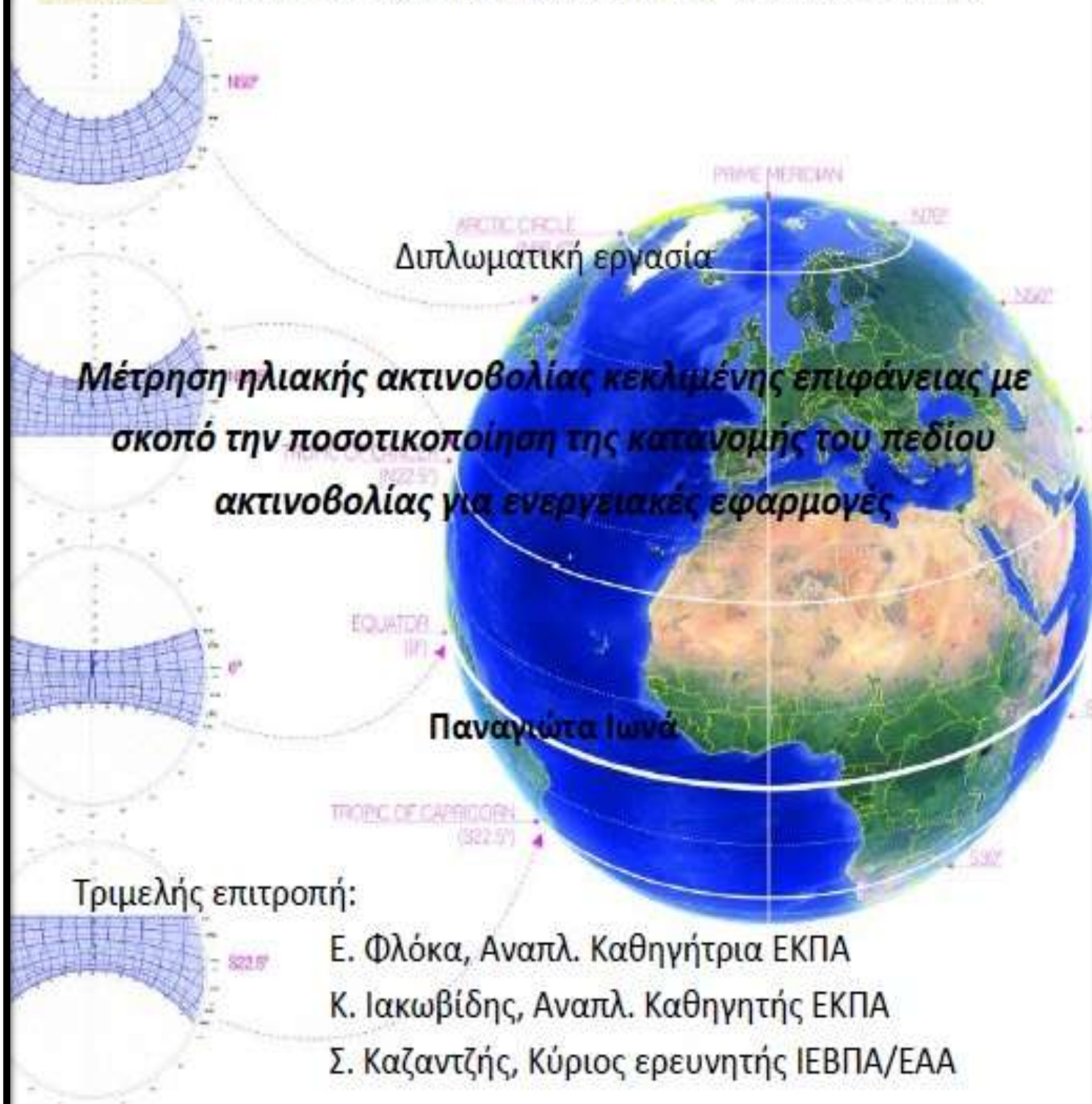




ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ – ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ



Αθήνα, Ιούνιος 2014

Εικόνα εξωφύλλου

Πίνακες που καταγράφουν την πορεία του ήλιου και δείχνουν πως μεταβάλλεται η κίνηση του ήλιου με το γεωγραφικό πλάτος.

*Στον πατέρα μου,
που συνεχίζει και παλεύει καθημερινά*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή, θα δουλέψουμε με στόχο να καταφέρουμε να ποσοτικοποιήσουμε την κατανομή του πεδίου της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες, με απώτερο σκοπό την χρήση των αποτελεσμάτων σε ενεργειακές εφαρμογές. Η περιοχή που θα καταπιαστούμε είναι αυτή της Ελλάδας και συγκεκριμένα θα μελετήσουμε τρεις πόλεις: Θεσσαλονίκη, Αθήνα, και Χανιά που αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τη Βόρεια, Κεντρική και Νότια μεριά της χώρας. Χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ηλιακής ακτινοβολίας για περίοδο 10 ετών και σε 3 διαφορετικές κλίσεις επιφανειών δίνουμε αποτελέσματα για τη βέλτιστη γωνία που πρέπει να έχει ο ηλιακός συλλέκτης. Οι κλίσεις των επιφανειών διαφοροποιούνται ως εξής: οριζόντια επιφάνεια με γωνία κλίσης 0° , κεκλιμένη επιφάνεια με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος της εκάστοτε περιοχής και τέλος κεκλιμένη επιφάνεια με μεταβλητή γωνία κλίσης ανάλογα με το ζενίθ του ήλιου.

Στην προσπάθειά μας για πιο ακριβή αποτελέσματα, εντάξαμε και τον παράγοντα νέφωσης που ως γνωστό αποκόπτει τεράστια ποσά ηλιακής ακτινοβολίας να φτάσουν μέχρι τη γη με αποτέλεσμα να μένει ανεκμετάλλευτα τεράστια ποσά ηλιακής ενέργειας. Έτσι χρησιμοποιώντας δεδομένα νεφοκάλυψης, για μια περίοδο 10 ετών, εξαγάγαμε ένα μαθηματικό μοντέλο που δίνει προβλέψεις ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιες και κεκλιμένες επιφάνειες σε μηνιαία βάση για συγκεκριμένο τόπο, συνυπολογίζοντας και τη νεφοκάλυψη.

Λέξεις κλειδιά:

Ηλιακή ακτινοβολία, θερμικά ηλιακά συστήματα, φωτοβολταϊκά, ηλιακή γεωμετρία, κεκλιμένη επιφάνεια, οριζόντια επιφάνεια, βέλτιστη γωνία συλλέκτη, κατανομή πεδίου ακτινοβολίας, δείκτης νεφοκάλυψης, πρόγνωση ακτινοβολίας

ABSTRACT

In this paper, we will work with the aim to be able to quantify the distribution of the field of solar radiation on incline surfaces, with a view to using the results in energy applications. The area we will study is that of Greece, and in particular we will study three cities; Thessaloniki, Athens and Chania which represent respectively the Northern, Central and Southern part of the country. Using 10-year- period measurements of solar radiation and 3 different slopes surfaces we give results for the optimum angle to have the solar collector. The slopes of the surfaces vary as follows; horizontal surface angle of 0° , inclined surface with tilt angle equal to the latitude of the study area and finally inclined surface with variable angle of inclination depending on the zenith of the sun.

Then, we have incorporated the factor known as cloud that cuts massive amounts of solar radiation to reach the earth thus remains unexploited huge amount of solar energy. So using 10-year-period cloud cover data we derive a mathematical model that allows predictions of solar radiation on horizontal and inclined surfaces on a monthly basis for a specific place and taking into account the cloud cover.

Keywords:

Solar radiation, solar thermal systems, photovoltaic, solar geometry, inclined surface, horizontal surface, optimal angle collector, radiation field distribution, cloud fraction, forecast radiation

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	10
2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2 Η ακτινοβολία. Γενικά – Ορισμοί.....	10
2.2.1 Βασικοί νόμοι της ακτινοβολίας.....	12
2.3 Η ηλιακή ακτινοβολία.....	13
2.4 Η ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα και επιφάνεια της γης.....	14
2.5 Ηλιακή γεωμετρία.....	17
2.5.1 Απόκλιση του ήλιου δ	18
2.6 Θέση του ήλιου σε σχέση με οριζόντια επίπεδα.....	19
2.7 Σχετική θέση του ήλιου με κεκλιμένα επίπεδα.....	21
2.7.1 Επιφάνειες τοποθετημένες στον ισημερινό.....	21
2.7.2 Επιφάνειες προσανατολισμένες κατά γωνία γ	22
2.8 Γενικοί κανόνες για τη συλλογή της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας.....	22
2.9 Ανακεφαλαίωση.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΜΕΣΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	25
3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 Θερμικά ηλιακά συστήματα.....	25
3.2.1 Ηλιακά συστήματα Ζεστού νερού χρήσης (Ζ.Ν.Χ.).....	26
3.2.2 Ηλιακός κλιματισμός.....	27
3.2.3 Θέρμανση χώρων.....	28
3.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	31
3.3.1 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος.....	32
3.3.2 Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	34
3.3.3 Τα φωτοβολταϊκά στην στέγη μας.....	35
3.3.4 Φωτοβολταϊκά – Τεχνολογία του μέλλοντος.....	37
3.4 Ανακεφαλαίωση.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ - ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ.....	40
4.1 Εισαγωγή.....	40

4.2 Ονοματολογία μεταβλητών	41
4.2.1 Μεθοδολογία.....	42
4.3 Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας για οριζόντια και κεκλιμένη επιφάνεια	44
4.3.1 Υπολογιστικό σχήμα της βάσης δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας	46
4.3.2 Αξιοπιστία και σύγκριση των χαρτών του PVGIS με του ESRA.....	50
4.4 Δείκτης νεφοκάλυψης – Cloud Fraction	51
4.4.1 Τηλεπισκοπικές απεικονίσεις MODIS.....	52
4.5 μοντέλο BOLAM	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	56
5.1 Εισαγωγή.....	56
5.2 Μελέτη τιμών ηλιακής ενέργειας.....	56
5.3 Έλεγχος αξιοπιστίας υπολογισμών ηλιακής ακτινοβολίας – μοντέλο BOLAM	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρύπανση του περιβάλλοντος, εξαιτίας της μεγάλης τεχνολογικής προόδου και της ραγδαίας βιομηχανικής ανάπτυξης, μόνο επικίνδυνη μπορεί να χαρακτηριστεί για τη γήινη βίωση. Τα τελευταία χρόνια, οι προσπάθειες για τη διάσωση του φυσικού περιβάλλοντος έχουν οδηγήσει στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με πρώτη στη λίστα την ηλιακή. Φωτοβολταϊκά και η ηλιοθερμική, είναι οι κύριες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ενέργεια. Η μελέτη αυτή, μπορούμε να πούμε, ότι εφαρμόζεται στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών και γενικότερα των ηλιακών συλλεκτών καθώς επίσης και στην άμεση εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας όπως γίνεται στο βιοκλιματικό σχεδιασμό.

Σε μεσογειακές χώρες, όπως είναι η Ελλάδα και η Κύπρος, υπάρχουν τεράστιες δυνατότητες εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας αφού σε τέτοια γεωγραφικά πλάτη έχουμε έντονη ηλιοφάνεια και μάλιστα θα τολμούσα να πω και καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, η έντονη μεταβλητότητα λόγω αποκοπής μεγάλου μέρους της από πλευράς νεφών, καθιστούν δύσκολη την ενσωμάτωσή της στα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στον ιδιωτικό τομέα και το εμπόριο (νοικοκυριά, επιχειρήσεις) όσο και στο δημόσιο (ΔΕΗ). Επίσης, η ηλιακή ενέργεια διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη ζωή μας και ειδικά στο τομέα της υγείας όπου πρόβλεψη της βλαβερής υπερϊώδους ακτινοβολίας ίσως να οδηγούσε στην άμεση πρόληψη διάφορων ασθενειών που κτυπούν τον ανθρώπινο οργανισμό. Μπορούμε να πούμε επίσης, ότι η πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας θα είναι ικανή να δώσει χρήσιμες προειδοποιήσεις σε τομείς όπως είναι η γεωργία και η κτηνοτροφία.

Στην παρούσα εργασία αρχικά θα γίνει μια διερεύνηση της αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών ανάλογα με την γωνία που υπόκεινται, το γεωγραφικό πλάτος και το χρονική στιγμή που γίνεται η μέτρηση (μήνας, εποχή). Με δεδομένα από την πλατφόρμα της NASA θα δείξουμε τη βέλτιστη γωνία της επιφάνειας για την καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Προηγούμενες μελέτες εξάγουν μαθηματικές σχέσεις για τον προσδιορισμό της βέλτιστης κλίσης ανάλογα με τη μέρα του χρόνου και την ώρα της ημέρας. (Jurgita Grigoniene, 2009) Εμείς παραθέτουμε ένα εμπειρικό κανόνα που εξάγουμε μέσα από διάφορες συσχετίσεις των δεδομένων που έχουμε στην διάθεσή μας.

Σημαντική αποστολή της εργασίας, είναι να τονίσει τη σημαντικότητα των νεφών στην ατμόσφαιρα και το πόσο ανασταλτικό ρόλο μπορούν να παίξουν στην ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη. Έτσι, θα γίνει προσπάθεια εξαγωγής ενός μοντέλου που θα δίνει προβλέψεις ηλιακής ακτινοβολίας, για οριζόντιες και κεκλιμένες επιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη και τον παράγοντα νέφη. Για τον σκοπό αυτό, εκτός από δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας θα κάνουμε χρήση και δεδομένων νεφοκάλυψης που εκφράζουν την επί της εκατό νεφοκάλυψη του ουράνιου θόλου. Προηγούμενες μελέτες για να φτάσουν σε παρόμοια αποτελέσματα κάνουν χρήση της διάχυτης ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες τα οποία πηγάζουν από μετρήσεις διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιες. (Chanchal Kumar Pnadey, 2009), (M. Diez-Media villa, 2004)

Μπορούμε να συνοψίζουμε τους σκοπούς της εργασίας ως εξής:

1. Εξαγωγή συμπερασμάτων για τη βέλτιστη κλίση που πρέπει να έχει ένας ηλιακός συλλέκτης με σκοπό τη μέγιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, σε

συγκεκριμένο τόπο και χρόνο. Υπολογισμός ηλιακής ενέργειας που συλλέγεται στη Ελλάδα σε ετήσια βάση.

2. Εξαγωγή μαθηματικών σχέσεων που δίνουν πρόγνωση ηλιακής ακτινοβολίας λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα νεφοκάλυψης, σε μηνιαία βάση. Σύγκριση της προγνωστικών τιμών με τις αληθείς μετρήσεις και παρατηρήσεις για τον ανασταλτικό παράγοντα, νέφη.
3. Σύγκριση της συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας με την προβλέψιμη και σε ημερήσια βάση με τη χρήση του μοντέλου BOLAM.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Ο ήλιος, από την αρχαιότητα ακόμα, κέντριζε το ενδιαφέρον του ανθρώπου. Οι αρχαίοι Έλληνες, μη μπορώντας να εξηγήσουν τα φυσικά φαινόμενα που προκαλούσε και ανίκανοι να προστατευτούν από το παντοδύναμο αυτό στοιχείο, το θεοποίησαν και έπλασαν μύθους και θρύλους γύρω από τον ήλιο. Από τότε, πολλοί προσπάθησαν να ερμηνεύσουν τη φύση του, τη λειτουργία του, τη θέση του στο πλανητικό σύστημα.

Αλλά παρόλα αυτά οι έρευνες γύρω από τον ήλιο δεν σταμάτησαν ποτέ. Σήμερα με την τεράστια ανάπτυξη της επιστήμης και των επιστημονικών οργάνων, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε πολλά για τον ήλιο. Οι γνώσεις μας αυτές, μας βοηθάνε να εκμεταλλευόμαστε, για το συμφέρον του ανθρώπου, τις ευεργετικές ιδιότητες του ήλιου και να εξουδετερώνουμε σε μεγάλο βαθμό τις βλαβερές.

Έτσι και εμείς, σε αυτή την εργασία, θα ξεκινήσουμε, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ακτινοβολίας. Θα αναφερθούμε στους νόμους που μπορούν να ερμηνεύσουν και να περιγράψουν τη φύση και τις βασικές ιδιότητες της ακτινοβολίας. Επίσης στην προσπάθειά μας να βρούμε τα ποσά της ηλιακής ενέργειας που έχουμε στη διάθεσή μας για εκμετάλλευση, θα μελετήσουμε, ποιοι παράγοντες οδηγούν στην εξασθένηση της, είτε επειδή απορροφάται από στοιχεία της ατμόσφαιρας, είτε σκεδάζεται, είτε λόγω μεταβλητότητας των εποχών, είτε λόγω της εναλλαγής μέρας νύχτας.

Η μεταβλητότητα των εποχών, η εναλλαγή μέρας νύχτας συμβαίνουν λόγω της περιστροφής της γης γύρω από τον ήλιο. Η ηλιακή γεωμετρία θα μας βοηθήσει να ερμηνεύσουμε όλα αυτά αλλά θα μας οδηγήσει ακόμα, στο να εξάγουμε συμπεράσματα πως μπορούμε να αξιοποιήσουμε επαρκώς την ηλιακή ακτινοβολία.

Με τον όρο ηλιακή γεωμετρία, εννοούμε τη μελέτη της θέσης του ήλιου σε σχέση με τη γη, που βρίσκεται σε κίνηση και γύρω από τον εαυτό της και γύρω από τον ήλιο. Εννοούμε επίσης τη σχετική θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της μέρας, των εποχών και ακολούθως του έτους, με μια οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια που βρίσκεται στη γη. Οι πληροφορίες από αυτό το κεφάλαιο είναι πάρα πολύ σημαντικές για το θέμα της εργασίας, αφού θα μας είναι απαραίτητες στην πορεία για να ερμηνεύσουμε τα αποτελέσματα της μελέτης της ηλιακής ακτινοβολίας,

2.2 Η ακτινοβολία. Γενικά – Ορισμοί

Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει στην επιφάνεια σώματος, ένα μέρος της ενέργειας του απορροφάται, με αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας και της θερμοκρασίας σώματος. Αντιστρόφως, ένα θερμό σώμα που δε βρίσκεται σε επαφή με άλλα σώματα ή τον αέρα, ψύχεται, εκπέμποντας θερμική ενέργεια υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικών

κυμάτων. Ως θερμική ακτινοβολία θα θεωρούμε την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπουν τα σώματα εξαιτίας της θερμοκρασίας τους.

Όταν σε ένα σώμα προσπέσει ακτινοβολία, τότε είναι δυνατόν να συμβούν οι ακόλουθες διεργασίες:

Απορρόφηση μέρους της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η οποία θα αποτελέσει την αιτία για την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας και ακολούθως της θερμοκρασίας του. Ο λόγος της απορροφούμενης ισχύος προς την ισχύ που προσπίπτει σε αυτό – για ορισμένο μήκος κύματος ακτινοβολίας και για ορισμένη θερμοκρασία T – ονομάζεται απορροφητική ικανότητα $\alpha(\lambda, T)$. Όταν $\alpha(\lambda, T) = 1$, τότε έχουμε την περίπτωση του μέλανος σώματος. Το μέλαν σώμα είναι εκείνο το θεωρητικό σώμα που απορροφά ολόκληρη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό για όλες τις θερμοκρασίες και για όλα τα μήκη κύματος. Η ακτινοβολία του μέλανος σώματος περιγράφεται από τους πέντε νόμους που θα αναφερθούν πιο κάτω.

Ανάκλαση μέρους της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Σαν ανακλαστική ικανότητα (albedo) $R(\lambda, T)$ ενός σώματος για ορισμένο μήκος κύματος και ορισμένη θερμοκρασία T , ονομάζουμε το λόγο της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Με βάση τα πιο πάνω θα ισχύει η σχέση: $\alpha(\lambda, T) + R(\lambda, T) = 1$. Ο προσδιορισμός της λευκαύγειας αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη μελέτη του ισοζυγίου ακτινοβολίας των υποκείμενων επιφανειών, γιατί καθιστά δυνατό να βρούμε το ποσό της θερμότητας που προσλαμβάνεται από τις θεωρούμενες επιφάνειες, λόγω απορροφήσεως της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τιμές λευκαύγειας (%) διάφορων επιφανειών δίνονται στον πιο κάτω πίνακα.

Πίνακας 2.1 τιμές λευκαύγειας (&) σε διάφορες επιφάνειες (Τ.Ι Μακρογιάννης)

Περιοχή	Λευκαύγεια (%)	Περιοχή (%)	Λευκαύγεια
Δρόσος	5-10	Άμμος	20-30
Διάβροχο έδαφος	10	Χλόη	25
Βραχώδες έδαφος	10-15	Παλιό χιόνι	55
Ξερή γη	20-25	Νέο χιόνι	80
Υδάτινη επιφ. (για μεγάλα ύψη ηλίου)	5	Υδάτινη επιφ. (για μικρά ύψη ηλίου)	70

Στα νέφη είναι δύσκολο να μετρηθεί, αλλά είναι γνωστό ότι εξαρτάται από το είδος τους και την πυκνότητα τους. Μια μέση τιμή είναι η 50-65%.

Ένα άλλο επίσης βασικό ποσοτικό χαρακτηριστικό της ακτινοβολίας είναι η **ροή ακτινοβολίας (F)** που ορίζεται σαν το ποσό ενέργειας που περνά από τη μονάδα του χρόνου και είναι περισσότερο γνωστή σαν **ένταση ακτινοβολίας**. Αν παραστήσουμε με $d\varphi$ το ποσό ενέργειας στην περιοχή των μήκων κύματος από λ μέχρι $\lambda+d\lambda$ που περνά από τη στοιχειώδη επιφάνεια ds στο χρόνο dt , τότε για μονοχρωματική ακτινοβολία θα έχουμε

$$F_\lambda = \frac{d\varphi}{dsdt} \quad (\text{Εξ. 2.1})$$

και για την ολοφασματική ακτινοβολία

$$F = \int_0^\infty F_\lambda d\lambda . \quad (\text{Εξ. 2.2})$$

2.2.1 Βασικοί νόμοι της ακτινοβολίας

Οι νόμοι που εκφράζουν τις βασικές ιδιότητες της ακτινοβολίας του μελανού σώματος είναι:

α) Νόμος του Kirchhoff

Ο νόμος αυτός αναφέρεται γενικά στην αρχή ότι, όταν κάποιο σώμα απορροφά ενέργεια σε ορισμένο φάσμα τότε εκπέμπει στο ίδιο φάσμα. Αλλιώς μπορούμε να πούμε ότι οι καλοί απορροφητές είναι και καλοί εκπομποί σε καθορισμένο μήκος κύματος και αντίστοιχα οι κακοί απορροφητές είναι και κακοί εκπομποί σε καθορισμένο μήκος κύματος. Σύμφωνα με το νόμο, ο λόγος της ακτινοβολούμενης ενέργειας ενός σώματος προς την ακτινοβόλουμένη, από ένα μέλαν σώμα, ενέργεια που βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το θεωρούμενο σώμα, είναι ίσος με την ικανότητα απορρόφησης του σώματος για ένα ορισμένο μήκος κύματος λ και για ορισμένη θερμοκρασία T

$$\frac{\varepsilon(\lambda, T)}{\varepsilon(\lambda, T)_{\text{μελ}}} = \alpha(\lambda, T) \quad (\text{Εξ. 2.3})$$

β) Νόμος του Plank

Σύμφωνα με το νόμο αυτό το ποσό της ισχύος $P_\lambda d\lambda$ που εκπέμπεται από τη μονάδα επιφάνειας του μελανού σώματος, στην φασματική περιοχή από λ μέχρι $\lambda+d\lambda$ δίνεται από:

$$P_\lambda d\lambda = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{Εξ. 2.4})$$

Όπου $c_1 = 3,7415 \times 10^{-16} \text{ Wat m}^2$, $c_2 = 1,4388 \times 10^{-2} \text{ m grad}$.

γ) Πρώτος νόμος του Wien

Αναφέρει ότι το γινόμενο της απόλυτης θερμοκρασίας του μέλανος σώματος και του μήκους κύματος που αναφέρεται στο μέγιστο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι σταθερό :

$$\lambda_m T = 2897,8 \text{ (m.grad)} \quad (\text{Εξ. 2.5})$$

δ) Δεύτερος νόμος του Wien

Εάν στη σχέση του νόμου του Plank που προσδιορίζει την τιμή του φασματικού συντελεστή εκπομπής θέσουμε $\lambda = \lambda_{\text{max}}$ έχουμε την έκφραση για το μέγιστο συντελεστή εκπομπής της πηγής :

$$\varepsilon_\lambda(T)_\mu = 1,286 \left(\frac{T}{1000}\right)^5 \quad (\text{Εξ 2.6})$$

ε) Νόμος του Stefan-Boltzmann

Καθορίζει την τιμή του ολικού φασματικού συντελεστή εκπομπής του μέλανος σώματος $\varepsilon(T)_\mu = \sigma T^4$ (Εξ. 2.7)

Όπου $\sigma = 5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ grad}^4$ (σταθερά Stefan-Boltzmann).

Για να υπολογίσουμε το καθαρό ποσό της ακτινοβολίας όταν το περιβάλλον έχει θερμοκρασία T_0 , ο νόμος των Stefan-Boltzmann γίνεται

$$\varepsilon(T)_\mu = \sigma(T^4 - T_0^4) \quad (\text{Εξ. 2.8})$$

Πρακτικά ο νόμος αυτός συνεπάγεται ότι η ισχύς που εκπέμπεται, π.χ. από ένα σώμα με $T = 303^\circ\text{K} (30^\circ\text{C})$ είναι 52% μεγαλύτερη από εκείνη όταν το σώμα αυτό θα είχε $T = 273^\circ\text{K} (0^\circ\text{C})$.

στ) Νόμος του Beer

Ο νόμος αυτός ειδικότερα για την ηλιακή ακτινοβολία, περιγράφει την ελάττωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας dI σαν συνάρτηση του πάχους του αέριου στρώματος dx από το οποίο διέρχεται:

$$dI = -aI_0 dx \Rightarrow I = I_0 e^{-ax} \quad (\text{Εξ. 2.9})$$

Όπου I_0 η αρχική ένταση και a ο συντελεστής εξασθένησης ή απόσβεσης της ακτινοβολίας, οφειλόμενη στην απορρόφηση και διάχυση. Οι τιμές του a κυμαίνονται από 0.01 km^{-1} για πολύ καθαρό αέρα μέχρι 0.003 ή 0.05 km^{-1} για αέρα με αρκετή θόλωση (Τ.Ι Μακρογιάννης).

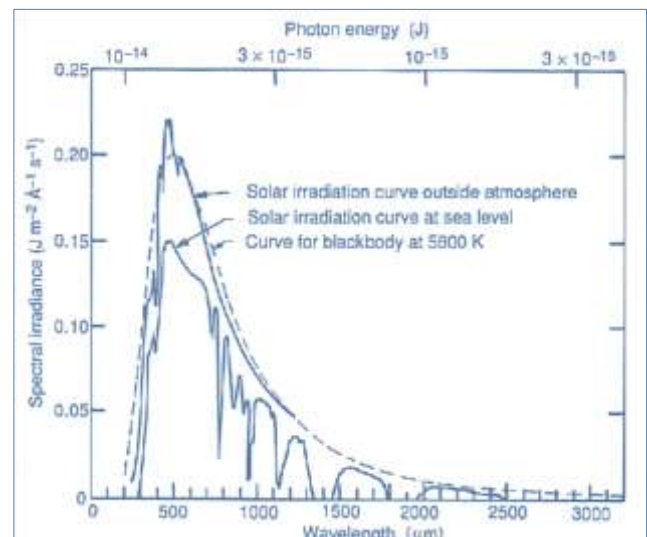
2.3 Η ηλιακή ακτινοβολία

Με τον όρο ηλιακή ακτινοβολία ή ηλιακή ενέργεια αναφερόμαστε στην ακτινοβολία που δέχεται ο πλανήτης μας από τον ήλιο. Τα βασικά στοιχεία του σημαντικότερου αστέρα του ηλιακού μας συστήματος είναι ο πυρήνας, η φωτόσφαιρα, η χρωμόσφαιρα και το στέμμα. Ο πυρήνας αποτελεί και το 0.9 της όλης μάζας του, η φωτόσφαιρα έχει πάχος 200-300 km και είναι η ορατή επιφάνεια του ήλιου. Η χρωμόσφαιρα εκτείνεται μέχρι ύψος $15 \times 10^3 \text{ km}$ και το στέμμα εκτείνεται πάνω από τη χρωμόσφαιρα. Από μετεωρολογικής άποψης, το περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η φωτόσφαιρα γιατί αυτή αποτελεί τη βασική πηγή εκπομπής της λεγόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

Ο ήλιος αντλεί την ενέργειά του από τη σύντηξη υδρογόνου του και τη μετατροπή του σε ήλιο (κύκλος πρωτονίου-πρωτονίου). Με βάση τη διαδικασία αυτή, 657 εκ. τόνοι υδρογόνου μετατρέπονται σε 652.5 εκ. τόνους ήλιο σε κάθε δευτερόλεπτο και το, κατά τη διαδικασία αυτή, εμφανιζόμενο έλλειμμα των 4.5 εκ. τόνων, είναι η ανά δευτερόλεπτο ελευθερωμένη ενέργεια (Τ.Ι Μακρογιάννης). Η ενέργεια παράγεται στο εσωτερικό του ήλιου και μεταφέρεται στα εξωτερικά στρώματα με ρεύματα μεταφοράς απ' όπου ακτινοβολείται στο διάστημα. Η ενέργεια είναι περίπου $1526.5 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1} = 6.381 \times 10^{10} \text{ erg.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$. Η γη μας υπολογίζεται ότι δέχεται κάτι λιγότερο από τα 2 δις, περίπου $2.51 \times 10^{18} \text{ cal.min}^{-1}$.

Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής, είναι η εκπομπή, κατά 99%, ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και κατά 1% σωματιδιακή ακτινοβολία η οποία αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια που απορροφώνται στην ανώτερη ατμόσφαιρα επηρεάζοντας ατμοσφαιρικά φαινόμενα.

Η ακτινοβολία από τον ήλιο προσεγγίζει αυτή που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία 6000K. Εφαρμόζοντας το νόμο του Wien, υπολογίζεται ότι το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας εκπέμπεται σε μήκος κύματος $0,6 \mu\text{m}$. Το 99% της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται σε μήκη κύματος μεταξύ $0,15 \mu\text{m}$ και $4,0 \mu\text{m}$ και η φασματική κατανομή της είναι: 7% υπεριώδης (0.1 με $0.4 \mu\text{m}$), 44% ορατή (0.4 με $0.71 \mu\text{m}$), και 49%



Σχήμα 2.1 Φασματική διανομή της ειδικής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (Coffari, 1977)

υπέρυθρη (0.71 με 1.5 μm). Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η φασματική διανομή της ειδικής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, στην επιφάνεια της γης και της ακτινοβολίας μέλανος σώματος θερμοκρασίας 5900°K (διακεκομμένη γραμμή). Αν συγκρίνουμε τις καμπύλες παρατηρούμε ότι η ακτινοβολία του ήλιου διαφέρει από την ακτινοβολία μέλανος σώματος. Αυτό γενικά οφείλεται στο ότι τα διάφορα στρώματα του ήλιου δεν έχουν την ίδια θερμοκρασία.

Μακροχρόνιες μελέτες έδειξαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία δεν μεταβάλλεται αισθητά. Στην πραγματικότητα δεχόμαστε ότι είναι σταθερή, αφού η ηλιακή ενέργεια δημιουργείται σε μια κεντρική περιοχή του ήλιου που δέχεται μηδαμινές μεταβολές για μακρές περιόδους. Αυτή η σταθερή τιμή ονομάζεται ηλιακή σταθερά και ορίζεται ως: «το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που πέφτει κάθετα στην μονάδα της επιφάνειας, που τοποθετείται στα ανώτερα όρια της ατμόσφαιρας, ανά μονάδα χρόνου κι όταν η γη βρίσκεται στη μέση απόσταση της από τον ήλιο» (περίπου στα $1.4968 \times 10^8 \text{ km}$). Η τιμή της έχει οριστεί στα 1367 W/m^2 .

2.4 Η ηλιακή ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα και επιφάνεια της γης

Τα τεράστια ποσά ενέργειας που παράγονται στο κέντρο του ήλιου, είναι αδύνατον να φτάσουν ακέραια στην ατμόσφαιρα της γης, πόσο μάλλον στην επιφάνεια της γης. Λόγω αστρονομικών και γεωγραφικών παραγόντων, που θα αναλύσουμε αργότερα, η ηλιακή ακτινοβολία περιορίζεται, ενώ λόγω απορρόφησης και σκέδασης της στα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας υφίσταται περαιτέρω εξασθένηση.

Το σημαντικότερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της γης σαν δέσμη των ακτινών που προέρχονται απ' ευθείας από τον ήλιο και καλείται **άμεση ηλιακή ακτινοβολία (direct solar radiation)**.

Η ακτινοβολία που διαχέεται από την ατμόσφαιρα για να φτάσει στο έδαφος καλείται **διάχυτη ακτινοβολία (diffuse solar radiation)** προερχόμενη από όλα τα σημεία του ουρανού.

Η ατμόσφαιρα, και ιδιαίτερα τα νέφη, ανακλούν ένα ποσοστό της ακτινοβολίας. Αυτή αποτελεί την **ανακλώμενη ακτινοβολία (reflect radiation)**.

Η επιφάνεια του εδάφους, με τη σειρά της, θερμαίνεται από την ακτινοβολία και ως εκ τούτου, εκπέμπει προς την ατμόσφαιρα ακτινοβολία ανάλογη με τη θερμοκρασία της, τη **γήινη ακτινοβολία (terrestrial radiation)**.

Τέλος, η θερμαινόμενη ατμόσφαιρα, εκπέμπει την **ατμοσφαιρική ακτινοβολία (atmospherial radiation)** προς όλες τις κατευθύνσεις.

Η άμεση και η διάχυτη ακτινοβολία, είναι οι σημαντικότερες και γενικά αυτές μελετούμε στην παρούσα εργασία. Το άθροισμά τους είναι αυτό που ονομάζουμε **ολική ηλιακή ακτινοβολία (global solar radiation)**: $O=A\sigma\eta Z+\Delta$. Όπου Z ζενιθιακή γωνία του ηλίου. Η ημερήσια πορεία της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από το Z και τη διαφάνεια της ατμόσφαιρας.

Οι παραπάνω ακτινοβολίες παρουσιάζουν διαφορετική φασματική σύνθεση. Αν θεωρήσουμε ότι η γη και η κατώτερη ατμόσφαιρα της ακτινοβολούν ως «μέλαν σώμα» με θερμοκρασίες για την επιφάνεια της γης μικρότερες των 80°C και μεγαλύτερες των -70°C για την ανώτερη ατμόσφαιρα, με την εφαρμογή του νόμου του Planck, προκύπτει ότι το

φάσμα εκπομπής της γήινης ακτινοβολίας θα κυμαίνεται από 1,5μm έως 100μm. συγκεκριμένα για την επιφάνεια της γης, με μέση θερμοκρασία 15°C , το φάσμα της ακτινοβολίας της αρχίζει από τα 4μm και φτάνει ως τα 100μm. Σύμφωνα με το νόμο του Wien, το μέγιστο της έντασης της ακτινοβολίας αυτής αντιστοιχεί σε ακτινοβολίες σε μήκη κύματος περίπου 10μ. Παρατηρούμε ότι το φάσμα εκπομπής της γης ξεκινάει από τα μήκη κύματος που σταματά το φάσμα εκπομπής του ήλιου. Η γη δηλαδή εκπέμπει σε μεγαλύτερα μήκη κύματος σε σχέση με τον ήλιο και γι αυτό η γήινη ακτινοβολία χαρακτηρίζεται ως «μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία» ενώ η ηλιακή ως «μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία». (Τ.Ι Μακρογιάννης)

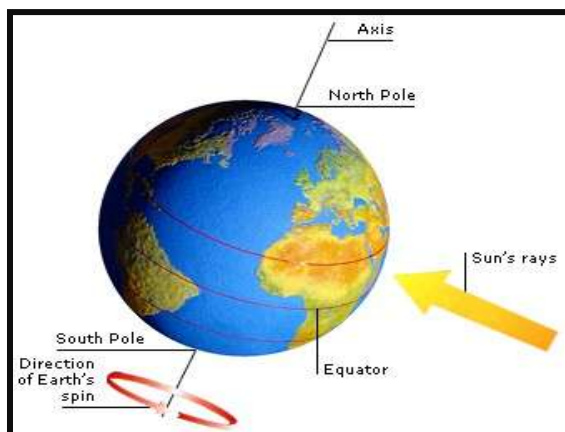
Εξασθένηση ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη ποικίλουν. Μπορούμε να τους ομαδοποιήσουμε κατά κάποιο τρόπο ως εξής:

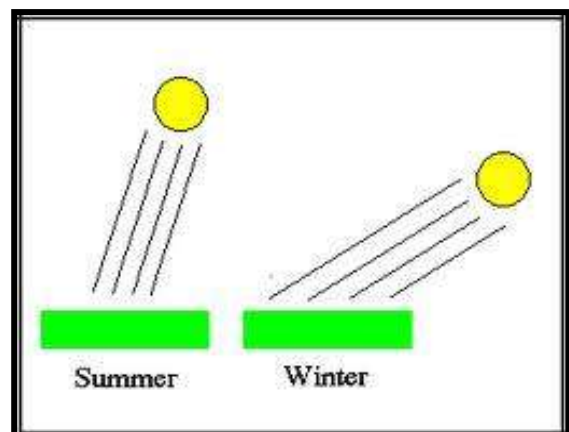
A) Λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της γης ως προς τον ήλιο, η απόσταση μεταξύ ήλιου και γης δε διατηρείται σταθερή. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι το εύρος της διακύμανσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, κατά τη μεταβολή της αποστάσεως ήλιου-γης δεν υπερβαίνει το 3.5%.

