

Τ.Ε.Ι ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΩΝ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ & ΑΡΔΕΥΣΕΩΝ



**ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ
ΧΩΡΟ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΛΑΒΡΟΥΖΙΩΤΗ ΑΝΔΡΕΑ

ΜΕΣΟΛΟΓΓΙ 2003

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ.Ιωάννου Αθανάσιο,για την ανάθεση θέματος και για τις θετικές του υποδείξεις και παρατηρήσεις του καθ'όλη τη διάρκεια της συγγραφής της πτυχιακής μελέτης .

Ευχαριστώ την Ε.Μ.Υ.και το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών για την πολύτιμη βοήθεια τους .

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Γραμματεία του τμήματος και κυρίως τον υπεύθυνο κ.Κατσαρό Π. για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη που μου παρείχε .

Τέλος ευχαριστώ τους γονείς μου για την ηθική και οικονομική βοήθεια που αφειδώς μου παρείχαν καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή

Ονοματολογία

Κεφάλαιο i

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΕΞΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

1.1. Γενικά χαρακτηριστικά του ηλίου	1
1.2. Ηλιακή σταθερά	2
1.3. Μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας	3
1.4. Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα	5
1.5. Βασικές γνώσεις, απαραίτητες για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια στο έδαφος	6
1.6. Ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια, έξω από την ατμόσφαιρα	8

Κεφάλαιο ii

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

2.1 Γενικά	10
2.2 Όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας	13
2.3 Όργανα μέτρησης της ηλιοφάνειας	14
2.4 Δεδομένα που απαιτούνται για ηλιακές εφαρμογές	14
2.5 Μέθοδοι υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος	16
2.5.1 Ατμοσφαιρικά μοντέλα	16
2.5.2 Στοχαστικά μοντέλα	17
2.6 Εμπειρικά μοντέλα	18
2.6.1 Μοντέλο Angstrom	18
2.6.2 Μοντέλο Page	19
2.6.3 Μοντέλο AFEDES	19
2.6.4 Μοντέλο S.J.Reddy	20
2.6.5 Μοντέλο J.A.Sabbagh et al.	21

2.6.6	Μοντέλο S.Barbaro	21
2.6.7	Μοντέλα πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας από δεδομένα νέφωσης	22
2.7	Εκτίμηση της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας από δεδομένα ολικής ακτινοβολίας	22
2.7.1	Γενικά	22
2.7.2	Εκτίμηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας	23
2.7.3	Εκτίμηση της ωριαίας ακτινοβολίας από δεδομένα ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας	24
2.7.4	Εκτίμηση της ημερήσιας διάχυτης ακτινοβολίας από δεδομένα ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας	24
2.7.5	Εκτίμηση της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας από δεδομένα ωριαίας ολικής ακτινοβολίας	25
2.7.6	Εκτίμηση της μέσης μηνιαίας τιμής της διάχυτης ακτινοβολίας	25

Κεφάλαιο iii

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

3.1	Γενικά	27
3.2	Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα	28
3.3	Μέθοδος εκτίμησης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια	29
3.4	Εκτίμηση των μηνιαίων παραμέτρων a και b	33
3.5	Εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια, με τιμές των παραμέτρων a και b που προσδιορίστηκαν από τις πολυωνυμικές εκφράσεις	34
3.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων από την προτεινόμενη μέθοδο με αποτελέσματα προηγούμενων ερευνητών	35
3.7	Εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια, για 22 σταθμούς της Ελλάδας	39
3.8	Συμπεράσματα	45

Κεφάλαιο iv

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑΣ

4.1. Γενικά	46
4.2 Δεδομένα ηλιοφάνειας για τον Ελλαδικό χώρο	47
4.3 Ανάλυση του προβλήματος	48
4.4. Υπολογισμός των εμπειρικών περιθωριακών πιθανοτήτων της ημερήσιας σχετικής ηλιοφάνειας	49
4.5 Προσαρμογή των εμπειρικών περιθωριακών πιθανοτήτων $P_1(m,x)$ με μαθηματική έκφραση	51
4.6 Συμπεράσματα	56

Εισαγωγή

Το ενεργειακό ,είναι ένα βασικό πρόβλημα ,που αντιμετωπίζει ο σύγχρονος άνθρωπος τα τελευταία είκοσι χρόνια .Το ενδιαφέρον για τις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας έγινε περισσότερο έντονο από το 1970 ,αφενός λόγω της ραγδαίας αύξησης της τιμής του πετρελαίου και αφετέρου επειδή ευαισθητοποιήθηκαν περισσότερο οι άνθρωποι σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος .

Αρκετοί ερευνητές από τη δεκαετία του 1970 ασχολήθηκαν με τις μεθόδους εκμετάλλευσης των ήπιων μορφών ενέργειας ,δηλαδή της ηλιακής ,αιολικής ,βιομάζας γεωθερμίας και των υδατοπτώσεων .Τα πλεονεκτήματα των ήπιων μορφών ενέργειας σε σχέση με τη χρησιμοποίηση των άλλων μορφών και κυρίως της πυρηνικής είναι πολλά ,όπως το γεγονός ότι δεν μολύνουν το περιβάλλον ,δεν εξατμούνται και δεν υπόκεινται σε εξαρτήσεις .

Η Ελλάδα έχει υψηλή ηλιοφάνεια και επομένως η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας παρουσιάζει ιδιαίτερο οικονομικό ενδιαφέρον .Πρόσθετος λόγος είναι ότι η χώρα μας δεν είναι ιδιαίτερα πλούσια σε άλλα ενεργειακά αποθέματα .Η έρευνα όμως σχετικά με την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας δεν έχει ενισχυθεί ικανοποιητικά μέχρι σήμερα .Η μεγαλύτερη ανάπτυξη παρατηρείται στην παραγωγή και εγκατάσταση επίπεδων ηλιακών συλλεκτών για τη θέρμανση νερού ,ενώ η εγκατάσταση μονάδων για θέρμανση και ψύξη χώρων στον αγροτικό και βιομηχανικό τομέα είναι μικρή.

Επειδή το κόστος των συσκευών μετατροπής των ήπιων μορφών ενέργειας είναι ακόμη μεγάλο ,πρέπει οι θέσεις που πρόκειται να εγκατασταθούν να εξασφαλίζουν τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση.

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι το κυριότερο μετεωρολογικό στοιχείο για τη μελέτη και εγκατάσταση ενός ηλιακού συστήματος .Επίσης ο αίθριος καιρός και επομένως η πραγματική ηλιοφάνεια ,παρουσιάζει ενδιαφέρον όχι μόνο από κλιματολογικής πλευράς ,αλλά γενικότερα για ενεργειακές εφαρμογές .

Το δίκτυο των σταθμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) που διαθέτει ηλιογράφους για τη μέτρηση της ηλιοφάνειας είναι σχετικά φτωχό ,ενώ σταθμοί με ακτινόμετρα για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σχεδόν ανύπαρκτοι.

Από το έτος 1977 υπηρεσίες της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) ενδιαφέρθηκαν για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και τοποθέτησαν ηλιογράφους και ακτινόμετρα σε σταθμούς με διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη και ιδιαίτερες κλιματολογικές συνθήκες .Μολονότι τα δεδομένα είναι λίγων ετών ,με κατάλληλη στατιστική ανάλυση ,μπορεί κανείς να αντλήσει ικανοποιητικές πληροφορίες για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο της πτυχιακής αναφέρονται οι απαραίτητες γνώσεις για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια έξω από την ατμόσφαιρα .Δίνονται επίσης οι απαραίτητες εξισώσεις για τον υπολογισμό των ωριαίων ,ημερήσιων ή μηνιαίων τιμών της .

Το δεύτερο κεφάλαιο σχετίζεται με τη μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο έδαφος μετά τον υποβιβασμό της μέσα στην ατμόσφαιρα .Αναφέρονται τα όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας και ηλιοφάνειας και τα απαραίτητα δεδομένα που απαιτούνται για ηλιακές εφαρμογές .Ακόμη, αναφέρονται μέθοδοι υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος .

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η μέθοδος εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα από δεδομένα ημερήσιων τιμών ακτινοβολίας και ηλιοφάνειας .Γίνεται εφαρμογή της μεθόδου για 30 σταθμούς της Ελλάδας ,που διαθέτουν δεδομένα ηλιοφάνειας και εκτιμάται η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία .Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου συγκρίνονται με αποτελέσματα προηγούμενων ερευνητών ,που εκτιμούν την ηλιακή ακτινοβολία ,βασιζόμενοι κυρίως σε δεδομένα του σταθμού του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η στατιστική ανάλυση της ηλιοφάνειας με δεδομένα 30 χρόνων του Αστεροσκοπείου Αθηνών .Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται για κάθε μήνα ,δίνοντας πληροφορίες για την κατανομή της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια του έτους με μαθηματικές εκφράσεις .

Ονοματολογία

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΑ Ι, ΙΙ ΚΑΙ ΙΙΙ

β ,	κλίση επιφάνειας
γ ,	αζιμουθιακή γωνία επιφάνειας
γ_s	αζιμουθιακή γωνία του ήλιου
δ ,	απόκλιση του ήλιου
θ ,	γωνία πρόσπτωσης ηλιακών ακτίνων
θ_z	ζενίθια γωνία του ήλιου
λ ,	γεωγραφικό μήκος τόπου
φ ,	γεωγραφικό πλάτος τόπου
ω ,	ωριαία γωνία
a, b	εμπειρικές παράμετροι
c ,	βαθμός νέφωσης
d ,	ημέρα νέφωσης
e ,	σχετικό σφάλμα
I ,	ωριαία ολική ακτινοβολία που προσπίπτει στο έδαφος
G_{0n} ,	ένταση ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα
G_0 ,	ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια έξω από την ατμόσφαιρα
I_0 ,	ωριαία ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια έξω από την ατμόσφαιρα
I_d ,	ωριαία διάχυτη ακτινοβολία
I_{sc} ,	ηλιακή σταθερά
K_T ,	ημερήσιος δείκτης αιθριότητας
M ,	αέρια μάζα
N ,	διάρκεια της ημέρας
n ,	ημερήσια ηλιοφάνεια
n/N	ημερήσια σχετική ηλιοφάνεια
Q ,	ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια στο έδαφος
Q_n ,	ημερήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία

Κεφάλαιο i

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΕΞΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

1.1. Γενικά χαρακτηριστικά του ήλιου

Η ακτινοβολία του ήλιου είναι η κυριότερη πηγή ενέργειας, υπεύθυνη για τις μεταβολές της θερμοκρασίας του εδάφους, της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και άλλων μετεωρολογικών ή ιονοσφαιρικών παραμέτρων της.

Ο ήλιος είναι περίπου μια σφαίρα με διάμετρο 1.39×10^6 km και βρίσκεται σε απόσταση από τη γη 1.5×10^8 km. Όπως φαίνεται από τη γη, ο ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του κάνοντας κατά μέσο όρο μια περιστροφή σε τέσσερις εβδομάδες. Η περιστροφή του ήλιου δεν μοιάζει με την περιστροφή στερεού σώματος, γιατί η περίοδος της περιστροφής του εξαρτάται από το ηλιογραφικό πλάτος και μεταβάλλεται από 27 ημέρες στον ηλιογραφικό ισημερινό μέχρι 30 περίπου ημέρες στην πολική του περιοχή.

Η επιφάνεια του ήλιου έχει ενεργό θερμοκρασία περίπου 5900 K. Η θερμοκρασία στις κεντρικές εσωτερικές περιοχές μεταβάλλεται από 8×10^6 K μέχρι 40×10^6 K και η πυκνότητά του είναι 8 μέχρι 100 φορές μεγαλύτερη από τη πυκνότητα του νερού. Η τεράστια ισχύς που εκλύεται από τον ήλιο είναι της τάξης των 4×10^{23} kW. Η αντίστοιχη ενέργεια παράγεται κυρίως από τη θερμοπυρηνική σύντηξη τεσσάρων πρωτονίων (πυρήνων υδρογόνου) σε ένα πυρήνα ηλίου. Το έλλειμμα μάζας μετατρέπεται σε ενέργεια. Η ενέργεια αυτή, που παράγεται στο εσωτερικό της ηλιακής σφαίρας, διαδίδεται στα εξωτερικά στρώματα για να ακτινοβοληθεί στο διάστημα. Η διάδοση γίνεται κυρίως με ακτινοβολία και σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 0.7 R (όπου R η ακτίνα του ήλιου) επικρατεί η διάδοση με μεταφορά. Η ακτινοβολία στον πυρήνα του ήλιου βρίσκεται στην περιοχή των ακτίνων α και γ του Φάσματος, τα δε μήκη κύματος αυξάνονται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία σε μεγαλύτερες ακτινικές αποστάσεις. Υπολογίζεται ότι το 90% της ενέργειας παράγεται στην περιοχή 0-0.23 R. Στην ίδια περιοχή βρίσκεται το 40% της μάζας του ήλιου. Σε απόσταση 0.7 R από το κέντρο η θερμοκρασία έχει ελαττωθεί στους 130.000 K και η πυκνότητα στα 70 kg/m^3 . Στην περιοχή αυτή οι διαδικασίες μεταφοράς αρχίζουν να γίνονται σημαντικές και η ζώνη των 0.7 R - 1.0 R είναι γνωστή σαν ζώνη μεταφοράς.

Μέσα στη ζώνη αυτή η θερμοκρασία είναι 5000 K, η δε πυκνότητα 10^{-5} kg/m³. Το εξωτερικό στρώμα της ζώνης μεταφοράς λέγεται **φωτόσφαιρα**. Η φωτόσφαιρα αποτελείται από ισχυρά ιονισμένα αέρια χαμηλής πυκνότητας, ικανά να απορροφήσουν και να εκπέμψουν ένα συνεχές Φάσμα ακτινοβολίας και είναι η πηγή του μεγαλύτερου ποσοστού της ηλιακής ακτινοβολίας. Έξω από τη φωτόσφαιρα υπάρχει ένα στρώμα ψυχρότερων αερίων, το **ανατρεπτικό στρώμα**, μετά η **χρωμόσφαιρα** με αέρια χαμηλότερης πυκνότητας και υψηλότερης θερμοκρασίας από τη φωτόσφαιρα και τέλος το στέμμα, με αέρια πολύ μικρής πυκνότητας και πολύ υψηλής θερμοκρασίας (περίπου 10⁶ K).

Αυτή η απλοποιημένη μορφή του ήλιου, η φυσική του Κατασκευή και οι διαβαθμίσεις στη θερμοκρασία και την πυκνότητά του, μας οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι ο ήλιος στην πραγματικότητα δεν είναι “μέλαν σώμα” σταθερής θερμοκρασίας. Από την άποψη όμως των εφαρμογών της ηλιακής ενέργειας δεν ενδιαφέρει η σωματιδιακή εκπομπή του ήλιου (ηλιακός άνεμος), ούτε η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην περιοχή των ακτινών χ και γ του φάσματος. Ενδιαφέρον για τις εφαρμογές έχει η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος από 0,3 μm μέχρι 3 μm , που είναι περίπου το 98% της ολικής ηλιακής ενέργειας, που φθάνει στη γη πριν την είσοδό της στη γήινη ατμόσφαιρα. Για θερμικές διαδικασίες, είναι αρκετό να θεωρήσουμε τον ήλιο σαν “μέλαν σώμα”, θερμοκρασίας περίπου 5900 K [1].

1.2. Ηλιακή σταθερά

Ηλιακή σταθερά I_{sc} (solar constant), ονομάζεται η ηλιακή ενέργεια ολοκλήρου του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας που διέρχεται στη μονάδα του χρόνου και στη μονάδα επιφάνειας, κάθετης προς τη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, τοποθετημένης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα και σε απόσταση από τον ήλιο τη μέση απόσταση ήλιου-γης, δηλαδή σε απόσταση μιας αστρονομικής μονάδας.

Αρχικά, η εκτίμηση της ηλιακής σταθεράς γινόταν από μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, δηλαδή μετά την είσοδό της στην ατμόσφαιρα. Και επομένως μετά τη σχετική απορρόφηση και διάχυση από τα στοιχεία της ατμόσφαιρας. Η πρώτη σημαντική ερευνητική προσπάθεια για τον υπολογισμό της ηλιακής σταθεράς αναπτύχθηκε στο Smithsonian Ινστιτούτο των Η.Π.Α. από την

ομάδα του Abbot. Τα αποτελέσματα της ομάδας αυτής και μετρήσεις που πάρθηκαν με χρήση J3ολιδων, συγκεντρώθηκαν από τον Johnson (1954) ο οποίος πρότεινε την τιμή $I_{sc} = 1395 \text{ W/m}^2$ αντί της τιμής 1322 W/m^2 που είχε προτείνει ο Abbot. Η ακρίβεια υπολογισμού της ηλιακής σταθεράς ήταν σχετικά μικρή τα πρώτα χρόνια. Τα σφάλματα που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της ηλιακής σταθεράς με μετρήσεις στο έδαφος είναι κυρίως από τα πυρηλιόμετρα εδάφους, που δεν μετράνε σε απόλυτες μονάδες την ένταση της ακτινοβολίας, αλλά σχετικά με μια πηγή αναφοράς. Αυτές οι πηγές αναφοράς βαθμολογούνται απόλυτα με τη χρήση των νόμων του μέλανος σώματος.

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη νέων μεθόδων, επέτρεψε τη μέτρηση της ηλιακής σταθεράς έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα. Μετρήσεις συγκεντρώθηκαν το 1971 από τους Thekaekara και Drummond, που πρότειναν σαν τιμή της ηλιακής σταθεράς, την τιμή $I_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$ ή $1.94 \text{ cal/m}^2\text{min}$, με ακρίβεια $\pm 1.5\%$.

Δεδομένα από τους δορυφόρους Nimbus και Mariner αναλύθηκαν από τον Frohlich το 1978 προτείνοντας σαν τιμή της I_{sc} την τιμή 1373 W/m^2 με πιθανό σφάλμα 1 ή 2 %. Την τελευταία δεκαετία κατασκευάστηκαν νέον τύπου πυρηλιόμετρα τα γνωστά σαν ραδιόμετρα, απολύτων μετρήσεων. Μετρήσεις με τα πυρηλιόμετρα αυτά επέτρεψαν στο Frohlich το 1982 να προτείνει την τιμή $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$, σαν πιο αξιόπιστη, με ακρίβεια $\pm 0.2\%$ [1,2].

1.3. Μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα

Η γη διαγράφει γύρω από τον ήλιο ελλειπτική τροχιά. Η μέση απόσταση γης-ήλιου ονομάζεται αστρονομική μονάδα (A.U.) και είναι ίση με $149.5 \times 10^6 \text{ km}$. Λόγω της εκκεντρότητας της τροχιάς της γης η απόσταση γης-ήλιου μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους σε ποσοστό $\pm 1.7\%$. Οι μεταβολές αυτές της απόστασης έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα περίπου κατά $\pm 3\%$.

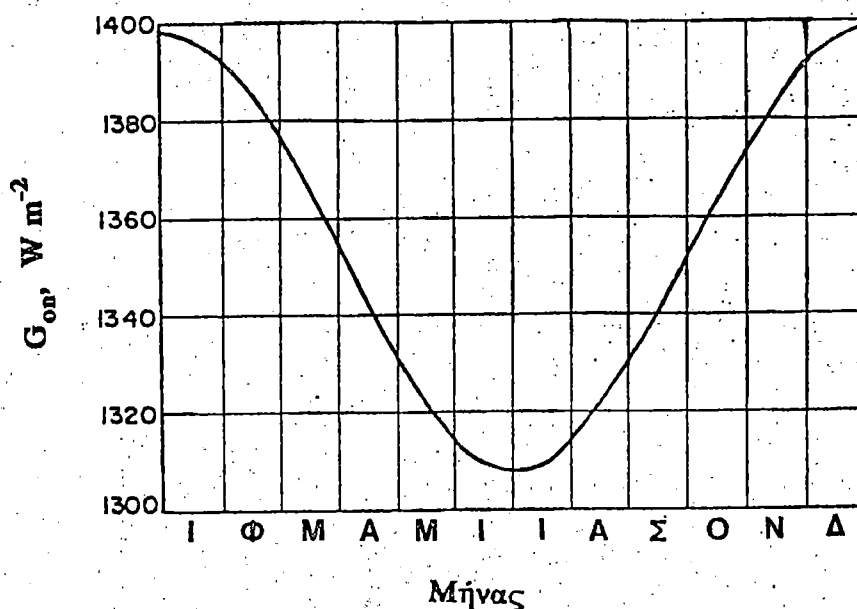
Η σχέση που εκφράζει τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας (έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα) συναρτήσεως του χρόνου είναι [1]:

$$G_{on} = I_{sc} [(1 + 0.033 \cos (360d/365))] \quad (1.3.1)$$

όπου G_{on} , είναι η ηλιακή ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα, που προσπίπτει σε επιφάνεια κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, την d ημέρα του

έτους, παίρνοντας $d = 1$ την 1^η Ιανουαρίου, και I_{sc} , είναι η τιμή της ηλιακής σταθεράς. Στο Σχήμα 1.3.1 φαίνεται αυτή η μεταβολή κατά τη διάρκεια του έτους.

Μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα προκαλεί επίσης η αλλαγή της εκπεμπόμενης από τον ήλιο ακτινοβολίας, λόγω της δραστηριότητας των ηλιακών κηλίδων. Αναλύσεις δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας έδειξαν, ου οι μεταβολές στη συνολική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο, είναι μικρότερες του $\pm 1.5\%$. Μετρήσεις που πάρθηκαν τελευταία από τους δορυφόρους Nimbus και Mariner έδειξαν μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας της τάξης του $\pm 0,2\%$ [1].



