}}$:	Η θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί στα Φ/Β στοιχεία του πλαισίου ($^\circ\text{C}$)
T_{NOC} :	Η ονομαστική θερμοκρασία του Φ/Β πλαισίου ($^\circ\text{C}$)
$T_{\text{ΑΕΡΟΣ}}$:	Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ($^\circ\text{C}$)
H_0 :	Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου (mW/cm^2)

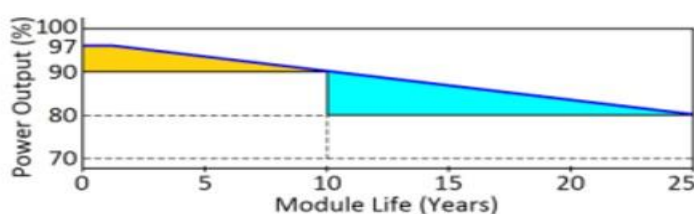
Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πραγματική απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου στο πεδίο μπορεί να διαφέρει σημαντικά, καθώς εξαρτάται και από άλλους παράγοντες οι οποίοι αναλύονται παρακάτω. Ως ακολούθως, ενώ οι συνθήκες STC ή/και NOC παρέχουν έναν τυποποιημένο τρόπο σύγκρισης της απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών, δεν είναι απαραίτητα μια ακριβής αναπαράσταση του τρόπου με τον οποίο το Φ/Β στοιχείο θα αποδώσει στον πραγματικό κόσμο.

3.2.2 Παράγοντες βαθμού απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης ενός Φ/Β στοιχείου διακρίνονται σε εσωτερικούς και εξωτερικούς [9] [17]:

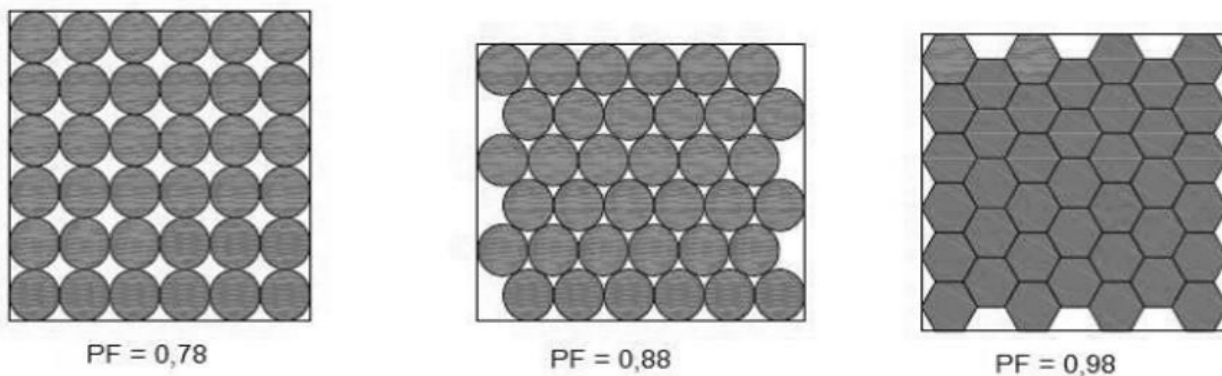
Εσωτερικοί παράγοντες:

- Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά Φ/Β στοιχείου: Η διαδικασία κατασκευής ενός Φ/Β στοιχείου μπορεί να επηρεάσει την απόδοσή του. Οι παράγοντες κατασκευής που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου περιλαμβάνουν την ποιότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών, την ακρίβεια του εξοπλισμού κατασκευής και την τεχνογνωσία του προσωπικού κατασκευής. Για παράδειγμα, εάν η διαδικασία κατασκευής δεν είναι ακριβής ή τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι χαμηλής ποιότητας, η απόδοση του Φ/Β στοιχείου μπορεί να μειωθεί.
- Οπτικές απώλειες: Οι οπτικές απώλειες αναφέρονται σε όλες εκείνες τις αποκλίσεις ανακλαστικότητας σε σχέση με τις Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς (STC) και οφείλονται κυρίως στις χαμηλές τιμές πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, σε διαφοροποίηση της πόλωσης, σε διαφοροποίηση του φάσματος της ακτινοβολίας και στην καθαρότητα όψεως του Φ/Β πλαισίου.
- Γήρανση του Φ/Β πλαισίου: Με την πάροδο του χρόνου, η απόδοση των Φ/Β στοιχείων μπορεί να υποβαθμιστεί λόγω παραγόντων όπως η υποβάθμιση λόγω φωτός, η οξειδωτική υποβάθμιση και άλλες μορφές υποβάθμισης. Οι κατασκευαστές των Φ/Β συνήθως εγγυώνται διάρκεια ζωής 25 ετών για τις μονάδες. Όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, η καμπύλη εγγύησης υπόσχεται ότι οι μονάδες θα παράγουν τουλάχιστον το 90% της ονομαστικής ισχύος κατά τα πρώτα 10 έτη και περίπου 80% στα επόμενα 10-15 έτη.



Εικόνα 37 Διάρκεια ζωής ενός τυπικού πάνελ [19]

- Χωροταξική τοποθέτηση των Φ/Β στοιχείων: Η χωροταξική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο πλαίσιο παίζει σημαντικό ρόλο καθότι όσο πιο πυκνά είναι τοποθετημένα, τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής κάλυψης ([PF-Packing Factor](#)), ήτοι ο λόγος της επιφάνειας του ημιαγωγού προς τη συνολική επιφάνεια του πλαισίου.

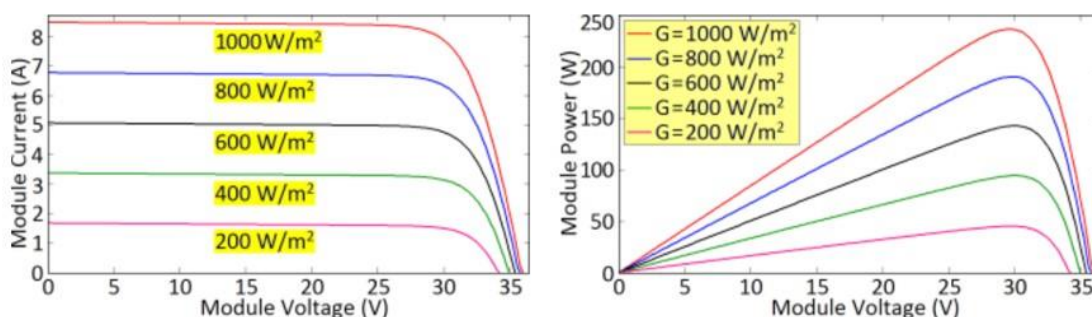


Εικόνα 38 Παραδείγματα διαφορετικής διάταξης ΦΒ κυψελών [20, ρ. 24]

- Δίοδος αντεπιστροφής: Αναφέρεται στις απώλειες που προέρχονται από τη δίοδο αντεπιστροφής, η οποία τοποθετείται προκειμένου να αποτραπεί η εκφόρτιση του συσσωρευτή διαμέσου της Φ/Β συστοιχίας κατά τη φάση που δεν φωτίζεται. Επιπλέον προστατεύει το ίδιο το Φ/Β στοιχείο από ανάστροφη πόλωση κατά τη φάση μη φωτισμού.

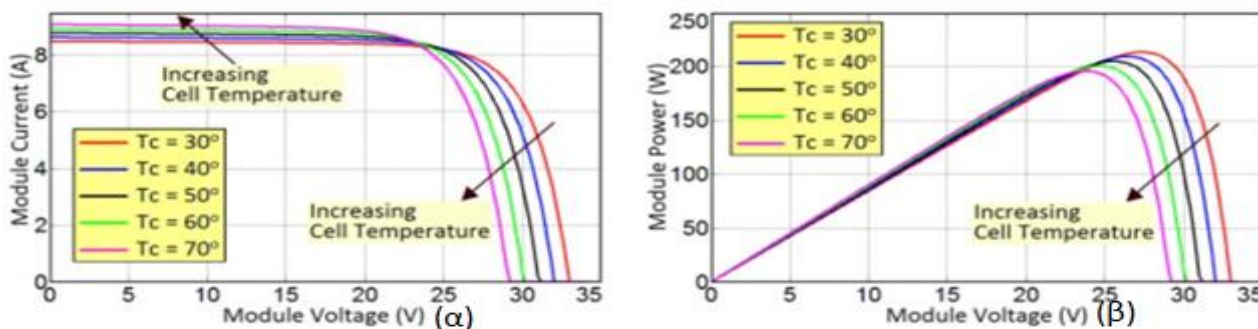
Εξωτερικοί παράγοντες:

- Ακτινοβολία: Η ενέργεια που παράγεται από ένα Φ/Β πλαίσιο εξαρτάται άμεσα από την ποσότητα της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας και ως ακολούθως από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος και από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Αυξημένη ηλιακή ακτινοβολία οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος που οφείλεται στην αυξανόμενη παραγωγή ηλεκτρονίων και κατ' επέκταση στη μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ. Άρα, οι μεταβολές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει σε έναν ηλιακό συλλέκτη επηρεάζει τη μέγιστη ισχύ εξόδου του υπό ιδανικές συνθήκες σταθερού ρεύματος (I_{sc} & V_{oc}) και κατ' επέκταση την απόδοσή του μέσω του συντελεστή πλήρωσης (FF). Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται το ρεύμα, η τάση και η ισχύς μιας μονάδας με μεταβαλλόμενη ακτινοβολία:



Εικόνα 39 Επιπτώσεις των διακυμάνσεων της ακτινοβολίας στο ρεύμα και την ισχύ εξόδου μιας φωτοβολταϊκής μονάδας [19]

- Σκίαση: Η σκίαση ενός τμήματος ενός Φ/Β πλαισίου μειώνει την ποσότητα του φωτός που φτάνει στο στοιχείο και συνεπώς μειώνει την ισχύ εξόδου του.
- Θερμοκρασία: Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία ενός Φ/Β στοιχείου, μειώνεται η ηλεκτρική του απόδοση. Αυτό οφείλεται στη θερμοκρασιακή εξάρτηση της ενέργειας του χάσματος ζώνης και του ρυθμού επανασύνδεσης των φορέων φορτίου. Κατά τη διάρκεια ενός καλοκαιρινού μεσημεριού όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ υψηλή, η θερμοκρασία ενός Φ/Β μπορεί να αγγίξει τους 60-65 °C. Με δεδομένο ότι τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν ιδανικά συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη μείωση της τάσης σε σύγκριση με την αντίστοιχη αύξηση του ρεύματος. Οι επιπτώσεις της θερμοκρασίας στο ρεύμα, την τάση και την ισχύ ενός Φ/Β στοιχείου παρουσιάζονται στην ακόλουθη Εικόνα 41 (α). Η τάση (V_{oc}) μειώνεται κατά περίπου 0,1 έως 0,3 V για κάθε βαθμό Κελσίου αύξηση της θερμοκρασίας. Αντιστοίχως, το ρεύμα (I_{sc}) αυξάνεται κατά περίπου 2,3 έως 4 mA/K. Ως αποτέλεσμα, η μείωση στην ισχύ εξόδου με ρυθμό περίπου 0,4 έως 0,5% ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Οι επιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 41(β).

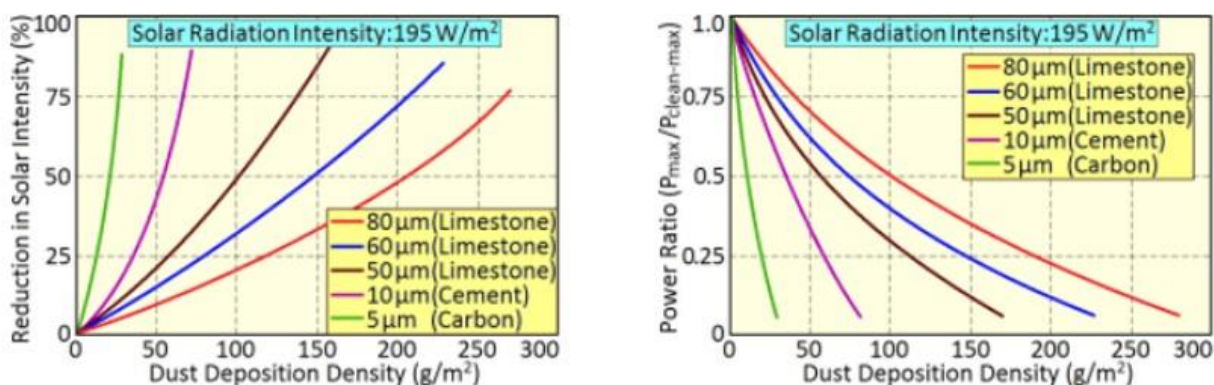


Εικόνα 40 Επίδραση της θερμοκρασίας κυψέλης στα χαρακτηριστικά I-V (α) και P-V (β) μιας Φ/Β μονάδας 240 Wp [19]

$$P_{DC} = \frac{I_{tot}}{800} P_{DC,0}(1 + \gamma(T_{cell} - T_{ref})) \quad (3.2.2.1)$$

- Άνεμος: Η ταχύτητα του ανέμου παίζει καθοριστικό ρόλο στη θερμοκρασία του Φ/Β πλαισίου. Ειδικότερα, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου.
- Ρύπανση: Η σκόνη και η βρωμιά από φύλλα, χιόνι, θαλασσινό αλάτι, έντομα κ.ο.κ. στην επιφάνεια του κυττάρου μπορεί να μειώσει την ισχύ εξόδου του μειώνοντας την ποσότητα του φωτός που απορροφάται. Η καθίζηση της σκόνης εξαρτάται από παράγοντες όπως οι ιδιότητες

της σκόνης (σχήμα, μέγεθος, βάρος), οι καιρικές συνθήκες (βροχή, υγρασία, χιόνι), τοποθεσία (παράκτιες ή σκονισμένες περιοχές), η γωνία κλίσης της μονάδας, το φινίρισμα της επιφάνειας και η ταχύτητα του ανέμου. Οι επιπτώσεις της σκόνης θα είναι υψηλότερες κοντά σε αυτοκινητόδρομους και ερημικές περιοχές, αλλά θα είναι μικρότερες σε περιοχές με συχνές βροχές. Ο αντίκτυπος των διαφορετικών πυκνοτήτων σκόνης στο ακτινοβολία που δέχεται ένα Φ/Β στοιχείο και η μείωση της μέγιστης ισχύος κάτω από τη σκόνη σε σχέση με εκείνη ενός καθαρού παρουσιάζεται στην Εικόνα 42 (α) & Εικόνα 42 (β), αντίστοιχα.