B) Από το ύψος του ήλιου πάνω από τον ορίζοντα του τόπου. Αλλιώς μπορούμε να τους ονομάσουμε γεωγραφικούς παράγοντες που περιλαμβάνουν το γεωγραφικό πλάτος και άρα η διάρκεια της ημέρας, το ύψος του σημείου παρατήρησης από τη μέση στάθμη της θάλασσας, το ανάγλυφο της περιοχής γύρω από το σημείο παρατήρησης και η αντανάκλαστικότητα της επιφάνειας που δέχεται την ακτινοβολία. Εδώ εμπίπτουν και οι γεωμετρικοί παράγοντες που περιλαμβάνουν το προσανατολισμό και την κλίση της επιφάνειας που δέχεται την ακτινοβολία, σε σχέση με την κατεύθυνση των ηλιακών ακτινών.

Ο άξονας της γης έχει κλίση 23.5°, σε σχέση με τον κάθετο άξονα πάνω στην εκλειπτική. Η σταθερή κλίση, αυτή της γης, προκαλεί αλλαγές στη γωνία που σχηματίζει μια δέσμη φωτός με ένα συγκεκριμένο σημείο της, κατά τη διάρκεια του έτους, τη λεγόμενη γωνία του ήλιου. Η πιο έντονη ηλιακή ακτινοβολία εμφανίζεται όταν οι ακτίνες του ήλιου κτυπούν τη γη κατά την μεγαλύτερη γωνία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Καθώς η γωνία του ήλιου μειώνεται , η δέσμη φωτός απλώνεται σε ευρύτερη περιοχή κι έτσι η ένταση της ελαττώνεται. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η γη έχει κλίση προς τον ήλιο αποδίδοντας υψηλές γωνίες ηλίου. Ενώ το χειμώνα, η γη είναι προσανατολισμένη μακριά από τον ήλιο δημιουργώντας μικρές γωνίες ηλίου.



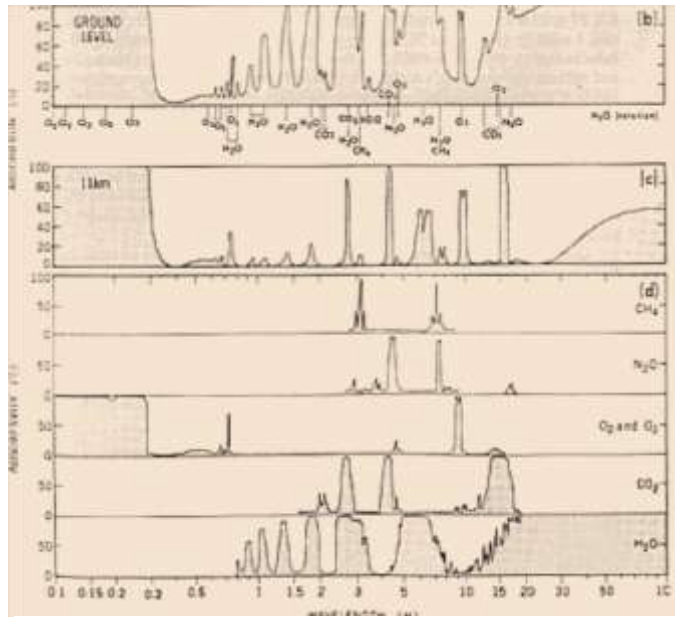
Σχήμα 2.2 Ο άξονας της γης σχηματίζει γωνία 23.5° με τον κάθετο άξονα. (www.google.com)



Σχήμα 2.3 Η δέσμη φωτός είναι απλωμένη κατά τη διάρκεια του χειμώνα (www.google.com)

Γ) Από την εκάστοτε διαδρομή της ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα. Η ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διέλευση της μέσα από την ατμόσφαιρα εξασθενεί λόγω απορρόφησης και σκέδασης. Οι δυο διαδικασίες περιγράφονται αναλυτικά πιο κάτω.

Απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας εξαιτίας της απορρόφησης οφείλεται στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας κυρίως σε θερμότητα. Η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τον αέρα στη ατμόσφαιρα αποτελεί την κύρια διεργασία που καθορίζει το κλίμα στη γη και τις διεργασίες που συνδέονται με την ατμοσφαιρική χημεία. Στο σχήμα 2.4 φαίνεται ότι το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης παρουσιάζει πολυάριθμες γραμμές και ζώνες απορρόφησης κυρίως στην περιοχή του υπεριώδους και του υπέρυθρου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην απορρόφηση της ακτινοβολίας, από συστατικά της ατμόσφαιρας, με μήκη κύματος στο υπέρυθρο και το υπεριώδες. Τα πιο σημαντικά αέρια της ατμόσφαιρας για απορρόφηση είναι το οξυγόνο (O_2), το όζον (O_3), οι υδρατμοί (H_2O) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Άλλα ατμοσφαιρικά αέρια που απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία είναι διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και το μεθάνιο (CH_4) όπως επίσης και ο αιωρούμενος κονιορτός χωρίς όμως φασματική προτίμηση.



Σχήμα 2.4 Απορρόφηση ακτινοβολίας από αέρια στην ατμόσφαιρα (Iqbal, 1983)

Από το σχήμα παρατηρούμε:

- **Οξυγόνο:** Οι ζώνες απορρόφησης της ακτινοβολίας εμφανίζονται λίγο στο ορατό και υπέρυθρο ενώ πιο έντονες στο υπεριώδες από 0,1μm έως 0,3μm
- **Όζον:** Το όζον παρουσιάζει μεγάλη απορροφητική ικανότητα στο υπεριώδες τμήμα του φάσματος (0,2 με 0,3 μm) με απόλυτο μέγιστο απορρόφησης στα 255nm. Στο ορατό φάσμα παρατηρείται μια μικρή ζώνη απορρόφησης μεταξύ 0,41μm – 0,8μm. Στο υπέρυθρο φάσμα οι περισσότερες ζώνες απορρόφησης άλλων αερίων (CO_2 και H_2O) με μια σημαντική μόνο στενή περιοχή απορρόφησης μεταξύ 9μm-10μm.
- **Διοξείδιο του άνθρακα:** Οι ζώνες απορρόφησης του εντοπίζονται μόνο στην περιοχή του υπέρυθρου στις περιοχές 1μm-2μm, 2,05μm-2,7μm, 4,3μm-12,9μm, και 12,9μm-17,1μm. Η ισχυρότερη ζώνη απορρόφησης παρατηρείται στο μήκος κύματος των 4,3 μm. Όμως μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή των 12,9μm-17,1μm γιατί βρίσκεται στο μέγιστο της θερμικής εκπομπής της ατμόσφαιρας αλλά και επειδή είναι μια ευρεία περιοχή.
- **Υδρατμοί:** Οι υδρατμοί παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, όχι μόνο επειδή η ποσότητα τους είναι σημαντική κι εύκολα

μεταβλητή αλλά κι επειδή παρουσιάζουν πολλές και εκτεταμένες ζώνες απορρόφησης, κυρίως στο υπέρυθρο φάσμα. Οι υδρατμοί παρουσιάζουν , όπως φαίνεται και στο σχήμα, ολική απορρόφηση στο υπέρυθρο τμήμα.

Σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας: Η ατμοσφαιρική σκέδαση οφείλεται στην αλληλεπίδραση (ανάκλαση, περίθλαση, διάθλαση) των φωτονίων με τα μόρια του αέρα και τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα. Κατά τη σκέδαση έχουμε εξασθένηση της ακτινοβολίας λόγω της μεταβολής της διεύθυνσης κίνησης των φωτονίων, χωρίς να μεταβληθεί η ενέργεια τους. Αποτέλεσμα της σκέδασης είναι ότι η ενέργεια της ακτινοβολίας που έρχεται στην επιφάνεια της γης είναι μικρότερη από αυτή που προσπίπτει στα όρια της ατμόσφαιρας.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διέλευση της μέσα από την ατμόσφαιρα οφείλεται σε :

- Απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας, στην ανώτερη ατμόσφαιρα, από το Όζον και το Οξυγόνο
- Απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας κυρίως από τους υδρατμούς και δευτερευόντως από το CO₂ και O₃
- Σκέδαση Rayleigh υπό των μορίων των αερίων της ατμόσφαιρας και των υδρατμών
- Απορρόφηση και σκέδαση από τα ατμοσφαιρικά αιωρήματα. (Τ.Ι Μακρογιάννης)

2.5 Ηλιακή γεωμετρία

Η ηλιακή γεωμετρία αναφέρεται στη μελέτη της θέσης του ήλιου, σε σχέση με το δεδομένο σημείο κατά ορισμένο χρονικό διάστημα. Η κατανόηση της ηλιακής γεωμετρίας αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση, για την ερμηνεία των κλιματικών συνθηκών, τον υπολογισμό της ηλιακής πρόσπτωσης, τον προσδιορισμό της ηλιακής πρόσβασης και το σχεδιασμό ηλιοπροστασίας.

Η ηλιακή γεωμετρία συνδέεται με τις δύο κύριες κινήσεις της γης. Την ημερήσια περιστροφή , γύρω από τον άξονα Β-Ν από τα δυτικά προς τα ανατολικά που διαρκεί 24 ώρες και την ετήσια κίνηση γύρω από τον ήλιο, που γίνεται με μέση ωριαία ταχύτητα 106.000km/h και διαρκεί 365 μέρες , 5 ώρες, 48 λεπτά και 46 δευτερόλεπτα. Το διάστημα αυτό λέγεται έτος.

Η γη κινείται γύρω από τον ήλιο σε ελλειπτική τροχιά, με τον ήλιο να βρίσκεται σε μία από τις εστίες. Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης γης-ήλιου. Η μέση απόσταση γης-ήλιου r_0 , καλείται αστρονομική μονάδα (AU) και είναι ίση με: $1AU=1.496 \times 10^8$ km. Η γη βρίσκεται σε απόσταση μιας αστρονομικής μονάδας περίπου στις 4 Απριλίου και 5 Οκτωβρίου. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ γης-ήλιου καλείται περιήλιο, και είναι ίση με 0.983 AU. Η γη βρίσκεται στο περιήλιο στις 3 Ιανουαρίου. Η μέγιστη απόσταση καλείται αφήλιο, είναι ίση με 1.017 AU και παρατηρείται στις 4 Ιουλίου (<http://www.pveducation.org/>).

Τώρα μπορούμε να προσδιορίσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την ηλιακή σταθερά που αναφέρθηκε παραπάνω. Όπως είπαμε, δεχόμαστε την ηλιακή σταθερά σαν μια σταθερή τιμή ίση με $G_{sc}=1367$ W/m², όμως αν λάβουμε υπόψη την απόσταση γης-ήλιου που μεταβάλλεται, καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση , που υπολογίζει τη ροή της ηλιακής ακτινοβολίας που

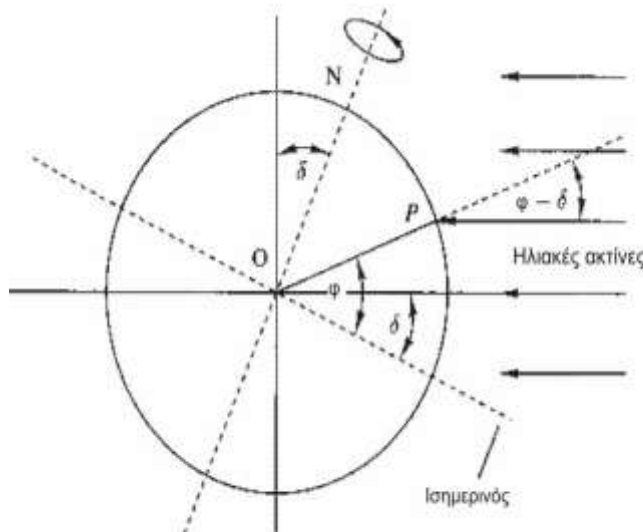
προσπίπτει στην μοναδιαία επιφάνεια κάθετη στις ακτίνες του ήλιου στο όριο της ατμόσφαιρας, για κάθε μέρα του έτους ξεχωριστά.

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.0033 \cos \frac{360n}{365} \right] \text{ όπου } n \text{ οι μέρες του έτους } n = 1, 2, 3, \dots, 365 \text{ (Εξ. 2.10)}$$

(Iqbal, 1983)

2.5.1 Απόκλιση του ήλιου δ

Απόκλιση του ήλιου καλείται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει το



Σχήμα 2.5 Απόκλιση ηλίου (Iqbal, 1983)

κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, στο επίπεδο του ισημερινού. Έτσι η γωνία μεταξύ του άξονα B-N και των ηλιακών ακτίνων μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους. Οι τιμές απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο.

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{360(284+n)}{365} \right) \text{ (Εξ. 2.11)}$$

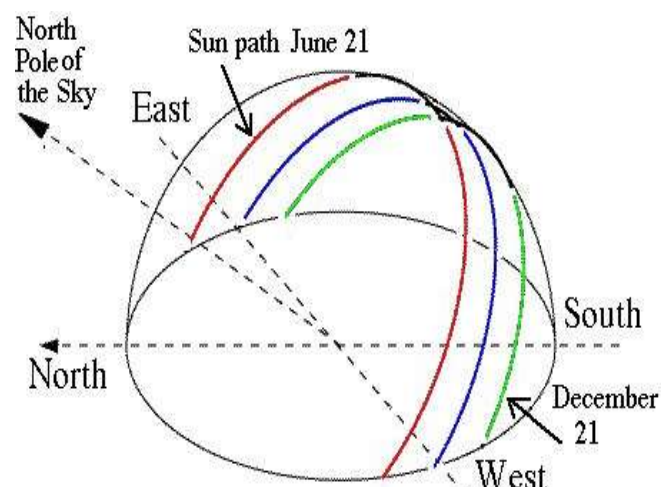
Όπου $n=1, 2, 3, \dots, 365$ μέρες του χρόνου.

- Στις 21/12 (χειμερινό ηλιοστάσιο) παίρνει την ελάχιστη τιμή: $\delta = -23.45^\circ$
- Στις 21/6 (θερινό ηλιοστάσιο)

Παίρνει τη μέγιστη τιμή: $\delta = 23.45^\circ$.

- Κατά την φθινοπωρινή και εαρινή ισημερία, η τιμή γίνεται: $\delta = 0$.

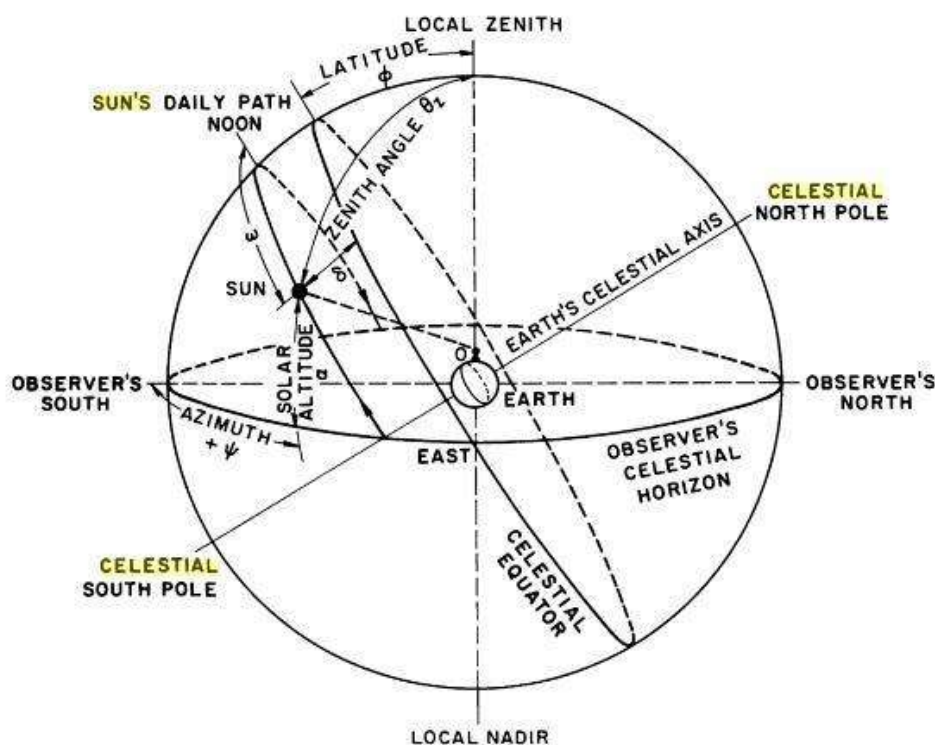
Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά την διάρκεια του έτους είναι οι κυκλικές τροχιές που διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι. Έτσι έχουμε νωρίτερα την ανατολή και αργότερη τη δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ το χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο. Παράλληλα διαμορφώνονται οι αντίστοιχες μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στις εποχές του έτους.



Σχήμα 2.6 Τροχιά του ήλιου όπως φαίνεται στον ορίζοντα (<http://www-istp.gsfc.nasa.gov/stargaze/Secliptc.htm>)

2.6 Θέση του ήλιου σε σχέση με οριζόντια επίπεδα

Για να υπολογίσουμε το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει σε ένα οριζόντιο επίπεδο πάνω στη γη, είναι απαραίτητο να γράψουμε κάτω τις τριγωνομετρικές σχέσεις μεταξύ της θέσης του ήλιου στον ουρανό και στις συντεταγμένες της γης, όπου βρίσκεται η επιφάνεια. Μπορούμε να περιγράψουμε ένα παρατηρητή πάνω στη γη, ζωγραφίζοντας ακόμα μια ουράνια σφαίρα με τη γη στο κέντρο της, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Ουράνια σφαίρα και ηλιακές συντεταγμένες σε σχέση με επίγειο παρατηρητή (Iqbal, 1983)

Για κάθε δεδομένη στιγμή ο παρατηρητής που βρίσκεται στη επιφάνεια της γης, έχει την αντίστοιχη θέση στην ουράνια σφαίρα το ζενίθ του παρατηρητή. Το ακριβώς απέναντι σημείο ονομάζεται ναδίρ. Ο ορίζοντας του παρατηρητή είναι ο μεγάλος κύκλος στην ουράνια σφαίρα, όπου το επίπεδό της περνά ανάμεσα από το κέντρο τη γης και είναι κάθετο στη γραμμή που ενώνει το κέντρο της γης και το ζενίθ.

Η ζενιθιακή γωνία θ_z (καλείται και ζενιθιακή απόσταση) είναι η γωνία μεταξύ του τοπικού ζενίθ και της γραμμής που ενώνει τον παρατηρητή με τον ήλιο. Είναι μια γωνία μεταξύ 0° και 90° . Το ύψος του ήλιου α (ανύψωση ήλιου) είναι η γωνία που σχηματίζει ο ήλιος με τον ορίζοντα και βρίσκεται μεταξύ 0° και 90° . Το ύψος ήλιου α είναι η συμπληρωματική γωνιά της ζενιθιακής απόστασης.

Το αζιμούθιο ψ είναι η γωνιά που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο, ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ήλιου και στον τοπικό μεσημβρινό βορρά- νότου. Ο όρος προέρχεται από την αραβική λέξη *as summut*, που σημαίνει κατεύθυνση. Στα ανατολικά

είναι θετικό ενώ στα δυτικά αρνητικό και μεταβάλλεται από 0° μέχρι 180° . Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το ύψος και το αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό. Το αζιμούθιο για νότιους προσανατολισμούς είναι 0.

Η ωριαία γωνία ω μετριέται στον ουράνιο πόλο, και είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μεσημβρινού του παρατηρητή και στον μεσημβρινό του ήλιου. Με άλλα λόγια είναι η γωνιακή απόσταση του ήλιου από την ηλιακή μεσημβρία λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονά της. Στην ηλιακή μεσημβρία $\omega=0^\circ$, ενώ κάθε ώρα η ω μεταβάλλεται κατά 15° . Τις πρωινές ώρες η ω είναι θετική (+) και κατά τις απογευματινές γίνεται αρνητική (-).

Για δεδομένο γεωγραφικό τόπο, χωρίς την αλληλεπίδραση της ατμόσφαιρας, οι τριγωνομετρικές σχέσεις μεταξύ του ήλιου και μιας οριζόντιας επιφάνειας είναι γνωστές. Τις παραθέτουμε πιο κάτω:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega = \sin a \quad (\text{εξ. 2.12})$$

και
$$\cos\psi = \frac{\sin a \sin\varphi - \sin\delta}{\cos a \cos\varphi} \quad (\text{εξ. 2.13a})$$

$$0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ, \cos\psi \geq 0$$

$$90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ, \cos\psi \leq 0$$

$$\sin\psi = \frac{\cos\delta \sin\omega}{\cos a} \quad (\text{εξ. 2.13β})$$

με φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου

Η εξίσωση (2.12) μπορεί να λυθεί ως προς την ωριαία γωνία ω . Για την ανατολή του ήλιου έχουμε $\theta_z=90^\circ$ και η $\omega=\omega_s$.

$$\cos\omega_s = -\frac{\sin\varphi \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta} \quad (\text{εξ. 2.14})$$

ή

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (\text{εξ. 2.15})$$

Η ωριαία γωνία της ανατολής είναι ίση με την ωριαία γωνία της δύσης με μόνη διαφορά το πρόσημο. Η διάρκεια μιας μέρας είναι ίση με $2\omega_s$, εκφρασμένη σε ώρες είναι ίση με:

$$N_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (\text{εξ. 2.16})$$

Ας αναλύσουμε λίγο την εξίσωση (1.6.5). Στην περιοχή των πόλων, κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ο ήλιος δεν ανατέλλει, ακολούθως δεν υπάρχει διάρκεια ημέρας άρα $\cos\omega_s > +1$. Παρομοίως, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού δεν υπάρχει συνεχής μέρα για περίπου 6 μήνες κι έτσι δεν υπάρχει ωριαία γωνία ανατολής. Στην περιοχή του ισημερινού, τώρα, έχουμε $\varphi=0$. Άρα $\omega_s = \pi/2$ και η διάρκεια της ημέρας δεν εξαρτάται από την απόκλιση του

ήλιου, είναι πάντα ίση με 12 ώρες. Τέλος, την εποχή των ισημεριών, $\delta=0$, άρα $\omega_s = \pi/2$ και η διάρκεια της ημέρας είναι ανεξάρτητη του γεωγραφικού πλάτους και είναι ίση με 12 ώρες. (Iqbal, 1983).

2.7 Σχετική θέση του ήλιου με κεκλιμένα επίπεδα

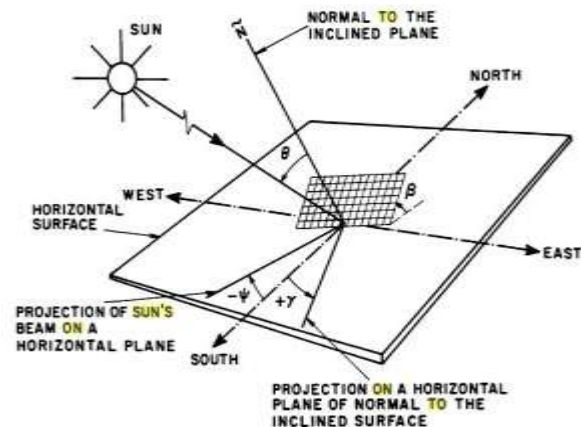
Για να περιγράψουμε τη σχετική θέση ήλιου και κεκλιμένου επιπέδου, είναι απαραίτητο να περιγράψουμε την κλίση του επιπέδου σε σχέση με το οριζόντιο (ή κάθετο) και τον προσανατολισμό του σε σχέση με τον τοπικό μεσημβρινό.

Από το σχήμα έχουμε:

β : η κλίση του επιπέδου σε σχέση με την οριζόντια θέση

ψ : είναι το αζιμούθιο της επιφάνειας, είναι η απόκλιση της καθέτου στο επίπεδο σε σχέση με τον τοπικό μεσημβρινό, με θετικό προσανατολισμό προς την ανατολή

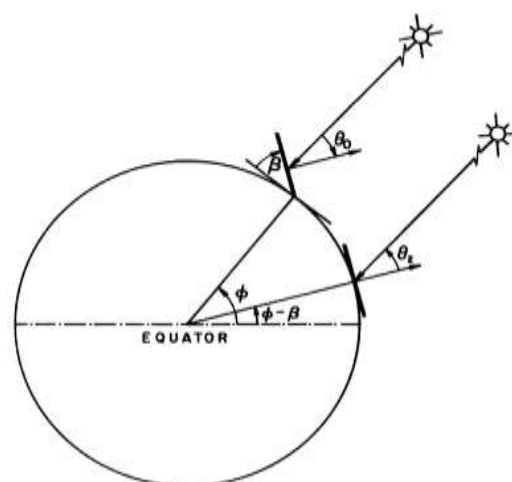
θ : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κάθετο στο επίπεδο και την ευθεία που ενώνει τον ήλιο με τη γη.



Σχήμα 2.8 Σχετική θέση του ήλιου σε κεκλιμένο επίπεδο. (Iqbal, 1983)

2.7.1 Επιφάνειες τοποθετημένες στον ισημερινό

Ας πάρουμε για θ_0 , τη γωνία πρόσπτωσης σε μια επιφάνεια που βρίσκεται στον ισημερινό. Το σχήμα 2.9 απεικονίζει δυο επιφάνειες τοποθετημένες σε γεωγραφικά πλάτη φ και $\varphi - \beta$. Η επιφάνεια σε γ.π. φ είναι υπό γωνία β , ενώ η άλλη είναι οριζόντια. Σύμφωνα με Liu and Jordan, μια επιφάνεια σε γ.π. φ με κλίση β από το οριζόντιο, προς τον ισημερινό είναι παράλληλο σε οριζόντιο επίπεδο που βρίσκεται σε γ.π. $\varphi - \beta$. Ακολούθως έχουμε ότι, θ_0 σε γ.π. φ , είναι ίση με τη θ_z σε γ.π. $\varphi - \beta$. Από την εξίσωση (2.12) η γωνία πρόσπτωσης για επιφάνεια προς τον ισημερινό μπορεί να γραφτεί ως εξής:



Σχήμα 2.9. Σχετική γωνία πρόσπτωσης για διαφορετικά φ (Iqbal, 1983)

$$\cos\theta_0 = \sin\delta \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cos(\varphi - \beta) \cos\omega \quad (\text{εξ. 2.17})$$

και αντίστοιχα

$$\cos \omega'_s = -\frac{\sin(\varphi-\beta)\sin\delta}{\cos(\varphi-\beta)\cos\delta} \quad (\text{εξ. 2.18})$$

με ω'_s η ωριαία γωνία του ήλιου, κατά την ανατολή, για κεκλιμένη επιφάνεια προσανατολισμένη στον ισημερινό.

2.7.2 Επιφάνειες προσανατολισμένες κατά γωνία γ .

Για επιφάνειες που έχουν προσανατολισμό, σε οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση εκτός του ισημερινού, δόθηκαν οι τριγωνομετρικές τους σχέσεις από Benrod and Bock, Kondratyev Coffari .

$$\begin{aligned} \cos\theta = & (\sin\varphi \cos\beta - \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma) \sin\delta \\ & + (\cos\varphi \cos\beta + \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma) \cos\delta \cos\omega \\ & + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (\text{εξ. 2.19α})$$

ή

$$\cos\theta = \cos\beta \cos\theta_z + \sin\beta \sin\theta_z \cos(\psi-\gamma) \quad (\text{εξ. 2.20β})$$

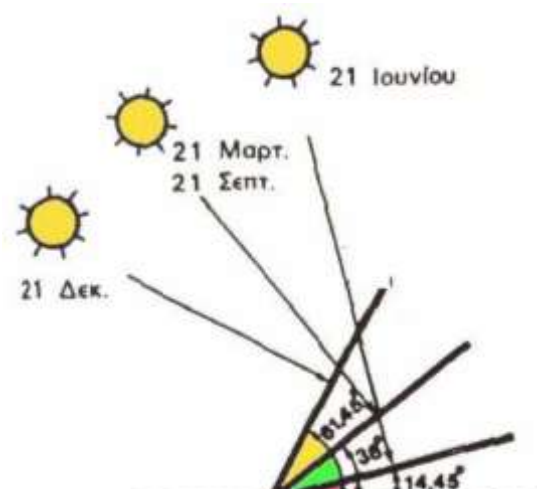
Για νότιους προσανατολισμούς, $\gamma=0^\circ$, η εξίσωση (2.19α) μεταπίπτει στην εξίσωση (2.17). Για $\beta=90^\circ$, κάθετη επιφάνεια, τότε έχουμε:

$$\cos\theta = -\cos\varphi \cos\gamma \sin\delta + \sin\varphi \cos\gamma \cos\delta \cos\omega + \cos\delta \sin\gamma \sin\omega \quad (\text{εξ. 2.21})$$

(Coffari, 1977)

2.8 Γενικοί κανόνες για τη συλλογή της μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας

Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη για τη διάρκεια του έτους, είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, και η αζιμούθια γωνία πρέπει να είναι μηδέν, δηλαδή ο συλλέκτης να είναι προσανατολισμένος στο νότο. Λόγω όμως της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή. Έτσι αφού η γωνία ύψους του ήλιου, κατά τη θερινή περίοδο είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι κατά την χειμερινή, τότε η βέλτιστη γωνία του συλλέκτη πρέπει να είναι 10° - 15° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος. Ενώ για τη χειμερινή περίοδο που συμβαίνει το αντίθετο, η



Σχήμα 2.10 βέλτιστη γωνία συλλέκτη. (<http://www.tm.teiher.gr>)

κλίση του συλλέκτη πρέπει να είναι 10° - 15° μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος.

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες, από ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου. Έτσι όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσό της ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος που δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό.

Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό ενώ η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, για ολόκληρο το έτος είναι περίπου 10 - 15° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος. Έτσι ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα τη διάχυτη ακτινοβολία.

Γενικά έχουμε μέγιστη ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας, για το βόρειο ημισφαίριο, στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) και αντίστοιχα ελάχιστη ισχύ στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Όμως, στις κεκλιμένες επιφάνειες, με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος, η μέγιστη τιμή της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι στα ηλιακά μεσημέρια των ισημεριών, 21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου, αφού τότε δέχονται κάθετα τις ακτίνες του ήλιου.

2.9 Ανακεφαλαίωση

Η ακτινοβολία που δέχεται ο πλανήτης γη από τον ήλιο ορίζεται σαν η ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατά την πορεία της από το διάστημα μέχρι τη γη μπορεί να απορροφηθεί ή να ανακλαστεί, κι αυτό εξαρτάται από την σύσταση της ατμόσφαιρας της γης. Επίσης διέπεται από κάποιους νόμους που μπορούν να επεξηγήσουν τη φύση της.

Το σημαντικότερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη απευθείας από τον ήλιο είναι αυτή που ονομάζουμε άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Αλλά λόγω, κυρίως των νεφών η ηλιακή ακτινοβολία, διαχέεται από όλα τα μέρη του ουρανού, κι έτσι έχουμε τη διάχυτη ακτινοβολία. Το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης δίνουν την ολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στα όρια της γης μέσω της σχέσης $O=A\sigma\eta Z+\Delta$. Όπου Z ζενιθιακή γωνία του ηλίου.

Η θέση του ήλιου περιγράφεται από το κεφάλαιο της ηλιακής γεωμετρίας. Η γη κινείται γύρω από τον άξονα B-N με μια περίοδο περίπου 24 ωρών, κι έτσι έχουμε τη δημιουργία μέρας νύχτας. Επίσης κινείται γύρω από τον ήλιο, σε μια εκλειπτική τροχιά έχοντας τον ήλιο σε μια από τις εστίες της. Η συμπλήρωση μιας τέτοιας στροφής γύρω από τον ήλιο, σηματοδοτεί και το τέλος ενός έτους.

Οι κλιματολογικές συνθήκες, που μεταβάλλονται κάθε εποχή μπορούν να εξηγηθούν από την απόκλιση του ήλιου δ . Απόκλιση του ήλιου καλείται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, στο επίπεδο του ισημερινού. Έτσι έχουμε μεταβολή του δ , για κάθε διαφορετική μέρα, γι αυτό και ο ήλιος

εμφανίζεται πιο ψηλά στον ουρανό το καλοκαίρι ενώ το χειμώνα το συναντούμε σε χαμηλότερα επίπεδα.

Μελετώντας τη θέση του ήλιου , ορίσαμε τις ηλιακές συντεταγμένες όπως είναι το ζενίθ και το ναδίρ. Ορίσαμε τη ζενιθιακή γωνία Θ_z , την ανύψωση του ήλιου α , το αζιμούθιο ψ και την ωριαία γωνία ω που μας βοηθάει να βρούμε τη διάρκεια ηλιοφάνειας N_d σε μια συγκεκριμένη μέρα του έτους.

Αξιοποιώντας όλα μας τα δεδομένα μέχρι τώρα οδηγηθήκαμε σε ένα γενικό κανόνα, κατά τον οποίο επισημαίνεται ότι πρέπει να μεταβάλουμε τη γωνία κλίσης ενός συλλέκτη για μέγιστη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας. Σημειώνεται ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η γωνία πρέπει να είναι πιο μικρή από το γεωγραφικό πλάτος, ενώ το χειμώνα μεγαλύτερη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΜΕΣΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Η ρύπανση του περιβάλλοντος, εξαιτίας της μεγάλης τεχνολογικής προόδου και της ραγδαίας βιομηχανικής ανάπτυξης, μόνο επικίνδυνη μπορεί να χαρακτηριστεί για τη γήινη βιόσφαιρα. Τα τελευταία χρόνια, οι προσπάθειες για τη διάσωση του φυσικού περιβάλλοντος, έχουν οδηγήσει στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με πρώτη στη λίστα την ηλιακή. Η ηλιακή ενέργεια είναι καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια και ανανεώσιμη. Η ηλιακή ακτινοβολία δεν ελέγχεται από κανένα και είναι ένας ανεξάντλητος εγχώριος ενεργειακός πόρος, που παρέχει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία. Για τη δέσμευση της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούνται θερμικά ηλιακά συστήματα, παθητικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά.

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άμεση παραγωγή θερμότητας, με ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα. Αν η παραγόμενη θερμότητα είναι υψηλής θερμοκρασίας, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού και στη συνέχεια μηχανικής ενέργειας.

Με τη σειρά της η μηχανική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Σε τέτοια περίπτωση αναφερόμαστε σε θερμική παραγωγή ηλεκτρισμού από την ηλιακή ενέργεια. Από την ηλιακή ακτινοβολία όμως, μπορεί άμεσα να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια, με την εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα καταπιαστούμε με τα πιο πάνω. Θα αναφερθεί ο τρόπος λειτουργίας όλων αυτών των συστημάτων, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους καθώς επίσης θα παραθέτουν παραδείγματα της μέχρι τώρα χρήσης τους. Θα διαχωρίσουμε τις εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας σε α) θερμικές και θερμικές ηλεκτρικές εφαρμογές και β) ηλεκτρικές ή φωτοβολταϊκές εφαρμογές και θα αναλύσουμε το μηχανισμό τους. Τέλος, θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μια αναφορά στο γενικό νομοθετικό πλαίσιο, χωρίς πολλές λεπτομέρειες, αφού δεν εμπίπτει στο θέμα της εργασίας.

3.2 Θερμικά ηλιακά συστήματα

Οι θερμικές εφαρμογές της ηλιακής ενέργειας διακρίνονται σε εφαρμογές χαμηλής, μέσης και υψηλής θερμοκρασίας. Οι εφαρμογές χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας περιλαμβάνουν τα ενεργητικά και παθητικά συστήματα παραγωγής θερμότητας από τον ήλιο.

Ενεργητικά, ονομάζονται τα συστήματα ή οι ηλιακές εγκαταστάσεις στα οποία η μεταφορά της συλλεγόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, πραγματοποιείται με κυκλοφορία του θερμικού υγρού με τη βοήθεια αντλίας ή ανεμιστήρα. Δηλαδή για τη λειτουργία αυτών των συστημάτων απαιτείται επιπλέον ενέργεια, κυρίως ηλεκτρισμός.

Παθητικά συστήματα, είναι αυτά που λειτουργούν αυτόνομα και η ενέργεια κυκλοφορεί με φυσική ροή, όπως η ελεύθερη συναγωγή η οποία εξαρτάται μόνο από τις διαφορές θερμοκρασίας και πυκνότητας που δημιουργούνται σε ορισμένα σημεία του συστήματος.

Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής θερμότητας αποτελείται κυρίως από ένα σύστημα συλλογής και μετατροπής της θερμικής ακτινοβολίας σε θερμότητα, κοινώς αυτό που αποκαλούμε συλλέκτη. Ένα σύστημα αποθήκευσης, όπως είναι η λεκάνη αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής ζεστού νερού. Ένα σύστημα απόδοσης της αποθηκευμένης ενέργειας για χρήση, παράδειγμα οι σωληνώσεις που διοχετεύουν το ζεστό νερό και τέλος ένα σύστημα ελέγχου, αισθητήρια θερμοκρασίας, μηχανισμοί ασφάλειας του συστήματος. (<http://www.cres.gr>)

3.2.1 Ηλιακά συστήματα Ζεστού νερού χρήσης (Z.N.X.)