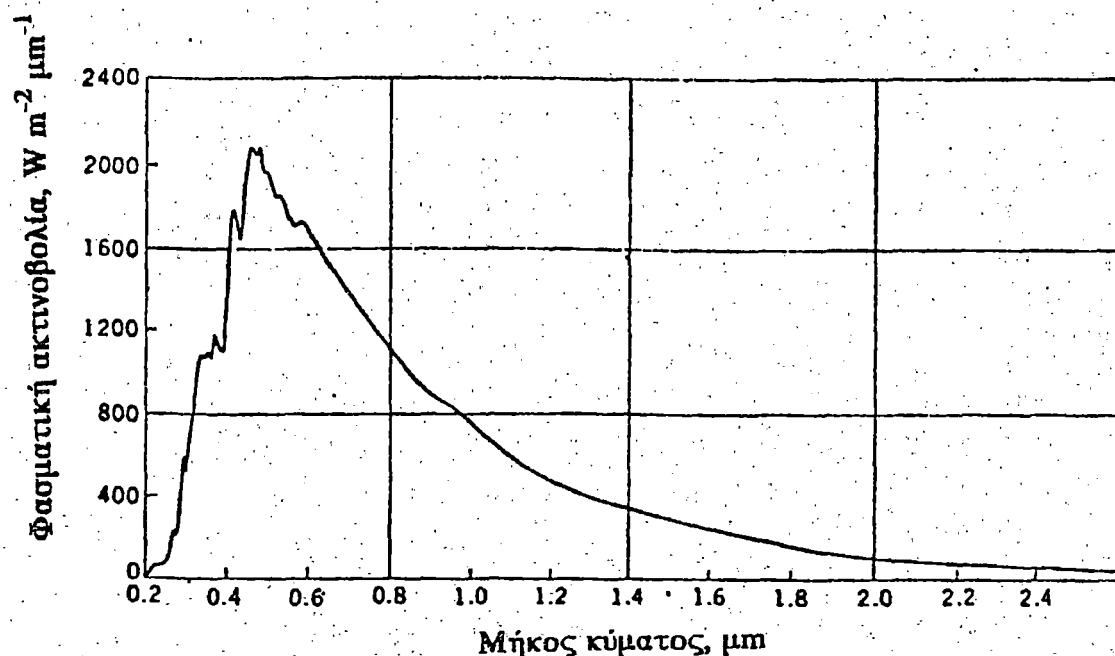
Σχήμα 1.3.1.: Μεταβολή της ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα συναρτήσει του μήνα

Για εφαρμογές όμως της ηλιακής ενέργειας στο έδαφος, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η γνώση της μεταβολής της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, δεδομένου, ότι αν αγνοήσουμε τη μεταβολή αυτή, Το αντίστοιχο σφάλμα που υπεισέρχεται στην εκτίμηση είναι πολύ μικρότερο από το σφάλμα στον υπολογισμό της διαπερατότητας της ατμόσφαιρας.

1.4. Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα

Η κατανομή της ακτινοβολούμενης ενέργειας στο ηλιακό φάσμα δεν είναι ίδια με εκείνη τον μέλανος σώματος σε θερμοκρασία ίση με την ενεργό θερμοκρασία του ήλιου. Έχει διαπιστωθεί, ότι διάφορες περιοχές τον φάσματος πηγάζουν από διάφορες περιοχές της ηλιακής ατμόσφαιρας με διαφορετικές θερμοκρασίες. Η γνώση της φασματικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα έχει μεγάλη σημασία για τις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας στο έδαφος [1.3].

Η τιμή της ηλιακής σταθεράς I_{sc} W/m^2 που μέχρι πρόσφατα γινόταν παραδεκτή, έχει αναθεωρηθεί κυρίως από τη μελέτη της ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα στα διάφορα μήκη κύματος του φάσματος. Η καμπύλη της φασματικής ακτινοβολίας, όπως προτείνεται από τους Thekaekara και Drummond [1], φαίνεται στο σχήμα 1.4.1. Το ολοκλήρωμα της καμπύλης δίνει για την ηλιακή σταθερά την τιμή $I_{sc} = 1353 W/m^2$. Αυτή η καμπύλη έχει προταθεί σαν πρότυπη, παρά την περιορισμένη ακρίβεια που έχει σχετικά με τις νεότερες μετρήσεις.



Σχήμα 1.4.1.: Πρότυπη καμπύλη της φασματικής ακτινοβολίας στη μέση απόσταση γης-ήλιου. ($I_{sc}=1353 W/m^2$)

1.5. Βασικές γνώσεις, απαραίτητες για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια στο έδαφος

Άμεση (direct) ακτινοβολία, είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο, χωρίς να αλλάζει διεύθυνση διερχόμενη διαμέσου της ατμόσφαιρας.

Διάχυτη (diffuse) ακτινοβολία, είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από τον ήλιο μετά την αλλαγή της διεύθυνσης της, λόγω σκέδασης, μέσα στην ατμόσφαιρα.

Ολική ακτινοβολία (global), είναι το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που δέχεται μια επιφάνεια.

Γεωγραφικό πλάτος Φ ενός τόπου, είναι η γωνιακή θέση βόρεια ή νότια του ισημερινού. Τα βόρεια πλάτη είναι θετικά, τα νότια αρνητικά, δηλαδή $-90^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$.

Απόκλιση ήλιου δ , είναι η γωνιακή θέση του ήλιου κατά την ηλιακή μεσημβρία, σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού. Η μεταβολή της απόκλισης δ είναι περιοδική με περίοδο ένα έτος και πλάτος $23^\circ 27'$, παίρνοντας την ελάχιστη τιμή της την 22/12 και την μέγιστη την 22/6. Υπολογίζεται από την εξίσωση του Cooper [4]:

$$\delta = 23.45^\circ \sin [360(284+d/365)] \quad (1.5.1)$$

όπου d , η ημέρα του έτους και $d=1$ για την 1^η Ιανουαρίου.

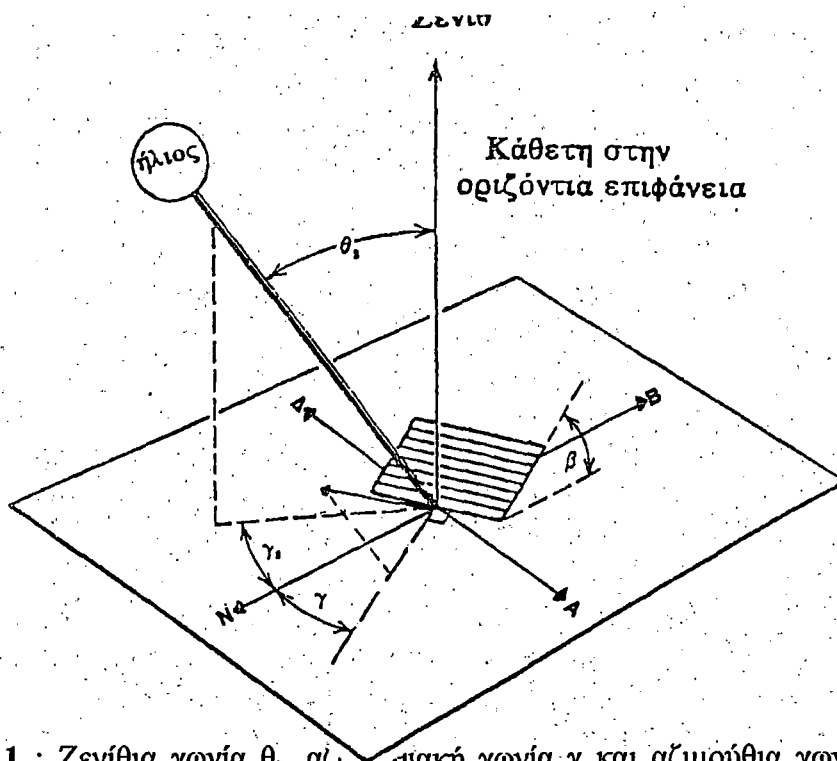
Κλίση επιφάνειας β , είναι η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια με το οριζόντιο επίπεδο, $0 \leq \beta \leq 180^\circ$.

Αζιμουθιακή γωνία επίπεδης επιφάνειας γ , είναι η απόκλιση από το νότο, της προβολής της καθέτου στην επιφάνεια, $-180^\circ < \gamma < 180^\circ$.

Αζιμούθια γωνία ήλιου γ_s , είναι η απόκλιση από το νότο της προβολής της διεύθυνσης της άμεσης ακτινοβολίας, μετρούμενη σε οριζόντιο επίπεδο, $-180^\circ < \gamma_s < 180^\circ$.

Ζενίθια γωνία του ήλιου θ_z , είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατακορύφου ενός τόπου και της διεύθυνσης των ακτινών της άμεσης ακτινοβολίας του ήλιου.

Στο Σχήμα 1.5.1. φαίνονται η κλίση β , η αζιμουθιακή γωνία γ , η ζενίθια γωνία θ_z και η αζιμούθια γωνία του ήλιου γ_s , για μια κεκλιμένη επιφάνεια.



Σχήμα 1.5.1 : Ζενίθια γωνία θ_z , αζιμούθια γωνία γ_s και αζιμούθια γωνία γ_s για κεκλιμένη επιφάνεια, κλίσης β .

Ωριαία γωνία ω , είναι η γωνιακή μετατόπιση του ήλιου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού, λόγω της περιστροφής της γης γύρω από τον άξονά της κατά 15° την ώρα. Για τις ώρες πριν τη μεσουράνηση του ήλιου η ωριαία γωνία έχει αρνητικές τιμές, ενώ για τις ώρες μετά τη μεσουράνηση θετικές.

Γωνία πρόσπτωσης θ , είναι η γωνία που σχηματίζουν οι ηλιακές ακτίνες (άμεσης ακτινοβολίας) με την κάθετη στην επιφάνεια. Η σχέση που συνδέει τη γωνία πρόσπτωσης θ της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας με τις άλλες γωνίες που αναφέρθηκαν πριν είναι:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma \\ &+ \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega \\ &+ \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega \\ &+ \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (1.5.2)$$

Για οριζόντιες επιφάνειες, η γωνία $\beta=0$ και η γωνία πρόσπτωσης είναι η ζενίθια γωνία του ήλιου θ_z . Επομένως η σχέση (1.5.2) για οριζόντια επιφάνεια γίνεται:

$$\cos\theta_s = \cos\delta \cos\varphi \cos\omega + \sin\delta \sin\varphi \quad (1.5.3)$$

Αν $\theta_z=90^\circ$, η αντίστοιχη ωριαία γωνία ω είναι η γωνία δύσης του ήλιου, ω_s . Λύνοντας την εξίσωση (1.5.3) για $\theta_z = 90^\circ$ προκύπτει:

$$\cos\omega_s = -(\sin\varphi \sin\delta / \cos\varphi \cos\delta) = -\tan\varphi \tan\delta \quad (1.5.4)$$

Διάρκεια της ημέρας N ή θεωρητική ηλιοφάνεια, είναι ο χρόνος κατά τον οποίον ο ήλιος βρίσκεται πάνω από τον ορίζοντα ενός τόπου. Ισούται με το διπλάσιο της ωριαίας γωνίας του ήλιου κατά την δύση, εκφρασμένη σε χρόνο. Από τη σχέση (1.5.4) προκύπτει ότι η διάρκεια της ημέρας N είναι:

$$N = (2/15) \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta), \text{ σε ώρες} \quad (1.5.5.)$$

Αέρια μάζα M (Air Mass), είναι ο λόγος του οπτικού πάχους της ατμόσφαιρας διαμέσου τον οποίου διέρχεται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία προς το οπτικό πάχος, αν ο ήλιος βρισκόταν στο ζενίθ. Στο επίπεδο της θάλασσας επομένως $M = 1$ όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ και $M = 2$ για ζενίθια γωνία $\theta_z = 60^\circ$. Για ζενίθιες γωνίες μεταξύ 0° και 70° και στο επίπεδο της θάλασσας, η αέρια μάζα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M = (\cos\theta_z)^{-1} \quad (1.5.6.)$$

Για $\theta_z > 70^\circ$ πρέπει να γίνει διόρθωση, γιατί το σφάλμα λόγω της καμπυλότητας της γης είναι σημαντικό. Η έκφραση του Kasten [13] για την αέρια μάζα, που έχει πλατιά υιοθετηθεί και ισχύει για $\theta_z < 89^\circ$ με σφάλμα 1 %, είναι

$$M = [\cos\theta_z + 0,15 (93,885 - \theta_z)^{-1,235}]^{-1} \quad (1.5.7.)$$

1.6. Ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια έξω από την ατμόσφαιρα

Αν θεωρήσουμε τη γη χωρίς ατμόσφαιρα και τελείως σφαιρική, η ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια σε Κάποιο τόπο και σε κάθε χρονική στιγμή, εξαρτάται από την κλίση των ακτινών του ήλιου. Είναι δηλαδή:

$$G_0 = G_{on} \cos\theta_z \quad (1.6.1)$$

Αντικαθιστώντας την G_{on} από τη σχέση (1.3.1) και το $\cos\theta_z$ από την (1.5.3) προκύπτει [1,5]:

$$G_0 = I_{sc} [1 + 0.033 \cos(360d/365)] (\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega) \quad (1.6.2)$$

Μια ενδιαφέρουσα ποσότητα είναι η ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία Q_0 , σε οριζόντια επιφάνεια και στο όριο της ατμόσφαιρας. Μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση (1.6.2) αν την ολοκληρώσουμε από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, και ισούται με:

$$Q_0 = 24 \times 3600 \cdot \frac{I_{sc}}{\pi} [1 + 0.033 \cos(360d / 365)] \times (\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + 2\pi\omega_s / 360 \sin\phi \sin\delta / 360) \quad (1.6.3)$$

όπου I_{sc} η ηλιακή σταθερά σε μονάδες W/m^2 και ω_s , η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου σε μοίρες.

Η μέση μηνιαία τιμή της ημερήσιας ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα Q_0 , είναι επίσης μια χρήσιμη ποσότητα και συνήθως υπολογίζεται από τη σχέση (1.6.3) για τη μέση ημέρα του μήνα. Ο Klein (1976) [1] προτείνει για τον υπολογισμό της Q_0 , η μέση ημέρα του μήνα να είναι εκείνη που έχει Q_0 , περίπου ίση με την Q_0 του μήνα.

Τιμές της ακτινοβολίας Q_0 υπάρχουν σε πίνακες για πλάτη από -60° μέχρι 60° [1]. Για να υπολογίσουμε την ωριαία ακτινοβολία I_0 σε οριζόντια επιφάνεια έξω από την ατμόσφαιρα, ολοκληρώνουμε την εξίσωση (1.6.2) για περίοδο μιας ώρας, που ορίζεται από τις ωριαίες γωνίες ω_1 και ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$). Το αποτέλεσμα είναι η εξίσωση:

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} I_{sc} [1 + 0.033 \cos \frac{360d}{365}] \times [\cos\phi \cos\delta (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin\phi \sin\delta] \quad (1.6.4.)$$

Γενικά, για να υπολογίσουμε την ακτινοβολία για κάποιο χρονικό διάστημα αρκεί να ορίσουμε τις ωριαίες γωνίες ω_1 και ω_2 που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο διάστημα.

Κεφάλαιο ii

ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

2.1. Γενικά

Η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διόδό της μέσα στην ατμόσφαιρα υποβιβάζεται κυρίως για δύο λόγους:

Πρώτον, λόγω της ατμοσφαιρικής σκέδασης από τα μόρια του αέρα, τους υδρατμούς και τα σωματίδια σκόνης και δεύτερον, λόγω της ατμοσφαιρικής απορρόφησης από τα μόρια O_2, O_3, H_2O και CO_2 .

Ο μηχανισμός σκέδασης για τα μόρια του αέρα συμφωνεί με τη θεωρία του Rayleigh, σύμφωνα με την οποία ο συντελεστής σκέδασης μεταβάλλεται ανάλογα προς το λ^{-4} , όπου λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Για τα σωματίδια σκόνης ο συντελεστής σκέδασης μεταβάλλεται περίπου ανάλογα του $\lambda^{-0,75}$, ενώ για τους υδρατμούς ανάλογα του λ^{-2} .

Το αποτέλεσμα της σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας ήταν το αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών και αρκετές προσεγγιστικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για να υπολογισθεί η μείωση της ακτινοβολίας που προκαλείται από τη σκέδαση. Αν ορίσουμε την διαπερατότητα της ατμόσφαιρας, που είναι ο λόγος της ακτινοβολίας που μετράται στο έδαφος προς την ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας, το ολικό αποτέλεσμα της σκέδασης μπορεί να γραφεί προσεγγιστικά από τη σχέση [6]:

$$T_{\lambda(s)} = [(T_{a\lambda})^p / 760 (T_{d\lambda})^d / 800 (T_{w\lambda})^w / 20]^M \quad (2.1.1)$$

όπου

$T_{\lambda(s)}$ είναι ο μονοχρωματικός συντελεστής ατμοσφαιρικής διαπερατότητας άμεσης ακτινοβολίας, σε μήκος κύματος λ , αν λάβουμε υπόψη μόνο τη σκέδαση.

$T_{a\lambda}, T_{d\lambda}, T_{w\lambda}$ είναι οι μονοχρωματικοί συντελεστές διαπερατότητας, που έχουν σχέση με την ατμοσφαιρική σκέδαση, τη σκέδαση από σωματίδια σκόνης και υδρατμούς, αντίστοιχα.

- p, είναι η πίεση της ατμόσφαιρας, σε μονάδες mmHg
d, είναι η συγκέντρωση των σωματιδίων σκόνης κοντά στο έδαφος, σε σωματίδια/cm³
w, είναι το ύψος υετήσιμου νερού, σε mm και
M, η αέρια μάζα.

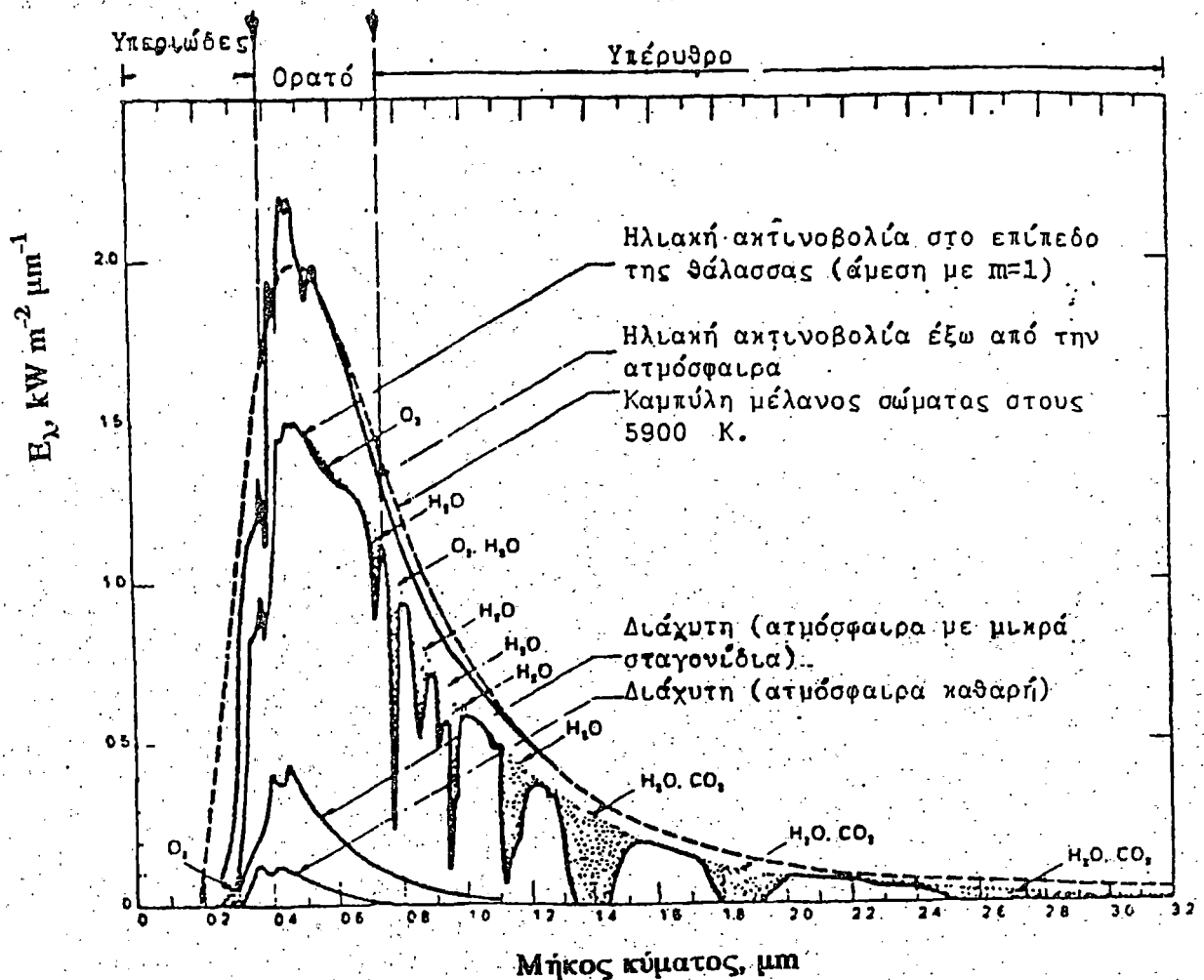
Οι παράμετροι p και M μπορούν να προσδιοριστούν, ενώ οι τιμές των d και w γενικά είναι άγνωστες και μπορούν να εκτιμηθούν στην επιφάνεια από μετρήσεις.

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας στην Περιοχή μικρού μήκους κύματος ($\lambda < 0.3 \mu\text{m}$) είναι σχεδόν πλήρης και οφείλεται στο όζον των ανώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Στο όζον επίσης οφείλεται και μικρή απορρόφηση στην περιοχή των 0.6 μm . Οι υδρατμοί απορροφούν ισχυρά στο υπέρυθρο (1.1 μm , 1.4 μm 1.8 μm) όπως και το CO₂. Για μήκη κύματος $\lambda > 3.0 \mu\text{m}$ η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το H₂O και το CO₂ είναι πλήρης. Η μονοχρωματική διαπερατότητα της άμεσης ακτινοβολίας μπορεί να γραφεί σαν γινόμενο της ατμοσφαιρικής διαπερατότητας, $T_{\lambda(s)}$ και των διαπερατοτήτων, απορρόφησης όζοντος $T_{\text{ολ}}$ και υδρατμών $T_{w\lambda}$, δηλαδή:

$$T_{\lambda} = T_{\lambda(s)} T_{\lambda(\text{abs})} = T_{\lambda(s)} T_{\text{ολ}} T_{w\lambda} \quad (2.1.2.)$$

Στο Σχήμα 2.1.1 υπάρχει η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα και η φασματική καμπύλη μέλανος σώματος, θερμοκρασίας περίπου 5900 K. που έχει την ίδια φασματική Κατανομή με την ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης, φαίνεται η κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της θάλασσας για M=1 [7].

Έξω από την ατμόσφαιρα, το 7% της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας είναι στο υπεριώδες (0.3-0.38 μm), το 47% στο ορατό (0.38-0.78 μm) και το 46% στο υπέρυθρο (0.78-3.0 μm). Για μήκη κύματος μεγαλύτερα από 2.5 μm , οι χαμηλές τιμές της ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα και η ισχυρή απορρόφηση από τα μόρια CO₂ και H₂O, έχουν σαν αποτέλεσμα να φθάνει στο έδαφος ένα πολύ μικρό ποσό ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως, για εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας μας ενδιαφέρει μόνο η ακτινοβολία μηκών κύματος μεταξύ 0.3 μm και 2.5 μm .



