



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ – ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ
ΓΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΡΑ-ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ ΝΟΜΙΚΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΑΛΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2013

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΓΙΑ
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ

ΒΕΡΑ-ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ ΝΟΜΙΚΟΥ

ΥΠΟΒΛΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΘΗΝΩΝ

ΑΘΗΝΑ 2013

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Επιβλέπων

Γ. Κάλλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Μέλη

Γ. Γαλάνης, Επίκουρος Καθηγητής στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων

Σ. Σοφιανός, Λέκτορας ΕΚΠΑ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου Γεώργιο Κάλλο, καθηγητή του Ε.Κ.Π.Α., για την υπόδειξη το θέματός μου και για την ευκαιρία που μου έδωσε να διευρύνω τις γνώσεις μου. Η βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, η κατανόηση και η εμπιστοσύνη που μου έδειξε ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωσή της. Επιπλέον η συνεχής ενθάρρυνση και η προτροπή του συντέλεσαν στην αποτελεσματικότερη απόδοση της προσπάθειάς μου.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Γεώργιο Γαλάνη, καθηγητή στη Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, και τον Λέκτορα του Ε.Κ.Π.Α Σαράντη Σοφιανό για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγησή τους. Ευχαριστώ τον Δόκτορα Χρήστο Σπύρου καθώς η συμβολή του ήταν απαραίτητη για την ολοκλήρωση αυτής της μελέτης.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Αριστοτέλη Λιακατά για την αμέριστη βοήθειά του και τον φίλο μου Γιάννη Παπαλεωνίδα για την ηθική στήριξη και την ουσιαστική βοήθειά του.

Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γιάννη και Βαρβάρα, για την υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα εργασία είναι η αξιολόγηση και η βελτίωση της πρόγνωσης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας με τη χρήση στατιστικών μεθόδων. Για το σκοπό αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας από το μοντέλο Σκίρων και δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας τα οποία προέρχονται από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς στους οποίους υπάρχουν εγκατεστημένα πυρανόμετρα. Απώτερο στόχο αποτελεί η εκτίμηση παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκές μονάδες. Για τη μεγιστοποίηση παραγωγής της ενέργειας από τις φωτοβολταϊκές μονάδες είναι απαραίτητη η γνώση της προβλεπόμενης ωριαίας ή ημερήσιας εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας.

Η εφαρμογή τεσσάρων μεθόδων στις προγνωστικές τιμές αποσκοπούν στη βελτίωση των τιμών του αριθμητικού μοντέλου. Η πρώτη μέθοδος απαλείφει συστηματικά σφάλματα τα οποία προκύπτουν με βάση την εποχικότητα. Η δεύτερη μέθοδος υπολογίζει την συχνότερα εμφανιζόμενη προγνωστική τιμή ενώ η τρίτη μέθοδος στηρίζεται στη παράμετρο του ποσοστού νεφοκάλυψης ώστε να δώσει πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η τέταρτη μέθοδος βασίζεται στην αυτοσυσχέτιση των τιμών ακτινοβολίας και εντοπίζει συστηματικά σφάλματα κατά τις ημέρες με ανέφελο και με νεφοσκεπή ουρανό.

Τέλος γίνεται μία αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σύμφωνα με την οποία καταλήγουμε στο ότι με την πρώτη μέθοδο απαλείφονται τα συστηματικά σφάλματα που οφείλονται είτε στην εποχικότητα, είτε στην μη συνεκτίμηση των αερολυμάτων. Με τη δεύτερη μέθοδο, όπου υπολογίζεται η πιθανότερη τιμή, καθώς και με την τέταρτη μέθοδο, η οποία εφαρμόζεται για αυτοσυσχετιζόμενες τιμές, μειώνονται σημαντικά οι αποκλίσεις των προγνωστικών από τις παρατηρούμενες τιμές. Παράλληλα η μέθοδος που βασίζεται στην παράμετρο της νεφοκάλυψης μειώνει αρκετά τα σφάλματα της πρόγνωσης για τις ημέρες με νέφωση. Με τη βοήθεια της προγνωστικής τιμής και της παρατηρούμενης για την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται η συνολική προβλεπόμενη παραγωγή για τις φωτοβολταϊκές μονάδες.

Λέξεις κλειδιά: Ηλιακή Ακτινοβολία, Εκτίμηση παραγωγής ενέργειας εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, Αριθμητικά Μοντέλα Πρόγνωσης, Στατιστικά Μοντέλα Πρόγνωσης.

Abstract

The aim of this work is to evaluate and improve the prognosis of incoming solar radiation by using statistical methods. For this purpose data regarding predictive solar radiation, was derived from the system Skiron and solar radiation data was derived from four meteorological stations in which pyranometers are installed. The ultimate objective is to evaluate the energy production from PV modules. To maximize energy production from the PV modules, it is necessary to know the predicted hourly or daily incoming solar energy.

Four methods were performed in predictive values in order to improve the numerical values of the model. The first method eliminates systematic errors that arise due to seasonality. The second method computes the most frequently occurring predictive value while the third method is based on the rate parameter of cloudiness to give prognosis of solar radiation. The fourth method is based on the autocorrelation of solar irradiation values and identifies biases in the days of overcast skies or clear skies.

Finally an evaluation of the results is given, according to which we conclude that the first method eliminated the systematic errors due either to seasonality or the omission of aerosols. With the second method, which calculated the most likely value, and the fourth method, which is applied for autocorrelated values, the deviations between predictions and the observed values were significantly reduced. Similarly, the method based on the cloudiness parameter reduces errors regarding the prediction on overcast days.

Keywords: Solar Radiation, Estimate power for incoming solar radiation, Numerical Prediction Models, Statistical Forecasting Models.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	1
1.Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2 : Ηλιακή Ακτινοβολία	5
2. Εισαγωγή.....	5
2.1 Ο Ήλιος.....	5
2.2 Ηλιακή Ακτινοβολία	6
2.2.1 Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα	6
2.2.2 Φασματική Κατανομή της Ηλιακής Ακτινοβολίας.....	6
2.3 Η γεωμετρία του Ηλίου.....	7
2.3.1 Στερεά Γωνία.....	7
2.3.2 Βασικές Ραδιομετρικές Ποσότητες.....	8
2.4 Τα είδη της ακτινοβολίας.....	10
2.4 .1 Ακτινοβολία Δέσμης	10
2.4.2 Διάχυτη ακτινοβολία	11
2.4.3 Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία	11
2.5 Οι έννοιες της Σκέδασης και της Απορρόφησης.....	11
Κεφάλαιο 3 : Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	14
3. Εισαγωγή.....	14
3.1 Τι είναι τα Φωτοβολταϊκά συστήματα	14
3.2 Η δομή και η λειτουργία των Φωτοβολταϊκών	14
3.2.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	14
3.2.2 Οι ημιαγωγοί	16
3.2.3 Πλεονεκτήματα χρήσης των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.....	17
Κεφάλαιο 4 : Το Σύστημα Πρόγνωσης Καιρού ΣΚΙΡΩΝ (SKIRON/Eta).....	18
4. Εισαγωγή.....	18
4.1 Το Στάδιο της Προ-επεξεργασίας (pre-processing)	18

4.2 Οριζόντια Διακριτοποίηση και Μετασχηματισμός Συντεταγμένων	20
4.3 Κατακόρυφη Διακριτοποίηση	21
4.4 Βασικές Εξισώσεις και Σχήματα Χρονικής Διαφόρισης	22
4.5 Το στάδιο μετεπεξεργασίας (Post-processing).....	26
Κεφάλαιο 5 : Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν	27
5.1 Δεδομένα πρόγνωσης Ηλιακής ακτινοβολίας.....	27
5.2. Δεδομένα παρατήρησης Ηλιακής ακτινοβολίας.....	27
5.2.1 Οι Μετεωρολογικοί σταθμοί των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	27
5.2.2 Χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων των φωτοβολταϊκών πάρκων	27
5.2.3 Ο μετεωρολογικός σταθμός της Λαμίας	28
5.3 Τα κλιματικά χαρακτηριστικά των 4 περιοχών	29
Κεφάλαιο 6 : Το μοντέλο που αναπτύχθηκε	30
6. Εισαγωγή.....	30
6.1 Στατιστικά μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν.....	30
6.1.1 Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson.....	30
6.1.2 Το Bias	31
6.1.3 Η απόλυτη τιμή του Bias.....	31
6.1.4 Η τυπική απόκλιση του σφάλματος	31
6.1.5 Η τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος	31
6.2 Έλεγχος συσχέτισης των δεδομένων	32
6.3 Επεξεργασία των δεδομένων	32
6.3.1 Απαλοιφή συστηματικών σφαλμάτων που οφείλονται στην εποχικότητα	32
6.3.2 Επιλογή της ωριαίας τιμής ακτινοβολίας με τη μεγαλύτερη συχνότητα	33
6.3.3 Χρήση της παραμέτρου της νεφοκάλυψης για την πρόγνωση της ακτινοβολίας.....	35
6.3.4. Εξάλειψη σφαλμάτων με τη χρήση της αυτοσυσχέτισης.....	37
Κεφάλαιο 7: Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις τέσσερις μεθόδους.....	39

7. Εισαγωγή.....	39
7.2.1 Αποτελέσματα για το σταθμό της Λαμίας	39
7.2.2 Αποτελέσματα για το σταθμό της Τρίπολης	43
7.2.3 Αποτελέσματα για το σταθμό των Μολάων (περιοχή: Βελιές)	46
7.2.4 Αποτελέσματα για το σταθμό του Αρκαλοχωρίου	49
7.3 Εκτίμηση παραγωγής για τα φωτοβολταϊκά πάρκα.....	52
7.3.1 Αποτελέσματα.....	53
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα	54
Βιβλιογραφία	56

Κεφάλαιο 1

1.Εισαγωγή

Η συνεχής αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων έχει οδηγήσει σε μία επιτακτική ανάγκη για ακριβή πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας. Για αυτό το σκοπό απαιτείται η ύπαρξη μοντέλων τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα να δίνουν αξιόπιστες προβλέψεις και προγνώσεις της ηλιακής ενέργειας. Μία χρήσιμη εφαρμογή της πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας αφορά στη ρύθμιση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Συνεπώς η πρόγνωση της εισερχόμενης ισχύος μπορεί να βελτιώσει τα ποσά της παραγόμενης ισχύος από τις φωτοβολταϊκές μονάδες.

Οι χρονικές κλίμακες της πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας κυμαίνονται από λίγα λεπτά έως και αρκετές ημέρες. Για προγνώσεις μικρής χρονικής κλίμακας, δηλαδή από 30 λεπτά έως και 6 ώρες, χρησιμοποιούνται είτε φυσικά μοντέλα πρόγνωσης, είτε στατιστικές προσεγγίσεις, είτε μοντέλα που στηρίζονται σε νευρωνικά δίκτυα. Τα παραπάνω μοντέλα χρησιμοποιούν δορυφορικά δεδομένα ή δορυφορικές εικόνες μέσω των οποίων παρακολουθούν τη χρονική εξέλιξη των νεφών. Για προγνώσεις από 6 ώρες έως και κάποιες ημέρες χρησιμοποιούνται τα αριθμητικά μοντέλα καθώς και τα στατιστικά μοντέλα πρόγνωσης. Τα υβριδικά μοντέλα μπορούν να συνδυάσουν δύο ή περισσότερες τεχνικές ώστε να παρουσιάσουν πιο βελτιωμένες προγνώσεις.

Τα φυσικά μοντέλα πρόγνωσης που βασίζονται σε παραμέτρους όπως είναι το ποσοστό της νεφοκάλυψης και το οπτικό βάθος, σε συνδυασμό με τις δορυφορικές εικόνες ή τα επίγεια δεδομένα εξάγουν προγνώσεις με μικρά σφάλματα για 30 λεπτά μπροστά, ενώ για δύο ώρες μπροστά το σφάλμα της πρόγνωσης αυξάνεται όπως έδειξε ο Hammer et al., 1999. Ο Perez et al., 2010, παρουσίασε ένα μοντέλο πρόγνωσης βασισμένο στην κίνηση των νεφών σύμφωνα με δεδομένα που λαμβάνονται από δορυφορικές εικόνες. Αργότερα, ο Chow et al., 2011 παρουσίασε μία μέθοδο πρόγνωσης της κίνησης των νεφών, της νεφοκάλυψης και της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία στηρίζεται σε εικόνες της ατμόσφαιρας που προέρχονται από επίγεια όργανα. Επιπλέον τα μοντέλα που χρησιμοποιούν χρονοσειρές δεδομένων ακτινοβολίας ή ισχύος από επίγεια όργανα παρατήρησης είναι αρκετά ακριβή για προγνώσεις λίγων ωρών. Τη τεχνική των χρονοσειρών εφάρμοσαν οι Boland, 2008,

και Wu και Chan, 2011. Επομένως οι παραπάνω τεχνικές είναι επαρκείς για πολύ μικρές χρονικές κλίμακες (Heinemann et al., 2005) και δεν ενδείκνυνται για προγνώσεις μεγαλύτερων χρονικών διαστημάτων λόγω της συνεχούς μεταβλητότητας που παρουσιάζουν τα νέφη.

Τα στατιστικά μοντέλα πρόγνωσης διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν φυσικές παραμέτρους ώστε να προβλέψουν την ηλιακή ενέργεια, αυτά που βασίζονται σε προγενέστερες παρατηρούμενες τιμές, και αυτά που συνδυάζουν τη γνώση και των δύο. Μία σχετική μέθοδος παρουσιάζεται από τους Kaplanis et al., 2010 όπου περιγράφεται ένα στοχαστικό σύστημα πρόγνωσης το οποίο λαμβάνει υπόψη μία μέτρηση της ακτινοβολίας νωρίς το πρωί. Προσεγγίσεις βασιζόμενες σε δεδομένα παρατηρήσεων του παρελθόντος παρουσιάζονται επίσης από τους Kemmoku et al., 1999, Sfetsos και Coonick, 2000, Cao και Cao, 2005, Mellit et al., 2006, Cao και Lin, 2008, και Cao και Cao, 2005. Οι πιο συνηθισμένες στατιστικές τεχνικές στηρίζονται σε μοντέλα αυτοπαλινδρόνησης (Autoregressive models), τέτοια είναι το ARMA, το ARIMA, το MLP, το TDNN (Time Delay Neural Network) και οι αλυσίδες Markov. Το μοντέλο ARMA (Autoregressive Moving average), το οποίο εφαρμόζεται σε αυτοσυσχετιζόμενα δεδομένα και χρησιμοποιεί τη μέθοδο του κινούμενου μέσου, είναι παρόμοιο με το MLP (Multi layer perception). Το ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) λειτουργεί όπως ακριβώς και το ARMA με τη διαφορά ότι δεν απαιτεί οι χρονοσειρές να είναι στάσιμες. Παράλληλα μία άλλη διαδεδομένη μέθοδο αποτελούν τα νευρωνικά δίκτυα. Παραδείγματα νευρωνικών δικτύων αποτελούν το ANNs (Artificial Neural Networks) (Mihalakou et al., 2000; Tymvios et al., 2005; Cao and Lin, 2008; Mellit et al., 2010), το FL (Fuzzy Logic), το ANFIS (Adaptive neuro-fuzzy inference system), το ANN-wavelet και το ANN-genetic algorithm. Μία καλύτερη προσέγγιση μπορούμε να λάβουμε αν χρησιμοποιήσουμε υβριδικά μοντέλα. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε τη δυνατότητα να συνδυάσουμε τα εξαγόμενα από κάθε μοντέλο έτσι ώστε να έχουμε πιο βελτιωμένη πρόγνωση.

Για προγνώσεις από 6 ώρες έως και κάποιες ημέρες τα πιο κατάλληλα μοντέλα πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και της ισχύος είναι τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης. Τα αριθμητικά μοντέλα πρόγνωσης χρησιμοποιούν συνήθως μονοδιάστατα μοντέλα μεταφοράς ακτινοβολίας και εμφανίζουν μικρά σφάλματα τις ανέφελους ημέρες ενώ τις ημέρες που υπάρχει νέφωση τα σφάλματα είναι μεγαλύτερα.

Το γεγονός ότι χρησιμοποιούν διαφορεικές εξισώσεις οδηγεί πολλές φορές σε μία δυσκολία πρόγνωσης πολλών φυσικών παραμέτρων. Ένα μειονέκτημα λοιπόν των μοντέλων αυτών είναι η ανεπαρκής χωρική και χρονική ανάλυση, η οποία δεν επιτρέπει την ανάλυση των περισσότερων νεφών. Παράλληλα μπορούν να εφαρμοστούν και στατιστικές μέθοδοι απαλοιφής συστηματικών σφαλμάτων (Model Output Statistics corrections), όπως στην περίπτωση εμφάνισης σφάλματος λόγω εποχικότητας. Οι Lorenz et al., 2009, Bofinger και Heilscher, 2006, Mathiesen και Kleissl, 2011, παρουσίασαν τη βελτίωση στη πρόγνωση της GHI (Global Horizontal Irradiance) ακτινοβολίας με τη χρήση της παραπάνω τεχνικής η οποία βασίζεται στην μετά-επεξεργασία. Τέλος ένα σύστημα πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί ο SKIRON ο οποίος συνυπολογίζει την κλίση του εδάφους, το αζιμούθιο και τη μεταφορά σκόνης (Spyrou et al., 2010).

Κατόπιν της εφαρμογής των προγνωστικών μοντέλων τα οποία εξάγουν τιμές για διάφορες φυσικές παραμέτρους, είναι εφικτή η περαιτέρω βελτίωση αυτών των τιμών μέσω στατιστικών τεχνικών και φίλτρων. Αρχικά μπορεί να γίνει ένας στατιστικός έλεγχος ώστε να εντοπιστούν τα σφάλματα των παρατηρήσεων από τις προβλεπόμενες τιμές. Ακολούθως είναι εφικτή η αφαίρεση των παραπάνω σφαλμάτων σε μεταγενέστερες προγνωστικές τιμές εκπαιδεύοντας την προϋπάρχουσα χρονοσειρά δεδομένων. Η εύρεση της χωρικής μέσης τιμής μπορεί να εξομαλύνει τις απότομες μεταβολές που παρατηρούνται στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία κυρίως λόγω της νέφωσης. Επιπρόσθετα μία αρκετά αξιόπιστη τεχνική για την αφαίρεση των συστηματικών σφαλμάτων, και κυρίως του bias, είναι ή χρήση των φίλτρων Kalman (Kalman 1960; Kalman and Bucy 1961; Bossanyi 1985; Persson, 1990; Dragulanescu, 1993; Kalnay, 2002; Galanis and Anadranistakis, 2002; Crochet, 2004; Giebel, 2000). Τα στατιστικά μοντέλα Kalman αποτελούνται από ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που καταλήγουν στην επίλυση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων. Τα φίλτρα αυτά έχουν το πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιούν τα στατιστικά βάρη έτσι ώστε να μειώνονται οι αντίστοιχες αποκλίσεις ανάμεσα στις τιμές των παρατηρήσεων και τις τιμές της πρόγνωσης.