Σε πολλές περιοχές του πλανήτη, τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού, γνωστά και ως ηλιακά συστήματα Z.N.X. (Ζεστού νερού χρήσης), μπορούν να καλύψουν από 50 έως 100% της ζήτησης ζεστού νερού στις κατοικίες. Αποτελούνται από δύο βασικά μέρη: τον συλλέκτη και το δοχείο αποθήκευσης. Ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, το μέγεθός του, τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής κ.λ.π. μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διαφορετικού τύπου θερμικά ηλιακά συστήματα. Η ποικιλία που παρουσιάζουν οι διατάξεις οφείλεται κυρίως στους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους τα συστήματα αυτά προστατεύονται από τον παγετό και στον τρόπο που επιτυγχάνεται η κυκλοφορία του ζεστού νερού. Μπορούν να διακριθούν σε ανοικτού (άμεσα) ή κλειστού (έμμεσα) κύκλου, παθητικά (με φυσική κυκλοφορία) ή ενεργητικά (με αντλίες για κυκλοφορία του νερού). Σχεδόν όλα τα ηλιακά συστήματα απαιτούν και βοηθητική πηγή θερμότητας, σε περιόδους με μικρή ηλιακή ακτινοβολία σχετικά με τη ζήτηση. (<http://www.mcit.gov.cy/>)

Τα παθητικά συστήματα ή συστήματα φυσικής κυκλοφορίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- τους συμπαγείς θερμαντήρες νερού, ή αλλιώς τα ολοκληρωμένα συστήματα συλλέκτη-αποθήκευσης που αποτελούνται από μια ή περισσότερες δεξαμενές αποθήκευσης και τοποθετούνται σε ένα μονωμένο περίβλημα με τη διαφανή πλευρά προς τον ήλιο.
- Τα θερμοσιμφωνικά συστήματα, τα οποία στηρίζονται στη φυσική κυκλοφορία του νερού στους συλλέκτες και τη δεξαμενή, η οποία βρίσκεται επάνω από το συλλέκτη. Καθώς το νερό θερμαίνεται στον ηλιακό συλλέκτη γίνεται ελαφρύτερο και ανέρχεται με φυσικό τρόπο προς τη δεξαμενή αποθήκευσης ενώ το ψυχρότερο νερό της δεξαμενής ρέει μέσω των σωληνώσεων προς το κατώτερο σημείο του συλλέκτη δημιουργώντας έτσι κυκλοφορία σε όλο το σύστημα.

Τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας χρησιμοποιούν αντλίες, βαλβίδες και συστήματα ελέγχου για να κυκλοφορήσουν το νερό ή άλλα ρευστά μεταφοράς της θερμότητας μέσα στους συλλέκτες. Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων συστημάτων:

- Τα συστήματα ανοικτού βρόχου, τα οποία χρησιμοποιούν αντλίες για να κυκλοφορήσουν το νερό χρήσης στους συλλέκτες

- Το συστήματα κλειστού βρόχου, που αντλούν το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, συνήθως αυτό είναι ένα μίγμα γλυκόλης και νερού, μέσα στους συλλέκτες. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω εναλλαγών θερμότητας από το ρευστό στο νερό που αποθηκεύεται στις δεξαμενές.

Υπάρχουν διαφοροποιήσεις και στους συλλέκτες κάθε συστήματος. Οι συλλέκτες μπορεί να είναι επίπεδοι, χωρίς κάλυμμα – πλαστικοί και μπορεί να είναι συλλέκτες κενού-σωλήνες κενού.

- Επίπεδοι συλλέκτες. Είναι η πιο συνηθισμένη μορφή συλλεκτών. Διαθέτουν συνήθως επιλεκτική ή ημί-επιλεκτική επιφάνεια ή επιφάνεια με μαύρη μπογιά. Η επιλεκτική επιφάνεια διακρίνεται από μεγάλη απορροφητικότητα στα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας και από ελάχιστη ανάκλαση στα μεγαλύτερα μήκη κύματος. Οι συλλέκτες με επιλεκτική βαφή μπορεί να έχουν μέχρι και 30% μεγαλύτερη απόδοση, σε σχέση με τους επίπεδους συλλέκτες με απλή μαύρη βαφή, λόγω της μείωσης των απωλειών λόγω ανάκλασης. Είναι αυτοί κυρίως που χρησιμοποιούνται για ζεστό νερό χρήσης, για θέρμανση του χώρου, για ηλιακό κλιματισμό.
- Συλλέκτες χωρίς κάλυμμα-πλαστικοί. Είναι η απλούστερη μορφή των συλλεκτών. Αποτελούνται μόνο από τον απορροφητή ο οποίος αναπτύσσει θερμοκρασίες 5-15 °C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Χρησιμοποιείται μόνο σε κολυμβητικές δεξαμενές, όπου η επιθυμητή θερμοκρασία είναι σχετικά χαμηλή (18-25 °C). Το νερό της πισίνας κυκλοφορεί μέσα στον ηλιακό συλλέκτη, θερμαίνεται από τον ήλιο και διοχετεύεται απευθείας στην πισίνα.
- Συλλέκτες ή σωλήνες κενού. Κατά την κατασκευή του συλλέκτη αυτού, γίνεται απορρόφηση του αέρα μεταξύ των τοιχωμάτων των δύο σωλήνων. Έτσι μειώνονται στο ελάχιστο οι απώλειες ενέργειας. Είναι δυνατόν να αναπτύξουν θερμοκρασίες πάνω από 120 °C από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, γι αυτό και δεν συνιστώνται σε οικιακές εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται κυρίως για ηλιακό κλιματισμό, για βιομηχανικές εφαρμογές (αποστείρωση) και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (<http://www.mcit.gov.cy/>)

3.2.2 Ηλιακός κλιματισμός

Ο ηλιακός κλιματισμός αποτελεί μια νέα και αναπτυσσόμενη τεχνολογία, σε σύγκριση με τους άλλους τομείς εφαρμογής της ηλιακής ενέργειας. Υψηλής απόδοσης ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν με ζεστό νερό ειδικούς ψύκτες νερού οι οποίοι ψύχουν το νερό για διανομή στα κτήρια προς κλιματισμό – ψύξη.

Ειδικά στα μεσογειακά κλίματα, οι τεχνολογίες του ηλιακού κλιματισμού μπορούν να χαρακτηριστούν πολύ συμφέρουσες. Ειδικά το καλοκαίρι που οι απαιτήσεις σε ψύξη ενός κτηρίου είναι υψηλές, την ίδια περίοδο έχουμε και την υψηλότερη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία.

Τα συστήματα ηλιακού κλιματισμού που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Κλειστά συστήματα: αυτά είναι θερμοκίνητοι ψύκτες που παρέχουν ψυχρό νερό, το οποίο είτε χρησιμοποιείται στις κεντρικές κλιματιστικές μονάδες για να παρέχει

πλήρως κλιματισμένο αέρα (ψυχρό, ξηρό), είτε διανέμεται μέσω ενός δικτύου ψυχρού νερού σε καθορισμένους χώρους για να ενεργοποιήσει τις τοπικές μονάδες των δωματίων. Ψύκτες κλειστού συστήματος είναι οι: ψύκτες απορρόφησης και οι ψύκτες προσρόφησης.

Οι ψύκτες απορρόφησης είναι οι πιο διαδεδομένοι ψύκτες παγκοσμίως. Η θερμική συμπίεση επιτυγχάνεται με τη χρήση υγρού διαλύματος ψυκτικού μέσου και πηγή θερμότητας, αντικαθιστώντας με αυτό τον τρόπο την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από ένα μηχανικό συμπιεστή. Για ψυχρό νερό άνω των 0°C τυπικά χρησιμοποιείται ένα υγρό διάλυμα H₂O/LiBr με το νερό ως ψυκτικό μέσο.

Στην περίπτωση των ψυκτών προσρόφησης, αντί υγρού διαλύματος, χρησιμοποιούνται στερεά πορώδη ροφητικά υλικά. Οι ψύκτες αποτελούνται από δύο χώρους ροφητικού υλικού, ένα εξατμιστή και ένα συμπηκνωτή. Ενώ το ροφητικό υλικό αναγεννάτε, στο πρώτο διαμέρισμα, χρησιμοποιώντας ζεστό νερό από εξωτερική πηγή θερμότητας (ηλιακό συλλέκτη), το ροφητικό υγρό του δεύτερου διαμερίσματος προσροφά τους υδρατμούς που εισάγονται από τον εξατμιστή. Το νερό στον εξατμιστή περνά στην αέρια φάση, θερμαινόμενο από το εξωτερικό κύκλωμα νερού.

- Ανοικτά συστήματα: χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο, σε άμεση επαφή με τον αέρα. Ο θερμοκίνητος ψυκτικός κύκλος είναι συνδυασμός εξατμιστικής ψύξης με αφύγρανση αέρα μέσω ξηραντικού/αφυγραντικού υλικού. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν υγρά ή στερεά υλικά. Ο όρος «ανοικτά» χρησιμοποιείται για να δείξει ότι το ψυκτικό μέσο απορρίπτεται από το σύστημα αφού παραχθεί η ψύξη και νέα ποσότητα ψυκτικού μέσου εισάγεται μέσω ενός ανοικτού βρόγχου. Επομένως μόνο το νερό μπορεί να παίζει το ρόλο του ψυκτικού μέσου, δεδομένου ότι υπάρχει άμεση επαφή με την ατμόσφαιρα. Η διαδεδομένη τεχνολογία που εφαρμόζεται σήμερα χρησιμοποιεί περιστρεφόμενους τροχούς αφυγραντικού υλικού, εφοδιασμένους είτε με *silica gel*, είτε με χλωριούχο λίθιο ως ροφητικό υλικό.

Χάρη στα συστήματα ηλιακής ψύξης είναι δυνατό να κλιματιστούν κτίρια μειώνοντας στο ελάχιστο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Εντούτοις, παρόλο που η ηλιακή ενέργεια παρέχεται δωρεάν, τα συστήματα ηλιακής ψύξης είναι προς το παρόν ακριβότερα από τα συμβατικά συστήματα κλιματισμού αντίστοιχης ισχύος. Επομένως, αν αποφασιστεί η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος, πρέπει να γίνει προσεκτική ανάλυση των παραμέτρων του κτηρίου που θα κλιματίζεται και να υιοθετηθούν όλα τα μέτρα που απαιτούνται για τη μείωση των ενεργειακών αναγκών. (<http://www.cres.gr>)

3.2.3 Θέρμανση χώρων

Μιλώντας για τρόπους άμεσης εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, θα ήταν παράληψη να μην αναφερθούμε πως η ηλιακή ενέργεια, με τη σωστή διαχείριση, μπορεί να πετύχει το επιθυμητό κλίμα στο σπίτι μας, ή σε οποιοδήποτε άλλο εσωτερικό χώρο. Εντός αυτών των πλαισίων εντάσσεται ο βιοκλιματικός σχεδιασμός που αποσκοπεί στην προσαρμογή των

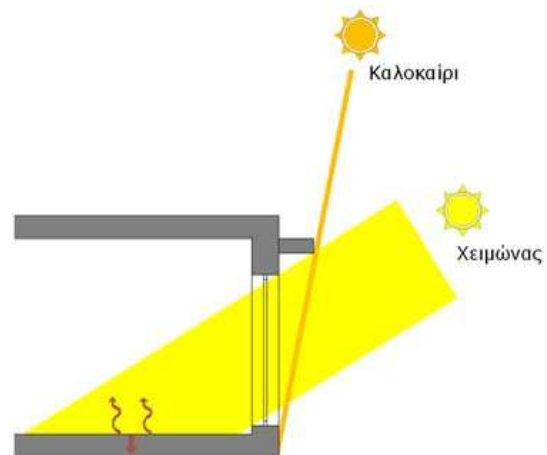
κτηρίων στο τοπικό κλίμα, διασφαλίζοντας παράλληλα συνθήκες θερμικής άνεσης στο εσωτερικό τους.

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός σχετίζεται με τη χωροθέτηση-προσανατολισμό του κτηρίου, καθώς και με το σχεδιασμό του έτσι ώστε να πετυχαίνει τις ελάχιστες απώλειες θερμότητας το χειμώνα, και το φυσικό δροσισμό το καλοκαίρι. Παράδειγμα, για το κλίμα της Ελλάδας, το καταλληλότερο σχήμα, ενός σπιτιού, είναι το επίμηκες κατά τον άξονα ανατολής-δύσης, γιατί προσφέρει μεγαλύτερη επιφάνεια προς το νότο για την συλλογή της ηλιακής θερμότητας τον χειμώνα. Επίσης το μέγεθος των ανοιγμάτων αποτελούν τον οικονομικότερο, αποδοτικότερο και απλούστερο ηλιακό συλλέκτη το χειμώνα, αρκεί να έχουν νότιο προσανατολισμό. Η διάρθρωση των εσωτερικών χώρων, η προστασία από ψυχρούς ανέμους, που επιτυγχάνεται ή με φυσικούς ή με τεχνητούς τρόπους, αν υπάρχει μόνωση ή όχι, τα υλικά που αποτελούν το κτήριο συμβάλουν στο καθορισμό του μικροκλίματος του εσωτερικού χώρου.

Για τη θέρμανση των κτηρίων, χρησιμοποιούνται τα παθητικά συστήματα που βασίζονται στη φυσική ροή της θερμικής ενέργειας, εκμεταλλεύονται τις φυσικές ιδιότητες των υλικών κτηρίων και χρησιμοποιούν τα δομικά στοιχεία του κελύφους για συλλογή και αποθήκευση της θερμότητας. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης πρέπει να έχουν νότιο προσανατολισμό, με απόκλιση έως 30° προς την ανατολή και ο χειμερινός ηλιασμός τους να είναι ανεμπόδιτος από πλευρικά εμπόδια και εξωτερικά σκίαστρα.

Τα συνηθέστερα παθητικά συστήματα είναι:

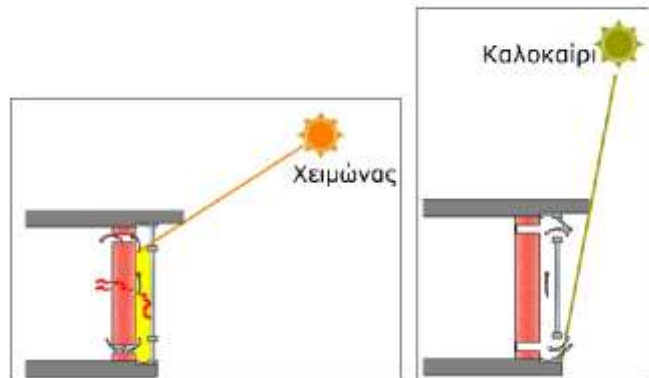
- Συστήματα άμεσου κέρδους – νότιο υαλοστάσιο. Το κτήριο λειτουργεί ως συλλέκτης, αποθήκη και διανομέας της θερμότητας. Όλα τα ανοίγματα συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία που στη συνέχεια μετατρέπεται σε θερμότητα και αποθηκεύεται στο δομικά στοιχεία του χώρου. Ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής, το σχεδιασμό του κελύφους του κτηρίου, τον προσανατολισμό, το μέγεθος και τη θέση των ανοιγμάτων, τις θερμοφυσικές ιδιότητες του διάφανου υλικού καθώς και τη θέση, το μέγεθος και το υλικό της θερμικής αποθήκης, η εξοικονόμηση ενέργειας για θέρμανση μπορεί να κυμαίνεται από 30% έως 100%. Γενικά όσο μεγαλύτερα είναι τα ανοίγματα στο νότιο προσανατολισμό και ικανοποιητική σε μέγεθος η επιφάνεια αποθήκευσης, τόσο μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση.
- Τοίχος θερμικής αποθήκευσης ή τοίχος μάζας ή ηλιακός τοίχος. Είναι η συνδυασμένη κατασκευή τοίχου και υαλοπίνακα, η οποία αποτελεί τμήμα του κτηριακού περιβάλλοντος. Ένα ηλιακός τοίχος αποτελείται από ένα τοίχο χωρίς θερμομόνωση, με νότιο προσανατολισμό, κατασκευασμένο από υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας που λειτουργεί ως αποθήκη και διανομέας της θερμότητας, και



Εικόνα 3.1. Σύστημα άμεσου κέρδους – νότιο υαλοστάσιο. (<http://www.cres.gr>)

ένα διαφανές υλικό τοποθετημένο σε ελάχιστη απόσταση 10εκ. προς την εξωτερική πλευρά, που χρησιμεύει για τη δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας.

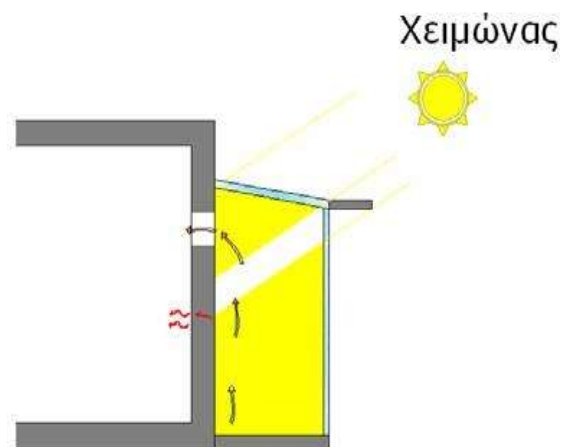
Μια παραλλαγή του συστήματος είναι ο τοίχος Trombe-Michelle. Είναι ένας τοίχος θερμικής αποθήκευσης κατασκευασμένος από υλικά τοιχοποιίας, με θυρίδες στο επάνω και κάτω τμήμα του συμπαγούς τμήματος, οπότε η μετάδοση της θερμότητας προς την πλευρά του εσωτερικού χώρου γίνεται με αγωγιμότητα και θερμοσιμφωνισμό. Ο αέρας,



Εικόνα 3.2. Τοίχος Trombe-Michelle (<http://www.cres.gr>)

που βρίσκεται μεταξύ του υαλοστασίου και του τοίχου, θερμαίνεται καθώς εφάπτεται στο θερμό τοίχο κι από τις θυρίδες που βρίσκονται στο επάνω μέρος του τοίχου εισέρχεται στον κατοικήσιμο χώρο, ενώ συγχρόνως εισέρχεται από την κάτω θυρίδα στο διάκενο ψυχρός αέρας από το εσωτερικό του κτηρίου, ο οποίος και θερμαίνεται. Με αυτό τον τρόπο αποδίδεται πρόσθετη θερμότητα στο χώρο στις περιόδους της ηλιοφάνειας και η θέρμανση του χώρου αρχίζει αμέσως με τη θέρμανση του τοίχου και συνεχίζεται έως 2-3 ώρες μετά το σκιασμό του.

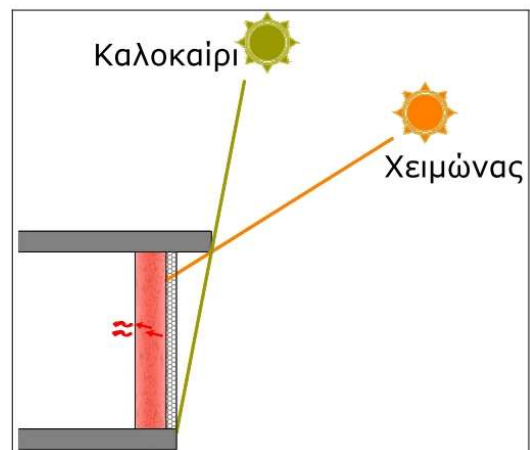
- Θερμοκήπιο ή ηλιακός χώρος. Είναι συνδυασμός παθητικού συστήματος άμεσου κέρδους και τοίχου θερμικής αποθήκευσης. Το κτήριο δηλαδή αποτελείται από δύο θερμικές ζώνες, τον ηλιακό χώρο που προσαρτάται στο κτήριο, όπου γίνεται η συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας, και τον έμμεσα θερμαινόμενο από τον ηλιακό χώρο, κύριο κατοικήσιμο χώρο. Οι δύο ζώνες χωρίζονται με συμπαγή τοίχο με θερμική μάζα, με ή χωρίς υαλοστάσια.



Εικόνα 3.3 Θερμοκήπιο – ηλιακός χώρος (<http://www.cres.gr>)

Ο χώρος του θερμοκηπίου θερμαίνεται απευθείας και λειτουργεί όπως το παθητικό σύστημα «άμεσου κέρδους». Συγχρόνως η ηλιακή ενέργεια απορροφάται από τον πίσω συμπαγή τοίχο του θερμοκηπίου ή και το δάπεδο, μετατρέπεται σε θερμότητα και ένα ποσοστό μεταφέρεται στο κτήριο. Το θερμοκήπιο χαρακτηρίζεται από έντονη θερμική διαστρωμάτωση, με τις πιο θερμές μάζες του αέρα να ανυψώνονται. Έτσι τοποθέτηση θυρίδων στα υψηλότερα σημεία του στοιχείου που συνδέει το θερμοκήπιο με το κτήριο είναι ικανές να προσάγουν θερμό αέρα στους θερμαινόμενους χώρους του κτηρίου.

- **Θερμοσιμφωνικό πανέλο ή αεροσυλλέκτης.** Το θερμοσιμφωνικό πανέλο είναι συλλέκτης της ηλιακής ακτινοβολίας, ο οποίος δε διαθέτει θερμική μάζα και είναι προσαρτημένος στο κτηριακό κέλυφος ή ανεξάρτητα από αυτό. Η θερμότητα που συλλέγεται αποθηκεύεται είτε στα δομικά στοιχεία είτε σε υποδαπέδια αποθήκη θερμότητας. Χαρακτηριστικό είναι ότι απομονώνεται εύκολα από το κτήριο κι έτσι μπορεί αν αξιοποιηθεί η βέλτιστη κλίση για τη χειμερινή δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αποτελείται από υαλοπίνακα, τοποθετημένο σε μικρή απόσταση μπροστά από μεταλλική επιφάνεια, σκούρου χρώματος και το όλο σύστημα μονώνεται. Συνδέεται με το κτήριο με θυρίδες εισροής και εκροής του αέρα του εσωτερικού χώρου προς και από το πανέλο. Ο ψυχρός αέρας από το εσωτερικό του κτηρίου, εισέρχεται στο κατώτερο μέρος του θερμοσυμφωνικού πανέλου από την κατώτατη θυρίδα του όπου θερμαίνεται, ανέρχεται ως ελαφρότερος και εξέρχεται στον εσωτερικό χώρο από την ανώτατη θυρίδα του.
- **Τοιχοποιία με διαφανή μόνωση.** Πρόκειται για τοίχο με υλικό μεγάλης θερμοχωρητικότητας, εξωτερικά του οποίου τοποθετείται διαφανής μόνωση χωρίς επίχρισμα. Η εξωτερική παρειά του τοίχου βάφεται σε σκούρο χρώμα. Ουσιαστικά πρόκειται για τοίχο μάζας, ο οποίος όμως θερμομονώνεται. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται μεν ο συντελεστής θερμικών ηλιακών απολαβών του διάφανου θερμομονωτικού υλικού, αλλά καθώς ο τοίχος είναι θερμομονωμένος, αυξάνουν τα καθαρά κέρδη, σε σχέση με τον τοίχο μάζας. Τη θερινή περίοδο, πρέπει οπωσδήποτε να σκιάζεται εξωτερικά είτε με προεξοχές είτε με κατακόρυφα, εξωτερικά σκίαστρα, προκειμένου να αποφεύγεται η υπερθέρμανση του χώρου. Ως προς τη χειμερινή του λειτουργία, δε χρειάζεται θερμική προστασία.



Εικόνα 3.4 Τοιχοποιία με διαφανή μόνωση (<http://www.cres.gr>)

3.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Μια νέα τεχνολογία, που αποσκοπεί στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, είναι τα πολυσυζητημένα πλέον φωτοβολταϊκά συστήματα. Ένα Φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τις ηλιακές κυψέλες, οι οποίες είναι φτιαγμένες από ειδικά υλικά, τους επονομαζόμενους ημιαγωγούς, που έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, πρώτος παρατήρησε ο φυσικός, Edmund Bequerel, κατά τα 1839. Πρόσεξε ότι κάποια συγκεκριμένα υλικά μπορούσαν να παράξουν μικρές ποσότητες ηλεκτρικού ρεύματος, όταν εκτεθούν στο φως. Το 1905, ο Albert Einstein περιέγραψε τη

φύση του φωτός και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, που είναι βασισμένη η φωτοβολταϊκή τεχνολογία κι έτσι κέρδισε το βραβείο Νόμπελ στη φυσική. Η πρώτη φωτοβολταϊκή μονάδα, κατασκευάστηκε το 1954, και ξεκίνησε σαν μια ηλιακή μπαταρία από απλή περιέργεια, που όμως ήταν πολύ ακριβή για να κερδίσει ευρεία χρήση. Στη δεκαετία του '60, η διαστημική βιομηχανία, άρχισε να κάνει την πρώτη σοβαρή χρήση της τεχνολογίας για παροχή ρεύματος στα διαστημικά οχήματα. Μέσω των διαστημικών προγραμμάτων, η τεχνολογία αναπτύχθηκε, απέκτησε πλέον αξιοπιστία και το κόστος άρχισε να μειώνεται. Αργότερα, κατά την διάρκεια της κρίσης του '70, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία κέρδισε αναγνώριση και εκτός των διαστημικών εφαρμογών. (<http://www.selasenergy.gr/>)

3.3.1 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, γίνεται κύρια με τη χρήση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων, που στηρίζονται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά, με πιο διαδεδομένο το πυρίτιο. Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται και διεγείρει ηλεκτρόνια επιτρέποντας τους έτσι να κινούνται σχετικά ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου υποχρεώνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα του οποίου η ισχύς καθορίζεται από τη ροή των ηλεκτρονίων και την εφαρμοζόμενη τάση στο φωτοβολταϊκό κύτταρο. Για να αυξηθεί η ροή των ελεύθερων ηλεκτρονίων προστίθενται στο καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο προσμίξεις, όπως ο φώσφορος και το βόριο.

Κάθε άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια κατανεμημένα σε τρεις διαφορετικές στοιβάδες. Οι δύο πρώτες είναι συμπληρωμένες με 2 και 8 άτομα αντίστοιχα. Η εξωτερική στοιβάδα περιλαμβάνει τα υπολειπόμενα 4 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα του πυριτίου σχηματίζοντας την κρυσταλλική πυραμιδική δομή του καθαρού πυριτίου.

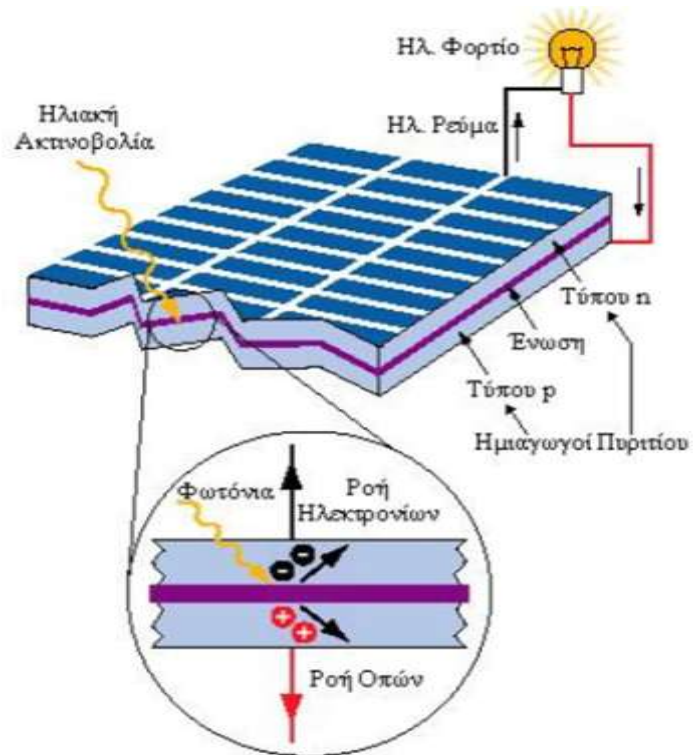
Το πρόβλημα όμως, είναι ότι το καθαρό πυρίτιο δεν αποτελεί καλό αγωγό του ηλεκτρισμού, αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα κινούμενα ηλεκτρόνια όπως την περίπτωση του μεταλλικού πλέγματος. Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο κρυσταλλικό πυρίτιο, κάποια ηλεκτρόνια διεγείρονται, σπάζουν τους δεσμούς τους και απομακρύνονται προς τα γειτονικά τους άτομα δημιουργώντας διαθέσιμες θετικά φορτισμένες «οπές» στη δομή του υλικού. Οι θέσεις αυτές καταλαμβάνονται από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων και με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων μέσα στο υλικό. Ο αριθμός όμως των ηλεκτρονίων που μπορούν να κινηθούν είναι αρκετά περιορισμένος και δεν είναι ικανός να δημιουργήσει ηλεκτρικό ρεύμα.

Για να άρουμε αυτό το πρόβλημα, εισάγουμε ετεροάτομα στην κρυσταλλική δομή, όπως του φωσφόρου. Η εξωτερική στοιβάδα του φωσφόρου έχει 5 ηλεκτρόνια, εκ των οποίων τα 4 συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου, ενώ το πέμπτο συγκρατείται ηλεκτροστατικά από τα πρωτόνια του πυρήνα. Το συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο, απαιτεί σημαντικά χαμηλότερη ενέργεια ενεργοποίησης για να κινηθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα. Σαν αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια ελευθερώνονται και γίνονται φορείς

ηλεκτρικού ρεύματος που είναι πολύ περισσότεροι από αυτούς του κρυσταλλικού πυριτίου. Η πρόσμιξη του κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργεί ημιαγωγό τύπου N. Το γράμμα N προέρχεται από το *negative*, λόγω του κύριου ελεύθερου ηλεκτρονίου. Ο ημιαγωγός τύπου N είναι πολύ καλύτερος αγωγός του ηλεκτρισμού από το γνήσιο πυρίτιο.

Όταν προστίθεται, στο κρυσταλλικό πυρίτιο, βόριο προκύπτουν οι ημιαγωγοί P. Το βόριο, έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 3 ηλεκτρόνια που συμμετέχουν σε δεσμούς με άτομα του πυριτίου. Σε κάθε άτομο απαιτούνται 8 άτομα για τη συμπλήρωση της εξωτερικής στοιβάδας, στην εξωτερική στοιβάδα του βορίου υπάρχουν διαθέσιμες 2 ελεύθερες θέσεις ηλεκτρονίων, αφού κάνει δεσμούς με το άτομο του πυριτίου. Έτσι δημιουργούνται οι αντίστοιχες θετικά φορισμένες «οπές» στη δομή του υλικού, κουβαλώντας το αντίθετο φορτίο, γι αυτό και αυτός ο τύπος ημιαγωγού ονομάζεται P από το *positive*. Η κατάληψη των οπών από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων δίνει την εικόνα διάδοσης τους στο υλικό ή μεταφοράς θετικών φορτίων στην κρυσταλλική δομή του ημιαγωγού.

Μέχρι τα δύο αυτά κομμάτια είναι χωριστά, εμάς μας είναι αδιάφορα. Το ενδιαφέρον ξεκινάει όταν τα φέρουμε σε επαφή. Φέρνοντας σε επαφή τους ημιαγωγούς N και P, σχηματίζεται ηλεκτρικό πεδίο. Τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου N κινούνται προς τις κενές θέσεις του πυριτίου τύπου P για να τις καλύψουν. Στην ένωση των δύο υλικών, επιτυγχάνεται ισορροπία και δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δύο πλευρές. Το ηλεκτρικό πεδίο λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο (δίοδος), επιτρέποντας τα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο P στο N αλλά όχι αντίστροφα.



Εικόνα 3.5 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος (<http://www.cie.org.cy>)

Όταν φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, κατάλληλου μήκους κύματος, προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο διεγείρουν ηλεκτρόνια και τα ελευθερώνουν δημιουργώντας παράλληλα αντίστοιχες οπές. Κάθε φωτόνιο με αρκετή ενέργεια θα ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο και θα δημιουργήσει μια οπή. Αν αυτό συμβεί κοντά στο ηλεκτρικό πεδίο, ή αν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή βρεθούν κοντά στην ένωση P-N ημιαγωγών, τα πεδίο θα εξαναγκάσει το ηλεκτρόνιο να πάει στον ημιαγωγό N και θα οδηγήσει την οπή στο πυρίτιο P. Αυτό προκαλεί μεγαλύτερη ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα και αν χρησιμοποιηθεί μια εξωτερική αγωγική οδός τα ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από αυτή για να πάνε στην αρχική τους θέση από όπου το ηλεκτρικό πεδίο το απομάκρυνε. Η ροή αυτή

των ηλεκτρονίων δημιουργεί το ρεύμα, και το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί την τάση του ρεύματος.

Το μέγιστο θεωρητικό ποσό ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι περίπου το 25% της ενέργειας που δέχεται, αλλά το πιο συνηθισμένο ποσοστό είναι λιγότερο από 15%. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική, αποτελείται από φάσμα διαφορετικών μηκών κυμάτων, άρα και φωτόνια διαφορετικών επιπέδων ενέργειας. Το φωτόνιο χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου δεν μπορούν να διεγείρουν ηλεκτρόνια του ημιαγωγού και απλώς διέρχονται μέσα από το φωτοβολταϊκό κύτταρο. Μόνο τα φωτόνια που μεταφέρουν μεγαλύτερη ή ίση ενέργεια από ένα συγκεκριμένο ποσό, που εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένο το κύτταρο, μπορούν να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια. (<http://www.allaboutenergy.gr>)

Η τεχνολογία των ημιαγωγών υλικών επέτρεψε την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην παραγωγή ηλεκτρισμού, καθώς ενδεχόμενη χρήση αγωγικών υλικών, όπως τα μέταλλα, θα οδηγούσε μεν σε μεγαλύτερη ροή ηλεκτρονίων αλλά θα παρουσίαζε πολύ χαμηλή τάση πεδίου.

3.3.2 Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ανάλογα με τη χρήση τους χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Τα αυτόνομα συστήματα: όπου η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται μόνο για κάλυψη των αναγκών του χρήστη και συνήθως διαθέτουν σύστημα αποθήκευσης – μπαταριών, για τις μέρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια ή ακόμα και για τις νύκτες. Εφαρμόζονται για τη δημιουργία μικρών τοπικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, εξοικονομώντας σημαντικό κόστος από την εγκατάσταση νέων δικτύων και γραμμών μεταφοράς ηλεκτρισμού σε περιοχές που δεν καλύπτεται το υφιστάμενο δίκτυο. Μπορεί να καλύψει ένα μέρος από τις ανάγκες σε ένα οικιακό εξοπλισμό για φωτισμό, τηλεόραση, ραδιόφωνο, στη γεωργία για άντληση νερού, σε ένα κοινοτικό γήπεδο για το φωτισμό, σε κέντρα υγείας για άντληση νερού και σε μικρές επιχειρήσεις για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύς για ελαφρύ εξοπλισμό.

Τα διασυνδεδεμένα συστήματα, όπου η τυχόν πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια ή το σύνολό της διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το σύστημα παράγει ρεύμα το οποίο τροφοδοτεί απευθείας τις συσκευές και μόνο σε περίπτωση που δεν υπάρχει επάρκεια ζήτησης, χρησιμοποιείται το ρεύμα από το δίκτυο. Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του διασυνδεδεμένου συστήματος είναι ότι σε περίπτωση που δεν υπάρχει παροχή ηλεκτρικού ρεύματος τότε η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μένει ανεκμετάλλευτη. Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα μπορούμε να βρούμε σε προσόψεις κτιρίων που είναι διασυνδεδεμένα με το δίκτυο της ΔΕΗ.

Αυτόνομα υβριδικά συστήματα. Σε περίπτωση που η παραγόμενη ηλιακή ενέργεια δεν είναι σε επαρκές επίπεδο, γίνεται συνδυασμός της παραγόμενης φωτοβολταϊκής ενέργειας με άλλες μορφές ενέργειας, όπως η αιολική, βιομάζα ή πετρελαιογεννήτριες.

Υβριδικές φωτοβολταϊκές συσκευές. Όπως είναι γνωστό, ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό μετατρέπεται σε

θερμότητα, προκαλώντας θέρμανση της πλάκας και μείωση στην ηλεκτρική απόδοση. Εδώ έρχονται και δίνουν λύση τα υβριδικά ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα. Υπάρχουν δύο είδη υβριδικών συστημάτων: τα συστήματα με κυκλοφορία αέρα και τα συστήματα με κυκλοφορία νερού. Χρησιμοποιούνται κυρίως για εγκατάσταση σε κτίρια τα οποία χρειάζονται ηλεκτρισμό αλλά και θερμότητα, όπως κατοικίες, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, βιομηχανίες. (πηγή: Πρόσφατες εξελίξεις στις Α.Π.Ε)

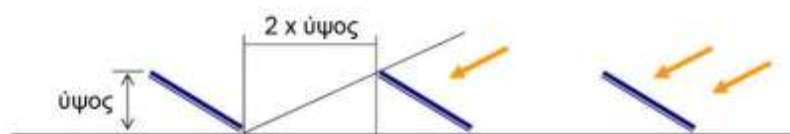
3.3.3 Τα φωτοβολταϊκά στην στέγη μας

Αρχικά, καλό είναι να σημειώσουμε ότι, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παράγουν συνεχές ρεύμα (DC) που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση συσσωρευτών οι οποίοι με τη σειρά τους τροφοδοτούν ηλεκτρικές συσκευές συνεχούς τάσης όπως τηλέφωνα, ραδιόφωνα, φωτιστικά, υπολογιστές. Με τη χρήση ενός αντιστροφέα (inverter), μπορούμε να το μετατρέψουμε σε εναλλασσόμενο (AC) και να τροφοδοτήσουμε τις συσκευές που λειτουργούν με αυτό το ρεύμα. Αυτές οι συσκευές και οι διατάξεις επιτρέπουν την εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας είτε με τη διοχέτευση της στο δίκτυο (διασυνδεδεμένα συστήματα.), είτε διαθέτοντας την προς αυτοκατανάλωση (αυτόνομα συστήματα).