Εικόνα 41 Επίδραση της πυκνότητας σκόνης στην ηλιακή ακτινοβολία (α) & στην έξοδο φωτοβολταϊκών (β) [19]

Η ρύπανση στο φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να οδηγήσει σε ετήσια απώλεια ισχύος 5-17% ή και περισσότερο και το ύψος της οποίας εξαρτάται από τον συντελεστή καθαριότητας (σ_p). Ο συντελεστής αυτός είναι το πηλίκο της ηλεκτρικής ισχύς που παράγεται από ένα ρυπασμένο Φ/Β προς την αντίστοιχη όταν η επιφάνεια είναι καθαρή.

3.3 Υπολογισμός βέλτιστης γωνίας μέσω κώδικα

3.3.1 Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου

Στην παρούσα ενότητα, θα γίνει αναφορά τόσο στη συλλογή, όσο και στον τρόπο επεξεργασίας των δεδομένων. Ειδικότερα, γνωρίζοντας ότι για την εκτίμηση της αποδοτικότερης λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πάνελ είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο, η θερμοκρασία αλλά και η διάρκεια της ηλιοφάνειας για την εκάστοτε εξεταζόμενη γεωγραφική περιοχή. Ταυτόχρονα, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μετεωρολογικοί σταθμοί που είναι εγκατεστημένοι σε διάφορα σημεία της ελληνικής επικράτειας, συλλέγουν και προσφέρουν τα

προαναφερθέντα δεδομένα για πλειάδα χρονικών διαστημάτων τα οποία είναι σε επεξεργάσιμη μορφή και δύναται να εξαχθούν σε μορφή πινάκων. Προκύπτει το συμπέρασμα ότι είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός αυτοματοποιημένου υπολογιστικού μοντέλου, το οποίο δύναται να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τον βέλτιστο σχεδιασμό κατά τόπο φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Στο πλαίσιο υλοποίησης των ανωτέρω, αναπτύχθηκε το τρέχον μοντέλο υπολογισμού εύρεσης βέλτιστης κλίσης ενός φωτοβολταϊκού πάνελ εγκατεστημένο σε σταθερά πλαίσια στην περιοχή της Αθήνας.

Περιγραφή δεδομένων:

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης κλίσης ενός φωτοβολταϊκού πάνελ ελήφθησαν υπόψη τα ακόλουθα:

- Η πηγή δεδομένων είναι η ιστοσελίδα <https://openmeteo.org>. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που αντλήθηκαν από την παραπάνω ιστοσελίδα περιλαμβάνουν τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος σε οριζόντιο επίπεδο ανά δεκάλεπτο και τις αντίστοιχες θερμοκρασίες περιβάλλοντος.
- Τα δεδομένα αφορούν τα έτη 1999-2008 για τα οποία υπήρχε η μέγιστη πληροφόρηση, ήτοι κάλυπταν όλους τους μήνες των αντίστοιχων ετών.
- Τα δεδομένα αφορούν την περιοχή Ζωγράφου του Δήμου Αθηναίων και ειδικότερα την Πολυτεχνειούπολη με γεωγραφικές συντεταγμένες $\varphi = 37,97385^\circ$ και $\lambda = 23,78743^\circ$.
- Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε σταθερά φωτοβολταϊκό πάνελ.
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πάνελ που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη για τον υπολογισμό των μετρήσεων εξόδου για το μοντέλο AS-5M και ονομαστική ισχύ (Nominal power) (P_{MAX}) ίσο με 195W παρουσιάζονται παρακάτω:

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC						
Nominal Power (P_{max})	195W	200W	205W	210W	215W	220W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	45.1V	45.2V	45.4V	45.6V	45.8V	46.0V
Short Circuit Current (I_{sc})	5.63A	5.72A	5.81A	5.90A	6.00A	6.10A
Voltage at Nominal Power (V_{mp})	36.7V	36.9V	37.1V	37.3V	37.5V	37.7V
Current at Nominal Power (I_{mp})	5.32A	5.43A	5.53A	5.64A	5.74A	5.84A
Module Efficiency (%)	15.27	15.67	16.06	16.45	16.84	17.23
Operating Temperature	-40°C to +85°C					
Maximum System Voltage	1000V DC					
Fire Resistance Rating	Type 1(in accordance with UL1703)/Class C(IEC61730)					
Maximum Series Fuse Rating	10A					

STC: Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, AM1.5

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT NOCT						
Nominal Power (P_{max})	144W	147W	151W	155W	159W	163W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	41.5V	41.6V	41.8V	42.0V	42.2V	42.4V
Short Circuit Current (I_{sc})	4.56A	4.63A	4.71A	4.78A	4.86A	4.94A
Voltage at Nominal Power (V_{mp})	33.4V	33.6V	33.8V	34.0V	34.2V	34.4V
Current at Nominal Power (I_{mp})	4.32A	4.38A	4.47A	4.56A	4.65A	4.74A

NOCT: Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s

MECHANICAL CHARACTERISTICS		TEMPERATURE CHARACTERISTICS	
Cell type	Monocrystalline 125x125mm (5x5inches)	Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C±2°C
Number of cells	72 (6x12)	Temperature Coefficients of P_{max}	-0.41%/°C
Module dimensions	1580x808x35mm (62.20x31.81x1.38inches)	Temperature Coefficients of V_{oc}	-0.31%/°C
Weight	15.5kg (34.2lbs)	Temperature Coefficients of I_{sc}	0.05%/°C
Front cover	3.2mm (0.13inches) tempered glass with AR coating		
Frame	Anodized aluminum alloy		
Junction box	IP67, 3 diodes		
Cable	4mm ² (0.006inches ²), 900mm (35.43inches)		
Connector	MC4 or MC4 compatible		

PACKAGING	
Standard packaging	29pcs/pallet
Module quantity per 20' container	348 pcs
Module quantity per 40' container	812 pcs

Εικόνα 42 Datasheet φωτοβολταϊκού AS-5M [21]

Χρήση μοντέλου Erbs et al:

Τόσο στο Κεφάλαιο 2, όσο και στον παρόν Κεφάλαιο, γίνεται αναφορά των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν υπολογιστικό μοντέλο για την εκτίμηση της έντασης της άμεσης, διάχυτης, ανακλώμενης και ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο και σε κεκλιμένο επίπεδο όπου για τον υπολογισμό της ανακλώμενης ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Erbs et al. Επιπλέον, υπολογίστηκε η θερμοκρασία των κελιών. Σημειώνεται δε ότι οι υπολογισμοί γίνονται για κάθε δεκάλεπτο της ημέρας σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο έως 89° και στη συνέχεια προκύπτουν οι μηνιαίοι υπολογισμοί. Τέλος, οι υπολογισμοί γίνονται για νότιο προσανατολισμό.

Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν εκ νέου χρησιμοποιώντας δύο επιπλέον παραμέτρους. Συγκεκριμένα, η πρώτη ανάλυση πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την αφαίρεση της επίδρασης της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην απόδοση του φωτοβολταϊκού. Επιπλέον, η δεύτερη πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις θεωρητικές τιμές ηλιοφάνειας αντί των μετρούμενων τιμών που ελήφθησαν από το openmeteo.org.

Χρήση μοντέλου Καρατάσου

Τέλος για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των πειραματικών αποτελεσμάτων για τα οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Erbs et al, τα δεδομένα αναλύθηκαν και με τη μέθοδο συσχέτιση της S. Karatasou et al (2003). Η μελέτη της S. Karatasou et al (2003) αποσκοπούσε στη μείωση του τυποποιημένου σφάλματος των συσχετίσεων με τη μέθοδο Liu & Jordan για την τοποθεσία της Αθήνας. Ειδικότερα, αναλύει την ωριαία διάχυτη ακτινοβολία σε μία οριζόντια επιφάνεια χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των ωριαίων πυρανόμετρων της Αθήνας. Καθιερώνει τη σχέση μεταξύ K_d και K_i για τις ωριαίες τιμές. Ο τύπος υπολογισμού του κλάσματος διάχυσης αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2 και συγκεκριμένα στον τύπο (2.3.17).

Περιγραφή υπολογιστικού μοντέλου

Τα δεδομένα που εισάγονται στο σύστημα είναι το γεωγραφικό πλάτος, η ημερομηνία, η ώρα, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η κλίση του φωτοβολταϊκού καθώς και το ποιο μοντέλο Erbs ή Καρατάσου επιλέγει για χρήση. Τα παραπάνω δεδομένα επεξεργάζονται προκειμένου να εξαχθούν αποτελέσματα για:

- τον αύξοντα αριθμό της ημέρας αναλόγως αν είναι ή όχι δίσεκτο ένα έτος,
- γωνία ημέρας ,
- ηλιακή απόκλιση,
- ηλιακή ώρα,
- γωνία ω ,
- τη θέση του ήλιου,
- το ύψος της εκκεντρότητας,
- ηλιακή ισχύς εκτός ατμόσφαιρας,
- συντελεστή αιθριότητας,
- κλάσμα διάχυσης,
- συνιστώσες άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας,
- θερμοκρασία κελιών,
- ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού & παραγόμενη ενέργεια.

Ο παρακάτω κώδικας πραγματοποιήθηκε στην πλατφόρμα Raw Labs χρησιμοποιώντας τη γλώσσα χειρισμού δεδομένων Snapi.