Σχήμα 2.1.1.: Η φασματική κατανομή της ηλιακής ενέργειας έξω από την ατμόσφαιρα και στο έδαφος.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα συστατικά της ατμόσφαιρας σκεδάζουν την ηλιακή ακτινοβολία και ένα μέρος της σκεδαζόμενης αυτής ακτινοβολίας φθάνει στο έδαφος, με αποτέλεσμα να υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία ακόμη και στην περίπτωση πολύ καθαρού ουρανού. Τα σωματίδια νερού και στερεών στα σύννεφα, σκεδάζουν επίσης την ακτινοβολία και στην περίπτωση πλήρους νέφωσης, όλη η ακτινοβολία που φθάνει στη γη είναι διάχυτη.

Στο Σχήμα 2.1.1 υπάρχει επίσης η φασματική κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας για την περίπτωση καθαρής ατμόσφαιρας (μικρό ποσό διάχυτης ακτινοβολίας) και ατμόσφαιρας με κάποιο ποσοστό σταγονιδίων νερού (μεγαλύτερο ποσό διάχυτης). Σύμφωνα με τη θεωρία σκέδασης Rayleigh, τα μικρότερα μήκη κύματος σκεδάζονται περισσότερο και επομένως η κατανομή της διάχυτης ακτινοβολίας μετατοπίζεται προς τα μικρότερα μήκη κύματος.

Η ένταση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, Q , που προσπίπτει στην επιφάνεια του εδάφους, είναι το άθροισμα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προέρχεται από τον ηλιακό δίσκο και της διάχυτης ακτινοβολίας που προέρχεται από τις υπόλοιπες περιοχές του ουρανού θόλου. Η ένταση της άμεσης ακτινοβολίας είναι

δυνατόν να υπολογισθεί, αν γνωρίζουμε τη διαπερατότητα της ατμόσφαιρας, ενώ ο υπολογισμός της διάχυτης είναι πολύπλοκος. Όταν η ατμόσφαιρα είναι καθαρή και ο ήλιος ψηλά (θ_z μικρό), τότε η διάχυτη είναι μικρό ποσοστό της ολικής ακτινοβολίας, ενώ όταν ο ήλιος είναι κοντά στον ορίζοντα του τόπου, η διάχυτη είναι Περίπου το 50% της ολικής. Όταν ο ήλιος είναι στο ζενίθ, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που μετράται σε οριζόντιο επίπεδο και στην επιφάνεια της θάλασσας είναι 1 kW/m^2 . Στα ψηλά βουνά η μέγιστη τιμή μπορεί να φθάσει τα 1.1 kW/m^2 , επειδή η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα είναι μικρότερη και επομένως μικρότερη και η εξασθένηση λόγω απορρόφησης και σκέδασης.

2.2. Όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας

Τα όργανα για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατατάσσονται σε δύο βασικούς τύπους [1,5] :

1. **Πυρηλιόμετρα ή ακτινόμετρα:** είναι όργανα για τη μέτρηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Έχουν σύστημα σκόπευσης του ηλιακού δίσκου, ώστε στο μαύρο πυθμένα του συστήματος να φθάνει η άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή αυξάνει τη θερμοκρασία της μαύρης επιφάνειας και επιτρέπει τον υπολογισμό της άμεσης ακτινοβολίας. Το πεδίο σκοπεύσεως ενός κοινού πυρηλιομέτρου είναι περίπου 5.7° . Εάν το πυρηλιόμετρο συνδεθεί με μηχανισμό, ώστε να παρακολουθεί την τροχιά του ήλιου, μπορούμε να έχουμε μια συνεχή καταγραφή της άμεσης ακτινοβολίας. Οι μετρήσεις αυτές είναι απαραίτητες για την πρόβλεψη της απόδοσης των συγκεντρωτικών ηλιακών συλλεκτών.
2. **Πυρανόμετρα ή ηλιόμετρα:** είναι όργανα για μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντιο επίπεδο και είναι ευαίσθητα στην περιοχή από 0.3 μέχρι 3μm. Έχουν ημισφαιρικά καλύμματα από γυαλί και εσωτερικά, λευκούς και μαύρους δίσκους, για να ανακλούν και να απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία. Η διαφορά θερμοκρασίας των δίσκων είναι ανάλογη της ολικής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σ' αυτούς και μετράται με σειρά θερμοζευγών, που τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα της τάξης των mV. Τα πυρανόμετρα συνδέονται με καταγραφικά και ολοκληρωτές, για να μετρούμε την ολική ηλιακή ακτινοβολία για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Αν το πυρανόμετρο σκιασθεί από την άμεση ακτινοβολία, μετρά τη διάχυτη ακτινοβολία. Η σκίαση γίνεται είτε με τη χρησιμοποίηση μικρού δίσκου σε μικρή

απόσταση από το όργανο ή με ταινία στερεωμένη στον πολικό άξονα του οργάνου. Η δεύτερη μέθοδος επιτρέπει τη συνεχή Καταγραφή, επειδή το όργανο σκιάζεται συνέχεια, αλλά μ' αυτό τον τρόπο εμποδίζεται ένα μέρος της διάχυτης ακτινοβολίας να φθάσει στο όργανο και οι μετρήσεις πρέπει να διορθωθούν με κατάλληλους συντελεστές.

2.3. Όργανα μέτρησης της ηλιοφάνειας

Η μέτρηση της διάρκειας της ηλιοφάνειας, δηλαδή ο χρόνος που ο ηλιακός δίσκος είναι ορατός, γίνεται συνήθως με τον καταγραφέα ηλιοφάνειας Campbell-Stokes [1,5]. Το όργανο αυτό χρησιμοποιεί μια στερεά γυάλινη σφαίρα, διαμέτρου περίπου 10cm, σαν φακό, που εστιάζει το είδωλο του ήλιου σε κατάλληλα προσαρμοσμένη ταινία. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία ξεπεράσει τα 200 W/m^2 δημιουργείται ένα σημάδι καπνίσματος πάνω στην ταινία. Το συνολικό μήκος του καπνίσματος της ταινίας δίνει τη διάρκεια της πραγματικής ή μετρούμενης ηλιοφάνειας. Για την εγκατάσταση των οργάνων μέτρησης της ηλιοφάνειας πρέπει να εκλέγεται η θέση εκείνη που έχει όσο το δυνατόν μικρότερη κάλυψη του ορίζοντά της. Αν ανατολικά ή δυτικά του ορίζοντα του τόπου υπάρχουν ψηλά εμπόδια (βουνά, δέντρα, κτίσματα), τότε για αρκετή ώρα ο τόπος βρίσκεται στη σκιά αυτών των εμποδίων και η ηλιοφάνεια είναι μικρότερη της πραγματικής, αφού τα εμπόδια δεν επιτρέπουν τις ηλιακές ακτίνες να φθάσουν μέχρι το όργανο μέτρησης της ηλιοφάνειας.

Η μετρούμενη στη περίπτωση αυτή διάρκεια της ηλιοφάνειας ονομάζεται γεωγραφική ηλιοφάνεια. Τα νέφη περιορίζουν ακόμη περισσότερο τη διάρκεια της ηλιοφάνειας. Στην περίπτωση αυτή η μετρούμενη ηλιοφάνεια ονομάζεται πραγματική ή μετρούμενη ηλιοφάνεια. Όταν ο ορίζοντας ενός τόπου είναι ακάλυπτος και ο ουρανός ανέφελος, η θεωρητική ηλιοφάνεια ή διάρκεια της ημέρας, είναι περίπου ίση με τη γεωγραφική και ίση με τη μετρούμενη ηλιοφάνεια.

2.4. Δεδομένα που απαιτούνται για ηλιακές εφαρμογές

Τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για τις ηλιακές εφαρμογές διατίθενται από μετεωρολογικούς σταθμούς ή διάφορες μετεωρολογικές υπηρεσίες. Οι περισσότεροι μετεωρολογικοί σταθμοί διαθέτουν δεδομένα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια, για χρονική περίοδο μιας ώρας ή μιας ημέρας.

Δεδομένα άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας είναι διαθέσιμα από λιγότερους σταθμούς και κυρίως για τα τελευταία χρόνια, που άρχισε η μελέτη συστημάτων για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Άλλα μετεωρολογικά στοιχεία, που είναι απαραίτητα για τις ηλιακές εφαρμογές και μετρούνται στους περισσότερους σταθμούς είναι Κυρίως ηλιοφάνεια, νέφωση, υγρασία, θερμοκρασία, ταχύτητα του ανέμου και πίεση.

Γενικά, οι απαιτήσεις δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας ή άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας. Για παράδειγμα, για τη μελέτη των επίπεδων ηλιακών συλλεκτών απαιτούνται τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της κατανομής συχνοτήτων της ολικής ακτινοβολίας. Για τα συστήματα αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας απαιτούνται πληροφορίες για τη χρονική διάρκεια παραμονής της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από μια ορισμένη τιμή κατωφλίου.

Για συγκεντρωτικά συστήματα που χρησιμοποιούν εστιακούς, παραβολικούς και σφαιρικούς συλλέκτες απαιτούνται τιμές της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας καθώς επίσης η γνώση της κατανομής των συχνοτήτων τους [8].

Για γεννήτριες που βασίζονται σε θερμοδυναμικά φαινόμενα, τα απαραίτητα δεδομένα είναι, η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία, η στατιστική κατανομή τους, η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου. [8].

Η απόδοση φωτοβολταϊκών συστημάτων εξαρτάται πολύ από τη φασματική κατανομή της ολικής ακτινοβολίας. Επομένως είναι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με την ολική ακτινοβολία, τη φασματική κατανομή της, τη θερμοκρασία και την ταχύτητα του ανέμου [78].

Τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να τα πληροφορηθεί κανείς και από μετεωρολογικούς χάρτες. Παγκόσμιοι χάρτες ολικής ηλιακής ακτινοβολίας δημοσιεύθηκαν αρχικά από τους Lof et al. (1966) και ξανατυπώθηκαν από τον Jong (1973).

Οι χάρτες μεγάλης κλίμακας όμως, πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή, επειδή δεν δείχνουν τις τοπικές, φυσικές ή κλιματολογικές συνθήκες, που μπορούν να επηρεάσουν πολύ την τοπική διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν, για πληροφορίες σχετικά με τις μεταβολές από τόπο σε τόπο των χρονικών μέσων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα τοπικά δεδομένα.

2.5. Μέθοδοι υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, για το σχεδιασμό και τη λειτουργία μιας ηλιακής εγκατάστασης σε κάποιο τόπο απαιτείται η γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος και για το συγκεκριμένο τόπο. Επειδή τα διαθέσιμα δεδομένα από τους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι ανεπαρκή ή και τελείως ανύπαρκτα για πολλούς τόπους, που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την εγκατάσταση μιας ηλιακής εγκατάστασης, αναπτύχθηκαν διάφοροι μέθοδοι υπολογισμού ή μοντέλα πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χωρισθούν σε τρεις κατηγορίες:

2.5.1. Ατμοσφαιρικά μοντέλα

Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας στηρίζονται στον υπολογισμό της απορρόφησης και σκέδασης της ηλιακής ακτινοβολίας από τα ατμοσφαιρικά συστατικά. Απαραίτητα δεδομένα για ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο είναι τιμές διαφόρων ατμοσφαιρικών παραμέτρων όπως υγρασίας, νέφωσης, ηλιοφάνειας, θερμοκρασίας, πίεσης, ατμοσφαιρικού όζοντος κ.ά. Ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο μπορεί να προβλέψει τιμές άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας για μικρά χρονικά διαστήματα. Έχουν προταθεί διάφορα ατμοσφαιρικά μοντέλα που μπορούν να εφαρμοσθούν σε κάθε τόπο, αν είναι διαθέσιμα τα απαραίτητα δεδομένα. Μερικά από τα πιο αξιόπιστα μοντέλα που προτάθηκαν και εφαρμόστηκαν σε διάφορους τόπους αναφέρονται στις εργασίες [9-16]. Τα περισσότερα ατμοσφαιρικά μοντέλα στηρίζονται στη γενική μορφή, που δίνεται από τη σχέση [12]:

$$I = I_{sc} \cos \theta_z T_G T_R T_w T_p T_c f / (1 - r_a r_s) \quad (2.5.1.)$$

όπου I , είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο έδαφος ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου, I_{sc} η ηλιακή σταθερά, θ_z η ζενίθια γωνία, T_G η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας λόγω της απορρόφησης της ακτινοβολίας από τα αέρια της ατμόσφαιρας, όπως το όζον και το οξυγόνο, T_R η διαπερατότητα λόγω της σκέδασης Rayleigh, T_w η διαπερατότητα λόγω της απορρόφησης από τους υδρατμούς, T_p η διαπερατότητα λόγω της απορρόφησης και ανάκλασης στο αεροζόλ., (δηλαδή σε στερεά ή υγρά αιωρήματα που υπάρχουν μέσα στην ατμόσφαιρα), T_c η διαπερατότητα λόγω της απορρόφησης και ανάκλασης στα σύννεφα, f η σχετική

απόσταση της γης από τον ήλιο, r_a η ατμοσφαιρική ανακλαστικότητα και r_s η ανακλαστικότητα της επιφάνειας.

Πολλοί ερευνητές προτείνουν διάφορες συναρτήσεις για τον υπολογισμό των διαπερατοτήτων από τις τιμές των ατμοσφαιρικών παραμέτρων [10,12,15,16]. Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα διακρίνονται σε μοντέλα υπολογισμού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού (απουσία νέφωσης) ή σε συνθήκες νεφελώδους ουρανού. Οι συναρτήσεις διαπερατότητας είναι συχνά πολύπλοκες και επομένως απαιτείται η χρήση υπολογιστού μεγάλης μνήμης. Επίσης, οι τιμές των ατμοσφαιρικών δεδομένων για την εφαρμογή ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου μετρούνται από λίγους μετεωρολογικούς σταθμούς και το γεγονός αυτό κάνει δύσκολη ή αδύνατη την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας, για κάποιο συγκεκριμένο τόπο.

2.5.2. Στοχαστικά μοντέλα

Τα στοχαστικά μοντέλα πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας στηρίζονται στη στατιστική επεξεργασία δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας, χωρίς να απαιτούνται άλλα μετεωρολογικά δεδομένα. Για να είναι αξιόπιστο ένα στοχαστικό μοντέλο απαιτούνται μετρήσεις πολλών χρόνων. Επειδή συστηματικές μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας είναι διαθέσιμες για λίγα χρόνια και για μικρό αριθμό μετεωρολογικών σταθμών, η ανάπτυξη των μοντέλων αυτών δεν ήταν δυνατή τα Πρώτα χρόνια έρευνας (δεκαετία 1970-80), σχετικά με τη διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια. Την τελευταία δεκαετία (1980-90) πολλοί ερευνητές προσανατολίσθηκαν στην κατεύθυνση αξιοποίησης των διαθέσιμων μετεωρολογικών δεδομένων και με τη χρήση υπολογιστού μεγάλης μνήμης προσπαθούν να προβλέψουν, με στοχαστικές διαδικασίες, διάφορα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η βασική παραδοχή στις στοχαστικές διαδικασίες είναι ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια στοχαστική μεταβλητή, που εξαρτάται από το χρόνο. Διάφοροι ερευνητές προτείνουν μοντέλα πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας με διαδικασίες Markov ή μοντέλα αυτοσυσχέτισης [17-18]. Το πρόβλημα για ένα στοχαστικό μοντέλο είναι, πόσο αξιόπιστα μπορεί να αναπαραγάγει ακολουθίες δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας, ημερήσιων ή ωριαίων, που να έχουν την ίδια στατιστική κατανομή όπως τα πραγματικά.

2.6. Εμπειρικά μοντέλα

Τα εμπειρικά μοντέλα προϋποθέτουν την ανεύρεση κάποιας εμπειρικής σχέσης ανάμεσα σε διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους. Τα περισσότερα εμπειρικά μοντέλα προβλέπουν την ολική ηλιακή ακτινοβολία, συσχετίζοντας τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας με τιμές ηλιοφάνειας ή νέφωσης. Οι εμπειρικές παράμετροι των συναρτήσεων συσχέτισης του μοντέλου έχουν τοπική ισχύ και πρέπει να αναπροσαρμόζονται για κάθε περιοχή.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα, που απαιτούνται για ένα εμπειρικό μοντέλο, μετρούνται σχεδόν από όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς και είναι δυνατή η ανάπτυξή τους και η χρήση τους στις ηλιακές εφαρμογές. Τα δεδομένα ηλιοφάνειας, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, μετρούνται με τα όργανα Campbell-Stokes, ενώ οι Τιμές νέφωσης εκτιμούνται με οπτικές παρατηρήσεις και για αυτό τα μοντέλα, που στηρίζονται στη συσχέτιση ηλιακής ακτινοβολίας και ηλιοφάνειας, είναι πιο αξιόπιστα από τα μοντέλα που στηρίζονται στο βαθμό νέφωσης. Τα κυριότερα εμπειρικά μοντέλα εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας στο έδαφος, που χρησιμοποιούνται στις ηλιακές εφαρμογές, είναι τα παρακάτω.

2.6.1. Μοντέλο Angstrom

Πρώτος ο Angstrom [29] διετύπωσε μια εμπειρική σχέση, συσχετίζοντας μέσες μηνιαίες τιμές ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας με μέσες μηνιαίες τιμές ημερήσιας ηλιοφάνειας. Η σχέση αυτή έχει τη μορφή:

$$\frac{\bar{Q}}{\bar{Q}_e} = a' + b' \frac{\bar{n}}{\bar{N}'} \quad (2.6.1.1.)$$

όπου

\bar{Q} , η μέση μηνιαία τιμή της ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια για συγκεκριμένο τόπο,

\bar{Q}_e , η μέση μηνιαία τιμή της ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας καθαρού ουρανού για τον τόπο αυτό,

\bar{n} , η μέση μηνιαία τιμή της ημερήσιας ηλιοφάνειας, σε ώρες,

\bar{N}' , ή μέση μηνιαία μέγιστη ηλιοφάνεια,

εμπειρικές παράμετροι

a', b' ,

Η σχέση αυτή παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα στην εφαρμογή της σε σχέση με τους όρους n/N και Q_c . Ο πρώτος όρος n/N έχει σχέση με την αξιοποίηση των ταινιών του ηλιογράφου, στην οποία υπεισέρχεται σε σημαντικό βαθμό ο προσωπικός παράγοντας του παρατηρητή, ενώ όσο αφορά τον δεύτερο όρο Q_c ακόμη δεν έχει καθορισθεί με σαφήνεια τι σημαίνει “καθαρή ημέρα”.

2.6.2. Μοντέλο Page

Ο Page [30] χρησιμοποιώντας την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια έξω από την ατμόσφαιρα και σε συγκεκριμένο τόπο, τροποποίησε την μέθοδο Angstrom προτείνοντας τη σχέση:

$$\frac{\bar{Q}}{\bar{Q}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (2.6.2.1)$$

όπου

- \bar{Q}_0 , η μέση μηνιαία τιμή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα για το συγκεκριμένο τόπο,
- \bar{N} , η μέση μηνιαία διάρκεια της ημέρας,
- a, b , εμπειρικές παράμετροι.

2.6.3. Μοντέλο AFEDES

(Cahiers de l' Association française pour l' etude et la developpement de l' energie solaire)

Το μοντέλο αυτό έχει προταθεί από την AFEDES [31] και όπως στο μοντέλο Angstrom, γίνεται συσχέτιση του λόγου $\frac{\bar{Q}}{\bar{Q}_c}$ και της μέσης μηνιαίας σχετικής ηλιοφάνειας, \bar{n}/\bar{N} . Η σχέση που προτείνεται είναι:

$$\frac{\bar{Q}}{\bar{Q}_c} = (a_1 \frac{\bar{n}}{\bar{N}} + b_1)^{c_1} - d_1 \quad (2.6.3.1)$$

όπου a_1, b_1, c_1, d_1 εμπειρικές παράμετροι

Για την Περιοχή της Μασσαλίας στη Γαλλία, δίνονται οι εξής τιμές των εμπειρικών αυτών παραμέτρων:

$$a_1=2, b_1=1, c_1=0.5, d_1=0.72$$

Η AFEDES προτείνει επίσης για τον υπολογισμό της έντασης της διάχυτης ακτινοβολίας, Q_d τη σχέση:

$$Q_d = 132 (\sin(h))^0.4 \quad (2.6.3.2.)$$

όπου h το ύψος του ήλιου.

2.6.4. Μοντέλο S. T. Reddy

Ο S.J. Reddy [32] πρότεινε ένα εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού της ακτινοβολίας Q , συναρτήσει δεδομένων ηλιοφάνειας, σχετικής υγρασίας και του αριθμού των ημερών με βροχόπτωση το συγκεκριμένο μήνα. Η εμπειρική σχέση που προτείνεται είναι:

$$\bar{Q} = K \left[\frac{1 + 0.8 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) (1 - 0.2t)}{\sqrt{R}} \right] \quad (2.6.4.1.)$$

όπου $K = (\lambda \bar{N} + \Psi_{ij} \cos \phi) 10^2$

$$(2.6.4.2.)$$

ϕ , το γεωγραφικό πλάτος του τόπου

$$\lambda = 0.2 / (1 + 0.1\phi) \quad (2.6.4.3.)$$

Ψ_{ij} εποχιακή παράμετρος ($i=1,2$ όπου, 1 αναφέρεται σε νησιώτικες συνθήκες και 2 σε παράλιες). Ο δείκτης j καθορίζει το μήνα, παίρνοντας $j=1$ για τον Ιανουάριο και $j=12$ για το Δεκέμβριο. Οι Τιμές των Ψ_{1j} , Ψ_{2j} για το βόρειο ημισφαίριο δίνονται στον πίνακα (2.6.4.1). Η παράμετρος R είναι η σχετική υγρασία και

$$T = r / ND$$

όπου

r είναι ο αριθμός των ημερών με βροχόπτωση το συγκεκριμένο μήνα και ND είναι ο αριθμός των ημερών του μήνα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6.4.1.

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ψ_{1j}	1.28	1.38	1.54	1.77	2.05	2.30	2.48	2.41	2.36	1.73	1.38	1.17
Ψ_{2j}	1.46	1.77	2.05	2.15	2.05	2.05	2.10	2.17	2.14	1.96	1.60	1.43

2.6.5. Μοντέλο j.a. Sabbagh et al.

Ο J.A. Sabbagh [33] πρότεινε την παρακάτω σχέση για την εκτίμηση της ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας Q , που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια και σε τόπο γεωγραφικού πλάτους ϕ :

$$Q = 1.530K \exp [\Phi (n / 12 - (R^{1/3}) / 100 - 1 / T_m)] \quad (2.6.5.1.)$$

όπου

- n είναι η ημερήσια ηλιοφάνεια,
- R η σχετική υγρασία,
- T_m η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα σε °C
- Φ γεωγραφικό πλάτος σε ακτίνια
- K είναι η παράμετρος του Reddy από τη σχέση (2.6.4.2).