Η παρούσα εργασία με τίτλο «*Πρόγνωση ηλιακής ακτινοβολίας και η χρήση της για εκτίμηση παραγωγής από φωτοβολταϊκά*» εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης (Μ.Δ.Ε.) Φυσικής Περιβάλλοντος, του

Τομέα Εφαρμογών του τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Ε.Κ.Π.Α).

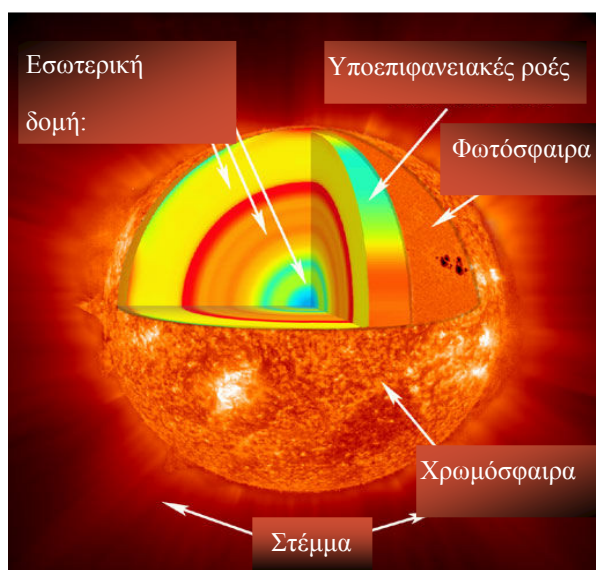
Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα εργασία είναι η αξιολόγηση και η βελτίωση της πρόγνωσης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας με τη χρήση στατιστικών μεθόδων. Για το σκοπό αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί δεδομένα πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας από το σύστημα Σκίρων και δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας τα οποία προέρχονται από τέσσερις σταθμούς φωτοβολταϊκών συστημάτων στους οποίους υπάρχουν εγκατεστημένα πυρανόμετρα. Το πρώτο μέρος της εργασίας περιλαμβάνει κάποιες γενικές έννοιες που διέπουν την ηλιακή ακτινοβολία, περιγραφή του συστήματος Σκίρων και παράθεση κάποιων στοιχείων για τη χρήση και τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επιπλέον παρέχονται πληροφορίες για τα δεδομένα παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τους σταθμούς από τους οποίους προέρχονται αυτά. Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική περιγραφή των στατιστικών μεθόδων που αναπτύχθηκαν. Η πρώτη μέθοδος έχει στόχο την μείωση των συστηματικών σφαλμάτων λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις ανέφελες ημέρες. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί δεδομένα πρόγνωσης από έναν αριθμό γειτονικών σημείων του σταθμού, τα οποία όμως έχουν υψηλή συσχέτιση με τα δεδομένα που προέρχονται από αυτόν, έτσι ώστε να διακρίνει τις τιμές αυτές σε κάποια διαστήματα. Ακολουθώς υπολογίζεται η συχνότερα εμφανιζόμενη τιμή η οποία θεωρείται ως η πιθανότερη προγνωστική τιμή. Παράλληλα, με τη βοήθεια της παραμέτρου του ποσοστού νεφοκάλυψης σε τρία επίπεδα στην ατμόσφαιρα, εκπαιδεύουμε ένα μοντέλο το οποίο χρησιμοποιώντας δεδομένα ενός έτους εντοπίζει ποιες είναι οι αποκλίσεις από τη μέση εποχική τιμή μιας ανέφελης ημέρας για δεδομένες τιμές ποσοστών νεφοκάλυψης και εφαρμόζει αυτές στο επόμενο έτος. Η τελευταία μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι η αφαίρεση συστηματικών σφαλμάτων μεταξύ των τιμών της πρόγνωσης και της παρατήρησης με τη βοήθεια ημερών του πρώτου έτους οι οποίες έχουν υψηλή συσχέτιση με τις αντίστοιχες ημέρες του δεύτερου έτους.

Κεφάλαιο 2 : Ηλιακή Ακτινοβολία

2. Εισαγωγή

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μία μορφή ενέργειας η οποία προέρχεται από τον Ήλιο. Ο Ήλιος λοιπόν αποτελεί μία ανανεώσιμη και αξιόπιστη πηγή ενέργειας η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελός μας. Για να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο θα μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε αυτή την άενη πηγή ενέργειας είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε τη δομή του Ηλίου καθώς και τις βασικές παραμέτρους και τις ιδιότητες που διέπουν την ηλιακή ενέργεια.

2.1 Ο Ήλιος



Εικόνα.2.1 : Η δομή του Ηλίου

Ο Ήλιος (Εικόνα.2.1) είναι μία σφαίρα που αποτελείται από έντονα θερμή αέρια μάζα διαμέτρου $1,39 \cdot 10^9$ m και απέχει από τη Γη $1,5 \cdot 10^{11}$ m. Όπως φαίνεται από τη Γη, ο Ήλιος περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του με συχνότητα μία φορά ανά τέσσερις εβδομάδες. Ωστόσο δεν περιστρέφεται σαν στερεό σώμα ο ισημερινός του χρειάζεται περίπου 27 ημέρες ενώ οι πολικές περιοχές χρειάζονται του 30 ημέρες για κάθε περιστροφή.

Ο Ήλιος εκπέμπει σαν ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας 5777K. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κυμαίνεται από $8 \cdot 10^6 \text{K}$ έως $40 \cdot 10^6 \text{K}$ και η πυκνότητα έχει υπολογιστεί ότι είναι 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Οι πολλαπλές αντιδράσεις σύντηξης συμβάλλουν στην παραγωγή ηλιακής ακτινοβολίας. Η ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό της ηλιακής σφαίρας μεταφέρεται στην επιφάνεια και στη συνέχεια στο διάστημα σε μορφή ακτινοβολίας. Στη συνέχεια έχουμε εκπομπή, απορρόφηση και επαναεκτινοβόληση. Η επιφάνειά του αποτελείται από κόκκους με χρόνο ζωής λίγων λεπτών και μικρούς πόρους. Το εξωτερικό στρώμα καλείται φωτόσφαιρα η οποία αποτελεί την κύρια πηγή ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόσταση της γης από τον ήλιο ποικίλει κατά 1,7%. Σε απόσταση μιας αστρονομικής μονάδας, που αποτελεί και τη μέση απόσταση, ο ήλιος βρίσκεται σε γωνία $32'$. Η ηλιακή σταθερά ορίζεται ως η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο, στη μονάδα του χρόνου, που προσπίπτει σε μία μονάδα επιφάνειας κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, στη μέση απόσταση γης και ηλίου, έξω από την ατμόσφαιρα. Η μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς σε ένα χρόνο ισούται με 1367 w/m^2 .

2.2 Ηλιακή Ακτινοβολία

Ως ηλιακή ακτινοβολία ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια της ακτινοβολίας προσπίπτει σε μία επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας. Η μονάδα μέτρησής της είναι το 1 W/m^2 .

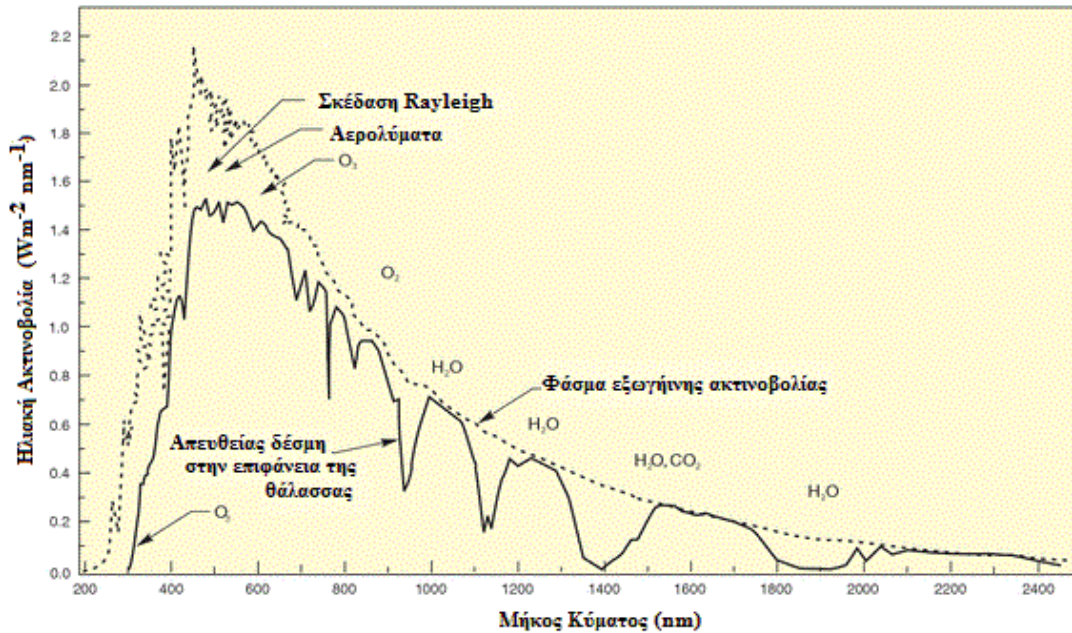
2.2.1 Το Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Η διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι η κύρια διαδικασία που συμβάλλει στη μεταφορά ενέργειας στην ατμόσφαιρα. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ταξιδεύει με τη μορφή κυμάτων και όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με τη ταχύτητα του φωτός. Το ορατό φως, οι ακτίνες γ, οι ακτίνες χ, η υπεριώδης και η υπέρυθρη ακτινοβολία, τα μικροκύματα, τα σήματα της τηλεόρασης, και τα ραδιοκύματα αποτελούν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

2.2.2 Φασματική Κατανομή της Ηλιακής Ακτινοβολίας

Η φασματική κατανομή της εξωγήινης ακτινοβολίας (Εικόνα 2.2) είναι όμοια με τη κατανομή που θα παίρναμε απουσία της ατμόσφαιρας. Κατά συνέπεια το φάσμα αυτό θα μοιάζει με το φάσμα ενός μέλανος σώματος στους 5800K. Όταν όμως η ηλιακή

ενέργεια διαπερνά την ατμόσφαιρα δέχεται πολλές επιδράσεις, ώστε η κατανομή της στην επιφάνεια της θάλασσας να παρουσιάζει μία διαφοροποιημένη μορφή.



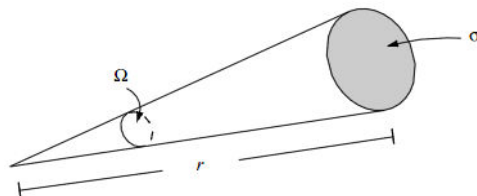
Εικόνα.2.2 : Το φάσμα της Ηλιακής Ακτινοβολίας

2.3 Η γεωμετρία του Ηλίου

2.3.1 Στερεά Γωνία

Για να αναλύσουμε το πεδίο της ακτινοβολίας συχνά χρειαζόμαστε να ορίσουμε την ποσότητα της φωτεινής ενέργειας που εγκλείεται σε ένα στοιχείο στερεάς γωνίας. Η στερεά γωνία (Εικόνα 2.3) ορίζεται ως ο λόγος της περιοχής σ μιας σφαιρικής επιφάνειας που περικλείεται στον πυρήνα προς στο τετράγωνο της ακτίνας, r , και μπορεί να γραφτεί ως:

$$\Omega = \sigma / r^2$$



Εικόνα.2.3 : Στερεά Γωνία

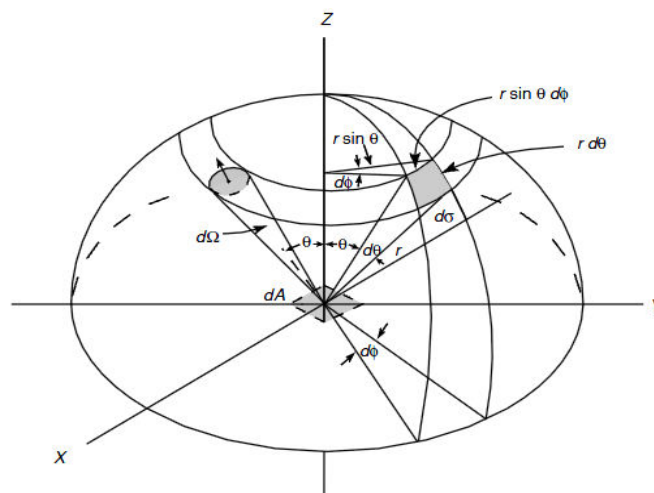
Η μονάδα της στερεάς γωνίας είναι το στερακτίνο (steradian). Για μία επιφάνεια της οποίας το εμβαδόν της είναι $4\pi r^2$, η στερεά γωνία είναι 4π sr. Για να υπολογίσουμε την στοιχειώδη διαφορική στερεά γωνία, κατασκευάζουμε μία σφαίρα με ένα κεντρικό σημείο που αναγράφεται ως O . Θεωρώντας μία γραμμή η οποία διέρχεται από το O και κινείται στο χώρο τέμνοντας μία αυθαίρετη επιφάνεια που βρίσκεται σε απόσταση r από το σημείο O . Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3, η διαφορική επιφάνεια (Εικόνα 2.4)σε πολικές συντεταγμένες δίνεται από τη σχέση :

$$d\sigma = (r d\theta) (r \sin\theta d\phi)$$

Συνεπώς, η διαφορική στερεά γωνία είναι :

$$d\Omega = d\sigma/r^2 = \sin\theta d\theta d\phi$$

όπου οι θ και ϕ υποδηλώνουν τις ζενιθιακές και τις αζιμουθιακές γωνίες αντίστοιχα, σε πολικές συντεταγμένες.



Εικόνα.2.3 :Διαφορική Στερεά Γωνία σε πολικές συντεταγμένες

2.3.2 Βασικές Ραδιομετρικές Ποσότητες

Η διαφορική ποσότητα της ενέργειας της ακτινοβολίας dE_λ σε ένα χρονικό διάστημα dt και σε ένα συγκεκριμένο διάστημα μηκών κύματος, λ έως $\lambda+d\lambda$, το οποίο διέρχεται από ένα στοιχείο της περιοχής dA (Εικόνα 2.3), με κατευθύνσεις που περικλείονται σε μία διαφορική στερεά γωνία, η οποία είναι προσανατολισμένη σε γωνία θ μπορεί να εκφραστεί και συναρτήσει της έντασης της ακτινοβολίας I_λ από τη σχέση :

$$dE_\lambda = I_\lambda \cos\theta dA d\Omega d\lambda dt$$

,όπου η ποσότητα $\cos\theta \, dA$ δηλώνει την ενεργό περιοχή στην οποία περικλείεται η ενέργεια. Έτσι η παραπάνω εξίσωση εκφράζει την ένταση της μονοχρωματικής ακτινοβολίας και η γενική της μορφή θα γράφεται ως:

$$I_\lambda = \frac{dE_\lambda}{\cos\theta \cdot d\Omega \cdot d\lambda \cdot dt \cdot dA}$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης που δίνει την ένταση της μονοχρωματικής ακτινοβολίας ως προς ολόκληρο ημισφαίριο της στερεάς γωνίας υπολογίζουμε τη πυκνότητα ροής της μονοχρωματικής ακτινοβολίας :

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda \cos\theta \cdot d\Omega$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω ποσότητα για όλο ο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα λαμβάνουμε την πυκνότητα της ολικής ροής της ακτινοβολούμενης ενέργειας.

Για ισοτροπική ακτινοβολία, δηλαδή αν η ένταση είναι ανεξάρτητη της κατεύθυνσης, η πυκνότητα μονοχρωματικής ροής θα είναι:

$$F_\lambda = \pi \cdot I_\lambda$$

Η ολική πυκνότητα ροής βρίσκεται αν ολοκληρώσουμε την πιο πάνω σχέση σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Η πυκνότητα μονοχρωματικής ροής μπορεί να εκφραστεί και στο χώρο των συχνοτήτων, ενώ με τη βοήθεια της θεμελιώδους εξίσωσης της κυματικής θα δοθεί από τη σχέση:

$$F_\nu = -(\lambda^2 / c) F_\lambda$$

Όμοια θα εκφράζεται και η ένταση της ακτινοβολίας:

$$I_\nu = -(\lambda^2 / c) I_\lambda$$

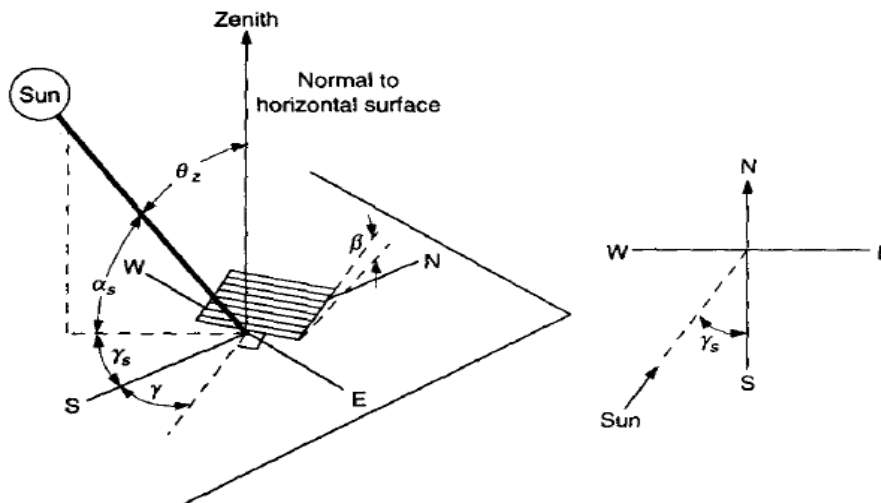
Όταν η πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας προέρχεται από μία εκπέμπουσα επιφάνεια, τότε η πυκνότητα ροής καλείται εκπομπή. Όταν εκφράζεται συναρτήσει του μήκους κύματος, αναφέρεται ως μονοχρωματική εκπομπή. Η ένταση της ακτινοβολίας καλείται επίσης και ως λαμπρότητα ή φωτεινότητα.