3.3.2 Κώδικας εύρεσης βέλτιστης γωνίας κλίσης πάνελ

1. `// Utility functions`
2. `min(a: double, b: double) = if(a<=b) then a else b`

```
3. max(a: double, b: double) = if(a>=b) then a else b
4. //dayOfYear(d: date):int = Int.From(Interval.ToMillis(Date.Subtract(d,
    Date.Build(Date.Year(d), 1, 1))) / 8.64e+7) + 1
5. dayOfYear(d: date) =
6. let
7.     getDaysOfMonth(year:int, month:int)=
8.     Let
9.         start=Date.Build(year,month,1),
10.        end=Date.FromTimestamp(Date.SubtractInterval(Date.Build(year, month+1, 1),
    Interval.Build(days=1)))
11.    In
12.        Interval.Days(Date.Subtract(end, start))+1
13.    ,
14.
15.    rec m2(d:date, month:int):int =
16.    Let
17.        year=Date.Year(d),
18.        i1=Date.Subtract(d, Date.Build(year, month, 1)),
19.        mondiff=Interval.Months(i1),
20.        daysDiff=Interval.Days(i1),
21.        output =
22.            if(mondiff<0) then 0
23.            else if(mondiff==0) then daysDiff
24.            else getDaysOfMonth(year, month)+m2(d, month+1)
25.    In
26.        Output
27.    ,
28.    output=m2(d,1)+1
29. In
30.    Output
31.
32. isLeapYear(year: int) =
33.     if (year % 4 == 0 and year % 100 != 0 ) or (year % 400 == 0) then true
34.     else false
35.
36. // Normalization functions
37. // we saw that some watt numbers where actually kilowatts, so we simply divided by 1000 -
    also negative watts numbers become zeros
38. normalizeWatt(a: double) = if(a>=1000) then a/1000.0 else max(0,a)
39. normalizeTemperature(a: double) = a
40.
41. // Calculate PDC for a given time slot
42. find_I_panel_pdc(r: record(timestamp: timestamp, watt: int, temperature: double), angle:
    double, method: string) =
43. let
44.     std=1367.00,
45.     year=Timestamp.Year(r.timestamp),
46.     days_of_year=if(isLeapYear(year)) then 366.0 else 365.0,
47.     day_of_year=dayOfYear(Date.FromTimestamp(r.timestamp)),
48.     cur_time=Time.Build(Timestamp.Hour(r.timestamp), Timestamp.Minute(r.timestamp)),
49.     latitude=37.97385,
50.     time_math=Time.Hour(cur_time)+Time.Minute(cur_time)/Double.From(60.00),
51.     beta=(360.00*(day_of_year-1.00))/days_of_year,
52.     delta=23.45*Math.Sin(Math.Radians(360.00*(284.00+day_of_year)/days_of_year)),
53.     e_min=229.2*(0.000075+(0.001868*Math.Cos(Math.Radians(beta)))-
    (0.032077*Math.Sin(Math.Radians(beta)))-(0.014615*Math.Cos(Math.Radians(2.00*beta)))-
    (0.04089*Math.Sin(Math.Radians(2.00*beta)))),
54.     t_solar=time_math+e_min/60.00+4.00*(30.00-23.78743)/60.00,
```



```
55.     omega=15.00*(t_solar-12.00),
56.     sin_beta=(Math.Sin(Math.Radians(delta)))*Math.Sin(Math.Radians(latitude))+(Math.Cos(Math.Radians(delta))*Math.Cos(Math.Radians(latitude))*Math.Cos(Math.Radians(omega))),
57.     b_m=Math.Asin(sin_beta)*180.00/Math.Pi(),
58.     e_o=1.0001+(0.034221*Math.Cos(Math.Radians(beta)))+(0.00128*Math.Sin(Math.Radians(beta)))+(0.000719*Math.Cos(Math.Radians(2.0*beta)))+(0.00077*Math.Sin(Math.Radians(2.0*beta))),
59.     g_extraterrestrial=e_o*std,
60.     g_global_h_oa_na=e_o*std*sin_beta,
61.     g_global_h_oa=max(0,g_global_h_oa_na),
62.     k_t_base=r.watt/g_global_h_oa,
63.     k_t=
64.         if(g_global_h_oa<=0)
65.             then 0
66.         Else
67.             if(k_t_base>1)
68.                 then 1
69.             else k_t_base,
70.     kappa=k_t,
71.     kappa_d=
72.         if(method=="erbs")
73.             then
74.                 if(kappa<=0.22)
75.                     then 1.0-0.09*kappa
76.                 else if(kappa>=0.8)
77.                     then 0.165
78.                 else 0.9511-0.1604*kappa+4.388*Math.Power(kappa,2)-
16.638*Math.Power(kappa,3)+12.336*Math.Power(kappa,4)
79.             else if(method=="karatasou")
80.                 then
81.                     (if(kappa<=0.78)
82.                         then 0.9995-0.05*kappa-2.4156*Math.Power(kappa,2) +1.4926*Math.Power(kappa,3)
83.                         else 0.20)
84.                 else Error.Build("Illegal method. Valid methods are 'erbs' and 'karatasou'")
85.         ,
86.     g_beam_h_10min=(if(sin_beta>0) then (r.watt*(1-kappa_d)) else 0),
87.     g_diff_10min=r.watt-g_beam_h_10min,
88.     g_beam_i_10min=(if(g_beam_h_10min*Math.Sin(Math.Radians(angle+b_m))/Math.Sin(Math.Radians(b_m))>g_extraterrestrial) then 0 else
(g_beam_h_10min*Math.Sin(Math.Radians((angle+b_m)))/Math.Sin(Math.Radians(b_m))))),
89.     g_diff_i_10min=g_diff_10min*(1+Math.Cos(Math.Radians(angle)))/2.00,
90.     g_albedo_i_10min=r.watt*0.2*(1-Math.Cos(Math.Radians(angle)))/2.00,
91.     g_glogal_i_10min=g_beam_i_10min+g_diff_i_10min+g_albedo_i_10min,
92.     t_cell=r.temperature+((45-20)/800.0)*g_glogal_i_10min,
93.     p_dc=(g_glogal_i_10min/800)*144.0*(1-0.0041*(t_cell-45)),
94.     e_10_min=p_dc/6000,
95.     output=e_10_min
96. in
97.     Output
98.     //Debugging: {timestamp:r.timestamp,sin_beta:sin_beta, e_o: e_o, g_global_h_oa:
g_global_h_oa, k_t: k_t, kappa_d:kappa_d, g_diff_10min:g_diff_10min, g_beam_i_10min:
g_beam_i_10min, g_diff_i_10min: g_diff_i_10min, g_albedo_i_10min: g_albedo_i_10min, t_cell:
t_cell, p_dc: p_dc}
99.
100.
101.     // Main method
102.     main(min_date_inclusive: date = Date.Build(1998,12,11), max_date_inclusive: date =
Date.Build(2009,09,01), method: string = "erbs") =
103.     let
```

```
104.     // Iterate through angles [0..89]
105.     min_angle=0,
106.     max_angle=90,
107.
108.     output=
109.     // Valid time period is [1998-12-11 .. 2009-09-01]
110.     if(Date.Build(1998,12,11)>min_date_inclusive or
max_date_inclusive>Date.Build(2009,09,01)) then Error.Build("Illegal period. Permissible
period is [1999/01/01 .. 2009/09/01]")
111.     Else
112.     Let
113.     angles=List.From(Int.Range(min_angle, max_angle)),
114.
115.     // Get temperatures from meteo (uploaded to a public site)
116.     temperature_raw=Csv.InferAndRead("https://rawlabs-public-test-data.s3.eu-
west-1.amazonaws.com/dataset_temperature_athens.csv"),
117.     // Consider only temperature measurements that are within the valid time
period and normalize them
118.     temperature_data=
119.     List.From(Collection.Transform(
120.     Collection.Filter(
121.     temperature_raw,
122.     c -> Date.FromTimestamp(c._1)>=min_date_inclusive and
Date.FromTimestamp(c._1)<=max_date_inclusive
123.     ),
124.     c -> {timestamp: c._1, temperature: normalizeTemperature(c._2)}
125.     )),
126.
127.     // Get solar radiation from meteo (uploaded to a public site)
128.     solar_radiation_raw=Csv.InferAndRead("https://rawlabs-public-test-data.s3.eu-
west-1.amazonaws.com/dataset_solar_radiation_athens_v2.csv"),
129.     // Consider only solar radiation measurements that are within the valid time
period and normalize them
130.     solar_radiation_data=
131.     Collection.Transform(
132.     Collection.Filter(
133.     solar_radiation_raw,
134.     c -> Date.FromTimestamp(c._1)>=min_date_inclusive and
Date.FromTimestamp(c._1)<=max_date_inclusive
135.     ),
136.     c -> {timestamp: c._1, watt: Int.From(normalizeWatt(c._2)*1000)}
137.     ),
138.     solar_radiation_list=List.From(solar_radiation_data),
139.
140.     // Join solar radiation and temperature lists, based on their timestamps
141.     combined_data=
142.     List.Transform(List.EquiJoin(temperature_data, solar_radiation_list, a ->
a.timestamp, b -> b.timestamp),
143.     r -> {timestamp: Record.GetFieldByIndex(r, 1), watt:r.watt,
temperature: r.temperature}
144.     ),
145.
146.     // For each angle [0..89] calculate the total output
147.     output=List.Transform(angles, angle ->
148.     {
149.     angle: Double.From(angle),
150.     H:
```

```
151.         List.Sum(List.Transform(combined_data, r -> find_I_panel_pdc(r,
Double.From(angle), method)))
152.     }
153. )
154.     In
155.     Output
156.     In
157.     // Sort angles by higher output
158. List.OrderBy(output, r -> r.H, "DESC")
159.     output
```

3.3.3 Ανάλυση γραμμών εντολών κώδικα

1. Από τη γραμμή 5 έως τη γραμμή 30 υπολογίζεται στη μεταβλητή dayOfYear ο αριθμός της ημέρας στο έτος με βάση την είσοδο από την ημερομηνία.
2. Στις γραμμές 32-34 υπολογίζεται με βάση την ημερομηνία εάν το έτος είναι δίσεκτο ή όχι. Εάν είναι δίσεκτο, η isLeapYear επιστρέφει true, αλλιώς false.
3. Στη γραμμή 38 από το openmeteo, οι τιμές δεκαλέπτου ηλιακής ακτινοβολίας δίνονται σε kW. Λόγω των παρακάτω υπολογισμών πρέπει να μετατραπούν τα kW σε W. Ωστόσο, λόγω κάποιας λανθασμένης αποθήκευσης των μετρήσεων όπου υπάρχουν από το openmeteo για τιμές πάνω από 1,0 kW το αντίστοιχο αρχείο csv τις εκτύπωνε πολλαπλασιασμένες ήδη με το 1000. Επίσης, υπήρχαν και κάποιες αρνητικές, με αποτέλεσμα να συνταχθεί μια if όπου:
 - i. μηδενίζει τις αρνητικές τιμές,
 - ii. για τιμές ίσες ή πάνω από 1000 παραμένει η μετατροπή τους σε W με το ίδιο νόμωρο και
 - iii. Για όλες οι υπόλοιπες τιμές πολλαπλασιάστηκαν με το 1000 για να μετατραπούν σε W.
4. Στη γραμμή 39 εισάγεται το είδος της μεταβλητής των θερμοκρασιών σε δεκαδική.
5. Στη γραμμή 42 εισάγονται τα δεδομένα (ημερομηνία, ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία) στο υποπρόγραμμα , ώστε από την επόμενη γραμμή να ξεκινήσουν υπολογισμοί διάφορων τύπων με τελικό τον υπολογισμό σε KWh της εξόδου του φωτοβολταϊκού πάνελ για διάρκεια 10 λεπτά.
6. Στη γραμμή 44 η μεταβλητή std παίρνει την τιμή της ηλιακής σταθερά $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$.
7. Στη γραμμή 45 η μεταβλητή year παίρνει την τιμή της χρονιάς από την είσοδο της ημερομηνίας
8. Στη γραμμή 46 καλείται η συνάρτηση isLeapYear και αναλόγως την επιστροφή η μεταβλητή days_of_year παίρνει είτε την τιμή 366, είτε 365.
9. Στη γραμμή 47 καλείται η συνάρτηση dayOfYear και επιστρέφει στη μεταβλητή day_of_year ποια ημέρα του χρόνου είναι. Παράδειγμα, η 28 Φεβρουαρίου ισούται με τον αριθμό 59.
10. Στη γραμμή 48 στη μεταβλητή cur_time εισάγεται η τοπική ώρα.

11. Στη γραμμή 49 στη μεταβλητή latitude εισάγεται η τιμή του γεωγραφικού πλάτους όπου ισούται με $37,97385^\circ$.
12. Στη γραμμή 50 μετατρέπεται η τοπική ώρα από προηγούμενη γραμμή σε μονάδες h (ώρα)
13. Στη γραμμή 51 υπολογίζεται η γωνία ημέρας B όπως στον τύπο (2.2.2.10)
14. Στη γραμμή 52 υπολογίζεται η ηλιακή απόκλιση δ όπως στον τύπο (2.2.2.3)
15. Στη γραμμή 53 υπολογίζεται η εξίσωση της ώρας (min) συναρτήσει του χρόνου στο έτος, όπως στον τύπο (3.1.2)
16. Στη γραμμή 54 υπολογίζεται η ηλιακή ώρα T_{Solar} όπως στον τύπο (3.1.4)
17. Στη γραμμή 55 υπολογίζεται η γωνία ω όπως στον τύπο (2.2.2.2)
18. Στη γραμμή 56 υπολογίζεται ο προσδιορισμός θέσης του ήλιου $\sin\beta$ όπως στον τύπο (2.2.2.4)
19. Στη γραμμή 57 υπολογίζεται το ύψος του ήλιου β όπως στον τύπο (2.2.2.5)
20. Στη γραμμή 58 υπολογίζεται η εκκεντρότητα του ήλιου E_0 όπως στον τύπο (2.2.2.11)
21. Στη γραμμή 59 υπολογίζεται η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) εκτός της ατμόσφαιρας όπως στον τύπο (2.3.2)
22. Στη γραμμή 60 υπολογίζεται η ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επίπεδο παράλληλο στο οριζόντιο του εδάφους όπως στον τύπο (2.3.3)
23. Στη γραμμή 61 μηδενίζεται οποιαδήποτε τιμή της προηγούμενης μεταβλητής όπου είναι αρνητική
24. Από τη γραμμή 62 έως τη γραμμή 70 υπολογίζεται ο συντελεστής αιθριότητας k_t όπως στον τύπο (2.3.15) με την παραδοχή ότι είναι ίδιος στο δεκάλεπτο με τον ωριαίο.
25. Από τη γραμμή 71 έως τη γραμμή 85 υπολογίζεται το κλάσμα διάχυσης k_d ανάλογα με το θεωρητικό μοντέλο (erbs, karatasou) που επέλεξε ο χρήστης με βάση τον τύπο(2.3.16) και (2.3.17)
26. Στη γραμμή 86 υπολογίζεται η συνιστώσα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο από τον συνδυασμό των σχέσεων (2.3.5) και (2.3.6)
27. Στη γραμμή 87 υπολογίζεται η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, επί του εδάφους όπως στον τύπο(2.3.8)
28. Στη γραμμή 88 υπολογίζεται η συνιστώσα της άμεσης ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη όπως στον τύπο(2.3.7)
29. Στη γραμμή 89 υπολογίζεται η συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας στο έδαφος, που προσπίπτει στο επικλινές επίπεδο του ηλιακού συλλέκτη όπως στον τύπο(2.3.9)
30. Στη γραμμή 90 υπολογίζεται η ανακλώμενη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο όπως στον τύπο(2.3.12)

31. Στη γραμμή 91 υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο όπως στον τύπο(2.3.13)
32. Στη γραμμή 92 υπολογίζεται η θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων ενός πλαισίου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία όπως στον τύπο(3.2.1.1)
33. Στη γραμμή 93 υπολογίζεται η ισχύς εξόδου ενός φωτοβολταϊκού που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία επηρεασμένη από τη θερμοκρασία των Φ/Β στοιχείων όπως στον τύπο(3.2.2.1)
34. Στη γραμμή 94 υπολογίζεται η ενέργεια σε KWh με βάση την ισχύ που υπολογίστηκε στη γραμμή 93 με την παραδοχή ότι η τιμή της ισχύς παραμένει σταθερή για όλο το δεκάλεπτο.
35. Στη γραμμή 97 εκτυπώνονται τα αποτελέσματα από τη γραμμή 94
36. Στη γραμμή 102 ξεκινάει το Main πρόγραμμα όπου καλεί το υποπρόγραμμα στη γραμμή 42. Επίσης εισάγονται τα όρια των ημερομηνιών μελέτης από τον χρήστη.
37. Στη γραμμή 105 εισάγεται η μικρότερη τιμή της κλίσης του πάνελ.
38. Στη γραμμή 106 εισάγεται η μεγαλύτερη τιμή της κλίσης του πάνελ.
39. Στη γραμμή 110 ελέγχεται η ορθότητα του διαστήματος της ημερομηνίας που ορίζει ο χρήστης.
40. Στη γραμμή 113 δημιουργείται μια λίστα με ακέραιες τιμές από τη μικρότερη τιμή της κλίσης του πάνελ που ορίστηκε στη γραμμή 105 μέχρι τη μεγαλύτερη τιμή της κλίσης του πάνελ που ορίστηκε στη γραμμή 106 μειωμένη κατά 1.
41. Από τη γραμμή 116 έως τη 125 εισάγεται τα δεδομένα για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος από το openmeteo σε ένα διάνυσμα-γραμμής.
42. Από τη γραμμή 128 έως τη 138 εισάγονται τα δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος σε οριζόντιο επίπεδο από το openmeteo σε ένα διάνυσμα-γραμμής.
43. Από τη γραμμή 141 έως τη 144 ενώνονται σε ένα διάνυσμα-γραμμής τα δύο παραπάνω διανύσματα για τις κοινές τους ημερομηνίες τους.
44. Από τη γραμμή 147 έως τη 155 για κάθε μία μοίρα από τις 0 έως τις 89 καλείται η συνάρτηση find_I_panel_pdc με δεδομένα τη ενοποιημένη λίστα από τις γραμμές 141-144 εκτυπώνοντας το άθροισμα όλων των e_10_min για το διάστημα που ορίστηκε στη γραμμή 110 για κάθε μοίρα ξεχωριστά σε ένα καινούργιο διάνυσμα-γραμμής.
45. Τέλος στη γραμμή 158 ταξινομείται το περιεχόμενο του διανύσματος-γραμμής που φτιάχτηκε στις γραμμές 147-155, έτσι ώστε να δοθεί κατά φθίνουσα σειρά ένα διάνυσμα γραμμής με πρώτη τη μοίρα με τη μεγαλύτερη παροχή ενέργειας προς αυτή με τη μικρότερη για το χρονικό διάστημα που ορίστηκε.

