

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ (Τ.Ε.Ι.) ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ
ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΘ' ΟΛΗ ΤΗ
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗ
ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΤΣΑΡΟΥΧΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΠΑΤΡΑ - 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η συγκεκριμένη εργασία αποτέλεσε τον καρπό των κόπων σε ένα αντικείμενο το οποίο αποτελούσε από τις πρώτες μέρες της ένταξης μου στο χώρο της τριτοβάθμιας εκπαίδευσης έναν διακαή πόθο τριβής. Πέρα από τις γνώσεις και τις κατευθύνσεις που μου παρείχε το ίδρυμα μας σε περισσότερο θεωρητικές κατευθύνσεις, το ενδιαφέρον μας προς περισσότερο πρακτικές μεθόδους όχι μόνο δεν εξανεμίστηκε, αλλά αντιθέτως η παρούσα εργασία πιστοποιεί ακριβώς το αντίθετό. Η ενασχόληση άλλωστε με αντικείμενα της σύγχρονης τεχνολογίας αποτελεί βασικό και αναπόσπαστο στοιχείο μιας επιτυχημένης ακαδημαϊκής αλλά και επαγγελματικής πορείας. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τόσο τον επιβλέποντα μου για την καθοδήγηση που μου έδωσε, όσο και τους γονείς μου και τους φίλους μου που στάθηκαν στο πλάι μου κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου ετών.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, μελετήθηκε ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει η σωστή πρόβλεψη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ενός υπολογιστικού μοντέλου. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να παρουσιάσει, να εξηγήσει και να αποδείξει την ορθή λειτουργία του μοντέλου HOTTTEL, στου οποίου τα αποτελέσματα μπορούμε να βασιστούμε, ώστε να γίνει πραγματικότητα η επιλογή της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων, μειώνοντας το κόστος έρευνας κατά πολύ μεγάλο βαθμό.

Το μοντέλο HOTTTEL έχει τη δυνατότητα να προβλέψει, με πολύ μεγάλη ακρίβεια, την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος για όλο το έτος, εισάγοντας στο πρόγραμμα ελάχιστα δεδομένα, όπως το γεωγραφικό πλάτος και την ημέρα του έτους και να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Εν συνεχεία, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί το πρόγραμμα και επαληθεύεται η ορθότητα των αποτελεσμάτων του μέσω μετρήσεων και υπολογισμών, και κατάλληλων γραφικών παραστάσεων.

ABSTRACT

In the context of this dissertation, we studied how to properly predict the intensity of solar radiation through a computational model. The purpose of this study is to present, explain and demonstrate the correct operation of the HOTTEL model, based on which the results can make the selection of the optimal location for the installation of photovoltaic systems a reality, reducing research costs to a great extent .

The HOTTEL model has the ability to accurately predict the incidence of solar radiation at a specific latitude throughout the year by introducing minimum data such as latitude and longitude and providing reliable results.

The following describes how the program works and verifies the accuracy of its results through measurements and calculations, as well as appropriate visualizations.

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	9
<i>Σκοπός και στόχος της εργασίας – Εισαγωγή στο σχετικό αντικείμενο</i>	<i>9</i>
1.1 Εισαγωγή	9
1.2 Σκοπός της εργασίας	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	12
<i>Πρόβλεψη της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</i>	<i>12</i>
2.1 Εισαγωγή	12
2.2 Συμβατικές εργασίες	12
2.3 Σύγχρονες εργασίες	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	19
<i>Ηλιακή ακτινοβολία</i>	<i>19</i>
3.1 Εισαγωγή – Γενικά σχόλια	19
3.2 Βασικές έννοιες και σχέσεις	20
3.3 Υπολογισμός έντασης ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο (μοντέλο Hottel)	25
3.4 Αξιολόγηση μοντέλου Hottel	26
3.5 Βέλτιστη γωνία κλίσης επιπέδου	33
3.6 Εφαρμογή Υπολογισμού Ηλιακής Ακτινοβολίας με χρήση του μοντέλου του Hottel	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	38
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	38
4.1 Εισαγωγή	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	58
Βιβλιογραφία	61

Πίνακας Εικόνων

<i>Εικόνα 1: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας</i>	19
<i>Εικόνα 2: Παράμετροι προσδιορισμού της θέσης του ήλιου</i>	23
<i>Εικόνα 3: Μετάδοση ηλιακής ενέργειας συναρτήσει μήκους κύματος</i>	27
<i>Εικόνα 4: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας</i>	28
<i>Εικόνα 5: Μετάδοση ηλιακής ενέργειας συναρτήσει της αέριας μάζας</i>	30
<i>Εικόνα 6: Σταθερές προσδιορισμού άμεσης ηλιακής μετάδοσης πρότυπης ατμόσφαιρας 1962 συναρτήσει υψομέτρου</i>	32
<i>Εικόνα 7: Ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο</i>	34
<i>Εικόνα 8: Διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο</i>	35
<i>Εικόνα 9: Αποτύπωση των ακτινοβολιών ανά διαφορετική γωνία επιπέδου σε σχέση με ολική ακτινοβολία σε οριζόντιόν επίπεδο</i>	35
<i>Εικόνα 10: Συνολικό διάγραμμα ολικών ακτινοβολιών</i>	36
<i>Εικόνα 11: Οπτικοποίηση πυρανομέτρου</i>	36
<i>Εικόνα 12: Οπτικοποίηση πυρηλιόμετρου</i>	37
<i>Εικόνα 13: Οπτικοποίηση διάταξης Ηλιογράφου</i>	43
<i>Εικόνα 14: Απεικόνιση της ανά μήνα συμπεριφοράς του προβλεπτικού μας μοντέλου σε σχέση με τις θεωρητικές τιμές</i>	48
<i>Εικόνα 15: Διορθωτικός συντελεστής ανά μήνα για 5 περιοχές της Ελλάδας</i>	50
<i>Εικόνα 16: Πλήθος ωρών ανά μήνα για 5 περιοχές της Ελλάδας</i>	50
<i>Εικόνα 17: Ανά μήνα σύγκριση εφαρμοζόμενου μοντέλου με αναμενόμενες τιμές για την Αλεξανδρούπολη</i>	51
<i>Εικόνα 18: Ανά μήνα σύγκριση εφαρμοζόμενου μοντέλου με αναμενόμενες τιμές για την Καλαμάτα</i>	52
<i>Εικόνα 19: Ανά μήνα σύγκριση εφαρμοζόμενου μοντέλου με αναμενόμενες τιμές για την Λάρισα</i>	53
<i>Εικόνα 20: Ανά μήνα σύγκριση εφαρμοζόμενου μοντέλου με αναμενόμενες τιμές για την Μυτιλήνη</i>	54
<i>Εικόνα 21: Ανά μήνα σύγκριση εφαρμοζόμενου μοντέλου με αναμενόμενες τιμές για τα Χανιά</i>	55
<i>Εικόνα 22: Διάγραμμα συχνότητας ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιο επίπεδο για την περιοχή της Πάτρας ανά έτος</i>	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Σκοπός και στόχος της εργασίας – Εισαγωγή στο σχετικό αντικείμενο

1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη και γενικότερα η εξέλιξη του ανθρώπινου είδους, χαρακτηρίζεται από τη δημιουργία, τη μετατροπή και τη χρήση ενέργειας οποιασδήποτε μορφής με σκοπό την κάλυψη των πρωταρχικών του αναγκών, και έπειτα για τη διευκόλυνση διάφορων όψεων της ζωής του. Κλασικό παράδειγμα είναι η ανακάλυψη της φωτιάς από τον homo erectus περίπου 2,5 εκατομμύρια χρόνια πριν, πράγμα το οποίο του έδωσε τη δυνατότητα να αναπτύξει ευκολότερα τον εγκέφαλο του και τη νοημοσύνη του.

Με την ίδια λογική, συμπεραίνει κανείς τη σημαντικότητα της ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα του ήλιου, που γίνεται καλύτερα αντιληπτή ολοένα και πιο έντονη σε μεταγενέστερες εποχές, όπως στην αρχαιοελληνική εποχή όπου ο ήλιος λατρευόταν ως θεότητα. Το βαθύτερο νόημα αυτού του είδους λατρείας είναι η ανάγκη της επιβίωσης και η συνειδητοποίηση ότι η διαίωσιση του ανθρώπινου είδους εξαρτάται άμεσα από την ενέργεια.

Σήμερα, η έννοια ενέργεια είναι άρρηκτα συνδεδεμένη, κυρίως με το πετρέλαιο και γενικότερα τα ορυκτά καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο και ο λιγνίτης, και λιγότερο με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμβατικές ή μη, όπως η ηλιακή ακτινοβολία και ο αέρας ή η πίεση του νερού. Παρόλες τις προσπάθειες που γίνονται για να επιτευχθεί η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μόνο ένα μικρό μέρος της συνολικής παραγωγής ενέργειας έχει αντικατασταθεί μέχρι στιγμής. Η αναγκαιότητα αυτής της αντικατάστασης είναι άμεση, διότι το πετρέλαιο είναι μια πηγή η οποία εξαντλείται χρόνο με το χρόνο και μολύνει το περιβάλλον σε μεγάλο βαθμό.

Αντίθετα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι φιλικές προς το περιβάλλον, είναι ανεξάντλητες και μπορούν να συλλεχθούν από οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη. Βέβαια υπάρχουν ακόμα μερικά τεχνικά προβλήματα, μιας και σε διαφορετική περίπτωση θα είχαν καθιερωθεί σαν την κύρια πηγή ενέργειας, όπως το κόστος των μέσων μετατροπής της ενέργειας και το ποσοστό της ενέργειας το οποίο μπορεί να μετατραπεί από αυτά. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που δεν έχουν αντικαταστήσει ακόμη τα ορυκτά καύσιμα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αποτελεί το κυριότερο εμπόδιο που η σύγχρονη αγορά θα πρέπει αν αντισταθμίσει προκειμένου να γίνει περισσότερο φιλική στο περιβάλλον.

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας συσχετίζεται άμεσα με τον τομέα της ηλιακής ενέργειας. Ο ήλιος μας τροφοδοτεί με τεράστιες ποσότητες ενέργειας καθημερινά. Έχει μετρηθεί ότι η ενέργεια που φτάνει έξω από την ατμόσφαιρα είναι σταθερή και ίση με 1367 W/m^2 . Χονδρικά η μισή από την ποσότητα αυτή φτάνει στην επιφάνεια της γης. Αρκεί να σκεφτεί κανείς ότι 24 km^2 στην περιοχή των Αθηνών, δέχονται τόση ηλιακή ενέργεια στη διάρκεια του έτους όση παράγει η ΔΕΗ για όλη τη χώρα. Δυστυχώς η τεράστια αυτή ποσότητα ενέργειας δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμη. Επιπλέον, η ηλιακή ενέργεια δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας και μεταβάλλεται επίσης κατά τη διάρκεια του έτους. Έτσι η ενεργειακή ζήτηση είναι ετεροχρονισμένη σε σχέση με τη διαθέσιμη ηλιακή

ακτινοβολία. Η ηλιακή ενέργεια είναι η πλέον αξιοποιούμενη από τις Α.Π.Ε στο τομέα κάλυψης των θερμικών αναγκών, ενώ η αντίστοιχη τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς επιδιώκοντας να καταστεί πλήρως ανταγωνιστική των συμβατικών πηγών ενέργειας.

Ο ήλιος στέλνει στη γη ένα σημαντικό ποσό ακτινοβολίας το οποίο αξιοποιούμε ως μία μορφή ενέργειας. Η αξιοποίηση αυτή γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται τόσο στον οικιστικό όσο και στον αγροτικό και βιομηχανικό τομέα. Ομοίως, αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιείται και από φωτοβολταϊκά συστήματα μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η απευθείας μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η αποδοτικότητα όμως αυτών των συστημάτων εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία όμως δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας και μεταβάλλεται επίσης κατά τη διάρκεια του έτους, όπως αυτό τονίστηκε και προηγουμένως. Για την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας θα πρέπει να γνωρίζουμε την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους σε μία περιοχή ώστε να γνωρίζουμε τι ενεργειακή ισχύ θα έχουμε στη διάθεσή μας σε αυτή την περιοχή.

Το θέμα του προσδιορισμού της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας είναι επίκαιρο για τη περίπτωση της χώρας μας, η οποία εμφανίζει υψηλή ηλιοφάνεια σε όλη τη διάρκεια του έτους, καθιστώντας τις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας αποδοτικές και πολλές φορές οικονομικά συμφέρουσες.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Ο μακροχρόνιος υπολογισμός πρόπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε βάθος χρόνου είναι ιδιαίτερα δύσκολος κυρίως λόγω των μετεωρολογικών φαινομένων τα οποία είναι σχεδόν αδύνατον να προβλεφθούν με αρκετή ακρίβεια ώστε να είναι σωστές οι μετρήσεις μας.

Επομένως, για την υλοποίηση του υπολογισμού των ηλιακών συστημάτων είμαστε αναγκασμένοι να εργαζόμαστε με βάση τις ήδη υπάρχουσες μακροχρόνιες μετρήσεις των διαφόρων μετεωρολογικών σταθμών. Συνήθως οι μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας από τους μετεωρολογικούς σταθμούς γίνονται σε οριζόντιο επίπεδο. Με βάση τα στοιχεία αυτά μπορούμε εν συνεχεία να υπολογίσουμε την ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο. Πέρα από τις μετρήσεις των μετεωρολογικών σταθμών μπορούμε να υπολογίσουμε την ηλιακή ακτινοβολία, επομένως και την ενέργεια, με τη βοήθεια των μοντέλων υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης όπως αυτά του HOTTEL και LIU & JORDAN.

Στη παρούσα εργασία γίνεται χρήση των εξισώσεων του μοντέλου του HOTTEL για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο αλλά και κεκλιμένο επίπεδο για κάθε ηλιακή ώρα, οποιαδήποτε ημέρα και σε οποιοδήποτε γεωγραφικό πλάτος. Ο υπολογισμός της πρόπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο είναι απαραίτητη και ιδιαίτερα σημαντική, αφού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό της απόδοση της εγκατάστασης. Δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία υπάρχουν για ορισμένες περιοχές της Ελλάδας. Αυτά αφορούν τη μέση ενέργεια που προσπίπτει κάθε μήνα σε οριζόντιο επίπεδο και τις ώρες ηλιοφάνειας. Τα παραπάνω δεδομένα αν και είναι χρήσιμα δεν είναι αρκετά για τον υπολογισμό των ηλιακών συστημάτων μια και στις περιπτώσεις αυτές ενδιαφέρει η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στη διάρκεια της ημέρας, του μήνα και μάλιστα σε επιφάνειες με διαφορετικές κλίσεις.

Έτσι προκύπτει η ανάγκη να αναπτυχθεί μία μέθοδος υπολογισμού της συχνότητας κατανομής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας για επιφάνεια οποιασδήποτε κλίσης ή προσανατολισμού. Αυτός είναι και ο στόχος της εργασίας αυτής, να αναπτύξει δηλαδή μία μεθοδολογία υπολογισμού της κατανομής συχνότητας της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας σε επιφάνεια τυχαίου προσανατολισμού σε οποιαδήποτε περιοχή της Ελλάδας χρησιμοποιώντας περιορισμένα μετεωρολογικά δεδομένα. Χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα συχνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση ενός ηλιακού συστήματος στην διάρκεια μιας ημέρας, μήνα ή έτους. Προκειμένου να έχουμε σωστά και εύληπτα σχήματα, καμπύλες και γραφικές παραστάσεις, τα εκάστοτε σχήματα θα πραγματοποιηθούν με τη βοήθεια του πακέτου Matlab, αξιοποιώντας και γνώσεις που αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια της φοίτησης στο τρέχον τμήμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πρόβλεψη της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούν διάφορες εργασίες που σαν κύριο σκοπό έχουν την πρόβλεψη της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Φυσικά, τα προβλεπτικά ή ντετερμινιστικά μοντέλα που έχουν υλοποιηθεί κατά καιρούς θα μπορούσαν ή έχουν ήδη αξιοποιηθεί στην εκτίμηση και άλλων σχετικών δεικτών ή ποσοτήτων. Εμείς παρόλα αυτά θα θέσουμε σα στόχο να αναφέρουμε τις σχετικές με το δικό μας σκοπό εργασίες, και θα διαχωρίσουμε τις εργασίες σε πιο συμβατικές και καθιερωμένες, αλλά και σε πιο πρόσφατες που ακολουθούν άλλες νοοτροπίες χρησιμοποιώντας εργαλεία και τεχνικές που πηγάζουν από την επιστήμη των υπολογιστών και τα παράγωγα τους. Ακολουθούν οι αναφορές με σύντομο σχολιασμό.

2.2 Συμβατικές εργασίες

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μετά τη πετρελαϊκή κρίση του '70 αναζωπυρώθηκε το ενδιαφέρον για τις Α.Π.Ε οι οποίες ήταν φιλικότερες προς το περιβάλλον σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες. Όμως η ανάπτυξή τους έπρεπε να συνοδευτεί από εντατικότερες μελέτες και ακριβέστερα υπολογιστικά μοντέλα που πηγάζουν από συνδυασμό πολλών επιστημών που συσχετίζονται με το συγκεκριμένο τομέα.

Όπως είναι φυσικό, αρχικά η έρευνα στον τομέα των Α.Π.Ε. και πιο συγκεκριμένα στην ηλιακή ενέργεια αποτελούσε ένα καινούργιο πεδίο με το οποίο ξεκίνησε να ασχολείται η επιστημονική κοινότητα. Οι πρώτες μελέτες που εκπονούνταν είχαν ως επίκεντρο την κατανόηση των ιδιοτήτων της ακτινοβολίας καθώς και της εποχιακής μεταβλητότητας της που αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για μία επιτυχημένη και ομαλή άντληση ενέργειας. Σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας, έγινε διαχωρισμός της σε αυτή έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα και σε αυτή στην επιφάνεια της γης. Η ακτινοβολία που εισέρχεται εντός της ατμόσφαιρας διαχωρίστηκε σε άμεση, δηλαδή αυτή που προέρχεται απευθείας από τον ήλιο και σε διάχυτη, αυτή που φτάνει στην επιφάνεια της γης και η οποία έχει προηγουμένως υποστεί διασπορά και ανάκλαση εντός της ατμόσφαιρας. Σε ότι αφορά την εποχιακή μεταβλητότητα της καταγράφηκε η μεταβολή που αυτή παρουσιάζει ανά εποχή λόγω αλλαγής της απόστασης ήλιου – γης καθώς και η ετήσια περιοδικότητα που αυτή παρουσιάζει. Χαρακτηριστικές μελέτες αποτελούν οι [1] και [2].

Έπειτα, ακολούθησε η ανάγκη προσδιορισμού της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης ώστε να γίνει γνωστή η ηλιακή ενέργεια που δεχόταν μια συλλεκτική επιφάνεια η οποία αποτελεί το μέσο αξιοποίησής της. Αναφερόμενοι στα τέλη της δεκαετίας του '70, ο τομέας συλλογής και επεξεργασίας μετεωρολογικών δεδομένων σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία δεν είχε αναπτυχθεί πλήρως. Συνεπώς, οι μελέτες που εκπονούνταν προσδιόριζαν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στοχαστικά, παρά

ντετερμινιστικά, μέσω κατανομής πιθανοτήτων που προσομοίωναν την ετήσια περιοδικότητα της ακτινοβολίας. Η μελέτη του κ. Δ. Τσανάκα [3] αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τεκμήρια επί αυτού του ζητήματος και της προσέγγισης.

Οι αρχικές αυτές μελέτες προσδιορισμού της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας όπως είναι φυσικό, παρουσίαζαν κενά και σημαντικές ελλείψεις, μιας και ούτε μπορούσαν να αιτιολογήσουν αρκετά περιστατικά, ούτε να επαληθεύσουν με μεγάλη ακρίβεια τα αποτελεσμάτων τους δεδομένης της έλλειψης μετεωρολογικών στοιχείων. Αυτό φυσικά για τόσο μεγάλου εύρους εργασίες αποτελούσε αγκάθι και φυσικά δε μπορούσε να επιτρέψει να δομηθεί ένα εκτενές σύστημα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας σε μόνιμη βάση.

Με την πάροδο όμως του χρόνου και φτάνοντας στις αρχές της δεκαετίας του '80, ο τομέας επεξεργασίας μετεωρολογικών στοιχείων που σχετίζεται με την ηλιακή ακτινοβολία όντας πλέον αναβαθμισμένος τόσο μέσω της δημιουργίας σταθμών μέτρησης, όσο και της επεξεργασίας δεδομένων που οδηγούσε στην πλήρη αποτύπωση και τυποποίησή τους, είχαμε σαν αποτέλεσμα να αναπτυχθούν έρευνες και μελέτες οι οποίες είχαν ως βάση τη μέτρηση και επεξεργασία μετεωρολογικών στοιχείων ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της γης με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα αποτελούσαν στατικές χρονοσειρές όπου μέσω κατάλληλης επεξεργασίας επέτρεψαν στους επιστήμονες να δημιουργήσουν μοντέλα υπολογιστικών μεθόδων των οποίων τα αποτελέσματα παρουσίαζαν όμοια συσχέτιση με τα δεδομένα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου είδους έρευνας αποτελεί αυτή των I. Supit, R. R. Van Kappel [4].

Έχοντας πλέον επιτύχει την ολοκλήρωση αξιόπιστων μελετών σχετικές με το συγκεκριμένο ζήτημα, και παράλληλα με την ανάπτυξη του τομέα επεξεργασίας μετεωρολογικών δεδομένων, έχει κατακτηθεί η γνώση σχετικά με το γεγονός πως η ηλιακή ακτινοβολία έχει συγκεκριμένη διεύθυνση με την οποία προσπίπτει στις επιφάνειες, οι οποίες με τη σειρά τους θα πρέπει να προσανατολιστούν κατάλληλα ώστε να δέχονται το μεγαλύτερο μέρος της. Έτσι ακολούθησε η ανάγκη μελέτης της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της γης. Ζωτικής σημασίας στην εξέλιξη της παραπάνω μελέτης ήταν η ολοκληρωμένη γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας που υπήρχε πλέον, μέσω των αναβαθμισμένων μετεωρολογικών μετρήσεων και των μοντέλων εξισώσεων που είχαν προηγηθεί στο οριζόντιο επίπεδο και περιλάμβαναν σταθερές οι οποίες αποτέλεσαν βάση για την μελέτη στις κεκλιμένες επιφάνειες. Παρατηρούμε δηλαδή ότι οι μελετητές χρησιμοποίησαν στοιχεία και συμπεράσματα από τις προγενέστερες εργασίες καθώς και τα υφιστάμενα μετεωρολογικά δεδομένα. Σχετικά με τα συγκεκριμένα πεδία έρευνας, χρήζει σίγουρα αναφοράς τουλάχιστον αυτή των Δ. Κουρεμένου και Κ. Αντωνόπουλου [5].

Εν συνεχεία, περί τα μέσα της δεκαετίας του 1980, έχοντας πλέον μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό η ηλιακή ενέργεια και η συμπεριφορά της, ακολούθησαν οι πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης και σχεδιασμού παθητικών και ενεργητικών ηλιακών συστημάτων. Ο σχεδιασμός αυτών των συστημάτων προϋπέθετε γνώση, ή καλύτερα ορθή εκτίμηση, του ποσού διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας. Παράλληλα, απαιτούταν προσεκτική μελέτη της εκάστοτε γεωγραφικής περιοχής, προκειμένου να καταστεί εφικτή η εκμετάλλευση της διαθέσιμης ενέργειας στο μέγιστο δυνατό. Η γενίκευση αυτού του είδους της συμπεριφοράς σε μεγαλύτερο φάσμα περιοχών, θα ήταν ικανό να προσδώσει σημαντικές πληροφορίες για την εκτίμηση της αποδοτικότερης γεωγραφικής περιοχής, βάσει πάντα κριτηρίων που θέτονται κάθε φορά, αλλά θα επέστρεφε και σαν αποτέλεσμα μία χαρτογράφηση των επιλέξιμων περιοχών σχετικά με τη συμπεριφορά τους στην απορρόφηση ηλιακής ενέργειας.

Για το λόγο αυτό η επιστημονική κοινότητα εργάστηκε ώστε να παρουσιάσει μελέτες επίπτωσης των καιρικών φαινομένων στην ηλιακή ακτινοβολία. Συνεπώς, επικεντρώθηκε στην μελέτη της επίπτωσης της νέφωσης και της θολότητας της ατμόσφαιρας στην ακτινοβολία. Αναπτύχθηκαν μελέτες που κατέγραφαν την ηλιακή ενέργεια συναρτήσει του ποσοστού ηλιοφάνειας συμπεριλαμβανομένου του παράγοντα της νέφωσης. Παράλληλα, στράφηκε ο τομέας μετεωρολογικών μετρήσεων προς αυτή την κατεύθυνση καταγράφοντας αντίστοιχα στοιχεία των καιρικών φαινομένων που παρουσιάζουν το αντίστοιχο ενδιαφέρον.