2.6.6. Μοντέλο s. Barbaro

Ο S. Barbaro [134] τροποποίησε την εμπειρική σχέση εκτίμησης της ακτινοβολίας Q , που είχε προταθεί από τον Sivkon [35] και είχε τη μορφή:

$$\bar{Q} = 4.9(\bar{n})^{1.31} + 10500[\sin(h_d)]^{2.1} \quad (2.6.6.1.)$$

όπου h_d , το ύψος του ήλιου την μεσημβρία και την 15ην ημέρα του συγκεκριμένου μήνα.

Η τροποποιημένη μορφή του Barbaro είναι:

$$\bar{Q} = K(\bar{n})^{1.24}(h_d)^{-0.19} + 10550 [\sin(h_d)]^{2.1} + 300[\sin(h_d)]^3 \quad (2.6.6.2.)$$

Η σχέση Barbaro εφαρμόστηκε στην Ιταλία, η οποία χωρίστηκε σε τρεις ζώνες, έτσι ώστε κάθε ζώνη να περιέχει τόπους με ίδιες περίπου κλιματολογικές συνθήκες.

2.6.7. Μοντέλα πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας από δεδομένα νέφωσης

Μερικοί ερευνητές προτείνουν τη συσχέτιση της ηλιακής ακτινοβολίας με το βαθμό νέφωσης. Αρχικά ο Budyko [36] πρότεινε την παρακάτω σχέση για την εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, Q :

$$Q = Q_c (1 - a'' - c - b'' c_2) \quad (2.6.7.1.)$$

Όπου

c ο βαθμός νέφωσης και
 a'', b'' εμπειρικές παράμετροι

Ο F. Kasten [37] προτείνει τη σχέση:

$$Q(c') / Q(0) = 1 - 0.75(c'/8)^{3.4} \quad (2.6.7.2.)$$

όπου

$Q(c')$, είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία όταν ο βαθμός νέφωσης είναι c' και $Q(0)$, η ολική ηλιακή ακτινοβολία όταν ο βαθμός νέφωσης είναι μηδέν.

Επειδή ο βαθμός νέφωσης εκτιμάται εμπειρικά, ενώ η ηλιοφάνεια μετριέται με όργανα, τα μοντέλα εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας από δεδομένα ηλιοφάνειας είναι πιο ακριβή και αξιόπιστα και χρησιμοποιούνται περισσότερο στις ηλιακές εφαρμογές.

2.7. Εκτίμηση της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας από δεδομένα ολικής ακτινοβολίας

2.7.1. Γενικά

Για εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας και κυρίως για συγκεντρωτικά συστήματα απαιτούνται τιμές της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας. Διαθέσιμα δεδομένα διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας υπάρχουν σε λίγους μετεωρολογικούς σταθμούς και για μικρό αριθμό ετών. Γι αυτό το λόγο, διάφοροι ερευνητές

προτείνουν μεθόδους υπολογισμού τιμών άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας από δεδομένα ολικής ακτινοβολίας. Πριν αναφέρουμε τις κυριότερες μεθόδους είναι απαραίτητο να ορίσουμε το μέσο μηνιαίο δείκτη αιθριότητας \bar{K}_T , τον ημερήσιο δείκτη αιθριότητας, K_T και τον ωριαίο δείκτη αιθριότητας, k_T σύμφωνα με τις σχέσεις [1,5]:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{Q}}{Q_0} \quad (2.7.1.1.)$$

$$K_T = \frac{Q}{Q_0} \quad (2.7.1.2.)$$

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (2.7.1.3.)$$

όπου I , είναι η ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια και I_0 είναι η ωριαία ολική ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα.

2.7.2. Εκτίμηση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας

Η εκτίμηση της άμεσης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας, Q_n ή της μέσης μηνιαίας τιμής της, \bar{Q}_n , γίνεται κυρίως από ατμοσφαιρικά μοντέλα. Αρκετοί όμως ερευνητές προτείνουν εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση των μεγεθών Q_n και \bar{Q}_n .

Ο Iqbal [38] προτείνει εμπειρική σχέση συσχέτισης των λόγων \bar{Q}_n/\bar{Q}_0 και \bar{n}/\bar{N} , η οποία είναι:

$$\frac{\bar{Q}_n}{\bar{Q}_0} = -0.176 + 1.45 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) - 1.12 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^2 \quad (2.7.2.1.)$$

Άλλοι ερευνητές, όπως οι Castro et al. [39] και Louche et al. [40], προτείνουν εξισώσεις συσχέτισης τον λόγου Q_n/Q_0 με τον δείκτη αιθριότητας K_T ή την ημερήσια σχετική ηλιοφάνεια, n/N . Επίσης ο Perez et al. [41], συσχετίζοντας δεδομένα από 14 σταθμούς της Ευρώπης και της Αμερικής προτείνουν μοντέλα, τα οποία εκτιμούν την άμεση ηλιακή ακτινοβολία από δεδομένα ολικής ακτινοβολίας. Εξισώσεις συσχέτισης άμεσου και ολικής ακτινοβολίας αναφέρει και ο Becker [42].

Οι ερευνητές Πισιμάνης και Νοταρίδου [43] εκτιμούν την ακτινοβολία Q_n για τον Ελλαδικό χώρο από τη σχέση Barbaro:

$$Q_n = \frac{n}{N} Q_c \quad (2.7.2.2.)$$

Η Q_c υπολογίζεται από το μοντέλο Bird και Hulstrom [43].

2.7.3. Εκτίμηση της ωριαίας ακτινοβολίας από δεδομένα ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας

Διάφορες στατιστικές μελέτες που έγιναν σχετικά με την κατανομή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της ημέρας, από διαθέσιμα δεδομένα πολλών σταθμών, οδήγησαν στην Κατασκευή χαρτών του λόγου της ωριαίας ολικής ακτινοβολίας 1, προς την ημερήσια ολική ακτινοβολία Q , συναρτήσεως της διάρκειας της ημέρας και της συγκεκριμένης ώρας. Τέτοιοι χάρτες δημοσιεύθηκαν αρχικά από τους Liu και Jordan (1960). Αναλύοντας αυτούς του χάρτες οι Collares-Pereira και Rabi [1,44], προτείνουν την παρακάτω εξίσωση συσχέτισης:

$$\frac{I}{Q} = \frac{\pi}{24} (a+b \cos\omega) \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - (2\pi\omega_s / 360)\cos\omega_s} \quad (2.7.3.1.)$$

όπου ω , είναι η ωριαία γωνία, σε μοίρες, για το μέσο της ώρας για την οποία γίνεται ο υπολογισμός και ω_s είναι η ωριαία γωνία δύσης του ήλιου. Οι παράμετροι a και b υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$a = 0.4090 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (2.7.3.2.)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (2.7.3.3.)$$

2.7.4. Εκτίμηση της ημερήσιας διάχυτης ακτινοβολίας από δεδομένα ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας

Μελέτες διαφόρων ερευνητών έδειξαν ότι το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας σε σχέση με την ολική Q_d/Q , είναι συνάρτηση του ημερήσιου δείκτη αιθριότητας K_T . Μία τέτοια μελέτη έγινε αρχικά από τους Liu και Jordan [45]. Παρόμοιες μελέτες έγιναν αργότερα από άλλους ερευνητές για διαφορετικούς τόπους

[43, 47, 48, 49]. Σχέσεις, που προέκυψαν από συσχετίσεις δεδομένων διαφόρων τόπων, έχουν προταθεί από τους Collares-Pereira και Rabi [44] και είναι οι εξής:

$$\frac{Q_d}{Q} = 0.99 \quad \text{για} \quad K_T \leq 0.17$$

$$\frac{Q_d}{Q} = 1.188 - 2.272 K_T + 9.473 K_T^2 - 21.856 K_T^3 + 14.448 K_T^4$$

για $0.17 < K_T < 0.75$

$$\frac{Q_d}{Q} = 0.54 K_T + 0.632 \quad \text{για} \quad 0.75 < K_T \leq 0.80$$

$$\frac{Q_d}{Q} = 0.2 \quad \text{για} \quad K_T \geq 0.80$$

Άλλοι ερευνητές προτείνουν εμπειρικές σχέσεις για τη διάχυτη ακτινοβολία, συναρτήσει της σχετικής ηλιοφάνειας [39,50].

2.7.5. Εκτίμηση της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας από δεδομένα ωριαίας ολικής ακτινοβολίας

Ελάχιστοι ερευνητές ασχολήθηκαν με την εκτίμηση της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας από τιμές ωριαίας ολικής ακτινοβολίας. Οι Orgill και Hollands [1,50] προτείνουν τις πιο αξιόπιστες σχέσεις για τον υπολογισμό του ωραίου ποσοστού διάχυτης ακτινοβολίας I_d/I , από τιμές του ωραίου δείκτη αιθριότητας k_T . Οι εξισώσεις συσχέτισης είναι :

$$\frac{I_d}{I} = 1.0 - 0.249 k_T \quad \text{για} \quad k_T < 0.35$$

$$\frac{I_d}{I} = 1.557 - 1.84 k_T \quad \text{για} \quad 0.35 < k_T < 0.75$$

$$\frac{I_d}{I} = 0.177 \quad \text{για} \quad k_T > 0.75$$

2.7.6. Εκτίμηση της μέσης μηνιαίας τιμής της διάχυτης ακτινοβολίας

Η εξίσωση που εκτιμά πιο αξιόπιστα το μέσο μηνιαίο ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας $\frac{\bar{Q}_d}{\bar{Q}}$, είναι η εξίσωση που προτείνουν οι Collage – Pereira και Rabi [44,1] :

$$\frac{\bar{Q}_d}{\bar{Q}} = 0.775 + 0.00653 (\omega_s - 90) - [0.505 + 0.00455 (\omega_s - 90)] \cos(115\bar{K}_T - 103) \quad (2.7.6.1.)$$

όπως ω_s , σε μοίρες είναι η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου για τη μέση ημέρα του μήνα.

Ο Iqbal [38] συσχετίζοντας δεδομένα διάχυτης ακτινοβολίας και σχετικής ηλιοφάνειας, προτείνει τις εξής σχέσεις :

$$\frac{\bar{Q}_d}{\bar{Q}} = 0.791 - 0.635 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)$$

$$\frac{\bar{Q}_d}{\bar{Q}_o} = 0.163 + 0.478 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) - 0.655 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^2$$

Κεφάλαιο iii

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

3.1. Γενικά

Η μέθοδος Page (βλ. παράγραφο 2.6.2) επακολουθεί ακόμη να χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάποιο τόπο και να προσαρμόζεται στις ιδιαίτερες συνθήκες του συγκεκριμένου τόπου. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο II, τα ατμοσφαιρικά μοντέλα είναι πιο δύσκολα να χρησιμοποιηθούν στις ηλιακές εφαρμογές, γιατί απαιτούνται αρκετά μετεωρολογικά στοιχεία, τα οποία δεν είναι διαθέσιμα από πολλούς σταθμούς. Οι ώρες ηλιοφάνειας είναι διαθέσιμες σχεδόν απ' όλους τους μετεωρολογικούς σταθμούς, ενώ τα τελευταία χρόνια οι περισσότεροι σταθμοί διαθέτουν επίσης τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν με τη συσχέτιση δεδομένων ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και ωρών ηλιοφάνειας και υπολόγισαν τις παραμέτρους συσχέτισης, οι οποίες μεταβάλλονται από τόπο σε τόπο [34,38,52-70]. Οι περισσότεροι ερευνητές χρησιμοποίησαν τη μέθοδο Page και προτείνουν κυρίως ετήσιες τιμές των παραμέτρων **a** και **b**. Αρκετοί επίσης προσπάθησαν να συσχετίσουν τις παραμέτρους **a** και **b** με γεωγραφικά ή κλιματολογικά στοιχεία του τόπου.

Αρχικά, οι Clover και McCulloch [81] πρότειναν ότι η παράμετρος **a** είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους φ του τόπου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$a = 0.29 \cos\varphi \quad (3.1.1)$$

και για πλάτη μεταξύ 0° και 60° . Αργότερα, οι Frere et al. [82] πρότειναν γραφικές σχέσεις για τις παραμέτρους **a** και **b** συναρτήσει της μέσης ετήσιας τιμής της σχετικής ηλιοφάνειας. Τελευταία, οι ερευνητές Raja και Twidell [69] προτείνουν για την παράμετρο **a** τη σχέση:

$$a = 0.388 \cos\varphi \quad (3.1.2)$$

Από τα συμπεράσματα των παραπάνω ερευνητών προκύπτει ότι οι σχέσεις (3.1.1) και (3.1.2), που δίνουν την παράμετρο **a** συναρτήσει του φ , ισχύουν μόνο για ετήσιες τιμές της παραμέτρου.

Οι Carli et al. [59] αναφέρουν ότι οι τιμές των μηνιαίων παραμέτρων βρίσκονται μεταξύ 0.10 και 0.55 με πιο επικρατέστερες τιμές στην περιοχή μεταξύ 0.20 και 0.50. Επίσης, για τις τιμές των μηνιαίων παραμέτρων (a+b) αναφέρουν, ότι βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ 0.55 και 0.90 με μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στην περιοχή μεταξύ 0.65 και 0.80.

Ο Gorinathan [61] Προτείνει ότι οι παράμετροι a και b είναι συναρτήσεις του γεωγραφικού πλάτους, του ύψους του σταθμού και της σχετικής ηλιοφάνειας.

Επειδή δεδομένα ηλιοφάνειας υπάρχουν για τους περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς, οι εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας από δεδομένα ηλιοφάνειας, βοήθησαν να γίνουν χάρτες ηλιακής ακτινοβολίας για αρκετές περιοχές [59, 69]. Οι χάρτες αυτοί όμως, αναφέρονται κυρίως σε μέσες ετήσιες ή μηνιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν για συγκεκριμένες ηλιακές εφαρμογές, για τις οποίες απαιτούνται δεδομένα για μικρότερα χρονικά διαστήματα.

Προηγούμενοι ερευνητές, που ασχολήθηκαν με την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα είναι οι, Β. Κατσούλης και Κ. Παπαχριστόπουλος [71], Γ. Μακρής [72], Νοταρίδου και Δ. Αάλας [73], Β. Κατσούλης και Σ. Λεονταρής [74], Α. Φλόκας [75], Α. Πελεκάνος και Κ. Παπαχριστόπουλος [76], Β. Κατσούλης [7η, Δ. Κουρεμένος, Κ.Α. Αντωνόπουλος και Ε. Ντομαζάκης [78]. Στο σύνολο τους σχεδόν οι προηγούμενοι ερευνητές εκτιμούν την ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιώντας τον τύπο του Angstrom ή τον Page, βασιζόμενοι μόνον σε δεδομένα του Αστεροσκοπείου Αθηνών. Οι παράμετροι συσχέτισης που προτείνουν είναι ετήσιες και αναφέρονται για όλο τον Ελλαδικό χώρο. Ο Φλόκας [75] διαιρεί την Ελλάδα σε περιοχές και προτείνει ετήσιες παραμέτρους, που διαφέρουν ελάχιστα από περιοχή σε περιοχή. Η Νοταρίδου [73] συσχετίζει την ηλιακή ακτινοβολία με τη νέφωση και οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας που εκτιμά είναι μικρότερες των τιμών που προτείνουν οι άλλοι ερευνητές. Στην εργασία [78] γίνεται ανάλυση ωριαίων, ημερήσιων και μηνιαίων τιμών ολικής ακτινοβολίας για την περιοχή των Αθηνών.

3.2. Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, όσοι ασχολήθηκαν με την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα βασίσθηκαν σε δεδομένα του

Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Από το έτος 1977 η Δ.Ε.Η. [79] έχει δημιουργήσει ηλιογραφικούς σταθμούς σε διάφορα μέρη της Ελλάδας. Στους σταθμούς αυτούς έχουν εγκατασταθεί ηλιογράφοι Campbell-stokes για τη μέτρηση της ηλιοφάνειας και ακτινογράφοι τύπου Robitzsch για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Θα είχε ενδιαφέρον επομένως, να γίνει εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας για τον Ελλαδικό χώρο, λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα από την Δ.Ε.Η. Οι σταθμοί της Δ.Ε.Η. υπάρχουν σε διάφορα γεωγραφικά πλάτη και σε τόπους που παρουσιάζουν κλιματολογικές ιδιομορφίες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από τους σταθμούς της Δ.Ε.Η. είναι ημερήσιες τιμές ολικής ακτινοβολίας και ηλιοφάνειας για τη χρονική περίοδο 1977-1980 [79].

Οι ακτινογράφοι των σταθμών της Δ.Ε.Η. βαθμολογήθηκαν με πυρανόμετρο Ερρίγγ του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, σε μονάδες της απόλυτης κλίμακας SI που ισχύει από την 1.4.1977 και η οποία σε σχέση με παλαιότερη κλίμακα του 1956 δίνει τιμές κατά 2.1% μεγαλύτερες.

Επειδή το διμεταλλικό στοιχείο μετρήσεως των ακτινογράφων παθαίνει κόπωση και χάνει την ευαισθησία του με το πέρασμα του χρόνου, προτείνονται συντελεστές διόρθωσης των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε σταθμό. Αυτούς τους συντελεστές τους λάβαμε υπόψη μας κατά την επεξεργασία των μετρήσεων.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών είναι ημερήσιες Τιμές ολικής ακτινοβολίας και ηλιοφάνειας για τη χρονική περίοδο 1960-1975 [80]. Τα διαθέσιμα δεδομένα ηλιοφάνειας είναι σε ώρες και δέκατα της ώρας, ενώ της ολικής ακτινοβολίας σε μονάδες $\text{Cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$.

3.3. Μέθοδος εκτίμησης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια

Για την εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια, έγινε συσχέτιση δεδομένων ολικής ηλιακής ακτινοβολίας με δεδομένα ηλιοφάνειας σύμφωνα με την μέθοδο Page, όπως εκφράζεται για συγκεκριμένη ημέρα, από την εξίσωση:

$$\frac{Q_m}{Q_0} = a + b \frac{n}{N}$$

(3.3.1)

όπου

Q_m , η μετρούμενη ημερήσια ολική ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια για μια συγκεκριμένη ημέρα,

n , η μετρούμενη ηλιοφάνεια για την ίδια ημέρα,

Q_0 , η ολική ακτινοβολία έξω από την ατμόσφαιρα για τη συγκεκριμένη ημέρα

N , η θεωρητική διάρκεια της ημέρας για την αντίστοιχη ημέρα.

Για κάθε συγκεκριμένη ημέρα του μήνα υπολογίσθηκε η ακτινοβολία Q_0 από τη σχέση (1.6.3) και η διάρκεια της ημέρας N από τη σχέση (1.5.5). Υπολογίσθηκαν επίσης οι λόγοι του ποσοστού ακτινοβολίας Q/Q_0 και της σχετικής ηλιοφάνειας n/N για κάθε ημέρα του μήνα.

Για κάθε σταθμό εκτιμήθηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, οι μηνιαίες παράμετροι a , b και ο συντελεστής συσχέτισης R . Οι τιμές των παραμέτρων a , b και του συντελεστού συσχέτισης R για τους επτά μετεωρολογικούς σταθμούς δίνονται στον πίνακα 3.3.1, για κάθε μήνα. Στον ίδιο πίνακα υπάρχουν το γεωγραφικό πλάτος Φ , το γεωγραφικό μήκος λ και το ύψος του σταθμού.

Από τον πίνακα 3.3.1 συμπεραίνουμε ότι υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών Q_n/Q_0 και n/N για όλους τους σταθμούς, γιατί οι τιμές του συντελεστού R στο μεγαλύτερο ποσοστό τους ξεπερνούν την τιμή 0.90. Παρατηρούμε επίσης ότι ο συντελεστής συσχέτισης μικραίνει τους θερινούς μήνες, για τους οποίους η σχετική ηλιοφάνεια είναι μεγαλύτερη, συγκριτικά με τους υπόλοιπους μήνες. Αυτό οφείλεται στη θόλωση της ατμόσφαιρας, η οποία είναι αυξημένη κατά τη θερινή περίοδο και έχει σαν αποτέλεσμα να καταγράφουν οι ακτινογράφοι μικρότερες τιμές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας από τις πραγματικές. Επομένως, ενώ υπάρχουν διαφορετικές τιμές στους λόγους $\frac{n}{N}$, δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές στους λόγους $\frac{Q_m}{Q_0}$.

$$\text{Αν στη σχέση } \frac{Q_m}{Q_0} = a + b \frac{n}{N} \quad \text{θέσουμε } n=0 \text{ έχουμε } \frac{Q_m}{Q_0} = a,$$

Δηλαδή η παράμετρος a , μπορούμε να πούμε ότι είναι ένα μέτρο του ποσοστού της διάχυτης ακτινοβολίας για νεφосκεπή ημέρα. Αν στην ίδια θέση θέσουμε $n=N$ τότε

$$\frac{Q_m}{Q_0} = a + b. \quad \text{Η παράμετρος } a + b \text{ είναι το ποσοστό της ολικής ηλιακής}$$

ακτινοβολίας που φθάνει στο έδαφος, όταν έχουμε πλήρη ηλιοφάνεια, δηλαδή έχουμε μια εκτίμηση του μηνιαίου δείκτη αιθριότητας για καθαρή (χωρίς νέφη) ατμόσφαιρα. Στην πραγματικότητα, η μετρούμενη ηλιοφάνεια η , δεν γίνεται ποτέ ίση με τη θεωρητική N , αν λάβουμε υπόψη μας τον τρόπο μέτρησης. Η μέση ετήσια τιμή της παραμέτρου a για τον Ελλαδικό χώρο είναι 0.24 με τυπική απόκλιση ± 0.04 , ενώ η μέση ετήσια τιμή της b είναι 0.52 με τυπική απόκλιση ± 0.08 . Στον πίνακα 3.3.2 υπάρχουν οι τιμές της παραμέτρου $a+b$ για τους επτά σταθμούς και για κάθε μήνα.