3.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

3.4.1 Μοντέλο Erbs et al

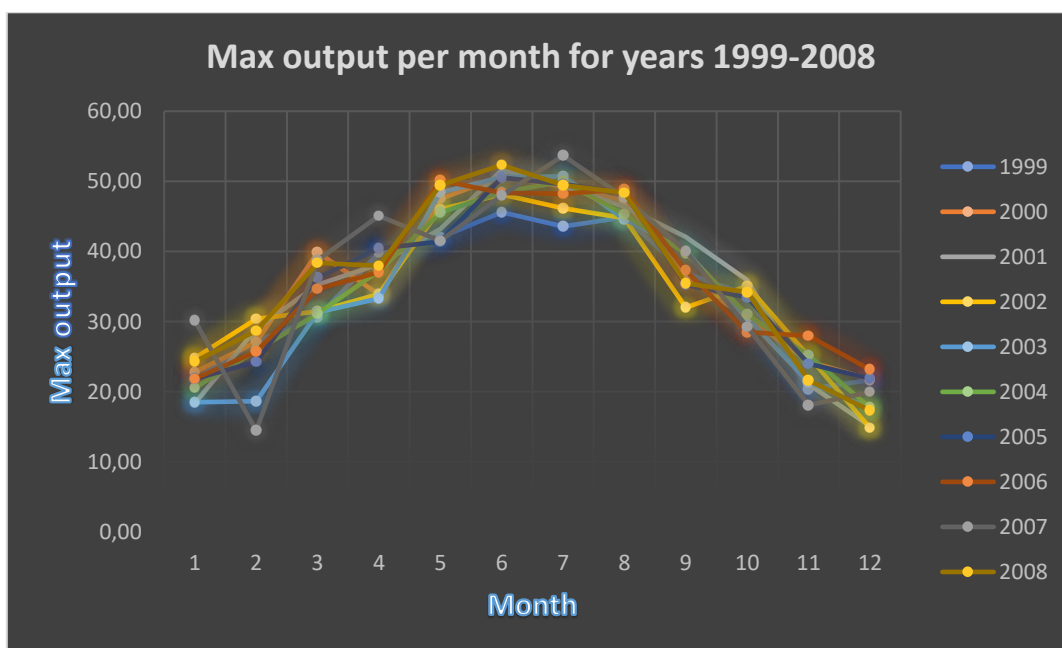
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο της παρούσας διπλωματικής, η περίοδος για την οποία εκτελέστηκε το πρόγραμμα αφορά τα έτη 1999-2008. Οι υπολογισμοί για τη βέλτιστη γωνία έγιναν για το σύνολο των παραπάνω ετών ανά μήνα ανά έτος και ανά εποχή.

Οι μέγιστες τιμές εξόδου του εν λόγω φωτοβολταϊκού ανά μήνα για κάθε ένα από τα ελεγχόμενα έτη παρουσιάζονται αναλυτικά στον ακόλουθο Πίνακα 6:

Πίνακας 6: Μέγιστες τιμές εξόδου φωτοβολταϊκού ανά μήνα για τα έτη 1999 - 2008

Max of output	Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1999		21,723223	27,175351	30,572636	39,792778	42,018160	45,591817	43,557318	44,896804	36,943389	33,796740	20,379264	21,624576
2000		22,795206	27,056518	39,887723	33,891559	47,488623	50,721707	49,264868	47,285977	36,351738	30,544771	24,287319	21,779614
2001		18,354902	28,964014	35,244168	38,165522	43,189434	51,594637	49,337325	46,374709	42,043611	35,905852	21,028935	15,092450
2002		24,795324	30,364488	31,465380	33,936126	46,015891	48,126455	46,187082	44,758715	32,031175	35,079926	25,003233	14,836932
2003		18,496877	18,632063	31,339104	33,305090	48,419282	50,583062	50,704610	44,624274	40,042121	30,499857	21,352276	17,631140
2004		20,529508	25,824970	31,141741	37,219236	45,544991	48,457568	49,959268	45,308881	39,745586	30,984237	25,138605	17,719205
2005		21,851578	24,262969	36,277313	40,421408	41,435340	50,538024	49,574708	48,420078	35,235188	33,426232	23,950670	21,859126
2006		21,848917	25,703792	34,645157	37,035002	50,129085	48,369745	48,207949	48,846708	37,266950	28,484334	27,967431	23,135689
2007		30,141644	14,438445	38,764555	45,091389	41,517931	47,998004	53,655972	47,717065	40,060475	29,238367	18,090271	19,976438
2008		24,269761	28,668985	38,350905	37,939640	49,443608	52,321332	49,444235	48,356356	35,415869	34,220179	21,592485	17,320093

Η διαγραμματική απεικόνιση του παραπάνω Πίνακα 6 είναι η ακόλουθη:



Διάγραμμα 1: Μέγιστες τιμές εξόδου φωτοβολταϊκού ανά μήνα για τα έτη 1999 – 2008 με χρήση του μοντέλου Erbs et al

Από το Πίνακα 6 και το Διάγραμμα 1 προκύπτει σταθερότητα αναφορικά με την καμπυλότητα στην υπό διερεύνηση δεκαετία. Ειδικότερα, οι μήνες με τις μέγιστες τιμές εξόδου είναι οι μήνες Ιούνιος και Ιούλιος, ενώ με τις ελάχιστες είναι οι μήνες Δεκέμβριος και Ιανουάριος.

Συγκεντρωτική παρουσίαση των ανωτέρω προκύπτει από τον ακόλουθο Πίνακα 7 όπου παρουσιάζονται οι βέλτιστες κλίσεις βάσει απόδοσης του φωτοβολταϊκού κατά τη διάρκεια της υπό μελέτη δεκαετίας.

Πίνακας 7: Βέλτιστες κλίσεις φωτοβολταϊκού για τη δεκαετία 1999 - 2008 ανά μήνα με τη χρήση μοντέλου Erbs et al

ΑΘΗΝΑ	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
$\alpha(^{\circ})$	56	48	45	40	38	38	40	42	44	48	53	57
H(kWh)	224.332	250.472	347.011	376.491	454.596	493.623	489.571	466.312	374.773	321.784	228.275	190.589

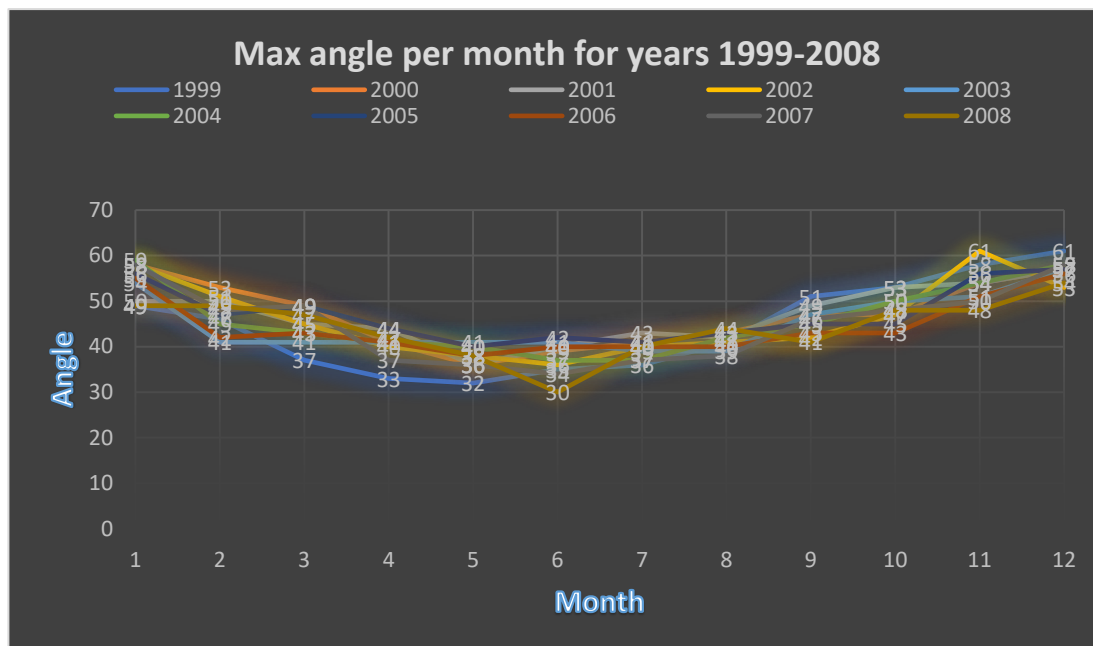
Εκ του εν λόγω πίνακα επιβεβαιώνονται τα αναφερόμενα στη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, για τις βέλτιστες κλίσεις ανά μήνα για όλη τη δεκαετία παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ηλιοφάνεια, τόσο μικρότερη είναι η απαιτούμενη κλίση του φωτοβολταϊκού για την επίτευξη του βέλτιστου/μέγιστου αποτελέσματος ως προς την έξοδο αυτού.

Εντούτοις, ως προς το βαθμό της κλίσης του φωτοβολταϊκού παρουσιάζονται αποκλίσεις μεταξύ της βιβλιογραφίας και των ανωτέρω αποτελεσμάτων, κυρίως κατά τους εαρινούς και θερινούς μήνες. Ειδικότερα, σε σύγκριση με τον κ. Μπιζιώνη, σύμφωνα με τον οποίο, ο βέλτιστος βαθμός κλίσης του φωτοβολταϊκού κατά τους εαρινούς και θερινούς μήνες είναι πλησίον του μηδέν, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας απέχουν κατά πολύ από το μηδέν. Ως προς τον κ. Δέρβο, παρότι παρατηρούνται μικρότερες διαφοροποιήσεις, ωστόσο δεν συσχετίζεται το γεωγραφικό πλάτος με τη γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού ανά εποχή.

Παρακάτω παρατίθενται οι βέλτιστες κλίσεις του φωτοβολταϊκού ανά μήνα και ανά έτος.

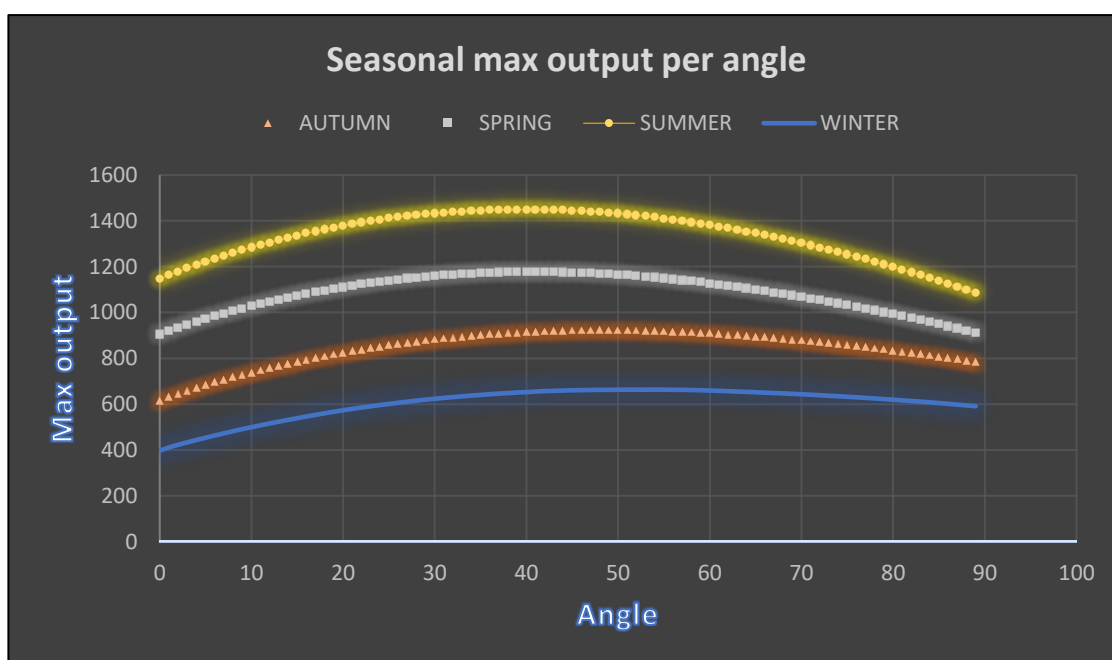
Πίνακας 8: Βέλτιστων κλίσεων α ανά μήνα και ανά έτος με χρήση του μοντέλου Erbs et al

Year	Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1999	49	46	37	33	32	35	36	41	51	53	58	61
2000	58	53	49	41	36	39	41	43	47	47	54	57
2001	50	50	45	44	36	40	43	42	49	53	54	57
2002	58	51	45	40	38	36	40	41	42	47	61	53
2003	54	41	41	41	41	41	39	39	47	50	51	57
2004	59	45	43	41	40	37	37	42	45	50	54	58
2005	56	47	49	44	40	42	41	43	45	45	56	57
2006	55	42	43	41	38	40	40	40	43	43	51	56
2007	58	48	49	37	36	34	37	38	46	48	50	58
2008	49	49	47	42	38	30	40	44	41	48	48	54



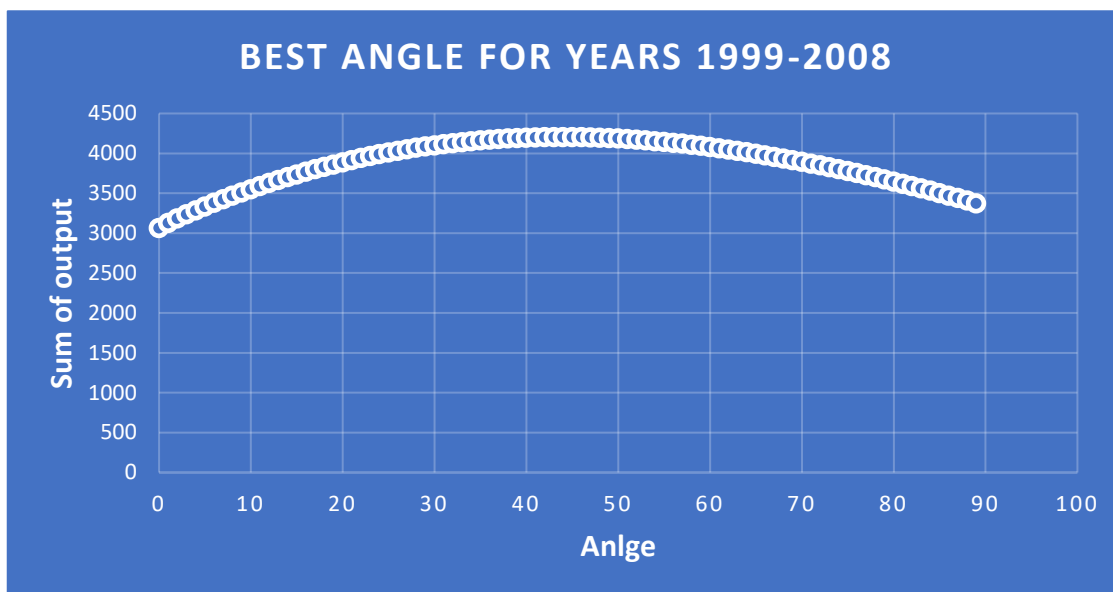
Διάγραμμα 2: Βέλτιστων κλίσεων α ανά μήνα και ανά έτος με χρήση του μοντέλου Erbs et al

Από τα Διαγράμματα 1 και 2 είναι πρόδηλο ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις στις βέλτιστες γωνίες μεταξύ ίδιων μηνών ανά τα έτη. Δεδομένου ότι τόσο ο παράγοντας K_i όσο και ο παράγοντας K_d επηρεάζονται από τη μετρούμενη ηλιοφάνεια, δύναται να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι διαφοροποιήσεις στις βέλτιστες γωνίες ακόμα και έως 10° οφείλονται στις αποκλίσεις στην μετρούμενη ακτινοβολία για τους ίδιους μήνες μεταξύ των ετών.