2.4 Τα είδη της ακτινοβολίας

2.4.1 Ακτινοβολία Δέσμης

Η ακτινοβολία δέσμης είναι η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο χωρίς αυτή να έχει σκεδαστεί από την ατμόσφαιρα. Αυτή η ακτινοβολία αναφέρεται και ως απευθείας ακτινοβολία. Η κατεύθυνση της ακτινοβολίας αυτής μπορεί να περιγραφεί από διάφορες παραμέτρους όπως είναι:

- Το γεωγραφικό πλάτος, φ ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$).
- Η απόκλιση, δηλαδή η γωνιακή θέση του Ήλιου το μεσημέρι σε σχέση με το επίπεδο του μεσημβρινού, δ ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$).
- Η κλίση, δηλαδή κλίση του επιπέδου της ζητούμενης επιφάνειας ως προς το οριζόντιο επίπεδο, β ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$).
- Η επιφανειακή αζιμουθιακή γωνία, δηλαδή η απόκλιση της προβολής σε ένα οριζόντιο επίπεδο της καθέτου στην επιφάνεια από τον τοπικό μεσημβρινό, είναι θετική δυτικά και αρνητική ανατολικά, γ ($-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).
- Η ωριαία γωνία ορίζεται ως η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου δυτικά ή ανατολικά του τοπικού μεσημβρινού εξαιτίας της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονά της κατά 15° την ώρα, τη μέρα αρνητική και μετά μεσημβρίας θετική, ω .
- Η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ακτινοβολίας δέσμης σε μία επιφάνεια και της καθέτου σε αυτή, θ .
- Η ζενιθιακή γωνία είναι η γωνία μεταξύ της κατακόρυφου και της γραμμής που εκτείνεται ως τον Ήλιο, θ_z .
- Η γωνία ηλιακού υψόμετρου σχηματίζεται ανάμεσα στο οριζόντιο επίπεδο και στη γραμμή που εκτείνεται ως τον Ήλιο, γ .
- Η ηλιακή αζιμουθιακή γωνία είναι η γωνιακή απόκλιση από το νότο της προβολής της ακτινοβολίας δέσμης στο οριζόντιο επίπεδο, γ_s .



Εικόνα.2.4 : Παράμετροι ακτινοβολίας δέσμης

2.4.2 Διάχυτη ακτινοβολία

Η διάχυτη ακτινοβολία είναι η ηλιακή ακτινοβολία η οποία έχει υποστεί σκέδαση ύστερα από τη διέλευσή της από την ατμόσφαιρα.

2.4.3 Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ολική ακτινοβολία ορίζεται ως το άθροισμα της απευθείας και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν σε μία επιφάνεια.

2.5 Οι έννοιες της Σκέδασης και της Απορρόφησης

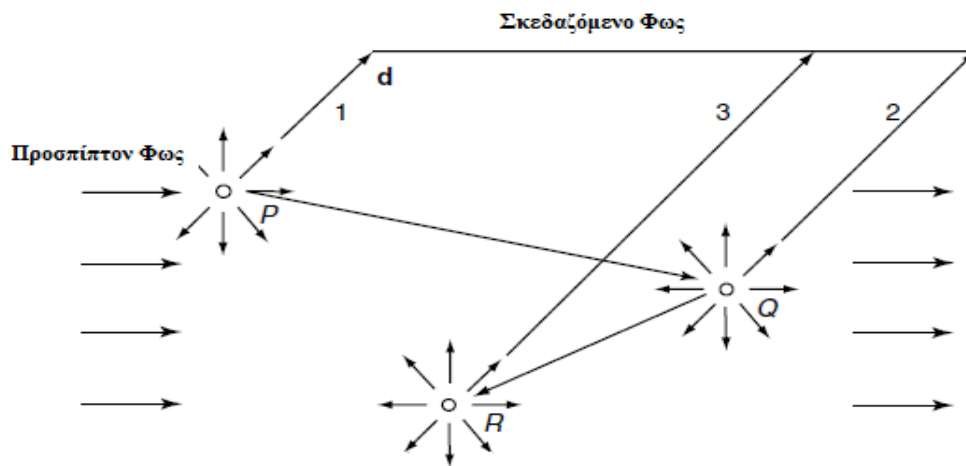
Μεγάλο μέρος του φωτός που φτάνει στα μάτια μας δεν προέρχεται απευθείας από την πηγή του αλλά έμμεσα μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται σκέδαση. Η σκέδαση είναι μία θεμελιώδης φυσική διαδικασία η οποία σχετίζεται με την αλληλεπίδραση του φωτός με τα ατμοσφαιρικά μόρια, με τις υδροσταγόνες, με τους παγοκρυστάλλους και την σκόνη. Ο βαθμός σκέδασης εξαρτάται από το πλήθος, το μέγεθος και το σχήμα της ύλης που σκεδάζει την ακτινοβολία. Η σκέδαση εμφανίζεται σε όλα τα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Στη διαδικασία της σκέδασης το σωματίδιο συνεχώς αποσπά ενέργεια από το προσπίπτον κύμα και επανακτινοβολεί την ενέργεια αυτή προς όλες τις κατευθύνσεις. Συνεπώς το σωματίδιο μπορεί να θεωρηθεί σαν μία σημειακή πηγή σκεδάζουσας ενέργειας. Στην ατμόσφαιρα τα σωματίδια που είναι υπεύθυνα για τη σκέδαση κυμαίνονται σε μέγεθος από μόρια αερίων ($\sim 10^{-4}$ μm) μέχρι αερολύματα (~ 1 μm), υδροσταγόνες (~ 10 μm), παγοκρυστάλλοι (~ 100 μm), και μεγάλες σταγόνες

βροχής ή σωματίδια χαλαζιού (~1 cm). Το μέγεθος του σωματιδίου που σκεδάζει την ακτινοβολία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και καλείται παράμετρος του μεγέθους. Για ένα σωματίδιο σφαιρικού σχήματος η παράμετρος του μεγέθους ορίζεται ως ο λόγος της περιμέτρου του προς το προσπίπτον μήκος κύματος. Εάν ο λόγος αυτός είναι πολύ μικρότερος από τη μονάδα τότε η σκέδαση θα ονομάζεται σκέδαση Rayleigh. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σκέδασης Rayleigh είναι η σκέδαση του ορατού φωτός από ατμοσφαιρικά μόρια, που εξηγεί την δημιουργία του μπλε χρώματος στον ουρανό και την πόλωση σε αυτόν. Στην περίπτωση όπου τα σωματίδια έχουν συγκρίσιμο μέγεθος με αυτό του μήκους κύματος της ακτινοβολίας ή και μεγαλύτερο μέγεθος η σκέδαση που πραγματοποιείται αναφέρεται ως Lorenz-Mie σκέδαση. Όταν τα σωματίδια έχουν μικρό μέγεθος τείνουν να σκεδάζουν το φως εξίσου προς δύο αντίθετες κατευθύνσεις, προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Ωστόσο καθώς το μέγεθος του σωματιδίου αυξάνεται σε μέγεθος σκεδάζει προς τα εμπρός με πολύπλοκα χαρακτηριστικά σκέδασης.

Στην ατμοσφαιρική σκέδαση θεωρούμε γενικά ότι το φως που σκεδάζεται από τα μόρια και τα σωματίδια έχει την ίδια συχνότητα (ή μήκος κύματος) με το προσπίπτον φως. Τα ατμοσφαιρικά μόρια και τα σωματίδια διαχωρίζονται έτσι ώστε το κάθε σωματίδιο να σκεδάζει το φως σαν να μην υπάρχουν τα υπόλοιπα σωματίδια. Αυτή η ιδιότητα αναφέρεται ως ανεξάρτητη σκέδαση. Η ανεξάρτητη σκέδαση βοηθά στην περίπτωση όπου έχουμε μία συλλογή από σωματίδια, καθώς επιτρέπει τη χρήση της ποσότητας της ενέργειας αντί του ηλεκτρικού πεδίου στην ανάλυση της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα.

Συχνά ένα μέρος της ακτινοβολίας που σκεδάζεται από κάποια σωματίδια προσπίπτει και πάλι σε κάποιο άλλο σωματίδιο με αποτέλεσμα να επανασκεδάζεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Η διαδικασία αυτή λέγεται δευτερεύουσα σκέδαση. Αν έχουμε πολλαπλής τάξης σκεδάσεις τότε η σκέδαση θα ονομάζεται πολλαπλή (Εικόνα 2.5). Η τελευταία διαδικασία είναι πολύ σημαντική επειδή συμβάλλει στη μεταφορά της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, ειδικότερα όταν εμπλέκονται αερολύματα ή νέφη.



Εικόνα.2.5 : Διαδικασία πολλαπλής σκέδασης η οποία περιλαμβάνει πρώτης (P), δεύτερης (Q) και τρίτης (R) τάξης σκέδαση, η κατεύθυνση ορίζεται με το γράμμα d.

Η σκέδαση της ηλιακής ακτινοβολίας πολλές φορές συνοδεύεται από την απορρόφηση, η οποία πραγματοποιείται στο υπεριώδες ηλιακό ενεργειακό φάσμα κυρίως από το όζον, ενώ στο υπέρυθρο τμήμα οφείλεται στην ύπαρξη υδρατμών και διοξειδίου του άνθρακα. Σε μοριακές ατμόσφαιρες, υπάρχει πολύ μικρή απορρόφηση της ενέργειας στο ορατό φάσμα. Τα νέφη απορροφούν επίσης πολύ λίγο ορατό φως. Εντέλει η σκέδαση και η απορρόφηση απομακρύνουν ενέργεια από τη δέσμη του φωτός που διέρχεται από το μέσο. Συνεπώς η δέσμη του φωτός εξασθενεί και το φαινόμενο αυτό λέγεται εξαφάνιση.

Η απορρόφηση ενέργειας από τα σωματίδια και τα μόρια συντελεί στην εκπομπή. Η εκπομπή ακτινοβολίας είναι στην ουσία η αντίστροφη διαδικασία από την απορρόφηση και σχετίζεται με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος το οποίο απορροφά σε όλα τα μήκη κύματος.

Κεφάλαιο 3 : Φωτοβολταϊκά συστήματα

3. Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία η οποία έχει ως στόχο τη βελτίωση των προγνωστικών τιμών εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα. Επομένως είναι απαραίτητο να μελετήσουμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων ώστε να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας τους ,δηλαδή τους φυσικούς νόμους που διέπουν την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Με τη παροχή της γνώσης της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας μπορούμε να ρυθμίσουμε τα συστήματα αυτά ώστε να έχουν την μέγιστη δυνατή απόδοση. Παρακάτω γίνεται μία σύντομη περιγραφή της δομής των φωτοβολταϊκών μονάδων και των φυσικών φαινομένων που καθορίζουν τη λειτουργία τους.

3.1 Τι είναι τα Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα Φωτοβολταϊκά είναι συστήματα τα οποία παράγουν ηλεκτρική ισχύ συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος η οποία μετριέται σε Watt ή σε KWatt. Η ιστορία των φωτοβολταϊκών ξεκινάει από τη στιγμή που ο Fritts δημιούργησε τη πρώτη λειτουργική φωτοβολταϊκή συσκευή, το 1983. Με την τήξη πυριτίου σε ένα λεπτό φύλλο σε μεταλλικό υπόστρωμα στο οποίο είχε πιέσει μία ταινία από φύλλο χρυσού, παρατήρησε ότι το ρεύμα που παράγεται, σε περίπτωση που δεν απαιτείται η απευθείας χρήση του, μπορεί να αποθηκευτεί σε συσσωρευτές ή να διαβιβασθεί κάπου αλλού. Από τότε έως και σήμερα η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών έχει εξελιχθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό, ενώ η εγκατάσταση και η χρήση τους έχουν διευρυνθεί.

3.2 Η δομή και η λειτουργία των Φωτοβολταϊκών

3.2.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Για να κατανοήσουμε καλύτερα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο θα πρέπει να έχουμε μελετήσει πρώτα τους νόμους που διέπουν την ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από σωματίδια που καλούνται φωτόνια. Τα φωτόνια μεταφέρουν συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας ανάλογα με τις φασματικές ιδιότητες της πηγής. Τα φωτόνια αναλόγως με το μήκος κύματός τους περιέχουν κάποια ενέργεια η οποία υπολογίζεται από το νόμο του Plank.

$$E=hc/\lambda$$

,όπου h η σταθερά του Plank.

Μόνο τα φωτόνια με επαρκή ποσότητα ενέργειας μπορούν να δημιουργήσουν ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής, δηλαδή τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από αυτή του ενεργειακού διάκενου του ημιαγωγού. Όπως αναφέραμε και πιο πριν η απορρόφηση και η εκπομπή από τον ήλιο, όπως σε όλα τα μέλανα σώματα, είναι ισοτροπική. Ωστόσο η απόσταση της Γης από τον ήλιο σημαίνει ότι μόνο τα φωτόνια με κατεύθυνση προς τη Γη θα φτάνουν σε αυτή και θα δημιουργούν το ηλεκτρομαγνητικό της φάσμα. Η μάζα του αέρα ορίζεται ως το μέτρο της απορρόφησης στην ατμόσφαιρα που επιδρά στο περιεχόμενο του φάσματος και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Η μάζα του αέρα δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Air mass} = 1/\cos\theta$$

,όπου θ η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης, ή από τον τύπο:

$$\text{Air mass} = \sqrt{1 + (S/H)^2}$$

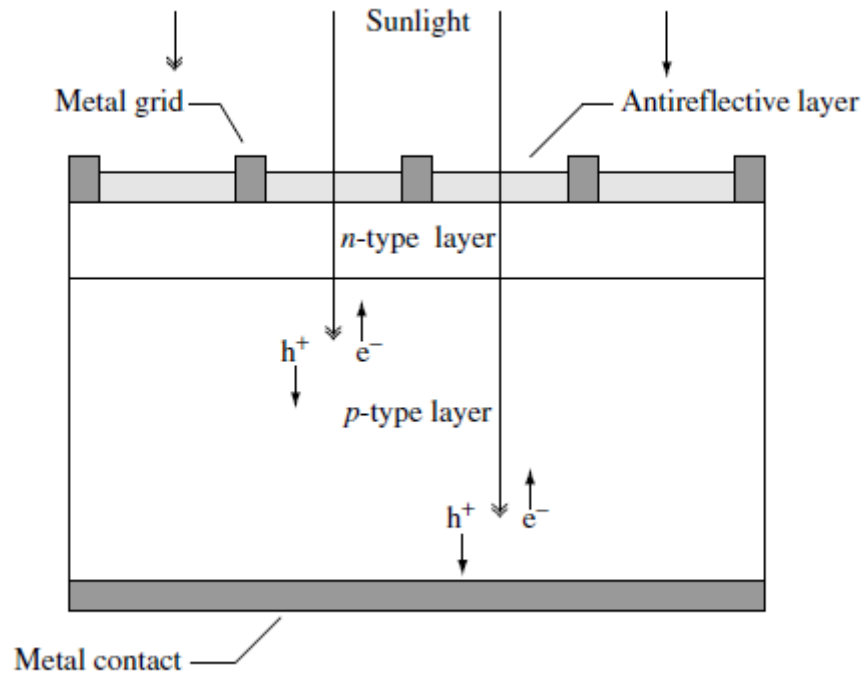
,όπου S είναι το μήκος της σκιάς ενός αντικειμένου, ενώ H είναι το ύψος του αντικειμένου.

Η διαδικασία παραγωγής ισχύος στα φωτοβολταϊκά συστήματα επιτυγχάνεται με την πρόσπτωση φωτονίων στην επιφάνεια των υπαρχόντων ημιαγωγών. Εάν τα φωτόνια που προσπίπτουν στην επιφάνεια των ημιαγωγών διαθέτουν ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση με αυτή του διάκενου του ημιαγωγού, τότε απορροφάται από έναν δεσμό και τελικά απελευθερώνεται ένα ηλεκτρόνιο. Οι ελεύθεροι φορείς που προκύπτουν από το 'σπάσιμο' των δεσμών μπορούν να δημιουργήσουν διαφορά δυναμικού όταν θα βρεθούν στη διεπαφή της διόδου. Η εμφάνιση της τάσης κατά το φωτισμό της διόδου, η οποία προκαλεί ορθή πόλωση στη δίοδο, καλείται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Έτσι όταν οι ηλιακές κυψέλες προσλαμβάνουν την ηλιακή ενέργεια τις στιγμές που υπάρχει διαθέσιμο φως, στη συνέχεια μετατρέπουν αυτή την ενέργεια σε ηλεκτρική.

3.2.2 Οι ημιαγωγοί

Τη φυσική βάση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών αποτελούν τα ηλιακά κελιά. Αυτά είναι κατασκευασμένα από ημιαγωγούς, υλικά τα οποία έχουν δεσμεύσει τα ηλεκτρόνια μιας συγκεκριμένης μπάντας που ονομάζεται μπάντα σθένους. Οι ημιαγωγοί είναι απλές συσκευές, με κρυσταλλική δομή, οι οποίες έχουν την ικανότητα να απορροφούν ηλιακό φως και να μεταφέρουν μία ποσότητα της ενέργειας αυτής των απορροφημένων φωτονίων σε φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και σε οπές. Οι δίοδοι ημιαγωγών διαχωρίζουν και συλλέγουν το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα επιλεκτικά προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση από τους φορείς και τους αγωγούς. Στην περίπτωση που αυτά τα στοιχεία βρίσκονται σε θεμελιώδη κατάσταση δεν άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ αν απορροφήσουν κάποιο ποσό ενέργειας απελευθερώνονται πολλά ηλεκτρόνια από τους δεσμούς. Έτσι τα ηλεκτρόνια σθένους απομακρύνονται από την περιοχή όπου είχαν δεσμό στο κρυσταλλικό πλέγμα και αποκτούν κινητική ενέργεια δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Για να ξεπεραστεί όμως το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και τη ζώνη αγωγιμότητας θα πρέπει να δοθεί η κατάλληλη ποσότητα ενέργειας με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ημιαγωγών είναι συνήθως ο κρύσταλλος του πυριτίου (Si), οι πολυκρύσταλλοι, τα άμορφα, το GaAs, το GaInP, το Cu(InGa)Se₂, και το CdTe. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό όμως είναι το πυρίτιο καθώς τα χαρακτηριστικά της απορρόφησής του μοιάζουν με αυτά του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Το πυρίτιο περιέχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους τα οποία μπορούν να σχηματίζουν δεσμούς με γειτονικά άτομα ώστε να δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς. Στον κρύσταλλο του πυριτίου τα άτομα σχηματίζουν μία τετραεδρική κρυσταλλική δομή σαν αυτή του διαμαντιού.



Εικόνα.3.1 : Η σχηματική αναπαράσταση ενός ηλιακού κελιού. Δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων, e^- , και ζευγών οπών h^+ .

3.2.3 Πλεονεκτήματα χρήσης των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα ποικίλα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα φωτοβολταϊκά έχουν οδηγήσει σε μία ραγδαία αύξηση της χρήσης τους τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι ότι χρησιμοποιούν μία αέναη πηγή ενέργειας, τον Ήλιο, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα τα οποία αποτελούν μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Επιπλέον δεν αποτελούν πηγή ρύπανσης για την ατμόσφαιρα, δηλαδή δεν συνεισφέρουν στην αλλαγή του κλίματος ή στη μόλυνση καθώς δεν λαμβάνουν χώρα καύσεις ή εκπομπές. Το χαμηλό κόστος λειτουργίας, καθώς και η γρήγορη εγκατάστασή τους έχει διευκολύνει σημαντικά την ανάπτυξη μίας ισχυρής αγοράς η οποία στοχεύει στην βέλτιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Παράλληλα η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων με trackers έχει βοηθήσει στην καλύτερη απόδοση αυτών.