Οι μελέτες που εκπονήθηκαν ανέπτυξαν μαθηματικά πρότυπα για την πρόβλεψη της προσπίπτουσας ολικής ενέργειας ο προσδιορισμός των οποίων στηρίχθηκε στην τιμή μέτρησης της ηλιοφάνειας και του συντελεστή θολότητας της ατμόσφαιρας καθώς και στην ολική ηλιακή ενέργεια που υπολογίζεται ότι προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο για συγκεκριμένες τιμές ηλιοφάνειας, όπως η μελέτη του Α. Τσιούμη [6].

Όπως έγινε αντιληπτό, η μελέτη για την εξέλιξη των Α.Π.Ε που αφορά τον τομέα της ηλιακής ενέργειας ακολούθησε μια ανοδική πορεία με την πάροδο του χρόνου, όπως άλλωστε συμβαίνει στην πλειοψηφία των τομέων της επιστήμης. Ξεκίνησε αρχικά μελετώντας τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας για να προαχθεί έχοντας εξάγει αξιόπιστα θεωρητικά μοντέλα υπολογισμού που σήμερα καλύπτουν μελέτες στους ηλιακούς συλλέκτες θέρμανσης ρευστών, στην ηλιακή παραγωγή θερμότητας για διεργασίες καθώς και σε σταθμούς παραγωγής ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Σε πιο τεχνικές λεπτομέρειες, η ωριαία πρόβλεψη δεδομένων για την ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις για τις περισσότερες ηλιακές εφαρμογές, μιας και χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος του ενεργειακού συστήματος, η μετεωρολογική εκτίμηση αλλά και το οικονομικό κόστος, όπως και η αναμενόμενη απόδοση ενέργειας εξαρτώνται άμεσα από αυτή. Η ακριβής πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας βελτιώνει την απόδοση των αποτελεσμάτων πολλών εφαρμογών, αποτελεί όμως και αρκετά δύσκολο αντικείμενο, ειδικά αν μιλάμε για υψηλού επιπέδου ακρίβεια. Ένας παράγοντας που εξηγεί την ανωτέρω δυσκολία αποτελεί το γεγονός πως η παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει όχι μόνο τακτικές ετήσιες και ημερήσιες παραλλαγές, αλλά επίσης και μια τυχαία συμπεριφορά. Οι ετήσιες και ημερήσιες διακυμάνσεις μπορούν να περιγραφούν με συγκεκριμένο τρόπο, ενώ η τυχαία συμπεριφορά έχει υψηλή συσχέτιση με την κατάσταση της ατμόσφαιρας. Ενώ λοιπόν η ηλιακή ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας (SROA) μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, η ατμόσφαιρα είναι αυτή που με τη σειρά της θα επιφέρει την ανεπιθύμητη τυχαιότητα.

Η διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως την υγρασία, τον αέρα, την πίεση και τον τύπο του σύννεφου, αλλά ο παράγοντας με σημαντικό αντίκτυπο είναι η κάλυψη του νέφους. Υποθέτοντας μια αιτιοκρατική σχέση μεταξύ της κάλυψης του νέφους και της ωριαίας παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας, εξαφανίζεται η ανάγκη μέτρησης της τελευταίας.

Το ζήτημα του μετασχηματισμού των μετρημένων δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας σε δεδομένα ακτινοβολίας χρήσιμα για τις ενεργειακές εφαρμογές είναι πολύ σημαντική και συχνά ασχολείται με διάφορες χρονικές κλίμακες (μηνιαίες μέσες τιμές, ημερήσια ή ωριαία δεδομένα) στην επιστημονική βιβλιογραφία. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις που επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας: η "φυσική μοντελοποίηση" με βάση τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα και επηρεάζουν την ηλιακή ενέργεια, την ακτινοβολία και την «στατιστική ηλιακή κλιματολογία» βασισμένη κυρίως στην ανάλυση χρονοσειρών

Αρκετοί συγγραφείς έχουν επίσης αναπτύξει εμπειρικά μοντέλα για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας. Κλασικά, τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να θεωρηθούν

ως τυχαία χρονοσειρά που παράγονται από μια στοχαστική διαδικασία, και η πρόβλεψή του εξαρτάται από την ακριβή μαθηματική μοντελοποίηση της υποκείμενης στοχαστικής διαδικασίας. Χρησιμοποιώντας ένα ακριβές μοντέλο, η πρόβλεψη ορίζεται μαθηματικά από την υπό όρους προσδοκία των δεδομένων που δίνονται από τα σημερινά και τα προηγούμενα δείγματα δεδομένων (ιστορική συμπεριφορά).

2.3 Σύγχρονες εργασίες

Ακολουθούν ορισμένες πιο πρόσφατες εργασίες, οι οποίες εμπλέκουν και θεωρητικά υπόβαθρα από επιστήμες όπως η Μηχανική Μάθηση και η Αναγνώριση Προτύπων, μέσω των οποίων χειριζόμαστε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για την αύξηση τόσο της ακρίβειας των προγνώσεων μας, όσο και της σθεναρότητας των απαντήσεων μας σε δυσχερείς ή/και απρόβλεπτες καταστάσεις. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία του Jahani [7], αναφέρεται πως η ηλιακή ακτινοβολία (R_s) ορίζεται ως η ποσότητα ενέργειας που εκπέμπεται από τον ήλιο με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που φθάνουν στην επιφάνεια της Γης. Το R_s παίζει βασικό ρόλο σε πολλές διαφορετικές φυσικές διεργασίες και υδρολογικό κύκλο. Δεδομένου ότι το R_s παρέχει την ενέργεια για πολλές φυσικές διεργασίες όπως η φωτοσύνθεση, η εξάτμιση, η εξατμισοδιαπνοή, ο σχηματισμός σύννεφων, το τήγμα χιονιού κλπ. Συνεπώς, θεωρείται ως μία από τις σημαντικότερες εισροές μοντέλων υδρολογίας, προγραμματισμού άρδευσης και ανάπτυξης καλλιεργειών. Επιπλέον, η R_s είναι επίσης μια ανανεώσιμη και καθαρή πηγή ενέργειας η οποία έχει λάβει μεγαλύτερη προσοχή πρόσφατα, δεδομένου ότι μπορεί να ενισχυθεί χωρίς να βλάψει τη φύση και αποτελεί επίσης εναλλακτική λύση για τα ορυκτά καύσιμα. Το R_s μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας, ενέργεια για διάφορους σκοπούς όπως θέρμανση (για θέρμανση νερού, σπίτια, κτίρια κ.λπ.). Ωστόσο, σε αντίθεση με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία του αέρα και οι βροχοπτώσεις που είναι άμεσα διαθέσιμες, οι άμεσες μετρήσεις των R_s είναι πολύ σπάνιες στις περισσότερες περιοχές του κόσμου. Αυτό οφείλεται σε οικονομικούς και τεχνικούς περιορισμούς (π.χ. υψηλό κόστος εγκατάστασης και βαθμονόμησης της συσκευής ελέγχου και συνεχής συντήρηση).

Ομοίως, οι άμεσες μετρήσεις των R_s δεν είναι διαθέσιμες στους περισσότερους σταθμούς του συνοπτικού δικτύου του Ιράν. Ως αποτέλεσμα, προκειμένου να ικανοποιηθεί η απαίτηση των σχετικών με την R_s μελετών, διάφοροι τύποι μοντέλων έχουν αναπτυχθεί από ερευνητές για την εκτίμηση των R_s βασισμένων σε άλλα μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία είναι πιο κοινά διαθέσιμα παγκοσμίως. Από αυτά τα μοντέλα μπορούν να αναφερθούν μοντέλα βασισμένα σε τεχνητή νοημοσύνη, πολυστρωματικά μοντέλα μεταφοράς ακτινοβολίας καθώς και εμπειρικά μοντέλα. Ωστόσο, μεταξύ των προαναφερθέντων, τα εμπειρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται πιο συχνά στις μελέτες υδρολογίας και γεωργίας, καθώς οι εισροές αυτών των μοντέλων είναι εύκολα προσβάσιμες και τα υπολογιστικά κόστη είναι χαμηλά.

Προχωρώντας με την πιο πρόσφατη βιβλιογραφία, που αποτελεί όπως ήδη αναφέραμε στόχο της παρούσας παραγράφου, μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν πολλές χώρες είναι η ενεργειακή κρίση, όπως αναφέρεται και στο [8] πιο διεξοδικά. Στο σημερινό σενάριο της ενεργειακής κρίσης, η ηλιακή ενέργεια διαδραματίζει ζωτικό ρόλο ως ανανεώσιμη ενέργεια λόγω της αμόλυντης φύσης της και της αφθονίας της σε τροπικές χώρες όπως η Ινδία. Είναι απαραίτητο να έχουμε μια ακριβή γνώση των διαφόρων συνιστωσών της ηλιακής ενέργειας που διατίθενται στις τοποθεσίες που μας ενδιαφέρουν για την αποτελεσματική και αποδοτική χρήση τους. Αυτές οι συνιστώσες της ηλιακής ενέργειας είναι η διάρκεια της ηλιοφάνειας, η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος,

το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος, η σχετική υγρασία, η ημέρα του έτους, η ημερήσια καθαρή παγκόσμια ακτινοβολία, η συνολική κάλυψη σύννεφων, η θερμοκρασία, ο δείκτης καθαρότητας, μέση ταχύτητα ανέμου, ατμοσφαιρική πίεση, εξωεδαφική ακτινοβολία, εξάτμιση, δείκτης ευκρίνειας αναφοράς, μέση διάχυτη ακτινοβολία, μέση ακτινοβολία δέσμης, μήνα, θερμοκρασία εδάφους. Από αυτά, η παγκόσμια ακτινοβολία είναι το πιο σημαντικό συστατικό της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς δίνει τη συνολική ηλιακή διαθεσιμότητα σε ένα δεδομένο μέρος. Μετριέται μόνο σε λίγες θέσεις, λόγω του υψηλού κόστους που συνεπάγεται η αγορά διαφόρων εξοπλισμών και η συντήρησή τους. Τα μαθηματικά μοντέλα καθίστανται αναπόφευκτα για χώρους όπου η μέτρηση της παγκόσμιας ακτινοβολίας δεν γίνεται με βάση τους ορισμένους παράγοντες. Ένας αριθμός εμπειρικών μοντέλων έχουν αναπτυχθεί με τη χρήση μετεωρολογικών παραμέτρων όπως οι ώρες ηλιοφάνειας, η θερμοκρασία κ.λπ., προκειμένου να εκτιμηθεί η παγκόσμια ακτινοβολία.

Μία περισσότερη τεχνοκρατική προσέγγιση δίνεται στην εργασία [9]. Εκεί, τίγεται ένα ζήτημα ζωτικής σημασίας για την οικονομική ανάπτυξη οποιασδήποτε χώρας, το οποίο είναι το ζήτημα της ενέργειας. Η ζήτηση ενέργειας για τις χώρες, ιδίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, έχει αυξηθεί σημαντικά λόγω της αύξησης των γεωργικών και βιομηχανικών τομέων. Αυτό οδήγησε σε ταχεία αύξηση του επιπέδου των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και αύξηση των τιμών των καυσίμων - οι οποίες αποτελούν τις κυριότερες κινητήριες δυνάμεις πίσω από τις προσπάθειες αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που προέρχονται από φυσικούς πόρους και είναι φυσικά γεμάτοι [10] - περισσότερο αποτελεσματικά.

Για τους δύο τελευταίους αιώνες, τα ορυκτά καύσιμα θεωρούνται και χρησιμοποιούνται ως κύρια πηγή ενέργειας. Οι ερευνητές ενδιαφέρονται για την αναζήτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών των ανθρώπων λόγω της συνεχιζόμενης μείωσης των συμβατικών πηγών ενέργειας γνωστών ως ορυκτά καύσιμα, της διάδοσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που εκλύονται στο περιβάλλον και των συνεπακόλουθων επιπτώσεων στην ατμόσφαιρα [11]. Ωστόσο, οι αρνητικές επιπτώσεις της καύσης ορυκτών καυσίμων στο περιβάλλον ανάγκασαν τη συνέχεια της ενεργειακής έρευνας να εξετάσει σοβαρά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [12].

Επομένως, τα μελλοντικά ενεργειακά συστήματα πρέπει να βασίζονται σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την καταγραφή της πεπερασμένης προσφοράς ορυκτών καυσίμων [13]. Έτσι αυξήθηκε το παγκόσμιο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση διαφόρων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας λόγω της αυξανόμενης έλλειψης συμβατικών καυσίμων και των δυσμενών οικολογικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με την υπερβολική χρήση τους [14]. Ως εκ τούτου, η ηλιακή ενέργεια, ως βασική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, έχει ληφθεί υπόψη στη μελλοντική ενεργειακή ζήτηση οποιασδήποτε χώρας, δεδομένου ότι είναι άφθονη (φυσικά διαθέσιμη), καθαρή και χωρίς κόστος.

Υπό αυτή την έννοια, η παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία είναι η κύρια πηγή ενέργειας για το οικοσύστημα μας για το σχεδιασμό και την κατασκευή ηλιακού ενεργειακού συστήματος, αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, χιονοστιβάδας, εξάτμισης ανοικτού νερού, εξατμισοδιαπνοής από την επιφάνεια της γης, ανάπτυξης καλλιεργειών, φυτικής φωτοσύνθεσης, του συστήματος αποστράγγισης άρδευσης και διακυμάνσεις σε ανοικτό επίπεδο νερού. Η διαθεσιμότητα των μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια δεδομένη τοποθεσία καθιστά ρεαλιστικά έργα και ελέγχει την επίτευξη αυτών των δραστηριοτήτων [15]. Στις μελέτες για την ηλιακή ενέργεια, τα δεδομένα σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία και τα συστατικά της σε αυτή τη δεδομένη τοποθεσία είναι πολύ σημαντικά. Με άλλα λόγια, η απαιτούμενη γνώση της διαθεσιμότητας του ηλιακού πόρου σε οποιαδήποτε θέση απαιτείται από τους ηλιακούς μηχανικούς, τους αρχιτέκτονες, τους γεωργούς και τους υδρολόγους για

πολλές εφαρμογές ηλιακής ενέργειας όπως οι ηλιακοί κλίβανοι, οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες και ο εσωτερικός φωτισμός των κτιρίων. Παρά τη σημασία της ηλιακής ακτινοβολίας αυτές οι πληροφορίες δεν είναι άμεσα διαθέσιμες λόγω των απαιτήσεων κόστους, συντήρησης και βαθμονόμησης του εξοπλισμού μέτρησης [16].

Πρόσφατη ερευνητική δραστηριότητα έχει διεξαχθεί για τη γείτονα χώρα Τουρκία σχετικά με τα εξεταζόμενα στην παρούσα εργασία ζητήματα. Η Τουρκία έχει αρχίσει να επενδύει σε έργα ηλιακής ενέργειας για την υιοθέτηση ενός συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας λόγω περιβαλλοντικών, οικονομικών και πολιτικών λόγων από την έναρξη ισχύος του νόμου για την ηλιακή ενέργεια το έτος 2011. Η ηλιακή ενέργεια διαδραματίζει σημαντικό ρόλο λόγω του ότι είναι ασφαλές, αποτελεσματικό και οικονομικό. Επιπλέον, η εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας καταλαμβάνει μία από τις σημαντικότερες πηγές ενέργειας μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών αντίστοιχων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες μπορεί να είναι πρακτικά ανεξάντλητες και να διευκολύνουν τις προσεχείς στρατηγικές ενεργειακής προμήθειας της συγκεκριμένης χώρας.

Μιλώντας από γεωγραφικής άποψης, η Τουρκία, η έχει έκταση 774.815 τετραγωνικών χιλιομέτρων επίσημα, όντας στο βόρειο ημισφαίριο στη συμβολή της Ευρώπης και της Ασίας. Βρίσκεται στην Ανατολή και τη νοτιοανατολική Ευρώπη που συνορεύει με τη Μαύρη Θάλασσα, το Αιγαίο και τη Μεσόγειο Θάλασσα. Η ηλιακή ενέργεια θεωρείται σοβαρή διότι καλύπτει μέρος της ενεργειακής ζήτησης στην Τουρκία, όπως και στον κόσμο. Στην Τουρκία, το δυναμικό ηλιακής ενέργειας είναι πολύ υψηλό. Η Τουρκία βρίσκεται στην περιοχή της Μεσογείου σε γεωγραφικό πλάτος 36° και 42° N και έχει ένα τυπικό μεσογειακό κλίμα. Για το λόγο αυτό, οι περισσότερες από τις τοποθεσίες στην Τουρκία λαμβάνουν άφθονη ηλιακή ενέργεια. Η ετήσια μέση ηλιακή ακτινοβολία είναι $3,6 \text{ kWh} / \text{m}^2$ ημερησίως και η συνολική ετήσια περίοδος ακτινοβολίας είναι 2610 ώρες [17]. Η Τουρκία είναι μια χώρα με μεγάλη ηλιοφάνεια, καθώς ο αριθμός των ωρών ηλιοφάνειας ανέρχεται σχεδόν σε 2640 ώρες το χρόνο. Η μέση ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργειας είναι $3,6 \text{ kWh} / \text{m}^2$. Το συνολικό δυναμικό ηλιακής ενέργειας της Τουρκίας είναι περίπου 8,8 Mtoe (WEC-TNC 2000 και 2002).

Η ηλιακή ενέργεια είναι ολοένα και πιο ελκυστική στον 21ο αιώνα, καθώς τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την καύση ορυκτών καυσίμων είναι όλο και πιο έντονα. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα του 2015, η καιρική κατάσταση του νέφους έχει καλύψει τις περισσότερες πόλεις που βρίσκονται στη μέση και ανατολική πλευρά της Κίνας και στη συνέχεια προκάλεσε μεγάλες ζημιές στην ανθρώπινη υγεία και ζωή. Ένας άλλος σημαντικός λόγος για την αποτίμηση της ηλιακής ενέργειας είναι η υπερβολική κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων με περιορισμένο απόθεμα. Η έλλειψη ορυκτών καυσίμων είναι μια παγκόσμια μακροπρόθεσμη πρόκληση που καθιστά αναγκαίο να αγωνιζόμαστε για ανανεώσιμους και βιώσιμους ενεργειακούς πόρους [18].

Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητα για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση των τεχνολογιών αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Τα πρακτικά μετρημένα δεδομένα είναι τα πιο ακριβή, αλλά όχι πάντα άμεσα διαθέσιμα, τα οποία οφείλονται κυρίως στην αρχική επένδυση και κόστος συντήρησης των οργάνων μέτρησης και των σχετικών συσκευών εγγραφής. Για παράδειγμα, υπάρχουν συνολικά 756 μετεωρολογικοί σταθμοί στην Κίνα, μεταξύ των οποίων μόνο 122 έχουν αρχεία παγκόσμιας ηλιακής ακτινοβολίας. Συνεπώς, η εκτίμηση των δεδομένων της ηλιακής ακτινοβολίας με τη συσχέτισή της με άλλες εύκολα μετρούμενες μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η διάρκεια της ηλιοφάνειας, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η κάλυψη του νέφους, η υγρασία κ.λπ., είναι μια εναλλακτική μέθοδος για την απόκτηση επιθυμητών δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας όταν δεν υπάρχει καταγραφή μετρήσεων. Πολλά μοντέλα έχουν προταθεί και αναπτυχθεί με βάση αυτή την

άποψη. Ορισμένες από αυτές είναι συνοπτικές μαθηματικές φόρμουλες, οι οποίες είναι βολικές για εφαρμογές μηχανικής και ονομάζονται εμπειρικά μοντέλα. Μερικές από αυτές είναι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, όπως το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, η μηχανή φορέα υποστήριξης, ο γενετικός προγραμματισμός κλπ. Εν τω μεταξύ, υπάρχουν επίσης πολλά μοντέλα που χρησιμοποιούν δορυφορικά δεδομένα και ατμοσφαιρικά χαρακτηριστικά για την εκτίμηση των δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας, όπως η σκέδαση Rayleigh, απορρόφηση όζοντος κλπ.

Στην πραγματικότητα, η μεταβατική ηλιακή ακτινοβολία σε οποιαδήποτε θέση, με τη μονάδα W/m^2 , συνεχίζει να αλλάζει καθόλη τη διάρκεια της ημέρας, η οποία κυρίως αποδίδεται στην κίνηση της γης και στη χαοτική ατμόσφαιρα. Δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου αποτελεσματικός τρόπος που μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια ή να προκαλέσει παροδική ηλιακή ακτινοβολία εκτός από πρακτικές μετρήσεις. Οι μετρήσεις που εκτελούνται στους περισσότερους από τους τυπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς είναι για οριζόντια επιφάνεια στην κλίμακα μιας ώρας με τη μονάδα $MJ / (m^2 * hour)$ ή μια ημέρα με τη μονάδα $MJ / (m^2 * day)$. Αυτές οι δύο ποσότητες αντιπροσωπεύουν συσσωρευμένη ενέργεια κατά τη διάρκεια διάφορων χρονικών περιόδων αντί για παροδική ένταση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

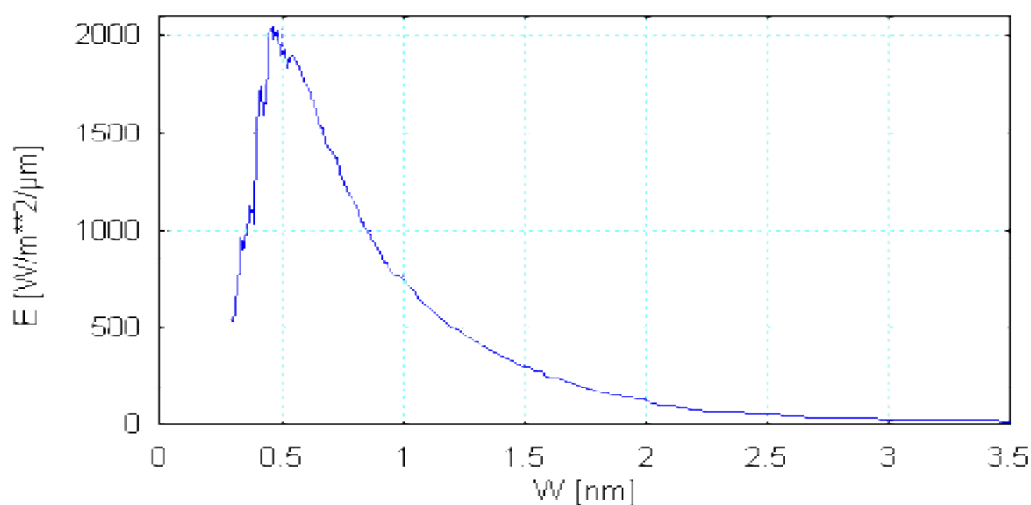
Ηλιακή ακτινοβολία

3.1 Εισαγωγή – Γενικά σχόλια

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθεί εκτενέστερα η ηλιακή ακτινοβολία και οι ιδιότητες που τη συνοδεύουν, τόσο από άποψη ενεργειακή όσο και από φυσικής άποψης, μιας και τα φαινόμενα, οι σταθερές και τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τις διάφορες όψεις της είναι πολυποίκιλα. Πιο στοχευμένα, η ηλιακή ενέργεια μεταφέρεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας από τον ήλιο, ο οποίος βρίσκεται σε μια μέση απόσταση $149,6 \cdot 10^6$ km (το μήκος αυτό αντιστοιχεί σε μία αστρονομική μονάδα 1 AU) από τη γη. Η ετήσια μεταβολή της απόστασης μεταξύ του ήλιου και της γης, λόγω της ελλειπτικής μορφής της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο είναι $\pm 1.7\%$ και επαναλαμβάνεται με μικρές μεταβολές από χρόνο σε χρόνο. Η αντίστοιχη διακύμανση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη μας εκτιμάται στα επίπεδα του $\pm 3.4\%$.

Από υφιστάμενες αναλύσεις, έχει υπολογιστεί προσεγγιστικά πως ο ήλιος εκπέμπει ενέργεια (ανά μονάδα χρόνου) υπό μορφή ακτινοβολίας ισχύος ίση με $3,72 \cdot 10^{23}$ KW. Σύμφωνα με τις πλέον σύγχρονες αναλύσεις, το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται στα μικρά μήκη κύματος, δηλαδή ως τα 3 με 4 μm . Συνεπώς, ακτινοβολία μεγαλύτερη των 4 μm ονομάζεται ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος.