Διάγραμμα 3: Έξοδος φωτοβολταϊκού ανά εποχή για τη δεκαετία 1999-2008 με τη χρήση του μοντέλου Erbs et al

Βάσει της μηνιαίας ανάλυσης που προηγήθηκε αναλυτικά και συγκεντρωτικά για την εξεταζόμενη δεκαετία, καθώς και του Διαγράμματος 3, παρατηρείται μικρότερη έξοδος στο φωτοβολταϊκό την χειμερινή περίοδο κατά την οποία απαιτείται μεγαλύτερη κλίση του για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος. Όπως αναμενόταν τη θερινή περίοδο, η απαιτούμενη γωνία του πάνελ προκειμένου να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα είναι μικρότερη. Η συγκεκριμένη περίοδος έχει και την καλύτερη έξοδο. Όσον αφορά την ανοιξιάτικη και την φθινοπωρινή περίοδο παρουσιάζουν κοινή καμπύλη με την εαρινή να έχει σταθερά μεγαλύτερη έξοδο ανά γωνία.



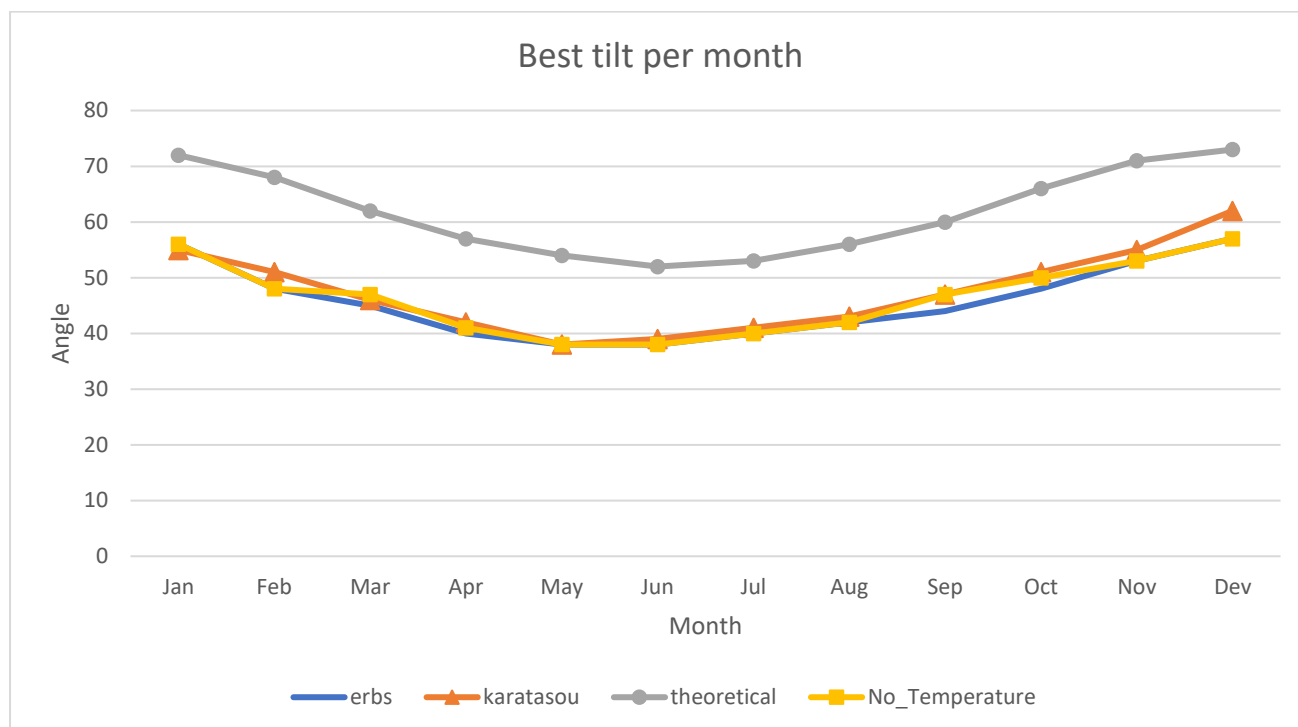
Διάγραμμα 4: Έξοδος φωτοβολταϊκού για τη δεκαετία 1999 – 2008 για όλες τις μοίρες με τη χρήση του μοντέλου Erbs et al

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η έξοδος του φωτοβολταϊκού συστήματος κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 1999-2008 για όλες τις δυνατές γωνίες τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού. Με βάση τον Πίνακα 12 που παρατίθεται στο παράρτημα Α, διαπιστώνεται ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης για το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι 44° . Επιπλέον, κατά την ετήσια ανάλυση παρατηρείται απόκλιση της βέλτιστης κλίσης από τη θεωρητική τιμή των 28° (ετήσια) σύμφωνα με τον κ. Μπιζιώνη αλλά και με τον κ. Δέρβο όπου η βέλτιστη κλίση ισούται με το γεωγραφικό πλάτος $\varphi = 37,97385^\circ$.

Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί για την κλίση επηρεάζονται και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, καθώς επίσης και από τη θερμοκρασία των κυψελών του φωτοβολταϊκού συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη κλίση ενδέχεται να διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και να απαιτεί προσαρμογές για τη βέλτιστη απόδοση του συστήματος φωτοβολταϊκών πάνελ.

Συγκριτική ανάλυση

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3.3.1 πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων κατά Erbs et al με εκείνα τα αποτελέσματα στα οποία αφαιρέθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας καθώς και με εκείνα όπου ελήφθησαν θεωρητικές τιμές ηλιοφάνειας έναντι των πραγματικών. Τέλος έγινε σύγκριση και με το μοντέλο που προτάθηκε από τη μελέτη S. Karatasou et al.



Διάγραμμα 5: Συγκριτική ανάλυση ανά μήνα για κάθε παραμετροποίηση

Erbs: Ανάλυση με τη χρήση του μοντέλου Erbs et al συνυπολογισμένη η επίδραση της θερμοκρασίας.

Karatasou: Ανάλυση με τη χρήση του μοντέλου Karatasou et al συνυπολογισμένη η επίδραση της θερμοκρασίας.

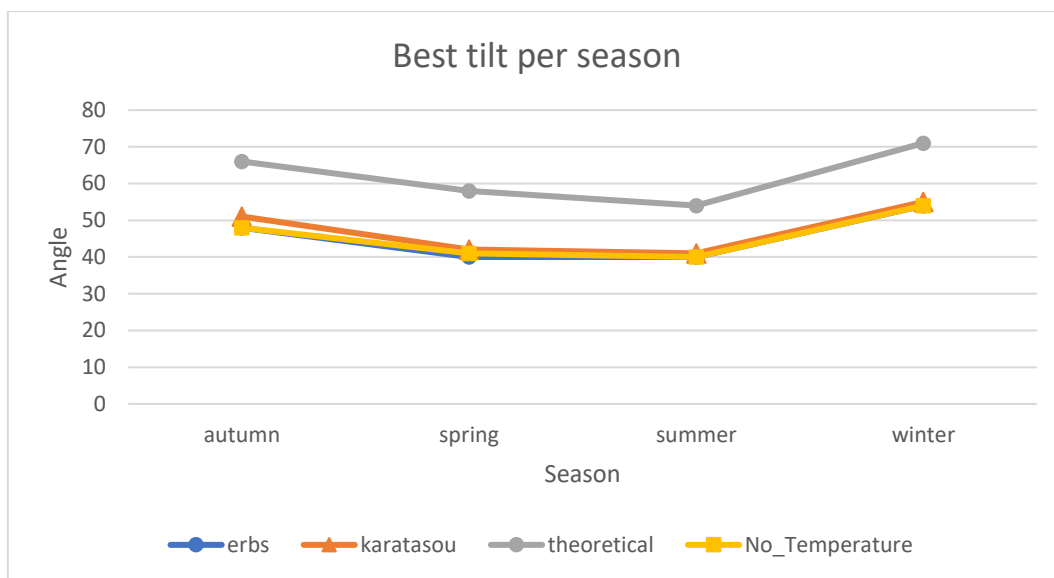
Theoretical: Ανάλυση με τιμές ηλιακής ακτινοβολίας τη $G_{GLOBAL,h,0\alpha}$ (ισχύς της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επίπεδο παράλληλο στο οριζόντιο του εδάφους) έναντι των μετρούμενων, $k_d=0$ και μηδενισμένη τη διάχυτη ακτινοβολία.

No_Temperature: Ανάλυση με τη χρήση του μοντέλου Erbs et al αφαιρώντας την επίδραση της θερμοκρασίας.

Η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στη γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού, όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα, είναι αμελητέα ανά μήνα κατά τη διάρκεια του έτους. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί ο μήνας Σεπτέμβριος και Οκτώβριος όπου η διαφορά της βέλτιστης κλίσης ανέρχεται σε 3° και 2° αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, τα μοντέλα Erbs et al. και S. Karatasou et al.

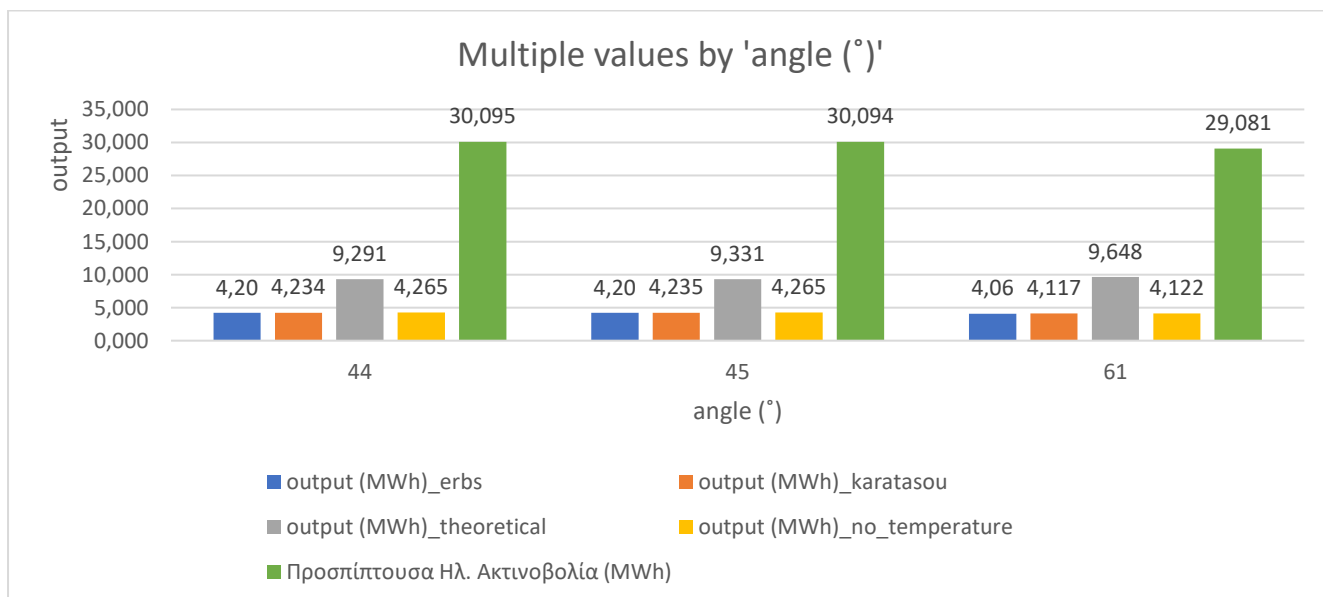
παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις καθιστώντας το πρώτο μοντέλο κατάλληλο για την περιοχή της Αθήνας, κάτι που είχε εντοπιστεί και από την ίδια τη μελέτη της *S. Karatasou et al.*

Τέλος, χρησιμοποιώντας τις θεωρητικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας έναντι των μετρούμενων υπάρχει αρκετή διαφοροποίηση σε όλους τους μήνες.



Διάγραμμα 6: Συγκριτική ανάλυση ανά εποχή για κάθε παραμετροποίηση

Ομοίως με την ανάλυση ανά μήνα, στο Διάγραμμα 6 δεν παρατηρούνται διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα δύο μοντέλα Erbs και Karatasou. Επιπροσθέτως, η επίδραση της θερμοκρασίας στη γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού είναι αμελητέα ανά εποχή καθώς ταυτίζονται οι καμπύλες.