Κεφάλαιο 4 : Το Σύστημα Πρόγνωσης Καιρού ΣΚΙΡΩΝ (SKIRON/Eta)

4. Εισαγωγή

Το Σύστημα πρόγνωσης καιρού SKIRON/Eta βασίζεται στο ατμοσφαιρικό μοντέλο Eta/NCEP (National Centre of Environmental Prediction) και αναπτύχθηκε από την ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού - UOA/AM&WFG (Kallos et al, 1997). Για να εφαρμόσουμε το σύστημα είναι απαραίτητη η χρήση περιβάλλοντος Unix/Linux και η εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων. Ένα βασικό πλεονέκτημα του συστήματος έγκειται στο ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε παράλληλο περιβάλλον και για οποιοδήποτε πλήθος επεξεργαστών. Η επεξεργασία του συστήματος διακρίνεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η προεπεξεργασία (pre-processing) του συστήματος κατά την οποία τα δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου προετοιμάζονται. Το δεύτερο στάδιο είναι η μετεπεξεργασία (post-processing) η οποία χρησιμοποιεί τα δεδομένα εξόδου είτε για να απεικονίσει γραφικά τα εξαγόμενα, είτε για άλλες εφαρμογές. Το μοντέλο SKIRON είναι ένα αξιόπιστο σύστημα το οποίο παρέχει προγνώσεις που αφορούν σε τοπικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (όπως για παράδειγμα κάποια έντονα καιρικά φαινόμενα) καθώς επίσης και σε διάφορες ατμοσφαιρικές παραμέτρους. Για την πρόγνωση καταστροφικών ή μόνιμων εκπομπών ατμοσφαιρικών αερολυμάτων χρησιμοποιείται το μοντέλο μεταφοράς του συστήματος το οποίο υπολογίζει τη διασπορά κάποιων ρύπων. Μία κύρια εφαρμογή αφορά τη συνδυασμένη λειτουργία με ένα μοντέλο για μεταφορά και εναπόθεση εδαφικής σκόνης.

Η Ομάδα Ατμοσφαιρικών Μοντέλων και Πρόγνωσης Καιρού (Atmospheric Modeling And Weather Forecasting Group) επιμελείται την αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος Σκίρων στις εγκαταστάσεις της στο Πανεπιστήμιο Αθηνών. Το σύστημα παρέχει πρόγνωση ατμοσφαιρικής κατάστασης μέχρι και 168 ωρών (5 ημερών) τόσο για τον ευρύτερο ελλαδικό χώρο όσο και για ολόκληρη την περιοχή της Μεσογείου και της Νότιας Ευρώπης. Ακολούθως γίνεται περιγραφή του συστήματος και των δυνατοτήτων του.

4.1 Το Στάδιο της Προ-επεξεργασίας (pre-processing)

Το στάδιο της προεπεξεργασίας περιλαμβάνει τη χρήση μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως είναι το γεωδυναμικό ύψος, συνιστώσες του ανέμου και υγρασία,

που προκύπτουν από ένα μοντέλο μεγαλύτερης κλίμακας (Global Climate Model). Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει:

- Την ανάλυση και τα προγνωστικά πεδία από το European Centre for Medium-Range Forecasts (ECMWF).
- Την ανάλυση και προγνωστικά πεδία από το National Center for Environmental Prediction (NCEP).
- Άλλα εξαγόμενα πεδία από 3 ή 4-διάστατα συστήματα 'assimilation' όπως το LAPS του NOAA/FSL.

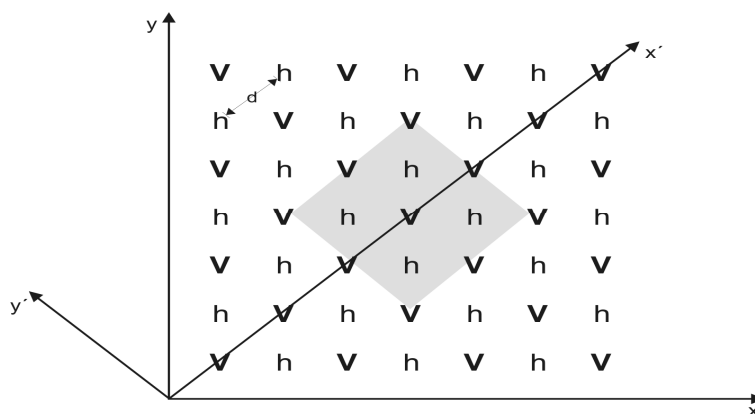
Τα δεδομένα αυτά αποκωδικοποιούνται και ύστερα παρεμβάλλονται στη δομή του πλέγματος, που χρησιμοποιεί το μοντέλο Eta. Σε αυτό το στάδιο, στο πλέγμα του μοντέλου καθορίζονται οι παράμετροι της επιφάνειας, οι οποίες είτε προέρχονται από παρατηρήσεις, είτε προκαθορίζονται υπολογιστικά (π.χ. το ανάγλυφο, η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας, διάφοροι τύποι εδάφους και βλάστησης, η θερμοκρασία και η υγρασία εδάφους). Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης ετοιμάζονται επίσης όλες οι παράμετροι, που ορίζουν την περιοχή και την ανάλυση του μοντέλου καθώς και οι σταθερές, που καθορίζουν την διαμόρφωση του μοντέλου. Εξαιτίας της δυσκολίας, που υπάρχει αναφορικά με την εύρεση όλων των απαραίτητων δεδομένων εισαγωγής, υπάρχουν αρκετές επιλογές καθώς και το σύνολο των δεδομένων, που συνήθως χρησιμοποιούνται από τα μοντέλα. Τα δεδομένα ορογραφίας, που χρησιμοποιούνται προέρχονται από το US Geological Survey (USGS) με ανάλυση 30x30 δευτερολέπτων της μοίρας. Όσον αφορά τη βλάστηση χρησιμοποιούνται τα δεδομένα σε κόμβους πλέγματος (gridded) με ανάλυση 30x30 δευτερολέπτων (σύμφωνα με την ταξινόμηση Olson World Ecosystems) ενώ για τις κλάσεις υφής εδάφους χρησιμοποιούνται δεδομένα υφής εδάφους με ανάλυση 2x2 πρώτων λεπτών. Τα δεδομένα αυτά προήλθαν από συνδυασμό δεδομένων υφής εδάφους κατά ZOBLER και τύπων εδάφους κατά UNEP/FAO. Για τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας (SST) υπάρχουν τρεις επιλογές όπως, ο προκαθορισμός του SST σύμφωνα με το γεωγραφικό πλάτος, από το NCAR, τα κλιματολογικά δεδομένα με ανάλυση σε μοίρες 1°x1° (μέσες μηνιαίες τιμές), από το ECMWF τα πεδία σε κόμβους πλέγματος, ή το NCEP με 0.5°x0.5° σε καθημερινή βάση. Για τη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους χρησιμοποιούνται σε 6 επίπεδα προκαθορισμένα δεδομένα ή δεδομένα gridded από το ECMWF ή το NCEP. Επιπρόσθετα υπολογίζονται οι κλίσεις και τα αζιμούθια των

κεκλιμένων επιφανειών που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο. Στο στάδιο της προετοιμασίας υπολογίζεται επίσης η ανακλαστικότητα του εδάφους (albedo).

Μετά το τέλος του σταδίου αυτού, εφαρμόζεται το τροποποιημένο μοντέλο Eta για μία προκαθορισμένη χρονική περίοδο πρόγνωσης (συνήθως για 2-3 ημέρες).

4.2 Οριζόντια Διακριτοποίηση και Μετασχηματισμός Συντεταγμένων

Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου εφαρμόζεται στα σημεία semi-staggered πλέγματος τύπου E (Messinger, 1973; Janjic, 1974; Mesinger and Arakawa, 1976; Janjic, 1979; Vasiljevic, 1982; Janjic and Messinger, 1989; Janjic et al., 1995), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα (4.1).



Σχήμα 4.1: Πλέγμα τύπου E σε κύριο (x,y) και δευτερεύον (x',y') σύστημα συντεταγμένων. Η ελάχιστη έκταση τεσσάρων σημείων πλέγματος σημειώνεται με τη σκιασμένη περιοχή. Η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά σημεία πλέγματος της ίδιας μεταβλητής απεικονίζεται με d .

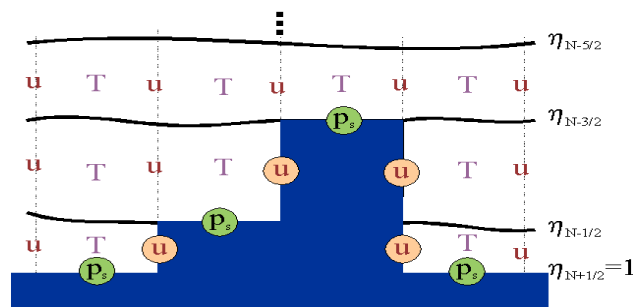
Στα σημεία πλέγματος που σημειώνονται με **v** επιλύονται οι οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου u και v , ενώ στα σημεία **h** επιλύονται όλες οι υπόλοιπες εξαρτημένες μεταβλητές, όπως η επιφανειακή πίεση, η θερμοκρασία, η ειδική υγρασία, η αναλογία μίγματος των νεφών, η κατακόρυφη ταχύτητα, η τυρβώδης κινητική ενέργεια καθώς και οι επιφανειακές μεταβλητές. Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται δύο οριζόντια συστήματα συντεταγμένων: το κύριο (x, y) , που ακολουθεί τις κανονικές γεωγραφικές συντεταγμένες και το δευτερεύον (x', y') , που προκύπτει με περιστροφή του κανονικού συστήματος γεωγραφικών συντεταγμένων κατά 45° . Με τον τρόπο αυτό τα σημεία πλέγματος **h** και αντίστοιχα τα σημεία **v** βρίσκονται στον ίδιο άξονα. Για υπολογιστικούς λόγους, στο περιστρεμμένο σύστημα συντεταγμένων επιβάλλεται και δεύτερος μετασχηματισμός, κατά τον οποίο το πολικό σημείο του πεδίου ορισμού

μεταφέρεται στην τομή του ισημερινού με τον μηδενικό μεσημβρινό. Έτσι, το τροποποιημένο σύστημα συντεταγμένων παρέχει πιο ομοιόμορφη οριζόντια απόσταση μεταξύ των σημείων πλέγματος, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό τη σύγκλιση των μεσημβρινών στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη .

4.3 Κατακόρυφη Διακριτοποίηση

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο Σκίρων χρησιμοποιεί την *Eta* (η) ως κατακόρυφη συντεταγμένη. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στη δυνατότητα σωστής αναπαράστασης της επίδρασης του ανάγλυφου και στην ελαχιστοποίηση γνωστών σφαλμάτων κατά τον υπολογισμό της δύναμης βαροβαθμίδας, της μεταφοράς και της οριζόντιας διάχυσης σε περιπτώσεις απότομης ορογραφίας.

Η eta (η) κατακόρυφη συντεταγμένη “βαθμωτής ορογραφίας” (step-mountain) αναπαριστά τα υψόμετρα της επιφάνειας ως διακριτά σύνολα τιμών ή βημάτων, άμεσα εξαρτώμενα από την κατακόρυφη ανάλυση του μοντέλου και από το πραγματικό ύψος των ορεινών όγκων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το επιφανειακό ανάγλυφο παρουσιάζεται βαθμωτό αντί ομαλό και συνεχές, όπως σε σ -συντεταγμένη. Για δεδομένο εύρος υψομέτρων, η eta συντεταγμένη δεν εμφανίζει μοναδικότητα αντιστοιχίας ύψους και eta επιφανειών (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Η κατακόρυφη κατανομή των εξαρτημένων μεταβλητών σε *Eta* κατακόρυφο σύστημα συντεταγμένων.

Οι eta συντεταγμένες ορίζονται από τη σχέση (Mesinger, 1984, Mesinger et al. 1988)

$$\eta = \left(\frac{p - p_T}{p_{sfc} - p_T} \right) \eta_{srf} \quad (4.1)$$

όπου

$$\eta_{sf} = \frac{p_{ref}(z_{sf}) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T} \quad (4.2)$$

Στις εξισώσεις καθορισμού της *eta* κατακόρυφης συντεταγμένης, p_T είναι η πίεση στην κορυφή του μοντέλου, p_{sf} και z_{sf} παριστάνουν την πίεση και το ύψος στο κάτω όριο του μοντέλου και p_{ref} την πίεση αναφοράς της κατακόρυφης στήλης (επί παραδείγματι, η πίεση της πρότυπης ατμόσφαιρας). Οι ορεινοί όγκοι στο *eta* σύστημα συντεταγμένων παριστάνονται ως “κυψελίδες ορογραφίας”. Στο συγκεκριμένο πλέγμα, η θερμοκρασία (T), η ειδική υγρασία (q) και οι οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου (u, v) τοποθετούνται στο μέσο των κατακόρυφων επιπέδων, ενώ η κατακόρυφη ταχύτητα (w) και το γεωδυναμικό ύψος (Φ) τοποθετούνται στις διαχωριστικές επιφάνειες των επιπέδων. Τα σημεία v βρίσκονται στις κάθετες πλευρές των “κυψελίδων ορογραφίας”, ενώ οι επιφανειακές συντεταγμένες συμπίπτουν με τις ελεύθερες κορυφές των “κυψελίδων ορογραφίας” (Σχήμα 4.2).

4.4 Βασικές Εξισώσεις και Σχήματα Χρονικής Διαφόρισης

Σύμφωνα με τους Kasahara (1974) και Simmons and Burridge (1981) και χρησιμοποιώντας τις *Eta* συντεταγμένες από τη σχέση (2.9), οι βασικές εξισώσεις για αδιαβατική κίνηση χωρίς τριβή είναι οι εξής (Mesinger et al., 1988):

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} + f\mathbf{k} \times \mathbf{v} + \nabla \Phi + \frac{RT}{p} \nabla p = 0 \quad (4.3)$$

$$\frac{dT}{dt} + \kappa \cdot \frac{T \cdot \omega}{p} = 0 \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right) + \nabla \cdot \left(\mathbf{v} \cdot \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\dot{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = - \frac{R \cdot T}{p} \frac{\partial p}{\partial \eta} \quad (4.6)$$

$$\omega \equiv \frac{dp}{dt} = - \int_0^\eta \nabla \cdot \left(\mathbf{v} \cdot \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta + \mathbf{v} \cdot \nabla p \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = - \int_0^{\eta_s} \nabla \cdot \left(\mathbf{v} \cdot \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta \quad (4.8)$$

$$\dot{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial \eta} = - \frac{\partial p}{\partial t} - \int_0^{\eta} \nabla \cdot \left(\mathbf{v} \cdot \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) d\eta \quad (4.9)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις το $\frac{d}{dt}$ παριστάνει την ολική παράγωγο ως προς το χρόνο, το \mathbf{v} είναι το οριζόντιο διάνυσμα της ταχύτητας, f η παράμετρος Coriolis, k το μοναδιαίο διάνυσμα στον κατακόρυφο άξονα, Φ το γεωδυναμικό, R η παγκόσμια σταθερά των αερίων και κ ο λόγος R/c_p , όπου c_p είναι η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση. Ο όρος $\dot{\eta}$ αντιστοιχεί στη κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου.

Η χρονική διαφόριση στο μοντέλο Skiron/Eta στηρίζεται στη χρήση “explicit” αριθμητικών σχημάτων (Ames, 1969; Gadd, 1974; Mesinger, 1974; Mesinger, 1977; Janjic and Wiin-Nielsen, 1977). Σε πρώτη φάση, επιλύεται χρονικά η εξίσωση της συνέχειας με χρήση “forward” σχήματος και στη συνέχεια, οι προκύπτουσες τιμές των βαθμίδων της πίεσης χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των συνιστωσών του ανέμου ολοκληρώνοντας “backward” ως προς το χρόνο.

Για την κατακόρυφη μεταφορά όρων, όπως θερμοκρασία, ειδική υγρασία, τυρβώδης κινητική ενέργεια (ΤΚΕ) και οριζόντια ορμή χρησιμοποιείται η “Euler-backward (Matsuno)” τεχνική. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, πραγματοποιείται αρχικά ένα βήμα μπροστά στο χρόνο, όπου χρησιμοποιώντας Eulerian σχήμα προκύπτει μια πρώτη εκτίμηση, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής της μεταβλητής γυρνώντας πίσω ένα βήμα, επιστρέφοντας, δηλαδή, στο τρέχον χρονικό βήμα:

$$A^{(n+1)*} = A^n - \Delta t \left(\dot{\eta} \frac{\partial A}{\partial \eta} \right)^n \quad (4.10)$$

Η πρώτη προσέγγιση $A^{(n+1)*}$ χρησιμοποιείται κατά την εκτέλεση του “backward” βήματος:

$$A^{n+1} = A^n - \Delta t \left(\dot{\eta} \frac{\partial A}{\partial \eta} \right)^{(n+1)*} \quad (4.11)$$

Το συγκεκριμένο σχήμα χαρακτηρίζεται “explicit” με πρώτης τάξεως ακρίβεια στο χρόνο.

Για την οριζόντια μεταφορά ορμής χρησιμοποιείται το “forward-then-centered time” σχήμα. Κατά τη συγκεκριμένη περίπτωση, εκτελείται αρχικά ένα βήμα, χρησιμοποιώντας Eulerian σχήμα, για την πρώτη εκτίμηση στο μισό του χρονικού βήματος ολοκλήρωσης:

$$\mathbf{v}^{\left(n+\frac{1}{2}\right)^*} = \mathbf{v}^n - \frac{\Delta t}{2}(\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v})^n \quad (4.12)$$

Η τελική τιμή προκύπτει από την πρώτη εκτίμηση ως:

$$\mathbf{v}^{n+1} = \mathbf{v}^n - \Delta t(\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v})^{\left(n+\frac{1}{2}\right)^*} \quad (4.13)$$

Η οριζόντια μεταφορά των υπολοίπων προγνωστικών μεταβλητών βασίζεται στο ίδιο σχήμα με τη διαφορά ότι το “forward” βήμα της πρώτης προσέγγισης εκτελείται σε $(\sqrt{2}/2) \cdot \Delta t$. Η συγκεκριμένη τεχνική χαρακτηρίζεται ως “first-forward-then-centered time” σχήμα.

Για την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις:

$$Q(p) = c_p^{-1} \frac{d}{dp} \int_0^{\infty} F_v(p) dv \quad (4.15)$$

$$F_v(p) = B_v \cdot T(0) \cdot \tau_v(0, p) + \int_0^{\infty} \frac{\partial B_v}{\partial p'} \tau_v(p, p') dp' \quad (4.16)$$

$$\tau_v(p, p') = 2 \int_0^1 \mu d\mu \prod_{r=1}^{\infty} \exp \left[\frac{-1}{\mu g_r} \int_r^{p'} r^{\text{sw}}(p^*) \sum_r f_r^{\text{sw}}(v, T(p^*), p^*) dp^* \right] \quad (4.17)$$

Η σχέση 4.15 δίνει το ρυθμό ψύξης ή θέρμανσης της ατμόσφαιρας, ενώ ως F_v ορίζεται η καθαρή ροή ακτινοβολίας στη συχνότητα v και πίεση p . Ως B_v ορίζεται η εκπομπή μέλανος σώματος. Η μονοχρωματική συνάρτησης διάδοσης τ_v περιλαμβάνει τους απορροφητές πιέσεων p και p' , το συντελεστή της ζενιθείας γωνίας, μ , την

αναλογία μίγματος κατά μάζα για τον κάθε απορροφητή r^{gas} , και τον συντελεστή απορρόφησης, f_k^{gas} , στη συχνότητα ω που οφείλεται στην κ-ιοστή φασματική γραμμή του απορροφητή.