Επιπρόσθετα, η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από ένα σύνολο ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών με μήκη κύματος από 0.25 έως 4 μm και μπορεί κατά προσέγγιση να εξομοιωθεί με την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία 5762°K . Στο ορατό τμήμα της ακτινοβολίας (0,39 ως 0,77 μm) περιέχεται το 46,41% της ενέργειας, ενώ στο υπεριώδες (μήκος κύματος μικρότερο των 0,4 μm) περιέχεται το 8,03% αυτής. Τέλος η φασματική περιοχή του ηλιακού φωτός (με μήκος κύματος μεγαλύτερο των 0,77 μm) περιέχει το υπόλοιπο 45,46% της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Εικόνα 1: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη γη έξω από την ατμόσφαιρα είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τις εποχές του έτους. Το μέγεθος όμως, η διάρκεια και οι μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης σε μία περιοχή ποικίλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας, την ώρα της ημέρας, την εποχή του έτους και το κλίμα της εκάστοτε περιοχής. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, χωρίζεται σε δυο μεγάλες κατηγορίες: α) την άμεση και β) τη διάχυτη. Το άθροισμα αυτών των μας δίνει την ολική ηλιακή ακτινοβολία.

3.2 Βασικές έννοιες και σχέσεις

Η μελέτη και η ανάπτυξη ηλιακών συστημάτων και εφαρμογών, προϋποθέτει μεταξύ άλλων τη γνώση τόσο της ηλιακής ακτινοβολίας, όσο και των μετεωρολογικών στοιχείων που συνοδεύουν αυτά. Παρακάτω, γίνεται αναλυτική αναφορά στις έννοιες και τις σχέσεις που χρειάζονται για τη μελέτη της εργασίας αυτής.

1. ΗΛΙΑΚΗ ΣΤΑΘΕΡΑ (Isc)

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, αποτελεί μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής που υπάρχει στο ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας. Η ηλιακή σταθερά, ισοδυναμεί με τη ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που δέχεται επιφάνεια 1m^2 λίγο έξω από τα όρια της ατμόσφαιρας προσανατολισμένη κάθετα της ακτίνες του ήλιου, σε χρόνο 1sec. Η μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς είναι $I_{sc}=1367\text{W/m}^2$.

Λόγω των διαφορών απόστασης μεταξύ γης και ήλιου, ανάλογα με τη θέση της περιφοράς στη τροχιά, η τιμή της ηλιακής σταθεράς υπόκειται σε διακυμάνσεις που κυμαίνονται μεταξύ [-3.5% , 3.5%]. Το ίδιο συμβαίνει και λόγω διαταραχών της από ηλιακές κηλίδες, με τις αντίστοιχες διακυμάνσεις να παίρνουν τιμές στο κλειστό διάστημα [-1.5% , 1.5%]. Είναι σχετικά αναμενόμενο λοιπόν, η ηλιακή σταθερά να παίρνει τη μέγιστη τιμή της χειμερινούς μήνες ενώ την ελάχιστη τους εαρινούς.

2. ΑΜΕΣΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ(Ib,n)

Είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάθε επιφάνεια, η οποία βρίσκεται εντός της ατμόσφαιρας και προέρχεται κατευθείαν από την κύρια πηγή ενέργειας φυσικά, τον ίδιο τον ήλιο.

Η ακτινοβολία, έχοντας ορισμένη διεύθυνση με την οποία προσπίπτει στις επιφάνειες, αναγκάζει την αναζήτηση του βέλτιστου προσανατολισμού, έτσι ώστε να είναι ικανές να δεχθούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος αυτής. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορούσαμε να πούμε πως έχουμε όσο το δυνατόν λιγότερη απώλεια ενέργειας ή αντίστοιχα, βέλτιστη απορρόφηση αυτής προς εκμετάλλευση.

3. ΔΙΑΧΥΤΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (Id,h)

Είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει σε κάθε επιφάνεια, η οποία βρίσκεται εντός της ατμόσφαιρας, αφού προηγουμένως η κατεύθυνσή της έχει υποστεί αλλαγές, λόγω ανάκλασης και διασποράς που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα.

Η διάχυτη ακτινοβολία δεν έχει κάποια διεύθυνση με την οποία προσπίπτει σε οποιαδήποτε επιφάνεια. Επιπλέον, για τις περιοχές που δεν ανήκουν στην ατμόσφαιρα, δε μπορεί να γίνεται λόγος για διάχυτη ακτινοβολία.

4. ΟΛΙΚΗ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (I_t, h)

Είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία επιφάνεια. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια, τις ηλιόλουστες ημέρες, είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της διάχυτης. Αντίθετα, τις μέρες με συννεφιά εμφανίζεται αντίθετη συμπεριφορά. Δηλαδή, η ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια εκπροσωπείται από τη διάχυτη. Σε ένα ηλιακό ενεργειακό σύστημα όμως, λειτουργώντας συμβατικά, λαμβάνεται υπόψη η ολική ηλιακή ακτινοβολία.

5. ΓΩΝΙΑ ΩΡΑΣ (ω)

Γωνία ώρας είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του μεσημβρινού και οφείλεται στη περιστροφή της γης περί τον άξονά της κατά 15° ανά ώρα. Η τιμή της γωνίας ώρας το ηλιακό μεσημέρι είναι 0° . Για τις ώρες πριν το ηλιακό μεσημέρι παίρνει θετικές τιμές ενώ για τις ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι παίρνει αρνητικές τιμές. Κατά την περίοδο της μεσημβρίας, η συγκεκριμένη παράμετρος παίρνει μηδενικές τιμές. Για παράδειγμα, στις 10:00 π.μ. θα συναντούσαμε μία τιμή ίση με $\omega = +30^\circ$, ενώ στις 14:00 θα είχαμε πιθανόν $\omega = -30^\circ$.

6. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ (ϕ)

Γεωγραφικό πλάτος ενός τόπου είναι η γωνιακή θέση βόρεια ή νότια του ισημερινού. Τα βόρεια πλάτη είναι θετικά ενώ τα νότια αρνητικά. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα γεωγραφικά πλάτη από διάφορες πόλεις της Ελλάδας.

A/A	Πόλη	Γεωγραφικό Πλάτος	A/A	Πόλη	Γεωγραφικό Πλάτος
1	Αθήνα	$37^\circ 58'$	19	Μήλος	$36^\circ 44'$
2	Αλίαρτος	$38^\circ 23'$	20	Μυτιλήνη	$39^\circ 04'$
3	Άραξος	$38^\circ 21'$	21	Νάξος	$37^\circ 06'$
4	Αργοστόλι	$38^\circ 10'$	22	Πάρος	$36^\circ 05'$
5	Άρτα	$39^\circ 08'$	23	Πάτρα	$38^\circ 15'$
6	Ηράκλειο	$35^\circ 29'$	24	Πύργος	$37^\circ 42'$
7	Θεσσαλονίκη	$40^\circ 33'$	25	Ρέθυμνο	$35^\circ 22'$
8	Ιεράπετρα	$35^\circ 24'$	26	Ρόδος	$36^\circ 23'$
9	Ιωάννινα	$39^\circ 42'$	27	Σάμος	$37^\circ 44'$
10	Καλαμάτα	$37^\circ 04'$	28	Σέρρες	$41^\circ 04'$
11	Κέρκυρα	$39^\circ 37'$	29	Σητεία	$35^\circ 12'$
12	Κομοτηνή	$41^\circ 07'$	30	Σκύρος	$38^\circ 54'$
13	Κόνιτσα	$40^\circ 03'$	31	Σούδα	$35^\circ 43'$
14	Κόρινθος	$37^\circ 56'$	32	Σύρος	$37^\circ 27'$
15	Κύθηρα	$36^\circ 09'$	33	Τυμπάκιο	35°
16	Λαμία	$38^\circ 54'$	34	Χανιά	$35^\circ 30'$
17	Λάρισα	$39^\circ 38'$	35	Χίος	$38^\circ 22'$
18	Μεθώνη	$36^\circ 50'$	36	Λήμνος	$39^\circ 55'$

Πίνακας 1: Γεωγραφικά πλάτη μερικών πόλεων της Ελλάδας

7. ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ (δ)

Απόκλιση δ είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά την ηλιακή μεσημβρία σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού. Οι τιμές που παίρνει είναι : 23,45 °(θερινό ηλιοστάσιο) μέχρι – 23,45°(χειμερινό ηλιοστάσιο).

Η απόκλιση του ήλιου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 * \sin[(360 / 365) * (284 + N)] \quad (1)$$

όπου N ο αύξων αριθμός της αντίστοιχης ημέρας του έτους. Για παράδειγμα για τις 10 Οκτωβρίου έχουμε N=283.

8. ΚΛΙΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (ς)

Κλίση ς μιας επιφάνειας είναι η γωνία μεταξύ της επιφάνειας και του οριζοντίου επιπέδου ($0 \leq \varsigma \leq 180$).

9. ΓΩΝΙΑ ΑΖΙΜΟΥΘΙΟΥ (γ)

Αζιμούθια γωνία επιφάνειας ονομάζεται η απόκλιση που παρουσιάζει η προβολή της καθέτου που άγεται από τον τοπικό μεσημβρινό σε ένα οριζόντιο επίπεδο. Η γωνία γ είναι 180° για κατεύθυνση του επιπέδου προς νότο, θετική ανατολικά και αρνητική δυτικά. Στα ηλιακά συστήματα, η ενεργός επιφάνεια τους είναι στραμμένη προς νότο, άρα έχουμε $\gamma=180^\circ$.

10. ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ (θ)

Είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην άμεση ακτινοβολία σε ένα επίπεδο και στην κάθετη στο επίπεδο.

Η σχέση που συνδέει τη γωνία προσπτώσεως της αμέσου ακτινοβολίας θ με τις άλλες προαναφερθείσες γωνίες είναι:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) * \sin(\varphi) * \cos(\varsigma) * \sin(\delta) * \cos(\varphi) * \sin(\varsigma) * \cos(\gamma) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\varsigma) * \cos(\omega) + \cos(\delta) * \sin(\varphi) * \sin(\varsigma) * \cos(\gamma) * \cos(\omega) + \cos(\delta) * \sin(\varsigma) * \sin(\gamma) * \sin(\omega) \quad (2)$$

Για οριζόντιες επιφάνειες ($\beta=0^\circ$) η σχέση (2) γίνεται:

$$\cos(\theta) = \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\omega) + \sin(\delta) * \sin(\varphi) \quad (3)$$

Από τη σχέση (3) προκύπτει τώρα πως :

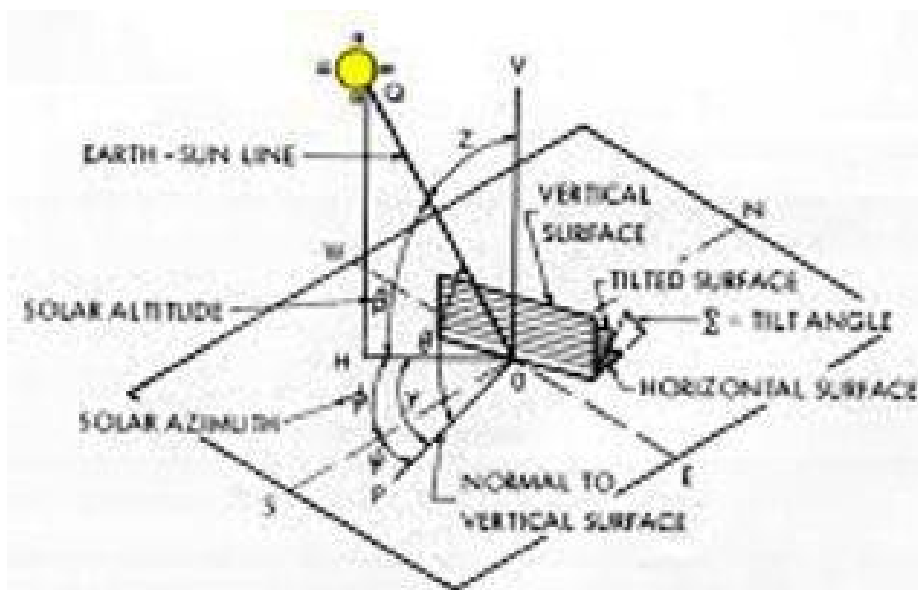
$$\omega_\varsigma = \arccos(- \tan(\delta) * \tan(\varphi)) \quad (4)$$

Όπου ω_ς είναι η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου σε οριζόντιο επίπεδο.

Ο ημερήσιος αριθμός ωρών ηλιοφάνειας για εντελώς καθαρό ουρανό ορίζεται από τη σχέση:

$$N_\varsigma = (2 * \omega_\varsigma) / 15 \quad (5)$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι γωνίες που αναφέρθηκαν παραπάνω (γ , θ , ζ):



Εικόνα 2: Παράμετροι προσδιορισμού της θέσης του ήλιου

11. ΓΩΝΙΑ ΥΨΟΥΣ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ (α)

Είναι η γωνία που σχηματίζει ο ορίζοντας άξονας με την ευθεία που ενώνει τον ήλιο με τον παρατηρητή ή μία επιφάνεια. Η γωνία α παίρνει τιμές μεταξύ 0° και 90° . Όπως είναι φυσικό οι τιμές του ηλιακού ύψους μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του έτους. Πιο συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού ο ήλιος εμφανίζεται να έχει μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με τον ορίζοντα, οπότε και η τιμή της γωνίας α είναι σχετικά υψηλή.

Όμοια, κατά τη χειμερινή περίοδο, η ημερήσια πορεία του ήλιου σε σχέση με τον ορίζοντα είναι χαμηλή, οπότε και οι τιμές του ηλιακού ύψους είναι σχετικά μικρές. Η εξήγηση των διαφορετικών τιμών αποδίδεται στη μετατόπιση του άξονα περιστροφής της γης σε σχέση με το επίπεδο πάνω στο οποίο αυτή περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο, δηλαδή την ηλιακή απόκλιση. Η γωνία ύψους του ήλιου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\alpha = \arcsin(\sin\delta * \sin\varphi + \cos\delta * \cos\omega * \cos\varphi) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (6)$$

12. ΓΩΝΙΑ ZENITH (θ_z)

Ο νοητός άξονας που τέμνει κάθετα τον ορίζοντα μιας περιοχής και που εκτείνεται μέχρι τον ουράνιο θόλο, ονομάζεται τοπικό ζενίθ. Η γωνία μεταξύ του τοπικού ζενίθ και της ευθείας που ενώνει τη θέση του παρατηρητή ή μιας επιφάνειας με τον ήλιο καλείται γωνία ζενίθ και συμβολίζεται ως θ_z . Η γωνία αυτή παίρνει τιμές μεταξύ των 0 και των 90 μοιρών, ενώ ο παρακάτω τύπος δείχνει τον αναλυτικό υπολογισμό της :

$$\theta_z = 90 - \alpha \text{ [}^\circ\text{]} \quad (7)$$

13. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΕΞΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ (I_0)

Θεωρητικά, μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτινοβολία – άρα και την ενέργεια - ανά μονάδα επιφάνειας που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο έξω από την ατμόσφαιρα. Η ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα υπολογίζεται αναλυτικά από τη σχέση:

$$I_o = I_{sc} * [1 + 0.034 * \cos(360 * N / 365.25)] \quad (8)$$

Όπου N ο αύξων αριθμός της ημέρας του έτους.

14. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ – ΜΟΝΤΕΛΟ HOTTTEL

Πέρα από τις μακροχρόνιες μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών που έχουν να κάνουν με την ηλιακή ενέργεια και αποτελούν βάση για τον σχεδιασμό ηλιακών συστημάτων μπορούμε να υπολογίσουμε μέσω εξισώσεων την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Για τον υπολογισμό της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιείται το μοντέλο του HOTTTEL. Αυτό οποίο αποτελείται από ένα σύνολο εξισώσεων, όπως αυτές έχουν τοποθετηθεί παρακάτω και μπορούν ουσιαστικά να αποτελέσουν τη βάση των υπολογισμών της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα :

- ΗΛΙΑΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ (δ) :

$$\delta = 23.45 * \sin[(360 / 365) * (284 + N)] \quad [^\circ] \quad (9)$$

Όπου N ο αύξων αριθμός της ημέρας του μήνα.

- ΓΩΝΙΑ ΩΡΑΣ (ω) :

$$\omega = 15 * (t_s - 12) \quad [^\circ] \quad (10)$$

Όπου t_s η ηλιακή ώρα.

- ΓΩΝΙΑ ΥΨΟΥΣ ΗΛΙΟΥ (α) :

$$\alpha = \arcsin(\sin\delta * \sin\varphi + \cos\delta * \cos\omega * \cos\varphi) \quad [^\circ] \quad (11)$$

Όπου φ το γεωγραφικό πλάτος.

- ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΞΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ (I_o) :

$$I_o = I_{sc} * [1 + 0.034 * \cos(360 * N / 365.25)] \quad [W/m^2] \quad (12)$$

Όπου I_{sc} η ηλιακή σταθερά, ίση με $1367 W/m^2$.

- ΓΩΝΙΑ ZENIΘ (θ_z) :

$$\theta_z = 90 - \alpha \quad [^\circ] \quad (7)$$

- ΑΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ($I_{b,n}$) :

$$I_{b,n} = I_0 * [\alpha_0 + \alpha_1 * e^{-k(1 / \cos\theta_z)}] \quad [W/m^2] \quad (13)$$

Οι συντελεστές α και κ παίρνουν τιμές ανάλογα με την ποιότητα της ατμόσφαιρας.

- Καθαρή ατμόσφαιρα – ορατότητα 23 km – στο επίπεδο της θάλασσας

$$\alpha_0 = 0.4237 - 0.00821(6-A)^2 \quad (14)$$

$$\alpha_1 = 0.5055 + 0.00595(6.5-A)^2 \quad (15)$$

$$\kappa = 0.2711 + 0.01858(2.5-A)^2 \quad (16)$$

- Αστική ατμόσφαιρα – ορατότητα 5 km – στο επίπεδο της θάλασσας

$$\alpha_0 = 0.2538 - 0.0063(6-A)^2 \quad (17)$$

$$\alpha_1 = 0.7678 + 0.001(6.5-A)^2 \quad (18)$$

$$\kappa = 0.249 + 0.81(2.5-A)^2 \quad (19)$$

Όπου A το υψόμετρο που καταμετράται σε χιλιόμετρα (km).

- ΔΙΑΧΥΤΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ($I_{d,h}$):

$$I_{d,h} = I_0 * \cos\theta_z * [0.271 - 0.2939 * (\alpha_0 + \alpha_1 * e^{-k(1 / \cos\theta_z)})] \quad [W/m^2] \quad (20)$$

- ΟΛΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ($I_{t,h}$):

$$I_{t,h} = I_{b,n} * \cos\theta_z + I_{d,h} \quad [W/m^2] \quad (21)$$

3.3 Υπολογισμός έντασης ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο (μοντέλο Hottel)

Πολλές φορές για το σχεδιασμό ηλιακών συστημάτων είναι απαραίτητο να υπολογισθεί η ακτινοβολία και σε κάποιο επίπεδο με κλίση. Γι' αυτόν τον υπολογισμό γίνεται πάλι χρήση του μοντέλου του HOTTTEL.

- ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Η ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{b,\alpha} = I_{b,n} * \cos\theta_i \quad [W/m^2] \quad (22)$$

$$\cos\theta_i = \cos\beta * (\sin\delta * \sin\varphi + \cos\delta * \cos\varphi * \cos\omega) - \cos\delta * \sin\omega * \sin\beta * \sin\gamma + \sin\beta * \cos\gamma * (\sin\delta * \cos\varphi - \cos\delta * \cos\omega * \sin\varphi) \quad (23)$$

όπου β , η κλίση του συλλέκτη σε μοίρες και γ , η γωνία αζιμούθιου συλλέκτη σε μοίρες

Γωνία αζιμούθιου ονομάζεται η απόκλιση που παρουσιάζει η προβολή της καθέτου που άγεται από τον τοπικό μεσημβρινό σε ένα οριζόντιο επίπεδο.

Η γωνία (γ) είναι 180° για κατεύθυνση του επιπέδου προς το νότο, θετική ανατολικά και αρνητική δυτικά.

Στα ηλιακά συστήματα, η ενεργός επιφάνεια τους είναι στραμμένη προς το νότο, άρα έχουμε $\gamma = 180^\circ$.

3.4 Αξιολόγηση μοντέλου Hottel

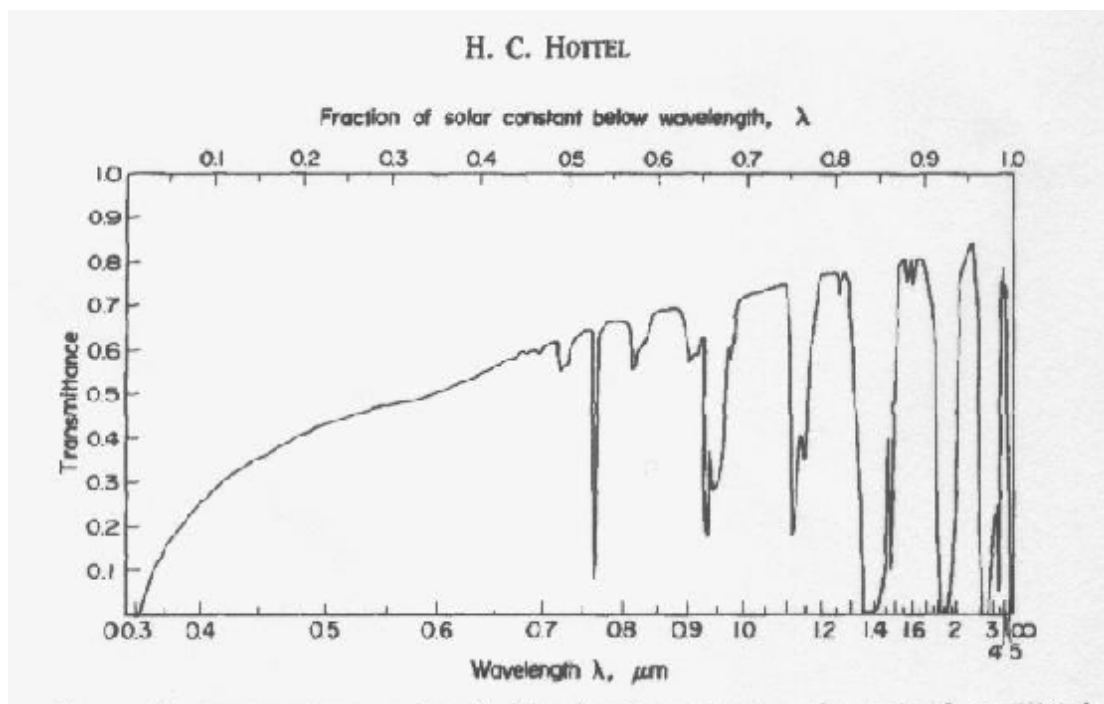
Εν συνεχεία, θα εξεταστεί το μοντέλο του Hottel, όπως αυτό έχει ήδη περιγραφεί από την εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής. Συνεπώς, γυρνώντας πίσω στο 1975, ο Hottel καθόρισε την μετάδοση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μέσω ατμοσφαιρών για δύο πρότυπα θολότητας όσο το δυνατόν ακριβέστερα και απλά. Χρειάστηκε να μελετήσει τα μέχρι τότε στοιχεία σχετικά με τη μετάδοση της και να εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα για το πώς αυτή υπολογίζεται λαμβάνοντας υπ' όψη την επιρροή που υφίσταται από τους παράγοντες της ατμόσφαιρας και το υψόμετρο.

Τα εργαστήρια του πανεπιστημίου του Cambridge είχαν ορίσει δεδομένα που αφορούσαν στοιχεία για τους συντελεστές απορρόφησης και διασποράς της ατμόσφαιρας για μήκη κύματος ακτινοβολίας της έκτασης $40.000 - 350 \text{ cm}^{-1}$. Για το πρότυπο ατμόσφαιρας 1962 και τους τέσσερις κλιματικούς τύπους (τροπικό, καλοκαίρι και χειμώνας μέσου πλάτους και καλοκαίρι στους πόλους) καθορίστηκαν τα συστατικά της ατμόσφαιρας τα οποία προκαλούν διασπορά και απορρόφηση της ακτινοβολίας στο επίπεδο της θάλασσας μέχρι και απόσταση ύψους 2,5 km από το αντίστοιχο επίπεδο.

Μέσω του καθορισμού των συστατικών διαπιστώθηκε ότι λόγω διεύρυνσης της πίεσης, μια μονάδα μάζας του απορροφητή μειώνει τη δέσμη φωτός κατά μία μονάδα περισσότερο όταν ο απορροφητής είναι τοποθετημένος στο επίπεδο της θάλασσας απ' ότι σε υψηλότερο επίπεδο. Η μελέτη επικεντρώθηκε στην κατακόρυφη διανομή των υδρατμών και του όζοντος και πώς αυτή επηρεάζεται ανά τύπο κλίματος. Για παράδειγμα, διαπιστώθηκε ότι η ατμόσφαιρα τροπικού κλίματος περιέχει 4,2 cm υγρασίας σε μια κατακόρυφη πορεία από τη στάθμη της θάλασσας σε ύψος A, αντιθέτως η περιεκτικότητα ισοδυναμεί σε 3,35 cm εάν αναφερθούμε στο επίπεδο της θάλασσας. Αν και το πρώτο km πάνω από το επίπεδο της θάλασσας περιέχει 11% λιγότερη μάζα αέρα από το επίπεδο της θάλασσας, η περιεκτικότητά του σε υγρασία ξεπερνά κατά 38% την αντίστοιχη στο επίπεδο της θάλασσας.