Είναι πολύ εύκολο, για κάποιον με στοιχειώδεις ηλεκτρολογικές γνώσεις να εγκαταστήσει ένα μικρό εφεδρικό σύστημα (back up) με συσσωρευτές. Για μεγαλύτερα συστήματα και ειδικά για τα συστήματα που συνδέονται με το βασικό δίκτυο, η εγκατάσταση πρέπει να γίνει από εξειδικευμένο τεχνικό.

Ένα βασικό σύστημα αποτελείται από τον ηλιακό συλλέκτη, το ρυθμιστή φόρτισης της μπαταρίας και την μπαταρία (συσσωρευτή). Προαιρετικά συνδέεται στον συσσωρευτή και ένας αντιστροφέας που μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη ώστε να τροφοδοτηθούν και οι συσκευές που απαιτούν 220volt. (<http://www.solar-systems.gr>)

Πριν την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών μονάδων, πρέπει να έχουμε υπόψη ότι δεν έχουν όλες οι οροφές το σωστό προσανατολισμό ή τη σωστή γωνία έτσι ώστε να έχουμε τα καλύτερα αποτελέσματα. Αρχικά, για μη μετακινούμενα συστήματα στο βόρειο ημισφαίριο, πρέπει τα φωτοβολταϊκά να αντικρίζουν απευθείας τον αληθή νότο. Αλλιώς, αν ο



προσανατολισμός είναι περισσότερο νοτιοανατολικός ή νοτιοδυτικός θα έχουμε μειωμένη παραγωγή ηλεκτρισμού. Ένας χοντρικός κανόνας για να αποφύγουμε τις τυχόν σκιάσεις είναι ο εξής: η απόσταση από τυχόν εμπόδιο (κτίριο, δέντρο κλπ) πρέπει να είναι διπλάσια του ύψους του εμποδίου. (<http://www.env-edu.gr>)

Επίσης, το φωτοβολταϊκό σύστημα πρέπει να είναι κεκλιμένο κατά μία γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Για να αυξήσουμε την παραγωγή μπορούμε να μεταβάλουμε το προσανατολισμό το πρωί ή το απόγευμα, και τη γωνία το καλοκαίρι και το χειμώνα. Το

καλοκαίρι συστήνεται μια γωνιά μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους ενώ το χειμώνα μεγαλύτερη. Το όλο θέμα έχει αναπτυχθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, στην ενότητα 1.8.

Επίσης, βασική προϋπόθεση αποτελεί το γεγονός ότι το σύστημα δεν πρέπει να σκιάζεται από κοντινά δέντρα ή κτίρια. Ακόμα και ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο να σκιάζεται, η παραγωγή ενέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Βέβαια, αν δεν ισχύουν τα παραπάνω, το φωτοβολταϊκό θα έχει μειωμένη απόδοση, χωρίς αυτό να σημαίνει απαραίτητα ότι δεν είναι βιώσιμη οικονομικά η επένδυσή του.

Αφού εξετάσουμε τους πιο πάνω παράγοντες, φτάνουμε στο στάδιο που πρέπει να επιλέξουμε τις διαστάσεις του συστήματος που πρόκειται να εγκαταστήσουμε. Σίγουρα, αυτό είναι περίπλοκο λόγω του ότι η κατανάλωση ρεύματος διαφέρει από εποχή σε εποχή λόγω της μεταβλητότητας του καιρού. Ευτυχώς, αυτές οι δυσκολίες είναι εύκολο να ξεπεραστούν. Μετεωρολογικά δεδομένα, παρέχουν μέσες μηνιαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, λαμβάνοντας υπόψη τις νεφελώδεις και βροχερές μέρες, την υγρασία και άλλους παράγοντες. Προτείνεται όπως, σχεδιάσουμε το σύστημα για το χειρότερο μήνα έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε την επάρκεια ηλεκτρισμού για όλη τη διάρκεια του έτους. Με αυτά τα δεδομένα και το μέσο ποσό ζήτησης του νοικοκυριού μπορούμε να διαπιστώσουμε πόσα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα χρειαστούμε.

Ως ένα πρόχειρο κανόνα υπολογίζουμε ότι χρειαζόμαστε περίπου 1-1.5m² για κάθε 100Watt, αν χρησιμοποιούμε τα συνηθισμένα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά του εμπορίου. Χρειάζεται 8-10m² για κεραμοσκεπή και 15m² για δώμα ή οικόπεδο. Χρήσιμο είναι να γνωρίζουμε επίσης, ότι ένα φωτοβολταϊκό σύστημα στην Ελλάδα, σε ένα έτος παράγει από 1100kWh (στη Βόρεια Ελλάδα) έως 1450kWh (νότια Ελλάδα) για κάθε που έχει εγκατασταθεί.

Από την 1^η Ιουλίου 2009 ισχύει ένα πρόγραμμα για την εγκατάσταση μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων στον οικιακό-κτηριακό τομέα. Το πρόγραμμα για τα φωτοβολταϊκά – ΑΠΕ αφορά οικιακούς καταναλωτές που επιθυμούν να εγκαταστήσουν φωτοβολταϊκά ισχύος έως 10kWp στο δώμα ή στη στέγη κτιρίου συμπεριλαμβανομένου και των στεγαστρων βεραντών. Για να ενταχθούν στο πρόγραμμα θα πρέπει να έχουν την κυριότητα του στο χώρο στον οποίο εγκαθίσταται το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Όλη η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ και ο μικροπαραγωγός ενέργειας πληρώνεται για αυτή με 55 λεπτά την κιλοβατώρα (0.55 €/ kWh), τιμή που είναι εγγυημένη για 25 χρόνια. Ο οικιακός μικροπαραγωγός συνεχίζει να αγοράζει ρεύμα από τη ΔΕΗ και να το πληρώνει στην τιμή που το πληρώνει και σήμερα (10-12 €/ kWh). Η ΔΕΗ καταθέτει το υπόλοιπο στον τραΑΠΕ-ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΠΑΡΚΑ-ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣζικό λογαριασμό του ιδιοκτήτη του φωτοβολταϊκού.

Για να ενταχθεί κανείς στο πρόγραμμα πρέπει να έχει μετρητή της ΔΕΗ στο όνομά του και να καλύπτει μέρος των αναγκών σε ζεστό νερό από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα έσοδα που έχει ο μικροπαραγωγός από το πρόγραμμα δεν φορολογούνται.

Ανάλογο πρόγραμμα αφορά πολύ μικρές επιχειρήσεις-που απασχολεί έως 10 άτομα- που επιθυμούν να εγκαταστήσουν φωτοβολταϊκά ισχύος έως 10kWp στο δώμα ή στη στέγη κτιρίου. Η μόνη προϋπόθεση είναι η επιχείρηση να μην έχει πάρει άλλη επιδότηση για φωτοβολταϊκά από εθνικά ή κοινοτικά προγράμματα.

Από 4-6-2010 επιτρέπεται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε γήπεδα (αγροτεμάχια) από πρόσωπα που είναι επαγγελματίες αγρότες, όπως αυτοί ορίζονται με

σχετική απόφαση του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων , εφόσον πρόκειται για σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε εκτάσεις ιδιοκτησίας τους, εγκατεστημένης ισχύος έως 100 kWp. Δεν επιτρέπεται η μεταβίβαση των σταθμών της περίπτωσης αυτής πριν από την πάροδο πενταετίας από την έναρξη λειτουργίας τους, εκτός αν πρόκειται για μεταβίβαση λόγω κληρονομικής διαδοχής.

Για τους μη επαγγελματίες αγρότες, όλους τους άλλους επενδυτές δηλαδή, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε γήπεδα (αγροτεμάχια και οικόπεδα) επιτρέπεται μετά τις 4-9-2010 και για ισχύ 500 kWp ή 1 MWp εντός βιομηχανικών περιοχών. (<http://www.env-edu.gr>)

3.3.4 Φωτοβολταϊκά - Τεχνολογία του μέλλοντος

Τα φωτοβολταϊκά είναι μια από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες της νέας εποχής που ανατέλλει στο χώρο της ενέργειας. Τα μικρά, ευέλικτα συστήματα που μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδο κατοικίας, εμπορικού κτιρίου ή μικρού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής αναμένεται να κατακτήσουν ένα σημαντικό μερίδιο της ενεργειακής αγοράς στο χρόνο που έρχονται.



Εικόνα 3.6 Εφαρμογή φωτοβολταϊκών σε ταράτσα κτιρίου. (<http://www.env-edu.gr>)

Τα φωτοβολταϊκά συνεπάγονται σημαντικά οφέλη για το περιβάλλον και την κοινωνία. Οφέλη για τον καταναλωτή, για τις αγορές ενέργειας και για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Όλα τα φωτοβολταϊκά πάντως μοιράζονται τα παρακάτω πλεονεκτήματα

- Μηδενική ρύπανση
- Αθόρυβη λειτουργία
- Αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής
- Απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες περιοχές
- Δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες
- Ελάχιστη συντήρηση
- Μπορούν να ενσωματωθούν στην αρχιτεκτονική των κτιρίων
- Έχουν μέγιστη παραγωγή την περίοδο της μεγάλης ζήτησης ηλεκτρισμού
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές όπου είναι αδύνατο να μεταφερθεί ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο.

Τα φωτοβολταϊκά, παρέχουν τον απόλυτο έλεγχο στον καταναλωτή και άμεση πρόσβαση στα στοιχεία που αφορούν την παραγόμενη και καταναλισκόμενη ενέργεια. Τον καθιστούν έτσι, πιο προσεκτικό στον τρόπο που καταναλώνει την ενέργεια και συμβάλλουν στην ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση της ενέργειας. Δεδομένου ότι η παραγωγή και η κατανάλωση του ηλιακού ηλεκτρισμού γίνονται τοπικά, αποφεύγονται οι σημαντικές απώλειες της μεταφοράς και διανομής του ηλεκτρισμού και έτσι επιτυγχάνεται

εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 10% σε σχέση με τη συμβατική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του δικτύου.

Έχουν αθόρυβη λειτουργία, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής, μέχρι και 30 χρόνια, δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες, δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση.

Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών είναι αδιαμφισβήτητα. Κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από φωτοβολταϊκά, όχι από συμβατικά καύσιμα, συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης 1.1Kg CO₂ στην ατμόσφαιρα. Ένα τυπικό σύστημα του 1kWp αποτρέπει κάθε χρόνο την έκλυση 1.3 -1.4 τόνων CO₂, όσο δηλαδή θα απορροφούσαν δύο στρέμματα δάσους. Επιπλέον συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές άλλων επικίνδυνων ρύπων (αιωρούμενα σωματίδια, NO_x, SO_x, κλπ).

Η βαθμιαία αύξηση των μικρών ηλεκτροπαραγωγών μπορεί να καλύψει αποτελεσματικά η διαρκή αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα έπρεπε να καλυφτεί με μεγάλες επενδύσεις. Επίσης οι διάφοροι μικροί παραγωγοί αποτελούν ιδανική λύση για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε τόπους που είναι αδύνατο να φτάσει από το δίκτυο.

Τα φωτοβολταϊκά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά υλικά παρέχοντας τη δυνατότητα για καινοτόμους, αρχιτεκτονικούς σχεδιασμούς καθώς διατίθενται σε ποικιλία χρωμάτων, μεγεθών, σχημάτων και μπορούν να παρέχουν ευελιξία και πλαστικότητα στη φόρμα, ενώ δίνουν και δυνατότητα διαφορικής διαπερατότητας του φωτός ανάλογα με τις ανάγκες του σχεδιασμού. Στη θέση των υαλοστασίων σε προσόψεις εμπορικών κτιρίων, διατίθενται σήμερα διαφανή φωτοβολταϊκά με θερμομονωτικές ιδιότητες αντίστοιχες με αυτές των υαλοστασίων χαμηλής εκπεμπιμότητας, τα οποία επιτυγχάνουν και εξοικονόμηση ενέργειας 15-30% σε σχέση με ένα κτίριο με συμβατικά απλά υαλοστάσια. (<http://www.cie.org.cy>).

3.4 Ανακεφαλαίωση

Σε αυτό το κεφάλαιο είδαμε τρόπους που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη γη για το συμφέρον του ανθρώπου αλλά και του περιβάλλοντος μας. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού.



Εικόνα 3.7. Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε δημόσιο κτίριο. (<http://www.env-edu.gr>)



Εικόνα 3.8. Φωτοβολταϊκά σε θέση σκίαστρου. (<http://www.env-edu.gr>)

Για την παραγωγή θερμότητας, υπάρχουν τα θερμικά ηλιακά συστήματα που χωρίζονται σε ενεργητικά, όπου η μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας απαιτεί επιπλέον ενέργεια, και στα παθητικά που λειτουργούν αυτόνομα και η ενέργεια κυκλοφορεί με φυσική ροή. Τα παραδείγματα πολλά, με πιο διαδεδομένα τα ηλιακά συστήματα ζεστού νερού χρήσης (Z.N.X.). Ακόμα, ο ηλιακός κλιματισμός που κάνει την αντίστροφη δουλειά, δηλαδή τροφοδοτούν ειδικούς ψύκτες με ζεστό νερό, που ψύχουν το νερό και το διανέμουν σε κτίρια και εγκαταστάσεις για κλιματισμό-ψύξης.

Είδαμε επίσης, πως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ηλιακή ακτινοβολία για θέρμανση χώρων. Βέβαια η άμεση θέρμανση χώρων, συνδέεται με το βιοκλιματικό σχεδιασμό που σκοπό έχει το μέγιστο περιορισμό των απωλειών θερμότητας. Περιγράφονται παραδείγματα όπως οι ηλιακοί τοίχοι, ο τοίχος Trombe-Michelle, τα θερμοκήπια και τα νότια υαλοστάσια.

Για την παραγωγή ηλεκτρισμού από το ήλιο, χρησιμοποιούνται ασφαλώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από τα λεγόμενα ηλιακά κύτταρα, που αυτά με τη σειρά τους αποτελούνται από ειδικά υλικά, τους ημιαγωγούς κυρίως πυρίτιο. Οι ημιαγωγοί έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στη δίοδο P-N, που συνθέτει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, δημιουργείται μια συνεχής ροή ηλεκτρονίων που σημαίνει ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά χωρίζονται σε αυτόνομα συστήματα, διασυνδεδεμένα, αυτόνομα υβριδικά συστήματα και στις υβριδικές φωτοβολταϊκές συσκευές.

Ακολουθώς, παραθέτουμε σημαντικές πληροφορίες που πρέπει να έχουμε υπόψη αν θέλουμε να εγκαταστήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια στη στέγη μας ή στην μικρή επιχείρησή μας. Τα νομικά πλαίσια δεν περιγράφονται επαρκώς διότι το θέμα δεν emπίπτει στην εργασία μας.

Τέλος, αναφερόμαστε στα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων και γιατί είναι σημαντικά για την προστασία του περιβάλλοντος. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι έχουν μηδενική ρύπανση, αθόρυβη λειτουργία, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής, απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες περιοχές, ελάχιστη συντήρηση και μπορούν να ενσωματωθούν στην αρχιτεκτονική των κτιρίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ - ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Η εργασία είναι χωρισμένη σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, που είναι και το πιο ουσιαστικό, γίνεται μια σύγκριση των δεδομένων που έχουμε στη διάθεσή μας, γίνεται μια μελέτη των τιμών της ηλιακής ενέργειας που συλλέγουν οριζόντια και κεκλιμένα επίπεδα σε τρεις διαφορετικές πόλεις της Ελλάδας, Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Χανιά. Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο και αντιπροσωπεύουν την περίοδο 1981-1990 (PVGIS). Μελετώνται οι περιπτώσεις συλλογής ενέργειας σε οριζόντια επιφάνεια, σε σταθερά κεκλιμένη επιφάνεια υπό μια γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και τέλος σε μια επιφάνεια που η γωνία της μεταβάλλεται για κάθε διαφορετικό μήνα ανάλογα με το ύψος του ήλιου. Όλες οι επιφάνειες είναι προσανατολισμένες προς το νότο. Ακολουθώντας, εντάσσουμε και το παράγοντα νέφωσης με σκοπό να εξάγουμε κάποιες σχέσεις μεταξύ του ποσοστού νεφοκάλυψης και της συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας. Η διαδικασία που ακολουθήσαμε θα περιγραφεί εκτενώς στο παρών κεφάλαιο. Τέλος, αυτές οι σχέσεις θα αποτελέσουν για μας, πρότυπα μοντέλα για να επιχειρήσουμε να κάνουμε πρόγνωση της ηλιακής ενέργειας στους υπό μελέτη τόπους.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, θα προσπαθήσουμε να αξιολογήσουμε την αξιοπιστία των υπολογισμών της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο (GHI) του μοντέλου BOLAM για την περιοχή της Ελλάδας για διάστημα δύο ημερών. Αυτό το κομμάτι της εργασίας γίνεται με σκοπό να έχουμε σύγκριση της πρόγνωσης με τη μέτρηση σε ημερήσια βάση. Με αυτό τον τρόπο αποδεικνύουμε ότι η μεταβλητότητα των νεφών παίζει σημαντικό ρόλο και για χρονικό διάστημα μιας ημέρας ακόμα και ώρας. Εμείς θα αναφέρουμε την πρόγνωση ηλιακής ακτινοβολίας στα Σπάτα, στα Χανιά και στη Δράμα.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και τα δύο μέρη της όλης μελέτης. Αρχικά θα επεξηγηθούν όλοι οι όροι που πρόκειται να αναφερθούν και ακολούθως θα γίνει περιγραφή της επεξεργασίας των διαθέσιμων δεδομένων. Τα απαραίτητα δεδομένα για το πρώτο μέρος της μελέτης, ήταν διαθέσιμα από το διαδίκτυο και συγκεκριμένα από το Ινστιτούτο Ενέργειας και Μεταφοράς του Ευρωπαϊκού ερευνητικού κέντρου. Παρακάτω παραθέτουμε από πού πάρθηκαν τα αρχικά δεδομένα και πως επεξεργάστηκαν μέσω του μοντέλου *r.sun*. Το συγκεκριμένο μοντέλο εξάγει τιμές της ολικής ακτινοβολίας και των συνιστωσών της – άμεση και διάχυτη- για καθαρό και νεφελώδη ουρανό σε οριζόντιες και κεκλιμένες επιφάνειες. Τέλος γίνεται και μια αναφορά στην αξιοπιστία του μοντέλου.

Ακολουθώντας, γίνεται λόγος για τα δεδομένα νεφοκάλυψης. Αυτά επίσης είναι διαθέσιμα από το διαδίκτυο και συγκεκριμένα από την πλατφόρμα Giovanni (Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure) της NASA (GIOVANNI). Ο αισθητήρας MODIS/TERRA δίνει απευθείας τις τιμές αυτές και πιο κάτω περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του.

Στο τέλος του κεφαλαίου, αναφέρεται η διαδικασία αξιολόγησης του μοντέλου, πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, BOLAM. Το μοντέλο αξιολογήθηκε με τις μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας, που παραχωρήθηκαν από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Οι

μετρήσεις έγιναν με πυρανόμετρα, με αισθητήρα σιλικόνης. Παρουσιάζονται ακολούθως οι μέθοδοι αξιολόγησης του μοντέλου.

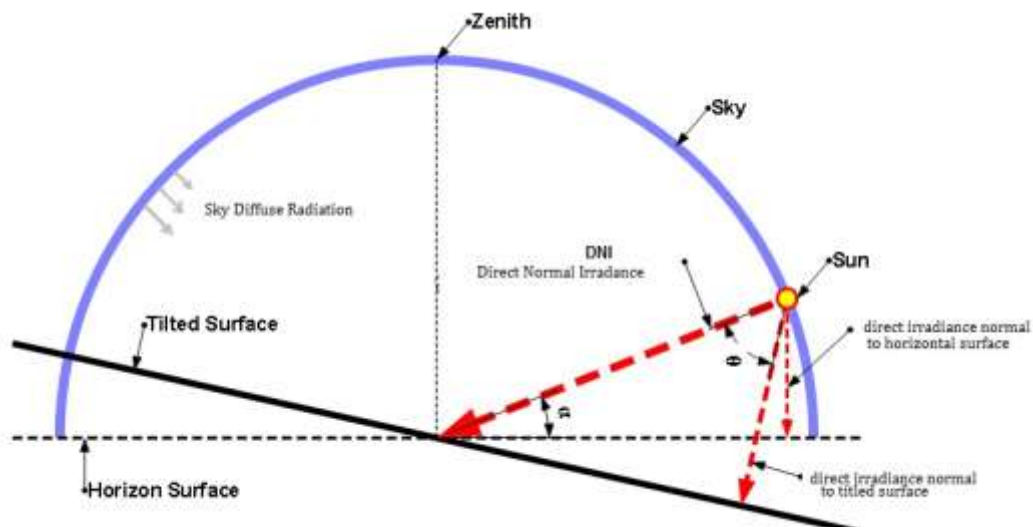
4.2 Ονοματολογία μεταβλητών

Για τις ανάγκες της εργασίας επεξεργαστήκαμε μετρήσεις ακτινοβολίας, για οριζόντιες και κεκλιμένες επιφάνειες. Πήραμε ημερήσιες μετρήσεις για τη μέση μέρα του εκάστοτε μήνα. Τα δεδομένα ακτινοβολίας είναι διαθέσιμα κάθε τέταρτο της ώρας, όσο υπάρχει ηλιοφάνεια, σε W/m^2 . Εμείς πήραμε το ολοκλήρωμα των τιμών της μέση ημέρας του μήνα με αποτέλεσμα να έχουμε στη διάθεσή μας μια τιμή ενέργειας για κάθε μήνα μετρούμενη σε Wh/m^2 . Επίσης, έχουμε δεδομένα δείκτη νεφοκάλυψης για 11 χρόνια (2001-2012) για κάθε μήνα του εκάστοτε έτους. Εμείς, πήραμε μια μέση τιμή για κάθε μήνα, με αποτέλεσμα να έχουμε 12 τιμές του δείκτη νεφοκάλυψης, μία για κάθε μήνα.

Παρακάτω θα εξηγήσουμε τους όρους που πρόκειται να αναφερθούν στην εργασία:

Optimal inclination: είναι η βέλτιστη κλίση που πρέπει να έχει ο συλλέκτης καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στην περίπτωση μας σαν βέλτιστη κλίση παίρνουμε τη γωνία που είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Ο δείκτης ο δηλώνει ότι η μέτρηση αναφέρεται στο σταθερά κεκλιμένο επίπεδο.

Adjusted inclination: είναι η κλίση του συλλέκτη η οποία ρυθμίζεται ανά μήνα σχετικά με το ύψος του ήλιου. Ο δείκτης adj δηλώνει ότι η μέτρηση αναφέρεται στο κεκλιμένο επίπεδο



Σχήμα 4.1 Ακτινοβολία σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο (www.google.com)

που μεταβάλλεται η γωνία κλίσης του.

G_h : ενέργεια η οποία προέρχεται από την ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε $1 m^2$ οριζόντιου επιπέδου, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m^2)

D_h : ενέργεια η οποία προέρχεται από τη διάχυτη ακτινοβολία που προσπίπτει σε $1 m^2$ οριζόντιου επιπέδου, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m^2)

G_{hc} : ενέργεια η οποία προέρχεται από την ολική ακτινοβολία, σε συνθήκες καθαρού ουρανού, που προσπίπτει σε $1 m^2$ οριζόντιου επιπέδου, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m^2)

DNI_h : η ενέργεια που παράγεται από την ακτινοβολία που έρχεται απευθείας από τον ηλιακό δίσκο και κτυπά $1 m^2$ οριζόντιου επιπέδου, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m^2)

DNI_{hc}: η ενέργεια που παράγεται από την ακτινοβολία, σε συνθήκες καθαρού ουρανού, που έρχεται απευθείας από τον ηλιακό δίσκο και κτυπά 1 m² οριζόντιου επιπέδου, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m²)

G_o: ενέργεια η οποία προέρχεται από την ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε 1 m² κεκλιμένου επιπέδου με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m²)

D_o: ενέργεια η οποία προέρχεται από την διάχυτη ακτινοβολία που προσπίπτει σε 1 m² κεκλιμένου επιπέδου με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m²)

G_{oc}: ενέργεια η οποία προέρχεται από την ολική ακτινοβολία, σε συνθήκες καθαρού ουρανού που προσπίπτει σε 1 m² κεκλιμένου επιπέδου με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m²)

DNI_o: η ενέργεια που παράγεται από την ακτινοβολία που έρχεται απευθείας από τον ηλιακό δίσκο και κτυπά 1 m² κεκλιμένου επιπέδου, με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, για τη μέση μέρα του μήνα (Wh/m²). Το κεκλιμένο επίπεδο ακολουθεί την πορεία του ήλιου καθ όλη τη διάρκεια της ημέρας.

DNI_{oc}: η ενέργεια που παράγεται, σε συνθήκες καθαρού ουρανού, από την ακτινοβολία που έρχεται απευθείας από τον ηλιακό δίσκο και κτυπά 1 m² κεκλιμένου επιπέδου, με γωνία κλίσης ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, για τη μέση μέρα του μήνα (Wh/m²). Το κεκλιμένο επίπεδο ακολουθεί την πορεία του ήλιου καθ όλη τη διάρκεια της ημέρας.

G_{adj}: ενέργεια η οποία προέρχεται από την ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε 1 m² κεκλιμένου επιπέδου με γωνία κλίσης που μεταβάλλεται κάθε μήνα, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m²)

D_{adj}: ενέργεια η οποία προέρχεται από την διάχυτη ακτινοβολία που προσπίπτει σε 1 m² κεκλιμένου επιπέδου με γωνία κλίσης που μεταβάλλεται κάθε μήνα, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m²)

G_{adjc}: ενέργεια η οποία προέρχεται από την ολική ακτινοβολία, σε συνθήκες καθαρού ουρανού, που προσπίπτει σε 1 m² κεκλιμένου επιπέδου με γωνία κλίσης που μεταβάλλεται κάθε μήνα, για τη μέση μέρα του μήνα. (Wh/m²)

DNI_{adj}: η ενέργεια που παράγεται από την ακτινοβολία που έρχεται απευθείας από τον ηλιακό δίσκο και κτυπά 1 m² κεκλιμένου επιπέδου, με γωνία κλίσης που μεταβάλλεται κάθε μήνα, για τη μέση μέρα του μήνα (Wh/m²). Το κεκλιμένο επίπεδο ακολουθεί την πορεία του ήλιου καθ όλη τη διάρκεια της ημέρας.

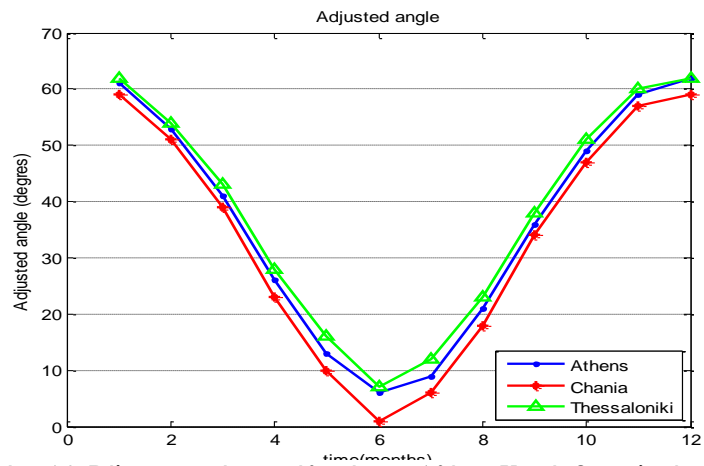
DNI_{adjc}: η ενέργεια που παράγεται από την ακτινοβολία, σε συνθήκες καθαρού ουρανού, που έρχεται απευθείας από τον ηλιακό δίσκο και κτυπά 1 m² κεκλιμένου επιπέδου, με γωνία κλίσης που μεταβάλλεται κάθε μήνα, για τη μέση μέρα του μήνα (Wh/m²). Το κεκλιμένο επίπεδο ακολουθεί την πορεία του ήλιου καθ όλη τη διάρκεια της ημέρας.

cf: δείκτης νεφοκάλυψης

4.2.1 Μεθοδολογία

Παίρνουμε δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο, σε κεκλιμένο κατά μια γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και σε επίπεδο που η γωνία κλίσης του μεταβάλλεται

κάθε μήνα. Η βέλτιστη γωνία που πρέπει να έχει ο συλλέκτης, σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι ακολουθεί αντιστρόφως τη γωνία ύψους του ηλίου. Δηλαδή, το καλοκαίρι που η γωνία ύψους του ηλίου είναι πολύ μεγάλη, η γωνία του κεκλιμένου επιπέδου πλησιάζει ακόμα και το οριζόντιο. Ενώ αντίθετα το χειμώνα, που ο ήλιος



Σχήμα 4.2. Βέλτιστη γωνία για κάθε μήνα σε Αθήνα, Χανιά, Θεσσαλονίκη

βρίσκεται πολύ χαμηλά, αναγκάζομαστε να αυξήσουμε τη γωνία του συλλέκτη έτσι ώστε οι ακτίνες να πέφτουν όσο πιο κάθετα γίνεται για να μπορούμε να συλλέξουμε περισσότερη ενέργεια. Επίσης, η γωνία του συλλέκτη μεταβάλλεται και ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της πόλης που μελετάται. Βλέπουμε ότι, για τη Θεσσαλονίκη που είναι η Βορειότερη πόλη, χρειάζονται μεγαλύτερες κλίσεις για να έχουμε το καλύτερο αποτέλεσμα. Αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι, όσο αυξάνεται το γεωγραφικό πλάτος, όσο απομακρυνόμαστε από τον ισημερινό, η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται με αποτέλεσμα να δεσμεύεται περιορισμένη ηλιακή ενέργεια από τους συλλέκτες. Για να άρουμε το πρόβλημα αυτό, αυξάνουμε τη γωνία του συλλέκτη.

Οι μεταβολές στη γωνία του συλλέκτη γίνονται τώρα χάριν μελέτης και πειράματος. Στην καθημερινή ζωή δεν συναντούμε τέτοια μετακινούμενα συστήματα, λόγω του αυξημένου κόστους τους. Αν θέλαμε να προσαρμόσουμε το συλλέκτη μας σε μια σταθερή γωνία, αυτή θα έπρεπε να ήταν η γωνία του γεωγραφικού πλάτους του συγκεκριμένου τόπου. Αν παρατηρήσουμε τους μήνες, που συμβαίνουν οι ισημερίες, Μάρτη και Σεπτέμβρη, οι βέλτιστες γωνίες που προτείνει το μοντέλο προσεγγίζουν το γεωγραφικό πλάτος της πόλης. Λέμε προσεγγίζουν γιατί έχουμε τιμές για τη μέση ημέρα του μήνα, δηλαδή στις 15 και όχι στις 21 και 23 που έχουμε ισημερίες αντίστοιχα. Στις 15 Μάρτιου, η απόκλιση του ήλιου είναι αρνητική κι έτσι προστίθεται στη βέλτιστη γωνία. Ενώ το στις 15 Σεπτεμβρίου είναι θετική, με αποτέλεσμα να αφαιρείται από τη βέλτιστη γωνία.

Οι τιμές της ακτινοβολίας, αντιστοιχούν στη μέση μέρα κάθε μηνός, για όλη τη διάρκεια της ηλιοφάνειας. Δηλαδή, από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου και ανά 15 λεπτά έχουμε τιμές ηλιακής ακτινοβολίας σε W/m^2 . Για να επεξεργαστούμε δεδομένα ενέργειας, πήραμε το ολοκλήρωμα, δηλαδή το άθροισμα, των τιμών ακτινοβολίας σε διάρκεια μιας ημέρας πολλαπλασιασμένο με το χρονικό βήμα 0.25 της ώρας:

$$I_{monthly} = \int_{east}^{west} H dt = [sum(H)]0.25 \quad (\text{εξ. 4.1})$$

Ακολούθως, γίνεται μια μελέτη και σύγκριση της ενέργειας που παράγεται μέσω της ολικής, άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας στις τρεις διαφορετικές επιφάνειες αλλά και στις τρεις περιοχές μελέτης: Χανιά, Αθήνα, Θεσσαλονίκη. Για το σκοπό της εργασίας, θέλουμε να εξάγουμε συμπεράσματα για το ποσοστό ακτινοβολίας που αποκόπτεται από τα νέφη,

έτσι παραθέτουμε τη σύγκριση των τιμών ενέργειας σε καθαρό και ταυτόχρονα σε αληθή ουρανό. Επίσης, για το σκοπό αυτό, θα παρουσιάσουμε τα γραφήματα που δείχνουν την εξάρτηση της ισχύς της ακτινοβολίας από το ποσοστό νεφοκάλυψης (cf). Έτσι μπορέσαμε να εξαγάγουμε σχέσεις ακτινοβολίας και ποσοστού νεφοκάλυψης, που θα μας έδιναν αργότερα τη δυνατότητα να κάνουμε πρόγνωση ενέργειας αντικαθιστώντας όλες τις τιμές του ποσοστού νεφοκάλυψης. Με άλλα λόγια, με αυτές τις σχέσεις που παρήγαμε, κάναμε πρόγνωση της μέσης ετήσιας τιμής της ηλιακής ενέργειας για την περίοδο 2001-2011.

Σε δεύτερο μέρος της εργασίας έγινε μια προσπάθεια πρόβλεψης της ηλιακής ενέργειας, κάνοντας χρήση του μοντέλου «μεταφοράς» ηλιακής ακτινοβολίας δύο ημερών, BOLAM. Για να γίνει η πρόγνωση της ηλιακής ενέργειας, αξιολογούμε την αξιοπιστία των υπολογισμών του μοντέλου. Για την επαλήθευση της πρόγνωσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ των τιμών που δίνει το μοντέλο και των επίγειων μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας που έχουμε στη διάθεσή μας ανά δεκάλεπτο στο οριζόντιο επίπεδο. Οι μετρήσεις παραχωρήθηκαν από το δίκτυο του Εθνικού αστεροσκοπείου Αθηνών. Η εκτίμηση της ακτινοβολίας εξετάστηκε σε δίωρη βάση, συγκρίνοντας τις τιμές του μοντέλου με επίγειες μετρήσεις που λήφθηκαν σε 8 ραδιομετρικούς σταθμούς για το έτος 2012 (Kosmopoulos P.G., 2013). Στην εργασία αυτή, μελετήθηκε μόνο η πρόγνωση ακτινοβολίας για τις περιοχές: Χανιά, Σπάτα και Δράμα. Έτσι και η αξιολόγηση του μοντέλου έγινε για αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιώντας το NRMSE (Normalize Root Mean Square Error):

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{obs,max} - X_{obs,min}} \quad (\text{εξ. 4.2})$$

Όπου:

$X_{obs,i}$: οι τιμές που μας δίνουν τα όργανα μέτρησης

$X_{model,i}$: οι τιμές που προβλέπει το μοντέλο

N: ολικός αριθμός μετρήσεων

$X_{obs, max}$: η μέγιστη τιμή που μετράται από τα όργανα

$X_{obs, min}$: η ελάχιστη τιμή που μετράται από τα όργανα

4.3 Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας για οριζόντια και κεκλιμένη επιφάνεια

Στην προσπάθεια μας να μελετήσουμε την συλλεγόμενη ηλιακή ενέργεια σε οριζόντιες και κεκλιμένες επιφάνειες, χρειαστήκαμε δεδομένα ολικής, άμεσης, διάχυτης ακτινοβολίας σε «αληθή» (με όλες τις συνθήκες νέφωσης) και ανέφελο ουρανό για οριζόντιες και κεκλιμένες επιφάνειες. Δεδομένα τα οποία αντλήσαμε από το INSTITUTE OF ENERGY AND TRANSPORT (IET) του Ευρωπαϊκού JOIN RESEARCH CENTRE (JRC).

Η μονάδα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας του JRC στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης της κατανεμημένης παραγωγής ενέργειας, μέσω του PVGIS (*Photovoltaic Geographical Information System*), (Φωτοβολταϊκό Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών), ερευνά και επιδεικνύει τη γεωγραφική εκτίμηση των πόρων της ηλιακής ενέργειας.

Οι βάσεις δεδομένων GIS (Huld T., 2012) περιλαμβάνει :

Ευρωπαϊκή Ήπειρος

Υπάρχουν τρεις ομάδες δεδομένων με πλέγματα ανάλυσης 1km x 1km:

1. Γεωγραφικά δεδομένα: ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο, διαχειριζόμενα όρια, δεδομένα εδαφικής κάλυψης CORINE και ολική κάλυψη γης, πόλεων κλπ.
2. Χωρικά συνεχείς κλιματικές χρονοσειρές που παρουσιάζουν μηνιαίες και ετήσιες τιμές των:
 - Ημερήσιο ποσό της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (Wh/m^2)
 - Linke Turbidity (TL) ατμόσφαιρας (αδιάστατος)
 - Λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας προς την ολική (αδιάστατος)
 - Βέλτιστη γωνία των φωτοβολταϊκών για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης [μοίρες].
3. Τοπικοί μέσοι όροι για κατοικημένες περιοχές
 - Ετήσιο ποσό ολικής ακτινοβολίας (οριζόντιο, κάθετο και άριστα κεκλιμένο επίπεδο)
 - Ετήσιο ποσό αναμενόμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (οριζόντιο, κάθετο και άριστα κεκλιμένο επίπεδο)
 - Βέλτιστη γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης πάνω από ένα χρόνο.