Διάγραμμα 7: Βέλτιστες γωνίες ετήσια συγκριτική ανάλυση για κάθε παραμετροποίηση

Τέλος, συνοψίζοντας στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η ετήσια έξοδος για τις βέλτιστες γωνίες για κάθε μία από τις υπό μελέτη παραμετροποιήσεις της παρούσας διπλωματικής μελέτης. Επίσης, περιέχετε και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο. Ο αντίστοιχος Πίνακας του παραπάνω διαγράμματος παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α στον Πίνακα 15.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Γενικά Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας και του γεωγραφικού πλάτους στην κλίση των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανά μήνα, έτος και εποχή αποκαλύπτει σημαντικά ευρήματα για τη βέλτιστη λειτουργία αυτών των συστημάτων. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος επηρεάζει την απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ, με τις υψηλές θερμοκρασίες να μπορούν να μειώσουν την απόδοση αυτού. Ωστόσο, η γωνία κλίσης δεν φαίνεται να σχετίζεται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επίσης, το γεωγραφικό πλάτος παίζει κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της βέλτιστης κλίσης, με περιοχές που βρίσκονται κοντά στην ισημερινή γραμμή να απαιτούν διαφορετικές κλίσεις από αυτές που απαιτούνται σε υψηλότερα γεωγραφικά πλάτη. Όμως, με βάση τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις παραπάνω αναλύσεις ανά μήνα, έτος και εποχή το γεωγραφικό πλάτος δεν παίζει το μοναδικό ρόλο στην επιλογή της βέλτιστης γωνίας, καθώς η βέλτιστη κλίση στη δεκαετία που αναλύθηκε διαφοροποιείται από την τιμή του γεωγραφικού πλάτους.

Επιπλέον, οι αναλύσεις ανά μήνα και ανά έτος αποκαλύπτουν τις εποχικές μεταβολές στη βέλτιστη κλίση, με τον χειμώνα και το καλοκαίρι να απαιτούν διαφορετικές ρυθμίσεις για τη μέγιστη απόδοση, γεγονός το οποίο αναμενόταν και από τις θεωρητικές τιμές-αναλύσεις. Παρόλα αυτά, οι θεωρητικές ρυθμίσεις ανά μήνα ή ανά εποχή διαφέρουν με αυτές των αποτελεσμάτων της παραπάνω ανάλυσης. Συνολικά, η βέλτιστη κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας, του γεωγραφικού πλάτους και της εποχής του έτους. Αυτή η κατανόηση είναι ουσιώδης για την αποτελεσματική λειτουργία και τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Η συγκριτική ανάλυση έδειξε ότι τα αποτελέσματα της γωνίας κλίσης παραμένουν σχεδόν πανομοιότυπα ανά μήνα, εποχή και έτος, με εκείνα στα οποία έχει αφαιρεθεί η επίδραση της θερμοκρασίας. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση ανάλυσης με το μοντέλο S. Karatasou. Διαφορετικές κλίσεις παρουσιάστηκαν μόνο στην περίπτωση της μελέτης με τη χρήση των θεωρητικών έναντι των πραγματικών τιμών ηλιακής ακτινοβολίας.

4.2 Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα

Μελλοντικοί ερευνητές μπορούν να εμβαθύνουν στην ανάλυση εύρεσης των λόγων στους οποίους αποδίδεται η απόκλιση των αποτελεσμάτων βέλτιστης γωνίας ανάμεσα στα θεωρητικά και εμπειρικά μοντέλα. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την ανάλυση των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη από τα θεωρητικά και εμπειρικά μοντέλα, καθώς και την εξέταση των δυνατών παραμέτρων που επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Επιπλέον, η επίδραση της κλιματικής αλλαγής υποδεικνύει την ανάγκη

να ληφθεί υπόψη στις αποκλίσεις που σχετίζονται με τη βέλτιστη γωνία των φωτοβολταϊκών πάνελ. Οι αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες, όπως η ηλιοφάνεια και η θερμοκρασία, μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, και αυτή η επίδραση πρέπει να εξεταστεί. Τέλος, η ανάλυση του οικονομικού κόστους και οφέλους υπογραμμίζει τη σημασία της αξιολόγησης του, σε σχέση με το πιθανόν όφελος που προκύπτει από τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων με κινητές βάσεις. Αυτό ενέχει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον προς μελέτη που θα μπορούσε να περιλαμβάνει την ανάλυση των επενδυτικών δαπανών, των εξοικονομήσεων σε ενέργεια, των επιπτώσεων στο περιβάλλον και την αναστολή του κόστους σε σχέση με την αύξηση της απόδοσης.

Συνολικά, αυτή η εργασία υποδεικνύει τη σημασία της προσέγγισης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας με έναν πολυδιάστατο τρόπο, περιλαμβάνοντας την ανάλυση τεχνικών, κλιματικών, και οικονομικών παραμέτρων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση και βιωσιμότητα κατά την αξιοποίηση φωτοβολταϊκής ενέργειας.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

Αναφορές

- [1] Μ. Π. Παπαδόπουλος, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Από Ανανεώσιμες Πηγές, Αθήνα: ΕΜΠ, 1997, pp. 219 - 228.
- [2] Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών, «helarco,» Νοέμβριος 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://helarco.gr/wp-content/uploads/Greek_PV_Market_Snapshot_HELAPCO_23Nov2022-1.pdf.
- [3] Υπ' αριθμ. 4/23.12.2019 Απόφαση του Κυβερνητικού Συμβουλίου Οικονομικής Πολιτικής, «Κύρωση του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ),» (ΦΕΚ Β' 4893/2019).
- [4] Ε. Δρ. Τσελεπής, «cres,» 16 Νοέμβριος 2006. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/hmerida_kape_iene/9_IENE_TSELEPIS_PV.pdf.
- [5] Ν. Ταουσανίδης, «openclass.teiwm,» 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://openclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/ME-ID107/%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%201%20%CE%A5%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CE%AF%20%CE%B7%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE%CF%82%20%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD>.
- [6] Κ. Α. Soteris, «web.cut.ac.cy,» 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://web.cut.ac.cy/wp-content/uploads/sites/13/2014/08/1-1-b-Basic-Solar-Geometry.pdf>.
- [7] Π. Κατσαφάδος και Η. Μαυροματίδης, Εισαγωγή στη Φυσική της Ατμόσφαιρας και την Κλιματική Αλλαγή, ΣΕΑΒ, 2015, pp. 140 - 141.
- [8] Χ. Χαλδούπης, Εισαγωγή στην Ατμοσφαιρική Φυσική, Ηράκλειο: ΣΕΑΒ, 2016, pp. 183 -184.
- [9] Κ. Θ. Δέρβος, Φωτοβολταϊκά Συστήματα: Από τη θεωρία στην πράξη, Αθήνα: ΕΜΠ, 2013, pp. 101 - 274.
- [10] Β. Δ. Μπιζιώνης και Δ. Β. Μπιζιώνης, ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΘΕΣΑΛΛΟΝΙΚΗ: ΤΖΙΟΛΑ, 2011.
- [11] Β. Dagmar , «Albedo. The Encyclopedia of Earth,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.eoearth.org/view/article/149954/>.
- [12] Ι. Κοσμαδάκης, «eclass.duth.g,» Οκτώβριος 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eclass.duth.gr/modules/document/index.php?course=TMC384&download=/5d8f6141UVdl/5da226a4sXVO/5da226e7OcN3.pdf>.
- [13] Κ. Θ. Δέρβος, Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα Υλικά και Φωτοβολταϊκές Διατάξεις, Αθήνα: ΕΜΠ, 2011.

- [14] Β. Κατσίκη, Οικονομική Επίδραση της αυξημένης διείσδυσης των ΑΠΕ στα μεγέθη του μικροδικτύου, Αθήνα: ΕΜΠ, 2010.
- [15] D. G. Erbs, S. A. Klein και J. A. Duffie, Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation, τόμ. 28, *Solar Energy*,, 1982, p. 293–302.
- [16] S.Karatasou, M. Santamouris και V.Geros, «Analysis of experimental data on diffuse solar radiation in Athens, Greece, for building applications,» *International Journal of Sustainable Energy*, 2003.
- [17] M. Shockley και H. Queisser, Detailed Balance Limit of Efficiency of P-N Junction Solar Cells, *J. Appl. Phys*, 1961.
- [18] ikee.lib.auth, «ikee.lib.auth,» 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://ikee.lib.auth.gr/record/300358/files/%CE%A0%CF%84%CF%85%CF%87%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE.pdf>.
- [19] V. Dr. K.V. , «Energy Scan,» Φεβρουάριος 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/publication/319165448_An_Overview_of_Factors_Affecting_the_Performance_of_Solar_PV_Systems.
- [20] docplayer, «docplayer,» 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://docplayer.gr/63136831-Ptyhiaki-ergasia-t-e-i-peiraia-sholi-tehnologikon-efarmogon-tmima-ilektrologias-eisigites-epivlepon-oytsas-panagiotis-stefanoy-panagiotis.html>.
- [21] e-kiriazis, «<https://www.e-kiriazis.gr/ell/product/>,» e-kiriazis, Αθήνα, 2023.
- [22] D. Dr. Bice, "e-education.psu.edu," 2022. [Online]. Available: <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/1004>.
- [23] fandom, «science.fandom,» 20 Ιούλιος 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://science.fandom.com/el/wiki/Φωτοβολταϊκό_Στοιχείο.
- [24] Μ. Δαμιανίδης, Γ. Κατσαρός, Μ. Τόλης και Φ. Στεργιόπουλος, «tkm.tee,» Απρίλης 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/fwtovoltaika_ergwn.pdf.
- [25] Δ. Καραμάνης, «eclass.upatras,» 4 Απρίλης 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/ENV304/6.%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CE%B9%CE%BA%CE%AC%20%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%B9%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%B1.pdf>.
- [26] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, «ise.fraunhofer,» 21 Φεβρουάριος 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>.

- [27] Homesolar, «Homesolar,» 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.homesolar.gr/autonoma-fotovoltaika-systimata/>.
- [28] geo.auth, «geo.auth,» 10 Οκτωβρίου 2004. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.geo.auth.gr/322/chapter041.html>.
- [29] openclass.teiwm, «openclass.teiwm,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://openclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/ME-ID107/%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%201%20%CE%A5%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%C>.
- [30] G. Mihalakakou, M. Santamouris και D. Asimakopoulos, The total solar radiation time series simulation in Athens using neural networks, Applied Climatology, 2000.
- [31] E. Μεχλερή, «dspace.lib.ntua,» Νοέμβριος 2007. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/770/mehlerie_irradiance.pdf?sequence=1.
- [32] Δ. Κουτσογιάννης και Θ. Ξανθόπουλος, «Τεχνική Υδρολογία,» 3 επιμ., Αθήνα, ΕΜΠ, 1999.
- [33] digilib.teiemt, «digilib.teiemt,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://digilib.teiemt.gr/jspui/bitstream/123456789/1467/1/012013057.pdf>.
- [34] “. i. a. c. d. o. d. d. a. t. s. r. S. E. v. 4. n. 3. p. 1. 1. B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, B. Y. H. Liu και R. C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, τόμ. 4, Solar Energy, 1960, pp. 1-19.
- [35] JPage, J. K, The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces, from sunshine records for latitudes 40 °N to 40 °S., Rome: Proc. of UN Conf. on New Sources of Energy, 1961.
- [36] Collares-Pereira M και A. Rabl , The average distribution of solar radiation-correlation between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values, Solar Energy 22, 1979, pp. 155 -164.