Από τον πίνακα 3.3.2 συμπεραίνουμε ότι γενικά η παράμετρος $a+b$ είναι μεγαλύτερη τους χειμωνιάτικους μήνες και μικρότερη τους καλοκαιρινούς. Αυτό αναμένεται θεωρητικά, γιατί το χειμώνα συγκριτικά με το καλοκαίρι, όταν ο ουρανός είναι ανέφελος, τα ατμοσφαιρικά σωματίδια σκέδασης και απορρόφησης όπως σκόνη, υδρατμοί, αεροζόλ είναι λιγότερα, δηλαδή η ατμόσφαιρα είναι πιο καθαρή. Επομένως, το ποσοστό ακτινοβολίας που φθάνει στη γη για την ίδια ζενίθια γωνία του ηλίου, είναι μεγαλύτερο το χειμώνα ότι το καλοκαίρι.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3.1

πλάτος φ 35⁰30' 36⁰22' 37⁰58' 38⁰37' 39⁰06' 39⁰38' 40⁰56'
 μήκος λ 24⁰02' 28⁰13' 23⁰43' 21⁰24' 26⁰33' 22⁰25' 24⁰25'
 ύψος (m) 50 5 107 60 30 65 150

Μήσος		Χανιά	Ρόδος	Αθήνα	Αργίνιο	Μυτ/νη	Λάρισα	Καβάλα
I	\bar{n}/\bar{N}	0.41	0.42	0.44	0.31	0.34	0.36	0.31
	a	0.23	0.26	0.19	0.22	0.21	0.18	0.24
	b	0.63	0.54	0.51	0.63	0.53	0.73	0.39
	R	0.96	0.93	0.89	0.95	0.93	0.93	0.90
Φ	\bar{n}/\bar{N}	0.37	0.52	0.51	0.45	0.39	0.34	0.37
	a	0.20	0.26	0.17	0.23	0.21	0.21	0.23
	b	0.67	0.53	0.56	0.59	0.58	0.65	0.58
	R	0.93	0.96	0.88	0.97	0.95	0.93	0.92
M	\bar{n}/\bar{N}	0.48	0.57	0.50	0.50	0.49	0.46	0.41
	a	0.19	0.21	0.23	0.24	0.21	0.28	0.24
	b	0.65	0.57	0.52	0.56	0.55	0.49	0.47
	R	0.88	0.95	0.95	0.96	0.98	0.94	0.91
A	\bar{n}/\bar{N}	0.58	0.62	0.61	0.44	0.58	0.50	0.49
	a	0.28	0.26	0.29	0.25	0.26	0.24	0.23
	b	0.50	0.51	0.41	0.47	0.47	0.53	0.53
	R	0.88	0.96	0.92	0.91	0.93	0.97	0.92
M	\bar{n}/\bar{N}	0.71	0.68	0.72	0.52	0.60	0.49	0.48
	a	0.24	0.29	0.21	0.21	0.26	0.24	0.28
	b	0.54	0.47	0.51	0.54	0.49	0.50	0.50
	R	0.94	0.95	0.92	0.92	0.94	0.96	0.94
I	\bar{n}/\bar{N}	0.78	0.81	0.77	0.68	0.78	0.65	0.66
	a	0.15	0.30	0.31	0.32	0.27	0.22	0.29
	b	0.62	0.45	0.37	0.37	0.46	0.51	0.44
	R	0.75	0.92	0.89	0.83	0.89	0.95	0.90
I	\bar{n}/\bar{N}	0.83	0.84	0.85	0.80	0.83	0.72	0.70
	a	0.18	0.24	0.31	0.24	0.38	0.32	0.33
	b	0.58	0.51	0.35	0.48	0.34	0.36	0.37
	R	0.71	0.56	0.62	0.84	0.80	0.67	0.78
A	\bar{n}/\bar{N}	0.82	0.84	0.87	0.76	0.84	0.70	0.67
	a	0.24	—	0.20	0.28	0.21	0.27	0.23
	b	0.50	—	0.47	0.44	0.54	0.42	0.49
	R	0.69	—	0.88	0.81	0.86	0.90	0.94
Σ	\bar{n}/\bar{N}	0.74	0.79	0.74	0.69	0.76	0.60	0.63
	a	0.28	0.20	0.21	0.30	0.20	0.24	0.21
	b	0.50	0.60	0.49	0.44	0.57	0.50	0.53
	R	0.85	0.83	0.86	0.85	0.95	0.88	0.91
O	\bar{n}/\bar{N}	0.50	0.63	0.66	0.56	0.62	0.40	0.49
	a	0.21	0.30	0.17	0.22	0.29	0.16	0.25
	b	0.60	0.47	0.55	0.57	0.45	0.68	0.46
	R	0.93	0.91	0.91	0.97	0.95	0.96	0.96
N	\bar{n}/\bar{N}	0.44	0.66	0.61	0.52	0.58	0.43	0.46
	a	0.23	0.24	0.23	0.18	0.23	0.21	0.25
	b	0.60	0.56	0.42	0.66	0.55	0.64	0.37
	R	0.92	0.95	0.85	0.95	0.93	0.96	0.88
Δ	\bar{n}/\bar{N}	0.41	0.50	0.48	0.45	0.46	0.43	0.38
	a	0.22	0.26	0.23	0.24	0.21	0.22	0.21
	b	0.60	0.52	0.39	0.52	0.55	0.65	0.39
	R	0.92	0.94	0.90	0.91	0.93	0.95	0.91
M.T	\bar{n}/\bar{N}	0.59	0.66	0.65	0.56	0.61	0.51	0.50
	a	0.22	0.26	0.23	0.24	0.24	0.23	0.25
	b	0.58	0.52	0.46	0.52	0.51	0.56	0.46
	R							

\bar{n}/\bar{N} : μέση μηνιαία σχετική ηλιοφάνεια

a, b : εμπειρικές παράμετροι

R : συντελεστής συσχέτισης

M.T : μέση ετήσια τιμή

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3.2.

 $a + b$

Μήνας	Χανιά	Ρόδος	Αθήνα	Αγρίνιο	Μυτ/νη	Λάρισα	Καβάλα
I	0.86	0.80	0.70	0.85	0.74	0.91	0.63
Φ	0.87	0.79	0.73	0.82	0.79	0.86	0.81
M	0.84	0.78	0.75	0.80	0.76	0.77	0.71
A	0.78	0.77	0.70	0.72	0.73	0.77	0.76
M	0.78	0.76	0.72	0.75	0.75	0.74	0.78
I	0.77	0.75	0.68	0.69	0.73	0.73	0.73
I	0.76	0.75	0.66	0.72	0.72	0.68	0.70
A	0.74	—	0.67	0.72	0.74	0.69	0.72
Σ	0.78	0.80	0.70	0.74	0.77	0.74	0.74
O	0.81	0.77	0.72	0.79	0.74	0.84	0.71
N	0.83	0.80	0.65	0.84	0.78	0.85	0.62
Δ	0.82	0.78	0.62	0.76	0.76	0.87	0.60

3.4. Εκτίμηση των μηνιαίων παραμέτρων a και b

Χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές μηνιαίες παραμέτρους a και b του πίνακα 3.3.1, μπορεί να εκτιμηθεί η ολική ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια από δεδομένα ηλιοφάνειας, για τους αντίστοιχους σταθμούς. Για τις εφαρμογές όμως της ηλιακής ενέργειας στην Ελλάδα θα είχε ενδιαφέρον να εκτιμηθούν οι παράμετροι a και b και για άλλες περιοχές της Ελλάδας, οι οποίες διαθέτουν δεδομένα ηλιοφάνειας, ώστε να είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η ηλιακή ακτινοβολία και για τις περιοχές αυτές. Υποθέτοντας ότι οι παράμετροι a και b είναι συναρτήσεις της μέσης μηνιαίας σχετικής ηλιοφάνειας, έγινε εκτίμησή τους, με τη μέθοδο της στατιστικής

παλινδρόμησης. Η αναλυτική έκφραση των a και b υποθέσαμε ότι είναι πολυωνυμικής μορφής 3ου βαθμού. Η υπόθεση αυτή δίνει ικανοποιητική ακρίβεια, η οποία δεν βελτιώνεται σημαντικά, αν υποθέσουμε πολυωνυμική μορφή 4ου βαθμού.

Επομένως έχουμε:

$$a = a_0 + a_1 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) + a_2 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^2 + a_3 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^3 \quad (3.4.1.)$$

$$b = b_0 + b_1 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) + b_2 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^2 + b_3 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^3 \quad (3.4.2.)$$

Οι συντελεστές a_0, a_1, a_2, a_3 και b_0, b_1, b_2, b_3 είναι :

$a_0 = 0.395$	$b_0 = 0.395$
$a_1 = 1.247$	$b_1 = 1.384$
$a_2 = 2.680$	$b_2 = 3.249$
$a_3 = 1.674$	$b_3 = 2.055$

3.5. Εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια, με τιμές των παραμέτρων a και b , που προσδιορίστηκαν από τις πολυωνομικές εκφράσεις

Για εννέα μετεωρολογικούς σταθμούς υπολογίσθηκαν για κάθε μήνα και για δεδομένη τιμή της μέσης μηνιαίας σχετικής ηλιοφάνειας $\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$, οι παράμετροι a και b , από τις μαθηματικές εκφράσεις (3.4.1) και (3.4.2).

Από τη σχέση $\bar{Q}_e = \bar{Q}_0 \left(a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)$ υπολογίσθηκαν οι μέσες μηνιαίες Τιμές της ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας Q_e και το % σχετικό σφάλμα e , για κάθε σταθμό. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 3.5.1. Στον ίδιο πίνακα υπάρχουν επίσης οι τιμές της μέσης μηνιαίας μετρούμενης ολικής ακτινοβολίας Q_m . Οι τιμές των ακτινοβολιών Q_e και Q_m είναι σε μονάδες $MJ m^{-2} day^{-1}$.

Στον πίνακα αυτόν παρατηρούμε ότι το ετήσιο σχετικό σφάλμα για το σταθμό των Αθηνών είναι 5.2%, ενώ για τους υπόλοιπους σταθμούς το μέγιστο σφάλμα είναι για το σταθμό της Ρόδου, με τιμή -3.9% και το ελάχιστο για το σταθμό της Μυτιλήνης, με τιμή - 0.2%. Παρατηρούμε δηλαδή ότι για το σταθμό των Αθηνών

υπερεκτιμούμε την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό ήταν αναμενόμενο, γιατί η περιοχή των Αθηνών παρουσιάζει αυξημένη ρύπανση τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα οι ακτινογράφοι να καταγράφουν μικρότερα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας απ' ότι θα κατέγραφαν, αν είχαμε τις ίδιες τιμές ηλιοφάνειας, αλλά χωρίς ρύπανση.

Παρατηρούμε επίσης ότι, ενώ τα δεδομένα των σταθμών Σπάρτης και Ζακύνθου δεν ανήκουν στο αρχικό δείγμα, από το οποίο υπολογίσθηκαν οι παράμετροι a και b η εκτίμηση της ακτινοβολίας για αυτούς τους δύο σταθμούς όπως φαίνεται στον πίνακα 3.5.1, είναι αρκετά ικανοποιητική. Το ετήσιο σχετικό σφάλμα για το σταθμό της Σπάρτης είναι -1.7% και για το σταθμό της Ζακύνθου -3.5% .

Από μελέτη του πίνακα 3.5.1 επίσης συμπεραίνουμε, ότι το μηνιαίο σχετικό σφάλμα e είναι μικρότερο από $\pm 5\%$ για το 69% των περιπτώσεων, ενώ το 27% βρίσκεται στη περιοχή μεταξύ $\pm 5\%$ και $\pm 10\%$. Επομένως, μπορεί να εκτιμηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια η ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, για κάποιο σταθμό της Ελλάδας, που διαθέτει ημερήσια δεδομένα ηλιοφάνειας.

3.6. Σύγκριση αποτελεσμάτων από την προτεινόμενη μέθοδο με αποτελέσματα προηγούμενων ερευνητών

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.1., προηγούμενοι ερευνητές που ασχολήθηκαν με την εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα, βασίσθηκαν σε μέσα μηνιαία δεδομένα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Ο Φλόκας [75] χωρίζει τον Ελλαδικό χώρο σε τρεις περιοχές και προτείνει ετήσιες παραμέτρους a και b για κάθε περιοχή. Επίσης, οι Πελεκάνος και Παπαχριστόπουλος [76] προτείνουν ετήσια τιμή της παραμέτρου $a = 0.192$ και ετήσια τιμή της Παραμέτρου $b = 0.516$, για ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο.

Σύγκριση αποτελεσμάτων, για πέντε διαφορετικούς σταθμούς, που προέκυψαν με την προτεινόμενη μέθοδο και αποτελεσμάτων που προέκυψαν, λαμβάνοντας υπόψη τις Τιμές a και b των παραπάνω ερευνητών, Φαίνεται, στον πίνακα 3.6.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5.1.

Μήνας		Χανιά	Ρόδος	Αθήνα	Αργείο	Μυτ/νη	Λάρισα	Καβάλα
I	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	7.87	7.73	7.47	6.18	6.30	6.33	5.67
		8.61	8.41	6.75	6.87	6.70	6.76	5.32
		-8.60	-8.10	10.70	-10.10	2.10	-6.50	6.60
Φ	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	9.63	11.18	10.61	9.84	8.91	8.32	8.34
		10.27	12.08	9.80	10.19	9.39	8.79	8.32
		-6.20	-7.40	8.20	-3.40	-5.00	-5.30	0.20
M	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	13.97	15.27	13.87	13.73	13.47	12.90	11.86
		14.61	15.81	13.82	14.26	13.11	13.51	11.52
		-4.40	-3.40	0.40	-3.70	2.70	-4.50	3.00
A	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	19.13	19.80	18.90	16.11	18.66	17.24	16.78
		20.50	20.17	18.55	16.45	18.84	17.37	16.91
		-6.70	-1.80	1.90	-2.10	-1.00	-0.70	-0.80
M	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	23.72	23.20	23.81	20.07	21.67	19.39	19.12
		24.64	24.31	23.07	19.48	21.60	19.47	19.83
		-3.70	-4.60	3.20	3.00	0.30	-0.40	-3.60
I	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	25.90	26.44	25.81	24.29	26.01	23.77	23.96
		26.66	26.22	25.11	23.85	26.11	22.66	23.77
		-2.80	-0.80	2.80	1.90	-0.40	4.90	0.80
I	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	26.20	26.40	26.58	25.73	26.23	24.41	24.06
		26.55	27.29	25.37	24.77	25.71	23.15	23.84
		-1.30	-3.30	4.80	3.90	2.00	5.40	0.90
A	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	23.89	24.12	24.44	22.69	23.83	21.68	21.07
		23.32	24.86	22.81	22.04	23.78	20.43	20.22
		-2.40	-3.00	7.20	-3.00	0.20	6.10	4.20
Σ	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	19.17	19.61	18.64	17.86	18.62	16.42	16.56
		20.07	20.71	17.97	18.37	19.00	16.41	15.97
		-4.50	-5.30	3.70	-2.80	-2.00	0.10	3.70
O	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	12.28	13.66	13.51	12.22	12.76	9.96	10.75
		12.99	14.78	12.42	12.40	13.08	10.05	10.38
		-5.50	-7.60	8.80	-1.50	-2.50	-0.90	3.60
N	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	8.74	10.57	9.63	8.64	9.01	7.51	7.41
		8.97	11.15	8.58	8.95	9.29	7.85	6.55
		-2.60	-5.20	12.2	-3.50	-3.00	-4.40	13.20
Δ	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	7.26	7.81	7.16	6.73	6.67	6.27	5.55
		7.62	8.28	6.16	6.97	6.57	6.90	4.74
		-4.70	-5.70	16.2	-3.50	1.40	-9.10	17.10
M.T	$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$	16.48	17.15	16.70	15.34	16.01	14.52	14.22
		17.07	17.84	15.87	15.48	16.05	14.45	13.95
		-3.50	-3.90	5.20	-0.90	-0.20	0.50	1.90

$\frac{Q_i}{Q_m} e_{B^c}$: μέση μηνιαία εκτιμώμενη ολική ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)
 $\frac{Q_i}{Q_m}$: μέση μηνιαία μετρούμενη ολική ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)
 M.T: μέση ετήσια τιμή
 e: % σχετικό σφάλμα

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5.1. (συνέχεια)

πλάτος φ 37°04' 37°43'
 μήκος λ 22°26' 20°51'
 ύψος (m) 200 10

Μήνας		Σπάρτη	Ζάκυνθος
I	\bar{n}/\bar{N}	0.40	0.38
	\bar{O}_e	7.36	7.02
	\bar{O}_m	8.15	7.46
	e	9.70	-5.90
Φ	\bar{n}/\bar{N}	0.42	0.45
	\bar{O}_e	9.75	10.03
	\bar{O}_m	10.85	10.27
	e	-10.20	-2.30
M	\bar{n}/\bar{N}	0.52	0.51
	\bar{O}_e	14.29	13.94
	\bar{O}_m	15.17	14.93
	e	-5.80	-6.60
A	\bar{n}/\bar{N}	0.49	0.49
	\bar{O}_e	17.34	17.21
	\bar{O}_m	17.77	18.15
	e	-2.40	-5.20
M	\bar{n}/\bar{N}	0.61	0.61
	\bar{O}_e	21.98	21.90
	\bar{O}_m	21.81	22.53
	e	0.80	-2.80
I	\bar{n}/\bar{N}	0.71	0.71
	\bar{O}_e	24.84	24.72
	\bar{O}_m	24.28	26.09
	e	2.30	-5.30
I	\bar{n}/\bar{N}	0.77	0.80
	\bar{O}_e	25.30	25.81
	\bar{O}_m	24.72	28.15
	e	2.30	-1.30
A	\bar{n}/\bar{N}	0.75	0.81
	\bar{O}_e	22.69	23.48
	\bar{O}_m	22.26	23.60
	e	1.90	-0.50
Σ	\bar{n}/\bar{N}	0.67	0.70
	\bar{O}_e	17.91	18.17
	\bar{O}_m	18.30	18.37
	e	-2.10	-1.10
O	\bar{n}/\bar{N}	0.51	0.54
	\bar{O}_e	11.95	12.22
	\bar{O}_m	12.20	12.67
	e	-2.00	-3.60
N	\bar{n}/\bar{N}	0.49	0.49
	\bar{O}_e	8.83	8.58
	\bar{O}_m	9.41	8.97
	e	-6.20	-4.40
Δ	\bar{n}/\bar{N}	0.47	0.41
	\bar{O}_e	7.37	6.64
	\bar{O}_m	7.91	7.39
	e	-6.80	-10.20
M.T	\bar{n}/\bar{N}	0.57	0.57
	\bar{O}_e	15.80	15.40
	\bar{O}_m	16.07	15.81
	e	-1.70	-3.50

Στον πίνακα αυτόν υπάρχουν οι Τιμές της μετρούμενης ακτινοβολίας Q_m , οι Τιμές Q_e που εκτιμήθηκαν με την προτεινόμενη μέθοδο, οι Τιμές Q_F που υπολογίσθηκαν με Τιμές a και b που προτείνει ο Φλόκας [75] και οι τιμές της ακτινοβολίας Q_P που υπολογίσθηκαν με Τιμές a και b , που προτείνει ο Πελεκάνος [76]. Στον ίδιο πίνακα δίνονται και τα σχετικά σφάλματα e , e_F , e_P μεταξύ των τιμών Q_m και Q_e , Q_F , Q_P αντίστοιχα. Η εκτίμηση της ακτινοβολίας έγινε από δεδομένα μέσω ετήσιων τιμών σχετικής ηλιοφάνειας.

Παρατηρούμε πράγματι, ότι οι παραπάνω ερευνητές εκτιμούν Τιμές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας αρκετά μικρότερες από τις μετρούμενες Τιμές. Το γεγονός ότι με την προτεινόμενη μέθοδο υπερεκτιμούμε την προσπίπτουσα ακτινοβολία για το σταθμό των Αθηνών έχει εξηγηθεί στην προηγούμενη παράγραφο 3.5. Τα % σχετικά σφάλματα e_F είναι επίσης συγκριτικά, μικρότερα των σφαλμάτων e_P .

Για να διαπιστωθεί καλύτερα η απόκλιση των πειραματικών τιμών από τις τιμές που εκτιμήθηκαν με την προτεινόμενη μέθοδο και με την μέθοδο Φλόκα, σχεδιάστηκαν τα Διαγράμματα 3.6.1 και 3.6.2, στα οποία φαίνονται οι μέσες μηνιαίες Τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, για Τέσσερις διαφορετικούς σταθμούς.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6.1.