Λεκάνη της Μεσογείου, Αφρική και Νότιο-Δυτική Ασία

Υπάρχουν δύο ομάδες δεδομένων με πλέγματα ανάλυσης 2km x 2km:

1. Γεωγραφικά δεδομένα: ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο, διαχειριζόμενα όρια, δεδομένα εδαφικής κάλυψης CORINE και ολική κάλυψη γης, πόλεων κλπ.
2. Χωρικά συνεχείς κλιματικές χρονοσειρές που παρουσιάζουν μηνιαίες και ετήσιες τιμές των:
 - Ημερήσιο ποσό της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (Wh/m^2)
 - Linke Turbidity (TL) ατμόσφαιρας (αδιάστατος)
 - Λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας προς την ολική (αδιάστατος)
 - Βέλτιστη γωνία των φωτοβολταϊκών για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης [μοίρες].

Αρχικές πηγές δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων:

Ευρωπαϊκή Ήπειρος

1. Μέσες μηνιαίες τιμές των ημερήσιων ποσών της ολικής και της διάχυτης ακτινοβολίας, που μετράται ή υπολογίζεται σε 566 επίγειους μετεωρολογικούς σταθμούς που κατανέμονται στην περιοχή. Οι μέσοι όροι αντιπροσωπεύουν την περίοδο 1981-1990. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν στο πλαίσιο του έργου (Atlas). (Χάρτης)
2. Linke Turbidity προέρχεται από την παγκόσμια βάση δεδομένων (Remund J., 2003), διαθέσιμη επίσης και στο (www.soda-is.com, 2001).



Σχήμα 4.4 επίγειοι μετεωρολογικοί σταθμοί. (Atlas)

3. Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο με χωρική ανάλυση 1x1km, προερχόμενο από δεδομένα του USGS (SRTM)(Shuttle Radar Topography Mission).
4. CORINE land cover με ανάλυση 100x100 meters.
5. Global Land Cover 2000 με ανάλυση 1x1 km. (χάρτης)
6. Βάση δεδομένων (GISCO) .
7. VMAP0 και ESRI δεδομένα (Suri M., 2007).



Σχήμα 4.5 Global land cover 2000 (Atlas)

Δεκάνη της Μεσογείου , Αφρική και Νότιο –Δυτική Ασία

1. Η βάση δεδομένων HelioClim -1 αποτελείται από ημερήσιες τιμές της ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας που υπολογίζονται από εικόνες του Meteosat Prime σε όλο το δίσκο. Οι τιμές αντιπροσωπεύουν την περίοδο 1985-2004, η αρχική χωρική ανάλυση είναι 15 x 15 arcminute , (περίπου 30x30 km στον ισημερινό). Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με τη μέθοδο Heliosat – 2.
2. Linke Turbidity προέρχεται από την παγκόσμια βάση δεδομένων (Remund J., 2003), διαθέσιμο επίσης και στο (www.soda-is.com, 2001) .
3. Ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο με ανάλυση πλέγματος 1x1km, προερχόμενο από δεδομένα του USGS (SRTM) (Shuttle Radar Topography Mission).
4. Global Land Cover 2000 με ανάλυση 1x1 km .
5. VMAP0 δεδομένα.

4.3.1 Υπολογιστικό σχήμα της βάσης δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας

Η βάση δεδομένων για την ηλιακή ακτινοβολία, αναπτύχθηκε από κλιματολογικά ομογενοποιημένα δεδομένα που είναι διαθέσιμα στο European Solar Radiation Atlas (Atlas), χρησιμοποιώντας το μοντέλο *r.sun* και τις τεχνικές *s.vol.rst* και *s.surf.rst*. Το μοντέλο *r.sun* υλοποιείται μέσα στο ανοικτό περιβάλλον του (H., 2002), με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού C. Το μοντέλο λειτουργεί σε δύο καταστάσεις. Στην πρώτη κατάσταση, για στιγμιαίο χρόνο, συνθέτει δορυφορικούς χάρτες για επιλεγμένες συνιστώσες της ακτινοβολίας (W/m^2) και γωνίες πρόσπτωσης του ήλιου ($^\circ$). Στη δεύτερη κατάσταση, ο χάρτης της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας (Wh/m^2) και της διάρκειας ηλιοφάνειας σε μία μέρα (minutes), σχεδιάζεται με την ολοκλήρωση των τιμών της ακτινοβολίας που έχουν υπολογιστεί σε ορισμένη χρονικό βήμα (dt) από την Ανατολή μέχρι τη Δύση του ήλιου. Εκτός από την ακτινοβολία σε ανέφελο ουρανό, το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει την ακτινοβολία σε νεφελώδεις καταστάσεις, με την προϋπόθεση ότι ο δείκτης καθαρότητας (Kc) είναι γνωστός.

Ο αλγόριθμος του μοντέλου υπολογίζει την άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία για ανέφελο ουρανό και δίνει την ολική ακτινοβολία για ουρανό με όλες τις συνθήκες νέφωσης σε οριζόντιες και κεκλιμένες επιφάνειες. Το ολικό ημερήσιο πόσο ακτινοβολίας, (Wh/m^2) υπολογίζεται με ολοκλήρωση των πεπερασμένων τιμών της ακτινοβολίας (W/m^2) για χρονικό διάστημα μιας ημέρας. Η πεπερασμένη τιμή της ακτινοβολίας, σε κάθε χρονικό

διάστημα dt περιλαμβάνει και την σκίαση από τοπικά χαρακτηριστικά, όπως βουνά ή λόφους, που υπολογίζεται από το *digital elevation model* με γωνιακή ανάλυση 30arc sec.

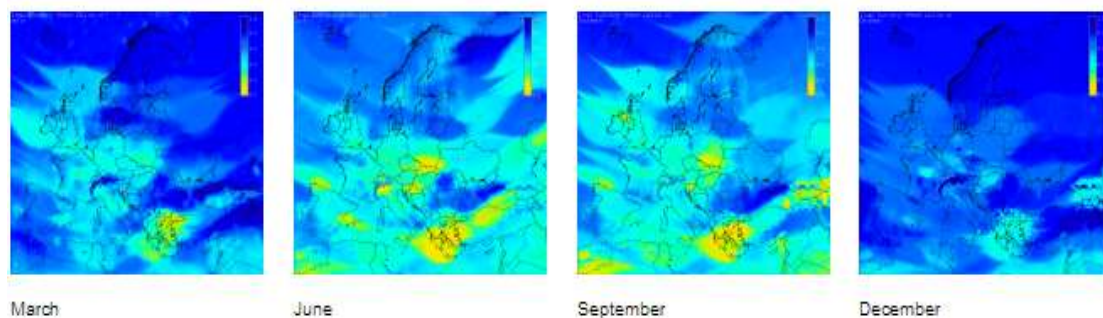
Τα δεδομένα υπολογίστηκαν σε τρία στάδια:

- α) υπολογισμός ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για ανέφελο ουρανό σε οριζόντια επιφάνεια
- β) υπολογισμός και πρόγνωση μέσω *spatial interpolation* του δείκτη καθαρότητας (clear-sky index), παραγωγή χαρτών της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια.
- γ) υπολογισμός της άμεσης και διάχυτης συνιστώσας για νεφελώδη ουρανό και παραγωγή χαρτών της ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες.

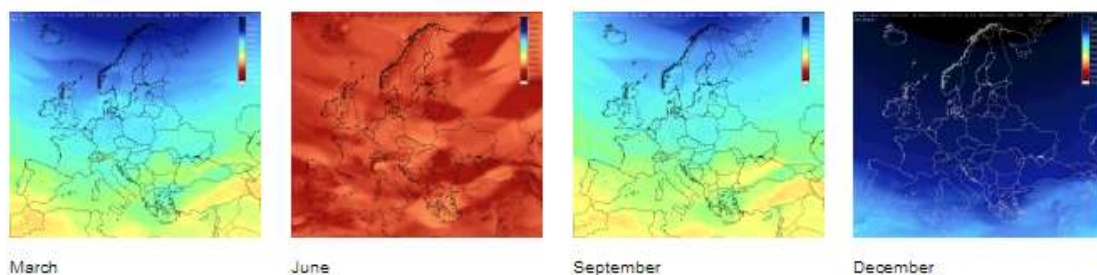
α) Ολική ακτινοβολία για καθαρό ουρανό σε οριζόντια επιφάνεια

Όλοι οι δορυφορικοί χάρτες (4500 X 5000 εικονοστοιχεία), με χωρική ανάλυση 1X1km ενσωματώθηκαν σε βάση δεδομένων GIS.

Ο παράγοντας Linke turbidity T_{LK} , είναι μια βολική προσέγγιση για να εκφράσουμε την απορρόφηση και σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας σε καθαρό ουρανό. Οι μηνιαίες μέσες τιμές του παράγοντα T_{LK} επεξεργάστηκαν ξανά από τη βάση δεδομένων της ολικής



Σχήμα 4.5 Μέσες μηνιαίες τιμές του T_{LK} (PVGIS)



Σχήμα 4.6 Μέση ημερήσια τιμή του μήνα για ολική ακτινοβολία σε καθαρό ουρανό (G_{hc}) (PVGIS)

ακτινοβολίας (Remund J., 2003), διαθέσιμα επίσης στην υπηρεσία (Atlas). Η ακρίβεια των δεδομένων φαίνεται από το $RMSE=0.7 T_{LK}$. Το πιο κρίσιμο πρόβλημα σε αυτό το στάδιο, είναι ότι ο παράγοντας T_{LK} έχει μεγάλη αβεβαιότητα και τείνει να αυξάνει. Για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση του ανάγλυφου, εφαρμόστηκε διόρθωση στην πίεση για τις τιμές T_{LK} (Remund J., 2003). Στο σχήμα 4.5 φαίνονται οι χάρτες που ετοιμάστηκαν.

Ακολούθως, υπολογίστηκαν οι μέσες ημερήσιες τιμές της ολικής ακτινοβολίας $G_{hc} [Wh/m^2]$ σε ανέφελο ουρανό (σχήμα 4.6), για τους 12 μήνες του έτους. Το χρονικό βήμα ολοκλήρωσης, για τις τιμές της ακτινοβολίας, ορίστηκε στο 0.25 της ώρας, ενώ η αρίθμηση

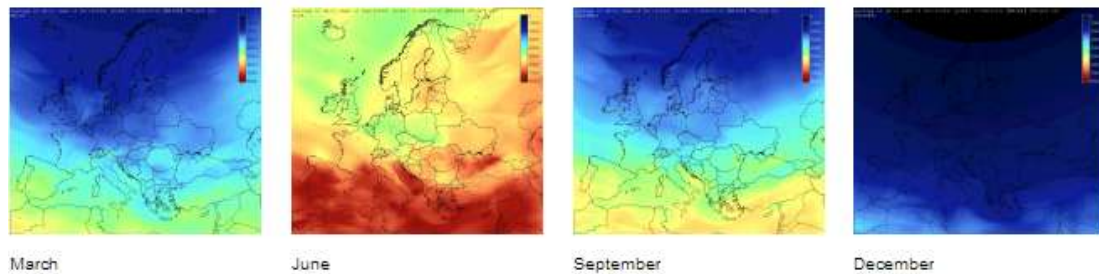
των ημερών και οι τιμές της απόκλισης του ήλιου ορίστηκαν σύμφωνα με το ESRA (J, 2000).

β) Ολική ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια.

Η ολική ακτινοβολία, σε συνθήκες ανέφελου ουρανού, υπολογίστηκε με τη χρήση της ακτινοβολίας ανέφελου ουρανού G_{hc} και του δείκτη καθαρότητας k_c . Για την ευρωπαϊκή ήπειρο, υπάρχουν κλιματολογικά δεδομένα από 566 μετεωρολογικούς σταθμούς (πηγή: (Atlas)), που δίνουν δυνατότητα σύγκρισης της γεωγραφικής θέσης και των μηνιαίων τιμών της ολικής G_{hc} , της άμεσης B_{hc} και διάχυτης D_{hc} ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια.

Για την εκτίμηση της ολικής ακτινοβολίας, σε οριζόντια επιφάνεια υπό συνθήκες νεφελώδους ουρανού, $G_h [Wh/m^2]$, οι αντίστοιχες τιμές σε καθαρό ουρανό, πολλαπλασιάστηκαν με το δείκτη καθαρότητας k_c (Beyer, 1996) (Hammer A., 1998) (Rigollier Ch) (R.C., 1961):

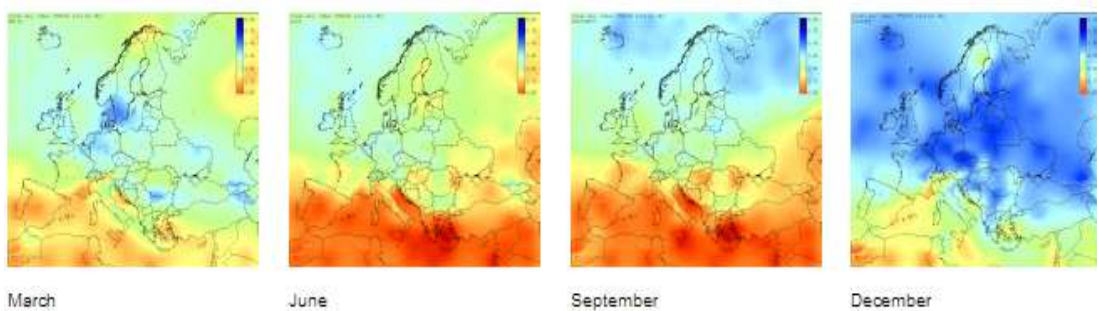
$$G_h = G_{hc} k_c \tag{εξ. 4.3}$$



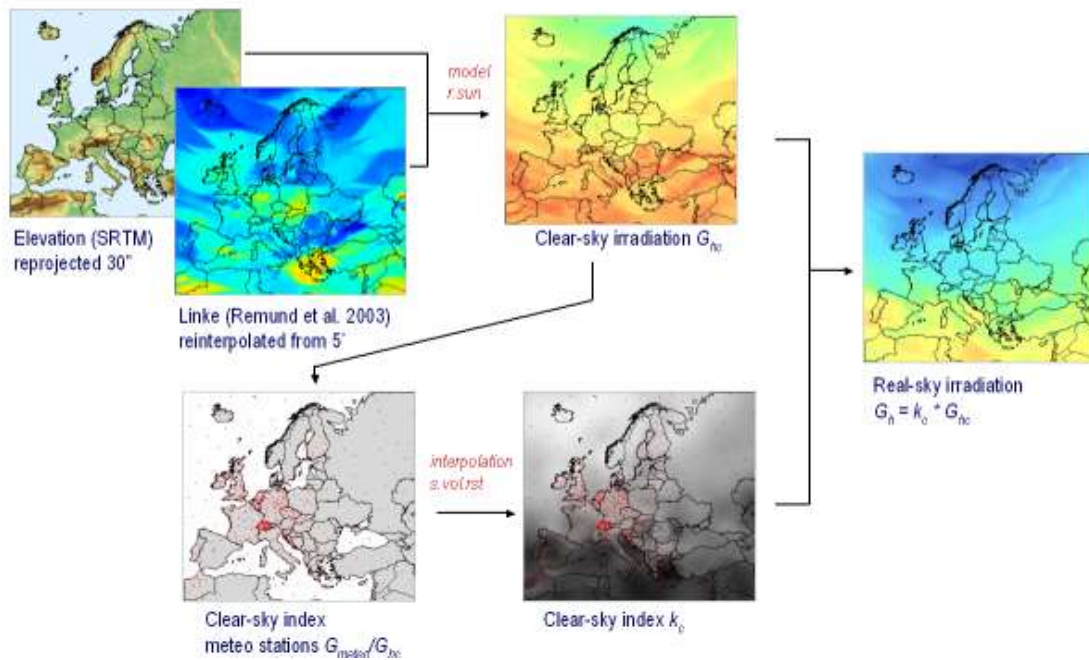
Εικόνα 4.7 Μέσες μηνιαίες τιμές της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο G_h (PVGIS)

Ο δείκτης καθαρότητας k_c , σε αυτή την περίπτωση, εκφράζει το λόγο μεταξύ των μέσων μηνιαίων τιμών της ολικής ακτινοβολίας σε συνθήκες νέφωσης και ανέφελου ουρανού. Για αριθμό επίγειων μετεωρολογικών σταθμών, ο k_c μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις ολικής ακτινοβολίας G_{hs} και υπολογιζόμενες τιμές της ολικής ακτινοβολίας σε καθαρό ουρανό G_{hc} :

$$k_c = G_{hs}/G_{hc} \tag{εξ. 4.4}$$



Εικόνα 4.8 Μέσες μηνιαίες τιμές για K_c (PVGIS)



Εικόνα 4.9 Παραστατικό σχήμα υπολογισμού της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο για νεφελώδη ουρανό (PVGIS)

γ) Ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένες επιφάνειες

Οι συνιστώσες της ακτινοβολίας επηρεάζονται με διάφορους τρόπους, από τη συννεφιά και τη σκίαση, από το ανάγλυφο του εδάφους ή από την κλίση της επιφάνειας που προσπίπτει η ακτινοβολία.

Για να υπολογιστεί η ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένες επιφάνειες G_i σε ατμόσφαιρα με συνθήκες νέφωσης, η διάχυτη D_h και η άμεση B_h συνιστώσα της ολικής ακτινοβολίας για νεφελώδη ουρανό και για δείκτη καθαρότητας k_c , έπρεπε να επεξεργαστούν χωριστά. Έτσι οδηγούμαστε στις παρακάτω σχέσεις:

$$D_h = D_{hc} k_c^d \quad (\text{εξ. 4.5})$$

$$B_h = B_{hc} k_c^b \quad (\text{εξ.4.6})$$

Ο λόγος της διάχυτης ακτινοβολίας προς την ολική D_h/G_h μεταβάλλεται ανάλογα με τη νεφοκάλυψη. Στην Ευρώπη οι τιμές του λόγου κυμαίνονται στα όρια 0.3-1.0 (G., 1980). Για πολλούς μετεωρολογικούς σταθμούς, εκτός από την ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο G_{hs} , η διάχυτη συνιστώσα D_{hs} μετριέται επίσης από τη νεφοκάλυψη, την ηλιοφάνεια ή από άλλα μετεωρολογικά δεδομένα. Οι χάρτες του λόγου D_{hs}/G_{hs} ολοκληρώθηκαν μέσω *spatial interpolation* (σχήμα 4.10). Η λευκαύγεια του εδάφους θεωρήθηκε ως σταθερή, στα 0.15. Οι χάρτες της διάχυτης και της άμεσης ακτινοβολίας με δείκτη καθαρότητας k_c μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

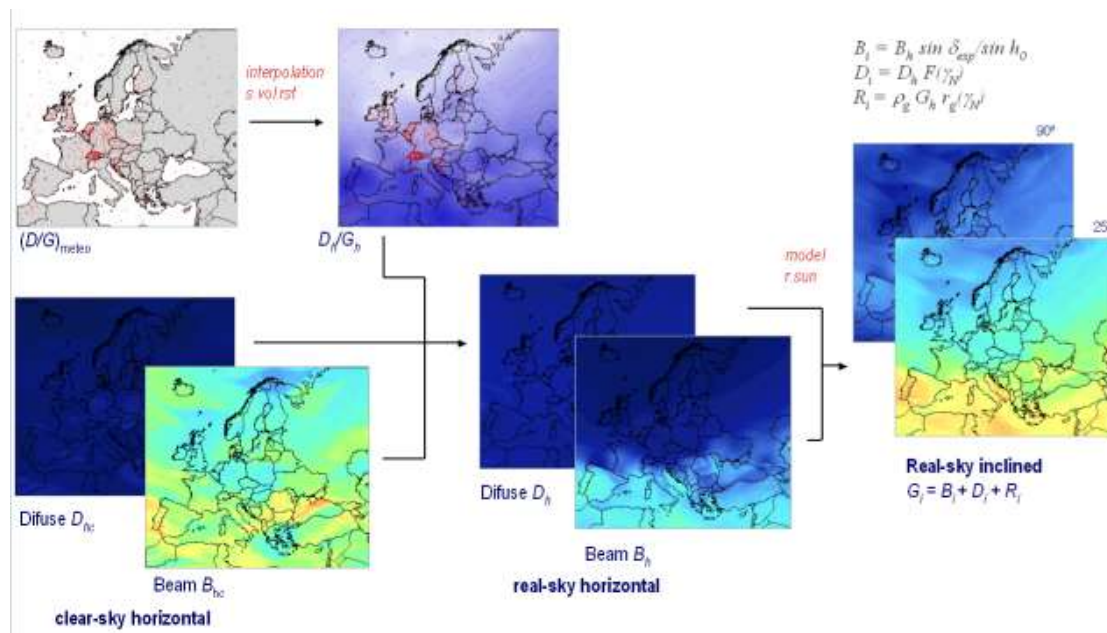
$$D_h = G_h D_{hs}/G_{hs} \quad (\text{εξ. 4.7})$$

$$B_h = G_h - D_h \quad (\text{εξ. 4.8})$$

$$k_c^d = D_h/D_{hc} \quad (\text{εξ. 4.9})$$

$$k_c^b = B_h/B_{hc} \quad (\text{εξ. 4.10}) \text{ (PVGIS)}$$

Ο δείκτης s δηλώνει ότι οι συγκεκριμένες τιμές προέρχονται από μετρήσεις μετεωρολογικών σταθμών

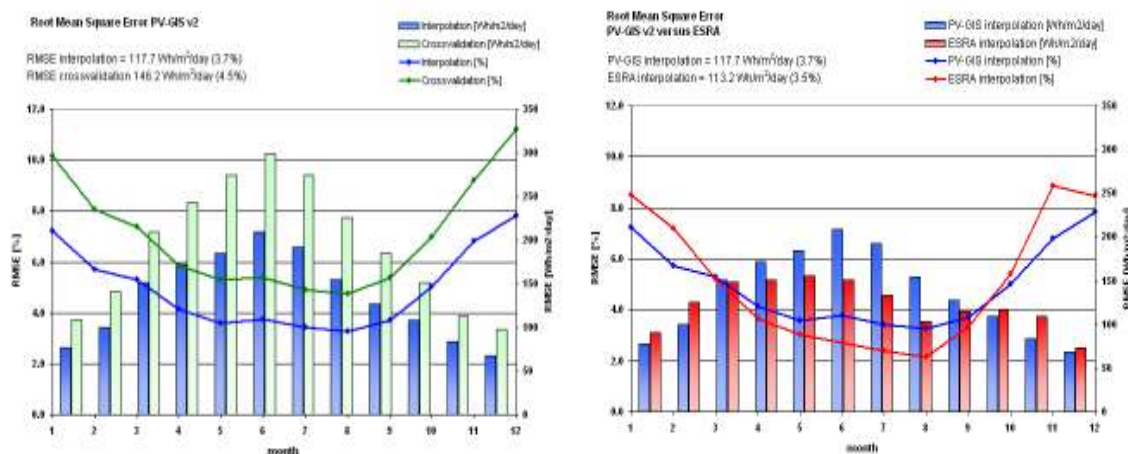


Σχήμα 4.10 Σχήμα υπολογισμού ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια (PVGIS)

4.3.2 Αξιοπιστία και σύγκριση των χαρτών του PVGIS με του ESRA

Η βάση δεδομένων του ESRA (J, 2000) αποτελείται από αρχικά δεδομένα ακτινοβολίας που μετρούνται ή υπολογίζονται από ένα δίκτυο 566 μετεωρολογικών σταθμών στην ευρωπαϊκή ήπειρο. Οι χάρτες με τις μέσες ημερήσιες τιμές, ενός μήνα, της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για οριζόντιες επιφάνειες δημιουργήθηκαν από τα αρχικά δεδομένα, με τη μέθοδο *kriging*. Η μέθοδος αυτή δεν έδειξε να δίνει υψηλή ακρίβεια λόγω της χαμηλής ανάλυσης των δορυφορικών δεδομένων και της μη ικανοποιητικής συσχέτισης με τις μετρήσεις εδάφους, ιδιαίτερα το χειμώνα.

Η ακρίβεια των τιμών του μοντέλου PVGIS αποτιμήθηκε σύμφωνα με τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό. Συγκρίνοντας τις ετήσιες μέσες τιμές της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια, το MBE (*mean bias error*) ήταν 8.9 Wh/m^2 (0.3%) και το RMSE (*root mean square error*) ήταν 118 Wh/m^2 (3.7%).



Σχήμα 4.9 Χάρτες με τα RMSE των PVGIS και ESRA (interpolation, crossvalidation) (PVGIS)

Ο υπολογισμός του RMSE για σύγκριση των αρχικών τιμών ακτινοβολίας (από μετεωρολογικούς σταθμούς) με τους χάρτες των PVGIS και ESRA παρουσιάζονται αντίστοιχα στο σχήμα 4.9. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ακτινοβολίας στο οριζόντιο από 563 σταθμούς της περιφέρειας. Το RMSE για τα αποτελέσματα μας σε σχέση με τις πραγματικές τιμές της ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας, βρίσκεται μεταξύ 68-209 Wh/m² (3.2-7.8%). Το μέγιστο του RMSE απαντάται στους χειμωνιάτικους μήνες. Η σύγκριση του ESRA *interpolation* δείχνει ότι, παρόλο που κατά μέσο όρο η ακρίβεια είναι η ίδια (η ετήσια μέση τιμή του RMSE για το ESRA είναι 113 Wh/m² δηλαδή 3.5%), το μοντέλο PVGIS είναι λίγο καλύτερο από τον Οκτώβρη μέχρι και τον Απρίλη και χειρότερο τους καλοκαιρινούς μήνες.

4.4 Δείκτης νεφοκάλυψης - Cloud Fraction

Η ηλιακή ακτινοβολία, φτάνει εξασθενημένη στον επίγειο συλλέκτη γιατί είτε απορροφάται, είτε ανακλάται εξαιτίας της σύστασης της ατμόσφαιρας της γης. Τα αέρια και τα αερολύματα που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα απορροφούν και σκεδάζουν ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας της τάξης του 20%, ενώ η ξηρά και οι ωκεανοί απορροφούν γύρω στο 50% και σκεδάζουν άλλο 4% της ακτινοβολίας. Τα νέφη που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, κατά γενικό κανόνα απορροφούν ένα 3% ενώ ανακλούν γύρω στο 20% της ηλιακής ακτινοβολίας. Βέβαια, ο παράγοντας νέφη δεν είναι σταθερός, αφού διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, από εποχή σε εποχή και ακόμα από μέρα σε μέρα.

Στην μελέτη μας αυτή έγινε μια προσπάθεια να εκτιμήσουμε το ποσό της ακτινοβολίας που εμποδίζεται να φτάσει στο συλλέκτη, λόγω της νεφοκάλυψης. Ακολουθώντας, αφού συσχέτισαμε το ποσοστό της νεφοκάλυψης με τη διαθέσιμη ενέργεια, εξάγαμε σχέσεις νεφοκάλυψης και ενέργειας, έτσι ώστε να έχουμε τη δυνατότητα πρόγνωσης της ενέργειας αν έχουμε δεδομένα νεφοκάλυψης.

Πήραμε δεδομένα νέφωσης από την πλατφόρμα δεδομένων Giovanni (Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure) της NASA που είναι διαθέσιμα

στο διαδίκτυο (GIOVANNI). Η εφαρμογή Giovanni αναπτύχθηκε από το Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (DISC) που παρέχει ένα απλό τρόπο να απεικονίζεις, να αναλύεις και να έχεις πρόσβαση στον απέραντο κόσμο των δορυφορικών δεδομένων.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν, για το ποσοστό νεφοκάλυψης, δεδομένα επιπέδου 3 (συλλογή 5) του αισθητήρα MODIS/ Terra (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) (MODIS). Ο δείκτης νεφοκάλυψης ορίζεται ως ο λόγος των νεφοκαλυμμένων εικονοστοιχείων προς τον συνολικό αριθμό εικονοστοιχείων. Επίσης αναφέρεται στο ποσοστό του ουρανού που είναι καλυμμένο από συγκεκριμένο τύπο νεφών, στη φάση που βρίσκονται τα στοιχεία του νέφους (νερό, παγοκρύσταλλοι, χιόνι κλπ), στο ύψος των νεφών, ή αναφέρεται γενικά σε όλους τους τύπους νεφών (total cloud fraction). Οι τιμές του ποσοστού νεφοκάλυψης που έχουμε στη διάθεσή μας, αφορούν σε κάθε μήνα του έτους για την περίοδο 1/2001-12/2011.

4.4.1 Τηλεπισκοπικές απεικονίσεις MODIS

Οι τηλεπισκοπικές απεικονίσεις MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer–«εικονοληπτικό φασματοραδιόμετρο μέσης χωρικής διακριτικής ικανότητας») που παρέχονται ελεύθερα από τη NASA (MODIS) είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για την παρακολούθηση της φυσικής γήινης επιφάνειας, των ωκεανών αλλά και της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας. Το πρόγραμμα MODIS διαθέτει δέκτες σε δύο διαφορετικούς δορυφόρους (Terra και Aqua) οι οποίοι καταγράφουν όλη την έκταση της γήινης επιφάνειας το πολύ δυο φορές τη μέρα. Με γεωμετρική διακριτική ικανότητα που ξεκινά από 250m και φτάνει έως και το 1km, βελτιώνει και συμπληρώνει τη δυνατότητα λήψης δεδομένων που είχαν οι επιστήμονες με τη σειρά δορυφόρων NOAA-AVHRR.

Σε αντίθεση με τους μέχρι τώρα δέκτες αυτής της κατηγορίας, οι δέκτες MODIS έχουν σχεδιαστεί να παρέχουν μετρήσεις με υψηλή φασματική διακριτική ικανότητα σε 36 διαφορετικά κανάλια, δηλαδή σε 36 διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πέρα από τα ορατά κανάλια (μπλε, πράσινο, κόκκινο), τα οποία δίνουν τη δυνατότητα για τη σύνθεση φυσικών έγχρωμων τηλεπισκοπικών απεικονίσεων, υπάρχουν κανάλια διασκορπισμένα σε περιοχές του φάσματος που καταγράφουν πληροφορία, πολύ χρήσιμη και με άμεσες εφαρμογές για την τηλεπισκόπηση. Υπάρχουν κανάλια στο υπέρυθρο φάσμα, με τα οποία γίνεται ανίχνευση και καταγραφή της βλάστησης και των υδάτινων όγκων, ενώ σε συνδιασμό με τα ορατά κανάλια, παράγεται πληροφορία για την κάλυψη και τη χρήση γης. Επίσης υπάρχουν κανάλια στο θερμικό υπέρυθρο που καταγράφουν τη θερμοκρασία τόσο της επιφάνειας του πλανήτη, όσο της ατμόσφαιρας και των ωκεανών. Επιπλέον, υπάρχουν εξειδικευμένα κανάλια που καταγράφουν το φυτοπλαγκτόν των θαλασσών, τα θαλάσσια ρεύματα, το όζον, το ύψος των νεφών στην ατμόσφαιρα κ.α.



Εικόνα 4.12 Δορυφορικά δεδομένα MODIS σε φυσικό έγχρωμο σύνθετο και σε ψευδέγχρωμο σύνθετο (www.google.com)

Όσο αφορά στην καταγραφή των φυσικών και ανακλαστικών ιδιοτήτων των νεφών, το φασματοραδιόμετρο, συνδυάζει τεχνικές στο ορατό και στο υπέρυθρο. Δεδομένα για τη φάση των στοιχείων του νέφους (πάγος, παγοκρύσταλλος, ύδωρ κλπ), για την κρίσιμη ακτίνα των στοιχείων και για το οπτικό βάθος του νέφους έχουμε από το ορατό και το κοντινό στο υπέρυθρο κανάλι. Παρέχει επίσης στοιχεία σκίασης από τα νέφη. Η θερμοκρασία στην κορυφή του νέφους, το ύψος, η φάση και ο δείκτης νεφοκάλυψης παράγονται από μεθόδους επανόρθωσης στο υπέρυθρο τόσο για ημέρα όσο και για νύχτα με γεωμετρική διακριτική ικανότητα 1km. Τέλος, το MODIS περιλαμβάνει την ανακλαστικότητα των σωρείτων (cirrus) στο ορατό με χωρική ανάλυση 1km, το οποίο είναι χρήσιμο για την αφαίρεση της σκέδασης των συγκεκριμένων νεφών που οφείλεται στην αντανακλαστικότητα του εδάφους.

4.5 μοντέλο BOLAM

Στο Β μέρος της εργασίας, κάνουμε πρόβλεψη της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιώντας το μοντέλο «μεταφοράς» ηλιακής ακτινοβολίας δύο ημερών, BOLAM. Έτσι, Μας δίνεται η δυνατότητα να εξάγουμε συμπεράσματα για την επίδραση των νεφών σε ημερήσια βάση. Για την πρόγνωση της ηλιακής ενέργειας, αξιολογούμε την αξιοπιστία των υπολογισμών της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο (GHI) δύο ημερών, που παρέχονται άμεσα από το μοντέλο για την περιοχή της Ελλάδας. Για την επαλήθευση της πρόγνωσης χρησιμοποιήθηκαν οι επίγειες μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας ανά δεκάλεπτο στο οριζόντιο επίπεδο (GHI), που παραχωρήθηκαν από το δίκτυο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Η εκτίμηση της ακτινοβολίας



Εικόνα 4.13 Εξεταζόμενη περιοχή (Kosmopoulos P.G., 2013)

εξετάστηκε σε δίωρη βάση, συγκρίνοντας τις τιμές του μοντέλου με επίγειες μετρήσεις που λήφθηκαν σε 8 ραδιομετρικούς σταθμούς για το έτος 2012.

Η περιοχή που εξετάζουμε καλύπτει την περιοχή της Ελλάδας, στο νότιο μέρος της Βαλκανικής χερσονήσου. Η περιοχή έχει έκταση περίπου 132,000km και περιλαμβάνει περίπου 13,700km² της ακτογραμμής παρουσιάζοντας μια ποικίλη τοπογραφία. Ιδιαίτερα το βόρειο τμήμα (Φλώρινα και Δράμα) είναι μια σχεδόν ομοιογενής περιοχή με ποικίλα βουνά με μια μέση ανύψωση γύρω στα 1500 m.a.s.l. . Αυτή η περιοχή εκτείνεται γύρω από την περιοχή απορροής των ποταμών Αξιού και Στρυμόνα. Το νότιο μέρος (Χανιά, Παραλία και Κρανίδι) είναι παραλιακές περιοχές με καθαρά μεσογειακό κλίμα. Η κεντρική περιοχή μελέτης (Άρτα, Αμφίκλεια, Σπάτα) παρουσιάζει μια πολύ σύνθετη τοπογραφία, με απότομες κλίσεις που φτάνουν τα 1000 m.a.s.l.. Ολόκληρη η περιοχή βρίσκεται στη ζώνη μετάπτωσης από τη θερμοκρασία στα υποτροπικά κλίματα, παρουσιάζοντας ένα μεσογειακό κλίμα επηρεασμένο από τους Αζόρες. Η βροχόπτωση υπάρχει από το Φθινόπωρο μέχρι την Άνοιξη κυρίως λόγω των μετωπικών συστημάτων του Ατλαντικού. Εντούτοις, τα τοπογραφικά και γεωγραφικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν τα καιρικά φαινόμενα και το κλίμα. Ιδιαίτερα στην υπό μελέτη περιοχή συνυπάρχουν μια από τις πιο κρύες περιοχές στο Βορρά (Φλώρινα) και μια από τις πιο βροχερές περιοχές (Άρτα) στη δύση με μια ημερημική περιοχή στον νότο (Χανιά).

Τα αποτελέσματα έχουν αξιολογηθεί με βάση επίγειων στοιχείων που συλλέγονται σε οκτώ ραδιομετρικούς σταθμούς. Αυτοί οι σταθμοί επιλέχθηκαν με δύο κριτήρια. Αρχικά λόγω της θέσης τους, που καλύπτει ποικιλία περιοχών της Ελλάδας και επειδή αντιπροσωπεύουν, μερικώς τουλάχιστον, τη μεταβλητότητα του κλίματος που αναφέρθηκε πιο πάνω. Οι σταθμοί είναι οι : Δράμα, Φλώρινα, Άρτα, Αμφίκλεια, παραλία, Σπάτα, Κρανίδι και Χανιά (εικόνα 3.3.1). Στην παρούσα μελέτη θα παρουσιαστούν ενδεικτικά μόνο οι σταθμοί στα Σπάτα, στη Δράμα και στα Χανιά. Ο σταθμός στα Σπάτα αντιστοιχεί στον αερολιμένα της Αθήνας (23.90°E, 38.00°N; 140 m.a.s.l.) και είναι τοποθετημένος 35km έξω από την πόλη. Είναι στο ανατολικό μέρος της Αττικής που παρουσιάζει μια ετήσια βροχόπτωση περίπου στα 380mm. Ο σταθμός της Δράμας (24.12°E, 41.12°N; 260 m.a.s.l.) βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης και παρουσιάζει ένα ηπειρωτικό κλίμα με εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες το χειμώνα και ετήσια βροχόπτωση περίπου στα 500mm. Ο σταθμός των Χανίων (24.08°E, 35.53°N; 50 m.a.s.l.) βρίσκεται στο νότιο μέρος της περιοχής, στο δυτικό μέρος της Κρήτης. Κατά συνέπεια, παρουσιάζει ένα ήπιο μεσογειακό κλίμα με βροχόπτωση γύρω στα 600mm.

Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις είναι οι Davis Wireless Vantage Pro2 Plus κατασκευασμένες από τα Davis Instruments, Hayward, California, United, States of America. Ένα πρόσθετο δίκτυο σταθμών που δίνουν μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας έχει στηθεί στο δίκτυο NOA και διανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την Ελλάδα (εικόνα). Τα όργανα Davis δίνουν πίεση, θερμοκρασία, βροχόπτωση, ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου, σχετική υγρασία, δείκτη υπεριώδους ακτινοβολίας και ηλιακή ακτινοβολία. Οι μετρήσεις καταγράφονται και είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο (METEO). Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας.

Η ηλιακή ακτινοβολία μετριέται από πυρανόμετρα με ανιχνευτές σιλικόνης που καλύπτουν το διάστημα μήκους κύματος 400-1100 , με ανάλυση 1 W/m² και ρυθμό δειγματοληψίας 50sec (Ryder C.L., 2011). Τα όργανα έχουν βαθμονομηθεί χρησιμοποιώντας

για πρότυπο αναφοράς τις παρατηρήσεις του μοντέλου BOLAM και έχει βρεθεί ότι έχουν μια ακρίβεια της τάξης του 5%. Αυτό αποτελεί το συνολικό λάθος, τυχαίο και συστηματικό μαζί. Σε αυτή τη μελέτη δεν έχουμε καθιερώσει τα συστηματικά λάθη των μεμονωμένων αισθητήρων. Οι μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο (GHI) συλλέχθηκαν κάθε 10 λεπτά.

Η αξιολόγηση έγινε με τη χρήση του RMSE (Root Mean Square Error) και NRMSE (Normalize Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{N}}$$
$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{obs,max} - X_{obs,min}}$$

Όπου:

$X_{obs,i}$: οι τιμές που μας δίνουν τα όργανα μέτρησης

$X_{model,i}$: οι τιμές που προβλέπει το μοντέλο

N: ολικός αριθμός μετρήσεων

$X_{obs, max}$: η μέγιστη τιμή που μετράται από τα όργανα

$X_{obs, min}$: η ελάχιστη τιμή που μετράται από τα όργανα

(Kosmopoulos P.G., 2013)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ

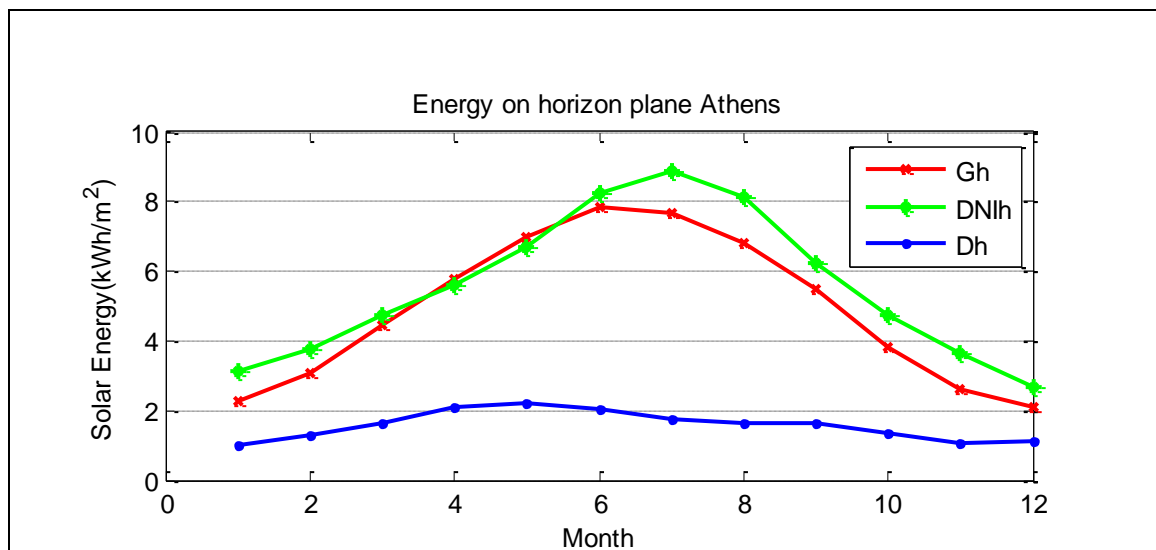
5.1 Εισαγωγή

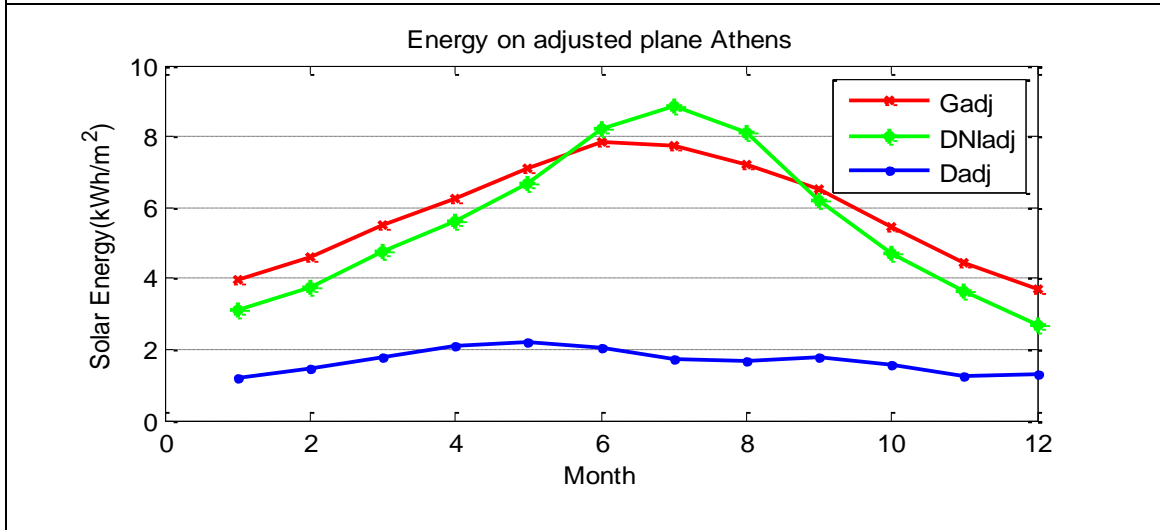
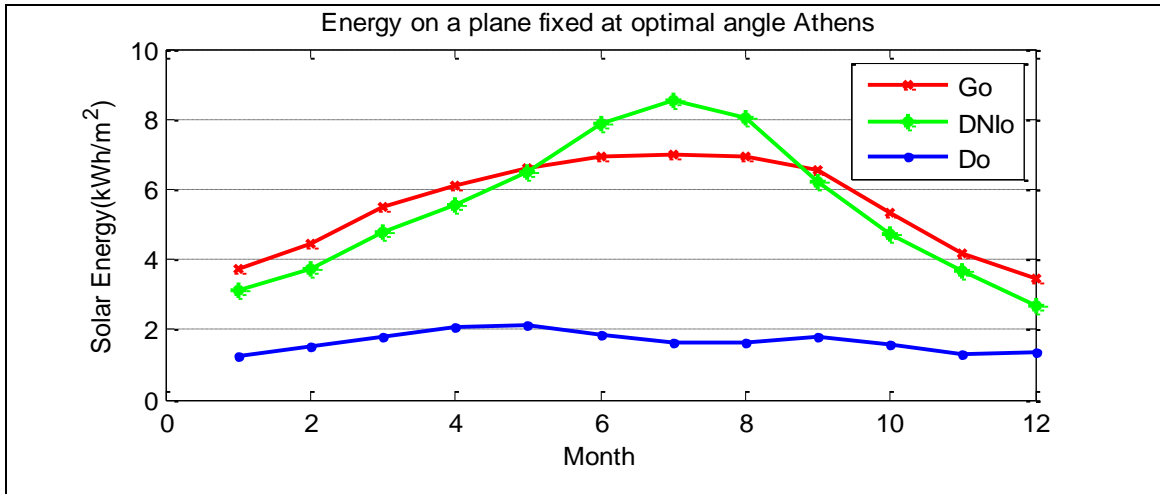
Σκοπός της εργασίας ήταν η μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας και πως θα μπορούσαμε να έχουμε τη βέλτιστη εκμετάλλευση της προς όφελος του ανθρώπου και του περιβάλλοντος. Σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε ο παράγοντας νέφη γιατί όπως θα δούμε , αποκόπτει μεγάλο κομμάτι της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσα από τη μελέτη των διαθέσιμων δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας στα κεκλιμένα επίπεδα. Τα αποτελέσματα θα συζητηθούν και έτσι θα εξάγουμε συμπεράσματα όσο αφορά τη βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, την επίδραση των νεφών στη συλλογή της ηλιακής ενέργειας σε ετήσια, μηνιαία και ημερήσια βάση.

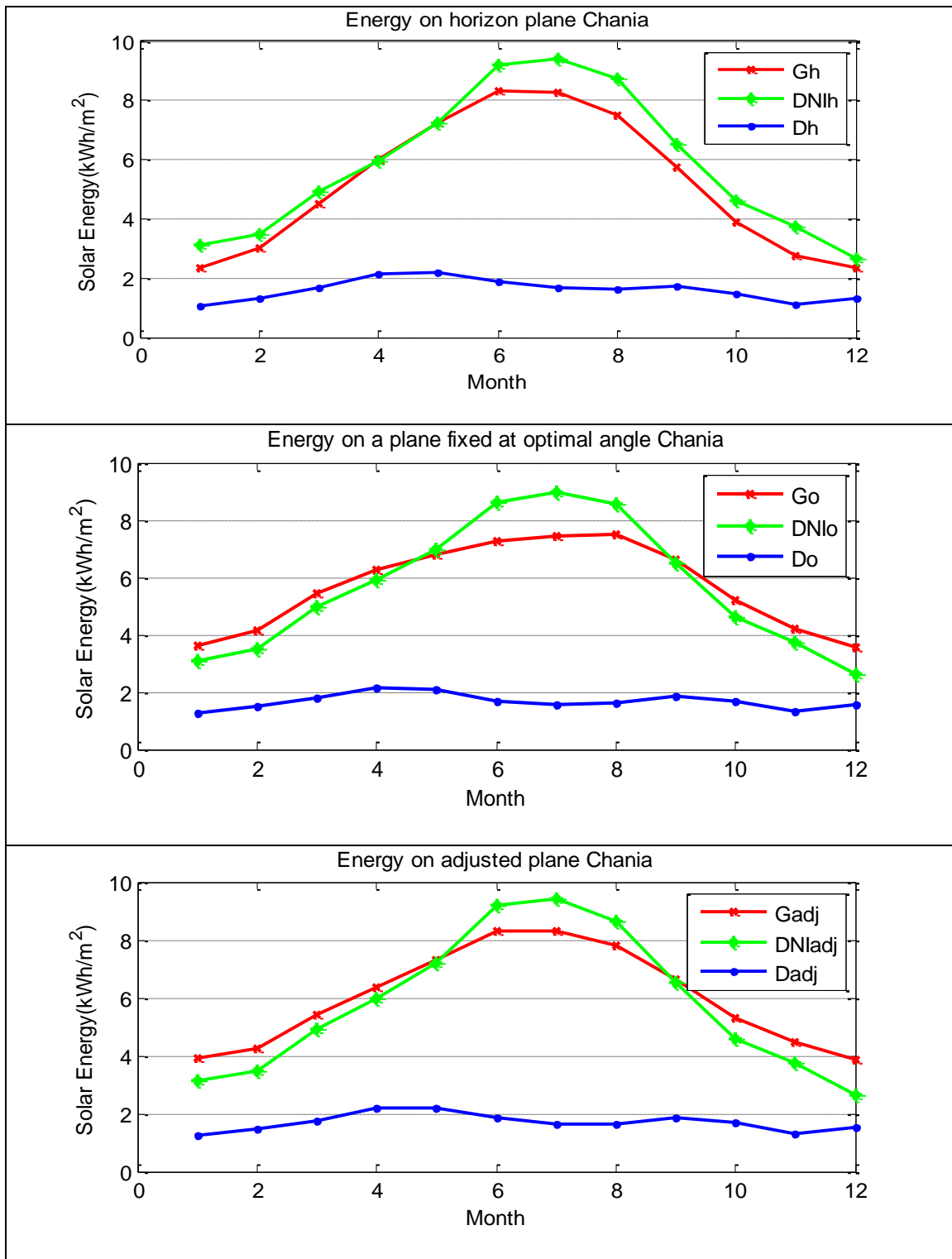
5.2 Μελέτη τιμών ηλιακής ενέργειας

Πίνακας 5.1: Ενέργεια σε οριζόντιο, και κεκλιμένα επίπεδα στην Αθήνα

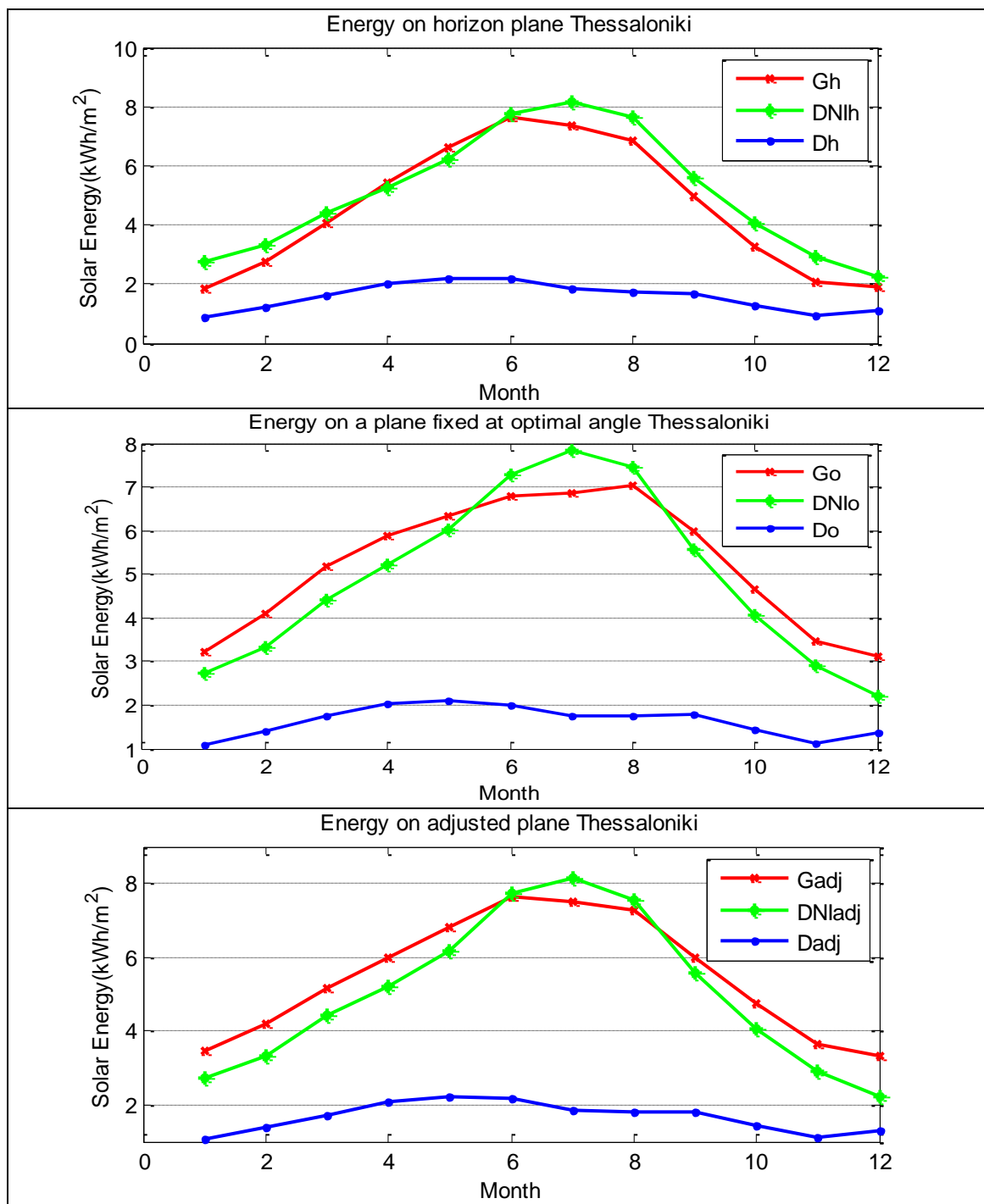




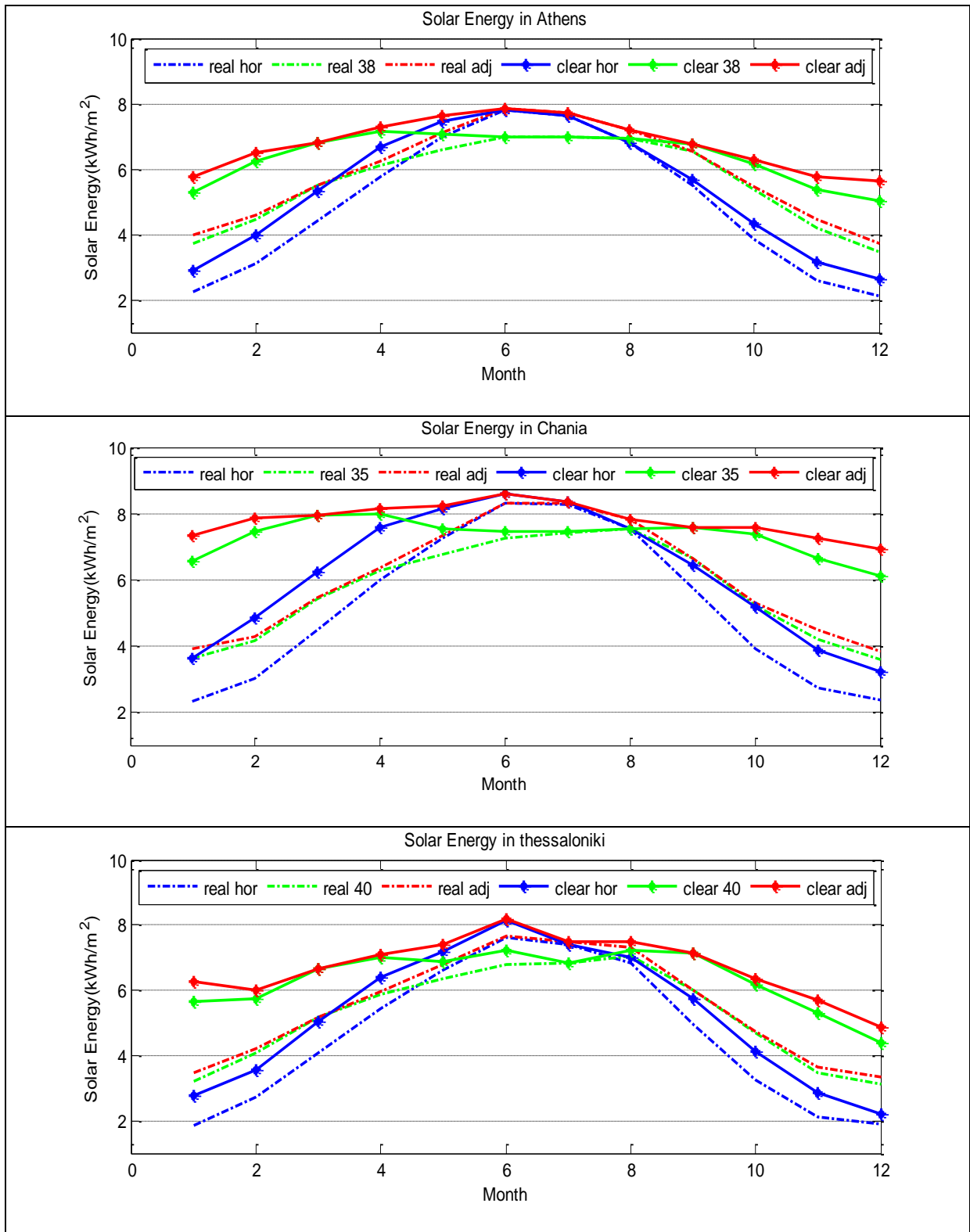
Πίνακας 5.2: Ενέργεια σε οριζόντιο και κεκλιμένα επίπεδα στα Χανιά



Πίνακας 5.3: Ενέργεια σε οριζόντιο και κεκλιμένα επίπεδα στη Θεσσαλονίκη



Πίνακας 5.4 Συνοπτική απεικόνιση



Πίνακας 5.5 Ετήσιο πόσο ενέργειας που συλλέγουν οι επιφάνειες κάθε πόλης

ΑΘΗΝΑ	GLOBAL *10³ (kWh/m²)	DIRECT *10³ (kWh/m²)	CLEAR *10³ (kWh/m²)
0	1.725	1.928	1.875
38	1.942	1.928	2.192
Adj.	2.022	1.928	2.291
ΧΑΝΙΑ	GLOBAL *10³ (kWh/m²)	DIRECT *10³ (kWh/m²)	CLEAR *10³ (kWh/m²)
0	1.809	2.011	2.108
35	1.961	2.011	2.468
Adj.	2.073	2.011	2.626
ΘΕΣΣΑ- ΛΟΝΙΚΗ	GLOBAL *10³ (kWh/m²)	DIRECT *10³ (kWh/m²)	CLEAR *10³ (kWh/m²)
0	1.611	1.746	1.822
40	1.809	1.746	2.164
Adj.	1.899	1.746	2.280

Η ενέργεια που έρχεται απευθείας από τον ήλιο στον συλλέκτη (άμεση ακτινοβολία) υπερτερεί της ολικής ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών στα κεκλιμένα επίπεδα και για τις τρεις πόλεις. Τους υπόλοιπους μήνες, η ενέργεια από την ολική ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη. Επίσης, και για τις τρεις πόλεις, η άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια όλου του έτους εκτός Απριλίου και Μάιου. Η διάχυτη ακτινοβολία, εμφανίζεται ελάχιστα αυξημένη στα κεκλιμένα επίπεδα, λόγω του γεγονότος ότι εμπερικλείεται και η ανακλώμενη ακτινοβολία από το έδαφος. Στην περίπτωση της Θεσσαλονίκης, η διάχυτη, σχετικά με τις άλλες δύο πόλεις, είναι μεγαλύτερη λόγω των αυξημένων νεφών της περιοχής. Σε όλες τις περιπτώσεις, βλέπουμε να βρίσκεται σε ισχύ η σχέση $O = A \cos \Theta + D$. Όπου O – η ολική ακτινοβολία, A - άμεση ακτινοβολία, D - διάχυτη ακτινοβολία και Θ – ζενίθια γωνία.

Η ενέργεια που συλλέγεται από κάθε επίπεδο σε ετήσια βάση παρουσιάζεται στον πίνακα 5.5. Σε γενικές γραμμές, το επίπεδο που μεταβάλλεται η γωνία του, σε σχέση με τη θέση του ήλιου κάθε μήνα, συλλέγει το μεγαλύτερο ποσό ηλιακής ενέργειας. Ακολουθεί το επίπεδο που είναι σταθερά κεκλιμένο σε γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος της πόλης. Συγκεκριμένα, για την Αθήνα είναι κεκλιμένο κατά 38° , για τα Χανιά κατά 35° και για τη Θεσσαλονίκη κατά 40° . Παρατηρείται ότι η συλλεγόμενη ενέργεια μειώνεται όσο το γεωγραφικό πλάτος της εκάστοτε πόλης αυξάνεται. Συγκεκριμένα, η ενέργεια που συλλέγεται στην κινούμενη κεκλιμένη επιφάνεια των Χανιών παρουσιάζεται αυξημένη κατά 2.5% από την ενέργεια που συλλέγεται στην Αθήνα και κατά 8.4% από την ενέργεια της Θεσσαλονίκης. Η ενέργεια που συλλέγεται από την σταθερά κεκλιμένη επιφάνεια των Χανιών παρουσιάζεται ελάχιστα αυξημένη (1%) από την αντίστοιχη επιφάνεια στην Αθήνα. Ενώ από την κεκλιμένη επιφάνεια της Θεσσαλονίκης παρατηρείται ότι συλλέγει κατά 7.8% περισσότερη ενέργεια. Το οριζόντιο επίπεδο στα Χανιά συλλέγει κατά 4.7% περισσότερη ενέργεια από ότι στην Αθήνα και κατά 11% από ότι στη Θεσσαλονίκη.

Από τη συνοπτική απεικόνιση στον πίνακα 5.4, κατά τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Ιούλιο το οριζόντιο συλλέγει μεγαλύτερα ποσά, από ότι το κεκλιμένο σε σταθερή γωνία και προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό το κεκλιμένο επίπεδο που μεταβάλλουμε τη γωνία του. Αυτό δείχνει τη σημαντικότητα της γωνίας κλίσης του συλλέκτη. Τους συγκεκριμένους μήνες η γωνία ύψους ηλίου είναι πάρα πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα, οι ακτίνες να προσπίπτουν ακόμα και πίσω από το συλλέκτη ο οποίος είναι κεκλιμένος υπό μία γωνία ίση ή μεγαλύτερη του γεωγραφικού πλάτους.

Επίσης από τον πίνακα 5.4 μπορούμε να συγκρίνουμε την ενέργεια που συλλέγεται από τις επιφάνειες υπό συνθήκες νέφωσης και υπό ανέφελο ουρανό. Η μείωση στην ενέργεια λόγω νεφοκάλυψης, γίνεται εμφανής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους εκτός των καλοκαιρινών μηνών, ειδικά Ιούνιο και Ιούλιο που η ύπαρξη νεφών είναι ελάχιστη. Τα νέφη εμποδίζουν μεγαλύτερο ποσοστό ακτινοβολίας να φτάσει στα κεκλιμένα επίπεδα, ειδικά σε αυτό που μεταβάλλεται η γωνία, παρά στο οριζόντιο.

Για την Αθήνα, τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο παρατηρείται μια μείωση στην ενέργεια της τάξης του 30% στα κεκλιμένα επίπεδα. Αυτό το ποσοστό απώλειας ενέργειας μειώνεται μέχρι που ελαχιστοποιείται τον Ιούνιο, αφού είναι ο μήνας με τα λιγότερα σύννεφα. Συνεχίζοντας, οι απώλειες αυξάνονται μέχρι και το Δεκέμβριο που φτάνουν το αρχικό 30%. Στο οριζόντιο επίπεδο, παρατηρείται μια μείωση στην ενέργεια, για τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο, της τάξης του 20%, ενώ ακολούθως το Μάιο πέφτει στο 7% και

προσεγγίζει την περίπτωση του καθαρού ουρανού τον Ιούνιο. Μέχρι το Δεκέμβριο έχουμε μείωση στην ενέργεια κατά 20% και πάλι.

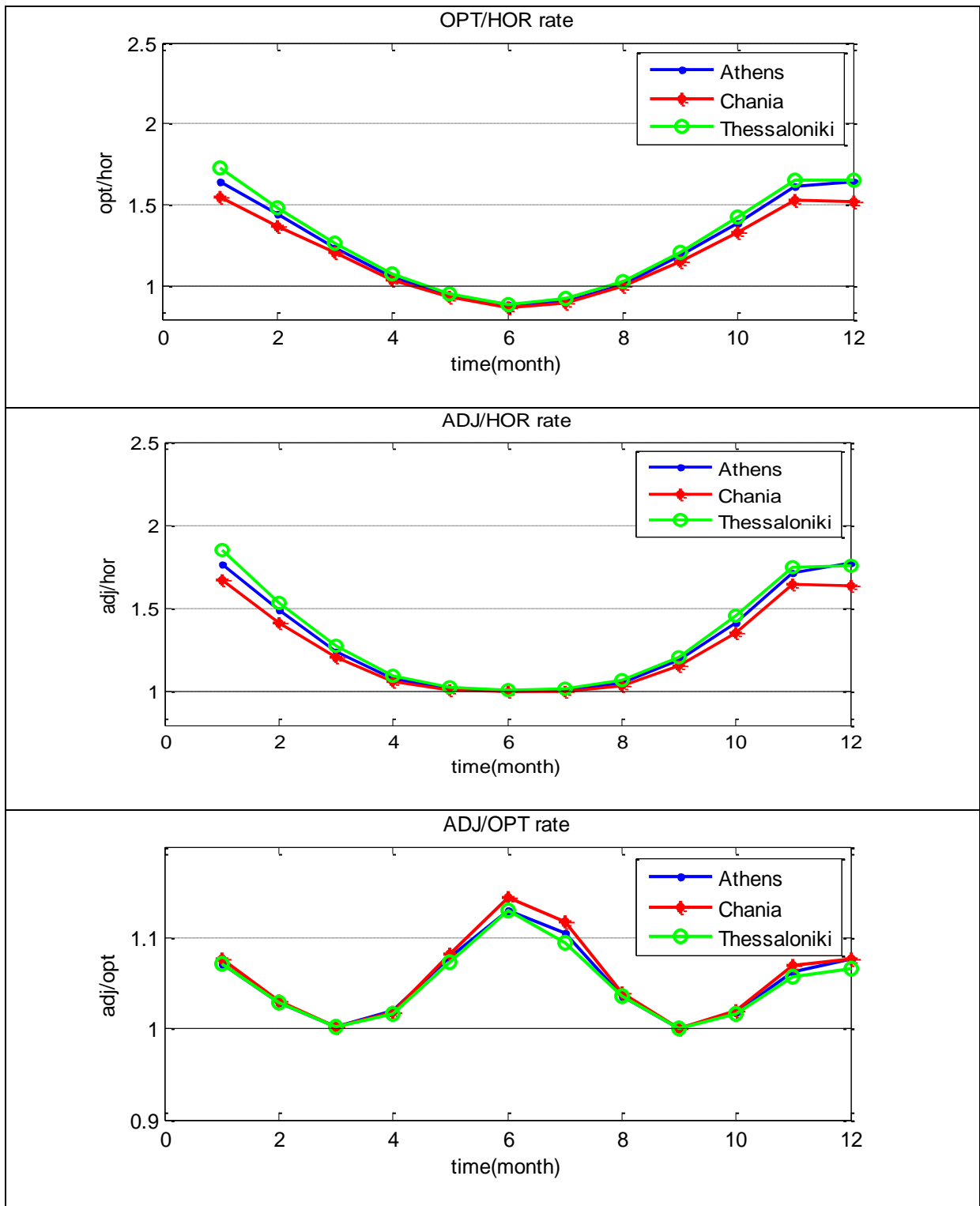
Για περίπτωση των Χανιών, στα κεκλιμένα επίπεδα, παρατηρείται μια μείωση που φτάνει ακόμα και το 45%, ειδικά τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο ενώ. Αυτό το ποσοστό απώλειας μειώνεται μέχρι που ελαχιστοποιείται τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Στη συνέχεια, πάλι αυξάνονται οι απώλειες, μέχρι το μήνα Δεκέμβριο που φτάνουν το αρχικό 45% και για τα δύο επίπεδα. Στο οριζόντιο επίπεδο, παρατηρείται μια μείωση στην ενέργεια, για τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο, της τάξης του 35%, μειώνεται μέχρι που προσεγγίζει την περίπτωση του καθαρού ουρανού, τον Ιούλιο. Μέχρι το Δεκέμβριο έχουμε 27% μείωση.

Για την περίπτωση της Θεσσαλονίκης παρατηρούμε ότι η κατανομή της συλλεγόμενης ενέργειας είναι πιο ανώμαλη, σε σχέση με τις προηγούμενες πόλεις, λόγω της θέσης της. Η Θεσσαλονίκη βρίσκεται βόρεια σε γεωγραφικό πλάτος 40° , με το κλίμα της να χαρακτηρίζεται μεσογειακό αλλά με εμφανή την ηπειρωτική επίδραση. Υπάρχει αυξημένη νεφοκάλυψη και βροχόπτωση σχετικά με Αθήνα και Χανιά.

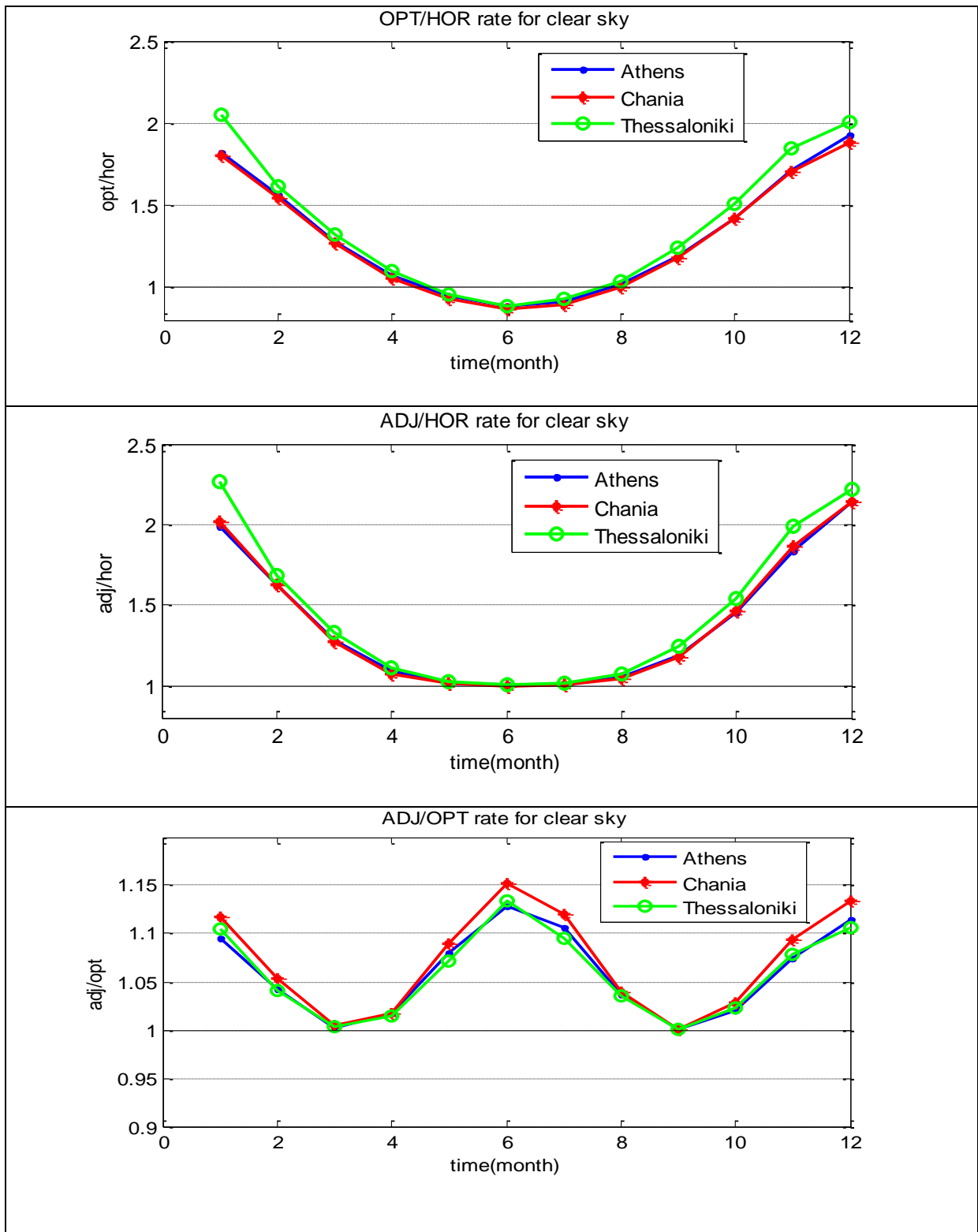
Η μείωση λόγω νεφοκάλυψης, στο κεκλιμένο επίπεδο με μεταβαλλόμενη γωνία, φτάνει το 45% για τον Ιανουάριο, ενώ για το Φεβρουάριο και Δεκέμβριο η μείωση είναι της τάξης του 30%.. Ακόμα και το μήνα Μάιο, έχουμε μείωση στην ενέργεια κατά ένα ποσοστό 8%. Στο επίπεδο που κλίνει κατά 40° , η μείωση στην ενέργεια, βρίσκεται περίπου στα ίδια επίπεδα για Ιανουάριο και Φεβρουάριο: 43% και 29% αντίστοιχα. Στο οριζόντιο επίπεδο, η μείωση είναι της τάξης του 30% για τον Ιανουάριο ενώ για το Φεβρουάριο είναι κάπου στο 23%, ακολούθως παρατηρείται μείωση μέχρι που ελαχιστοποιείται κατά τον Ιούλιο. Το Δεκέμβριο η ελάττωση είναι κάπου στο 13%.

Από τα αποτελέσματα αυτά μπορούμε να καταλάβουμε πόσο καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν τα νέφη όσο αφορά στην ακτινοβολία που καταφέρνει να φτάσει στη γη. Αργότερα, όταν εντάξουμε τον παράγοντα νέφη θα είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε ποσοστιαία την ακτινοβολία που αποκόπτεται σε συνθήκες νεφελώδους ουρανού.