Για την ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος χρησιμοποιούμε τις σχέσεις:

$$F_s^\perp = F_{VB} + F_{VD} + F_{NB} \quad (4.18)$$

$$F_{VB} = \tau_v \cdot \tau_{O_3} \cdot SSOLAR \cdot \cos Z \cdot e^{-0.15746 \sec Z} \quad (4.19)$$

$$\sec Z = \frac{35}{\sqrt{1224 \cdot \cos^2 Z + 1}} \quad (4.20)$$

$$SSOLAR = SOLC \cdot \cos Z \quad (4.21)$$

$$SOLC = SC \cdot (d_m / d)^2 \quad (4.22)$$

$$F_{VD} = \frac{(1 - R_{RAY}) \cdot (\tau_v \cdot \tau_{O_3} \cdot SSOLAR \cdot \cos Z) - (1 - A) \cdot F_{VB}}{1 - A} \quad (4.23)$$

$$R_{RAY} = R_1 + \frac{(1 - R_1) \cdot (1 - 0.093) \cdot A}{1 - 0.093 \cdot A} \quad (4.24)$$

$$R_1 = \frac{0.104}{1 + 4.8 \cdot \cos Z} \quad (4.25)$$

$$F_{NB} = \sum_{i=2}^{12} \tau_v \cdot \tau_{CO_2} \cdot SSOLAR \cdot \cos Z \quad (4.26)$$

$$\tau_v = e^{-kU} \quad (4.27)$$

Η σχέση 4.18 δίνει η ροή της ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια, για ατμόσφαιρα χωρίς νέφωση. Η 4.19 δίνει την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία στο ορατό φάσμα, η 4.23 τη διάχυτη ακτινοβολία στο ορατό φάσμα και η 4.26 την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Ο τύπος 4.20 δίνει τη συναφαπτομένη της ζενιθείας γωνίας, η σχέση 4.21 την ηλιακή ενέργεια που φθάνει σε ένα οριζόντιο επίπεδο στην κορυφή της ατμόσφαιρας και η 4.22 δίνει την ηλιακή σταθερά στην κορυφή της ατμόσφαιρας. Ως A θεωρούμε την ανακλαστικότητα της επιφάνειας, ως k το συντελεστή απορρόφησης για κάθε ζώνη και U το οπτικό βάθος για τους υδρατμούς.

4.5 Το στάδιο μετεπεξεργασίας (Post-processing)

Τα προγράμματα μετεπεξεργασίας είναι αρκετά και όλα συνδέονται με γραφικά πακέτα. Το βασικό πρόγραμμα είναι ένα και έχει ως στόχο την ενοποίηση των πεδίων των διαφόρων ατμοσφαιρικών παραμέτρων τα οποία είναι χωρισμένα από τους διάφορους επεξεργαστές, αφού το μοντέλο έχει παραλληλιστεί (παράλληλες I/O διαδικασίες). Η συχνότητα των εξαγομένων αποτελεσμάτων είναι προκαθορισμένη.

Ένα μέρος της διαδικασίας του “post-processing” είναι και η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων. Χρησιμοποιούνται τα εξής πακέτα για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων:

NCAR Graphics, ένα 2-διάστατο γραφικό πακέτο, εξειδικευμένο για μετεωρολογικές εφαρμογές,

VIS5D, ένα 3-διάστατο γραφικό πακέτο, που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, και

Για κάθε ένα από αυτά τα πακέτα έχει αναπτυχθεί και μία σειρά γραφικών προγραμμάτων.

Κεφάλαιο 5 : Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

5.1 Δεδομένα πρόγνωσης Ηλιακής ακτινοβολίας

Τα δεδομένα πρόγνωσης της ολικής εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξάχθηκαν από το μοντέλο Σκίρων για τέσσερις περιοχές.

5.2. Δεδομένα παρατήρησης Ηλιακής ακτινοβολίας

5.2.1 Οι Μετεωρολογικοί σταθμοί των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Τα δεδομένα εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας που χρησιμοποιήσαμε προέρχονται από 4 μετεωρολογικούς σταθμούς εκ των οποίων οι τρεις είναι εγκατεστημένοι σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Κάθε μετεωρολογικός σταθμός (Sunny Sensorbox) που είναι εγκατεστημένος στις φωτοβολταϊκές μονάδες μετρά την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πλαισίων, προαιρετικά την ταχύτητα του ανέμου και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Σε συνδυασμό με το Sunny Webbox και το Sunny portal ο σταθμός επιτρέπει τη συνεχή σύγκριση των θεωρητικών και των πραγματικών τιμών για την ισχύ της εγκατάστασης. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας του μετεωρολογικού σταθμού προϋποθέτουν θερμοκρασία περιβάλλοντος από -25°C έως 70°C , υψόμετρο από 0m έως 2km επάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και βαθμό προστασίας IP5, που είναι κατάλληλος για εξωτερικές εγκαταστάσεις. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι $\pm 8\%$ και το εύρος των μετρήσεων κυμαίνεται μεταξύ των $0\text{w}/\text{m}^2$ και $1500\text{w}/\text{m}^2$ με ανάλυση $1\text{w}/\text{m}^2$.

5.2.2 Χαρακτηριστικά των εγκαταστάσεων των φωτοβολταϊκών πάρκων

Ο πρώτος σταθμός φωτοβολταϊκών συστημάτων τοποθετείται στη περιοχή της Τρίπολης στο νομό Αρκαδίας με γεωγραφικό πλάτος $37,5^{\circ}$ και γεωγραφικό μήκος $22,37^{\circ}$. Η ισχύς του σταθμού ανέρχεται στα $99,6\text{kWp}$ και η ετήσια παραγωγή είναι περίπου $130,974\text{kWh}/\text{kWp}$. Επιπλέον οι μετατροπείς που χρησιμοποιούν τα συστήματα αποτελούνται από 7 Sunny Mini Central (11.000TL) και 3 Sunny Mini Central (10.000TL). Τα δεδομένα ακτινοβολίας προέρχονται από αισθητήρα ακτινοβολίας τύπου Sunny SensorBox. Τα δεδομένα παρατήρησης συγκεντρώνονται από τη SMA Sunny Portal. (Εικόνα 5.1).

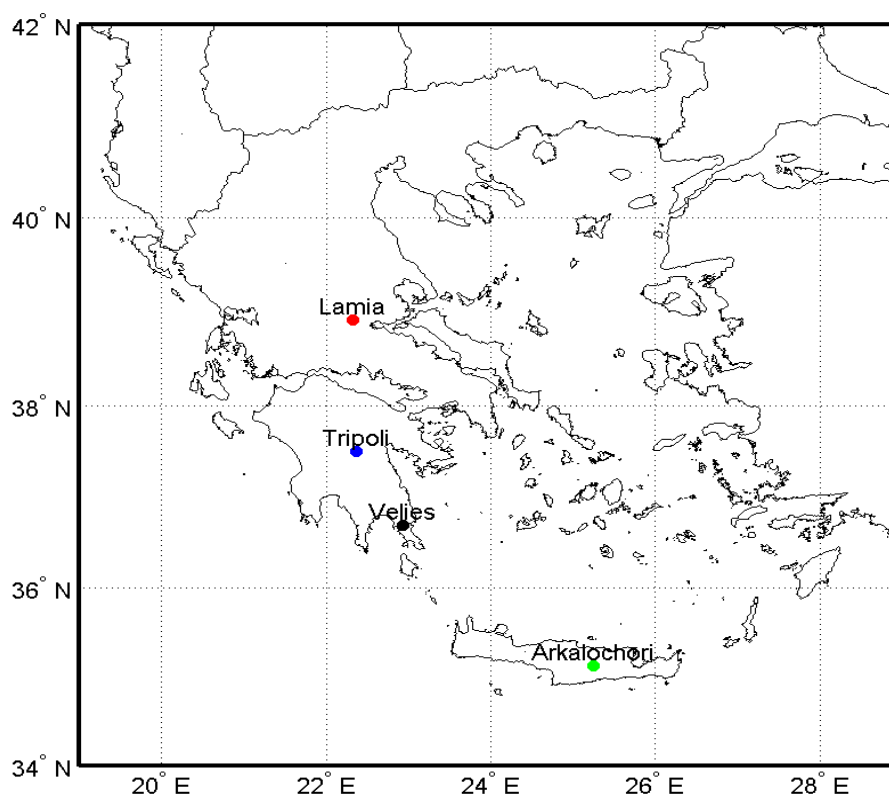
Ο δεύτερος σταθμός βρίσκεται στη περιοχή Βελιές στους Μολάους του νομού Λακωνίας με γεωγραφικό πλάτος $36,707^{\circ}$ και γεωγραφικό μήκος 22.94° . Η ισχύς του

φωτοβολταϊκού πάρκου ανέρχεται στα 149,85 kWp με ετήσια παραγωγή στα 329,670kWh/kWp. Τα δεδομένα ακτινοβολίας έχουν ληφθεί από τη SMA Sunny Portal και η υπεύθυνη εταιρία για την εγκατάσταση και τη λειτουργία των συστημάτων είναι η ΑΕΝΑΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Ε.. Παράλληλα ο σταθμός αποτελείται από 14 μετατροπείς τύπου Sunny Mini Central (11.000TL) (Εικόνα 5.1).

Ο τρίτος σταθμός βρίσκεται στο Αρκαλοχώρι του νομού Ηρακλείου με γεωγραφικό πλάτος $35,14^{\circ}$ και γεωγραφικό μήκος $35,26^{\circ}$. Το σύστημα ισχύος 80,00 kWp, αποτελείται από 6 Sunny Mini Central (11.000TL) και 3 Sunny Boy (4000-2000TL). Ο μετεωρολογικός σταθμός, της Korte Goule A.A. Energy, καταγράφει τις ωριαίες τιμές της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, οι οποίες στη συνέχεια αποθηκεύονται και είναι διαθέσιμες από τη SMA Sunny Portal (Εικόνα 5.1).

5.2.3 Ο μετεωρολογικός σταθμός της Λαμίας

Στη περιοχή της Λαμίας τοποθετείται ο τέταρτος πλήρης μετεωρολογικός σταθμός ο οποίος έχει γεωγραφικό πλάτος $38,92^{\circ}$ και γεωγραφικό μήκος $22,33^{\circ}$ (Εικόνα 5.1)..



Εικόνα 5.1 Οι μετεωρολογικοί σταθμοί από τους οποίους προέρχονται τα δεδομένα της εισερχόμενης Ηλιακής Ακτινοβολίας.

5.3 Τα κλιματικά χαρακτηριστικά των 4 περιοχών

Παρακάτω θα αναφέρουμε κάποια βασικά κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής της Τρίπολης. Η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιοχής κυμαίνεται από 13,5° C έως 14,5 ° C ενώ οι ημέρες του παγετού ετησίως, δηλαδή οι ημέρες στις οποίες σημειώνονται θερμοκρασίες μικρότερες από τους 0°C ή ίσες με 0°C, είναι 30 έως 40. Η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας, δηλαδή ο λόγος των υπαρχόντων υδρατμών προς την απαιτούμενη ποσότητα υδρατμών ώστε να φτάσουμε στον κορεσμό, είναι 62-64, και το ύψος της βροχής είναι 700mm-800mm. Παράλληλα οι ώρες της ηλιοφάνειας είναι 2550-2650 και οι ημέρες υετού, δηλαδή του συνόλου των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων ανά έτος, είναι περισσότερες από 125. Οι ημέρες του δρόσου είναι 120-135, οι ημέρες με ομίχλη 30-35 και οι ημέρες με πάχνη 40-45 ετησίως.

Η κλιματολογία της περιοχής των Μολάων χαρακτηρίζεται από μέσες θερμοκρασίες ανώτερες των 19,5 ° C. Οι ημέρες με παγετό είναι λιγότερες από 10 και η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας είναι 66-68. Το ύψος της βροχής είναι 700mm-800mm. Επίσης οι ώρες της ηλιοφάνειας είναι 2550-2650 και ο υετός έχει υπολογιστεί ότι κυμαίνεται από 85-95 ημέρες. Η δρόσος συναντάται σε λιγότερες από 15 ημέρες και η ομίχλη καθώς και η πάχνη σε λιγότερες από 3 ημέρες κάθε έτος.

Στο Αρκαλοχώρι έχουμε μέσες ετήσιες θερμοκρασίες 15,5 ° C-16,5 ° C και οι ημέρες του παγετού δεν ξεπερνούν τις 10. Το ύψος της βροχής είναι 800mm-900mm. Οι ώρες ηλιοφάνειας ετησίως ξεκινούν από 2550 και φτάνουν τις 2650. Οι ημέρες στις οποίες παρουσιάζεται υετός είναι 75-85, οι ημέρες με πάχνη καθώς και οι ημέρες με ομίχλη είναι λιγότερες από 5. Δρόσο έχουμε από 15 έως 30 ημέρες το χρόνο.

Η Λαμία χαρακτηρίζεται από τις ίδιες μέσες ετήσιες θερμοκρασίες με αυτές του Αρκαλοχωρίου-Κρήτης ενώ οι ημέρες με παγετό είναι από 10 έως 20. Το μέσο ύψος της βροχής είναι 500mm-600mm, δηλαδή μικρότερο των περιοχών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η σχετική υγρασία είναι 64-66 και οι ώρες της ηλιοφάνειας ανά έτος είναι 2450-2550. Οι ημέρες του υετού είναι 115-125, η δρόσος εμφανίζεται 105-120 ημέρες, η πάχνη από 10 έως 15 ημέρες και η ομίχλη λιγότερες από 5.

Κεφάλαιο 6 : Το μοντέλο που αναπτύχθηκε

6. Εισαγωγή

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της πρόγνωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και η χρήση της σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Είναι σκόπιμο λοιπόν να εξεταστεί η ακρίβεια των προγνωστικών τιμών εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και να γίνει μία προσπάθεια βελτίωσης αυτών ώστε να ωφεληθεί η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά. Αναπτύχθηκαν λοιπόν τέσσερις μέθοδοι οι οποίες έχουν στόχο την βελτίωση των προγνωστικών τιμών που εξάγονται από το αριθμητικό μοντέλο.

Αρχικά λοιπόν συλλέχθηκαν δεδομένα από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς εγκατεστημένους σε φωτολταϊκά πάρκα, ενώ για τις αντίστοιχες γεωγραφικές θέσεις καθώς και για δεκαέξι γειτονικές θέσεις εξάχθηκαν ωριαίες τιμές ακτινοβολίας και ποσοτών νεφοκάλυψης από το σύστημα του Σκίρων. Προτού ξεκινήσει η επεξεργασία των δεδομένων έγινε ένας έλεγχος της συσχέτισης των δεδομένων ακτινοβολίας που προκύπτουν για τη γεωγραφική θέση του μετεωρολογικού σταθμού με τα δεδομένα των γειτονικών σημείων ώστε να αποκλειστούν τυχόν ασυσχέτιστα σημεία. Στην προσπάθεια να επιτευχθεί πιο ακριβής πρόγνωση αναπτύχθηκαν τέσσερις μέθοδοι οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

6.1 Στατιστικά μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν

Τα κύρια στατιστικά μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επεξεργασία των δεδομένων ήταν ο συντελεστής συσχέτισης, το bias, η συνδιακύμανση και η μέση τιμή, ενώ για τη μετέπειτα αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν το απόλυτο bias, η τετραφωνική ρίζα του σφάλματος, η τυπική απόκλιση του σφάλματος, το bias και ο συντελεστής συσχέτισης. Έτσι στις επόμενες ενότητες δίνονται οι ορισμοί αυτών.

6.1.1 Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson

Για να ελεγχτεί η συσχέτιση δύο μεταβλητών x και y χρησιμοποιείται συνήθως ένας συντελεστής συσχέτισης. Ο συντελεστής αυτός δείχνει τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών x και y και δίνεται από το λόγο της συνδιακύμανσης προς το γινόμενο των τυπικών αποκλίσεων των μεταβλητών:

$$r_{xy} = \frac{Cov(x, y)}{s_x s_y} \quad (6.1)$$

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (6.2)$$

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i')(y_i')]}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i')^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i')^2 \right]^{1/2}} \quad (6.3)$$

Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμές από -1 έως 1. Οι τιμές που πλησιάζουν το 1 υποδεικνύουν πολύ καλή συσχέτιση των μεταβλητών και θετική κλίση της γραμμικής συνάρτησης που σχηματίζουν οι δύο μεταβλητές.

6.1.2 Το Bias

Η μέση απόκλιση (Bias) των προγνώσεων του μοντέλου από τις αντίστοιχες παρατηρήσεις θα δίνεται από τη σχέση:

$$Bias = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x_{fcst}(i) - x_{obs}(i)) \quad (6.4)$$

,όπου x_{fcst} η πρόγνωση (forecast) της παραμέτρου x , x_{obs} η παρατήρηση (observation) της παραμέτρου x και n το μέγεθος του δείγματος.

6.1.3 Η απόλυτη τιμή του Bias

Η απόλυτη τιμή του bias εκφράζεται από τη σχέση:

$$absolute_Bias = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |(x_{fcst}(i) - x_{obs}(i))| \quad (6.5)$$

6.1.4 Η τυπική απόκλιση του σφάλματος

$$St_Dv = \sqrt{\frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k ((x_{fcst}(i) - x_{obs}(i)) - Bias)^2} \quad (6.6)$$

6.1.5 Η τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \times \sum_{i=1}^k (x_{fcst}(i) - x_{obs}(i))^2} \quad (6.7)$$

6.2 Έλεγχος συσχέτισης των δεδομένων

Η πρώτη διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει τη συγκέντρωση των δεδομένων εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τους σταθμούς των φωτοβολταϊκών πλαισίων και από το σύστημα του Σκίρων. Συνεπώς για κάθε περιοχή έχουμε ωριαίες τιμές παρατήρησης ηλιακής ακτινοβολίας μετρημένες σε W/m^2 και τις αντίστοιχες τιμές που προέρχονται από το σύστημα Σκίρων. Επιπρόσθετα έχουμε ωριαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας για 16 γειτονικά σημεία του κάθε σταθμού. Για να επιβεβαιωθεί ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα από τα γειτονικά σημεία γίνεται έλεγχος της συσχέτισης αυτών με τα δεδομένα του σταθμού μας, με τη βοήθεια του συντελεστή συσχέτισης (σχέση 6.1). Έτσι βρέθηκε ότι σε κάθε σταθμό τα δεδομένα του μοντέλου είχαν συσχέτιση μεγαλύτερη από 0.98 με τα δεδομένα που προέρχονται από δεκαέξι γειτονικά σημεία.