Παράρτημα Α

Πίνακας 9: Έξοδος φωτοβολταϊκού ανά χρόνο για γωνία κλίσης α από 0° έως 89°

Sum of output Year										
Angle	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
0	300,6743855	310,7093857	309,4722977	298,5043894	297,7563577	303,1939134	307,8845695	311,316005	307,6706741	316,3401602
1	306,585759	316,8750582	315,7365615	304,4510322	303,4790727	309,3553812	314,166736	317,9907874	314,114441	323,1854768
2	311,6353072	322,5197521	321,2625408	309,8655998	308,6002146	314,7412298	319,7012939	323,6625078	319,7278706	328,9709973
3	316,6718116	327,6427937	326,5151735	315,0439321	313,5317668	319,7177875	325,1034278	329,149454	325,2626218	334,5987696
4	321,4119761	332,647216	331,378412	319,7317028	318,2013074	324,6273507	329,9545314	334,4029957	330,2375812	340,1581261
5	326,1024231	337,4819379	336,16112	324,3634147	322,7876321	329,1303036	334,8483623	339,6615031	335,2789191	345,5380652
6	330,3945877	342,1473282	340,7068603	329,0094354	327,1779331	333,5760127	339,5705011	344,5204024	340,2118149	350,4714306
7	334,5324427	346,7645025	345,0869543	333,3182325	331,3905862	337,8768514	344,277842	349,2996922	344,8856218	355,1374008
8	338,6063523	351,1736443	349,4810067	337,6005631	335,4719417	342,267555	348,5598812	353,8136802	349,4621656	359,7823445
9	342,4598328	355,5348939	353,4454115	341,6269616	339,2684923	346,5072856	352,7875343	358,1254971	353,9288824	364,2858312
10	346,2561739	359,6585935	357,4295651	345,7740991	343,0661513	350,2583331	356,8597446	362,4517866	358,1103762	368,6880468
11	349,9776663	363,7213709	361,3671839	349,7213973	346,5590979	354,1224366	360,8436878	366,5140666	362,0116109	372,9414397
12	353,4704163	367,665716	365,019468	353,4442835	349,9543062	357,7344114	364,7809846	370,6074249	366,1505068	376,8342923
13	356,8958389	371,4878743	368,8286064	356,8887151	353,3928821	361,3451511	368,6096752	374,4535073	370,0504649	380,8108505
14	360,2302448	375,1598458	372,2097531	360,2675265	356,9089076	364,8351571	372,2803989	378,2984208	373,6891391	384,6465785
15	363,4686088	378,6849956	375,656798	363,6231259	360,0977365	368,0145795	375,7495454	382,0209141	377,234883	388,2144841
16	366,4836101	382,2748338	379,0716411	366,9369451	363,1314689	371,4307579	379,177327	385,5856885	380,6462435	391,7658259
17	369,2365891	385,3711256	382,2230377	369,9958455	366,1229458	374,3192043	382,2675054	388,7818243	384,1802962	395,4303093
18	371,8434061	388,5329081	385,3786711	372,9393508	368,8980664	377,2735265	385,4644923	392,0522304	387,3326727	398,621204
19	374,3912364	391,583381	388,3386977	375,7983606	371,676397	380,1169917	388,5832763	394,9406524	390,5089451	401,8002697
20	376,5795721	394,5726909	391,2195094	378,5920023	374,2563403	383,0871017	391,4937528	397,4493805	393,5826504	404,9015635
21	379,4598184	397,4418829	394,0722277	381,195927	376,8941011	385,8016134	394,3221636	400,3088598	396,2449484	407,6154891
22	382,0667156	399,9577789	396,5971334	383,9160455	379,374538	388,4867417	397,1543844	403,0478534	398,7601237	410,1933606
23	384,3382525	402,362308	399,0819911	386,1501455	381,6543148	391,0669817	399,6289071	405,4570731	401,3196416	412,4581559
24	386,4938688	404,7626366	401,4895139	388,3463047	384,0630366	393,3115316	401,9190892	407,8307707	403,6116369	415,2103596
25	388,4728608	406,9368968	403,5602269	390,4269296	386,0663558	395,4466892	404,0527534	409,9776278	405,7026791	417,6206994
26	390,5699263	409,1133865	405,6733235	392,6850676	388,0002464	397,5824383	406,307427	412,0828442	407,9597832	419,5379607
27	392,3402503	411,2237926	407,1316003	394,7493377	389,7101412	399,4903575	408,3129997	414,1211775	409,8766342	421,7027697
28	394,094811	413,219645	409,018144	396,2158075	391,532236	401,1145179	410,2352376	416,1163953	411,6642918	423,5111538
29	395,2248912	415,3016265	410,7486705	397,827255	393,2139829	402,6153649	412,2365915	417,8468463	413,1845765	424,9934401
30	396,5250734	417,0216752	412,4362567	399,3924092	394,4881558	404,0138182	413,6493842	419,3148129	414,6292162	426,6875488
31	397,8198555	418,7644596	413,6051682	400,8013297	396,0844389	405,5116528	415,2743284	420,8424355	416,1045462	427,9075897
32	399,246601	420,0182781	414,7642775	402,2176471	396,8874159	406,8042602	416,6865612	422,3206909	417,5783294	429,0827706
33	400,3519347	421,3123817	415,8650371	403,6113682	398,0787829	408,140531	418,1360859	423,8626011	418,709648	430,1389487
34	401,3640193	422,6340081	417,1077327	404,9066875	398,8645253	409,4175122	419,1302525	424,9884526	419,5401831	431,1867933
35	402,3426618	423,9002995	418,445788	406,0283505	399,7816765	410,5118257	420,1188226	425,741361	420,4843749	432,0834935
36	403,1876952	425,0026997	419,4687538	406,8409001	400,7409334	411,5417814	421,286646	426,6772666	421,3850722	433,0724682
37	403,5500938	425,4106529	420,4499682	407,7429171	401,6120355	412,5155675	422,0704217	427,3131107	422,3102679	433,7264172
38	404,0236339	426,206427	421,1647382	408,3124254	402,3785953	413,1289848	422,8629617	428,1366096	422,5852286	434,1804327
39	404,4743904	426,8611586	421,7489157	408,6440963	403,1660386	413,7335329	423,4310622	428,8179231	422,9817464	434,824626
40	404,8740353	427,5543861	422,304448	409,2722436	403,5508154	414,5008814	424,0590726	429,2617371	423,449008	435,0505166
41	404,9399705	428,072329	422,710682	409,6174271	403,9909497	414,8746383	424,576198	429,4583059	423,8520195	435,3283094
42	405,132532	428,5185178	423,0550452	409,7400189	404,0256462	415,1736481	425,1087184	429,7123963	424,1864	435,6017
43	404,9637374	428,7759186	423,5281194	410,1442847	403,8410428	415,6426861	425,3018534	429,6875	424,0969769	435,3857758
44	404,7774707	428,8670576	423,8969	410,2571	404,0065	415,5859	425,5394	429,5740189	424,1834484	435,427365
45	404,8315547	428,9269	423,7560004	410,1674775	404,0038642	415,5854252	425,4059501	429,1914938	423,8301388	435,5325652
46	404,6258291	428,7685209	423,3983402	410,1202347	403,7943904	415,371705	425,2871338	428,8290376	423,93174	435,1838804
47	404,2082366	428,8033857	423,3504058	409,8621634	403,5138331	415,2892297	425,0374813	428,4259129	423,7317436	434,8913663
48	403,7342648	428,526257	423,1575634	409,473622	402,1780364	415,2666342	424,7953824	427,960448	423,7355505	434,3799295
49	403,1287655	428,1748364	422,90658	408,9463775	402,6729396	414,6076465	424,4056338	427,1167377	422,5644146	433,5598531
50	402,4717573	427,5433584	422,4615927	408,6988749	402,2636263	414,0782779	424,1930335	426,2506536	422,1442325	432,897211
51	401,6605677	427,1136346	421,7075941	408,1350885	401,6542288	413,3725301	423,4772035	425,2593183	421,4033526	432,096583
52	400,6514335	426,6581683	421,1258477	407,2421805	400,9059007	412,6947669	422,9910389	424,1574237	420,6264903	431,1361103
53	399,7462137	425,989815	420,4168441	406,4094216	400,1152034	411,8676232	422,2908718	423,1678608	419,6873658	429,8282256
54	398,8684743	425,3718287	419,6105214	405,5140972	399,4191379	411,1073628	421,3759332	422,1147121	418,6738307	428,5584607
55	397,8914903	424,5049665	418,7072439	404,4920187	398,5206103	410,1707574	420,4442143	421,01741	417,5579541	427,5040079
56	396,9377025	423,5860402	417,581738	403,5746774	397,4506846	409,1000105	419,4838588	419,8091479	416,3494699	426,4972442
57	395,8964235	422,5983342	416,6007685	402,5594823	396,0591545	408,0286123	418,3155964	418,3800953	415,3505221	425,1378688
58	394,692717	421,3708639	415,1669535	401,3807985	394,9161027	406,8907833	416,8495453	416,7652985	414,1874411	423,8620473
59	393,2454147	420,0695116	413,6975626	400,2065473	393,8015983	405,8554709	415,6277498	414,8813359	415,6213575	422,4184078
60	391,7079585	418,5932484	412,2654467	398,9542093	392,3702025	404,5712594	414,128861	413,2785004	410,8743083	420,4877162
61	390,2860799	417,0622175	410,9637288	397,5368057	391,0343784	403,0769385	412,644633	411,5674066	409,1169945	418,8073279
62	388,6112542	415,5957331	409,4308176	395,9001498	389,3543121	401,6379334	411,1523704	409,6842672	407,4964332	417,223059
63	386,9735899	413,9914282	407,7207015	394,0993611	387,4267281	399,9191576	409,5659788	407,4562212	405,5845596	415,4586923
64	385,3885721	412,2506704	405,9993386	392,6365024	385,7134787	398,2316711	407,8031896	405,3577598	403,7685226	413,4593498
65	383,7982658	410,3146691	404,336232	390,8578419	384,0637455	396,4512718	406,1804609	403,542124	401,9704053	411,3634116
66	381,7880081	408,4675564	402,2389982	388,9176242	382,1505893	394,6991492	404,2363832	401,3804554	399,9704654	409,1674947
67	379,9064772	406,490765	400,2555037	386,8927934	380,1397316	392,9760917	402,4660912	399,3195505	398,0007188	407,0225376
68	378,0257922	404,504822	398,3645507	385,0793255	378,1937918	391,0070258	400,3815393	397,1462717	395,9013389	404,903201
69	375,8692772	402,4277656	396,2626325	383,0668005	376,1705754	389,0022083	398,3907378	394,9403082	393,6053782	402,6551102
70	373									

Επίδραση εποχιακής μεταβολής μετεωρολογικών παραγόντων και διάρκειας ημέρας στην επιλογή βέλτιστης γωνίας κλίσης σε σταθερά φωτοβολταϊκά πλαίσια

Πίνακας 10: Έξοδος φωτοβολταϊκού ανά μήνα για γωνία κλίσης α από 0° έως 89° για τη δεκαετία 1999-2008

Sum of output Angle	Month 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	128,6674371	160,8646195	246,9979011	294,0138971	363,0473585	398,4803955	390,0565111	358,0174359	272,732574	209,7347196	134,0513449	106,8579438
1	133,3471677	165,4967908	252,3739324	298,7836531	368,4097667	403,5643712	395,4479915	364,1672853	278,1617494	215,4474006	138,6786184	112,0615787
2	137,3237925	169,5487778	257,2228107	303,196908	373,1624737	408,4896364	400,6638165	369,3918068	283,0173186	220,4313194	142,9134053	115,3252483
3	141,3636978	173,393182	261,8038766	307,3806341	377,8717168	413,1846896	405,6515896	374,6037536	287,6132061	225,086394	146,8675717	118,4172174
4	145,2076332	177,0827067	266,3422047	311,5586894	382,1405071	417,7362605	410,2537709	379,7178277	291,9220752	230,570081	150,3621052	120,8569775
5	148,7512482	180,7680447	270,3566724	315,4171518	386,4515316	422,0744109	414,9104378	384,5241601	296,4277043	234,0002846	153,8969408	123,7750938
6	152,0795225	184,2765182	274,5254269	318,9241796	390,4251637	426,392112	419,3945061	389,1873485	300,6234864	238,209428	157,1330564	126,6155582
7	155,2725199	187,6352647	278,2174393	322,2854984	394,398796	430,6270751	423,6734747	393,5865464	304,6599596	242,3698729	160,324514	129,5191657
8	158,6015311	191,0189677	282,0887048	325,5528517	398,2447437	434,5985664	427,8500415	397,9118942	308,4864875	246,291461	163,3688216	132,2077733
9	161,8141791	194,1458043	285,9188757	328,8386505	401,8444527	438,4294268	431,8206807	402,0573928	311,8889050	250,0516256	166,301888	134,8587462
10	164,855375	197,0534929	289,4072297	331,9835094	405,4314631	442,1440193	435,7707687	406,0622851	315,4883119	253,6579524	169,3032675	137,3951352
11	167,7338873	199,8695457	292,9424099	335,094525	408,7477483	445,7716408	439,595115	409,7450235	319,0132819	257,2624661	172,0610693	139,9432451
12	170,3611675	202,8733554	296,221287	337,9840775	412,1980074	449,2377219	443,1154892	413,4287487	322,3136877	260,6923618	174,768672	142,4672339
13	173,053827	205,6027083	299,2330082	340,92835	415,3112044	452,6551805	446,5050456	417,2347658	325,6631987	264,1330741	177,5178122	144,9239991
14	175,6661937	208,2442575	302,5299779	343,6958389	418,4924867	455,8793506	449,7274312	420,7827069	328,9063762	267,243237	180,2004083	147,1577073
15	178,2430317	210,8834546	305,5675833	346,248621	421,1023547	459,0183771	452,9281685	423,9121465	332,086663	270,5200972	182,8481807	149,4074236
16	180,955413	213,2782824	308,5120356	348,7706702	423,8878866	462,0771868	456,1480813	427,1603058	334,983072	273,6629792	185,2645967	151,8038321
17	183,4729814	215,5547265	311,2780216	351,1585997	426,4407777	464,7987327	458,9232981	430,2883342	337,6606878	276,7170648	187,5732233	154,0622353
18	186,0070931	217,9934146	313,8205537	353,2187578	428,9852879	467,4675208	461,7124006	433,1480847	340,4176265	279,4115167	190,0457235	156,1085485
19	188,1523289	220,3627167	316,3804126	355,3158928	431,4545159	470,086589	464,4894226	435,9917001	343,0760279	282,3957209	192,33557	158,1293555
20	190,4213983	222,4972866	318,8808078	357,3576796	433,813848	472,4042715	467,0739624	438,6787742	345,296117	284,8016366	194,3944156	160,0934426
21	192,7090943	224,5972606	321,3703964	359,4151248	435,9832046	474,8183427	469,5743275	441,207853	347,7822559	287,4375531	196,5063144	161,9553039
22	194,687393	226,4589366	323,7290693	361,3368923	438,0773532	477,0039639	471,953433	443,7930751	350,2127152	289,916449	198,6628822	163,7225554
23	196,5932432	228,5274141	325,9798498	363,0507618	439,9843644	479,0311385	474,1059645	445,9009182	352,2849803	292,4128223	200,5975613	165,230753
24	198,4705498	230,364144	327,608457	364,740658	441,7786513	481,0856924	476,1004248	448,247946	354,4424592	294,7071369	202,5808697	166,9169289
25	200,1131346	232,0046783	329,5158097	365,9177541	443,3443053	482,8768883	478,0788432	450,4010007	356,3182996	296,6831902	204,5033	168,506146
26	202,0905502	233,6153734	331,4911212	367,3299118	444,8685974	484,4751367	479,6564667	452,5848756	358,2426364	298,8343495	206,3308889	170,122316
27	203,7230818	235,1919843	333,2582854	368,6039111	446,3948043	485,8417594	481,1342692	454,3710521	359,8087478	300,8951327	207,8742894	171,5617407
28	205,633498	236,7574773	334,8918343	369,6325704	447,6963114	487,1574166	482,3103419	455,9640099	361,6139738	302,6858854	209,4399676	172,9013935
29	207,2476869	238,1718724	336,0017075	370,6421941	449,03862	488,3827885	483,3562688	457,5463637	363,2509262	304,6066156	210,8995162	174,104156
30	208,8142237	239,4533244	337,728389	371,7868187	450,0870629	489,618001	484,4550537	460,762036	364,4615421	306,1428673	212,3373778	175,1649914
31	209,9029306	240,8659964	338,5880753	372,8011322	451,1727234	490,1821629	485,6796196	459,9952787	365,7902288	307,8545253	213,3873571	176,495774
32	211,2547752	241,8516265	339,7660943	373,5348263	452,1868043	492,8254792	486,4331011	461,3601512	366,8363689	309,2131923	214,8478656	177,4434472
33	212,4216186	243,0829856	340,976617	374,2098503	453,0199438	491,7065806	487,3130374	462,2911167	367,9312605	310,7092493	216,0092873	178,5357722
34	213,604802	244,0041936	342,0555702	374,7193575	453,2996442	492,8973874	488,9267503	462,9915229	369,1548784	312,0519529	217,3457952	179,6964118
35	214,3920428	244,735324	343,1626913	375,2870175	453,979441	492,9680128	488,3483546	463,7565043	370,1014444	313,1564772	218,6218478	180,9291515
36	215,685543	245,5555232	344,2230944	375,530552	454,4843268	493,2452049	488,8642076	464,5112337	371,0647219	314,2482184	219,7567895	182,029298
37	216,6327413	246,3507388	344,7659685	375,9916269	454,5809726	493,5117983	489,226048	464,9378977	371,6060877	315,2590613	220,8770961	182,9609831
38	217,4369426	246,9908091	345,4945921	376,1337834	454,59556	493,6234	489,2900931	465,3560605	372,2739897	316,3347993	221,6947303	183,7552238
39	218,2597806	247,7669682	345,9066611	376,2981527	454,2500666	493,5848342	489,5232642	465,6934905	372,8836965	317,3690906	222,6440863	184,5033987
40	219,0208961	248,4387147	346,3830661	376,4909	454,2696124	493,5291012	489,5711	465,9144083	373,4415912	318,2850217	223,4968093	185,035854
41	219,6781382	249,0062442	346,5383591	376,4817398	454,401236	493,2512935	489,3253402	466,2390548	373,8701299	318,788393	224,1715885	186,0388573
42	220,6825911	249,3463719	346,677959	376,3451012	453,6662742	493,0732586	488,9952777	466,3124	374,2489955	319,5256277	224,4627428	186,9135766
43	221,0199428	249,5857398	346,8491817	375,9674743	453,4394103	492,6757475	488,6908724	466,1679937	374,3903262	320,1522639	225,127039	187,3018853
44	221,6646418	249,8734273	346,893921	375,5754554	452,9230314	492,1986061	488,2378085	465,946684	374,7725	320,6610578	225,6959539	187,6739547
45	222,1674831	250,0590279	347,011	375,1401716	452,4486653	491,4981504	487,7387388	465,3295662	374,665359	320,9795216	226,1210999	188,0752452
46	222,4883138	250,1034434	346,967151	374,6123767	451,6914525	490,8281138	487,1980843	464,7042953	374,4635722	321,1397472	226,664942	188,4678059
47	222,7535982	250,2354503	345,9596745	373,8833639	450,830968	489,9349192	486,3350205	464,3220276	374,5763913	321,4838889	227,00023	188,7660949
48	222,955942	250,4719	346,7576306	373,4105267	449,8967253	488,214315	485,426803	463,5466138	374,3092175	321,7836	227,5329006	188,9344423
49	223,3416504	250,3822255	346,3105768	372,4395587	448,782441	487,7361514	484,5942269	462,8059822	373,8428288	322,625657	228,6967214	188,6947757
50	223,6315091	250,2423019	345,9358914	371,6113309	447,501874	486,6467125	483,4197446	461,9212242	373,4361708	321,6609564	227,9922905	189,002612
51	223,7053902	250,0085672	345,4484115	370,466434	446,1898567	485,3384739	482,2473455	460,6446609	372,8692799	321,5020555	228,1163764	189,3430752
52	223,6850465	249,555094	344,8752075	369,5033376	444,8842113	483,6671525	480,255062	459,437438	372,4378995	321,4147656	228,1440135	189,7592729
53	223,7648694	249,15753	344,1101123	368,4967693	443,1780077	482,0907662	479,3976494	458,1525797	371,702426	321,2130924	228,2746	189,969093
54	223,9933491	248,9396999	343,685003	367,1407545	441,557929	480,4197615	477,8962323	456,8004989	370,8423335	320,9744434	228,1515933	190,2127605
55	224,2092322	248,3910079	343,0672013	366,005989	439,985638	478,5981754	476,354397	455,3066556	370,0072175	320,5450989	228,0466038	190,2934568
56	224,3316	247,8524889	342,5281689	364,5622503	438,1270882	476,7685599	474,8096604	453,740078	369,0860103	320,1145257	228,0507331	190,4048491
57	224,1990216	247,6161841	341,525742	363,2258055	436,0617596	474,8695718	472,9818627	452,0690114	368,2633342	319,6462823	227,879496	190,5888
58	224,0534077	247,045926	340,6038897	361,8871603	434,1910783	472,6820184	471,0090831	450,2956284	367,1381828	318,9549707	227,7323416	190,4888642
59	223,8155275	246,5318877	339,5254144	360,4328739	431,9645053	470,5646042	469,0373457	448,5218889</				