Κατά τη μετάδοση της ακτινοβολίας η απορρόφηση και η διασπορά προκαλούν μεταβολή του μήκους κύματος που έχει αριθμητική σχέση εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία, την πίεση και τον κλιματικό τύπο αλλά τα ισοδύναμα μεγέθη στο επίπεδο της θάλασσας και σε κάθε υψόμετρο χρειάζεται να υπολογιστούν.

Αποτύπωση τέτοιων υπολογισμών έγινε απ' τον Mc Clatchey το 1972 με γραφική μέθοδο βασισμένη στη μελέτη μονοχρωματικής μετάδοσης ολόκληρου του μήκους κύματος λ του ηλιακού φωτός σε κάθε υψόμετρο A καθορισμένης απόστασης απ' το επίπεδο της θάλασσας που είχε προηγηθεί απ' τον Altschuler το 1965. Η εικόνα 3 είναι παράδειγμα των υπολογισμών που ήταν βασισμένοι σε 581 διαστήματα μήκους κύματος και καθορίζεται η μεταβολή του μήκους κύματος κατά την μετάδοση του μέσω της πρότυπης ατμόσφαιρας 1962 σε μια διαδρομή έξω απ' την ατμόσφαιρα προς το επίπεδο της θάλασσας όπου η αέρια μάζα ισούται με 2 όταν η ορατότητα της ατμόσφαιρας είναι 23 km. Σημειώνεται ότι η αναλογία του μήκους κύματος δεν είναι γραμμική και λαμβάνεται απ' την εικόνα 4.

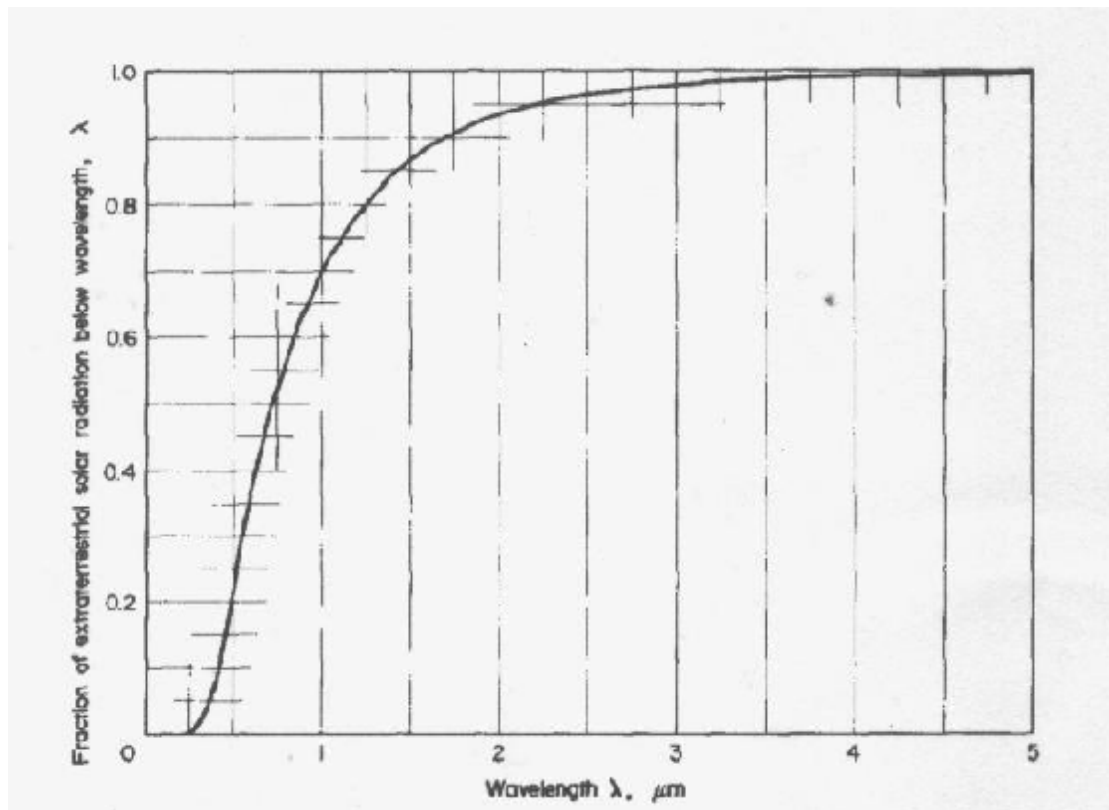


Εικόνα 3: Μετάδοση ηλιακής ενέργειας συναρτήσει μήκους κύματος

Σύμφωνα με τους Stefan–Boltzman, η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στον ήλιο, ίση με 5762 K είναι η θερμοκρασία ενός μέλαν σώματος ακτίνας 0,009305 rad στη γη που παράγει ακτινοβολία 1,367 KW/m² ίση με την ηλιακή σταθερά. Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να συγκριθεί με τη θερμοκρασία 5612 K την οποία έχει ένα μέλαν σώμα όπου το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας που παράγει το μισό της ενέργειας του, βρίσκεται εκατέρωθεν της τιμής 0,7318 μm.

Η τετμημένη αναλογία της εικόνας 3 είναι γραμμική σε συνάρτηση με το μήκος λ με συνέπεια ολόκληρο το εμβαδόν που περιλαμβάνεται κάτω απ' την καμπύλη να ισοδυναμεί με την άμεση μετάδοση της ολικής ηλιακής ενέργειας μέσω της ατμόσφαιρας. Εάν η μετάδοση ολόκληρου του μήκους κύματος του ηλιακού φωτός ήταν επακριβώς μονοχρωματική, αλλάζοντας τη γωνία ζενίθ του ήλιου ώστε να αλλάξει το μήκος της διαδρομής της καμπύλης της εικόνας 3 από L₁ σε L₂ χωρίς να αλλάξει το υψόμετρο A τότε θα άλλαζε και η ισοδύναμη επίδραση των συστατικών απορρόφησης και διασποράς κατά την ίδια αναλογία L₂/L₁. Τότε έχουμε $\tau_{\lambda, L2} = (\tau_{\lambda, L1})^{L2/L1}$ καθώς μια γραφική αποτύπωση του ln τ_λ συναρτήσει του L θα ήταν μια ευθεία γραμμή που θα περνούσε απ' το σημείο (0,0). Όμως η ολική μετάδοση τ δεν θα υπάκουε σε αυτή τη σχέση αν δεν ήταν αστική η ατμόσφαιρα.

Έπειτα, παρατηρούμε την εικόνα 4 η οποία απεικονίζει τη φασματική κατανομή της ηλιακής ενέργειας εκτός ατμόσφαιρας για μήκη κύματος μικρότερα από 0,7318 μm σε μια προσπάθεια αποτύπωσης αυτής συναρτήσει του μήκους κύματος λ.



Εικόνα 4: Φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας

Βασιζόμενος σε όλα αυτά που αναπτύχθηκαν ο Hottel έκανε υπολογισμούς με σκοπό να υπολογίσει τη μετάδοση τ για κάθε μία από αρκετές αέριες μάζες ($\sec z$), ($z =$ γωνία ζενίθ) και κάθε ένα από αρκετά υψόμετρα A για τους τέσσερις κλιματικούς τύπους. Κάθε τιμή μετάδοσης τ των υπολογισμών περιλαμβάνει 581 υποδιαστήματα τιμών μετάδοσης τ συναρτήσει του μήκους κύματος λ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 1 και στην εικόνα 5 ως μετάδοση τ λογαριθμικής κλίμακας, συναρτήσει της αέριας μάζας (Air mass) αριθμητικής κλίμακας. Όπως είναι αναμενόμενο, οι καμπύλες δεν είναι ευθείες, αλλά παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες κυρτώσεις και καμπυλότητες.

Table 1. Direct clear-day transmittance of solar energy (by integration over solar spectrum)

Haze Model	Elevation above sea level, Km	Zenith Angle of Sun*	Climate Model				
			1962 Std Atmosphere	Tropical (T)	Mid-latitude Summer (MLS)	Subarctic Summer (SAS)	Mid-latitude Winter (MLW)
23 Km Visibility	0	0°	0.6413	0.6194	0.6260	0.6335	0.6503
		40°	0.5829	—	—	0.5750	0.5915
		60°	0.4764	0.4563	0.4618	0.4687	0.4839
		65°	0.4312	—	—	—	—
		70°	0.3729	—	—	0.3662	0.3800
		75°	0.2973	0.2814	0.2857	0.2913	0.3036
	0.5	0°	0.6858	—	—	—	—
		60°	0.5370	—	—	—	—
		75°	0.3654	—	—	—	—
	1.0	0°	0.7199	0.6988	0.7057	0.7120	0.7287
		30°	0.6956	—	—	—	—
		40°	0.6733	—	—	0.6654	0.6820
		60°	0.5851	0.5648	0.5710	0.5774	0.5936
		70°	—	—	—	0.4889	0.5023
		75°	0.4232	0.4050	0.4104	0.4160	0.4306
	1.5	0°	0.7465	—	—	—	—
		60°	0.6232	—	—	—	—
		75°	0.4704	—	—	—	—
	2.0	0°	0.7677	0.7493	0.7554	0.7600	0.7763
		60°	0.6534	0.6350	0.6406	0.6452	0.6617
		75°	0.5085	0.4914	0.4963	0.5008	0.5163
5 Km Visibility	0	0°	0.4077	—	0.3954	0.4016	—
		60°	0.2059	—	0.1976	0.2016	—
		75°	0.0708	—	0.0659	0.0688	—
	1	0°	0.6147	0.3908	0.6018	0.6075	0.4148
		60°	0.4331	0.1945	0.4214	0.4268	0.2104
		75°	0.2471	0.0652	0.2383	0.2422	0.0733
	2	0°	—	0.9953	—	—	0.6228
		60°	—	0.4163	—	—	0.4402
		75	—	0.2344	—	—	0.2526

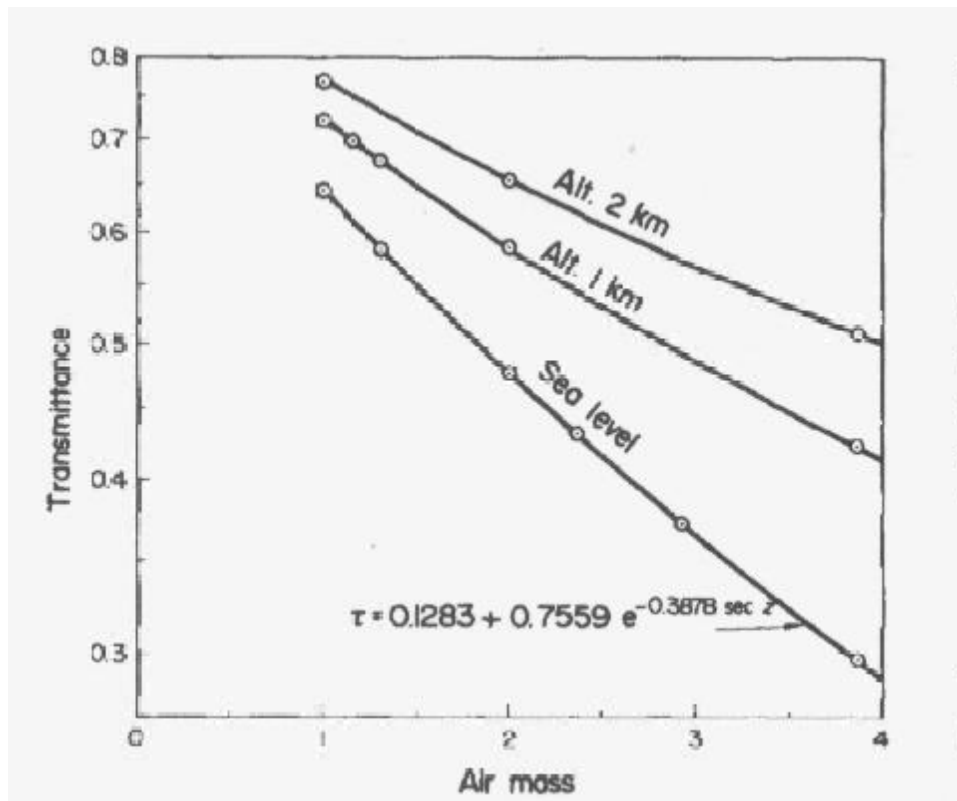
* Relation between zenith angle and air mass:

Zenith angle, z	0°	30°	40°	60°	65°	70°	75°
Air mass, sec z	1	1.155	1.305	2.000	2.366	2.924	3.864

Πίνακας 2: Μετάδοση ηλιακής ενέργειας - κάθε τιμή μετάδοσης των υπολογισμών περιλαμβάνει 581 υποδιαστήματα τιμών.

Ο Hottel προχώρησε επιτυχάνοντας να τις παρουσιάσει γραμμικά, ικανοποιώντας οποιαδήποτε επιθυμητή ακρίβεια, μέσω μίας μεγάλης αριθμητικής σειράς, όμως ένα μοντέλο το οποίο είχε επιτυχία σε εφαρμογή καθαρών καυσίμων αερίων σε βιομηχανικούς φούρνους και σε πολλά προβλήματα σχετικά με την αστρική εκπομπή φωτός, αξίωνε περισσότερες σταθερές ώστε να ταιριάζει με τα αποτελέσματα των δεδομένων υπολογισμών. Αυτό το μοντέλο ονομαζόταν “μοντέλο αναμιγμένου γκριζου αερίου” με μετάδοση ακτινοβολίας τ που δίνεται απ’ τη σχέση:

$$\tau = \sum \alpha_i \cdot e^{-k_i \cdot L}, \quad (\sum \alpha_i = 1) \quad (24)$$



Εικόνα 5: Μετάδοση ηλιακής ενέργειας συναρτήσει της αέριας μάζας

Το γεγονός ότι η κλίση των καμπύλων της εικόνας 3 δεν είναι μεγάλη καθώς και ότι δεν υπάρχει ενδιαφέρον μελέτης της μετάδοσης τ για L κοντά στο μηδέν αλλά και απ' την εμπειρία που υπήρχε στις εκπομπές καθαρών καύσιμων αερίων, ο Hottel όπως θα αναπτυχθεί ακολούθως εξήγαγε συντελεστές απ' το "μοντέλο αναμιγμένου γκριζου αερίου" που ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις ώστε να υπάρχει γραμμική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της μετάδοσης τ .

Το "μοντέλο αναμιγμένου γκριζου αερίου" έδινε:

$$\tau = \alpha_0 * e^{-\kappa_0 * L} + \alpha_1 * e^{-\kappa_1 * L} + \alpha_2 * e^{-\kappa_2 * L} \quad (25)$$

έχοντας $\kappa_0=0$ (καθαρό συστατικό) και $\kappa_2=\infty$ (μαύρο συστατικό), η σχέση 25 μετασχηματίζεται στην παρακάτω:

$$\tau = \alpha_0 + \alpha_1 * e^{-\kappa * L} \quad (26)$$

Ο Hottel παρατήρησε πως $L \rightarrow 0$ και $\sec z$ (αέρια μάζα) δεν είναι ποτέ μικρότερη του 1.

Για καθαρή ατμόσφαιρα (ορατότητα 23 km) και στο επίπεδο της θάλασσας μια προσαρμογή με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, της σχέσης 24 στις έξι τιμές της αέριας μάζας $\sec z$ του πίνακα 1 έδωσε:

$$\tau = 0,1283 + 0,7548 * e^{-0.3866 * \sec z} \quad (27)$$

Το μέγιστο σφάλμα ήταν 0,25%. Η ευκολότερη προσαρμογή στις αέριες μάζες 1,2 και 3,864 ($z=0^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) έδωσε:

$$\tau = 0,1283 + 0,7559 * e^{-0.3876 * \sec z} \quad (28)$$

Σε αυτή τη σχέση το μέγιστο σφάλμα ήταν 0,26% και ο μέσος όρος σφάλματος 0,14%.

Έχοντας εξάγει αυτά τα πολύ καλά αποτελέσματα, η σχέση 24 με τις σταθερές που αξιώνει εναρμονιζόταν πλήρως, στα δεδομένα του πρότυπου ατμόσφαιρας 1962

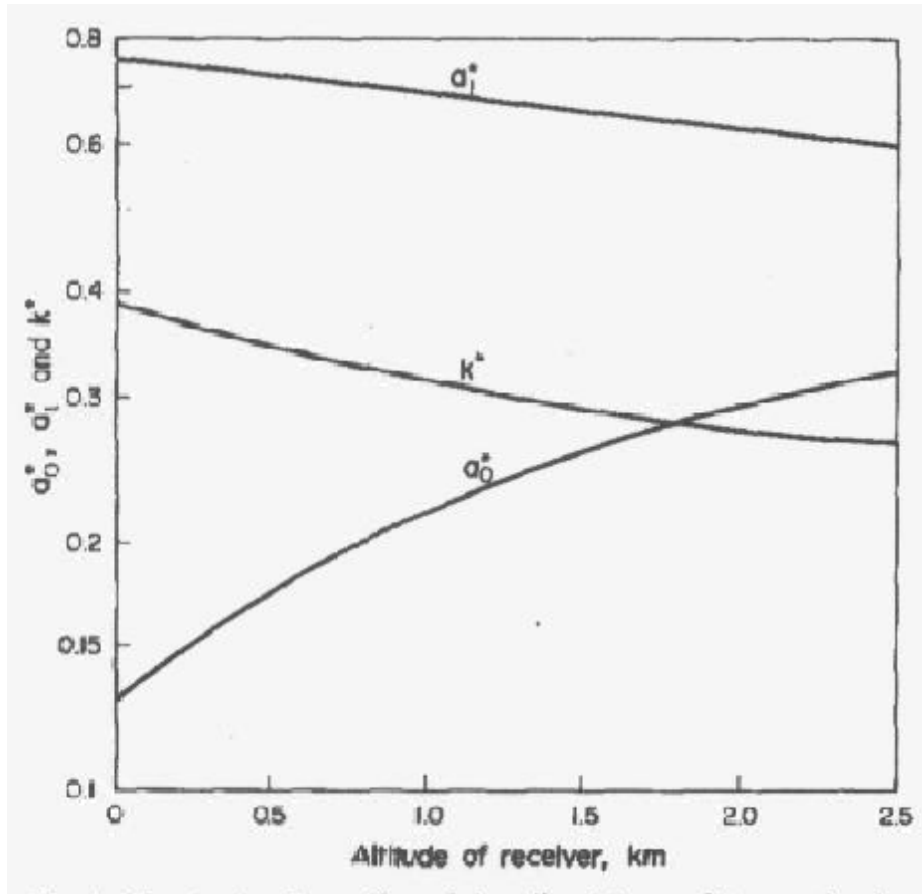
$$\tau = a_0^m + a_1^m e^{-k^m \sec z}$$

Altitude above Sea Level, Km		0	0.5	1	1.5	2	(2.5)
23 Km Haze Model	a_0^m	.1283	.1742	.2195	.2582	.2915	(.320)
	a_1^m	.7559	.7214	.6848	.6532	.6265	(.602)
	k^m	.3878	.3436	.3139	.2910	.2745	(.268)
5 Km Haze Model	a_0^m	.0270	(.063)	.0964	(.126)	(.153)	(.177)
	a_1^m	.8101	(.804)	.7978	(.793)	(.788)	(.784)
	k^m	.7552	(.573)	.4313	(.330)	(.269)	(.249)

z = zenith angle of the sun; τ = direct solar transmittance

Πίνακας 3: Σταθερές προσδιορισμού άμεσης ηλιακής μετάδοσης πρότυπης ατμόσφαιρας 1962, χρησιμοποιώντας την αναγραφόμενη σχέση του πίνακα

Οι σταθερές a_0 , a_1 και k παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 για δύο πρότυπα θολότητας της ατμόσφαιρας και για υψόμετρα ανά διαστήματα 0,5 km από 0 έως 2,5 km. Οι τιμές που εξήχθησαν συμπερασματικά εμφανίζονται σε παρενθέσεις, οι τιμές χωρίς παρενθέσεις χρησιμοποιήθηκαν στη σχέση 26 για τον υπολογισμό της μετάδοσης τ δίνοντας ποσοστό σφάλματος 0,3% σε σχέση με την πρότυπη ατμόσφαιρα 1962. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται γραφικά αυτές οι σταθερές.



Εικόνα 6: Σταθερές προσδιορισμού άμεσης ηλιακής μετάδοσης πρότυπης ατμόσφαιρας 1962 συναρτήσει υψομέτρου

Πέρα απ' τη γραμμική παρεμβολή που μπορεί κανείς να εφαρμόσει στον πίνακα 3 για τον εντοπισμό των τιμών των σταθερών για τα ενδιάμεσα υψόμετρα A, η επίδραση του υψομέτρου στον υπολογισμό των συντελεστών για τα δύο πρότυπα θολότητας εκφράστηκε από τον Hottel με ποσοστό απόκλισης 0,4% μέσω των ακόλουθων σχέσεων, οι οποίες καλύπτουν υψόμετρα μέχρι 2,5 km, όπου A φυσικά το υψόμετρο σε km.

- Καθαρή ατμόσφαιρα-ορατότητα 23 km- στο επίπεδο της θάλασσας

$$\alpha_0 = 0.4237 - 0.00821 * (6-A)^2$$

$$\alpha_1 = 0.5055 + 0.00595 * (6.5-A)^2$$

$$\kappa = 0.2711 + 0.01858 * (2.5-A)^2$$

- Αστική ατμόσφαιρα-ορατότητα 5 km- στο επίπεδο της θάλασσας

$$\alpha_0 = 0.2538 - 0.0063 * (6-A)^2$$

$$\alpha_1 = 0.7678 + 0.001 * (6.5-A)^2$$

$$\kappa = 0.249 + 0.81 * (2.5-A)^2$$

3.5 Βέλτιστη γωνία κλίσης επιπέδου

Έχοντας καταγράψει τις παραπάνω εξισώσεις με όλους τους συνοδευόμενους λογισμούς, προκύπτει πως η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται μία επιφάνεια με κλίση εξαρτάται από το γεωγραφικό της πλάτος, τη γωνία κλίσης και τη χρονική περίοδο. Αυτό σημαίνει ότι για κάποιο χρονικό διάστημα που σε μία επιφάνεια προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία, θα πρέπει να υπάρχει μία γωνία κλίσης (β) της επιφάνειας τέτοια ώστε η ολική ακτινοβολία να είναι μέγιστη.

Η γωνία (β) είναι πολύ σημαντική για τα ηλιακά συστήματα διότι η συλλεκτική τους επιφάνεια τοποθετείται με αυτή τη κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο για να δέχονται το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας και συνεπώς να έχουν τη μέγιστη απόδοση.

Όταν είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η βέλτιστη γωνία (β_{opt}), για κάποιους μήνες του έτους, χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$\beta_{opt} = \Sigma(\beta) / N \quad (29)$$

όπου η μεταβλητή $\Sigma(\beta)$ ισούται με το άθροισμα των βέλτιστων γωνιών κλίσης της επιφάνειας για τους μήνες που μας ενδιαφέρουν. Αντίστοιχα, η μεταβλητή N αντιπροσωπεύει τον αριθμό των μηνών.

Σε αυτό το σημείο έχουμε να παρατηρήσουμε πως επιλέγοντας γωνίες κλίσης μικρότερες των 30 μοιρών, υπάρχει κίνδυνος, ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης, να δημιουργηθεί στρώμα σκόνης στις συλλεκτικές επιφάνειες με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης. Σε αυτήν τη περίπτωση λαμβάνονται μέτρα καθαρισμού των επιφανειών κατά τακτά χρονικά διαστήματα.