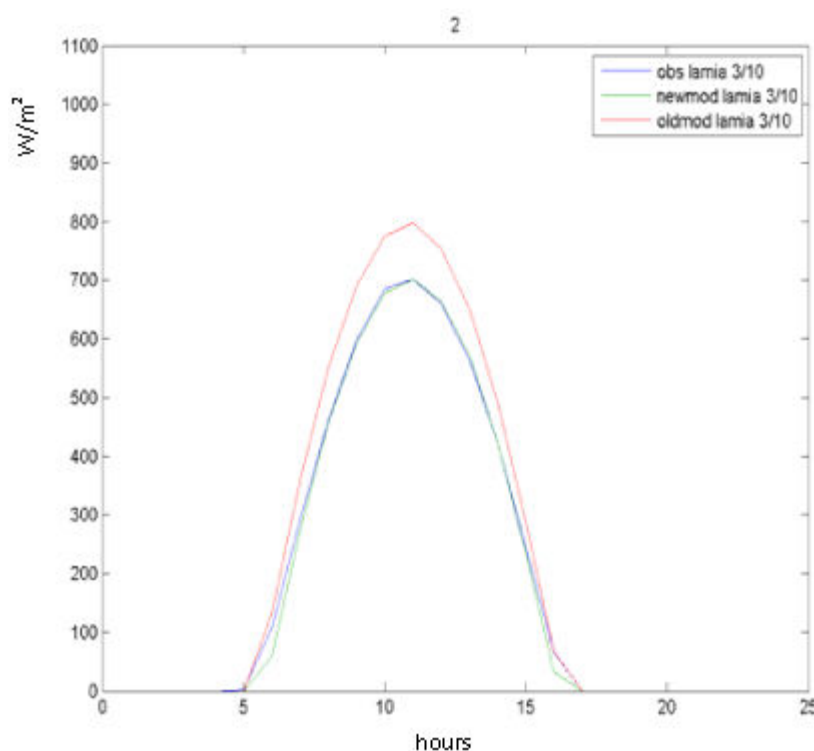
6.3 Επεξεργασία των δεδομένων

6.3.1 Απαλοιφή συστηματικών σφαλμάτων που οφείλονται στην εποχικότητα

Στόχος της μεθόδου αυτής είναι η εξάλειψη των συστηματικών σφαλμάτων που προκύπτουν λόγω εποχικότητας. Σε αυτή τη περίπτωση εντοπίστηκαν οι ωριαίες αποκλίσεις των προγνωστικών τιμών από τις παρατηρούμενες τιμές για τις ανέφελες ημέρες και χρησιμοποιήθηκαν στην απαλοιφή των σφαλμάτων των προγνωστικών τιμών για τις επόμενες ημέρες. Αρχικά λοιπόν διαχωρίστηκαν οι ημέρες με νεφοκάλυψη από τις ημέρες με ανέφελο ουρανό γνωρίζοντας ότι τις ημέρες όπου δεν έχουμε νέφωση οι τιμές της ακτινοβολίας μας ακολουθούν περίπου μία συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Κατά συνέπεια αφότου εξαλείφθηκαν οι ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια συσχετίσαμε τις τιμές των παρατηρήσεών μας με ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Στη περίπτωση όπου η συσχέτιση των τιμών παρατήρησης και του μοντέλου με τα αντίστοιχα πολυώνυμα είναι μεγαλύτερη από 0.95 και εάν οι συναρτήσεις μας είναι γνησίως μονότονες, θεωρείται ότι η ημέρα είναι ανέφελη. Ακολούθως για κάθε 10 ημέρες υπολογίζεται το μέσο ωριαίο σφάλμα (σχέση 6.4) των τιμών της πρόγνωσης από τις τιμές παρατήρησης χρησιμοποιώντας εξ' αυτών μόνο τις ανέφελες ημέρες. Το εξαγόμενα μέσα ωριαία σφάλματα τα αφαιρούνται από τις επόμενες 10 ημέρες. Οι 10 ημέρες που επιλέχθηκαν ήταν επαρκείς όχι μόνο για την απαλοιφή των συστηματικών σφαλμάτων, αλλά και για την αποφυγή του

θορύβου. Τέλος αυτά τα σφάλματα αφαιρέθηκαν και από τα δεδομένα που προέρχονται από τα γειτονικά σημεία.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 6.1) παρουσιάζεται η αφαίρεση των συστηματικών σφαλμάτων για το σταθμό της Λαμίας. Εδώ είναι φανερή η γραμμική σχέση που συνδέει τις ωριαίες τιμές της ακτινοβολίας με το σφάλμα, κατά τη διάρκεια μιας ανέφελης ημέρας, αφού καθώς αυξάνεται η τιμή της ακτινοβολίας, αυξάνεται και το αντίστοιχο σφάλμα. Ως αποτέλεσμα έχουμε τη μεγιστοποίηση του σφάλματος κατά τις μεσημεριανές ώρες μιας ημέρας.



Σχήμα 6.1 Αποτελέσματα επεξεργασίας με τη χρήση της 6.3.1 μεθόδου για το σταθμό της Λαμίας. Ο κατακόρυφος άξονας παριστάνει τις τιμές της ακτινοβολίας μετρούμενες σε w/m^2 , ενώ ο οριζόντιος τις ώρες. Η τιμή της παρατήρησης αναγράφεται με μπλε, οι τιμές από το μοντέλο αναφοράς σημειώνονται με κόκκινο και οι τιμές που προκύπτουν από τη μέθοδο 6.3.1 σημειώνονται με πράσινο.

6.3.2 Επιλογή της ωριαίας τιμής ακτινοβολίας με τη μεγαλύτερη συχνότητα

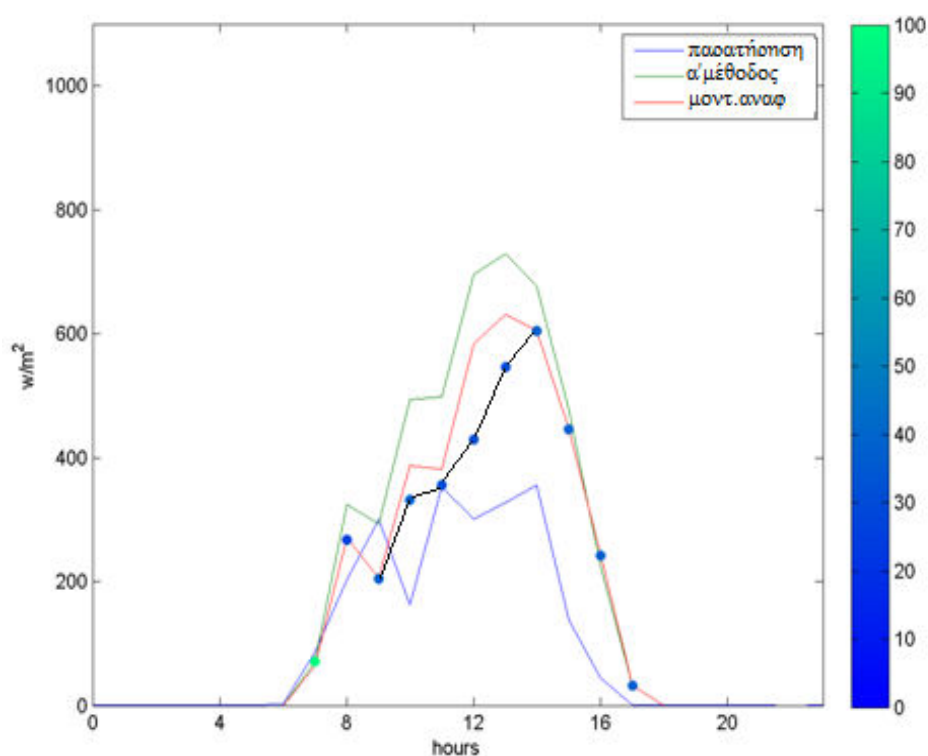
Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν οι ωριαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας από δεκαέξι γειτονικά σημεία του σταθμού μας. Οι τιμές αυτές τοποθετήθηκαν σε 5 διαστήματα-κλάσεις και υπολογίστηκε η συχνότητα εμφάνισης του κάθε διαστήματος ανά ώρα. Η συχνότητα εμφάνισης του διαστήματος μας έδωσε την πιθανότητα (6.5)

να εμφανιστεί μία τιμή ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία θα ισούται με τη κεντρική τιμή της κλάσης.

$$f_i = \frac{n_i}{n} \quad (6.5)$$

Με τον υπολογισμό της συχνότερης τιμής, αντί να λαμβάνεται μόνο ένα σημείο για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας θα συνυπολογίζονται οι τιμές των γειτονικών θέσεων με συνέπεια να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στη πρόγνωσή μας.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 6.2), η συχνότερα εμφανιζόμενη τιμή πλησιάζει περισσότερο την τιμή της παρατήρησης καθώς είναι πολύ πιθανό στα σημεία γύρω από το σταθμό μας το να έχει εντοπιστεί από το μοντέλο αναφοράς κάποιο είδος νέφους το οποίο δεν εμφανίστηκε στις εξαγόμενες τιμές μας για τον δεδομένο σταθμό. Επομένως η μέθοδος αυτή σε πολλές περιπτώσεις είναι πιο αξιόπιστη από την λήψη τιμών μόνο από ένα σημείο.



Σχήμα 6.2 Αποτελέσματα επεξεργασίας με τη χρήση της B μεθόδου για το σταθμό της Τρίπολης. Ο κατακόρυφος άξονας παριστάνει τις τιμές της ακτινοβολίας μετρούμενες σε w/m^2 , ενώ ο οριζόντιος τις ώρες. Η τιμή της παρατήρησης αναγράφεται με μπλε, οι τιμές από το μοντέλο αναφοράς σημειώνονται με κόκκινο και οι τιμές που προκύπτουν από τη μέθοδο A σημειώνονται με πράσινο. Τα χρωματισμένα

σημεία παριστάνουν τις πιθανότερες ωριαίες τιμές της ακτινοβολίας οι οποίες προέκυψαν από την εφαρμογή της B μεθόδου.

Επιπρόσθετα θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η 6.3.1 μέθοδος ενδείκνυται περισσότερο για τις περιπτώσεις των ανέφελων ημερών, καθώς σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να εισάγει νέα σφάλματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2.

6.3.3 Χρήση της παραμέτρου της νεφοκάλυψης για την πρόγνωση της ακτινοβολίας

Εδώ χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος του ποσοστού νεφοκάλυψης για τρία επίπεδα στην ατμόσφαιρα ώστε να δώσουμε την πιθανότερη ωριαία τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα δεδομένα των ποσοστών νεφοκάλυψης έχουν ληφθεί από το σύστημα Σκίρων για τη περιοχή του κάθε σταθμού και για τα αντίστοιχα δεκαέξι γειτονικά σημεία του.

Πρώτα λοιπόν για κάθε σταθμό διακρίθηκαν σε τέσσερα διαστήματα ([0,25), [25,50), [50,75) και [75,100]) τα ποσοστά νεφοκάλυψης για το κάθε ένα από τα τρία επίπεδα στην ατμόσφαιρα (χαμηλά νέφη, μέσα νέφη και υψηλά νέφη). Ακολουθώντας σε κάθε επίπεδο που εντοπίστηκε νεφοκάλυψη υπολογίστηκε για κάθε διάστημα ποσοστού νεφοκάλυψης η μέση απόκλιση από την εποχική τιμή (την μέση ωριαία τιμή για τις ανέφελες ημέρες των προηγούμενων δέκα ημερών). Με αυτό τον τρόπο μπορεί να καθοριστεί το ποσό της μείωσης της ακτινοβολίας ανάλογα με το είδος των νεφών και το ποσοστό της νεφοκάλυψης. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται σε τέσσερις περιόδους για ένα έτος:

1^η περίοδος: Δεκέμβριος-Φεβρουάριος

2^η περίοδος: Μάρτιος-Μάιος

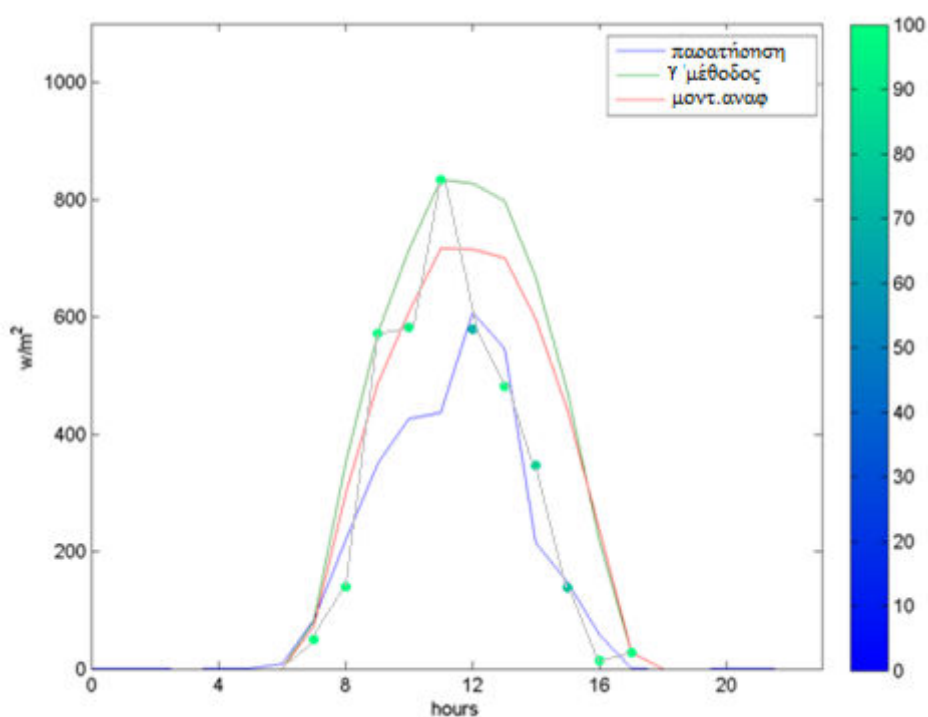
3^η περίοδος: Ιούνιος-Αύγουστος

4^η περίοδος: Σεπτέμβριος-Νοέμβριος

Προχωρώντας στο επόμενο έτος για κάθε ένα από τα δεκαέξι γειτονικά σημεία εντοπίζονται τα ποσοστά νεφοκάλυψης για τα τρία επίπεδα στην ατμόσφαιρα και υπολογίζεται η μέση απόκλιση της ωριαίας τιμής από την εποχική τιμή όπως προκύπτει από τις προηγούμενες 10 ημέρες. Ως αποτέλεσμα εξάγεται μία τιμή ακτινοβολίας για κάθε σημείο με τη βοήθεια της εποχικής τιμής και της απόκλισης

από αυτή. Βρίσκοντας τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή που παρουσιάζονται σε κάθε ώρα χωρίζουμε τις τιμές μας σε 5 διαστήματα. Τέλος από τις συχνότητες εμφάνισης (6.5) του κάθε διαστήματος επιλέγεται εκείνο με τη μεγαλύτερη συχνότητα και θεωρείται η κεντρική τιμή του διαστήματος αυτού ως η πιθανότερη τιμή ακτινοβολίας που θα εμφανιστεί στο σταθμό μας.

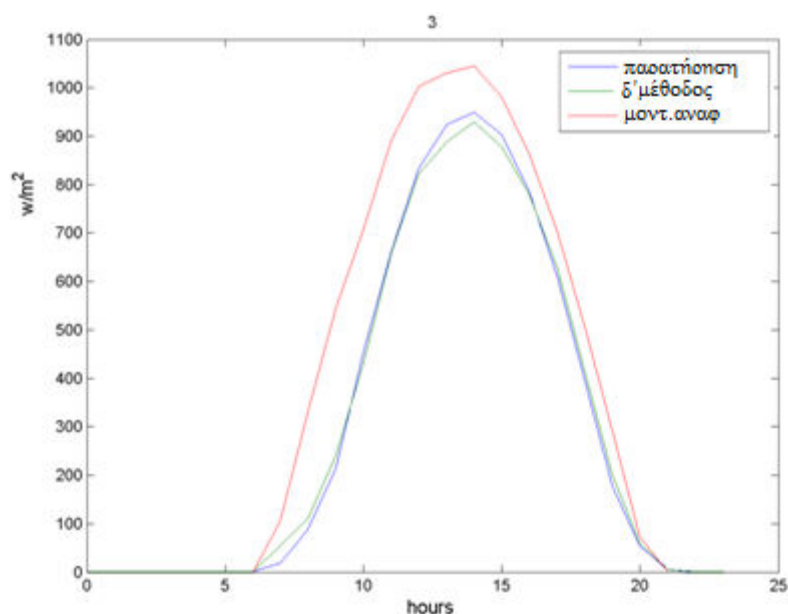
Η μέθοδος που περιγράφηκε πιο πάνω μπορεί να δώσει βελτιωμένες τιμές πρόγνωσης ιδιαίτερα για τις ημέρες όπου υπάρχει νέφωση. Ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα όπου η τιμές της ακτινοβολίας που προκύπτουν από τη παράμετρο της νεφοκάλυψης πλησιάζουν σημαντικά τις παρατηρούμενες τιμές.



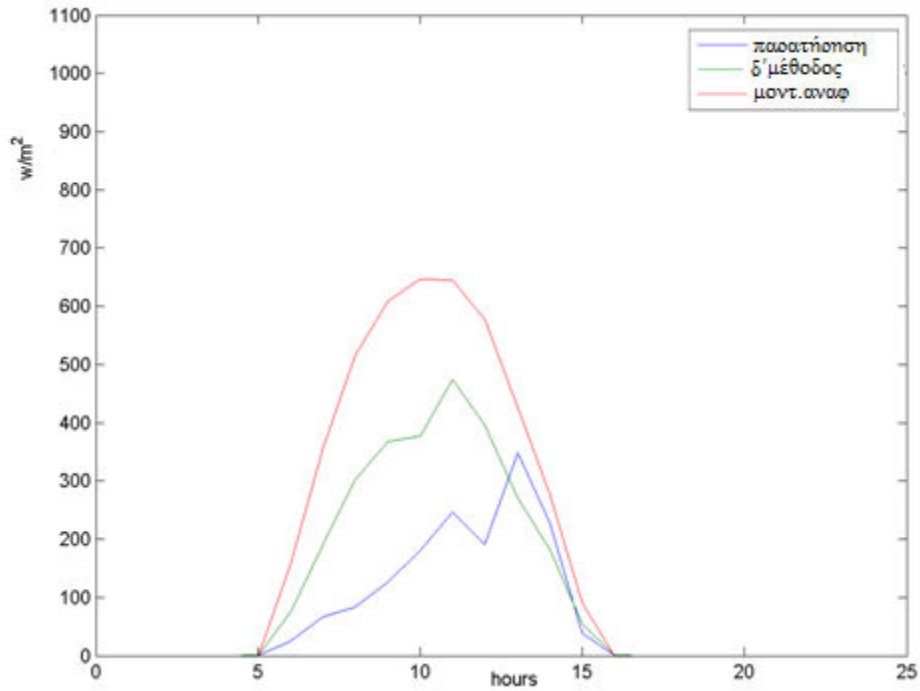
Σχήμα 6.3 Αποτελέσματα επεξεργασίας με τη χρήση της 6.3.3 μεθόδου για το σταθμό της Τρίπολης. Ο κατακόρυφος άξονας παριστάνει τις τιμές της ακτινοβολίας μετρούμενες σε w/m^2 και ο οριζόντιος τις ώρες. Η τιμή της παρατήρησης αναγράφεται με μπλε, οι τιμές από το μοντέλο αναφοράς σημειώνονται με κόκκινο και οι τιμές που προκύπτουν από τη μέθοδο 6.3.1 σημειώνονται με πράσινο. Τα χρωματισμένα σημεία παριστάνουν τις πιθανότερες ωριαίες τιμές της ακτινοβολίας οι οποίες προέκυψαν από την εφαρμογή της 6.3.3 μεθόδου με τη βοήθεια της παραμέτρου του ποσοστού νεφοκάλυψης.