Πίνακας 5.6 Λόγοι ακτινοβολίας σε ουρανό με όλες τις συνθήκες νέφωσης



Πίνακας 5.7 Λόγοι ακτινοβολίας σε ανέφελο ουρανό



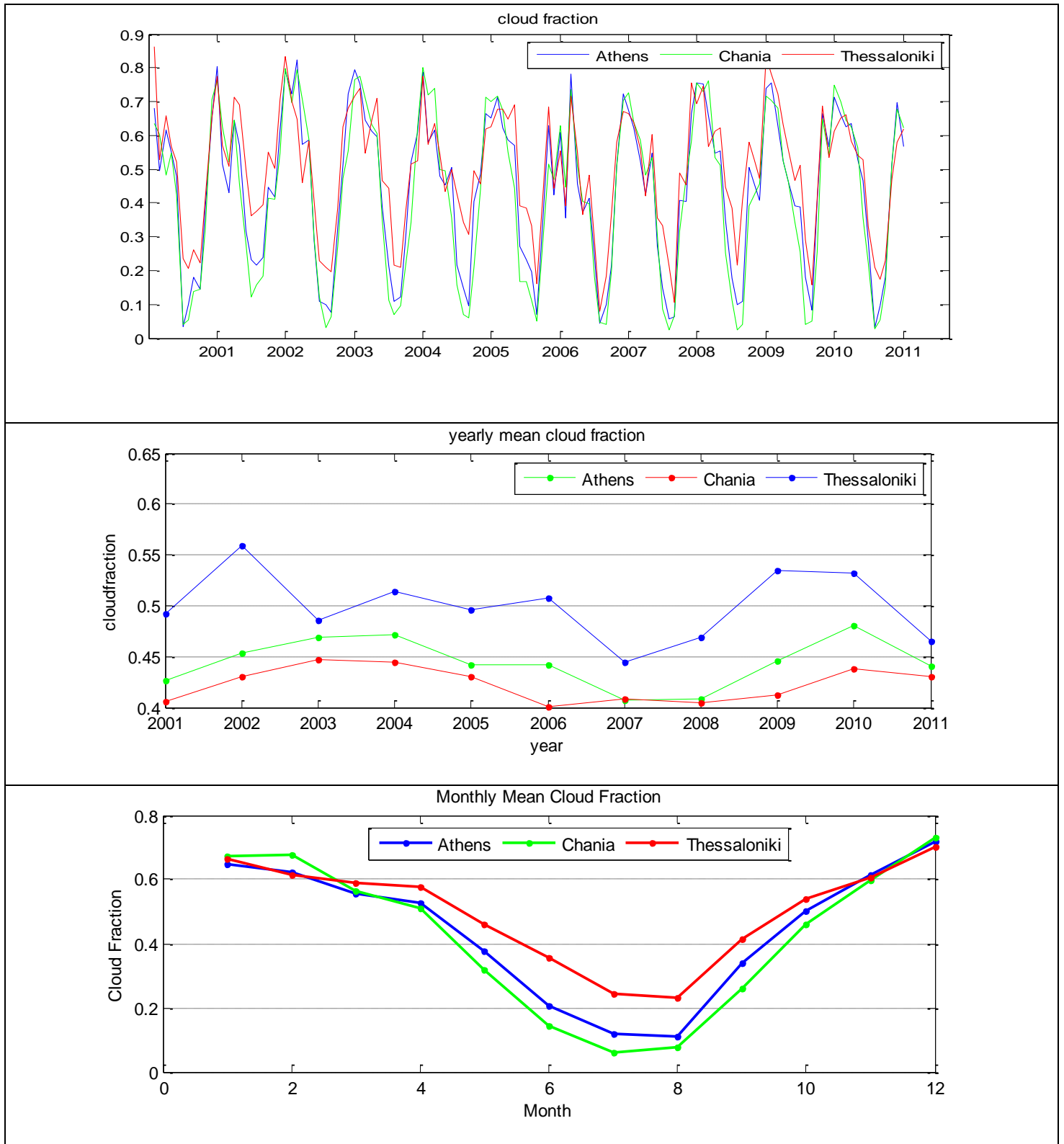
Στους πίνακες 5.6 και 5.7 απεικονίζονται για ανέφελο και ουρανό με όλες τις συνθήκες νέφωσης οι λόγοι της ενέργειας :

- OPT/HOR, ο λόγος της ενέργειας που συλλέγεται στο κεκλιμένο επίπεδο στη γωνία του γεωγραφικού πλάτους προς την ενέργεια που συλλέγεται στο οριζόντιο επίπεδο
- ADJ/HOR, ο λόγος της ενέργειας που συλλέγεται στο κεκλιμένο επίπεδο που μεταβάλλεται η γωνία του προς την ενέργεια που συλλέγεται στο οριζόντιο
- ADJ/OPT, ο λόγος της ενέργειας που συλλέγεται στο κεκλιμένο επίπεδο στη γωνία του γεωγραφικού πλάτους προς την ενέργεια που συλλέγεται στο κεκλιμένο επίπεδο που η γωνία κλίσης του μεταβάλλεται.

Ο λόγος opt/hor για ουρανό με συνθήκες νέφωσης στην Αθήνα φτάνει την τιμή 1.8 το μήνα Δεκέμβριο, ενώ τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο παίρνει τιμές κάτω της μονάδας. Δηλαδή το οριζόντιο συλλέγει περισσότερη ενέργεια την περίοδο αυτή. Επίσης για τα Χανιά ο λόγος φτάνει το 1.5 ενώ για τη Θεσσαλονίκη το 1.7. Γενικά οι λόγοι της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης είναι πάρα πολύ κοντά, ενώ ο λόγος των Χανιών διαφοροποιείται ελαφρώς προς πιο μειωμένες τιμές. Σε καθαρό ουρανό οι τιμές του λόγου opt/hor αυξάνονται για όλους σχεδόν τους μήνες εκτός των : Μάη, Ιούνη, Ιούλη που είναι επίσης κάτω της μονάδας, και για τις τρεις πόλεις. Για την Αθήνα ο λόγος προσεγγίζει το 2, ενώ για τα Χανιά φτάνει το 1.8, για τους μήνες αυτούς. Για τη Θεσσαλονίκη επίσης φτάνει το 2 για το μήνα Ιανουάριο και Δεκέμβρη. Σε καθαρό ουρανό οι λόγοι παρατηρούνται αυξημένοι λόγω της απουσίας των νεφών ειδικά για τους μήνες: Γενάρη , Φλεβάρη, Νοέμβρη και Δεκέμβρη. Ο λόγος adj/hor κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών από 1 μέχρι 1.8 για ουρανό με νέφωση ενώ για καθαρό ουρανό οι τιμές απλώνονται από 1 μέχρι 2.2. Η Θεσσαλονίκη με ελάχιστη διαφορά εμφανίζει τους μεγαλύτερους λόγους σε σχέση με τις άλλες δύο πόλεις. Ο λόγος adj/opt μειώνεται από το Ιανουάριο μέχρι τον Μάρτιο, όπου ξεκινά να αυξάνεται μέχρι τον Ιούνιο. Ακολούθως μειώνεται μέχρι τον Σεπτέμβρη και αρχίζει πάλι την άνοδο μέχρι το Δεκέμβριο. Για όλες τις πόλεις η μέγιστη τιμή του λόγου συναντάται κατά τον Ιούνιο. Στην Αθήνα η μέγιστη τιμή φτάνει το 1.12, στα Χανιά φτάνει το 1.15 ενώ στη Θεσσαλονίκη το 1.12. Για την Αθήνα ο λόγος παρουσιάζει και τιμές ελάχιστα κάτω της μονάδας κάτι που δείχνει ότι το σταθερά κεκλιμένο επίπεδο αποδίδει περισσότερο. Αυτό γίνεται για τους μήνες: Φεβρουάριο, Μάρτιο, Απρίλιο Σεπτέμβρη και Δεκέμβριο. Σε γενικές γραμμές όμως οι τιμές του λόγου είναι πάρα πολύ κοντά, αφού αν δούμε κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών από 0.98 μέχρι 1.12. Τα Χανιά εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές του λόγου, ακολουθεί η Θεσσαλονίκη και τέλος η Αθήνα. Σε καθαρό ουρανό , η διαφοροποίηση των τιμών του λόγου ανά περιοχή ομαλοποιείται. Σε ανέφελο ουρανό, φαίνεται ότι τους μήνες που συμβαίνουν οι ισημερίες, έχουμε ίση τιμή του λόγου. Δηλαδή το μήνα Μάρτιο και Σεπτέμβριο. Οι τιμές κυμαίνονται από 1 μέχρι 1.15.

Συνεχίζουμε τη μελέτη χρησιμοποιώντας τώρα τα δεδομένα νεφοκάλυψης. Στον πίνακα 5.8 φαίνεται η χρονοσειρά του δείκτη νεφοκάλυψης για όλα τα χρόνια και ακολουθεί το γράφημα με τις μέσες μηνιαίες τιμές του cf για τους 12 μήνες του χρόνου καθώς και οι μέσες ετήσιες τιμές για τα χρόνια 2001-2011. Ακολούθως εξάγουμε σχέσεις μεταξύ cf και ενέργειας σε κάθε επίπεδο, έτσι ώστε να γίνει η πρόγνωση ενέργειας αργότερα, χρησιμοποιώντας τα αρχικά δεδομένα του δείκτη για τη περίοδο 2001-2011.

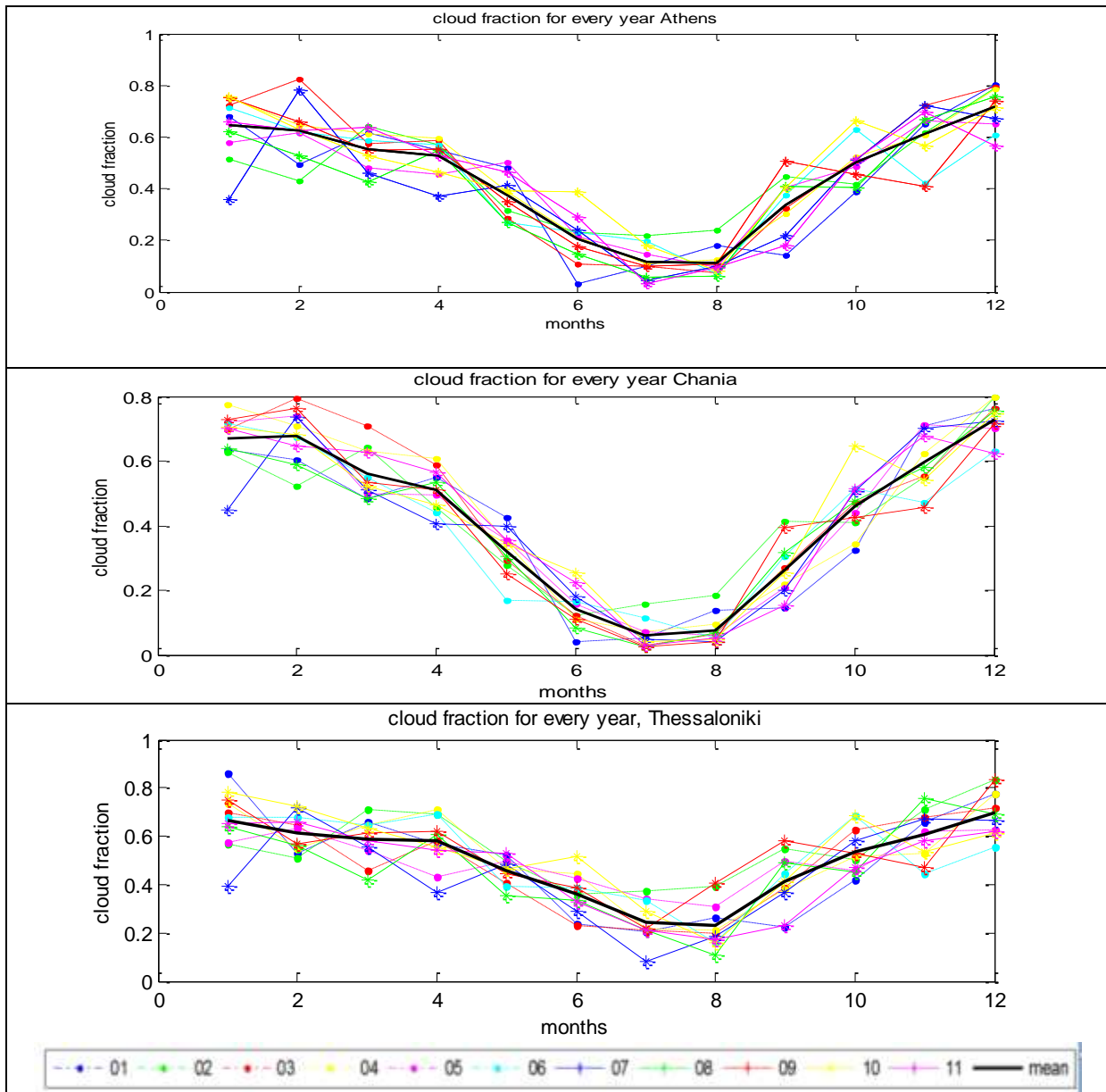
Πίνακας 5.8 Δείκτης νεφοκάλυψης για τα έτη 2001-2011 και μέση μηνιαία τιμή ποσοστού νεφοκάλυψης



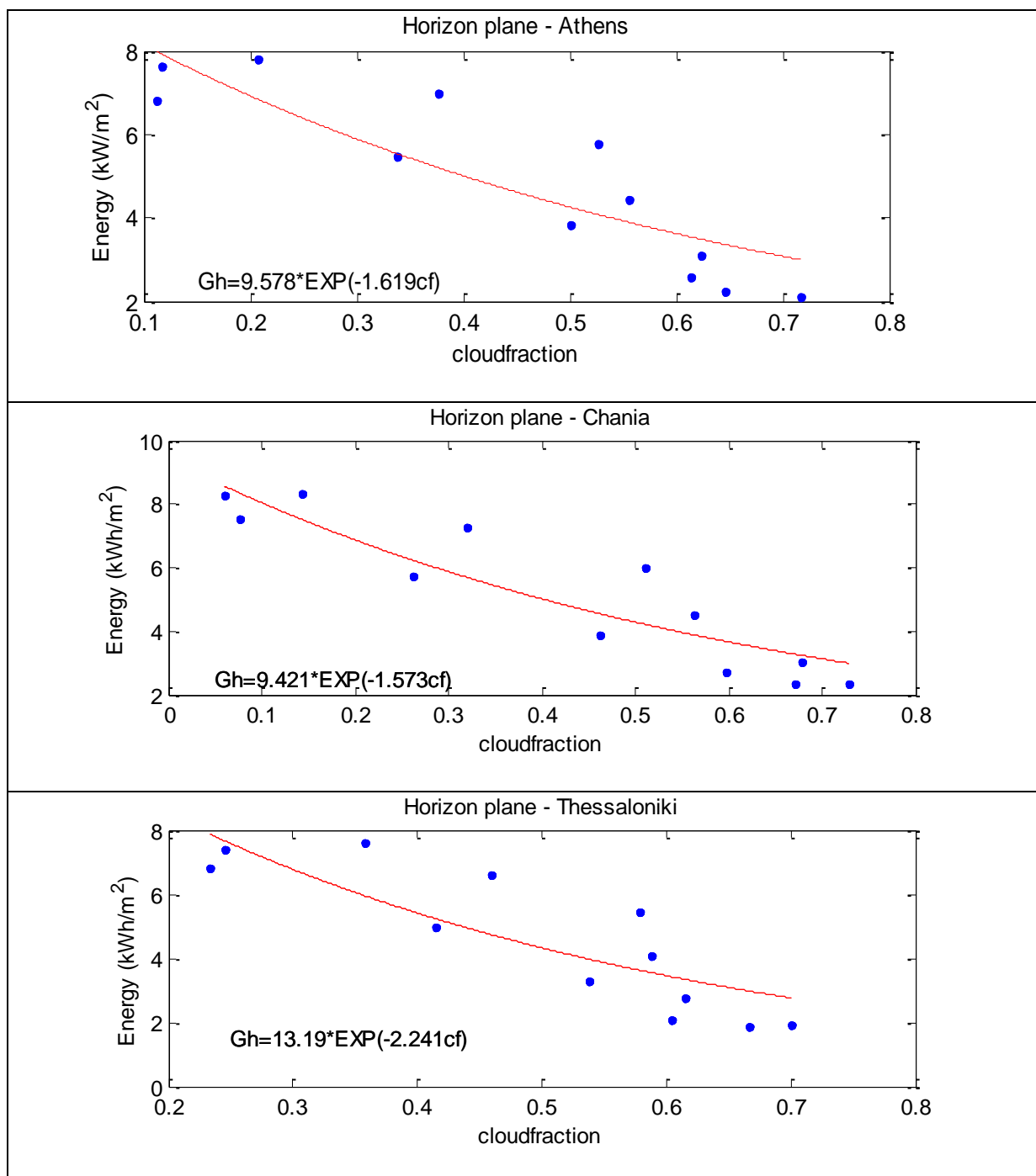
Από την κατανομή της μέσης ετήσιας τιμής φαίνεται καθαρά ότι η Θεσσαλονίκη διαθέτει μεγάλη διακύμανση στο δείκτη νεφοκάλυψης από χρόνο σε χρόνο. Η Αθήνα και τα Χανιά ακολουθούν μια πιο ομαλή κατανομή. Από την κατανομή των μέσων μηνιαίων τιμών

φαίνεται ότι οι αυξημένες τιμές του δείκτη συναντούνται τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες ενώ οι καλοκαιρινοί και ανοιξιάτικοί έχουν να δώσουν πιο μειωμένες τιμές. Οι τιμές στη Θεσσαλονίκη έχουν πιο μικρό εύρος απ' ότι στις άλλες πόλεις, δηλαδή από 0.23 (Αύγουστος) μέχρι 0.7 (Δεκέμβριος). Για την Αθήνα κυμαίνεται από 0.11 (Ιούλιος) μέχρι 0.72 (Νοέμβριος), το ελάχιστο για τα Χανιά φτάνει λίγο πιο χαμηλά, δηλαδή από 0.06 (Ιούλιος) μέχρι 0.73 (Δεκέμβριος). Πιο κάτω παραθέτουμε αναλυτικά το δείκτη νεφοκάλυψης για κάθε έτος.

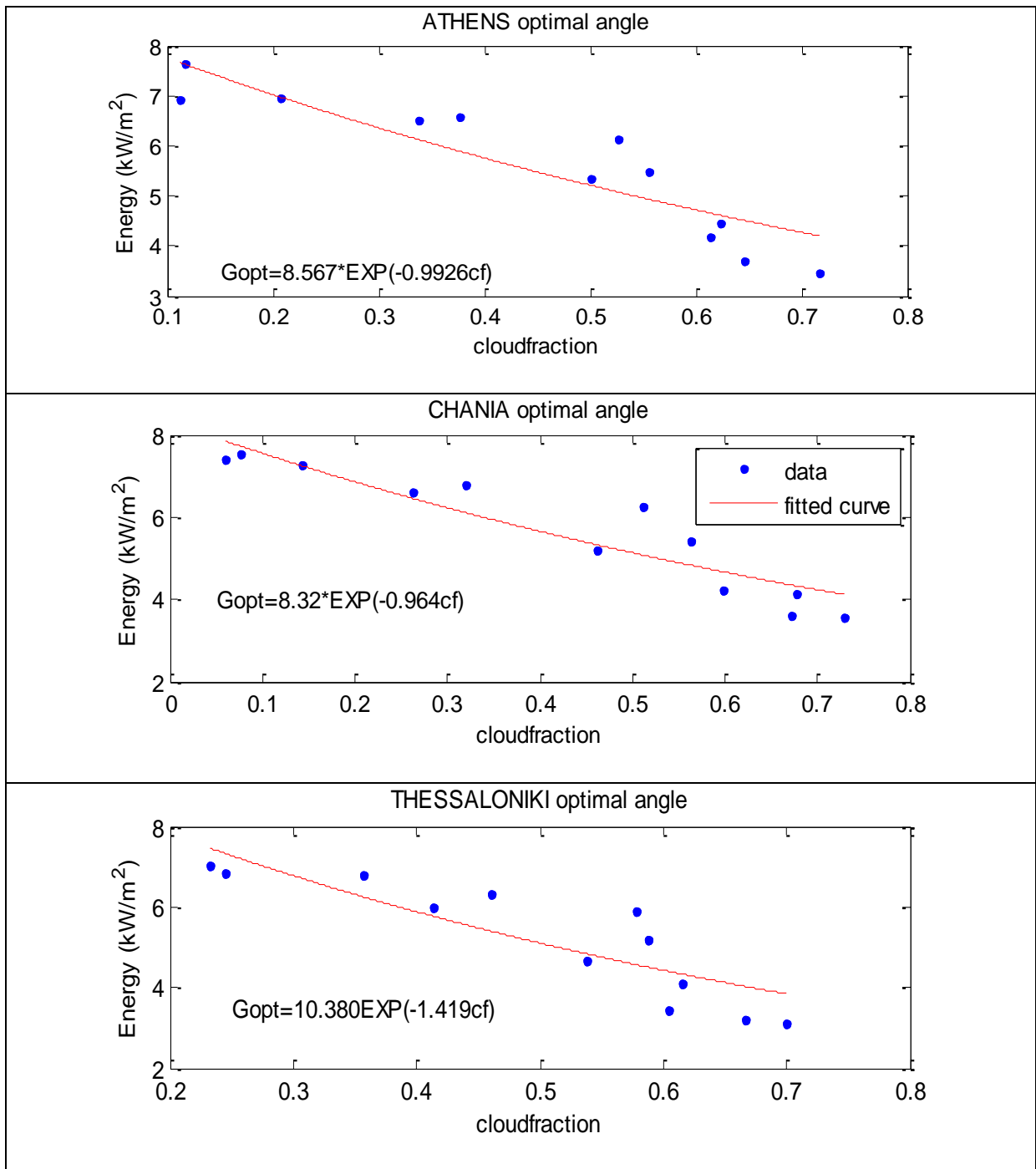
Πίνακας 5.9 Δείκτης νεφοκάλυψης για κάθε χρόνο: α) Αθήνα, β)Χανιά, γ)Θεσσαλονίκη



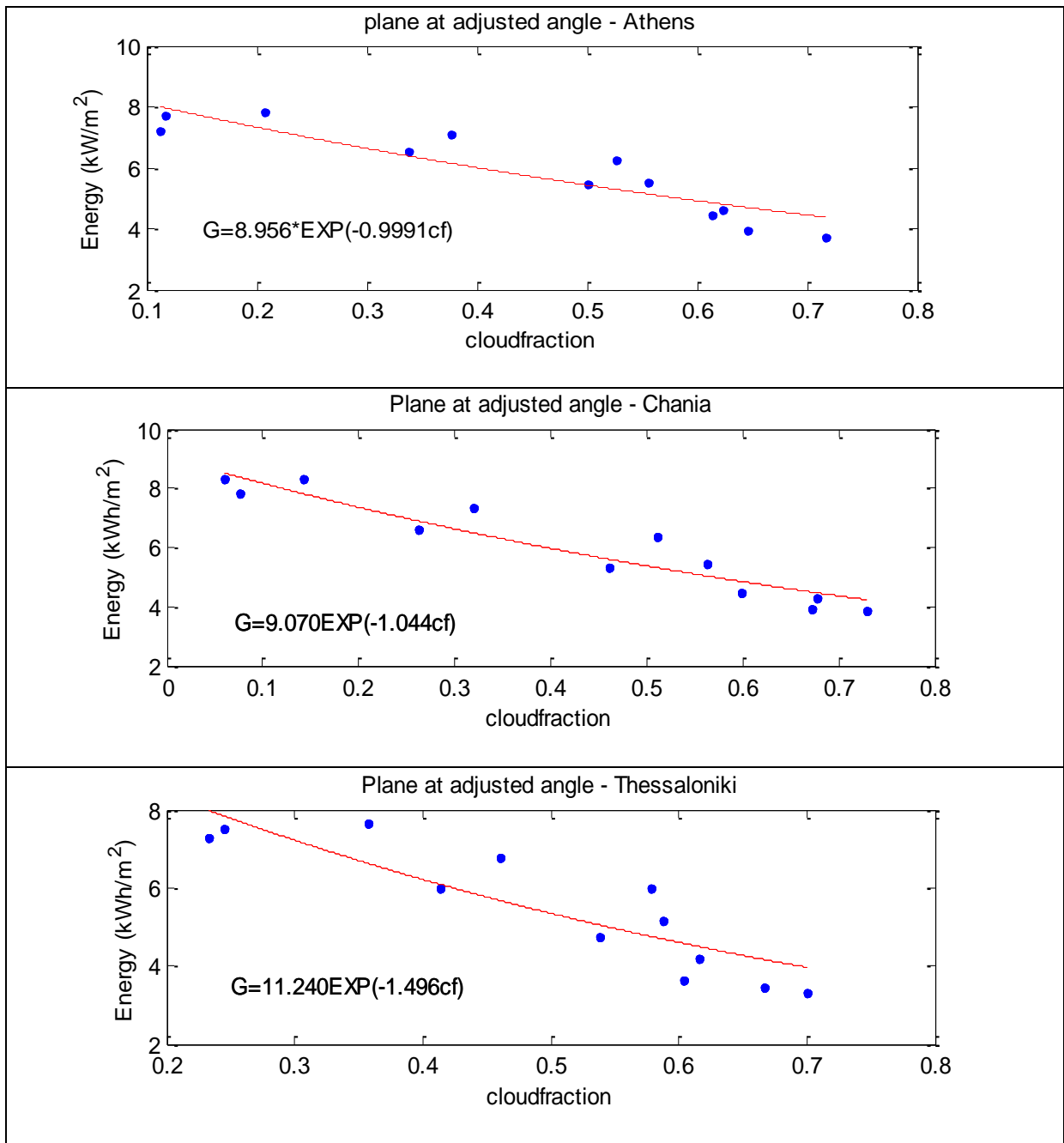
Πίνακας 5.10 Συσχέτιση δείκτη νεφοκάλυψης και ενέργειας για το οριζόντιο επίπεδο



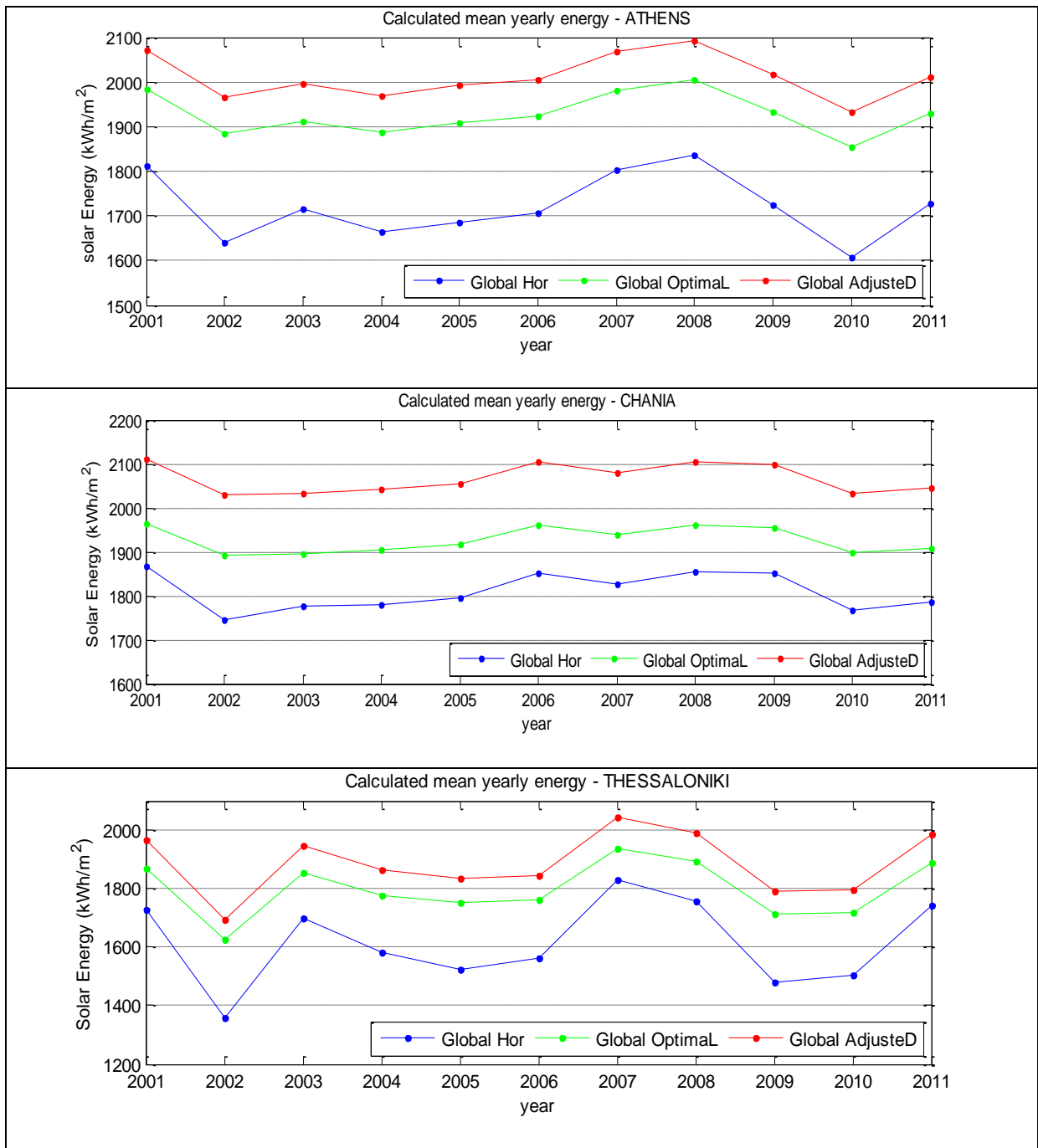
Πίνακας 5.11 Συσχέτιση δείκτη νεφοκάλυψης και ενέργειας για το κεκλιμένο επίπεδο σε σταθερή γωνιά



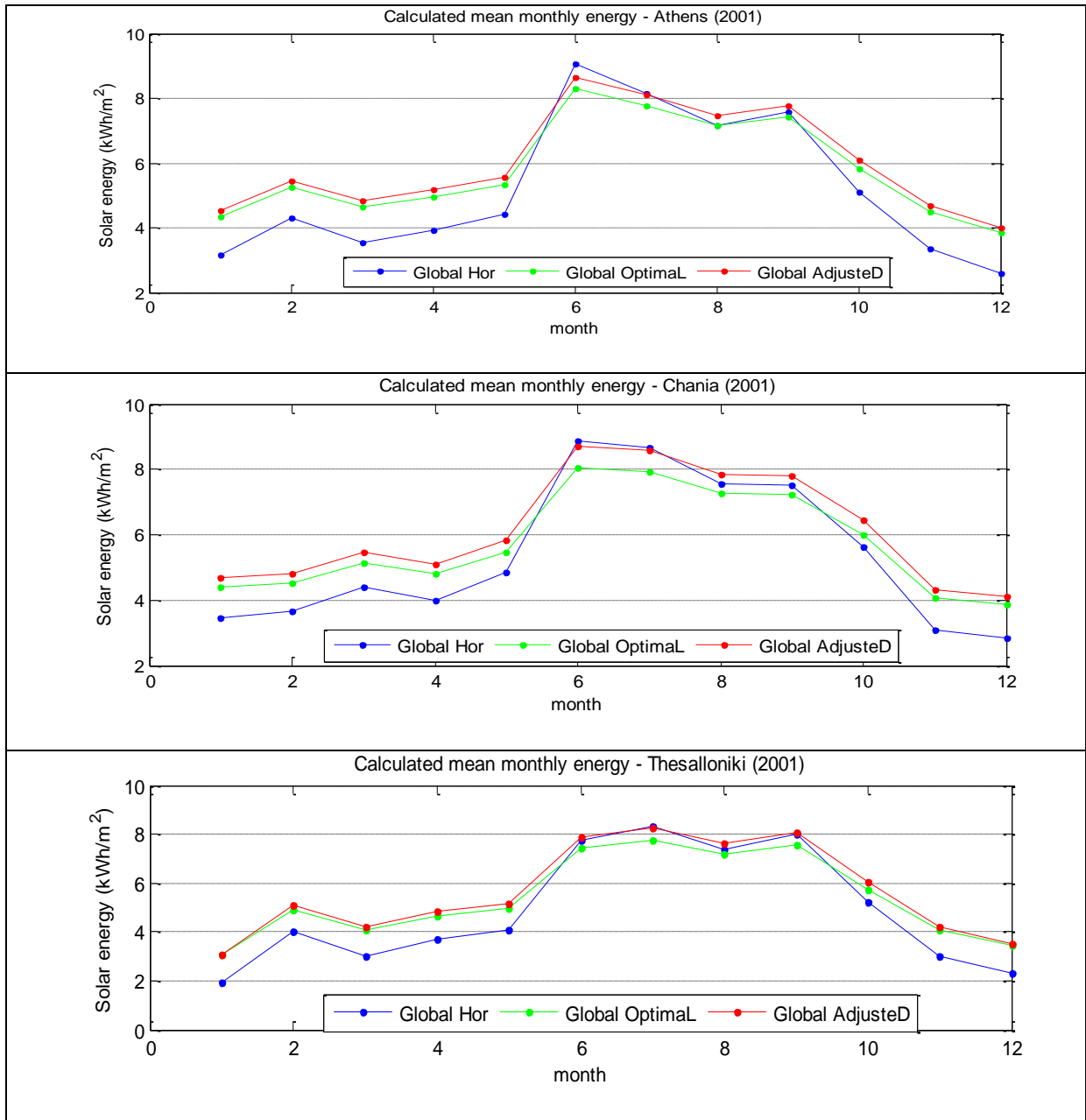
Πίνακας 5.12 Συσχέτιση δείκτη νεφοκάλυψης και ενέργειας για το μεταβαλλόμενο επίπεδο (adjusted)



Πίνακας 5.13 Πρόγνωση ενέργειας με χρήση δείκτη νεφοκάλυψης



Πίνακας 5.14 Πρόβλεψη μέσης μηνιαίας τιμής – 2001 α) Αθήνα, β)Χανιά, γ)Θεσσαλονίκη



Συσχετίζουμε την ενέργεια με το δείκτη νεφοκάλυψης και παράγουμε μια εκθετική σχέση της μορφής $R=a*\exp(cf)$. Όλες οι εξισώσεις φαίνονται πιο κάτω.

Ενέργεια στο οριζόντιο επίπεδο:

- Αθήνα: $G_h=9.578\exp(-1.619cf)$
- Χανιά: $G_h=9.419\exp(-1.573cf)$
- Θεσσαλονίκη: $G_h=13.1900\exp(-2.241cf)$

Ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο σε σταθερή γωνιά (optimal):

- Αθήνα: $G_o=8.567\exp(-0.9926cf)$
- Χανιά: $G_o=8.32\exp(-0.964cf)$
- Θεσσαλονίκη: $G_o=10.38\exp(-1.419cf)$

Ενέργεια στο κεκλιμένο επίπεδο με γωνιά που μεταβάλλεται (adjusted):

- Αθήνα: $G_a=8.956\exp(-0.9991cf)$
- Χανιά: $G_a=9.070\exp(-1.044cf)$
- Θεσσαλονίκη: $G_a=11.240\exp(-1.496cf)$

Οι τιμές που βρίσκουμε για την ενέργεια σε ετήσια βάση για τις πόλεις Αθήνα, Χανιά, Θεσσαλονίκη ανταποκρίνονται και στη βιβλιογραφία που αναφέρει ότι για οριζόντιο επίπεδο η ετήσια συλλογή φτάνει τα 1400 – 1800 kWh/m². Επαληθεύεται επίσης και από τον αρχικό μας υπολογισμό της ετήσιας συλλογής ενέργειας που φαίνεται στον πίνακα 5.5. με την ενέργεια μας αυτή καταφέραμε, να μην έχουμε μόνο μια μέση τιμή για όλα τα χρόνια αλλά για τον κάθε χρόνο να έχουμε διαφορετική προβλέψιμη τιμή. Επίσης με αυτό τον τρόπο εξασφαλίσαμε και τη μηνιαία πρόβλεψη. Παίρνοντας τη μέση μηνιαία τιμή του δείκτη νεφοκάλυψης εξάγουμε μέσες μηνιαίες προβλέψεις. Ενδεικτικά, παρουσιάζουμε τις μηνιαίες προβλέψεις για το έτος 2001.