Σταθμός	\bar{Q}_m	\bar{Q}_e	e	\bar{Q}_F	e_F	\bar{Q}_P	e_P
Χανιά	6230.6	6015.2	-3.5	5639.2	-9.5	5595.4	-10.2
Ρόδος	6511.6	6259.8	-3.9	5858.2	-10.0	5847.3	-10.2
Αθήνα	5792.6	6095.5	5.2	5730.5	-1.1	5694.0	-1.7
Μυτιλήνη	5858.2	5843.6	-0.2	5478.7	-6.5	5438.5	-7.2
Λάρισα	5274.3	5299.8	0.5	4898.3	-7.1	4843.6	-8.2

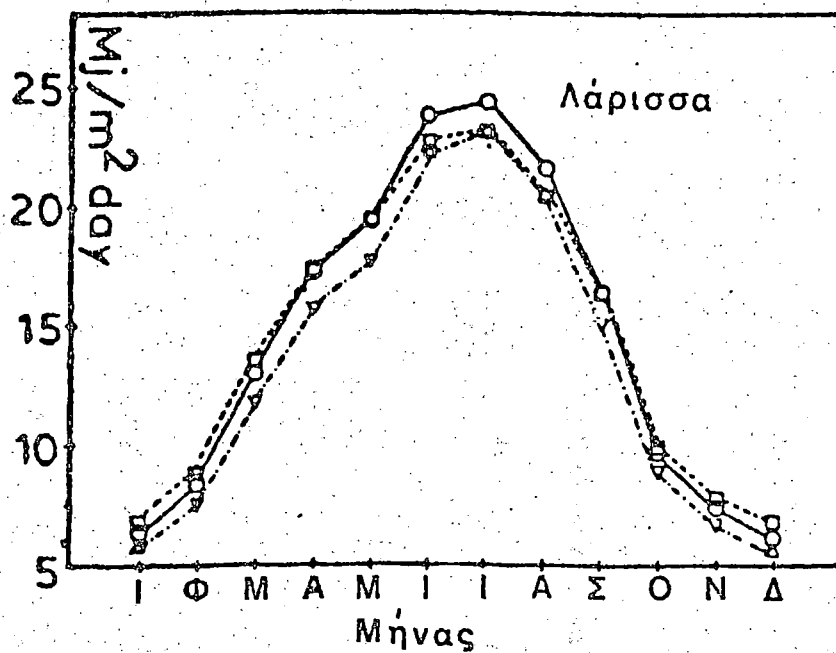
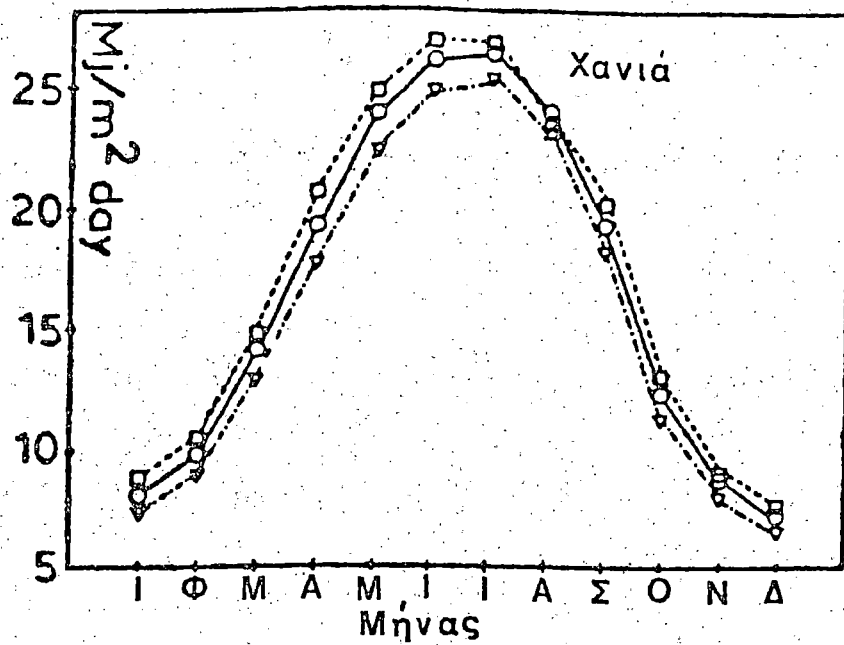
\bar{Q}_m , μέση ετήσια μετρούμενη ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)

$\bar{Q}_e, \bar{Q}_F, \bar{Q}_P$ μέση ετήσια ακτινοβολία που εκτιμήθηκε με την προτεινόμενη μέθοδο, με τη μέθοδο Φλόκα και Πελεκάνου, αντίστοιχα ($\text{MJ m}^{-2} \text{ year}^{-1}$)

e, e_F, e_P τα % σχετικά σφάλματα μεταξύ Q_m και Q_e, Q_F, Q_P , αντίστοιχα

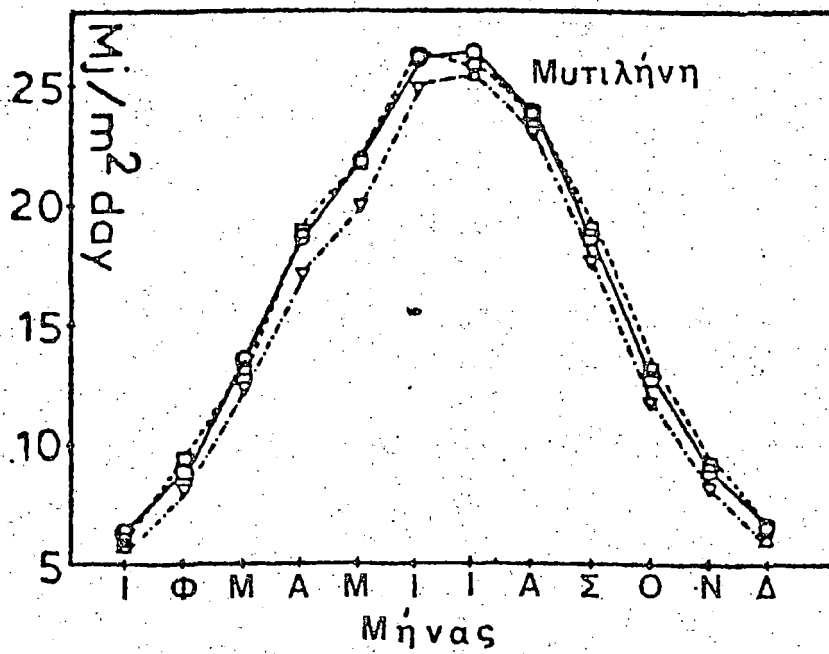
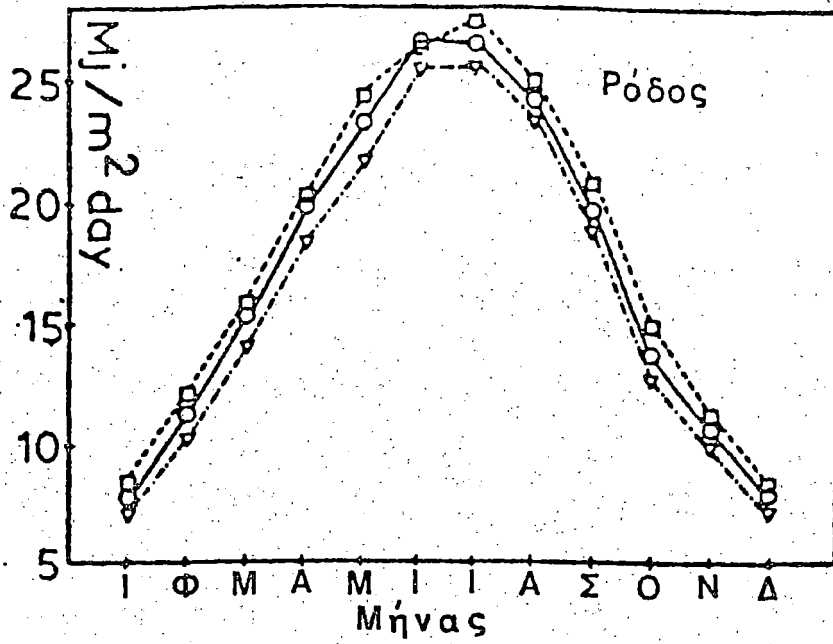
3.7. Εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια για 22 σταθμούς της Ελλάδας

Χρησιμοποιώντας για τις παραμέτρους a και b τις εκφράσεις από τις εξισώσεις (3.4.1) και (3.4.2) εκτιμήθηκε η ολική ηλιακή ακτινοβολία, που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια για 22 μετεωρολογικούς σταθμούς, από δεδομένα τιμών μέσης μηνιαίας σχετικής ηλιοφάνειας, για την περίοδο 1965-1980. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 3.7.1. Για κάθε σταθμό υπάρχουν τα στοιχεία του, γεωγραφικό πλάτος Φ , γεωγραφικό μήκος λ και το ύψος του από την επιφάνεια της Θάλασσας. Οι Τιμές της μέσης ολικής ακτινοβολίας Q_e , σε μονάδες $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ και της μέσης σχετικής ηλιοφάνειας $\frac{\bar{h}}{N}$, δίνονται για κάθε μήνα.



Διάγραμμα 3.1

Σύγκριση μέσω μηνιαίων τιμών ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που εκτιμήθηκαν με την προτεινόμενη μέθοδο (-○-) και με τη μέθοδο Φλόκα (-▽-) (Πειραματικά σημεία (-□-)).



Διάγραμμα 3.2

Σύγκριση μέσων μηνιαίων τιμών ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που εκτιμήθηκαν με την προτεινόμενη μέθοδο (-ο-) και με τη μέθοδο Φλόκα (-▽-) (Πειραματικά σημεία (-□-)).

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7.1.

πλάτος φ	35°00'	35°00'	35°12'	35°21'	35°29'	36°00'	36°50'	37°04'	
μήκος λ	25°44'	25°44'	26°06'	25°08'	24°04'	23°00'	21°43'	22°06'	
υψος (m)	14	6	26	39	140	166	34	31	
Μήνας		Ιερί/τρα	Τυμ/κιο	Σητεία	Ηράκλειο	Σούδα	Κύθηρα	Μεθώνη	Καλαμάτα
I	\bar{n}/\bar{N}	0.51	0.47	0.38	0.37	0.38	0.43	0.42	0.48
	\bar{Q}_e	9.04	8.64	7.70	7.48	7.52	7.93	7.60	8.13
Φ	\bar{n}/\bar{N}	0.54	0.50	0.43	0.41	0.43	0.46	0.46	0.47
	\bar{Q}_e	11.74	11.29	10.31	10.08	10.20	10.51	10.34	10.40
M	\bar{n}/\bar{N}	0.57	0.59	0.51	0.50	0.49	0.55	0.52	0.52
	\bar{Q}_e	15.47	15.77	14.47	14.25	14.13	14.93	14.36	14.21
A	\bar{n}/\bar{N}	-	0.61	0.59	0.58	0.59	0.55	0.55	0.52
	\bar{Q}_e	-	19.67	19.30	19.10	19.31	18.50	18.44	17.87
M	\bar{n}/\bar{N}	0.73	0.69	0.71	0.72	0.72	0.68	0.68	0.69
	\bar{Q}_e	24.08	23.36	23.79	23.85	23.90	23.17	23.14	23.28
I	\bar{n}/\bar{N}	0.83	0.81	0.81	0.82	0.78	0.80	0.76	0.78
	\bar{Q}_e	26.80	26.45	26.38	26.52	25.96	26.30	25.54	25.92
I	\bar{n}/\bar{N}	0.88	0.87	0.86	0.86	0.85	0.83	0.82	0.83
	\bar{Q}_e	27.14	26.84	26.78	26.70	26.59	26.23	26.01	26.18
A	\bar{n}/\bar{N}	0.89	0.87	0.85	0.84	0.88	0.82	0.81	0.82
	\bar{Q}_e	25.12	24.78	24.32	24.25	24.80	23.86	23.61	23.69
Σ	\bar{n}/\bar{N}	0.83	0.81	0.75	0.77	0.78	0.76	0.74	0.73
	\bar{Q}_e	20.39	20.19	19.51	19.50	19.64	19.25	18.87	18.73
O	\bar{n}/\bar{N}	0.69	0.66	0.58	0.55	0.54	0.60	0.61	0.58
	\bar{Q}_e	14.69	15.58	13.43	12.90	12.80	13.33	13.32	12.88
N	\bar{n}/\bar{N}	0.66	0.59	0.55	0.53	0.54	0.55	0.55	0.54
	\bar{Q}_e	11.07	10.40	9.98	9.64	9.66	9.64	9.50	9.30
Δ	\bar{n}/\bar{N}	0.54	0.48	0.41	0.40	0.41	0.44	0.43	0.46
	\bar{Q}_e	8.56	8.02	7.33	7.15	7.18	7.38	7.11	7.26
M.T	\bar{Q}_e	17.65	17.58	16.94	16.79	16.81	16.75	16.49	16.49

\bar{n}/\bar{N} : μέση μηνιαία σχετική ηλιοφάνεια

\bar{Q}_e : μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)

M.T: μέση ετήσια ολική ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7.1. (συνέχεια)

πλάτος ϕ 37⁰06¹ 37⁰27¹ 37⁰45¹ 37⁰45¹ 38⁰10¹ 38⁰10¹ 38⁰22¹
 μήκος λ 25⁰24¹ 24⁰56¹ 22⁰50¹ 27⁰00¹ 21⁰25¹ 20⁰29¹ 23⁰05¹
 ύψος (m) 7 32 800 49 10 13 110

Μήνας		Νάξος	Σύρος	Στεφανί	Σάμος	Αραξος	Αργοστόλι	Αλιάρτος
I	\bar{n}/\bar{N}	0.34	0.35	0.37	0.45	0.40	0.45	0.29
	\bar{Q}_e	6.76	6.82	6.91	7.59	7.04	7.49	6.12
Φ	\bar{n}/\bar{N}	0.38	0.44	0.38	0.48	0.44	0.49	0.35
	\bar{Q}_e	9.32	9.96	9.13	10.34	9.76	10.29	8.68
M	\bar{n}/\bar{N}	0.46	0.51	0.50	0.54	0.51	0.51	0.43
	\bar{Q}_e	13.34	14.02	13.75	14.45	13.90	13.82	12.62
A	\bar{n}/\bar{N}	0.56	0.62	0.49	0.59	0.57	0.53	0.54
	\bar{Q}_e	18.61	19.54	17.24	18.99	18.54	17.92	18.07
M	\bar{n}/\bar{N}	0.66	0.72	0.63	0.70	0.65	0.68	0.64
	\bar{Q}_e	22.87	23.76	22.20	23.48	22.54	23.14	22.42
I	\bar{n}/\bar{N}	0.74	0.80	0.75	0.80	0.70	0.78	0.72
	\bar{Q}_e	25.34	26.23	25.40	26.37	24.57	25.93	25.01
Γ	\bar{n}/\bar{N}	0.78	0.86	0.77	0.86	0.77	0.83	0.78
	\bar{Q}_e	25.36	26.79	25.23	26.68	25.22	26.21	25.44
A	\bar{n}/\bar{N}	0.79	0.86	0.79	0.86	0.81	0.83	0.78
	\bar{Q}_e	23.31	24.36	23.18	24.33	23.49	23.74	22.95
Σ	\bar{n}/\bar{N}	0.75	0.79	0.69	0.82	0.72	0.74	0.67
	\bar{Q}_e	18.94	19.32	18.02	19.68	18.34	18.57	17.68
O	\bar{n}/\bar{N}	0.59	0.66	0.55	0.67	0.59	0.58	0.49
	\bar{Q}_e	13.00	13.63	12.39	13.70	12.70	12.57	11.39
N	\bar{n}/\bar{N}	0.54	0.54	0.52	0.59	0.52	0.51	0.44
	\bar{Q}_e	9.26	9.14	8.88	9.51	8.78	8.63	7.98
Δ	\bar{n}/\bar{N}	0.40	0.44	0.44	0.44	0.44	0.42	0.33
	\bar{Q}_e	6.72	6.94	6.92	6.92	6.80	6.60	5.87
M.T	\bar{Q}_e	16.07	16.71	15.77	16.84	15.97	16.24	15.35

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7.1. (συνέχεια)

πλάτος φ	38 ⁰ 22'	39 ⁰ 37'	38 ⁰ 51'	39 ⁰ 40'	39 ⁰ 45'	40 ⁰ 03'	41 ⁰ 05'
μήκος λ	26 ⁰ 09'	19 ⁰ 55'	22 ⁰ 34'	20 ⁰ 51'	25 ⁰ 14'	20 ⁰ 45'	23 ⁰ 34'
ύψος (m)	61	2	143	480	17	543	35

Μήνας		Χίος	Κέρκυρα	Λαμία	Ιωάννινα	Λήμνος	Κόνιτσα	Σέρρες
I	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.36 6.67	0.40 6.69	0.36 6.55	0.35 6.22	0.27 5.65	0.38 6.40	0.35 5.89
Φ	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.41 9.29	0.40 8.92	0.35 8.48	0.37 8.53	0.37 8.54	0.38 8.62	0.38 8.32
M	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.47 13.18	0.45 12.68	0.47 13.08	0.40 11.81	0.44 12.49	0.44 12.38	0.43 11.98
A	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.55 18.25	0.53 17.69	0.53 17.76	0.45 16.17	0.57 18.44	0.42 15.57	0.51 17.07
M	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.73 24.03	0.64 22.36	0.62 22.10	0.54 20.38	0.66 22.76	0.53 20.19	0.56 20.87
I	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.80 26.41	0.74 25.32	0.72 24.98	0.61 23.07	0.73 25.26	0.60 22.73	0.65 23.82
Ι	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.78 26.86	0.82 26.09	0.75 24.98	0.72 24.33	0.80 25.76	0.71 24.17	0.71 24.25
A	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.87 26.41	0.80 23.18	0.76 22.59	0.72 21.93	0.80 23.17	0.71 21.72	0.69 21.42
Σ	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.81 19.41	0.69 17.70	0.66 17.38	0.62 16.66	0.73 18.05	0.62 16.55	0.65 16.73
O	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.63 3.09	0.57 12.04	0.50 11.40	0.51 11.32	0.57 12.07	0.50 11.11	0.49 10.70
N	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.52 8.67	0.46 7.78	0.48 8.19	0.42 7.37	0.43 7.52	0.44 7.49	0.42 7.03
Δ	\bar{p}/\bar{N} \bar{Q}_e	0.44 6.75	0.40 6.04	0.43 6.52	0.31 5.37	0.34 5.55	0.44 6.20	0.40 5.64
M.T	\bar{Q}_e	16.42	15.54	15.33	14.43	15.44	14.43	14.48

3.8. Συμπεράσματα

Πολλές εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας απαιτούν τη γνώση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια. Η ημερήσια ηλιοφάνεια, που μετρείται σε πολλούς σταθμούς της Ελλάδας είναι η καλύτερη πηγή δεδομένων για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε μπορούν να εκτιμηθούν οι μηνιαίες παράμετροι a και b και να υπολογισθεί η ολική ηλιακή ακτινοβολία, που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια για κάθε τόπο, που διαθέτει δεδομένα ηλιοφάνειας. Η εκτίμηση της ακτινοβολίας μπορεί να γίνει με ικανοποιητική ακρίβεια. Για συγκεκριμένο μήνα ή για συγκεκριμένη ημέρα, αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα ημερήσιας ηλιοφάνειας. Οι ωριαίες τιμές της ολικής ακτινοβολίας είναι επίσης απαραίτητες για τις ηλιακές εφαρμογές, όπως επίσης και οι τιμές της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας. Στη παράγραφο 2.7 του προηγούμενου κεφαλαίου αναφέρονται μέθοδοι για τον υπολογισμό ωριαίων τιμών ολικής ακτινοβολίας ή ημερήσιων και μηνιαίων τιμών διάχυτης ακτινοβολίας από δεδομένα ολικής, οι οποίες μπορούν να εφαρμοσθούν και στον Ελλαδικό χώρο.

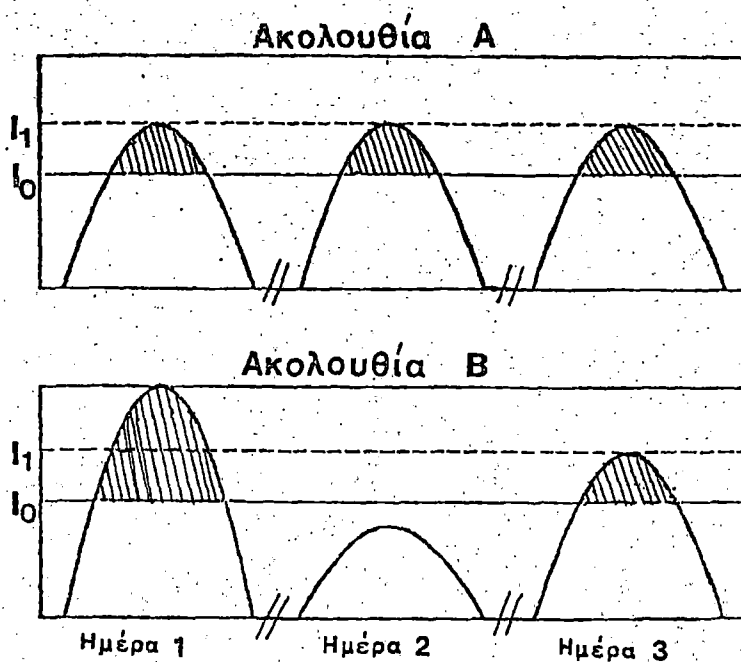
Από μελέτη των πινάκων 3.5.1 και 3.7.1 συμπεραίνουμε, ότι οι μέγιστες μέσες τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρούνται τον μήνα Ιούλιο και οι μικρότερες τον μήνα Δεκέμβριο. Τα νησιά Κρήτη και Ρόδος παρουσιάζουν υψηλή ηλιοφάνεια και τις μεγαλύτερες Τιμές ολικής ακτινοβολίας απ' όλο τον Ελλαδικό χώρο. Συγκεκριμένα, στα Χανιά της Κρήτης παρατηρείται μέγιστη μέση τιμή ολικής ηλιακής ακτινοβολίας ίση με $6,015 \text{ MJ m}^2 \text{ year}^{-1}$, ενώ στη Ρόδο ίση με $6,260 \text{ MJ m}^2 \text{ year}^{-1}$. Στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη οι Τιμές της ηλιοφάνειας και της ακτινοβολίας ελαττώνονται. Η ελάχιστη μέση τιμή $5,190 \text{ MJ m}^2 \text{ year}^{-1}$ παρατηρείται στο σταθμό της Καβάλας. Η Αττική επίσης παρουσιάζει υψηλή ηλιοφάνεια και ακτινοβολία, όπως γενικά όλες οι νοτιανατολικές περιοχές της Ελλάδας.

Κεφάλαιο iv

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΟΦΑΝΕΙΑΣ

4.1. Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, απαραίτητη προϋπόθεση για τη μελέτη μιας ηλιακής εγκατάστασης είναι τα μετεωρολογικά δεδομένα. Για να λειτουργήσει π.χ. ένας ηλιακός συλλέκτης που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα, πρέπει η ηλιακή ακτινοβολία να ξεπεράσει κάποια κρίσιμη τιμή. Στο Σχήμα 4.1.1 φαίνεται η κατανομή της ωριαίας ολικής ακτινοβολίας για τρεις συνεχείς ημέρες, υποθέτοντας ότι η κατανομή της είναι συμμετρική ως προς τη μεσημβρία.



Σχήμα 4.1.1.:

Δύο ακολουθίες ημερών Α και Β με την ίδια μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι ημέρες της επάνω σειράς είναι όλες μέσες ημέρες. Παρατηρούμε ότι για το χαμηλό επίπεδο κρίσιμης ακτινοβολίας I_0 και οι τρεις ημέρες δείχνουν χρήσιμο ηλιακό κέρδος (γραμμοσκιασμένο τμήμα), γεγονός που δεν συμβαίνει για το υψηλό επίπεδο κρίσιμης ακτινοβολίας I_1 . Στην κάτω σειρά φαίνονται τρεις ημέρες με την ίδια μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά με διαφορετική ωριαία κατανομή. Παρατηρούμε ότι η συλλογή ενέργειας για το χαμηλό επίπεδο είναι μεγαλύτερη, ενώ υπάρχει συλλογή και για το υψηλό επίπεδο κρίσιμης ακτινοβολίας. Φαίνεται επίσης ότι δεν έχουμε απορρόφηση ενέργειας για μια ημέρα [1,5].

Οι περισσότεροι ερευνητές που ασχολήθηκαν με τα προβλήματα της ηλιακής ενέργειας, προσανατολίσθηκαν κυρίως στην εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ολικής, άμεσης ή διάχυτης, δίνοντας πληροφορίες κυρίως για τις μέσες τιμές. Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, η γνώση της χρονικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητη για τις ηλιακές εγκαταστάσεις. Δεδομένα για τη χρονική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας υπάρχουν για περιορισμένο αριθμό ετών και για λίγους μετεωρολογικούς σταθμούς. Τα τελευταία χρόνια (1970-1980), οι ερευνητές άρχισαν να ασχολούνται με τη στατιστική ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας ή άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων για τόπους που διαθέτουν επαρκή δεδομένα [83-93].

Η μελέτη που αναφέρεται στο κεφάλαιο III, σχετικά με τη συσχέτιση της ηλιοφάνειας και της ηλιακής ακτινοβολίας, δείχνει ότι θα ήταν ενδιαφέρουσα η στατιστική ανάλυση δεδομένων ηλιοφάνειας, από την άποψη της χρονικής κατανομής της ηλιοφάνειας, ειδικά για την προσέγγιση των προβλημάτων της αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας.