6.3.4. Εξάλειψη σφαλμάτων με τη χρήση της αυτοσυσχέτισης

Στη τελευταία μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν και πάλι δεδομένα ακτινοβολίας για δύο έτη, όπως ακριβώς και στη μέθοδο 6.3.3. Τα δεδομένα της κάθε ημέρας του δεύτερου έτους συγκρίνονται με τα δεδομένα κάθε ημέρας του προηγούμενου έτους με τη βοήθεια του συντελεστή συσχέτισης (σχέση 6.1). Παράλληλα υπολογίζονται οι λόγοι των μέσων τιμών για κάθε ημέρα του δεύτερου έτους σε σχέση με κάθε ημέρα του πρώτου έτους καθώς και οι αντίστοιχοι λόγοι των διακυμάνσεων. Εάν ο συντελεστής συσχέτισης είναι μεγαλύτερος από 0.7, ο λόγος των μέσων τιμών μιας ημέρας του δεύτερου έτους και μιας ημέρας του πρώτου έτους κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.7 και 1.3 και ο λόγος των τιμών των διακυμάνσεων μιας ημέρας του δεύτερου έτους και μιας ημέρας του πρώτου έτους βρίσκεται μεταξύ των τιμών 0.7 και 1.3, τότε υπολογίζεται το μέσο ωριαίο σφάλμα μεταξύ της τιμής της πρόγνωσης και της τιμής της παρατήρησης για το πρώτο έτος και το αφαιρείται από τις αντίστοιχες ωριαίες τιμές του δεύτερου έτους. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα να απαλειφθούν συστηματικά σφάλματα όχι μόνο κατά τις ανέφελους ημέρες, αλλά και κατά τις νεφελώδεις ημέρες όπως φαίνεται και στις εικόνες 6.3 και 6.4.



Σχήμα 6.4 Αποτελέσματα επεξεργασίας με τη χρήση της 6.3.4 μεθόδου για το σταθμό του Αρκαλοχωρίου σε μία ανέφελη ημέρα. Ο κατακόρυφος άξονας παριστάνει τις τιμές της ακτινοβολίας μετρούμενες σε w/m^2 και ο οριζόντιος τις ώρες. Η τιμή της παρατήρησης αναγράφεται με μπλε, οι τιμές από το μοντέλο αναφοράς σημειώνονται με κόκκινο και οι τιμές που προκύπτουν από τη μέθοδο 6.3.4 σημειώνονται με πράσινο.



Σχήμα 6.5 Αποτελέσματα επεξεργασίας με τη χρήση της 6.3.4 μεθόδου για το σταθμό της Λαμίας σε μία ημέρα με νέφωση. Ο κατακόρυφος άξονας παριστάνει τις τιμές της ακτινοβολίας μετρούμενες σε w/m^2 και ο οριζόντιος τις ώρες. Η τιμή της παρατήρησης αναγράφεται με μπλε, οι τιμές από το μοντέλο αναφοράς σημειώνονται με κόκκινο και οι τιμές που προκύπτουν από τη μέθοδο 6.3.4 σημειώνονται με πράσινο.

Κεφάλαιο 7: Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις τέσσερις μεθόδους

7. Εισαγωγή

Για να αξιολογηθούν τα εξαγόμενα αποτελέσματα από την επεξεργασία, με τη χρήση των τεσσάρων μεθόδων, υπολογίστηκαν κάποιες στατιστικές παράμετροι, οι ορισμοί των οποίων παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ακολούθως συγκεντρώθηκαν σε πίνακες και έγινε σύγκριση μεταξύ τους για κάθε σταθμό.

7.2.1 Αποτελέσματα για το σταθμό της Λαμίας

Στους πίνακες 7.1 και 7.2 φαίνεται ότι το απόλυτο bias μειώνεται καθώς προχωράμε από τους χειμερινούς προς τους θερινούς μήνες τις ανέφελες ημέρες. Αυτό οφείλεται στο ότι καθώς οι ανέφελες ημέρες αυξάνονται σε πλήθος τους θερινούς μήνες, είναι δυνατό να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το συστηματικό σφάλμα της προβλεπόμενης από τη παρατηρούμενη τιμή. Ακριβώς η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στα μεγέθη της τυπικής απόκλισης και της τετραγωνικής ρίζας του σφάλματος, ενώ ο συντελεστής συσχέτισης αυξάνεται. Ωστόσο τις ημέρες με νέφωση το απόλυτο σφάλμα, η τυπική απόκλιση και η τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος είναι πιο αυξημένα, ιδιαίτερα τη περίοδο της άνοιξης. Η συσχέτιση δείχνει να μειώνεται αρκετά τους χειμερινούς μήνες των ημερών με νεφοκάλυψη. Το bias υποδεικνύει μία υποεκτίμηση του μοντέλου των μεθόδων 6.3.3 και 6.3.4 κατά τους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες και μία υπερεκτίμηση τους εαρινούς και θερινούς μήνες.

Σταθμός: Λαμία		Absolute Bias		Standard Deviation of Error		RMSE	
		months	clear	cloudy	clear	cloudy	clear
Μέθοδος 6.3.3	1 st -2 nd & 12 th	84.5	104.3	116.8	134.7	119.3	135.6
	9 th – 11 th	64.7	109.5	102	153	105	157
	3 rd – 5 th	40	117	57	164	58	165
	6 th – 8 th	26	95	34	158	35	158
Μέθοδος 6.3.4	1 st -2 nd & 12 th	101.9	116.8	117.7	119	136.7	153.3
	9 th – 11 th	86	101	105	140	133	140
	3 rd – 5 th	38	118	45	166	54	170
	6 th – 8 th	31.3	93.3	51.3	150.2	51.6	154

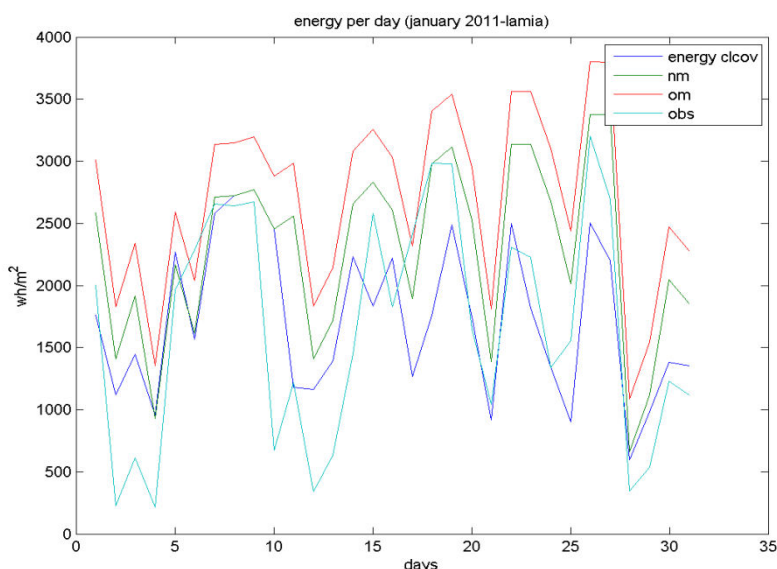
Πίνακας 7.1 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό της Λαμίας

Σταθμός: Λαμία		Bias		Correlation coefficient	
		months	clear	cloudy	clear
Μέθοδος 6.3.3	1 st -2 nd & 12 th	-24.2	16	0.772	0.484
	9 th – 11 th	-24	34	0.89	0.68
	3 rd – 5 th	10	14	0.97	0.795
	6 th – 8 th	10	1.4	0.992	0.837
Μέθοδος 6.3.4	1 st -2 nd & 12 th	-70	-1	0.746	0.385
	9 th – 11 th	-82	4	0.954	0.745
	3 rd – 5 th	-29	38	0.985	0.806
	6 th – 8 th	5.4	34.6	0.98	0.85

Πίνακας 7.2 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό της Λαμίας.

Εάν εξεταστούν οι ενέργειες μετρημένες σε wh/m^2 οι οποίες προβλέπονται από τα μοντέλα των μεθόδων 6.3.3, 6.3.1 και του συστήματος του Σκίρων τότε μπορεί να υπολογιστεί για κάθε ημέρα ποιο μοντέλο παρουσιάζει τη μικρότερη απόκλιση από την μετρούμενη τιμή της ενέργειας. Στα πιο κάτω διαγράμματα φαίνονται οι ημερήσιες τιμές των ενεργειών για το μήνα Ιανουάριο-2011 για το σταθμό της

Λαμίας. Κατά κύριο λόγο οι τιμές που προέρχονται από το μοντέλο της νεφοκάλυψης είναι οι πλησιέστερες προς τις παρατηρούμενες τιμές.



Σχήμα 7.1 Ενέργεια ανά ημέρα για το μήνα Ιανουάριο-2011 στο σταθμό της Λαμίας. Obs: παρατηρούμενες τιμές, om: οι τιμές από τον Σκίρων, nm: οι τιμές που προκύπτουν από την 6.3.1 μέθοδο, energycloov: οι τιμές της 6.3.3 μεθόδου.

Κατά τους χειμερινούς μήνες, η μέθοδος 6.3.3 προβλέπει καλύτερα την ποσότητα της εισερχόμενης ενέργειας, ενώ όπως προαναφέραμε το μοντέλο της μεθόδου 6.3.1 προσεγγίζει καλύτερα τις τιμές της ενέργειας κατά την εαρινή και τη θερινή περίοδο (Πίνακας 7.3).

Σταθμός: Λαμία	Ποσοστό ημερών όπου η ενέργεια από τη πρόγνωση (wh/m^2) είναι πλησιέστερη στη παρατηρούμενη		
	Μέθοδος 6.3.3	Μοντέλο αναφοράς	Μέθοδος 6.3.1
months			
1 st -2 nd & 12 th	0.53	0.03	0.44
9 th - 11 th	0.44	0.04	0.52
3 rd - 5 th	0.37	0.06	0.57
6 th - 8 th	0.32	0.05	0.63

Πίνακας 7.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό της Λαμίας. Ποσοστό ημερών όπου η ενέργεια από τη πρόγνωση (wh/m^2) είναι πλησιέστερη στη παρατηρούμενη

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στους πίνακες 7.4 και 7.5 το μοντέλο της μεθόδου 6.3.1 έχει το μικρότερο σφάλμα για τις ανέφελες ημέρες. Το μοντέλο της μεθόδου 6.3.3, που χρησιμοποιεί τη παράμετρο της νέφωσης, έχει το μικρότερο απόλυτο bias κατά τις ημέρες με νέφωση και τα μοντέλα των μεθόδων 6.3.2 και 6.3.4 παρουσιάζουν αρκετά ελαττωμένο σφάλμα σε σχέση με αυτό του μοντέλου αναφοράς. Η τιμή του bias δεν δίνει μία ξεκάθαρη εικόνα για τα συστηματικά σφάλματα ενώ ο συντελεστής συσχέτισης είναι αρκετά αυξημένος και στις τέσσερις μεθόδους κατά τις ανέφελες ημέρες. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής συσχέτισης εμφανίζει υψηλές τιμές και κατά τις ημέρες με νέφωση γεγονός που εξηγείται από την κατανομή της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Παρότι οι αποκλίσεις των μοντέλων από τις μετρούμενες τιμές τις νεφοσκεπείς ημέρες είναι συνήθως μεγάλες ο συντελεστής συσχέτισης παραμένει υψηλός καθώς οι παρατηρούμενες με τις προβλεπόμενες τιμές συχνά ακολουθούν παρόμοια κατανομή.

Σταθμός: Λαμία	Absolute Bias		Standard Deviation of Error		RMSE	
	clear	cloudy	clear	cloudy	clear	cloudy
Μοντέλο αναφοράς	101	163	55.9	158.8	113	210
Μέθοδος 6.3.1	25.5	112	41.6	153.7	41	162
Μέθοδος 6.3.2	31	117	42.3	151.1	44	165
Μέθοδος 6.3.3	53.8	106.5	77.5	152	79.3	153.9
Μέθοδος 6.3.4	64.3	107.3	79.8	143.8	93.8	154.3

Πίνακας 7.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό της Λαμίας

Σταθμός: Λαμία	Bias		Correlation coefficient	
	clear	cloudy	clear	cloudy
Μοντέλο αναφοράς	99	137	0.988	0.822
Μέθοδος 6.3.1	4	51	0.987	0.814
Μέθοδος 6.3.2	14	67	0.987	0.816
Μέθοδος 6.3.3	-7	16.4	0.906	0.699
Μέθοδος 6.3.4	-43.9	75.6	0.916	0.696

Πίνακας 7.5 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό της Λαμίας

7.2.2 Αποτελέσματα για το σταθμό της Τρίπολης

Από τους πίνακες 7.6 και 7.7 συμπεραίνουμε ότι για το μοντέλο της μεθόδου 6.3.3 κατά τις ανέφελές ημέρες το μέσο σφάλμα είναι αρκετά μειωμένο και μάλιστα παρουσιάζει πτωτική τάση από τη χειμερινή προς την θερινή περίοδο. Την ίδια συμπεριφορά εμφανίζουν η τετραγωνική ρίζα του μέσου σφάλματος και η τυπική απόκλιση του σφάλματος για τη 6.3.3 μέθοδο. Αντίθετα ύστερα από την εφαρμογή της 6.3.4 μεθόδου παρατηρείται αυξημένη τιμή του σφάλματος κατά τους μήνες Μάρτιος-Μάιος η οποία ίσως οφείλεται στις συνθήκες που θεωρήσαμε για την εύρεσή τους, ήτοι οι λόγοι των διακυμάνσεων και των μέσων τιμών του μοντέλου αναφοράς και της παρατήρησης να κυμαίνονται από 0.7 έως και 1.3 και οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης έχουν θεωρηθεί μεγαλύτερες από το 0.7. Εφόσον οι λόγοι που αναφέραμε ποιο πάνω δεν είναι πολύ κοντά στον αριθμό 1, είναι εύλογο να παρουσιάζονται μεγαλύτερα από τα αναμενόμενα σφάλματα στο μοντέλο μας. Επιπλέον παρατηρείται ότι με την άνοδο του σφάλματος ακολουθείται αντίστοιχη πτώση στη τιμή του συντελεστή συσχέτισης κατά τις ανέφελές και κατά τις νεφελώδεις ημέρες.

Σταθμός: Τρίπολη		Absolute Bias		Standard Deviation of Error		RMSE	
		months	clear	cloudy	clear	cloudy	clear
Μέθοδος 6.3.3	1 st -2 nd & 12 th	125	115	149.7	148	156	153
	9 th – 11 th	63	100	96	137	97	147
	3 rd – 5 th	13,5	87	21	146.7	21.7	150
	6 th – 8 th	22	86	32	142	34	149
Μέθοδος 6.3.4	1 st -2 nd & 12 th	85	72	90	105	120	107
	9 th – 11 th	94	154	110	192	122	204
	3 rd – 5 th	157	154	195	199	204	202
	6 th – 8 th	90.5	128	112	160	113	165

Πίνακας 7.6 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό της Τρίπολης

Σταθμός: Τρίπολη		Bias		Correlation coefficient	
		months	clear	cloudy	clear
Μέθοδος 6.3.3	1 st -2 nd & 12 th	-44.8	40.4	0.786	0.717
	9 th – 11 th	9	53	0.92	0.78
	3 rd – 5 th	2.5	32.7	0.997	0.885
	6 th – 8 th	12	45	0.995	0.898
Μέθοδος 6.3.4	1 st -2 nd & 12 th	-79	-15	0.965	0.779
	9 th – 11 th	52	67	0.886	0.71
	3 rd – 5 th	-59	-35	0.735	0.668
	6 th – 8 th	20.3	42	0.934	0.837

Πίνακας 7.7 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό της Τρίπολης

Όπως φαίνεται στον πίνακα 7.8 οι μέθοδοι 6.3.1 και 6.3.3 συνδυαστικά δίνουν μικρότερα σφάλματα στη πρόγνωση της ηλιακής ενέργειας ανά ημέρα. Τους μήνες Μάρτιος-Μάιος εμφανίζεται ένα μεγάλο ποσοστό επιτυχίας της μεθόδου 6.3.3, παρότι η εν λόγω εμφανίζει συνήθως μικρότερα σφάλματα κατά τη χειμερινή περίοδο. Αυτό ίσως να οφείλεται στην τοπογραφία και στη κλιματολογία που

επικρατεί στη περιοχή της Τρίπολης. Η συνεχής μεταβλητότητα που επικρατεί στη νεφοκάλυψη καθώς και το αυξημένο πλήθος των ημερών με νέφωση, δεν μας επιτρέπουν να απαλείψουμε τα συστηματικά σφάλματα αποτελεσματικά με τη χρήση της μεθόδου 6.3.1. Επιπρόσθετα η αδυναμία της ακριβούς πρόγνωσης της νέφωσης από το σύστημα του Σκίρων εξαιτίας των συνεχών μεταβολών οδηγεί σε σφάλματα κατά τη πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας με τη βοήθεια της 6.3.3 μεθόδου.

Σταθμός: Τρίπολη	Ποσοστό ημερών όπου η ενέργεια από τη πρόγνωση (wh/m^2) είναι πλησιέστερη στη παρατηρούμενη		
	Μέθοδος 6.3.3	Μοντέλο αναφοράς	Μέθοδος 6.3.1
months			
1 st -2 nd & 12 th	0.29	0.46	0.25
9 th – 11 th	0.34	0.03	0.63
3 rd – 5 th	0.77	0.01	0.22
6 th – 8 th	0.48	0.02	0.5

Πίνακας 7.8 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό της Τρίπολης. Ποσοστό ημερών όπου η ενέργεια από τη πρόγνωση (wh/m^2) είναι πλησιέστερη στη παρατηρούμενη

Τα συνολικά αποτελέσματα από τους υπολογισμούς των στατιστικών παραμέτρων για το σταθμό της Τρίπολης δείχνουν ότι η μέθοδος 6.3.1 μειώνει σε μεγάλο ποσοστό το απόλυτο bias, την τυπική απόκλιση του σφάλματος και τη τετραγωνική ρίζα του σφάλματος κατά τις ανέφελες ημέρες. Ταυτόχρονα η μέθοδος 6.3.3 εξασφαλίζει σημαντική ελάττωση του απόλυτου bias, της τυπικής απόκλισης του σφάλματος και της τετραγωνικής ρίζας του σφάλματος κατά τις ημέρες με νέφωση. Οι άλλες δύο μέθοδοι οδηγούν σε βελτιωμένη πρόγνωση, χωρίς όμως να ξεπερνούν σε απόδοση τα μοντέλα των 6.3.1 και 6.3.3 μεθόδων (Πίνακες 7.9 και 7.10). Ο συντελεστής συσχέτισης εμφανίζεται πιο ελαττωμένος κατά τις νεφοσκεπείς ημέρες ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου το απόλυτο bias είναι αυξημένο.