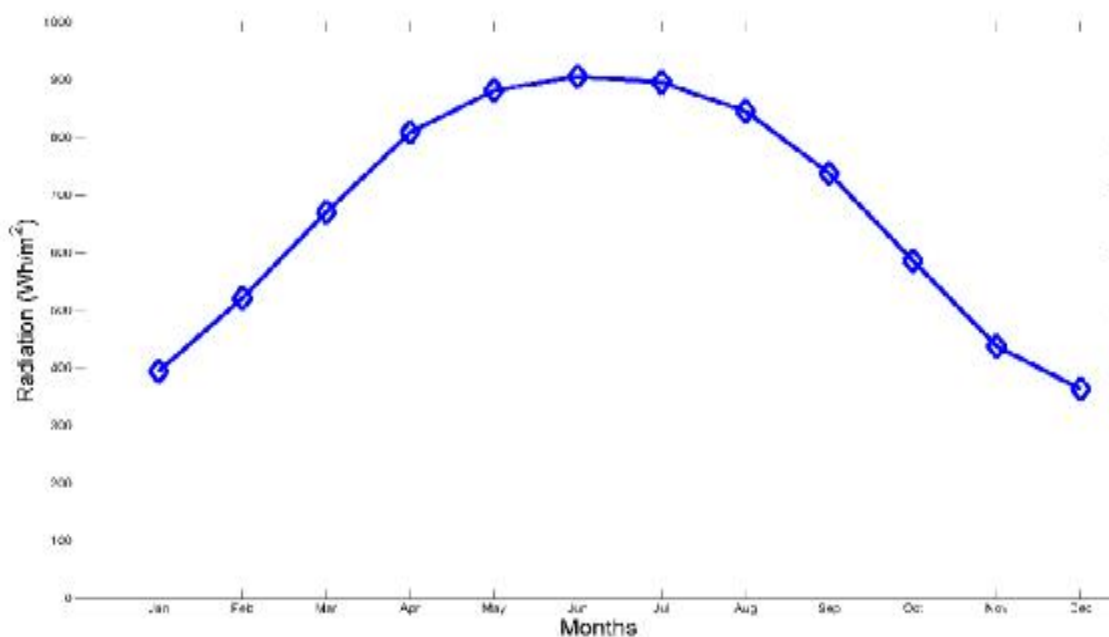
3.6 Εφαρμογή Υπολογισμού Ηλιακής Ακτινοβολίας με χρήση του μοντέλου του Hottel

Στην παρούσα παράγραφο, θα τοποθετηθούν πρακτικά αποτελέσματα συνοδευόμενα από γραφικές παραστάσεις που θα διευκολύνουν τόσο την αναπαράσταση των μετρήσεων μας, αλλά θα διευκολύνουν τόσο την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων όσο και θα ενισχύσουν την εξακρίβωση των υποθέσεων και των θεωρητικών ενδείξεων που προκύψανε από τα αναφερόμενα παραπάνω στοιχεία.

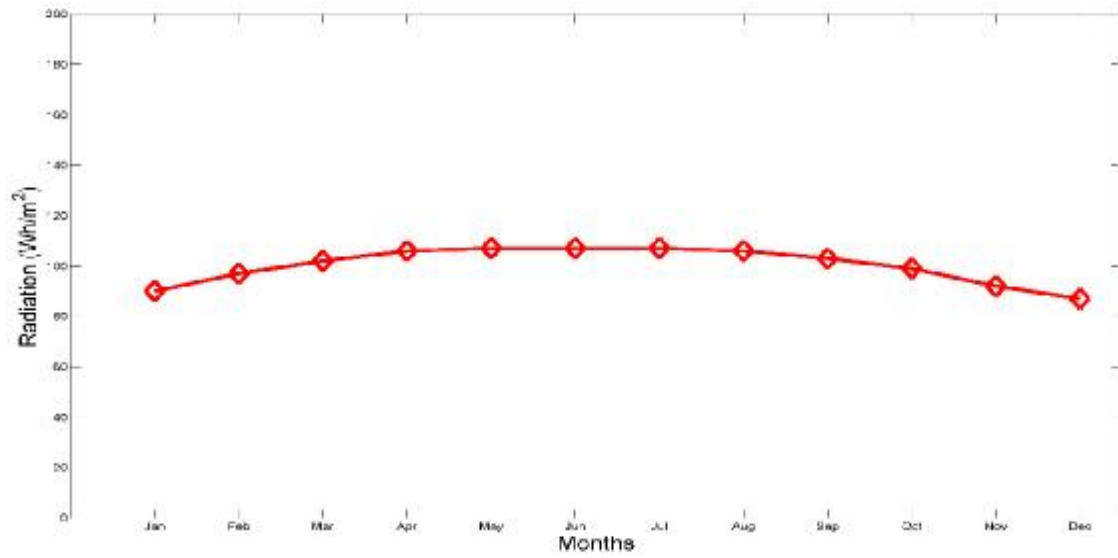
Επομένως, ακολουθεί μια εφαρμογή του μοντέλου του HOTTTEL για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας την 20η ημέρα κάθε μήνα του έτους κατά την 12η ηλιακή ώρα στη περιοχή της Πάτρας με γεωγραφικό πλάτος $\phi = 38.15$ για οριζόντιο επίπεδο καθώς και για κλίσεις 30° , 45° και 60° . Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις συγκεκριμένες μετρήσεις :

Πίνακας 1: Αποτελέσματα εφαρμογής μοντέλου Hottel για ένα έτος

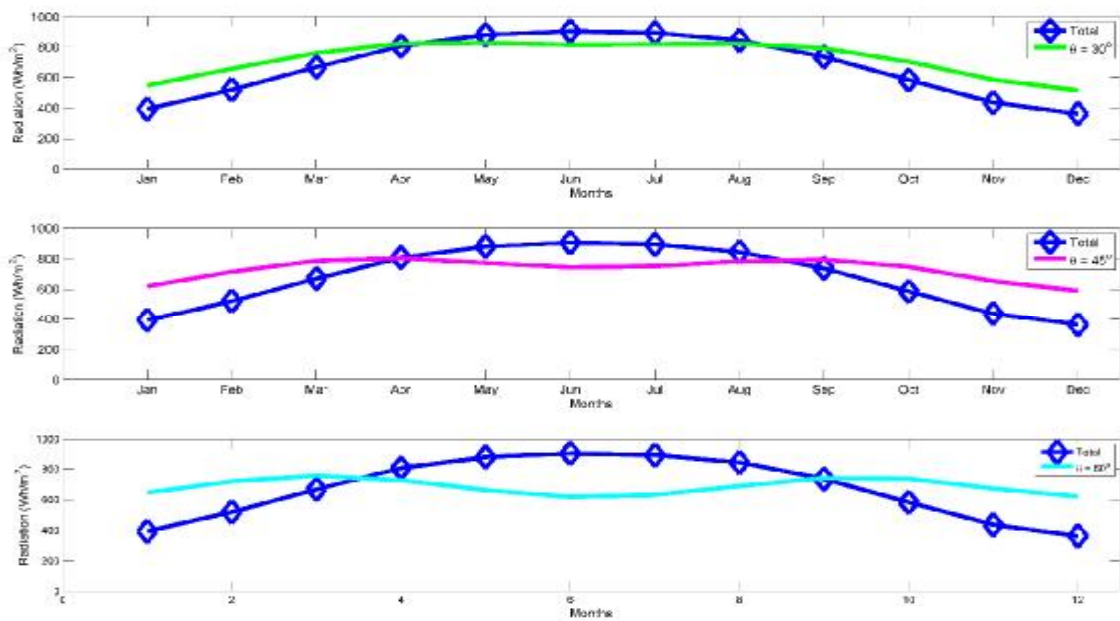
Μήνας (Α/Α)	Ολική Ακτινοβολία	Διάχυτη Ακτινοβολία	Ολική Ακτινοβολία ($\varphi = 30^\circ$)	Ολική Ακτινοβολία ($\varphi = 45^\circ$)	Ολική Ακτινοβολία ($\varphi = 60^\circ$)
(Μονάδες μέτρησης)	(W/m^2)	(W/m^2)	(W/m^2)	(W/m^2)	(W/m^2)
1 – Ιανουάριος	394	90	548	619	648
2 – Φεβρουάριος	521	97	659	715	722
3 – Μάρτιος	670	102	763	787	758
4 – Απρίλιος	808	106	824	804	729
5 – Μάιος	881	107	829	773	665
6 – Ιούνιος	905	107	817	744	620
7 – Ιούλιος	895	107	819	751	633
8 – Αύγουστος	845	106	824	784	691
9 – Σεπτέμβριος	737	103	793	795	744
10 – Οκτώβριος	585	99	705	747	739
11 – Νοέμβριος	437	92	586	653	675
12 – Δεκέμβριος	363	87	517	590	623



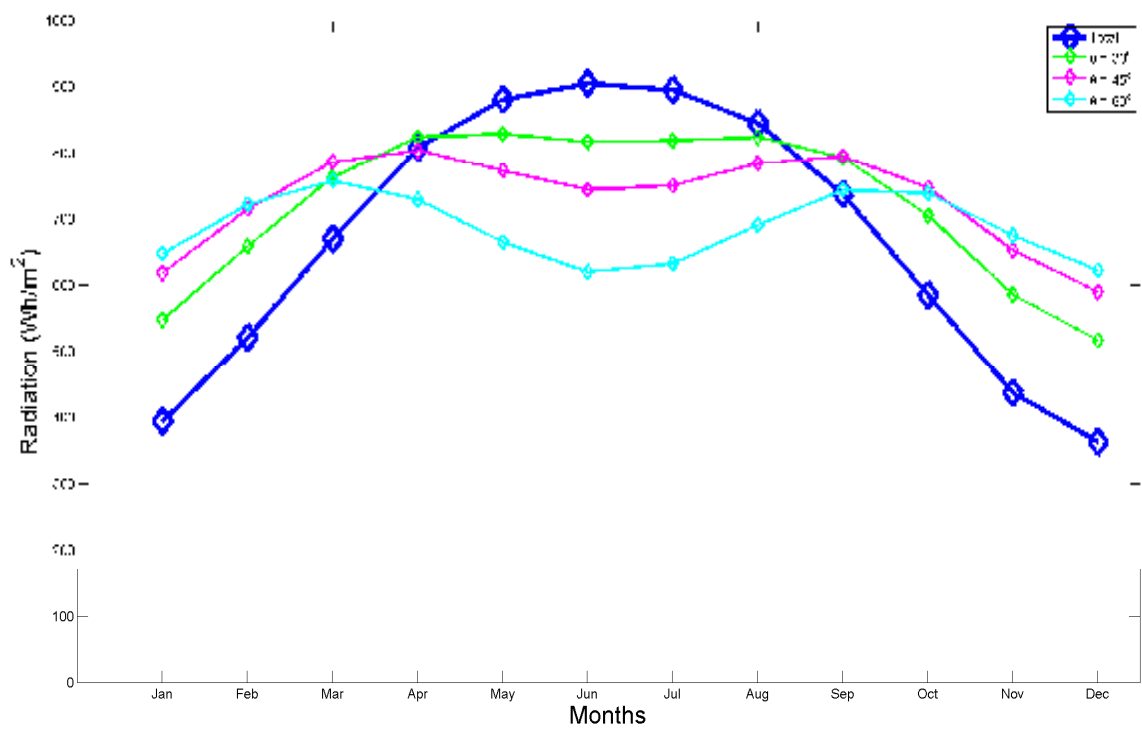
Εικόνα 7: Ολική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα 8: Διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο



Εικόνα 9: Αποτύπωση των ακτινοβολιών ανά διαφορετική γωνία επιπέδου σε σχέση με ολική ακτινοβολία σε οριζόντιόν επίπεδο

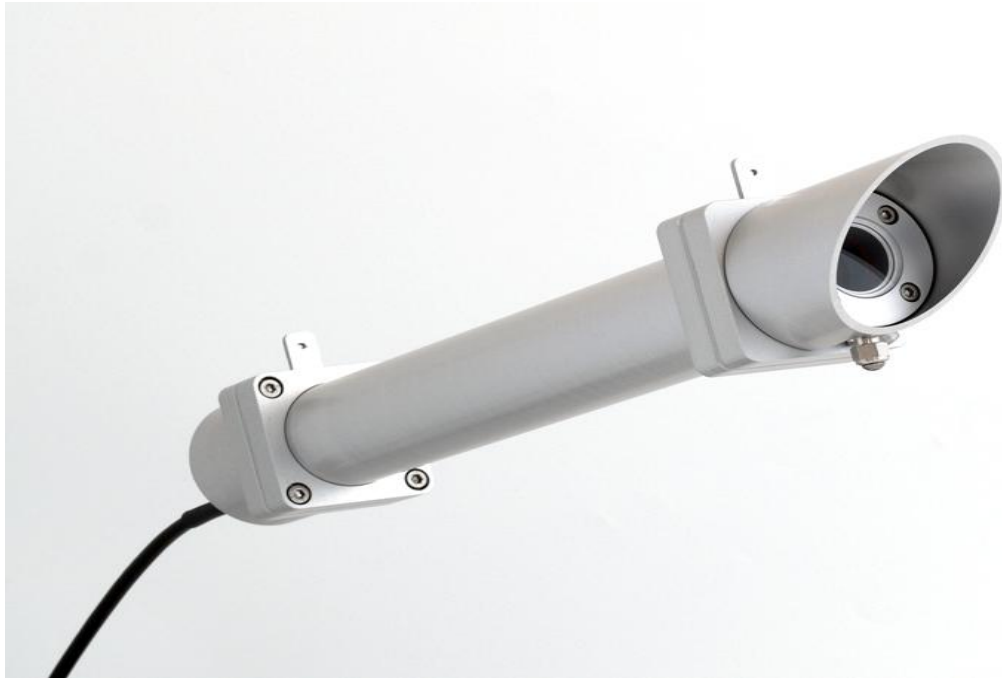


Εικόνα 10: Συνολικό διάγραμμα ολικών ακτινοβολιών

Ακολουθούν δύο εικόνες των τυπικών οργάνων μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας:



Εικόνα 11: Οπτικοποίηση πυρανομέτρου



Εικόνα 12: Οπτικοποίηση πυρηλιόμετρον

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα παράγραφο, θα γίνει αναφορά στη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων στα πλαίσια της εξεταζόμενης εργασίας που θα εξειδικευτεί στα πλαίσια της περιοχής της Πάτρας. Πιο συγκεκριμένα, οι διάφοροι μετεωρολογικοί σταθμοί της χώρας μας, οι οποίοι βρίσκονται κατανομημένοι σε κατατοπιστικά σημεία, προσφέρουν πλήθος δεδομένων για τα επιθυμητά από τον εκάστοτε χρήστη χρονικά διαστήματα. Αυτά εξάγονται σε απλή μορφή πινάκων, παρέχοντας άνεση κατά τη διαχείριση τους από πλειάδα εφαρμογών, με σκοπό να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους εκάστοτε ενδιαφερόμενους, ανεξαρτήτως ύπαρξης μεγάλης εξειδίκευσης και τεχνικών γνώσεων ή μη, για τη διεκπεραίωση υπολογιστικών μοντέλων και πραγματοποίηση σχετικών προβλέψεων.

Για την κατασκευή και την ομαλή λειτουργία ηλιακών σταθμών αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο αλλά και σε κεκλιμένο επίπεδο καθώς και τις ώρες ηλιοφάνειας για την κάθε μία εξεταζόμενη γεωγραφική περιοχή/ζώνη.

Πέρα από τα υφιστάμενα μετεωρολογικά δεδομένα μπορούμε να γνωρίζουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μία γεωγραφική περιοχή υπολογίζοντας την μέσα από μοντέλα εξισώσεων που είναι κοινά αποδεκτά από την επιστημονική κοινότητα. Τα μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να λειτουργήσουν με απλά δεδομένα εισόδου και δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς να έχουν μεγάλη μαθηματική πολυπλοκότητα. Είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τις μελέτες εγκατάστασης ηλιακών συστημάτων σε περιοχές που για κάποιους λόγους δεν υπάρχουν μετεωρολογικά δεδομένα ή ίσως αυτά που υπάρχουν δεν είναι ικανοποιητικά.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι για το βέλτιστο σχεδιασμό των ενεργητικών ή παθητικών ηλιακών συστημάτων πρέπει να είναι γνωστή η ένταση των διαφόρων μορφών της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και σε επίπεδα με διάφορες κλίσεις.

Προχωρώντας στην πράξη, το τρέχον μοντέλο υπολογισμού που αναπτύσσουμε έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει τις εντάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας τόσο σε οριζόντιο όσο και σε κεκλιμένο επίπεδο. Λόγω ότι είναι ρυθμισμένο στα πλαίσια λειτουργίας του γνωστότερου προγράμματος επεξεργασίας λογιστικών φύλλων (Microsoft Excel), είναι σε θέση να αποδώσει σε μικρό χρόνο διάστημα ακριβή αποτελέσματα, τόσο για μια δεδομένη χρονική στιγμή όσο και για ένα επιθυμητό χρονικό διάστημα.

4.2 Περιγραφή του Μοντέλου Hottel

Έχοντας πλέον αναφερθεί στις εξισώσεις και τις συσχετίσεις που υπάρχουν στο υπολογιστικό μοντέλο του του HOTTTEL, απομένει η υλοποίηση του μέσω της επιλεγμένης πλατφόρμας και η εφαρμογή του για τα δεδομένα που έχουν συλλεχτεί, τόσο για το σενάριο

πρόβλεψης της έντασης της άμεσης, διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο αλλά και σε κεκλιμένο επίπεδο.

Το μοντέλο αυτό περιγράφεται αναλυτικά - από τις εξισώσεις (8 έως 21) για οριζόντιο επίπεδο και (22 έως 23) για κεκλιμένο επίπεδο στο κεφάλαιο 3.

Έχοντας μελετήσει τις παραπάνω εξισώσεις, προχωρούμε στη κωδικοποίηση τους στο πρόγραμμα διαχείρισης λογιστικών φύλλων και αναπτύσσουμε ένα αλγόριθμο υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο καθώς και σε κεκλιμένο.

Σημειώνεται ότι οι υπολογισμοί γίνονται για κάθε ηλιακή ώρα (6^{h} έως 18^{h}) κατά τη διάρκεια της $15^{\text{ης}}$ ημέρας κάθε μήνα για οριζόντιο επίπεδο και για επίπεδο οποιασδήποτε κλίσης και προσανατολισμού και μετά προκύπτουν αντίστοιχα οι παραπάνω υπολογισμοί για κάθε μήνα και τελικά για όλο το έτος.

Ο υπολογισμός γίνεται για πλήρη ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας καθώς και για καθαρή ατμόσφαιρα (ορατότητα 23 km).

4.2.1 Υπολογισμός Ημερήσιας Ηλιακής Ενέργειας

Λαμβάνοντας υπόψιν πως έχουν πραγματοποιηθεί οι υπολογισμοί έως τώρα της έντασης της άμεσης ακτινοβολίας $I_{b,n}$ [W/m^2], της διάχυτης ακτινοβολίας $I_{d,h}$ [W/m^2] και της ολικής ακτινοβολίας $I_{t,h}$ [W/m^2] για οριζόντιο επίπεδο και της ολικής ακτινοβολίας σε επίπεδο οποιασδήποτε κλίσης $I_{b,a}$ [W/m^2] για κάθε ηλιακή ώρα, προχωρούμε στον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ενέργειας $I_{t,h}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$], της άμεσης ηλιακής ενέργειας $I_{b,n}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$] καθώς και της διάχυτης ηλιακής ενέργειας $I_{d,h}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$] σε οριζόντιο επίπεδο και της ολικής ηλιακής ενέργειας για κεκλιμένο επίπεδο $I_{b,a}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$] για κάθε μέρα. Αυτό επιτυγχάνεται με ολοκλήρωση των αντίστοιχων εντάσεων της ακτινοβολίας κάθε ηλιακής ώρας στη διάρκεια της ημέρας για την οποία ενδιαφερόμαστε να υπολογίσουμε την αντίστοιχη ενέργεια.

4.2.2 Υπολογισμός Μηνιαίας Ηλιακής Ενέργειας

Έχοντας υπολογίσει προηγουμένως την ημερήσια ολική ηλιακή ενέργεια $I_{t,h}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$] καθώς και την ημερήσια διάχυτη ηλιακή ενέργεια $I_{d,h}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$] σε οριζόντιο επίπεδο καθώς και την ημερήσια ολική ηλιακή ενέργεια σε κεκλιμένο $I_{b,a}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$] υπολογίζουμε τις αντίστοιχες μηνιαίες ηλιακές ενέργειες [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{month}$]. Επομένως, ενεργούμε αναλόγως για κάθε ημερήσια ηλιακή ενέργεια του μήνα που μας αφορά κάθε φορά.

4.2.3 Υπολογισμός Ετήσιας Ηλιακής Ενέργειας

Έχοντας υπολογίσει προηγουμένως την μηνιαία ολική ηλιακή ενέργεια $I_{t,h}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{month}$], την μηνιαία διάχυτη ηλιακή ενέργεια $I_{d,h}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{month}$] σε οριζόντιο επίπεδο καθώς και τη μηνιαία ολική ηλιακή ενέργεια σε κεκλιμένο $I_{b,a}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{month}$] απομένει ο υπολογισμός των αντίστοιχων τιμών της ετήσιας ηλιακής ενέργειας [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{year}$].

4.2.4 Υπολογισμός Συντελεστών Κλίσης

Υπολογίζοντας την ημερήσια ολική ηλιακή ενέργεια σε οριζόντιο επίπεδο $I_{t,h}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$] και την ημερήσια ολική ηλιακή ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο $I_{b,\alpha}$ [$\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$] μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή R που συνδέει τις ενέργειες αυτές μεταξύ τους. Η σχέση που δίνει τη τιμή του συντελεστή R είναι η ακόλουθη:

$$R = I_{b,\alpha} [\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}] / I_{t,h} [\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{day}] \quad (30)$$

Από τον τρόπο που προκύπτει ο συντελεστής R , συμπεραίνουμε ότι εξαρτάται από το μήνα και την κλίση. Συνεπώς, ο υπολογισμός της ολικής ενέργειας για κεκλιμένο επίπεδο έγκειται στον ακόλουθο τύπο:

$$I_{b,\alpha} = I_{t,h} \cdot R [\text{kWh}/\text{m}^2] \quad (31)$$

Όταν ο συντελεστής R για μία κλίση είναι μεγαλύτερος της μονάδας ($R > 1$) η κλίση είναι συμφέρουσα ενώ όταν είναι μικρότερος ($R < 1$) η κλίση δεν είναι συμφέρουσα. Από την μελέτη των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι οι κλίσεις είναι συμφέρουσες κατά τους χειμερινούς μήνες και όχι κατά τους εαρινούς.

4.3 Περιγραφή Λειτουργίας του Υπολογιστικού Μοντέλου

Για τη λειτουργία του υπολογιστικού μοντέλου απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων εισόδου τα οποία είναι:

- Γεωγραφικό πλάτος (ϕ): Το γεωγραφικό πλάτος της εκάστοτε γεωγραφικής περιοχής σε μοίρες.
- Ημέρα μήνα (N): Ο αύξων αριθμός της ημέρας του μήνα $\in [1, 30]$.
- Υψόμετρο (A): Το υψόμετρο στο οποία θα τοποθετηθεί ο συλλέκτης σε km.
- Κλίση επιφάνειας (β): Η κλίση στην οποία προβλέπεται να τοποθετηθεί ο συλλέκτης σε μοίρες. Προσοχή πως το τρέχον πρόγραμμα πραγματοποιεί υπολογισμούς και για κλίσεις μεγαλύτερες κατά 15° καθώς και 30° από την κλίση που εμείς εισάγουμε.
- Γωνία αζιμούθιου επιφάνειας (γ): Η γωνία που σχηματίζει ο προσανατολισμός του συλλέκτη σε σχέση με το βόρειο πόλο. Προτείνεται νότιος προσανατολισμός για συλλέκτες που τοποθετούνται στο βόρειο ημισφαίριο ($\gamma = 180^\circ$)

Αφού έχουμε προσδιορίσει τα παραπάνω δεδομένα, έχουμε πλέον καθορίσει τα δεδομένα εισόδου. Εν συνεχεία, επεξεργαζόμαστε τα δεδομένα μας στο περιβάλλον του Matlab και αποκτάμε τις ακόλουθες πληροφορίες :

- Τις θεωρητικές μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας (ht). Όπως αναφέρθηκε θεωρούμε ότι όλες οι ηλιακές ώρες (ts) χαρακτηρίζονται από πλήρη ηλιοφάνεια.
- Τις ημερήσιες τιμές της ολικής ηλιακής ενέργειας ($I_{t,h}$ daily) καθώς και της διάχυτης ηλιακής ενέργειας ($I_{d,h}$ daily) στο οριζόντιο επίπεδο.
- Τις μηνιαίες τιμές της ολικής ηλιακής ενέργειας ($I_{t,h}$ monthly) καθώς και της διάχυτης ηλιακής ενέργειας ($I_{d,h}$ monthly) στο οριζόντιο επίπεδο.
- Τις ημερήσιες τιμές της ολικής ηλιακής ενέργειας ($I_{b,a}$ daily) στο κεκλιμένο επίπεδο που έχουμε επιλέξει.
- Τις μηνιαίες τιμές της ολικής ηλιακής ενέργειας ($I_{b,a}$ monthly) στο κεκλιμένο επίπεδο που έχουμε επιλέξει.
- Το συντελεστή R που συνδέει τη μηνιαία ολική ηλιακή ενέργεια του επιπέδου κλίσης με αυτή του οριζόντιου.
- Τις ετήσιες τιμές όλων των ειδών της ηλιακής ενέργειας που αναφέρθηκαν παραπάνω.

4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ακολουθούν πειραματικά αποτελέσματα γραφικές παραστάσεις και σχολιασμοί που επιβεβαιώνουν τη σπουδαία χρησιμότητα εφαρμογής των υπολογιστικών μοντέλων που εξομοιώνουν την πρόβλεψη ακτινοβολίας ανά γεωγραφική περιοχή/ζώνη, με σκοπό τη βέλτιστη εκμετάλλευση των υπαρχόντων διατάξεων απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και το σχηματισμό σωστής απόφασης σχετικά με την εγκατάσταση ενός νέου αντίστοιχου μηχανισμού, αν φυσικά συνδυαστούν τα εξαγόμενα δεδομένα με οικονομικές προβλέψεις και ληφθούν υπόψιν σχετικές εισροές/εκροές.