4.2. Δεδομένα ηλιοφάνειας για τον Ελλαδικό χώρο

Ημερήσιες τιμές ηλιοφάνειας είναι διαθέσιμες από Πολλούς μετεωρολογικούς σταθμούς στην Ελλάδα και για αρκετά χρόνια. Προηγούμενες μελέτες σχετικά με την κατανομή της ηλιοφάνειας στην Ελλάδα, δείχνουν γενικές κλιματικές τάσεις και οι πληροφορίες που μπορεί να πάρει κανείς από πίνακες ή ιστογράμματα, αναφέρονται κυρίως σε μέσες τιμές και δεν επαρκούν για να χρησιμοποιηθούν ικανοποιητικά, σε Προγράμματα ηλιακών εφαρμογών [94,95,96].

Για τη μελέτη της κατανομής της ηλιοφάνειας επιλέχθηκαν δεδομένα τον Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών για δύο λόγους:

Πρώτον επειδή δεδομένα ημερήσιας ηλιοφάνειας είναι διαθέσιμα για πολλά χρόνια και επομένως τα αποτελέσματα είναι περισσότερο αξιόπιστα και δεύτερον, επειδή η Αττικής όπως οι νότιες και οι νοτιοανατολικές περιοχές της Ελλάδας έχουν υψηλή ηλιοφάνεια και επομένως, οι πληροφορίες που παίρνει πανείς, μπορούμε να πούμε ότι αντιπροσωπεύουν ευρύτερη περιοχή της χώρας μας.

Τα δεδομένα που έχουν επεξεργασθεί σ' αυτή τη μελέτη, είναι τιμές ημερήσιας ηλιοφάνειας για περίοδο τριάντα χρόνων (1950-1980), τα οποία καταγράφηκαν από ηλιογράφους Campbell-Stokes [100].

4.3. Ανάλυση του προβλήματος

Η μελέτη της κατανομής της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια του χρόνου, δίνει απαντήσεις στα παρακάτω ερωτήματα:

1. Ποια είναι η πιθανότητα, μια τυχαία ημέρα του έτους, η ηλιοφάνεια να ξεπεράσει κάποια τιμή;
2. Ποια είναι η πιθανότητα, όλες τις ημέρες μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου, η ηλιοφάνεια να ξεπεράσει κάποια τιμή;
3. Πως θα δώσουμε αυτές τις πληροφορίες με μαθηματικές εκφράσεις, ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν σε προγράμματα ηλιακών εφαρμογών;

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας συνδέεται άμεσα με τη σχετική ηλιοφάνεια p/N . Θα παρούσαζε ενδιαφέρον επομένως, η στατιστική ανάλυση να γίνει για τιμές σχετικής ηλιοφάνειας, p/N , και όχι για της μετρούμενης ηλιοφάνειας p .

Η απάντηση στο πρώτο ερώτημα δόθηκε με τον υπολογισμό των Εμπειρικών περιθωριακών πιθανοτήτων (που υπολογίζονται από τις εμπειρικές συχνότητες), θεωρώντας αρχικά ότι ο καιρός κάποιας ημέρας μιας χρονικής περιόδου είναι ανεξάρτητος του καιρού των προηγούμενων ημερών.

Οι απαντήσεις στο δεύτερο ερώτημα του προβλήματος δόθηκαν από τον υπολογισμό των εμπειρικών πιθανοτήτων, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο καιρός κάποιας ημέρας εξαρτάται από τον καιρό προηγούμενων ημερών.

Οι πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν από τις απαντήσεις στα δύο πρώτα ερωτήματα, έγινε προσπάθεια να δοθούν με μαθηματικές εξισώσεις, προσαρμόζοντας κατάλληλα τα εμπειρικά δεδομένα με τα θεωρητικά.

Η σχετική ηλιοφάνεια για την Ελλάδα παρουσιάζει μια εποχιακή διακύμανση, με μέγιστες τιμές το καλοκαίρι και ελάχιστες τον χειμώνα, αλλά υπάρχουν οπωσδήποτε και τυχαίες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του χρόνου. Για να συγκεντρωθούν επομένως περισσότερες πληροφορίες για τις τυχαίες διακυμάνσεις, πρέπει η στατιστική ανάλυση να γίνει για σύντομη χρονική περίοδο. Θεωρήθηκε, ότι η περίοδος ενός μήνα, είναι η πιο κατάλληλη για την επεξεργασία των δεδομένων ημερήσιας ηλιοφάνειας. Παρόμοιες μελέτες στατιστικής ανάλυσης τιμών ηλιοφάνειας έγιναν από τους Barbaro et al. [101,102] για σταθμούς της Ιταλίας και από τους Goussebail et al. [103] για σταθμούς της Γαλλίας.

4.4. Υπολογισμός των εμπειρικών περιθωριακών πιθανοτήτων της ημερήσιας σχετικής ηλιοφάνειας.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο ορίστηκε σαν ημερήσια σχετική ηλιοφάνεια p/N , ο λόγος της ημερήσιας μετρούμενης ηλιοφάνειας p προς τη διάρκεια της ημέρας N . η οποία υπολογίζεται από τη σχέση (1.5.5). Οι εμπειρικές πιθανότητες της σχετικής ημερήσιας ηλιοφάνειας υπολογίζονται από τις εμπειρικές συχνότητες, όπως αναπτύσσεται παρακάτω.

Θεωρούμε μια τιμή της ημερήσιας σχετικής ηλιοφάνειας, χ ($0 < \chi < 1$) και ορίζουμε δύο καταστάσεις 0 και 1, ως εξής:

- Κατάσταση 0, "κακός" Καιρός, αν η ημερήσια σχετική ηλιοφάνεια είναι μικρότερη του χ και
- Κατάσταση 1, "καλός" Καιρός, αν η ημερήσια σχετική ηλιοφάνεια είναι μεγαλύτερη του χ .

Μ' αυτόν τον τρόπο, κάθε ημέρα της χρονικής περιόδου που εξετάζουμε, αντιστοιχεί σε μια επανάληψη δυωνυμικών πειραμάτων [104,105]. Τα αποτελέσματα αυτών των επαναλήψεων είναι αλληλουχίες 0 και 1 της μορφής π.χ. 0111000110001111 I... όπου επιτυχία = 1 και αποτυχία = 0. Μπορούν επομένως να αριθμηθούν οι αλληλουχίες k συνεχών ημερών $M_i^{(k)}(m, \chi)$, "καλού" ($i=1$) ή "κακού" ($i=0$) καιρού, , για κάθε μήνα m ($m=1,2 \dots 12$). Ορίστηκε η περιθωριακή πιθανότητα $P_i(m, \chi)$, που είναι η πιθανότητα, ώστε κάποια ημέρα ενός συγκεκριμένου μήνα m να έχει ποσοστό ηλιοφάνειας μεγαλύτερο της τιμής χ .

Ο ολικός αριθμός Nd των ημερών της χρονικής περιόδου που εξετάζεται προφανώς είναι:

$$Nd = \sum_{k=1}^{K_{\max 1}} M_1^{(k)}(m,x) k + \sum_{k=1}^{K_{\max 2}} M_0^{(k)}(m,x) k \quad (4.4.1)$$

όπου $k_{\max 1}$ είναι ο μέγιστος αριθμός ημερών μιας αλληλουχίας “κάλού” καιρού που εμφανίζεται στο δείγμα και $k_{\max 2}$ είναι ο μέγιστος αριθμός ημερών μιας αλληλουχίας “κακού” καιρού.

Η εμπειρική περιθωριακή πιθανότητα $P_1(m,\chi)$, δεδομένου ότι το δείγμα είναι αρκετά μεγάλο, υπολογίζεται από την εμπειρική συχνότητα σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_1(m,x) = \frac{\sum_{k=1}^{k_{\max 1}} M_1^{(k)}(m,x) k}{Nd} \quad (4.4.2)$$

Προφανώς η περιθωριακή πιθανότητα, ώστε κάποια ημέρα του μήνα να έχει ημερήσια σχετική ηλιοφάνεια μικρότερη της τιμής χ , $P_0(m,\chi)$, είναι:

$$P_0(m,x) = 1 - P_1(m,x) \quad (4.4.3)$$

ηλιοφάνειας χ , από 0 μέχρι 1 με βήμα 0.02. Η επεξεργασία έγινε για 900 (30 ημέρες \times 30 χρόνια) και πλέον δεδομένα και για 50 διαφορετικές Τιμές του χ .

Η τυπική απόκλιση σ της πιθανότητας $P_1(m,\chi)$ δίνεται [104,105] από τη σχέση:

$$\sigma = \sqrt{\frac{P_1(m,x)P_0(m,x)}{Nd}} \quad (4.4.4)$$

Επομένως, το μέγιστο σφάλμα σ_{\max} της εμπειρικής πιθανότητας $P_1(m,\chi)$ που προκύπτει από την προηγούμενη εξίσωση είναι:

$$\sigma_{\max} \approx \sqrt{\frac{0.5 \times 0.5}{900}} \approx 1.7\% \quad (4.4.5)$$

Τα αποτελέσματα των εμπειρικών πιθανοτήτων για όλους τους μήνες φαίνονται στο διάγραμμα 4.5. της επομένης παραγράφου.

4.5. Προσαρμογή των εμπειρικών περιθωριακών πιθανοτήτων $P_1(m,x)$ με εξισώσεις.

Από τις εμπειρικές καμπύλες της ημερήσιας σχετικής ηλιοφάνειας μπορούν να εξαχθούν αρκετά συμπεράσματα για την κατανομή της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια του έτους. Όμως, για πρακτικές εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας, είναι απαραίτητη η προσαρμογή τους με εξισώσεις, για να είναι εύχρηστες στα προγράμματα ηλιακών εφαρμογών.

Παρατηρούμε ότι οι εμπειρικές καμπύλες των περιθωριακών πιθανοτήτων $P_1(m,\chi)$, διαφέρουν από μήνα σε μήνα. Ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες, παρατηρούμε μια απότομη μεταβολή της πιθανότητας για μεγάλες τιμές της ημερήσιας σχετικής ηλιοφάνειας.

Οι S. Bean et al. [103] χρησιμοποίησαν την κατανομή-β για να προσαρμόσουν δεδομένα νέφωσης από διάφορα γεωγραφικά πλάτη. Η προσαρμογή έγινε για περίοδο τριών μηνών, Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου. Επίσης οι Osturk et al. [104] για να προσαρμόσουν δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποίησαν την γενικευμένη κατανομή-λ. Όπως αναφέρουν, είναι δύσκολο να βρεθεί μια μαθηματική έκφραση για όλους τους μήνες και με την μέθοδό τους, προσάρμοσαν δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας για τους καλοκαιρινούς μήνες.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις των παραπάνω ερευνητών έγινε η υπόθεση, ότι η κατανομή πιθανότητας $f_1(m,\chi)$, της ημερήσιας σχετικής ηλιοφάνειας, είναι της μορφής:

$$f_1(m,x) = c x^\alpha (1-x)^\beta \quad (4.5.1)$$

όπου c , α και β παράμετροι.

Η συνάρτηση κατανομής $F_1(m,\chi)$ ορίζεται από τη σχέση:

$$F_1(m,x) = \int_0^x f_1(m,x) dx = c \int_0^x x^\alpha (1-x)^\beta dx \quad (4.5.2)$$

Οι εμπειρικές πιθανότητες $P_1(m,X)$ αντιπροσωπεύουν τις συναρτήσεις $1-F_1(m,\chi)$. Είναι προφανές, ότι οι εμπειρικές καμπύλες $P_1(m,\chi)$, θα έχουν την ίδια μαθηματική έκφραση με τη συνάρτηση κατανομής $1-F_1(m,\chi)$.

Επομένως:

$$P_1(m,x) = \int_x^1 f_1(m,x) dx = c \int_x^1 x^\alpha (1-x)^\beta dx \quad (4.5.3)$$

Το ολοκλήρωμα $I = \int x^\alpha (1-x)^\beta dx$ υπολογίστηκε προσεγγιστικά ως εξής:

Ολοκληρώνοντας κατά παράγοντας, η μορφή $I = \int x^a(1-x)^b dx$ γίνεται:

$$I = (1-x)^{b+1} \left[-\frac{x^a}{(b+1)} - \frac{a(1-x)x^{a-1}}{(b+1)(b+2)} - \frac{a(a-1)(1-x)^2 x^{a-2}}{(b+1)(b+2)(b+3)} + \dots \right] \quad (4.5.4.)$$

Για λόγους απλότητας, αντί για την έκφραση αυτή, θα χρησιμοποιείται στα επόμενα η προσεγγιστική έκφραση:

$$I = - (1-x)^l (\alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x^3 + \dots) \quad (4.5.5.)$$

όπου $l, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ παράμετροι. Η εξίσωση (4.5.3) συναρτήσεως της (4.5.5) γίνεται:

$$P_1(m, x) = (1-x)^l c (\alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots) \quad (4.5.6.)$$

Επειδή η τιμή της συνάρτησης $P_1(m, \chi)$ είναι 1 για $\chi=0$, η τιμή της παραμέτρου c είναι 1, αν ληφθεί $\alpha_0=1$.

Λαμβάνοντας υπόψη τους όρους του πολυωνύμου μόνο μέχρι δευτέρου βαθμού, η εμπειρική πιθανότητα $P_1(m, X)$ μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή:

$$P_1(m, x) = (1-x)^l (1 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2) \quad (4.5.7.)$$

με άγνωστες παραμέτρους l, α_1 και α_2 .

Η προσαρμογή των εμπειρικών καμπύλων $P_1(m, \chi)$ με τη θεωρητική έκφραση της μορφής (4.5.7) έγινε με τη βοήθεια προγράμματος H/Y. Για κάθε μήνα, υπολογίσθηκαν οι τιμές των παραμέτρων l, α_1, α_2 και της τυπικής απόκλισης σ [104,105], που η τιμή της ορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{S-1} \sum_{i=1}^S (P_1(m, x_i) - P_1'(m, x_i))^2} \quad (4.5.8.)$$

όπου

S , είναι ο αριθμός των πειραματικών σημείων

$P_1(m, \chi)$, η εμπειρική πιθανότητα που υπολογίσθηκε από τη σχέση (4.4.2)

$P_1'(m, \chi)$, η πιθανότητα που υπολογίσθηκε από την σχέση (4.5.7).

Στον πίνακα 4.5.1 υπάρχουν οι τιμές των τυπικών αποκλίσεων για κάθε μήνα. Παρατηρούμε ότι οι τιμές τους είναι αρκετά υψηλές και βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ 2.6% και 7.6%. Στα Διαγράμματα 4.1 και 4.2, φαίνονται οι εμπειρικές πιθανότητες $P_1(m, \chi)$ και οι αντίστοιχες καμπύλες που υπολογίσθηκαν από τη σχέση (4.5.7) για τους μήνες Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο και Αύγουστο. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις θεωρητικών και πειραματικών τιμών Παρατηρούνται τους καλοκαιρινούς μήνες, κατά τους οποίους παρατηρείται απότομη μείωση της εμπειρικής πιθανότητας, για μεγάλες τιμές της ημερήσιας σχετικής ηλιοφάνειας χ .

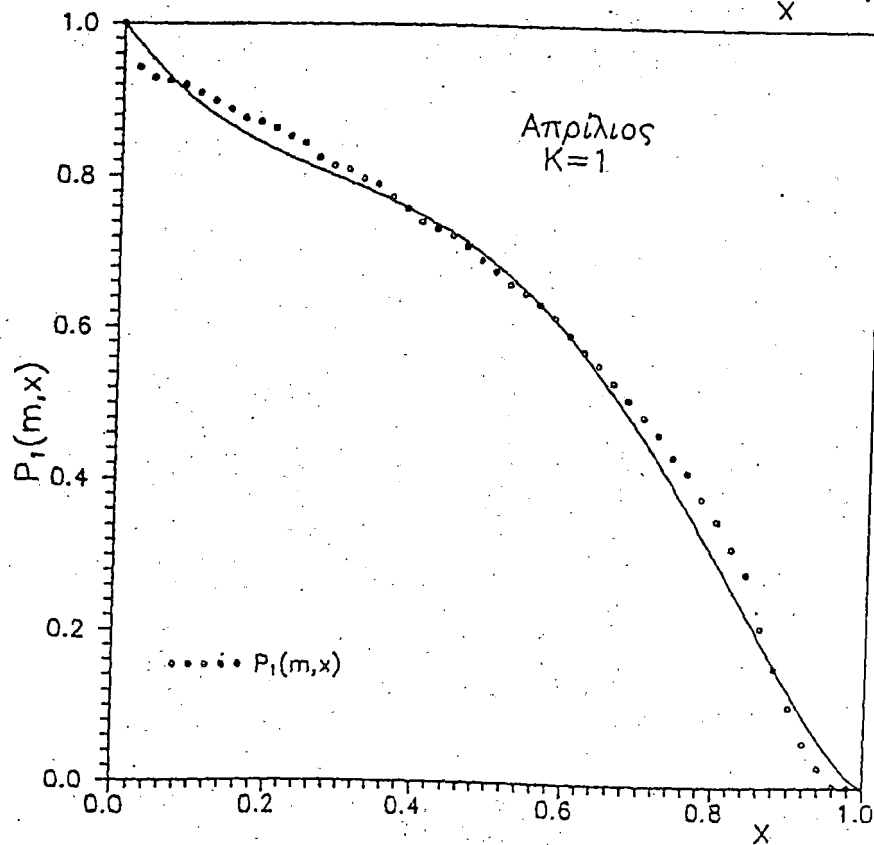
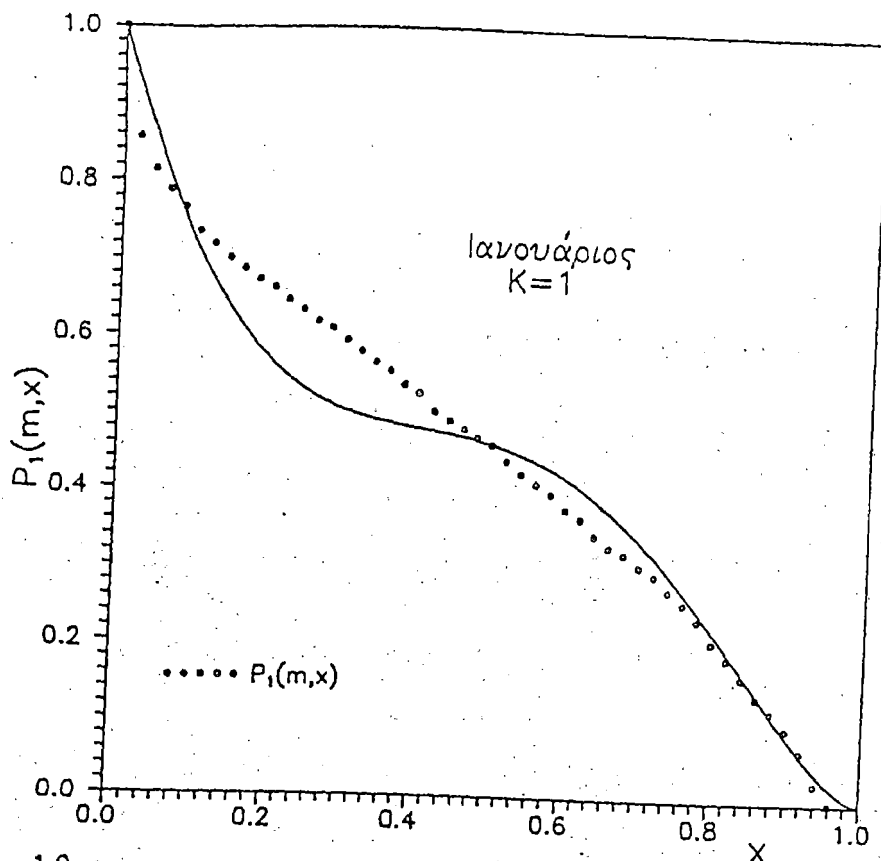
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5.1.