Στην ετήσια πρόβλεψη το οριζόντιο επίπεδο συλλέγει τη λιγότερη ενέργεια, ακολουθεί το κεκλιμένο επίπεδο σε σταθερή γωνιά ίση με το γεωγραφικό πλάτος και τέλος τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται από το επίπεδο που η γωνία του μεταβάλλεται κάθε μήνα. Για την περίπτωση της Αθήνας, μπορούμε να παρατηρήσουμε (από τον πίνακα 5.13) το μέγιστο της ενέργειας για το έτος 2001 και 2008, κοντά στο 2100 kWh/m² και το ελάχιστο για το έτος 2010, στα 1600 kWh/m². Ελάχιστο μπορούμε να θεωρήσουμε και την τιμή 1640 kWh/m² που αντιστοιχεί στο οριζόντιο επίπεδο για το έτος 2002. Αν ανατρέξουμε στον πίνακα 5.9, θα παρατηρήσουμε ότι για το 2002 και 2010 οι τιμές του δείκτη νεφοκάλυψης φτάνουν τη τιμή 0.8, γεγονός που φανερώνει αυξημένη νεφοκάλυψη για τον συγκεκριμένο χρόνο. Επίσης, για το έτος 2010 διαφαίνεται καθαρά η τιμή του Ιουνίου, κάπου στο 0.4, που κάθε άλλο παρά αυξημένη μπορεί να χαρακτηριστεί για τα δεδομένα της εποχής. Ενώ για το 2001 και 2008 οι τιμές του δείκτη είναι πιο χαμηλές ιδίως κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών (σχεδόν 0) και επίσης η μέγιστη τιμή για τα έτη αυτά μπορεί να χαρακτηριστεί και ως μειωμένη σε σχέση με τα υπόλοιπα έτη. Ο Φεβρουάριος του 2001 ξεχωρίζει για τα χαμηλά επίπεδα του δείκτη νεφοκάλυψης καθώς επίσης και ο Οκτώβριος του 2010. Για τα Χανιά μπορούμε να πούμε ότι η ετήσια συλλογή ενέργειας είναι σταθερή. Μόνο για το έτος 2002 το ποσό εμφανίζεται πιο μειωμένο, 1750 kWh/m² στο οριζόντιο, για τον ίδιο λόγο που είπαμε και

πάνω. Από τον πίνακα 5.9 η τιμή του δείκτη νεφοκάλυψης για τα Χανιά στο έτος 2002 βρίσκεται στο 0.2 ακόμα και κατά τη διάρκεια του Ιουνίου. Μπορούμε να επισημάνουμε ότι και η τιμή του δείκτη νεφοκάλυψης κατά τη διάρκεια του Δεκεμβρίου του 2001, φτάνει το 0.8. Η Θεσσαλονίκη είναι η πόλη που παρουσιάζει την περισσότερη αστάθεια, αφού είναι και η βορειότερη πόλη που μελετάται που συνεπάγεται και μεγαλύτερη διακύμανση στη νέφωση. Είναι εμφανές από τον πίνακα 5.9 ότι για το έτος 2002 θα περιμέναμε μειωμένη τιμή, 1360 kWh/m² για το οριζόντιο επίπεδο, αφού βλέπουμε ότι οι τιμές του δείκτη νεφοκάλυψης κυμαίνονται από 0.4 μέχρι 0.8 και άνω. Η Θεσσαλονίκη το έτος αυτό χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα νέφωσης ολόχρονα. Ακόμα και τον Ιούνιο παρουσιάζει υψηλές, για την εποχή, τιμές νεφοκάλυψης. Επίσης για το έτος 2009 και 2010, οι τιμές του δείκτη αρχίζουν από 0.3 και φτάνουν το 0.9 σχεδόν πλήρη νεφοκάλυψη καθ' όλη τη διάρκεια του Δεκεμβρίου. Για το 2007 έχουμε τη μέγιστη τιμή της συλλεγόμενης ετήσιας ενέργειας που φτάνει σχεδόν το 2100 kWh/m², αναμενόμενο αφού για το έτος αυτό έχουμε τις χαμηλότερες τιμές του δείκτη νεφοκάλυψης. Οι τιμές για τον Ιούνιο πλησιάζουν το 0.1 ενώ φαίνεται καθαρά ότι για τον Ιανουάριο επικρατούσαν συνθήκες χαμηλής νέφωσης. Αυτό το φαινόμενο διαφαίνεται καθαρά και στον πίνακα 5.8 όπου για τα έτη 2002, 09, 10 η Θεσσαλονίκη διαθέτει τις πιο ψηλές μέσες τιμές.

5.3 Έλεγχος αξιοπιστίας υπολογισμών ηλιακής ακτινοβολίας – μοντέλο BOLAM

Στην προσπάθεια μας για να έχουμε και δεδομένα σετη χρονική βάση ημέρας, έγινε μια προσπάθεια πρόβλεψης της ηλιακής ενέργειας, κάνοντας χρήση του μοντέλου «μεταφοράς» ηλιακής ακτινοβολίας δύο ημερών, BOLAM. Για να γίνει η πρόγνωση της ηλιακής ενέργειας, αξιολογούμε την αξιοπιστία των υπολογισμών του μοντέλου. Για την επαλήθευση της πρόγνωσης, γίνεται σύγκριση μεταξύ των τιμών που δίνει το μοντέλο και των επίγειων μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας που έχουμε στη διάθεσή μας ανά δεκάλεπτο στο οριζόντιο επίπεδο. Οι μετρήσεις παραχωρήθηκαν από το δίκτυο του Εθνικού αστεροσκοπείου Αθηνών. Η εκτίμηση της ακτινοβολίας εξετάστηκε σε δίωρη βάση, συγκρίνοντας τις τιμές του μοντέλου με επίγειες μετρήσεις που λήφθηκαν σε 8 ραδιομετρικούς σταθμούς για το έτος 2012. Στην εργασία αυτή, μελετήθηκε μόνο η πρόγνωση ακτινοβολίας για τις περιοχές: Χανιά, Σπάτα και Δράμα. Έτσι και η αξιολόγηση του μοντέλου έγινε για αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιώντας το NRMSE (Normalize Root Mean Square Error):

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{obs,max} - X_{obs,min}}$$

Όπου:

$X_{obs,i}$: οι τιμές που μας δίνουν τα όργανα μέτρησης

$X_{model,i}$: οι τιμές που προβλέπει το μοντέλο

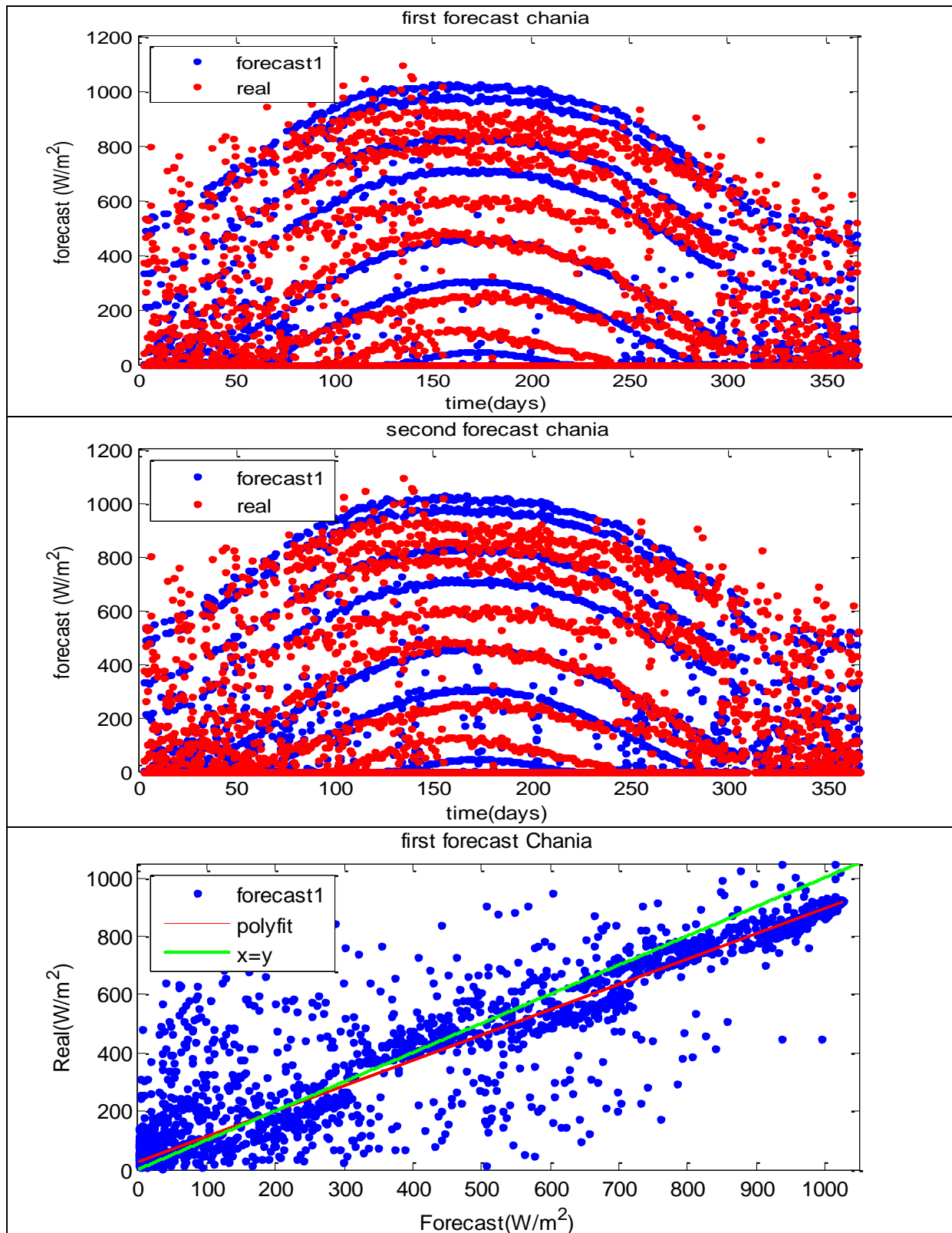
N: ολικός αριθμός μετρήσεων

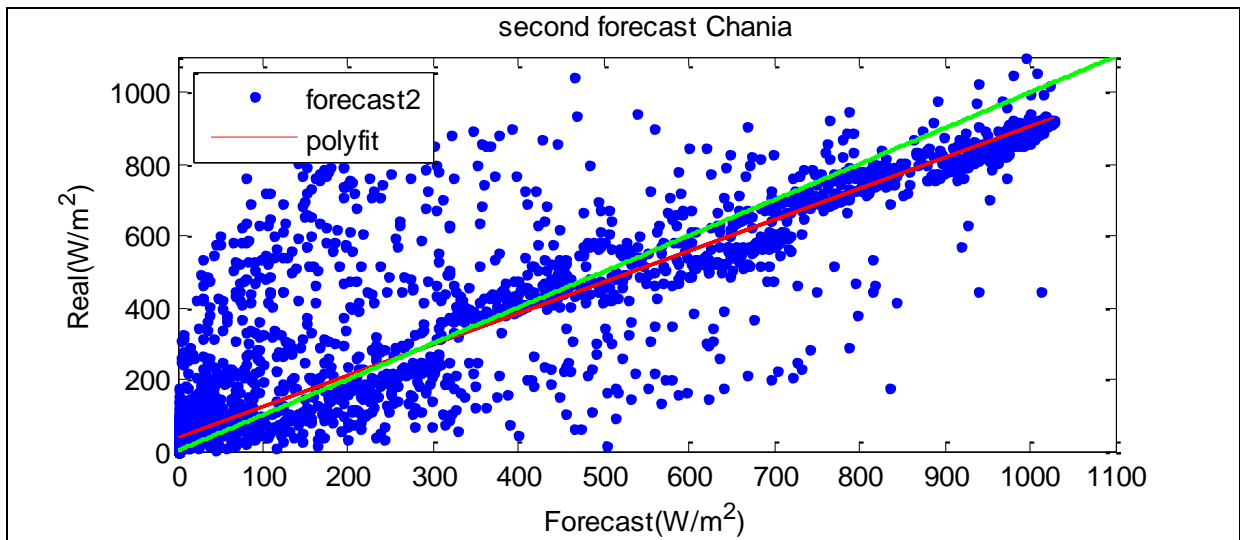
$X_{obs, max}$: η μέγιστη τιμή που μετράται από τα όργανα

$X_{obs, min}$: η ελάχιστη τιμή που μετράται από τα όργανα

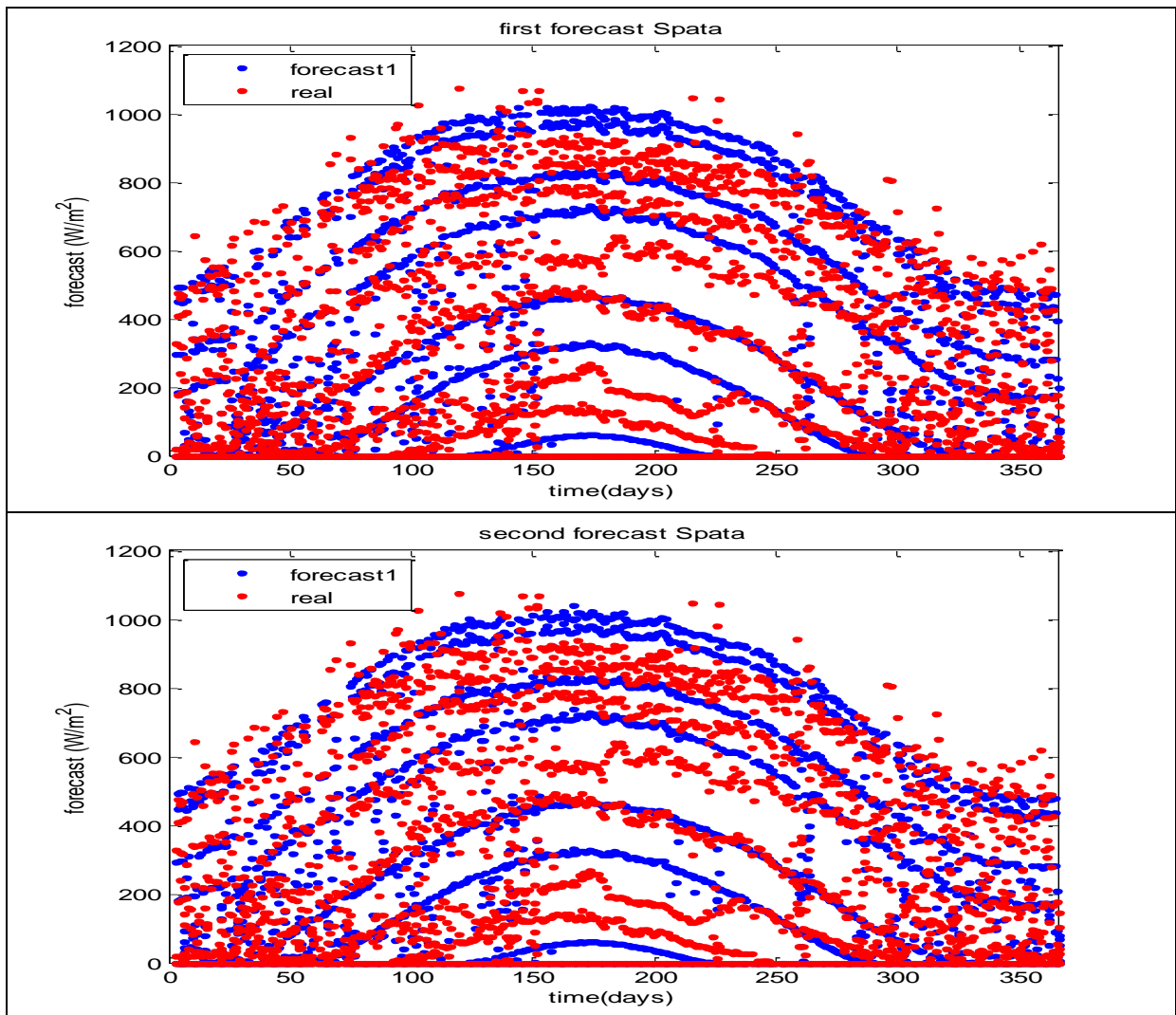
Παρακάτω, παραθέτουμε τα γραφήματα όπου φαίνεται η σύγκριση των επίγειων μετρήσεων με τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο κατά την πρώτη πρόγνωση (πρώτη μέρα) και κατά τη δεύτερη πρόγνωση (δεύτερη μέρα).

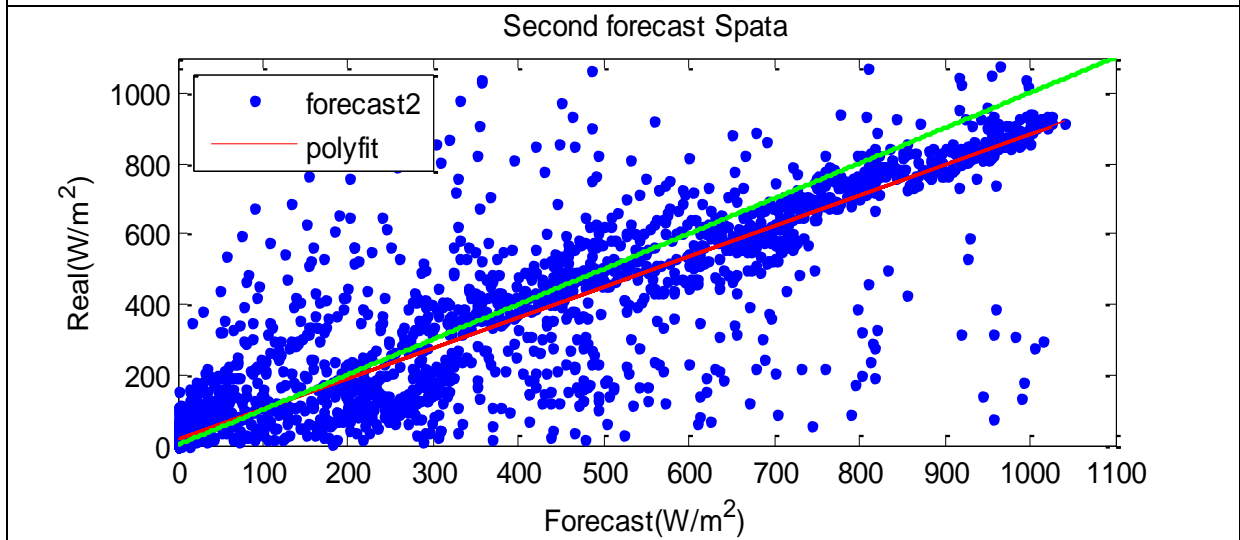
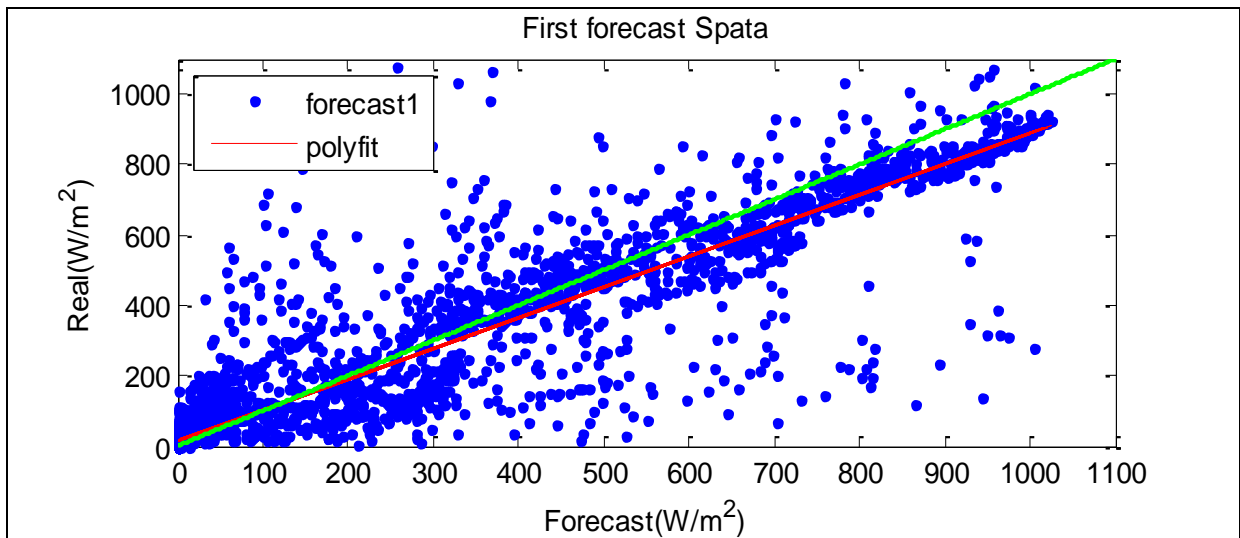
Πίνακας 5.15 Μοντέλο πρόγνωσης και πραγματικές επίγειες μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας στα Χανιά



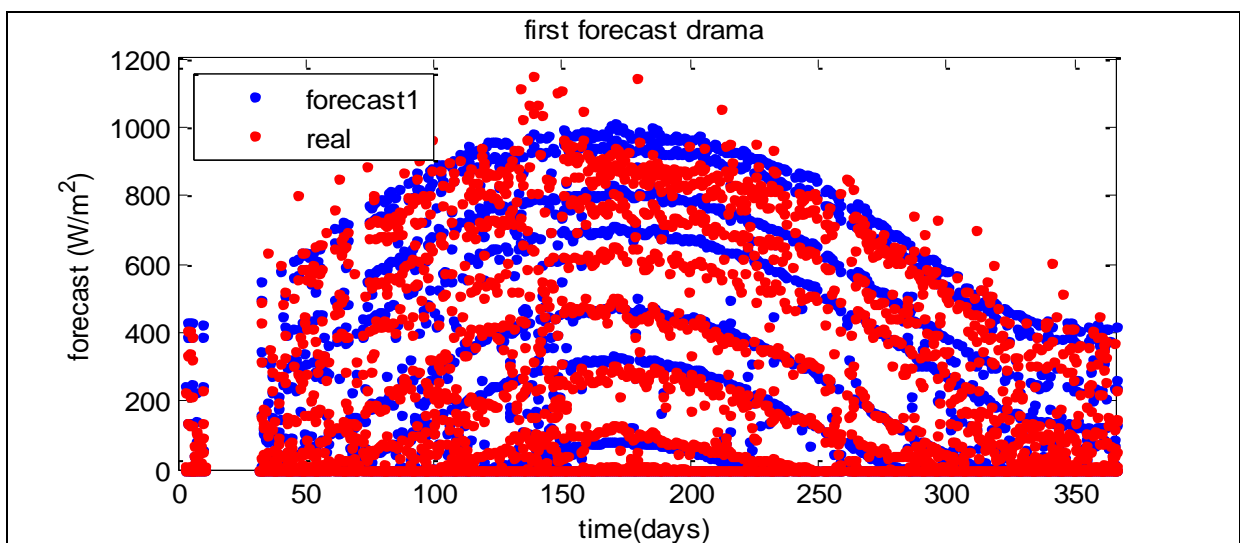


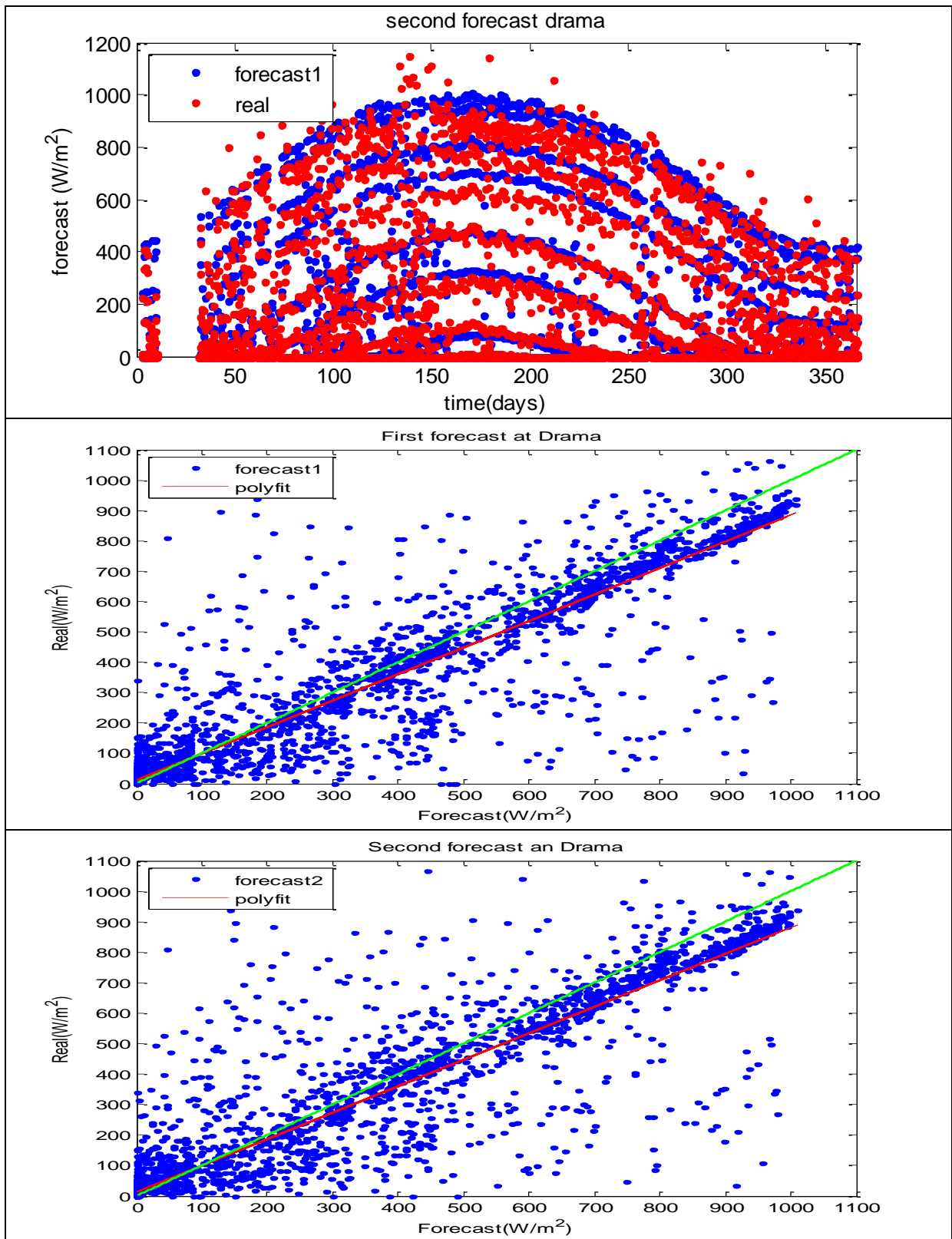
Πίνακας 5.16 Μοντέλο πρόγνωσης και πραγματικές επίγειες μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας στα Σπάτα





Πίνακας 5.17 Μοντέλο πρόγνωσης και πραγματικές επίγειες μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας στη Δράμα





Παρατηρούμε από τα γραφήματα, ότι ακόμα και κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, τις μεσημβρινές ώρες καταγράφονται ενδείξεις χαμηλότερες της πρόβλεψης. Αυτό ίσως οφείλεται σε σφάλματα βαθμονόμησης των οργάνων. Επίσης, φαίνεται ότι οι μεγάλες αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές συμβαίνουν κατά τη διάρκεια των χειμερινών και

φθινοπωρινών μηνών κυρίως κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες. Όμως, υπάρχουν και γενικότερες αποκλίσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Όλα αυτά αποδεικνύουν ότι τα νέφη είναι ένας παράγοντας με έντονη μεταβλητότητα από λεπτό σε λεπτό και ωστόσο η πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας με τεράστια ακρίβεια καθίσταται πλέον μια δύσκολη αποστολή.

Το NRMSE (Normalize Root Mean Square Error), επίσης διαφέρει στις δύο προγνώσεις. Το κανονικοποιημένο αυτό σφάλμα παρουσιάζεται μικρότερο για την πρώτη πρόγνωση και γύρω στο 11.1% για τα Χανιά, 10.4% για τη Δράμα και 10.1 για τα Σπάτα. Ενώ για τη δεύτερη πρόγνωση παρουσιάζεται ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με την πρώτη κάπου γύρω στο 12.8% για τα Χανιά, 10.8% για τη Δράμα και 10.9% για τα Σπάτα. Το γεγονός ότι η πρόγνωση της πρώτης μέρας έχει καλύτερα αποτελέσματα φαίνεται επίσης, αν

	ΧΑΝΙΑ		ΔΡΑΜΑ		ΣΠΑΤΑ	
	Α' ΠΡΟΓΝΩΣΗ	Β' ΠΡΟΓΝΩΣΗ	Α' ΠΡΟΓΝΩΣΗ	Β' ΠΡΟΓΝΩΣΗ	Α' ΠΡΟΓΝΩΣΗ	Β' ΠΡΟΓΝΩΣΗ
NRMSE	0.1107	0.1279	0.1037	0.1075	0.1014	0.1088
Ετήσιο Ποσό ενέργειας (πρόβλεψη) (kWh/m ²)	1877	1771	1646	1652	1844	1850
Ετήσιο Ποσό ενέργειας (kWh/m ²)	1860	1860	1544	1544	1741	1741

επιχειρήσουμε να υπολογίσουμε το ετήσιο ποσό ενέργειας που παράγεται από την δεσμευόμενη ηλιακή ενέργεια. Βλέπουμε ότι το ετήσιο ποσό ενέργειας στα Χανιά υπολογίζεται από τις επίγειες μετρήσεις κάπου στα 1860 kWh/m², ενώ η προβλέψιμη τιμή κυμαίνεται στα 1877 kWh/m² για την πρώτη μέρα και στα 1771 kWh/m² για τη δεύτερη μέρα. Στη Δράμα η πραγματική τιμή είναι 1544 kWh/m² ενώ οι τιμές που δίνει το μοντέλο είναι για την πρώτη και δεύτερη μέρα 1646 kWh/m² και 1652 kWh/m² αντίστοιχα. Τέλος στα Σπάτα η μετρούμενη τιμή είναι 1741 kWh/m², ενώ οι τιμές που δίνει το μοντέλο είναι 1844 kWh/m² και 1850 kWh/m² για την πρώτη και δεύτερη μέρα αντίστοιχα.

Για την περίπτωση των Χανιών, παρατηρούμε ότι στον ετήσιο υπολογισμό, η πρόγνωση της πρώτης μέρας υπερεκτιμά ελάχιστα την ενέργεια (0.9%). Βέβαια η πρόγνωση για τη δεύτερη μέρα ξεφεύγει και υποεκτιμά την ενέργεια κατά ένα ποσοστό 4.8%. Στη Δράμα, και οι δύο προγνώσεις υποεκτιμούν την ενέργεια κατά 6.2% η πρώτη και κατά 6.5% η δεύτερη. Τέλος, στα Σπάτα το μοντέλο υπερεκτιμά την ενέργεια κατά ένα ποσοστό 5.6% για την πρώτη μέρα και κατά 5.9% για τη δεύτερη μέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Ανάμεσα στα τρία επίπεδα, οριζόντιο, κεκλιμένο κατά γωνία ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και κεκλιμένο επίπεδο κατά γωνία που μεταβάλλεται ανά μήνα, το τελευταίο έδινε και τα καλύτερα αποτελέσματα. Είχε συλλέξει την μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας σε σχέση με τις δύο υπόλοιπες επιφάνειες.
- Παρατηρήθηκε όμως ότι σε συνθήκες νεφελώδους ουρανού, οι μεγαλύτερες απώλειες συνέβαιναν για την συγκεκριμένη επιφάνεια, διατηρώντας όμως την πρωτιά στο ποσό της ενέργειας που συλλέγει, σε σχέση με τις υπόλοιπες δύο.
- Η συλλεγόμενη ενέργεια μειώνεται όσο το γεωγραφικό πλάτος αυξάνει. Τα Χανιά βρέθηκαν να συλλέγουν κατά 2,5% περισσότερη ενέργεια από την Αθήνα και κατά 8.5% από την Θεσσαλονίκη.
- Παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στις σχέσεις της ενέργειας σε διάφορες γωνιές σε πραγματικές συνθήκες νέφωσης.
- Με τη χρήση πραγματικών συνθηκών νέφωσης και μοντέλου υπολογισμού της ηλιακής ενέργειας δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της σε πραγματικές συνθήκες.
- Εισάγοντας τον παράγοντα της νέφωσης, παρατηρήσαμε την εκθετική εξάρτηση της ακτινοβολίας, με αυτόν, για όλες τις γωνιές.
- Η πρόγνωση της ηλιακής ενέργειας που επιχειρήσαμε να κάνουμε με βάση αυτή την εκθετική εξάρτηση, αντικατόπτριζε σε μεγάλο βαθμό το ποσό της νέφωσης που υπήρχε για το εκάστοτε έτος.
- Η πρόγνωση ενέργειας στα Χανιά ακολουθούσε τη πιο ομαλή πορεία. Στην Αθήνα παρατηρούνται κάποιες αποκλίσεις ενώ η Θεσσαλονίκη είναι η πόλη με την πιο μεγάλη μεταβλητότητα της νέφωσης και ακολούθως της πρόγνωσης.
- Η ενέργεια μειώνεται ακόμα και κατά 45% λόγω της ύπαρξης της νέφωσης ειδικά στη βορειότερη, υπό μελέτη περιοχή, αυτή της Θεσσαλονίκης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τα έτη 2002, 2009 και 2010 που καταγράφηκαν ψηλά ποσοστά νέφωσης στην πόλη αυτή.
- Μοντέλο BOLAM: ακόμα και κατά τις μεσημβρινές ώρες του καλοκαιριού καταγράφονται ενδείξεις χαμηλότερες της πρόβλεψης. Αυτό ίσως οφείλεται σε σφάλματα βαθμονόμησης των οργάνων.
- Επίσης, φαίνεται ότι οι μεγάλες αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές συμβαίνουν κατά τη διάρκεια των χειμερινών και φθινοπωρινών μηνών κυρίως κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες.
- Γενικά οι μετρήσεις διαφοροποιούνται σε ωριαίο επίπεδο, σχετικά καλή συσχέτιση σε μηνιαίο, ετήσιο επίπεδο.
- Τα νέφη είναι ένας παράγοντας με έντονη μεταβλητότητα από λεπτό σε λεπτό και ωστόσο η πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας με τεράστια ακρίβεια καθίσταται πλέον μια δύσκολη αποστολή.

- Όσο αφορά στην αξιολόγηση του μοντέλου BOLAM παρατηρούμε υπάρχει καλή συσχέτιση με NRMSE γύρω στο 10-12%.
- Ωστόσο, γενικότερα υπάρχει μια υπερεκτίμηση της ενέργειας.
- Τέλος, αν συγκρίνουμε τις προβλέψεις που δίνει το μοντέλο PVGIS με τις αντίστοιχες του BOLAM θα δούμε ότι οι μέγιστες διαφοροποιήσεις είναι μικρότερες του 10% για την Αθήνα και του 5% για τα Χανιά.
- Ο συνδυασμός μοντέλων και πραγματικών ατμοσφαιρικών συνθηκών βελτιστοποιεί εφαρμογές που βασίζονται σε απλά μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ενέργειας σε καθαρό ουρανό.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Atlas, E. -E. (n.d.). <http://www.soda-is.com/esra/data.html>.

Beyer, H. C. (1996). *Modifications of the Heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images*. *Solar Energy*, 56: 206-207.

Chanchal Kumar Pnadey, A. K. (2009). *A note on diffuse solar radiation on a tilted surface*.

Coffari, E. (1977). *Solar Energy Engineering*. New York.

DISC, G. (n.d.). <http://daac.gsfc.nasa.gov/>.

G., K. a. (1980). *Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud*. *Solar Energy* 24Q 177-189.

GIOVANNI. (n.d.). disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni.

GISCO. (n.d.). *EuroGeographics Association for the administrative boundaries*.

H., N. M. (2002). grass.osgeo.org.

Hammer A., H. D. (1998). *Derivation of daylight and solar irradiance data from satellite observations*. Paris: In proceedings of the Ninth Conference on Satellite Meteorology and Oceanography.

<http://www.allaboutenergy.gr>. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi321.html>.

<http://www.cie.org.cy>. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.cie.org.cy/sxoliko.html#menu2-3-1-4>.

<http://www.cres.gr>. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.cres.gr/kape/education/thermika%20Hliaka.pdf>.

<http://www.env-edu.gr>. (n.d.).

<http://www.mcit.gov.cy/>. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/All>.

<http://www.pveducation.org/>. (n.d.).

<http://www.selasenergy.gr/>. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.selasenergy.gr/history.php>.

<http://www.solar-systems.gr>. (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.solar-systems.gr/solar-panel-pv-1.html>.

<http://www.tm.teiher.gr>. (n.d.).

<http://www-istp.gsfc.nasa.gov/stargaze/Secliptc.htm>. (n.d.). Ανάκτηση από [nasa.gov](http://www-istp.gsfc.nasa.gov/stargaze/Secliptc.htm).

Huld T., M. R. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86, 1803-1815.

IET. (n.d.). <http://iet.jrc.ec.europa.eu/>.

Iqbal, M. d. (1983). *An Introduction To Solar Radiation*.

J, S. K. (2000). *The european Solar Radiation Atlas Vol. 2: Database and exploitation Software* . Paris.

JRC. (n.d.). <http://ec.europa.eu/dgs/jrc/>.

Jurgita Grigoniene, M. K. (2009). *Mathematical modeling of optimal tilt angles for solar collector and sunray reflector*.

Kosmopoulos P.G., K. S. (2013). *Solar Energy prediction and verification using model calculations and ground based solar measurements*. Athens: National observatory of Athens.

M. Diez-Media villa, A. d. (2004). *Measurement and comparison of diffuse solar irradiance models on inclined surfaces in Valladolid (Spain)*.

METEO. (n.d.). www.meteo.gr.

MODIS. (n.d.). modis.gsfc.nasa.gov.

PVGIS, S. r. (n.d.). Ανάκτηση από <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solrespvgis.htm>.

R.C., L. B. (1961). *Daily insolation on surfaces tilted toward to the equator*, *ASHRAE J.* 3(10) 53-39.

Remund J., W. I. (2003). *Worldwide Linke turbidity information, Proceedings of the ISES solar world congress 'Solar Energy for a Sustainable Future'*. Göteborg Sweden.

Rigollier Ch, L. M. *Heliosat Version 2: Integration and Exploitation of Networked Solar Radiation Databases for Environmental Monitorin*. Brussels: European Commission Project No. IST-1999-122245.

Ryder C.L., T. R. (2011). *An urban solar flux island: Measurements from London. Atmospheric Environment, vol. 45(20), 3414-3423*.

SRTM. (n.d.). srtm.usgs.gov.

Suri M., H. T. (2007). Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy* 81, 1295-1305.

www.google.com. (n.d.).

www.soda-is.com. (2001). *Heliosat version 2, Intergation and exploitation of Networked Solar Radiation Databases for Environment Monitoring (SoDa)*. Ανάκτηση από Rigollier Ch., Lefevre M. and Wald L.

Τ.Ι Μακρογιάννης, Χ. Σ. *ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΓΕΝΙΚΗΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ*.