Εξαίσιος σημασίας παράγοντας αποτελεί το γεγονός πως η ημερήσια ολική ακτινοβολία μεταβάλλεται αναλόγως την εποχή και το μήνα. Η μεταβολή αυτή προκύπτει από την αλλαγή της σχετικής θέσης του ήλιου ως προς τη γη καθώς και στη φυσιολογική μεταβολή των καιρικών φαινομένων ανάλογα με την εποχή του έτους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η έντονη παρουσία νεφών αλλά και έντονα τοπικά φαινόμενα που είναι δύσκολο να προβλεφθούν, όπως η παρουσία και η μεταφορά σκόνης από γειτονικές χώρες.

Η επίδραση της σχετικής θέσης του ήλιου στην ηλιακή ακτινοβολία είναι καθορισμένη και λαμβάνεται υπόψη από το μοντέλο HOTTTEL που βρίσκεται στην καρδιά του εφαρμοζόμενου υπολογιστικού μοντέλου. Αντίθετα, η παρουσία νεφών είναι στοχαστικός παράγοντας και δεν λαμβάνεται υπόψη από αυτό, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί οι υπολογισμοί γίνονται για πλήρως ανέφελο ουρανό. Φυσικά αυτό το γεγονός θα μπορούσε να

ληφθεί υπόψιν σε επεκτάσεις του εργαλείου πρόβλεψης μας, κυρίως για εφαρμογές που εμπεριέχουν και οικονομικοτεχνικές αναλύσεις ή/και βλέψεις.

Επομένως, οι υπολογισμοί που θα αποτυπωθούν στις επόμενες υποπαραγράφους έχουν εκτελεστεί χωρίς να ληφθεί η παρουσία νεφών στην ατμόσφαιρα. Αναμένουμε επομένως κάποια απόκλιση, έχοντας κατά νου πως οι δικές μας τιμές θα είναι πιο ανακριβείς από την ρεαλιστική περίπτωση ως προς τα πάνω, επιστρέφοντας δηλαδή περισσότερο αισιόδοξες απορροφήσεις ηλιακής ακτινοβολίας.

4.4.1 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας - Εξομοίωσης

Αποκτώντας τη σχετική τιμή της ηλιακής ενέργειας που υπολογίσαμε από το μοντέλο που αναπτύξαμε - η οποία είναι για τελείως ανέφελο ουρανό - θα εισαχθεί μία μέθοδος σύμφωνα με την οποία θα γίνει προσπάθεια να προβλεφθεί ποια θα είναι τελικά η ηλιακή ενέργεια λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα της νέφωσης και της θολότητας της ατμόσφαιρας.

Η μεγαλύτερη δυσκολία της παρούσας προσπάθειας έγκειται στο γεγονός πως για κάθε γεωγραφική περιοχή για την οποία ενδιαφερόμαστε να μελετήσουμε, τα μετεωρολογικά της δεδομένα είναι περιορισμένα και γνωρίζουμε μόνο τις ώρες ηλιοφάνειας της περιοχής αυτής που μετρούνται μέσω ειδικού οργάνου (ηλιογράφος Campbell-Stokes).

Αναπτύσσοντας τη μέθοδο πρόβλεψης δείχνουμε την ακρίβεια την οποία θα έχουμε συγκρίνοντας την ηλιακή ενέργεια που θα προβλέψουμε, για διάφορες ενδεικτικές περιοχές, με αυτή που δίνουν τα υφιστάμενα μετεωρολογικά δεδομένα για τις περιοχές αυτές.

Σημειώνουμε οι μετρήσεις των μετεωρολογικών δεδομένων έγιναν από την Ε.Μ.Υ (Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία) , όμως ως πηγή για την εκπόνηση της εργασίας μας θεωρείται η ιστοσελίδα του Κ.Α.Π.Ε , αφού τα υφιστάμενα μετεωρολογικά δεδομένα έχουν αντληθεί από εκεί.



4.4.2 Παράθεση Μεθόδου Πρόβλεψης

Ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι η συννεφιά.

Επομένως η ολική ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζεται άμεσα λαμβάνοντας υπόψη τη νέφωση που επικρατεί σε μια περιοχή.

Όπως γνωρίζουμε η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία αυτή που φτάνει στην επιφάνεια της γης και η οποία προέρχεται απ' ευθείας απ' τον ήλιο. Στην περίπτωση όμως που υπάρχει νέφωση η άμεση ακτινοβολία υφίσταται διασπορά απ' τα σύννεφα και προκαλείται σε αρκετά μεγάλο βαθμό μείωση της τιμής που τελικά φτάνει στην επιφάνεια της γης,

Δηλαδή συμπεραίνουμε ότι η άμεση ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης μειώνεται σημαντικά όταν υπάρχει συννεφιά, βλέπουμε συνεπώς ότι υπάρχει άμεση σχέση νέφωσης και άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης και της οποίας η κατεύθυνση έχει υποστεί αλλαγές από ανάκλαση και διασπορά στην ατμόσφαιρα.

Η διάχυτη ακτινοβολία δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση με την οποία προσπίπτει στις επιφάνειες και αποτελεί τη βάση στη σύνθεση της ηλιακής ακτινοβολίας αφού τις μέρες με νέφωση η ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια είναι η διάχυτη η οποία προσπίπτει επίσης και κατά τις ημέρες χωρίς νέφωση μαζί με την άμεση ακτινοβολία.

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης. Όπως είδαμε πριν η άμεση ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται σε μεγάλο βαθμό όταν επικρατεί συννεφιά συνεπώς θα μειώνεται και η ολική ακτινοβολία. Υπάρχει δηλαδή εξάρτηση της έντασης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας απ' τη συννεφιά.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν παραπάνω οδηγούμαστε λοιπόν στην ανάγκη να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά της νέφωσης και να δούμε πώς αυτά θα μας οδηγήσουν στον υπολογισμό της ηλιακής ενέργειας που είναι πραγματικά διαθέσιμη σε μια περιοχή.

Για να μελετήσουμε τον παράγοντα της νέφωσης σε οποιαδήποτε περιοχή πρέπει να γνωρίζουμε τις ώρες ηλιοφάνειας για την περιοχή αυτή. Στη συγκεκριμένη εργασία λαμβάνουμε, ως πηγή των ωρών ηλιοφάνειας κάθε περιοχής, τα δεδομένα του Κ.Α.Π.Ε.

Τα παραπάνω δεδομένα αφορούν τις πειραματικές μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας κάθε περιοχής κατά τη διάρκεια του έτους όπως αυτές μετρήθηκαν από το Κ.Α.Π.Ε. . Το δικό μας ενδιαφέρον στρέφεται στο βασικότερο χαρακτηριστικό της νέφωσης, θέλουμε δηλαδή να γνωρίζουμε πόσες ώρες συννεφιάς επικρατούν κατά τη διάρκεια κάθε μήνα στην εκάστοτε περιοχή που μελετάμε.

Έχουμε γνωστές τις μηνιαίες θεωρητικές ώρες ηλιοφάνειας που προκύπτουν απ' το υπολογιστικό μας μοντέλο (Hottel). Οι θεωρητικές ώρες ηλιοφάνειας κάθε μήνα δεν

λαμβάνουν υπόψη τη συννεφιά, δηλαδή μας δείχνουν πόσες ώρες ανά μήνα θα επικρατούσε ηλιοφάνεια στην περίπτωση που δεν θα υπήρχε νέφωση.

Γνωρίζουμε απ' τα δεδομένα του Κ.Α.Π.Ε. τις πειραματικές μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας για κάθε περιοχή οι οποίες είναι μειωμένες σε σχέση με τις μηνιαίες θεωρητικές ώρες ηλιοφάνειας διότι λαμβάνουν υπόψη τις ώρες συννεφιάς που επικρατούν κάθε μήνα. Συνεπώς αν αφαιρέσουμε απ' τις μηνιαίες θεωρητικές ώρες ηλιοφάνειας (h_t) τις πειραματικές μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας (h_s) μπορούμε να υπολογίσουμε τις ώρες συννεφιάς (h_c) που επικρατούν κάθε μήνα.

$$h_c = h_t - h_s \text{ (hours) (31)}$$

Όπως είδαμε παραπάνω η άμεση ακτινοβολία που τελικά φτάνει στην επιφάνεια της γης μειώνεται σημαντικά όταν επικρατεί συννεφιά αφού επηρεάζεται από αυτήν λόγω διασποράς που υφίσταται. Το ποσοστό μείωσης της μηνιαίας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας είναι ανάλογο με το ποσοστό των ωρών συννεφιάς που επικρατούν κάθε μήνα. Το παραπάνω ισχύει αρκεί να υποθέσουμε ότι το ποσοστό συννεφιάς είναι κατανομημένο ισόποσα κατά τη διάρκεια κάθε ηλιακής ώρας της ημέρας για κάθε ημέρα του μήνα.

Εμείς έχουμε υπολογίσει απ' το υπολογιστικό μας μοντέλο (Hottel) την θεωρητική άμεση ηλιακή ενέργεια κάθε μήνα ($I_{b,n}$) την οποία θα συλλέγαμε αν δεν υπήρχε καθόλου συννεφιά. Έτσι αν απ' την μηνιαία θεωρητική άμεση ηλιακή ενέργεια αφαιρέσουμε ένα ποσοστό ίσο με αυτό των ωρών συννεφιάς ($\%h_c$) που επικρατούν τον αντίστοιχο μήνα τελικά προκύπτει η προβλεπόμενη μηνιαία άμεση ηλιακή ενέργεια ($I_{b,n'}$) η τιμή της οποίας τελικά είναι αυτή που φτάνει στην επιφάνεια της γης έχοντας λάβει υπόψη τη συννεφιά.

Ο υπολογισμός του ποσοστού των ωρών συννεφιάς για κάθε μήνα δίνεται απ' την ακόλουθη σχέση:

$$\%h_c = (h_t - h_s / h_t) * 100 \text{ (32)}$$

Ακολούθως για τον υπολογισμό της προβλεπόμενης μηνιαίας άμεσης ηλιακής ενέργειας ($I_{b,n'}$) έχουμε:

$$I_{b,n'} = I_{b,n} - [(\%h_c / 100) * I_{b,n}] \text{ (KWh/m}^2 \text{ *month) (33)}$$

Προχωρώντας στον υπολογισμό της ολικής ηλιακής ενέργειας πρέπει να σκεφτούμε ότι αυτή προκύπτει απ' το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης. Συνεπώς, αν για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιήσουμε την προβλεπόμενη μηνιαία άμεση ηλιακή ακτινοβολία ($I_{b,n'}$) καθώς και την θεωρητική μηνιαία διάχυτη ηλιακή ενέργεια ($I_{d,h}$) που προκύπτει απ' το υπολογιστικό μας μοντέλο (Hottel) τότε η ολική μηνιαία ηλιακή ενέργεια που υπολογίζεται μπορεί να ονομασθεί προβλεπόμενη ($I_{t,h'}$) η οποία λαμβάνει υπόψη τη νέφωση διότι προκύπτει απ' την προβλεπόμενη μηνιαία άμεση ηλιακή ενέργεια ($I_{b,n'}$) η οποία με τη σειρά της έχει λάβει υπόψη τη συννεφιά καθώς και απ' την μηνιαία θεωρητική διάχυτη ενέργεια ($I_{d,h}$) του υπολογιστικού μοντέλου (Hottel) η οποία όπως έχουμε αναφέρει δεν επηρεάζεται απ' τη νέφωση.

Προχωρώντας στον υπολογισμό της προβλεπόμενης μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας ($I_{t,h'}$) πρέπει να υπολογίσουμε τον παράγοντα της γωνίας ζενίθ ($\cos\theta_z$) για κάθε μήνα ξεχωριστά. Η ολική ηλιακή ενέργεια δίνεται απ' τη σχέση ($I_{t,h} = I_{b,n} * \cos\theta_z + I_{d,h}$) άρα έχουμε:

$$\cos\theta_z = (I_{t,h} - I_{d,h}) / I_{b,n} \text{ (34)}$$

Οι τιμές (It,h)-(Id,h)-(Ib,n) πρέπει να είναι μηνιαίες και υπολογίζονται αυτομάτως απ' το υπολογιστικό μας μοντέλο (Hottel) το ίδιο και ο παράγοντας της γωνίας ζενίθ ($\cos\Theta_z$) για κάθε μήνα ξεχωριστά.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την προβλεπόμενη μηνιαία ολική ηλιακή ενέργεια ($I_{t,h'}$) συνθέτοντας την προβλεπόμενη μηνιαία άμεση ($I_{b,n'}$) με την θεωρητική μηνιαία διάχυτη ($I_{d,h}$) απ' το υπολογιστικό μας μοντέλο.

$$I_{t,h'} = I_{b,n'} * \cos\Theta_z + I_{d,h} \text{ (KWh/m}^2 \text{ *month)} \quad (35)$$

Σε αυτό το σημείο έχουμε υπολογίσει με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε την προβλεπόμενη μηνιαία ολική ηλιακή ενέργεια που προβλέπεται ότι είναι πραγματικά διαθέσιμη σε μια περιοχή.

Στη συνέχεια είναι απαραίτητο να γίνει έλεγχος της ακρίβειας που υπάρχει στον υπολογισμό της προβλεπόμενης αυτής ενέργειας.

Για τον λόγο αυτό συγκρίνουμε την προβλεπόμενη μηνιαία ολική ηλιακή ενέργεια ($I_{t,h'}$) με την πειραματική μηνιαία ολική ηλιακή ενέργεια ($I_{t,hs}$) που έχουμε διαθέσιμη απ' τα μετεωρολογικά δεδομένα του Κ.Α.Π.Ε.

Αυτό επιτυγχάνεται υπολογίζοντας το ποσοστό απόκλισης Π.Α. για κάθε μήνα το οποίο έχει η προβλεπόμενη ολική ενέργεια ($I_{t,h'}$) απ' την πειραματική ολική ενέργεια ($I_{t,hs}$) που μετράει το Κ.Α.Π.Ε. και η οποία είναι πραγματικά διαθέσιμη σε μια περιοχή.

$$\text{Π.Α.}\% = [(I_{t,hs} - I_{t,h'}) / I_{t,hs}] * 100 \quad (36)$$

Επίσης προχωρούμε και στον υπολογισμό του ετήσιου μέσου όρου του Π.Α.% . Ο ετήσιος μέσος όρος προκύπτει απ' το άθροισμα των -Π.Α.- κάθε μήνα προς το σύνολο των μηνών του έτους:

$$\text{Μ.Ο.} = \Sigma[\text{Π.Α.}\%] / 12 \quad (37)$$

Έχοντας υπολογίσει το Π.Α. της προβλεπόμενης μηνιαίας ολικής ηλιακής ενέργειας ($I_{t,h'}$)

σε σχέση με την πειραματική ($I_{t,hs}$) στρεφόμαστε σε προσπάθεια μείωσης του ώστε να προσεγγίσουμε όσο το δυνατόν γίνεται, με τα περιορισμένα μετεωρολογικά δεδομένα που θα έχουμε γνωστά, την πειραματική ολική ηλιακή ενέργεια που τελικά μετράει το Κ.Α.Π.Ε.

Έχοντας πλέον στραφεί σε αυτήν την κατεύθυνση εξετάζουμε λεπτομερώς τα μετεωρολογικά δεδομένα του Κ.Α.Π.Ε. που έχουμε στη διάθεσή μας και παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις στη μηνιαία διάχυτη ενέργεια ($I_{d,hs}$) έχουν απόκλιση από τη μηνιαία διάχυτη ενέργεια ($I_{d,h}$) που υπολογίσαμε με βάση το υπολογιστικό μας μοντέλο.

Αυτή η διαφορά στις μετρήσεις επηρεάζει το -Π.Α.- της προβλεπόμενης ολικής ενέργειας ($I_{t,h'}$) σε σχέση με την ολική ενέργεια που μετρά το Κ.Α.Π.Ε. ($I_{t,hs}$).

Από εφαρμογές που έγιναν συμπεραίνουμε ότι αν χρησιμοποιήσουμε τη μηνιαία διάχυτη ενέργεια που μετρά το Κ.Α.Π.Ε. ($I_{d,hs}$) αντί της διάχυτης ενέργειας που υπολογίζει το υπολογιστικό μας μοντέλο (Hottel), τότε το -Π.Α.- μειώνεται σε μεγάλο βαθμό.

Έτσι προκύπτει η νέα προβλεπόμενη μηνιαία ολική ενέργεια ($I_{t,h''}$).

$$I_{t,h''} = I_{b,n'} * \cos\Theta_z + I_{d,hs} \text{ (KWh/m}^2 \text{ *month)} \quad (38)$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε και το μειωμένο αυτή τη φορά -Π.Α.- ανάμεσα στην ($I_{t,h''}$) και την ($I_{t,hs}$).

$$\text{Π.Α.}\% = [(I_{t,hs} - I_{t,h'}) / I_{t,hs}] * 100 \quad (39)$$

Ο ετήσιος μέσος όρος προκύπτει από το άθροισμα των -Π.Α- του κάθε μήνα προς το σύνολο των μηνών.

$$\text{Μ.Ο.} = \Sigma[\text{Π.Α.}\%] / 12 \quad (40)$$

Καθοριστικό στοιχείο παραμένει το γεγονός ότι θεωρούμε πως δεν θα έχουμε στη διάθεση μας την πειραματική μηνιαία διάχυτη ενέργεια που μετρά το Κ.Α.Π.Ε. για να τη συνθέτουμε με την προβλεπόμενη άμεση και να υπολογίζουμε τη νέα προβλεπόμενη μηνιαία ολική ενέργεια ($I_{t,h'}$).

Έτσι οδηγούμαστε στην κατεύθυνση της εξαγωγής ενός βοηθητικού συντελεστή (C_k) ο οποίος θα συνδέει μεταξύ τους την μηνιαία θεωρητική διάχυτη ενέργεια ($I_{d,h}$) που υπολογίζει το θεωρητικό μας μοντέλο (Hottel) με αυτήν που μετράει το Κ.Α.Π.Ε. για κάθε μήνα ($I_{d,hs}$). Ο συντελεστής αυτός προκύπτει απ' τη σχέση που ακολουθεί και λαμβάνεται για κάθε μήνα ξεχωριστά μέσω των αντίστοιχων ενεργειών κάθε μήνα:

$$C_k = I_{d,hs} / I_{d,h} \quad (41)$$

Έχουμε εξάγει τιμές του (C_k) για κάθε μήνα για διάφορες περιοχές της χώρας που καλύπτουν όλο το εύρος του γεωγραφικού πλάτους της Ελλάδος.

Όπως θα φανεί στη συνέχεια σε λεπτομερή ανάλυση, στην παράγραφο του διορθωτικού συντελεστή, οι τιμές του (C_k) ανάμεσα στις παραπάνω περιοχές έχουν πολύ μικρή απόκλιση για κάθε μήνα, έτσι χρησιμοποιούμε συγκεκριμένες τιμές του συντελεστή για κάθε μήνα ξεχωριστά.

Ο διορθωτικός συντελεστής (C_k) χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της βελτιωμένης προβλεπόμενης μηνιαίας ολικής ηλιακής ενέργειας ($I_{t,h'}$) που προκύπτει απ' την ακόλουθη σχέση:

$$I_{t,h'} = I_{b,n'} * \cos\Theta_z + I_{d,h} * C_k \quad (\text{KWh/m}^2 * \text{month}) \quad (42)$$

Πετύχαμε έτσι η ($I_{t,h'}$) να έχει μειωμένο ποσοστό απόκλισης σε σχέση με την πειραματική ολική ηλιακή ενέργεια ($I_{t,hs}$) που μετρά το Κ.Α.Π.Ε. σε κάθε περιοχή, χωρίς να έχουμε γνωστή την πειραματική μέτρηση της μηνιαίας διάχυτης ενέργειας του Κ.Α.Π.Ε.

Παρατήρηση: έχοντας υπολογίσει τη προβλεπόμενη ολική ενέργεια $I_{t,h'}$ για το οριζόντιο επίπεδο μπορούμε να υπολογίσουμε και τη προβλεπόμενη ολική ενέργεια για επίπεδο οποιασδήποτε κλίσης μέσω του συντελεστή R που υπολογίζεται από το πρόγραμμα υπολογισμού για οποιαδήποτε κλίση.

4.4.3 Εφαρμογή Μεθόδου Πρόβλεψης

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χρήσης της εφαρμοζόμενης μεθόδου για τη περιοχή της Αλεξανδρούπολης, η οποία χαρακτηρίζεται από την παράμετρο $\phi = 40.51$. Προκειμένου να παρουσιάσουμε τα τελικά αποτελέσματα, περιγράφουμε τη διαδικασία με την οποία καταλήγουμε στο επιθυμητό σημείο:

- Με βάση τις θεωρητικές ώρες ηλιοφάνειας (h_t) και τις πειραματικές ώρες ηλιοφάνειας (h_s) υπολογίζουμε τις ώρες συννεφιάς (h_c) για κάθε μήνα (σχέση 31).
- Έχοντας υπολογίσει τις ώρες συννεφιάς (h_c) υπολογίζουμε το ποσοστό τους επί τοις εκατό(%) (σχέση 32).
- Θεωρούμε ότι το ποσοστό συννεφιάς είναι κατανομημένο ισόποσα κατά τη διάρκεια κάθε ηλιακής ώρας μιας ημέρας για κάθε μέρα του μήνα. Έτσι αφαιρούμε ποσοστό θεωρητικής μηνιαίας άμεσης ενέργειας ($I_{b,n}$) ίδιο με το ποσοστό των ωρών συννεφιάς ($\% h_c$) και τελικά προκύπτει η προβλεπόμενη μηνιαία άμεση ενέργεια ($I_{b,n'}$) (σχέση 33).
- Με βάση το τύπο ($I_{t,h} = I_{b,n} \cdot \cos\theta_z + I_{d,h}$) υπολογίζουμε το ($\cos\theta_z$) για κάθε μήνα ξεχωριστά (σχέση 34).
- Υπολογίζουμε τη προβλεπόμενη ολική ενέργεια ($I_{t,h'}$) συνθέτοντας τη προβλεπόμενη άμεση ($I_{b,n'}$) με τη διάχυτη ενέργεια ($I_{d,h}$) που προκύπτει από το υπολογιστικό μοντέλο και τη συγκρίνουμε με τη πειραματική ολική ενέργεια ($I_{t,hs}$) την οποία έχουμε λάβει από τις μετρήσεις του Κ.Α.Π.Ε (σχέση 36).
- Υπολογίζουμε το ποσοστό απόκλισης που έχει η προβλεπόμενη ολική ενέργεια ($I_{t,h'}$) από την πειραματική ολική ενέργεια ($I_{t,hs}$) για κάθε μήνα καθώς και τον ετήσιο μέσο όρο του ποσοστού απόκλισης (σχέσεις 36 και 37) .

Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον Πίνακα 2:

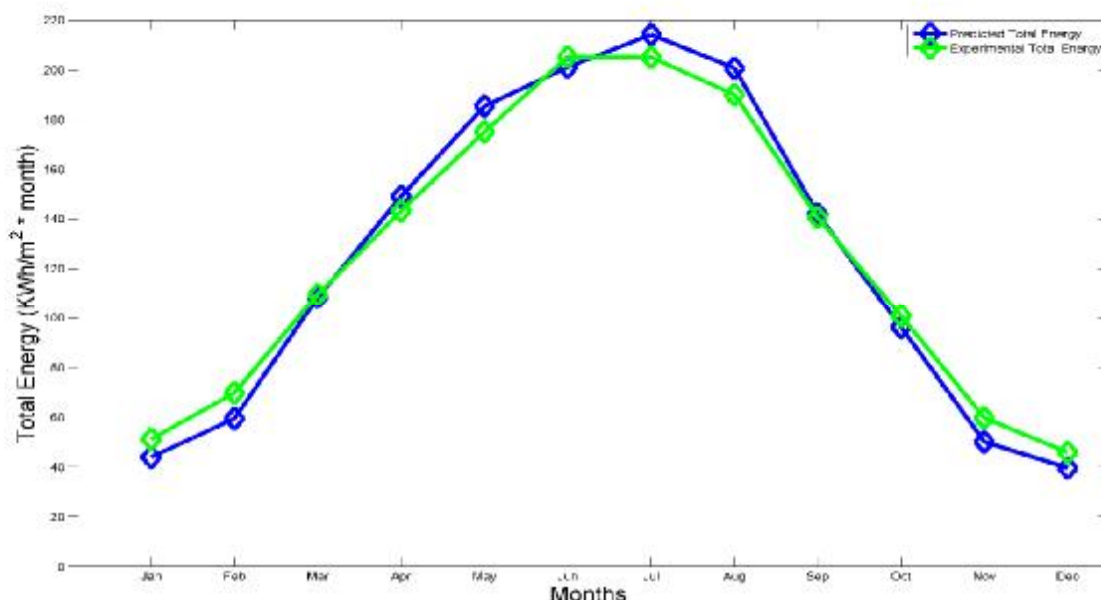
Πίνακας 2: Εξέταση ποσοστού απόκλισης πρόβλεψης μοντέλου με μετρηθείσες τιμές.