Μήνας	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
$\sigma \times 10^{-2}$	5.2	4.5	3.2	2.5	4.3	6.2	5.8	7.6	5.8	2.6	2.6	5.5

Για να προσαρμοσθούν καλύτερα τα πειραματικά σημεία χρησιμοποιήθηκε η γενικευμένη εξίσωση:

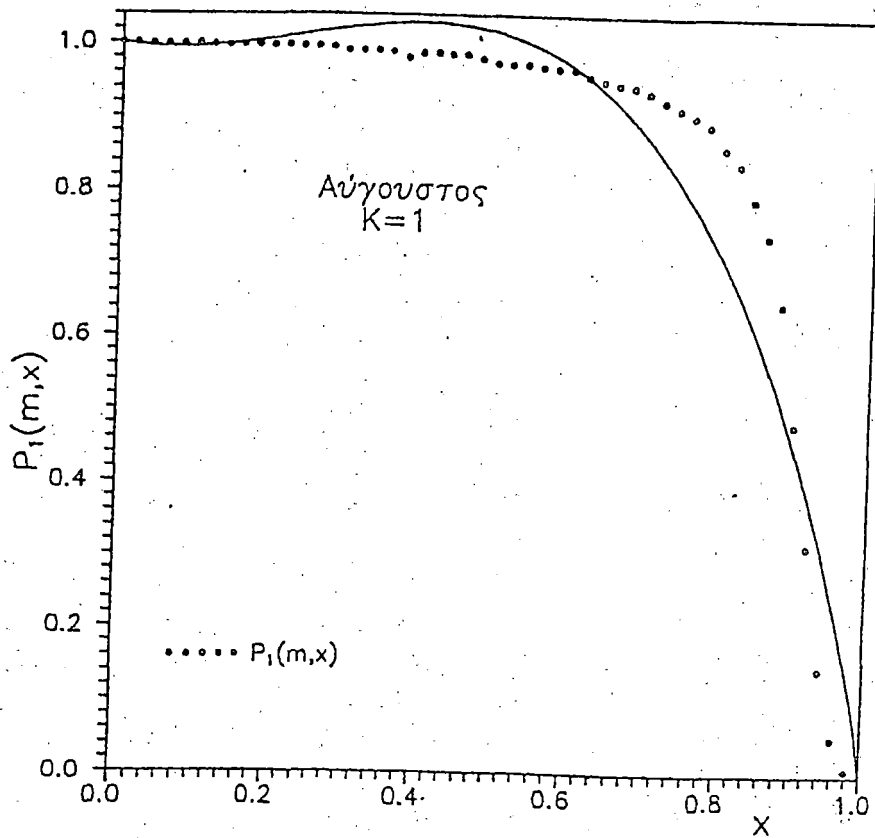
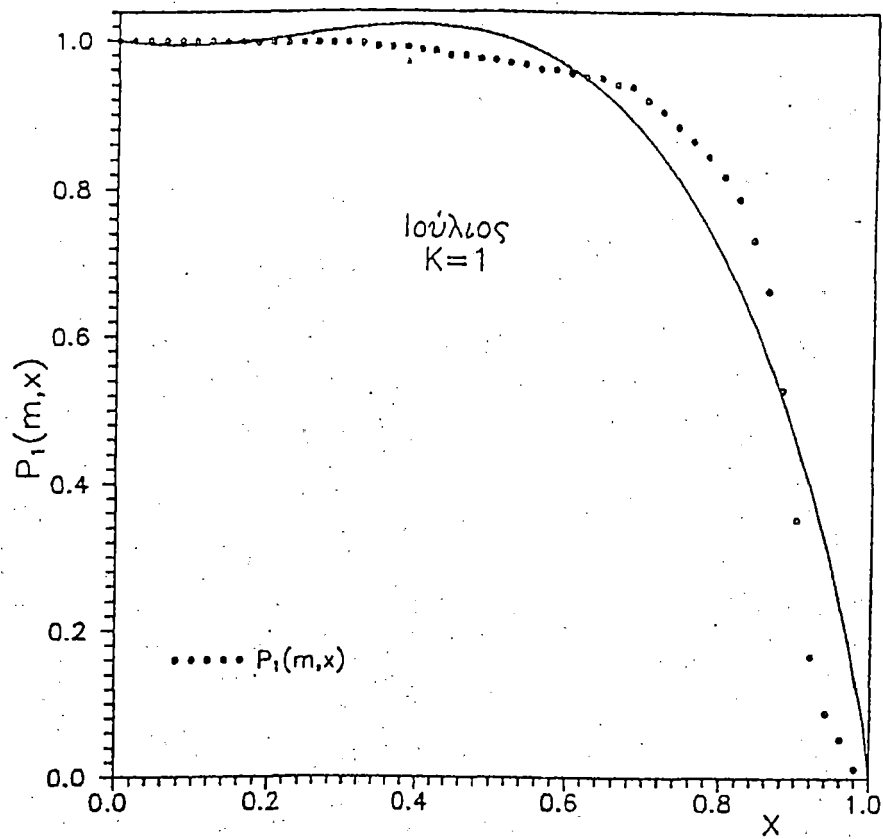
$$P_1(m, x) = (1-x^K)^l (1 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2) \quad (4.5.9)$$

με άγνωστες παραμέτρους K , l , α_1 και α_2 . Οι τιμές των παραμέτρων και της τυπικής απόκλισης σ , δίνονται στον πίνακα 4.5.2. Στα Διαγράμματα 4.3, 4.4 υπάρχουν οι εμπειρικές πιθανότητες $P_1(m, X)$ και οι θεωρητικές καμπύλες που υπολογίσθηκαν από τη σχέση (4.5.9), για τους μήνες Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο και Οκτώβριο, που αντιπροσωπεύουν τις τέσσερις εποχές τον έτος. Επίσης, στο Διάγραμμα 4.5 απεικονίζονται οι εμπειρικές περιθωριακές πιθανότητες και οι αντίστοιχες θεωρητικές για όλους τους μήνες του έτους.



Διάγραμμα 4.1

Εμπειρικές πιθανότητες $P_1(m,x)$ (-ο-) και οι αντίστοιχες καμπύλες που υπολογίσθηκαν από την εξίσωση (4.5.7) (συνεχής γραμμή), για τους μήνες Ιανουάριο και Απρίλιο.



Διάγραμμα 4.2

Εμπειρικές πιθανότητες $P_1(m,x)$ (-o-) και οι αντίστοιχες καμπύλες που υπολογίσθηκαν από την εξίσωση (4.5.7) (συνεχής γραμμή), για τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5.2.

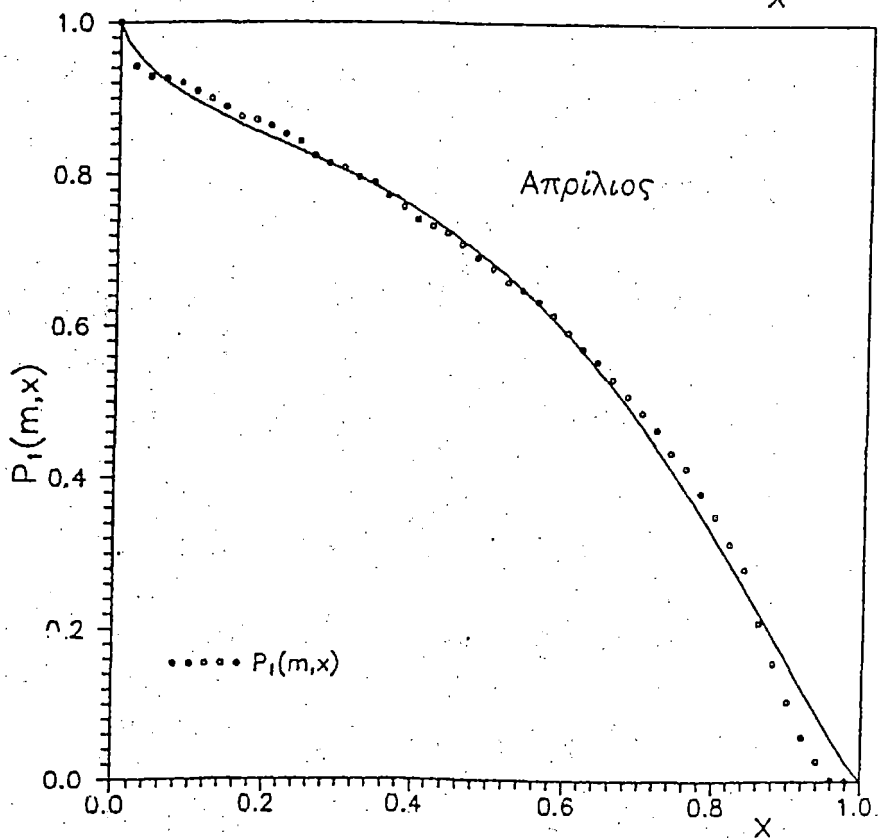
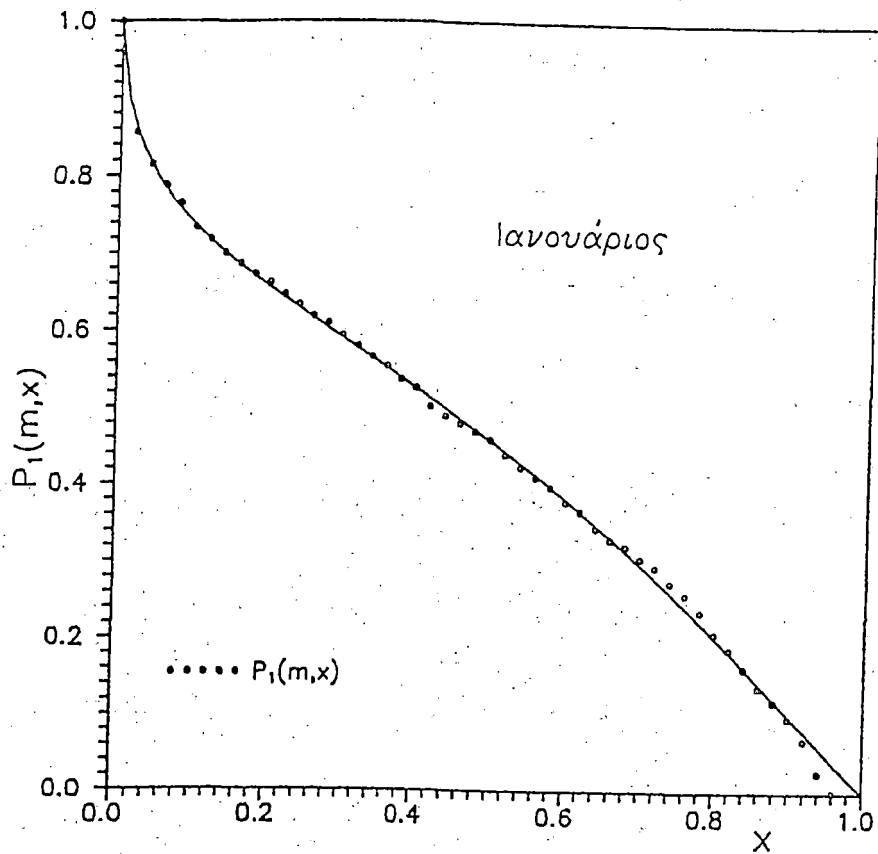
Μήνας	K	l	α_1	α_2	$\sigma \times 10^{-2}$
I	0.4952	1.1022	1.1748	0.8073	0.6
Φ	0.4780	0.7236	0.9798	-0.7322	1.3
M	0.0268	0.0461	-0.3024	-0.7429	1.7
A	0.7666	1.2237	1.0766	1.9337	1.6
M	15.6190	5.2840	-0.2348	-0.3541	0.9
I	16.7670	6.5668	-0.0828	-0.2988	1.5
I	21.0244	7.4844	0.03222	-0.1968	1.1
A	21.2643	5.3938	0.0091	-0.1340	0.8
Σ	15.0602	7.5423	-0.1617	-0.2184	1.2
O	0.6894	0.9334	0.9592	1.1981	1.9
N	0.6675	1.0580	0.8713	1.3023	1.2
Δ	0.4995	1.0924	1.6244	0.4244	1.0

Τιμές των παραμέτρων k , l , α_1 , α_2 και της τυπικής απόκλισης σ , για τις περιθωριακές πιθανότητες $P_1(m, x)$.

4.6. Συμπεράσματα

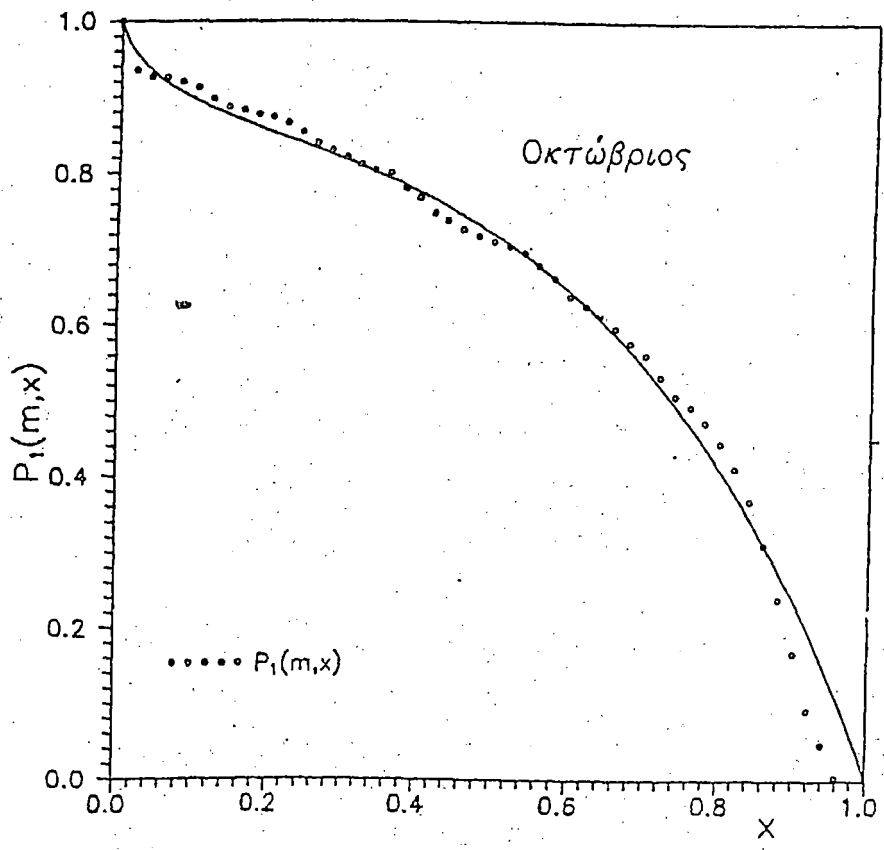
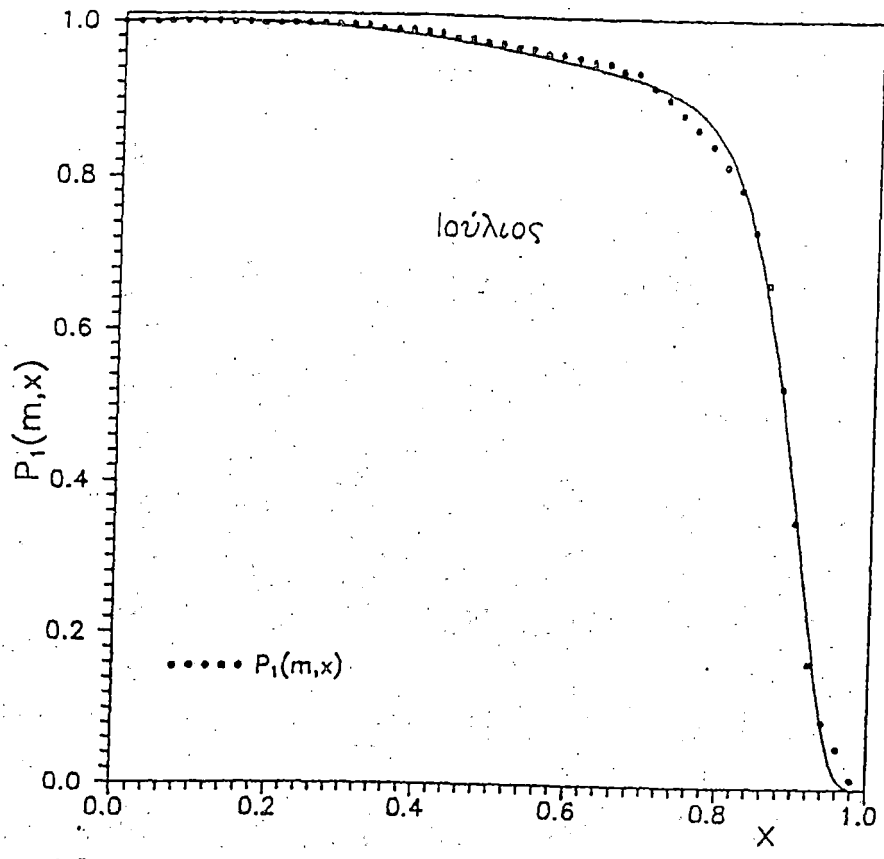
Από τον πίνακα 4.5.2 συμπεραίνουμε, ότι οι τιμές των τυπικών αποκλίσεων σ είναι αρκετά ικανοποιητικές. Η μεγαλύτερη απόκλιση πειραματικών και θεωρητικών τιμών παρατηρείται το μήνα Οκτώβριο, ενώ η μικρότερη τον Ιανουάριο. Οι αντίστοιχες τιμές σ είναι 1.9% και 0.6%.

Στην προσαρμογή των εμπειρικών καμπύλων, για να ελαττωθούν οι τιμές των τυπικών αποκλίσεων σ , δεν ελήφθησαν υπόψη τα πειραματικά σημεία για τιμές x μεγαλύτερες των τιμών x_{\max} γιατί θεωρήθηκε ότι υπάρχουν σφάλματα στις τιμές των εμπειρικών πιθανοτήτων για $x > x_{\max}$. Τα σφάλματα αυτά, οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι η ηλιοφάνεια με τις πιο ευνοϊκές συνθήκες μπορεί να καταγραφεί όταν ο ήλιος είναι 3° πάνω από τον ορίζοντα [95]. Στην ταινία του ηλιογράφου δεν παρατηρείται ίχνος καταγραφής περίπου για μισή ώρα στο κάθε άκρο μιας αίθριας ημέρας, επειδή η ηλιακή ακτινοβολία πρέπει να ξεπεράσει τα 200 w/m^2 για να αρχίσει η καταγραφή. Επομένως, το ενεργό μήκος της πιθανής διάρκειας της ηλιοφάνειας είναι περίπου μια ώρα λιγότερο του ολικού μήκους της διάρκειας της ημέρας όπως υπολογίζεται θεωρητικά.



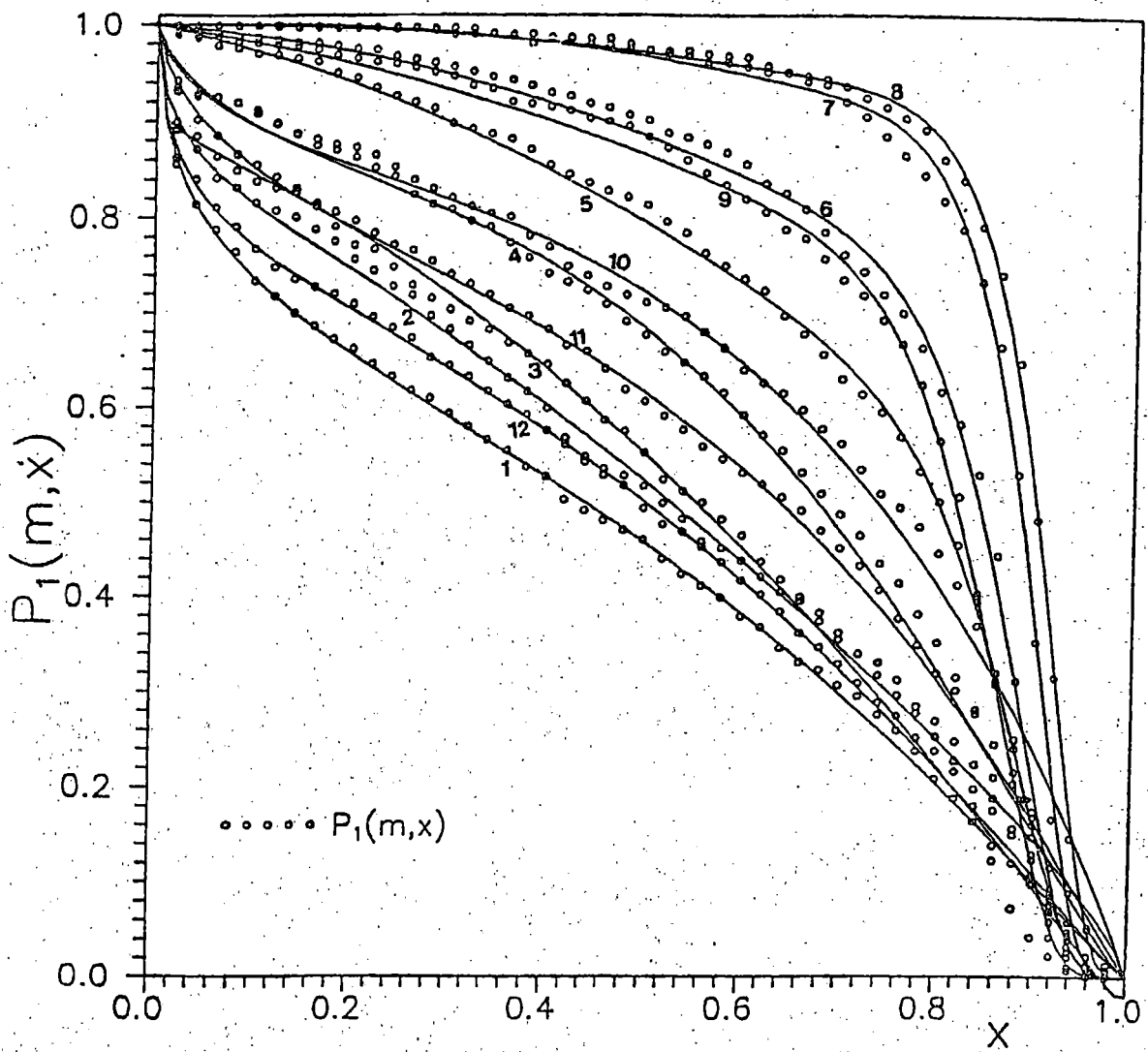
Διάγραμμα 4.3

Εμπειρικές πιθανότητες $P_1(m,x)$ (-o-) και οι αντίστοιχες καμπύλες που υπολογίσθηκαν από την εξίσωση (4.5.9) (συνεχής γραμμή), για τους μήνες Ιανουάριο και Απρίλιο.



Διάγραμμα 4.4

Εμπειρικές πιθανότητες $P_1(m,x)$ (-o-) και οι αντίστοιχες καμπύλες που υπολογίσθηκαν από την εξίσωση (4.5.9) (συνεχής γραμμή), για τους μήνες Ιούλιο και Οκτώβριο.



Διάγραμμα 4.5

Εμπειρικές πιθανότητες $P_1(m, x)$ (-o-) και οι αντίστοιχες καμπύλες που υπολογίστηκαν από την εξίσωση (4.5.9) (συνεχείς γραμμές), για όλους τους μήνες του έτους. Οι αριθμοί των καμπύλων αντιστοιχούν στο m και δείχνουν το μήνα του έτους.

Για το λόγο αυτό, τιμή x_{\max} ελήφθηκε ίση με 0.94 για τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και 0.92 τους υπόλοιπους μήνες. Επίσης, για τιμές ημερήσιας σχετικής ηλιοφάνειας ,μεγαλύτερες της τιμής x_{\max} οι τιμές των πιθανοτήτων είναι μικρές και δεν παρουσιάζουν πρακτικό ενδιαφέρον.

Στο Διάγραμμα 4.6 καταγράφονται οι εμπειρικές πιθανότητες $P_1(m,\chi)$ για κάθε μήνα και για τιμές $\chi = 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80, 0.90$. παρατηρούμε ότι για τιμές ημερήσιας σχετικής ηλιοφάνειας $x < 0.60$, η πιθανότητα κάποια ημέρα του μήνα, η σχετική ηλιοφάνεια να ξεπεράσει την τιμή χ , είναι μικρότερη τους μήνες Ιανουάριο και Δεκέμβριο. πιθανότητα αυτή αυξάνεται κανονικά από τον Ιανουάριο για να πάρει τη μέγιστη τιμή τον Αύγουστο και συνέχεια ελαττώνεται μέχρι τον Δεκέμβριο. Για Τιμές ημερήσιας σχετικής ηλιοφάνειας $x = 0.70$ και 0.80 παρατηρείται μια σχετική σταθερότητα της πιθανότητας $P_1(m,\chi)$ τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο, ενώ για τους υπόλοιπους μήνες παρατηρείται αύξηση της πιθανότητας μέχρι τον Αύγουστο και συνέχεια ελάττωση μέχρι το Δεκέμβριο. Για πολύ “καλό” καιρό, $\chi = 0.90$, παρατηρούμε απότομες αυξομειώσεις της πιθανότητας $P_1(m,\chi)$ τους ανοιξιάτικους και φθινοπωρινούς μήνες και μια απότομη αύξησή της; τους θερινούς μήνες Ιούλιο και Αύγουστο. Επίσης, στο Διάγραμμα 4.7 φαίνεται η μεταβολή της $P_1(m,\chi)$ συναρτήσει του μήνα και της σχετικής ημερήσιας ηλιοφάνειας.