Πίνακας 11: Έξοδος φωτοβολταϊκού ανά εποχή για γωνία κλίσης α από 0° έως 89° για τη δεκαετία 1999-2008

Sum of output Angle	Season AUTUMN	SPRING	SUMMER	WINTER
0	616,5186385	904,0591567	1146,554342	396,3900004
1	632,2877684	919,5673522	1163,179648	410,9055372
2	646,3620433	933,5821924	1178,54526	422,1978186
3	659,5671719	947,0562275	1193,440042	433,1740972
4	671,8542617	960,0414012	1207,708219	443,1473173
5	684,3249297	972,2253558	1221,509009	453,2943868
6	695,9659708	983,8747702	1234,973967	462,9715989
7	707,3543465	994,9017336	1247,887096	472,4269503
8	718,1467701	1005,8863	1260,357792	481,8282722
9	728,2424141	1016,601979	1272,3075	490,8187296
10	738,4495918	1026,822202	1283,977073	499,3040032
11	748,3368173	1036,784683	1295,111779	507,5466781
12	757,7747215	1046,403372	1305,78196	515,7017569
13	767,3140851	1055,472563	1316,394992	523,5805263
14	776,3500216	1064,718303	1326,389489	531,0681585
15	785,454869	1072,9182	1335,858692	538,5339099
16	793,9106479	1081,170592	1345,385574	546,0375276
17	801,9509759	1088,877399	1354,010365	553,0899432
18	809,8748667	1096,024599	1362,328006	560,1090562
19	817,3753187	1103,150821	1370,567712	566,6443562
20	824,4921692	1110,051615	1378,157008	573,0121278
21	831,7261235	1116,768726	1385,600523	579,2616588
22	838,7920463	1123,143315	1392,750472	584,8688421
23	845,2953639	1128,832976	1399,038021	590,3514103
24	851,7304659	1134,127766	1405,428912	595,7516226
25	857,5047897	1138,777869	1411,356732	600,6241478
26	863,2808748	1143,68963	1416,713659	605,8282395
27	868,57817	1148,257001	1421,347081	610,4768068
28	873,7395348	1152,220716	1425,431768	615,3302206
29	878,7570579	1155,682522	1429,285421	619,5237153
30	882,9417472	1159,152271	1432,63209	623,432243
31	887,0321111	1162,561931	1435,857061	627,2647011
32	890,8974267	1165,487725	1438,617831	630,5498489
33	894,6497971	1168,206411	1441,310735	634,0403764
34	898,5525355	1170,074572	1443,207652	637,3054074
35	901,8797693	1172,429123	1445,072872	640,0568902
36	905,0697298	1174,242473	1446,62165	643,2703642
37	907,7422451	1175,338568	1447,676176	645,9444632
38	910,3035193	1176,224023	1448,26952	648,1829756
39	912,8968735	1176,45488	1448,801589	650,5301474
40	915,2234222	1177,1436	1449,01465	652,4954648
41	916,8205577	1177,061335	1448,815689	654,7232397
42	918,2418712	1176,689334	1448,380917	656,9425396
43	919,669629	1176,256066	1447,534614	657,9075679
44	921,1294964	1175,392408	1446,381299	659,2120237
45	921,7659805	1174,599796	1444,563846	660,3017562
46	922,2498114	1173,27098	1442,730457	661,059563
47	923,0605102	1171,706135	1440,591967	661,7551435
48	923,62568	1170,064883	1437,794848	662,3622778
49	923,0903958	1167,53738	1435,091361	662,3646487
50	923,0894178	1165,049096	1431,987681	662,876423
51	922,4877118	1162,104702	1428,23048	663,0575821
52	921,9966787	1159,262756	1423,930097	662,9998289
53	921,1901606	1155,784889	1419,649305	662,8914897
54	919,9683702	1152,383687	1415,116493	663,14581
55	918,5989202	1149,058828	1410,259228	662,8936968
56	917,2512691	1145,217507	1405,318334	662,588899
57	915,7891098	1140,813307	1399,920446	662,4039951
58	913,825495	1136,682128	1393,98673	661,588198
59	911,7992707	1131,922794	1388,123839	660,6089333
60	909,4128787	1126,744666	1381,877975	659,1961906
61	907,1048644	1121,888915	1375,243276	657,8594547
62	904,572565	1116,710762	1368,260544	656,5427057
63	901,5104063	1111,086639	1360,785644	654,8137289
64	898,4937074	1105,558604	1353,17515	653,3815929
65	895,8134269	1099,749251	1345,431638	651,8841382
66	892,4912713	1093,401349	1337,166324	649,9577826
67	888,9977749	1087,26573	1328,887402	648,3193511
68	885,6858651	1081,117627	1320,053192	646,6509741
69	882,1284603	1074,388033	1310,99334	644,8813253
70	878,3820821	1067,457322	1302,16448	643,051236
71	874,3604349	1060,673122	1292,538257	640,9528557
72	870,4371795	1053,769549	1282,972788	638,8337913
73	866,2509429	1046,681538	1273,327528	636,527311
74	862,1753683	1039,511329	1263,498445	634,362651
75	857,9135715	1031,698273	1253,306029	632,0526092
76	853,532958	1024,074011	1242,692316	629,8069052
77	849,0720623	1016,459103	1232,003331	627,3419471
78	844,118665	1008,545056	1220,994798	624,6980756
79	839,2799317	1000,598953	1209,780452	621,9567361
80	834,1378452	992,4629634	1198,287057	619,3143325
81	829,0378948	984,0381112	1186,730373	616,3736676
82	823,9382225	975,4004451	1174,899989	613,619964
83	818,7269749	966,6966521	1162,763456	610,7290529
84	813,2585579	957,8179661	1150,392071	607,7829333
85	807,6903283	948,7666285	1138,073429	604,5810775
86	801,93521	939,4698079	1125,418126	601,2418972
87	796,1799139	930,112397	1112,465802	597,9667899
88	790,1738122	921,0412112	1099,218754	594,479443
89	784,0621809	911,5337638	1085,786768	590,979399

Πίνακας 12: Τιμές εξόδου φωτοβολταϊκού για γωνίες από 0 - 89 για τη δεκαετία 1999-2008

angle	Sum of output				
0	3063.522138	30	4098.158351	60	4077.231711
1	3125.940306	31	4112.715804	61	4062.096511
2	3180.687314	32	4125.552832	62	4046.086577
3	3233.237538	33	4138.207319	63	4028.196418
4	3282.751199	34	4149.140166	64	4010.609055
5	3331.353681	35	4159.438654	65	3992.878455
6	3377.786306	36	4169.204217	66	3973.016727
7	3422.570127	37	4176.701452	67	3953.470258
8	3466.219135	38	4182.980037	68	3933.507659
9	3507.970623	39	4188.68349	69	3912.391159
10	3548.55287	40	4193.877144	70	3891.055119
11	3587.779958	41	4197.420821	71	3868.524669
12	3625.66181	42	4200.254662	72	3846.013308
13	3662.762166	43	4201.367877	73	3822.787321
14	3698.525972	44	4202.115226	74	3799.547793
15	3732.765671	45	4201.231379	75	3774.970482
16	3766.504342	46	4199.310812	76	3750.106189
17	3797.928683	47	4197.113756	77	3724.876443
18	3828.336528	48	4193.847688	78	3698.356595
19	3857.738208	49	4188.083785	79	3671.616073
20	3885.712921	50	4183.002618	80	3644.202198
21	3913.357031	51	4175.880476	81	3616.180047
22	3939.554675	52	4168.189361	82	3587.858621
23	3963.517771	53	4159.515845	83	3558.916136
24	3987.038767	54	4150.614359	84	3529.251528
25	4008.263539	55	4140.810673	85	3499.111464
26	4029.512404	56	4130.37601	86	3468.065041
27	4048.659058	57	4118.926858	87	3436.724903
28	4066.72224	58	4106.082551	88	3404.91322
29	4083.248716	59	4092.454836	89	3372.362111

Πίνακας 13: Βέλτιστες γωνίες ανά μήνα για τη δεκαετία 1999 – 2008 για κάθε παραμετροποίηση

month	erbs	karatasou	theoretical	No_Temperature
Jan	56	55	72	56
Feb	48	51	68	48
Mar	45	46	62	47
Apr	40	42	57	41
May	38	38	54	38
Jun	38	39	52	38
Jul	40	41	53	40
Aug	42	43	56	42
Sep	44	47	60	47
Oct	48	51	66	50
Nov	53	55	71	53
Dev	57	62	73	57

Πίνακας 14: Βέλτιστες γωνίες ανά εποχή για τη δεκαετία 1999 – 2008 για κάθε παραμετροποίηση

season	erbs	karatasou	theoretical	No_Temperature
autumn	48	51	66	48
spring	40	42	58	41
summer	40	41	54	40
winter	54	55	71	54

Πίνακας 15: Βέλτιστες γωνίες ετήσια για τη δεκαετία 1999 – 2008 για κάθε παραμετροποίηση

Angle (°)	ERBS (MWh)	KARATASOU (MWh)	THEORETICAL (MWh)	No_temperature (MWh)	Προσπίπτουσα Ηλ. Ακτινοβολία (MWh)
44	4,2021	4,2343	9,2905	4,2655	23,6970
45	4,2012	4,2347	9,3307	4,2654	30,0944
61	4,0621	4,1165	9,6479	4,1218	29,0814