Μήνας (Α/Α)	Άμεση ενέργεια (measured)	Διάχυτη ενέργεια (predicted)	Ολική ενέργεια (measured)	Ολική ενέργεια (predicted)	Ποσοστό απόκλισης
(Μονάδες μέτρησης)	(KWh/m ² *month)				(%)
1 – Ιανουάριος	43.7	27.9	44.01	51.2	14.05
2 – Φεβρουάριος	55.51	35.1	59.47	69.8	14.8
3 – Μάρτιος	97.85	54.4	108.32	109.6	1.16
4 – Απρίλιος	132.54	65.2	149.13	143.3	-4.07
5 – Μάιος	155.38	77.5	185.43	175.1	-5.9
6 – Ιούνιος	194.87	65.6	201.1	205.3	2.05
7 – Ιούλιος	210.1	69.7	214.18	205.1	-4.43
8 – Αύγουστος	211.7	59.1	200.66	190	-5.61
9 – Σεπτέμβριος	161.07	48.3	142.05	140.7	-0.96
10 – Οκτώβριος	116.5	38.7	96.19	100.8	4.57

11 – Νοέμβριος	49.93	30	50.12	59.7	16.05
12 – Δεκέμβριος	44.26	24.4	39.65	45.9	13.61

Στην περίπτωση της δεύτερης στήλης, η διάχυτη ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που μετράται από το Κ.Α.Π.Ε. Επομένως, στην τελευταία στήλη λοιπόν, αναγράφουμε την προκύπτουσα απόκλιση μεταξύ της τέταρτης και της τρίτης στήλης. Προκειμένου να υπολογίσουμε τη μέση ετήσια απόκλιση υπολογίζουμε το μέσο όρο της απόλυτης τιμής των ποσοστών απόκλισης της πέμπτης και τελευταίας στήλης. Αυτός ανέρχεται στο 7.27 %, όπου η μέγιστη από τις 12 τιμές απόκλισης εμφανίστηκε κατά τον 11^ο μήνα, με τον 12^ο και τον 1^ο να ακολουθούν (χειμερινοί μήνες) ενώ η μικρότερη απόκλιση τον 9^ο και τον 3^ο.

Η ανά μήνα απεικόνιση των δύο παραπάνω συγκρινόμενων τιμών απεικονίζεται στο παρακάτω γράφημα:



Εικόνα 14: Απεικόνιση της ανά μήνα συμπεριφοράς του προβλεπτικού μας μοντέλου σε σχέση με τις θεωρητικές τιμές.

Έχοντας τις παραπάνω τιμές, είναι άμεσος πλέον ο υπολογισμός του διορθωτικού συντελεστή C_k . Ακολουθεί εκτενέστερη αναφορά στην επόμενη υποπαράγραφο.

4.4.4 Υπολογισμός Διορθωτικού Συντελεστή

Μέσω των σχέσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι δυνατός ο υπολογισμός του διορθωτικού συντελεστή καθώς και να αποκτήσουμε νέες προβλέψεις. Η διαδικασία αυτή γενικεύτηκε για περισσότερες από μία γεωγραφικές περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, συλλέξαμε δεδομένα πέρα από την Αλεξανδρούπολη, που έχει ήδη αναφερθεί, και από Καλαμάτα, Λάρισα, Μυτιλήνη και Χανιά, αποσκοπώντας στην εξέταση περιοχών με διαφορετικό κλίμα,

καλύπτοντας παράλληλα διαφορετικά σημεία της ηπειρωτικής και νησιωτικής Ελλάδας. Η απόκτηση φυσικά καλύτερων προβλέψεων/προσεγγίσεων αποτελεί τον κυρίαρχο σκοπό. Ακολουθούν πίνακες καταγραφής των δεδομένων και των υπολογισμών μας:

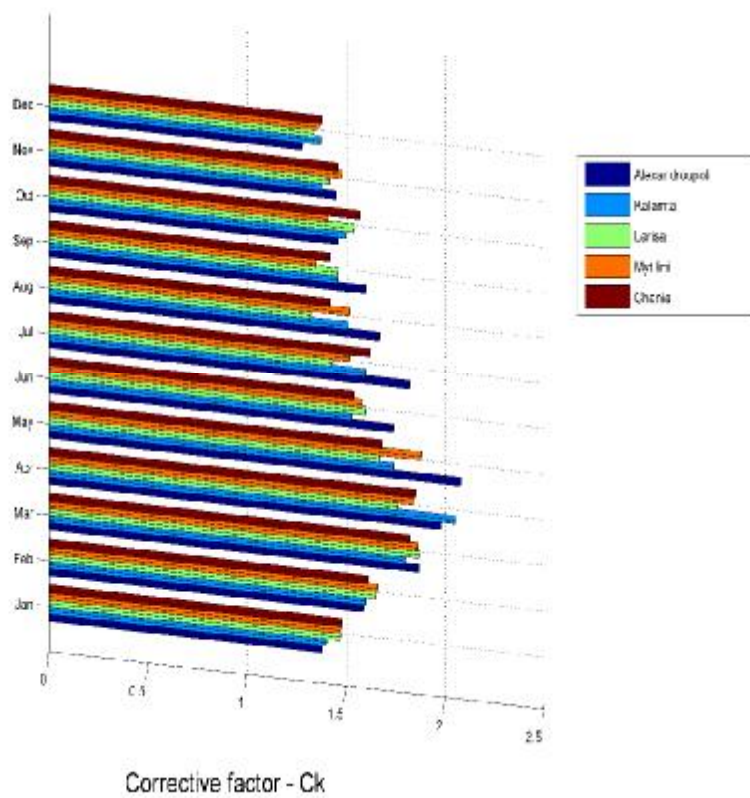
Πίνακας 3: Καταγραφή πειραματικών ωρών ηλιοφάνειας (hs) για 5 περιοχές της Ελλάδας.

Μήνας (Α/Α)	Αλεξανδρούπολη	Καλαμάτα	Λάρισα	Μυτιλήνη	Χανιά
1 – Ιανουάριος	79.4	148.9	89.4	92.9	111.7
2 – Φεβρουάριος	97.4	142.5	109.7	112.8	128.9
3 – Μάρτιος	144.7	193.5	159.1	172.7	174.4
4 – Απρίλιος	196.3	199.2	213.1	220.5	228.5
5 – Μάιος	247.7	307.9	279.8	285.2	314.2
6 – Ιούνιος	290.7	344.4	300.2	346	357.8
7 – Ιούλιος	317.4	366.3	333.1	372.7	391.7
8 – Αύγουστος	301.4	344.2	322.5	344.7	368.4
9 – Σεπτέμβριος	255.7	272	243.6	292.4	276.3
10 – Οκτώβριος	190.3	209.7	176	221.2	183.8
11 – Νοέμβριος	105.7	176.1	140.6	137.4	157.7
12 – Δεκέμβριος	85.3	122.4	95.9	101.6	115.4
Άθροισμα (ώρες)	2312	2827.1	2463	2700.1	2808.8

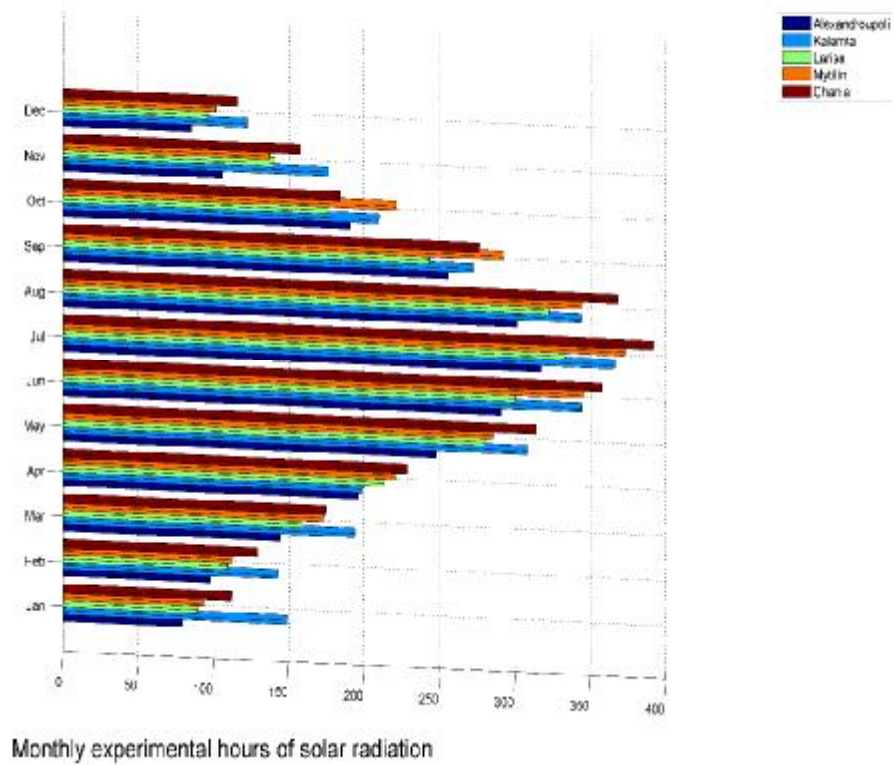
Πίνακας 4: Καταγραφή διορθωτικού συντελεστή (Ck) για 5 περιοχές της Ελλάδας.

Μήνας (Α/Α)	Αλεξανδρούπολη	Καλαμάτα	Λάρισα	Μυτιλήνη	Χανιά
1 – Ιανουάριος	1.38	1.4	1.47	1.47	1.48
2 – Φεβρουάριος	1.59	1.6	1.65	1.66	1.61
3 – Μάρτιος	1.87	1.8	1.87	1.86	1.82
4 – Απρίλιος	1.98	2.05	1.76	1.84	1.85
5 – Μάιος	2.08	1.74	1.67	1.88	1.68
6 – Ιούνιος	1.74	1.53	1.6	1.58	1.54
7 – Ιούλιος	1.82	1.6	1.43	1.52	1.62
8 – Αύγουστος	1.67	1.51	1.32	1.52	1.42
9 – Σεπτέμβριος	1.6	1.46	1.46	1.35	1.42
10 – Οκτώβριος	1.46	1.5	1.54	1.41	1.57
11 – Νοέμβριος	1.45	1.38	1.42	1.48	1.46
12 – Δεκέμβριος	1.28	1.37	1.34	1.36	1.38

Προκειμένου να αποκτήσουμε δυνατότητα άμεσης σύγκρισης του συντελεστή Ck για τις συγκεκριμένες περιοχές, όσον αφορά τόσο τις μηνιαίες πειραματικές ώρες ηλιοφάνειας, όσο και την τιμή αυτού του δείκτη, παρουσιάζουμε τα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 15: Διορθωτικός συντελεστής ανά μήνα για 5 περιοχές της Ελλάδας



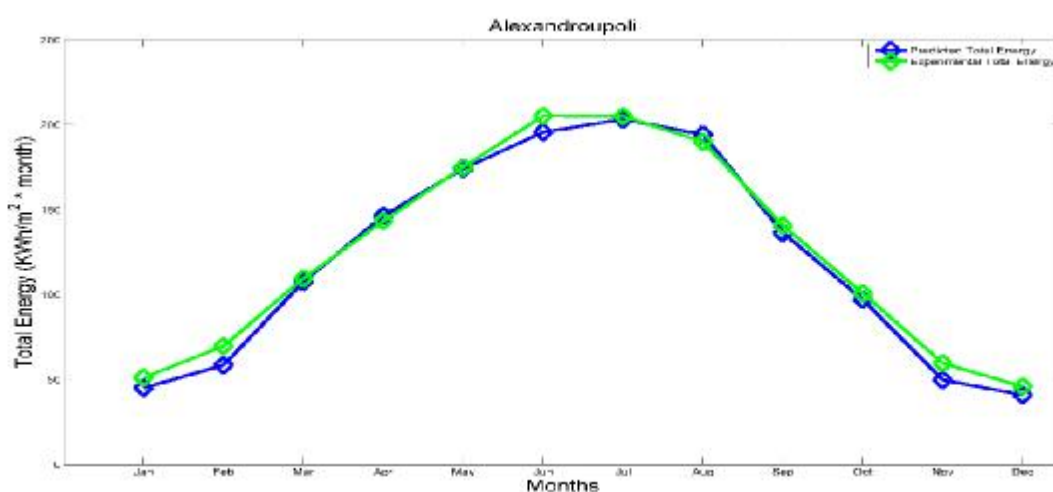
Εικόνα 16: Πλήθος ωρών ανά μήνα για 5 περιοχές της Ελλάδας

Χρήσιμα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι η προφανέστατα μεγαλύτερη απορρόφηση ηλιοφάνειας κατά τους θερινούς μήνες για όλες τις περιοχές αλλά και η σχετικά μικρή απόκλιση του διορθωτικού συντελεστή που παρατηρείται ανά περιοχή για παρόμοιες ώρες απορρόφησης. Λαμβάνοντας υπόψιν πως έχουμε ενδεικτικά πόλεις που καλύπτουν τα διάφορα γεωγραφικά σημεία της χώρας μας, μπορούμε με μεγάλη ασφάλεια να γενικεύσουμε πως σε οποιαδήποτε άλλη περιοχή χρειαστεί να εφαρμόσουμε την ίδια διαδικασία, δεν αναμένεται να πάρουμε μεγαλύτερη απόκλιση. Άρα αν είμαστε καλυμμένοι με την εξαχθείσα ακρίβεια, μελετώντας ακραίες περιοχές, θα έχουμε γνήσια καλύτερη συμπεριφορά στις ενδιάμεσες περιοχές, ανεξαρτήτως γεωγραφικής ζώνης, στα πλαίσια της Ελλάδας.

Ακολουθούν οι ανά πόλη υπολογισμοί με τον μέσο όρο πλέον του διορθωτικού συντελεστή που αναγράφεται στον Πίνακα 4, θεωρώντας την ως την πιο αντιπροσωπευτική τιμή για να προχωρήσουμε στους υπολογισμούς μας:

Πίνακας 5: Εφαρμογή μεθόδου στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης.

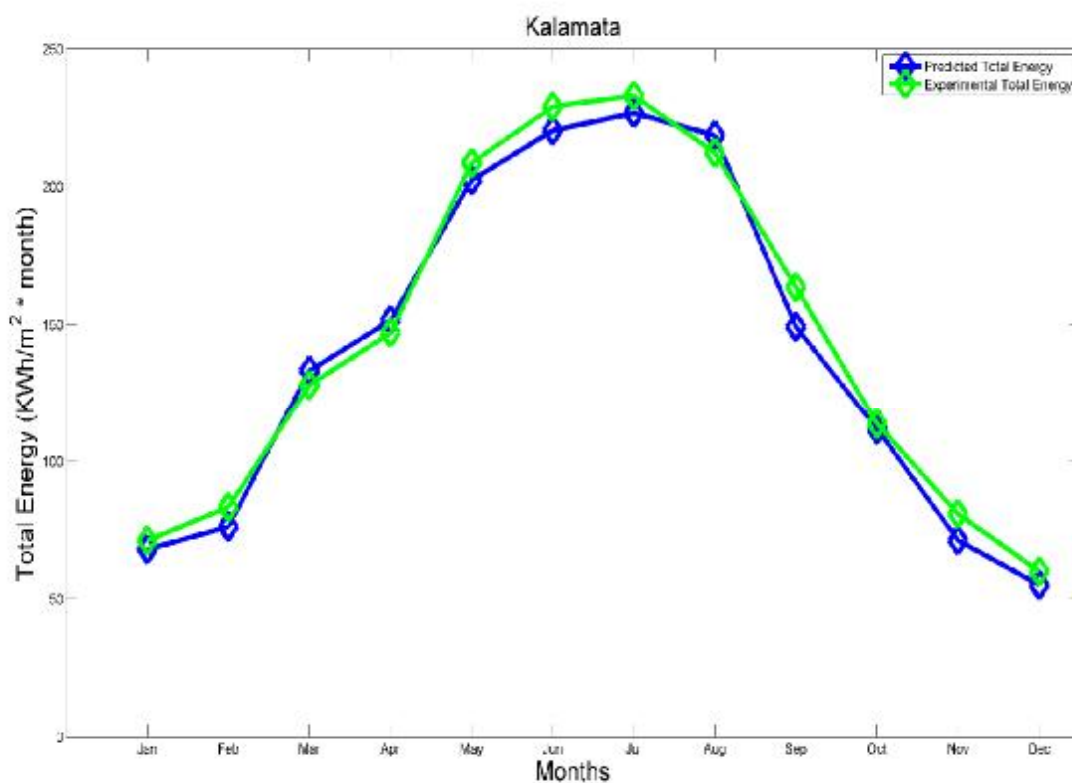
Μήνας (Α/Α)	Ολική ενέργεια (predicted)	Ολική ενέργεια (measured)	Ποσοστό απόκλισης
(Μονάδες μέτρησης)	(KWh/m ² *month)		(%)
1 – Ιανουάριος	45.12	51.2	11.88
2 – Φεβρουάριος	58.53	69.8	16.14
3 – Μάρτιος	107.56	109.6	1.86
4 – Απρίλιος	146.46	143.3	-2.21
5 – Μάιος	174.14	175.1	0.55
6 – Ιούνιος	195.68	205.3	4.69
7 – Ιούλιος	203.23	205.1	0.91
8 – Αύγουστος	194.23	190	-2.23
9 – Σεπτέμβριος	136.44	140.7	3.03
10 – Οκτώβριος	97.13	100.8	3.65
11 – Νοέμβριος	49.81	59.7	16.57
12 – Δεκέμβριος	40.92	45.9	10.84



Εικόνα 17: Ανά μήνα σύγκριση εφαρμοζόμενου μοντέλου με αναμενόμενες τιμές για την Αλεξανδρούπολη

Πίνακας 6: Εφαρμογή μεθόδου στην περιοχή της Καλαμάτας.

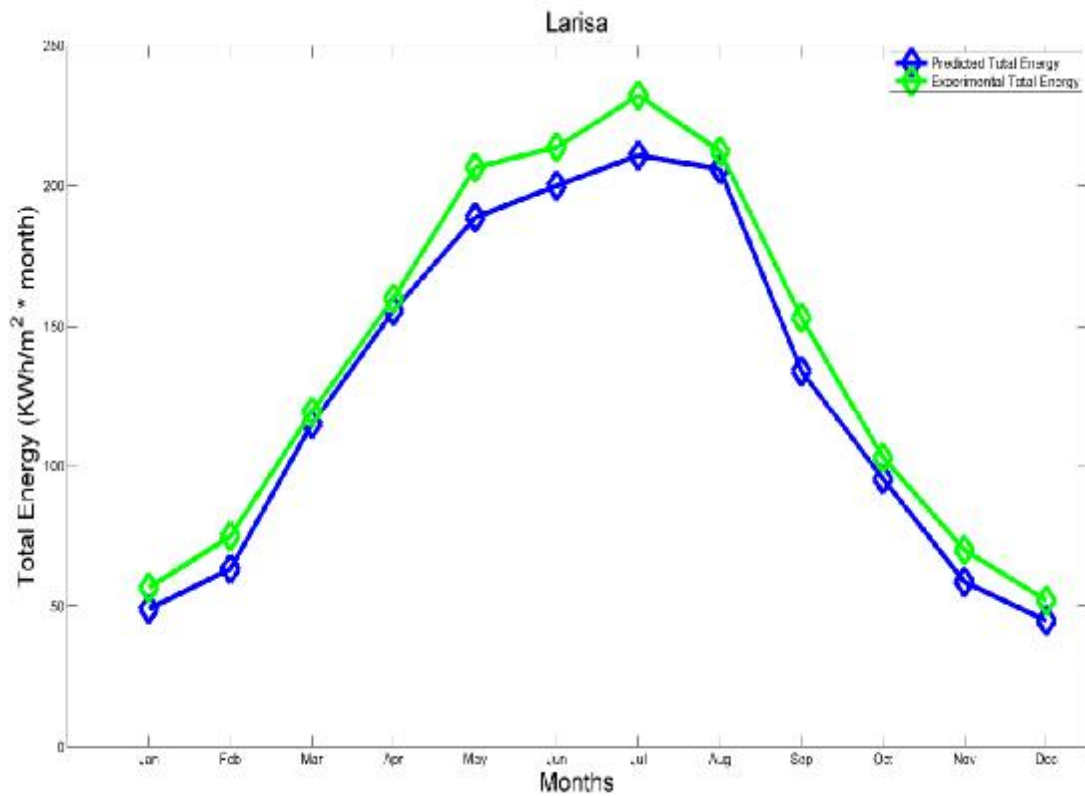
Μήνας (Α/Α)	Ολική ενέργεια (predicted)	Ολική ενέργεια (measured)	Ποσοστό απόκλισης
(Μονάδες μέτρησης)	(KWh/m ² *month)		(%)
1 – Ιανουάριος	68.05	71.3	4.56
2 – Φεβρουάριος	76.24	83.4	8.59
3 – Μάρτιος	133.31	128	-4.15
4 – Απρίλιος	151.6	147.1	-3.06
5 – Μάιος	202.48	208.7	2.98
6 – Ιούνιος	220.48	229.1	3.76
7 – Ιούλιος	226.82	233.1	2.69
8 – Αύγουστος	218.76	212.4	-2.99
9 – Σεπτέμβριος	149.25	163.6	8.77
10 – Οκτώβριος	111.83	113.9	1.82
11 – Νοέμβριος	71.33	80.9	11.83
12 – Δεκέμβριος	55.19	60.1	8.17



Εικόνα 18: Ανά μήνα σύγκριση εφαρμοζόμενου μοντέλου με αναμενόμενες τιμές για την Καλαμάτα

Πίνακας 7: Εφαρμογή μεθόδου στην περιοχή της Λάρισας.

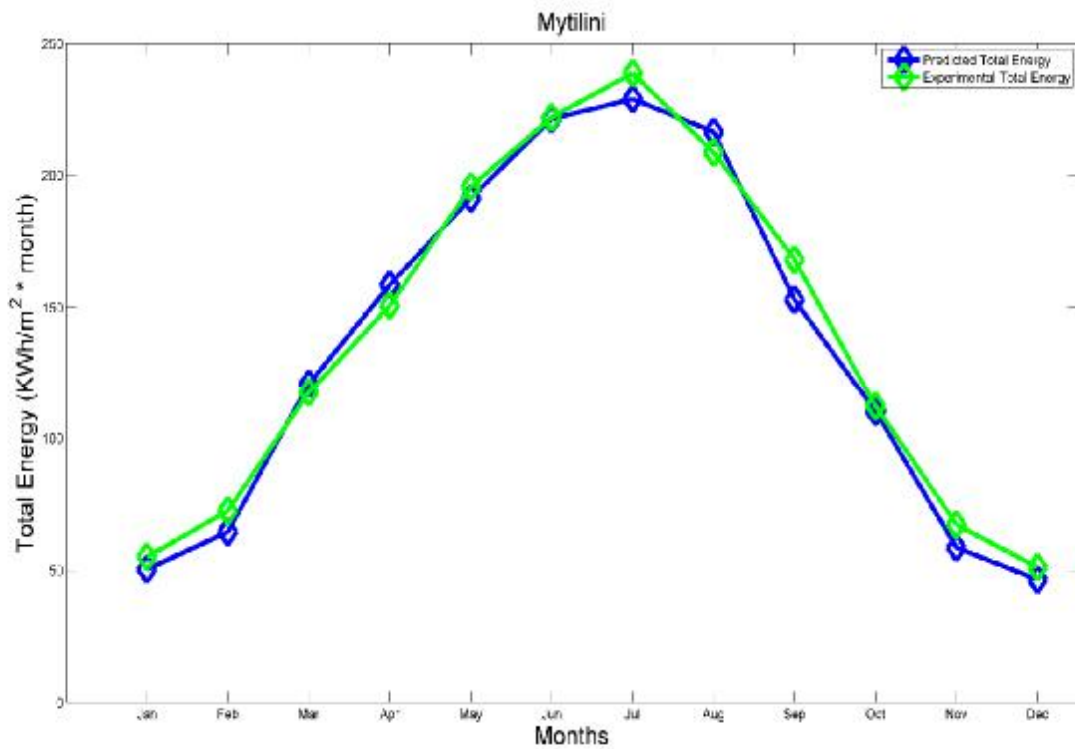
Μήνας (Α/Α)	Ολική ενέργεια (predicted)	Ολική ενέργεια (measured)	Ποσοστό απόκλισης
(Μονάδες μέτρησης)	(KWh/m ² *month)		(%)
1 – Ιανουάριος	49.18	56.7	13.26
2 – Φεβρουάριος	63.35	75	15.53
3 – Μάρτιος	115.08	119.5	3.7
4 – Απρίλιος	155.6	160	2.75
5 – Μάιος	188.82	206.6	8.61
6 – Ιούνιος	200.09	213.8	6.41
7 – Ιούλιος	210.85	232.2	9.19
8 – Αύγουστος	205.99	212.4	3.02
9 – Σεπτέμβριος	134.1	153.1	12.41
10 – Οκτώβριος	95.34	103	7.44
11 – Νοέμβριος	58.7	70.1	16.26
12 – Δεκέμβριος	44.95	52.1	13.72



Εικόνα 19: Ανά μήνα σύγκριση εφαρμοζόμενου μοντέλου με αναμενόμενες τιμές για την Λάρισα

Πίνακας 8: Εφαρμογή μεθόδου στην περιοχή της Μυτιλήνης.

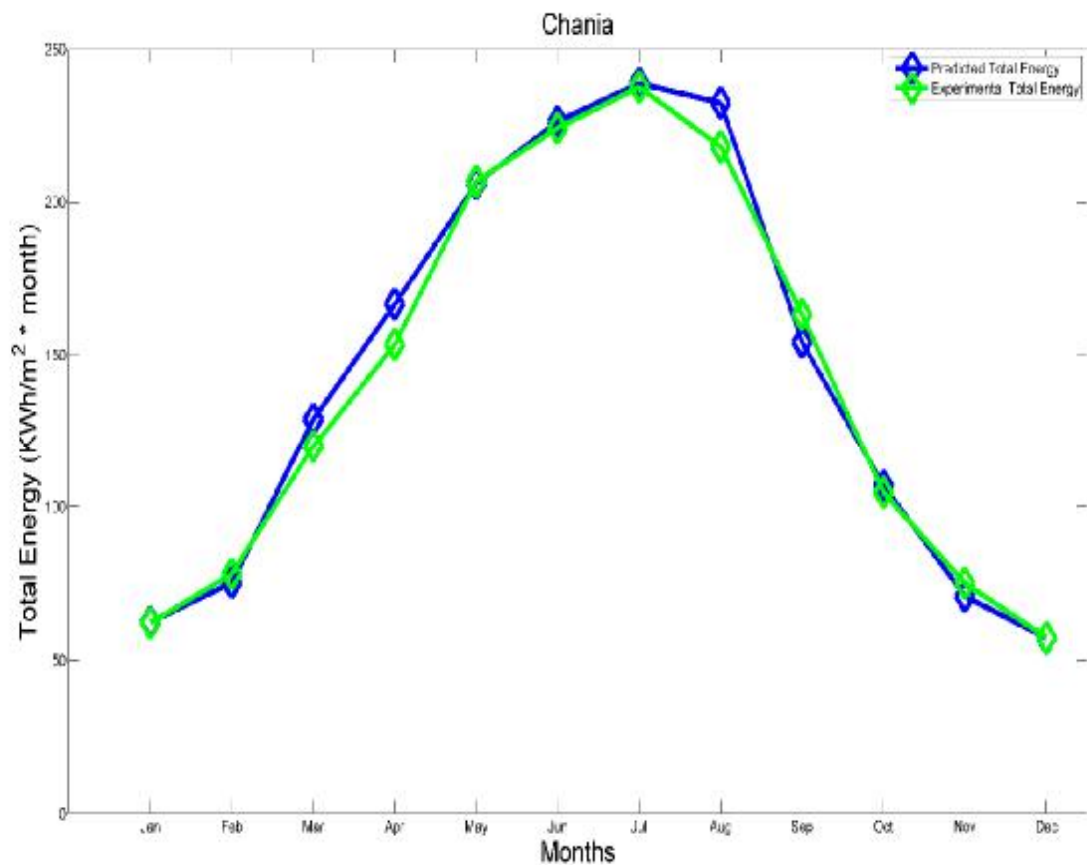
Μήνας (Α/Α)	Ολική ενέργεια (predicted)	Ολική ενέργεια (measured)	Ποσοστό απόκλισης
(Μονάδες μέτρησης)	(KWh/m ² *month)		(%)
1 – Ιανουάριος	50.53	55.2	8.46
2 – Φεβρουάριος	64.66	72.7	11.06
3 – Μάρτιος	120.93	117.7	-2.74
4 – Απρίλιος	158.67	150.8	-5.22
5 – Μάιος	191.38	195.7	2.21
6 – Ιούνιος	221.47	222.1	0.28
7 – Ιούλιος	229.02	238.8	4.1
8 – Αύγουστος	216.53	208.7	-3.75
9 – Σεπτέμβριος	152.99	168.2	9.04
10 – Οκτώβριος	110.37	112.4	1.81
11 – Νοέμβριος	58.68	67.4	12.94
12 – Δεκέμβριος	46.67	51.3	9.03



Εικόνα 20: Ανά μήνα σύγκριση εφαρμοζόμενου μοντέλου με αναμενόμενες τιμές για την Μυτιλήνη

Πίνακας 8: Εφαρμογή μεθόδου στην περιοχή τα Χανιά

Μήνας (Α/Α)	Ολική ενέργεια (predicted)	Ολική ενέργεια (measured)	Ποσοστό απόκλισης
(Μονάδες μέτρησης)	(KWh/m ² *month)		(%)
1 – Ιανουάριος	62.37	62.1	-0.43
2 – Φεβρουάριος	75.29	78.2	3.72
3 – Μάρτιος	128.89	120	-7.41
4 – Απρίλιος	166.64	153.4	-8.63
5 – Μάιος	206.08	206.8	0.35
6 – Ιούνιος	226.32	224.2	-0.95
7 – Ιούλιος	238.84	237.6	-0.52
8 – Αύγουστος	232.45	218.1	-6.58
9 – Σεπτέμβριος	154.17	163.2	5.53
10 – Οκτώβριος	106.95	104.7	-2.15
11 – Νοέμβριος	70.83	75.1	5.69
12 – Δεκέμβριος	57.25	57.4	0.26



Εικόνα 21: Ανά μήνα σύγκριση εφαρμοζόμενου μοντέλου με αναμενόμενες τιμές για τα Χανιά

Παρατηρώντας είτε τις γραφικές παραστάσεις είτε το ποσοστό απόκλισης στα αντίστοιχα πινακάκια ανά περιοχή, παρατηρούμε πως οι διαφορές είναι πολύ μικρές και η προβλεπόμενη τιμή ολικής ενέργειας προσεγγίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την πραγματική. Αναλογιζόμενοι πως μιλάμε για ορισμένες από τις ακραίες περιοχές του ελλαδικού χώρου, αναμένουμε με την εφαρμογή του τρέχοντος μοντέλου να έχουμε καλύτερες προσεγγίσεις για περιοχές ενδιαφέροντος που βρίσκονται σε ενδιάμεσα σημεία. Αυτό μάλιστα αποτελεί το πιο εξαιρετικό χαρακτηριστικό της όλης αυτής προσπάθειας μας.

4.4.5 Υπολογισμός Συχνότητας Φαινομένου

Όσον αφορά το τελευταίο κομμάτι των πειραματικών διαδικασιών και υπολογισμών που εκτελέστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποσκοπούμε στον υπολογισμό της συχνότητας της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, θέλουμε να προσδιορίσουμε τον αριθμό των ηλιακών ωρών κατά τη διάρκεια των οποίων επικρατεί η επιθυμητή ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Πέρα λοιπόν του υπολογισμού των αντίστοιχων μεγεθών, θα παραθέσουμε και μία αντίστοιχη γραφική παράσταση, διευκολύνοντας την κατανόηση και πρακτικών ζητημάτων αλλά και ευνοώντας την εξαγωγή συσχετίσεων και λοιπών χρήσιμων συμπερασμάτων για τον αναγνώστη/ερευνητή/μηχανικό που θα κληθεί να αποκωδικοποιήσει τα αποτελέσματα μας.

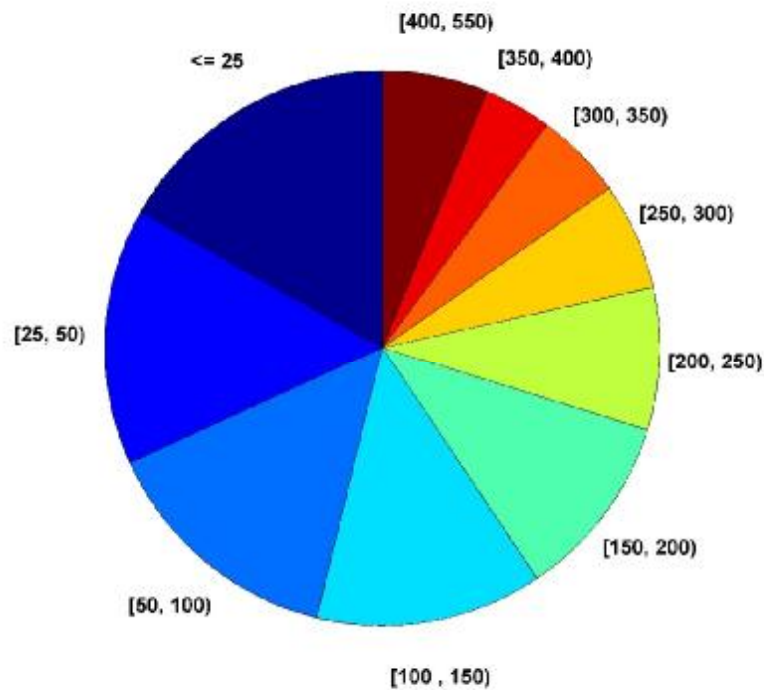
Ουσιαστικά, έχοντας στη διάθεση μας την πληροφορία σχετικά με το πόσες φορές θα επικρατήσει κάποια συγκεκριμένη τιμή ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, ο εκάστοτε ενδιαφερόμενος είναι σε θέση να γνωρίσει, μέσω πρόβλεψης που κινείται σε κάποια διαστήματα αστοχίας, το ποσό της ενέργειας που αναμένεται να απορροφηθεί/αξιοποιηθεί.

Επαναφέροντας όπως πριν την περιοχή της Πάτρας, ξεκινάμε τη διαδικασία ως εξής:

- Για κάθε ηλιακή ώρα της 15^{ης} ημέρας κάθε μήνα του έτους, εξάγουμε την τιμή της έντασης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (I_t, h) που είναι διαθέσιμη, αρχικά χωρίς να έχει ληφθεί υπ' όψη ο παράγοντας της νέφωσης,
- Ακολουθεί ο υπολογισμός της έντασης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (I_t, h'') για κάθε ηλιακή ώρα της 15^{ης} ημέρας κάθε μήνα η οποία προβλέπεται ότι θα είναι διαθέσιμη συμπεριλαμβάνοντας και την επιρροή του παράγοντα της νέφωσης (I_t, h'').

Τονίζουμε πως όλες οι τιμές εδώ αφορούν την περίπτωση του οριζόντιου επιπέδου. Προκειμένου να εξυπηρετήσουμε την διαδικασία κατασκευής του παρακάτω γραφήματος, αναφέρουμε πως πρέπει να θεσπίσουμε κάποια διακριτά διαστήματα τιμών, με σκοπό να μετρήσουμε τη συχνότητα. Δηλαδή, να ομαδοποιήσουμε όλες τις τιμές της ηλιακής ενέργειας σε διαστήματα, έτσι ώστε να αθροίσουμε τις εμφανίσεις των αντίστοιχων τιμών ανά διάστημα. Για παράδειγμα, ένα διάστημα θα μπορούσε να είναι οι τιμές μεταξύ [300 W/m² , 400 W/m²) και η συχνότητα αυτού του διαστήματος θα καθοριζόταν από τις φορές που εμφανίστηκε κάποια τιμή που ανήκει σε αυτό το διάστημα, είτε ανα μήνα είτε σε ετήσια βάση.

Έχοντας πλέον αναλύσει τη σημασία και τον τρόπο υπολογισμού των συχνότητων ηλιακής ενέργειας, παραθέτουμε το σχετικό διάγραμμα:



Εικόνα 22: Διάγραμμα συχνότητων ηλιακής ενέργειας σε οριζόντιο επίπεδο για την περιοχή της Πάτρας ανά έτος

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα πίτας, οι χαμηλότερες τιμές έχουν υπερισχύσει ποσοστιαία, κάτι που είναι αναμενόμενο. Για αυτόν ακριβώς το λόγο επιλέξαμε να χωρίσουμε τις μικρότερες ποσότητες ενέργειας ανα 25 W/m², ενώ στις επόμενες είχαμε βήμα 50 W/m² και στο τέλος ομαδοποιήσαμε την κατηγορία [400, 550] W/m². Φυσικά, δεν υπήρχε καμία τιμή πέραν της τιμής του 550 W/m² και για αυτό δεν εμφανίζεται κάποιο κομμάτι πίτας για αυτή την περίπτωση. Ακολουθώς αναγράφουμε και τα ποσοστά κάθε κατηγορίας:

- 16.82%
- 15.01%
- 14.38%
- 13.21%
- 10.78%
- 8.32%
- 6.26%
- 5.11%
- 3.94%
- 6.17%
- 0%

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Σχόλια – Συμπεράσματα

Ακολουθεί σχολιασμός των συμπερασμάτων και των ενεργειών που καταγράφηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Πρωτίστως, υλοποιήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο του HOTTEL στο περιβάλλον του Matlab, έπειτα από μία πλήρη θεωρητική περιγραφή του, έχοντας πλέον τη δυνατότητα ανάκτησης αξιόπιστων αποτελεσμάτων των εντάσεων της άμεσης, διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας καθώς και των αντίστοιχων ενεργειών, για οριζόντιο καθώς και για κεκλιμένο επίπεδο. Ο υπολογισμός επομένως του συντελεστή R, μπορεί να προσφέρει στον εκάστοτε ερευνητή, παρατηρητή ή/και καταναλωτή τη σαφή διάγνωση της βέλτιστης κλίσης επιφάνειας κατά τις διάφορες χρονικές περιόδους του έτους αναλόγως της γεωγραφικής περιοχής που μελετάμε.

Η συμφέρουσα κλίση επομένως κάθε φορά προκύπτει από τη δράση υπό τον μεγαλύτερο κατά απόλυτη τιμή συντελεστή R. Όσον αφορά τη διάκριση μεταξύ της καλύτερης επιλογής μεταξύ οριζόντιου και κεκλιμένου επιπέδου, σε περίπτωση τιμής R μεγαλύτερης της μονάδας, η μεταγενέστερη επιλογή θεωρείται περισσότερο αποδοτική, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η προγενέστερη αναφέρεται σαν η προτιμότερη.

Ένα σημαντικό στοιχείο που προκύπτει από τη μελέτη των πειραματικών μετρήσεων σε διάφορες περιοχές της χώρας δείχνει ότι η συνολική ενέργεια ολόκληρου του έτους σε επίπεδο κλίσης 30° είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο. Κατά μέσο όρο λοιπόν θα μπορούσε να θεωρηθεί η καλύτερη μεμονωμένη επιλογή. Έχοντας όμως τη δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης με αυτόματους μηχανισμούς, θα μπορούσαμε να μεγιστοποιήσουμε τις ενδιαφερόμενες ποσότητες περαιτέρω. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, η υιοθέτηση των οριζόντιων επιπέδων είναι σαφέστατα πιο επικερδής από την επιλογή των κεκλιμένων επιπέδων.

Στην προσπάθεια λοιπόν μεγιστοποίησης της απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας, δεν υπάρχει μία γωνία που επιτυγχάνεται η συγκεκριμένη κατάσταση. Αντιθέτως, σημειώνουμε τα παρακάτω συμπεράσματα :

- Επιλογή μεταβλητής γωνία κλίσης επιφάνειας για κάθε μήνα (γωνία κλίσης: βέλτιστη του μηνός) δίνει τα καλύτερα ετήσια αποτελέσματα.
- Σε περίπτωση σταθερής γωνία κλίσης της επιφάνειας, για να έχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση, πρέπει να γίνει επιλογή της κατάλληλης γωνίας σύμφωνα με τη χρονική περίοδο λειτουργίας. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της σχέσης 31.

Η μέθοδος πρόβλεψης, της ολικής ηλιακής ενέργειας για μια γεωγραφική περιοχή, δίνει αποτελέσματα με μεγάλο βαθμό ακρίβειας όπως έγινε φανερό στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μέθοδος πρόβλεψης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τις περιοχές στις οποίες τα υφιστάμενα μετεωρολογικά δεδομένα είναι περιορισμένα, και αυτό διότι έχοντας γνωστή την ολική ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο, την οποία λαμβάνουμε από το υπολογιστικό μοντέλο HOTTEL, μπορούμε μέσω της μεθόδου πρόβλεψης που αναπτύξαμε να υπολογίσουμε την ολική ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο λαμβάνοντας υπόψη τον

παράγοντα της νέφωσης ο οποίος επηρεάζει την τιμή έντασης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Τα μόνα μετεωρολογικά δεδομένα που απαιτούνται για τη πρόβλεψη είναι οι ώρες ηλιοφάνειας τις οποίες μπορούμε να έχουμε στη διάθεσή μας καθώς αυτές μετρούνται μέσω ειδικού οργάνου (ηλιογράφος Campbell-Stokes) .

Η ακρίβεια της μεθόδου πρόβλεψης σε μηνιαία βάση κυμάνθηκε με μέσο όρο απόκλισης από 3,52% έως 9,40% και σε ετήσια βάση από 1,49% έως 8,06% κατά την μελέτη των ενδεικτικών περιοχών του προηγούμενου κεφαλαίου που καλύπτουν εύρος γεωγραφικού πλάτους που αντιστοιχεί σε όλο τον ελλαδικό χώρο. Ως συγκριτικό μέγεθος για να προσδιοριστεί η ακρίβεια της μεθόδου που αναπτύξαμε χρησιμοποιήσαμε τις πειραματικές μετρήσεις της E.M.Y. όπως αυτές δημοσιεύονται στην ιστοσελίδα του Κ.Α.Π.Ε.

Η μέθοδος πρόβλεψης είναι βασισμένη στις ώρες ηλιοφάνειας που μετρούνται για κάθε περιοχή. Οι ώρες ηλιοφάνειας που καταγράφονται για μία περιοχή δεν είναι από τις ακριβέστερες προσδιοριζόμενες μετεωρολογικές παραμέτρους γιατί σύμφωνα με τον Riches προσδιορίζονται με ακρίβεια $\pm 10\%$ πάνω στη τιμή μέτρησης. Αυτό σημαίνει ότι στη μια περίπτωση η E.M.Y. μετρά σε ορισμένες περιοχές λιγότερες ώρες ηλιοφάνειας από τις πραγματικές. Έτσι εμείς θεωρούμε ότι υπάρχουν περισσότερες ώρες συννεφιάς και αφαιρούμε περισσότερη άμεση ηλιακή ενέργεια από αυτήν που υπολογίζουμε πως λαμβάνουμε χωρίς να υπάρχει νέφωση. Τελικά η ολική ηλιακή ενέργεια που προβλέπουμε έχει λίγο μικρότερη τιμή από τη πειραματική ολική ηλιακή ενέργεια που μετράει η E.M.Y. Αντίθετα σε άλλες περιοχές έχουν μετρηθεί περισσότερες ώρες ηλιοφάνειας από τις πραγματικές. Έτσι εμείς θεωρούμε ότι υπάρχουν λιγότερες ώρες συννεφιάς και αφαιρούμε λιγότερη άμεση ηλιακή ενέργεια από αυτήν που υπολογίζουμε πως λαμβάνουμε χωρίς να υπάρχει νέφωση. Τελικά η ολική ηλιακή ενέργεια που προβλέπουμε έχει λίγο μεγαλύτερη τιμή από τη πειραματική ηλιακή ενέργεια που μετράει η E.M.Y.

Το προαναφερθέν ποσοστό απόκλισης $\pm 10\%$ στη τιμή μέτρησης του αριθμού των ηλιακών ωρών μέσω των ηλιογράφων, δεν επηρεάζει την πειραματική μέτρηση της ολικής ηλιακής ενέργειας που γίνεται με τα πυρανόμετρα. Αυτό σημαίνει ότι οι ώρες ηλιοφάνειας που παρουσιάζονται στους πίνακες του Κ.Α.Π.Ε. έχουν ποσοστό σφάλματος $\pm 10\%$ το οποίο περνάει στους υπολογισμούς μας για την προβλεπόμενη ολική ενέργεια που γίνονται με βάση αυτές τις εσφαλμένες καταγεγραμμένες ώρες ηλιοφάνειας. Το σφάλμα στην μέθοδο πρόβλεψης παρουσιάζεται διότι συγκρίνουμε την προβλεπόμενη ολική ενέργεια, που εξαρτάται από τις καταγεγραμμένες ώρες ηλιοφάνειας με την πειραματική μέτρηση της ολικής ηλιακής ενέργειας που γίνεται με τα πυρανόμετρα και η οποία δεν εξαρτάται από τις καταγεγραμμένες ώρες ηλιοφάνειας.

Έχοντας γνωστή την προβλεπόμενη ολική ηλιακή ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο, μπορούμε μέσω του συντελεστή κλίσης R, που εξηγήθηκε προηγουμένως, να υπολογίσουμε και την προβλεπόμενη ολική ηλιακή ενέργεια σε οποιοδήποτε επίπεδο κλίσης με ακρίβεια ίδια με αυτήν της μεθόδου πρόβλεψης μέσω της ακόλουθης σχέσης: $I_b, \alpha' = I_t, h'' * R$
[kWh/m²]

Σαν μελλοντική εργασία, η αξιοποίηση του περιβάλλοντος του Matlab αποτελεί σίγουρα μία πολύ χρήσιμη διαδικασία, μιας και παρέχει γρήγορα υπολογισμούς καθώς και πολύ καλή οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων μας. Επιπλέον, προσδίδει θετικό χαρακτήρα κατά την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων του για τη διαστασιολόγηση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε σταθμούς συλλογής ηλιακής ενέργειας και για τη μελέτη ηλιακών συστημάτων, καθώς χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα συχνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση του συστήματος στην διάρκεια μιας ημέρας, μήνα ή έτους. Για

αυτό το λόγο η δημιουργία ενός GUI ου θα διευκόλυνε τον οποιοδήποτε χρήστη να εκτελεί τους υπολογισμούς του ή η χρήση νευρωνικών δικτύων για την επίλυση του ζητήματος της πρόβλεψης της αριθμητικής τιμής του R για ακόμη ακριβέστερη πρόβλεψη θα αποτελούσαν τις δυο κυριότερες βελτιώσεις.

Βιβλιογραφία

1. M. P. Thekaekara, *Solar energy outside the earth's atmosphere*. Air Force Cambridge Research Laboratories (1973).
2. W. A. Beckman, *Solar Irradiance*. New York (1978).
3. Δ. Τσανάκα, *Στοχαστική προσομοίωση της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας*. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (1980).
4. I. Supit, R. R. Van Kappel, *A simple method to estimate global radiation*. School of Engineering Atlanta (1982).
5. Δ. Κουρεμένου και Κ. Αντωνόπουλου, *(Αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κεκλιμένων επιφανειών στην Αθήνα*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (1983).
6. Α. Τσιούμη, *Πρόβλεψη της προσπίπτουσας ολικής ενέργειας σε διάφορες περιοχές σαν συνάρτηση της μετρηθείσας ηλιοφάνειας, του ύψους του ηλίου και του συντελεστή θολότητας*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (1990).
7. Jahavi et al., *Evaluation and development of empirical models for estimating daily solar radiation* (2017)
8. R. Jain and B. Goel, *Prediction of Global Solar Radiation Using Artificial Neural Network* (2013)
9. B. Yaniktepe et al., *The global solar radiation estimation and analysis of solar energy: Case study for Osmaniye, Turkey* (2017)
10. R. Baños, F.G. Montoya, C. Gil, A. Alcayde and J. Gómez, *Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 1753–66 (2011)
11. Islam, M.D., A.A. Alili, I. Kubo, and M. Ohadi, *Measurement of solar-energy (direct beam radiation) in Abu Dhabi, UAE*. *Renewable Energy* 35: 515–519 (2010)
12. Siddiqui, M.U., and S.A.M. Said, *A review of solar powered absorption systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42: 93–115 (2015)
13. Hepbasli, A., and Z. Alsuhaibani, *A key review on present status and future directions of solar energy studies and applications in Saudi Arabia*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 5021– 5050 (2011)
14. Garg, H.P., and T.C. Kandpal, *Renewable energy education: Challenges and problems in developing countries*. *Renewable Energy* 9: 1188-1193 (1996)
15. Duzen, H., and H. Aydin, *Sunshine-based estimation of global solar radiation on horizontal surface at Lake Van region (Turkey)*. *Energy Conversion and Management* 58: 35–46 (2012)
16. K. Bakıcı, *Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey*. *Energy* 34: 485–501 (2009)
17. A. Sozen, E. Arcaklioğlu, M. Ozalp, and N. Caglar, *Forecasting based on neural network approach of solar potential in Turkey*. *Renewable Energy* 30: 1075–1090 (2005)

18. *J. Zhang et al., A critical review of the models used to estimate solar radiation. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2017)*