Σταθμός: Τρίπολη	Absolute Bias		Standard Deviation of Error		RMSE	
	clear	cloudy	clear	cloudy	clear	cloudy
Μοντέλο αναφοράς	128.1	164.3	92.7	164.5	152.4	210
Μέθοδος 6.3.1	50.4	117.9	67.7	160.7	69.1	168.7
Μέθοδος 6.3.2	104	146.3	91.1	167.4	129.1	194.7
Μέθοδος 6.3.3	56	97	75	143	77.1	150
Μέθοδος 6.3.4	106.6	127.3	127	164	140	170

Πίνακας 7.9 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό της Τρίπολης.

Σταθμός: Τρίπολη	Bias		Correlation coefficient	
	clear	cloudy	clear	cloudy
Μοντέλο αναφοράς	121	130.7	0.957	0.829
Μέθοδος 6.3.1	13.8	51.4	0.977	0.821
Μέθοδος 6.3.2	92.5	99.5	0.96	0.823
Μέθοδος 6.3.3	-5.3	43	0.92	0.82
Μέθοδος 6.3.4	-16.4	14.8	0.879	0.749

Πίνακας 7.10 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό της Τρίπολης.

7.2.3 Αποτελέσματα για το σταθμό των Μολάων (περιοχή: Βελιές)

Η τιμή του απόλυτου bias όπως γίνεται φανερό από τους πίνακες 7.11 και 7.12 είναι μειωμένη κατά την εαρινή περίοδο σε σχέση με τη χειμερινή και για τις δύο μεθόδους 6.3.3 και 6.3.4. Όμοια πτωτική τάση παρατηρείται στην τυπική απόκλιση του σφάλματος και τη τετραγωνική ρίζα του σφάλματος. Παρόλα αυτά παρατηρείται αυξημένο σφάλμα κατά τους μήνες Μάιος-Σεπτέμβριος το οποίο ίσως εξηγείται από τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής ή την απόκλιση της πρόγνωσης της νέφωσης από την πραγματική τιμή.

Σταθμός: Βελιές		Absolute Bias		Standard Deviation of Error		RMSE	
		months	clear	cloudy	clear	cloudy	clear
Μέθοδος 6.3.3	1 st -2 nd & 12 th	68	283	79	316	91	366
	9 th – 11 th	131	191	150	250	172	253
	3 rd – 5 th	129	225	179	301	179	308
	6 th – 8 th	66	114	99	172	101	172
Μέθοδος 6.3.4	1 st -2 nd & 12 th	200	237	133	294	224	295
	9 th – 11 th	178	233	191	251	212	252
	3 rd – 5 th	184	171	206	303	229	303
	6 th – 8 th	150	212	175	216.7	175	218

Πίνακας 7.11 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό των Βελιών.

Σταθμός: Βελιές		Bias		Correlation coefficient	
		months	clear	cloudy	clear
Μέθοδος 6.3.3	1 st -2 nd & 12 th	-45	185	0.969	0.504
	9 th – 11 th	-85	42	0.853	0.651
	3 rd – 5 th	5	64	0.867	0.579
	6 th – 8 th	-6	2	0.931	0.803
Μέθοδος 6.3.4	1 st -2 nd & 12 th	-180	-16	0.952	0.428
	9 th – 11 th	-90	18	0.712	0.622
	3 rd – 5 th	-99	-1.5	0.766	0.476
	6 th – 8 th	8.3	28.4	0.801	0.722

Πίνακας 7.12 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό των Βελιών.

Το ποσοστό των ημερών όπου η πρόγνωση της 6.3.1 και της 6.3.3 μεθόδου είναι πλησιέστερη στην τιμή της παρατήρησης είναι μειωμένο για τους μήνες Δεκέμβριος-Φεβρουάριος και Μάρτιος-Μάιος καθώς τα σφάλματα των προγνωστικών τιμών σε αυτές τις περιόδους είναι σημαντικά (Πίνακας 7.13).

**Σταθμός:
Βελιές**

Ποσοστό ημερών όπου η ενέργεια από τη πρόγνωση (wh/m^2) είναι πλησιέστερη στη παρατηρούμενη

months	Μέθοδος 6.3.3	Μοντέλο αναφοράς	Μέθοδος 6.3.1
1 st -2 nd & 12 th	0.08	0.57	0.35
9 th – 11 th	0.28	0.44	0.28
3 rd – 5 th	0.16	0.6	0.24
6 th – 8 th	0.32	0.33	0.35

Πίνακας 7.13 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό των Βελιών. Ποσοστό ημερών όπου η ενέργεια από τη πρόγνωση (wh/m^2) είναι πλησιέστερη στη παρατηρούμενη

Από τη μελέτη των πινάκων 7.14 και 7.15 προκύπτει ότι η πιο αποτελεσματική μέθοδος για το σταθμό των Μολάων είναι η 6.3.3 όσον αφορά τις ανέφελες ημέρες. Για τις ημέρες με νέφωση προκύπτουν σφάλματα περίπου ίσα με τα σφάλματα του μοντέλου αναφοράς. Συμπερασματικά οι υπόλοιπες μέθοδοι ενώ βελτιώνουν τις προγνωστικές τιμές για τις ανέφελες ημέρες, δεν αποδίδουν βελτιωμένες τιμές για τις ημέρες με νέφωση. Ο συντελεστής συσχέτισης όπως είναι αναμενόμενο ακολουθεί την αντίστροφη πορεία από αυτή του απόλυτου σφάλματος, δηλαδή καθώς έχουμε αύξηση αυτού, η συσχέτιση των δεδομένων μειώνεται.

**Σταθμός:
Βελιές**

	Absolute Bias		Standard Deviation of Error		RMSE	
	clear	cloudy	clear	cloudy	clear	cloudy
Μοντέλο αναφοράς	167	187	179	242	209	244
Μέθοδος 6.3.1	113	202	144	254	144	274
Μέθοδος 6.3.2	124	199	161	262	163	273
Μέθοδος 6.3.3	98.5	203	127	260	136	275
Μέθοδος 6.3.4	178	212	176	266	240	267

Πίνακας 7.14 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό των Βελιών.

Σταθμός: Βελιές	Bias		Correlation coefficient	
	clear	cloudy	clear	cloudy
Μοντέλο αναφοράς	-109	-29	0.825	0.713
Μέθοδος 6.3.1	-11	102	0.879	0.674
Μέθοδος 6.3.2	-3	75	0.863	0.672
Μέθοδος 6.3.3	-33	73	0.905	0.634
Μέθοδος 6.3.4	-90	7	0.808	0.562

Πίνακας 7.15 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό των Βελιών.

7.2.4 Αποτελέσματα για το σταθμό του Αρκαλοχωρίου

Στη περιοχή του Αρκαλοχωρίου το απόλυτο σφάλμα, η τυπική απόκλιση του σφάλματος και η τετραγωνική ρίζα του σφάλματος χαρακτηρίζονται από μία καθοδική τάση προχωρώντας από τους χειμερινούς στους θερινούς μήνες. Όπως έχουμε εξηγήσει και πρωτύτερα το γεγονός αυτό οφείλεται στη μείωση των ημερών με νεφοκάλυψη κατά τη μετακίνηση προς τους θερινούς μήνες. Ο παράγοντας της νεφοκάλυψης είναι δύσκολος στη πρόγνωση καθώς εμφανίζει μεγάλη διακύμανση με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η προσπάθεια πρόγνωσης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον παράγοντα της νέφωσης. Όμοια μεταβολή παρατηρείται και στα σφάλματα κατά τις ημέρες με νέφωση όπου το χειμώνα το απόλυτο σφάλμα στις μεθόδους 6.3.3 και 6.3.4 είναι μεγάλο ενώ το καλοκαίρι είναι αισθητά μειωμένο. Όπως είναι εύλογο η συσχέτιση για τις μεθόδους 6.3.3 και 6.3.4 θα αυξάνεται στους θερινούς μήνες. Ταυτόχρονα όπως φαίνεται από τους πίνακες η μεγαλύτερη συσχέτιση εμφανίζεται στην εφαρμογή της 6.3.3 μεθόδου και ιδιαίτερα κατά το καλοκαίρι. Εξαιτίας της έλλειψης των δεδομένων για τους χειμερινούς μήνες οι μέθοδοι δεν έχουν εφαρμοστεί για τις δεδομένες χρονικές περιόδους.

Σταθμός:	Αρκαλοχώρι	Absolute Bias		Standard Deviation of Error		RMSE	
		months	clear	cloudy	clear	cloudy	clear
Μέθοδος 6.3.3	1 st -2 nd & 12 th	-	303	-	280	-	387
	9 th – 11 th	25	203	37	288	39	288
	3 rd – 5 th	3	137	10	209	10	220
	6 th – 8 th	16	75	35	160	35	167
Μέθοδος 6.3.4	1 st -2 nd & 12 th	-	253	-	252	-	307
	9 th – 11 th	40	144	58	194	61	194
	3 rd – 5 th	48	131	57	196	58	196
	6 th – 8 th	35	93	55	169	56	181

Πίνακας 7.16 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό του Αρκαλοχωρίου.

Σταθμός:	Αρκαλοχώρι	Bias		Correlation coefficient	
		months	clear	cloudy	clear
Μέθοδος 6.3.3	1 st -2 nd & 12 th	-	266	-	0.55
	9 th – 11 th	-12	129	0.994	0.64
	3 rd – 5 th	-3	67	0.999	0.792
	6 th – 8 th	-4	47	0.994	0.878
Μέθοδος 6.3.4	1 st -2 nd & 12 th	-	-177	-	0.31
	9 th – 11 th	-17	4	0.984	0.743
	3 rd – 5 th	58	196	0.985	0.7883
	6 th – 8 th	-6	64	0.986	0.854

Πίνακας 7.17 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό του Αρκαλοχωρίου. Ποσοστό ημερών όπου η ενέργεια από τη πρόγνωση (wh/m^2) είναι πλησιέστερη στη παρατηρούμενη

Στη διάρκεια των εαρινών και θερινών μηνών το μοντέλο της μεθόδου 6.3.3 προβλέπει καλύτερα την ηλιακή ενέργεια από ότι το μοντέλο της μεθόδου 6.3.1 (Πίνακας 7.18). Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στις τοπικές κλιματικές

συνθήκες. Ίσως κατά τη διάρκεια αυτών των ημερών να παρατηρείται αυξημένη νεφοκάλυψη με συνέπεια το μοντέλο της μεθόδου 6.3.3 να είναι πιο αξιόπιστο.

Σταθμός: Αρκαλοχώρι	Ποσοστό ημερών όπου η ενέργεια από τη πρόγνωση (wh/m^2) είναι πλησιέστερη στη παρατηρούμενη		
	Μέθοδος 6.3.3	Μοντέλο αναφοράς	Μέθοδος 6.3.1
months			
1 st -2 nd & 12 th	-	-	-
9 th – 11 th	0.29	0.55	0.16
3 rd – 5 th	0.74	0.23	0.03
6 th – 8 th	0.66	0.01	0.33

Πίνακας 7.18 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό του Αρκαλοχωρίου.

Στο σταθμό το Αρκαλοχωρίου το συνολικό απόλυτο bias και η τετραγωνική ρίζα του σφάλματος σε κάθε μέθοδο εμφανίζονται μειωμένα σε σχέση με αυτά του μοντέλου αναφοράς για τις ανέφελες ημέρες. Αντίθετα, τις ημέρες με νέφωση παρουσιάζεται μία ελάχιστη αύξηση του απόλυτου σφάλματος και της τετραγωνικής ρίζας του σφάλματος που προκύπτουν από τις τέσσερις μεθόδους. Η τυπική απόκλιση του σφάλματος είναι ελάχιστη στη μέθοδο 6.3.3 τις ανέφελες ημέρες και τις νεφοσκεπείς ημέρες η ελάχιστη τιμή εντοπίζεται στη μέθοδο 6.3.4. Η μέγιστη συσχέτιση παρουσιάζεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου 6.3.3.

Σταθμός: Αρκαλοχώρι	Absolute Bias		Standard Deviation of Error		RMSE	
	clear	cloudy	clear	cloudy	clear	cloudy
Μοντέλο αναφοράς	125	180	115	227	155	233
Μέθοδος 6.3.1	55	204	286	244	77	286
Μέθοδος 6.3.2	72	197	272	246	95	272
Μέθοδος 6.3.3	14.7	179.5	27	234	28	266
Μέθοδος 6.3.4	41	155	57	203	58	220

Πίνακας 7.19 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό του Αρκαλοχωρίου.

Σταθμός: Αρκαλοχώρι	Bias		Correlation coefficient	
	clear	cloudy	clear	cloudy
Μοντέλο αναφοράς	104	57	0.935	0.687
Μέθοδος 6.3.1	14	148	0.976	0.674
Μέθοδος 6.3.2	45	115	0.968	0.662
Μέθοδος 6.3.3	-6	127	0.995	0.715
Μέθοδος 6.3.4	15.7	22	0.985	0.674

Πίνακας 7.20 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων για το σταθμό του Αρκαλοχωρίου.

7.3 Εκτίμηση παραγωγής για τα φωτοβολταϊκά πάρκα

Για να υπολογιστεί η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιείται ο συντελεστής απόδοσης:

$$a = \frac{P_{\max}}{P_{rad}} \quad (7.1)$$

Όπου P_{\max} ορίζεται ως η παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων και ως P_{rad} η ισχύς της ακτινοβολίας η οποία προσπίπτει στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών μονάδων και έχει αναχθεί σε γωνία κλίσης 30° για τους σταθμούς στους οποίους τα συστήματα είναι τοποθετημένα με αυτή τη γωνία. Η ισχύς της εισερχόμενης ακτινοβολίας είναι ίση με το γινόμενο της ενέργειας που προσφέρεται από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας, επί τη συνολική ενεργό επιφάνεια των φωτοβολταϊκών μονάδων.

Κατά συνέπεια ο υπολογισμός της μέγιστης απόδοσης όπως προβλέπεται από το μοντέλο θα δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\max \text{ mod}} = \frac{E_{rad \text{ mod}} \cdot P_{\max \text{ obs}}}{E_{rad \text{ obs}}} \quad (7.2)$$

7.3.1 Αποτελέσματα

Με την εφαρμογή των τεσσάρων μεθόδων που περιγράφηκαν στα παραπάνω κεφάλαια συμπεραίνουμε ότι η τέταρτη μέθοδος (6.3.4), που βασίζεται σε αυτοσυσχετιζόμενες τιμές, παρουσιάζει συνολική παραγόμενη ισχύ η οποία έχει μικρή απόκλιση από τη πραγματική συνολική ισχύ και για τους τρεις σταθμούς. Ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι αν η μέθοδος 6.3.1, της διόρθωσης συστηματικών σφαλμάτων λόγω εποχικότητας, και η μέθοδος 6.3.3 εφαρμοστούν σε όλη τη διάρκεια του έτους και όχι στις ανέφελες και νεφοσκεπείς ημέρες αντίστοιχα, τότε η συνολική προβλεπόμενη παραγόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών μονάδων αποκλίνει σημαντικά από τη παρατηρούμενη. Η μέθοδος 6.3.2, που υπολογίζει τη συχνότητα εμφάνισης της προγνωστικής τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας, εμφανίζει σχετικά μικρές αποκλίσεις μόνο για το σταθμό της Τρίπολης.

Συνολική Παραγόμενη ισχύς από το σταθμό σε MWh	Σταθμός Τρίπολης Έτος 2011	Σταθμός Βελιών 4/2011-3/2012	Σταθμός Αρκαλοχωρίου 5/2011-3/2012
Παρατηρούμενη	156.83	320.18	142.88
Μοντέλο Αναφοράς	221.24	302.94	166.12
Μέθοδος 6.3.1	183.08	380.35	191.68
Μέθοδος 6.3.2	184.74	362.52	181.98
Μέθοδος 6.3.3	144.8	359.84	155.29
Μέθοδος 6.3.4	186.7	327.9	137.74

Πίνακας 7.21 Εκτίμηση παραγωγής από τρεις φωτοβολταϊκούς σταθμούς

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη αποτελεί μία προσπάθεια βελτίωσης πρόγνωσης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, σε επίπεδη επιφάνεια, η οποία προέρχεται από το αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης Σκίρων. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν τέσσερις μέθοδοι οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν στις εξαγόμενες προγνωστικές τιμές από το μοντέλο αναφοράς, το οποίο παρέχει προγνώσεις διάρκειας πέντε ημερών μπροστά. Τα δεδομένα που λήφθηκαν από το σύστημα πρόγνωσης Σκίρων ήταν ωριαίες τιμές ακτινοβολίας και ποσοστό νεφοκάλυψης σε τρία επίπεδα στην ατμόσφαιρα. Εδώ είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι λόγω του μεγέθους της ανάλυσης του μοντέλου ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$) δεν μπορεί να υπάρξει λεπτομερής πρόγνωση του είδους των νεφών.

Η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε, δηλαδή η εύρεση των μέσων εποχιακών σφαλμάτων ανά δέκα ημέρες, μείωσε σημαντικά τα συστηματικά σφάλματα στις προγνωστικές τιμές, ιδιαίτερα κατά τις ανέφελες ημέρες. Τα συστηματικά σφάλματα του μοντέλου Σκίρων οφείλονται κατά κύριο λόγο στην εποχικότητα, αλλά και στο ότι δεν συνεκτιμάται ο παράγοντας των αιωρούμενων σωματιδίων για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας. Συνεπώς παρατηρείται και για τους τέσσερις σταθμούς μείωση του bias, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη κατά τις ημέρες με καθαρό ουρανό και κατά τους θερινούς μήνες. Ωστόσο η μέθοδος αυτή δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιοχές όπου επικρατούν συνθήκες νέφωσης για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το μέτρο της μείωσης του απόλυτου σφάλματος εξαρτάται άμεσα από το πλήθος των ανέφελων ημερών οι οποίες διατίθενται.

Η δεύτερη μέθοδος, με την οποία υπολογίζεται η συχνότερα εμφανιζόμενη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας, παρέχει πλησιέστερες προς τις παρατηρούμενες τιμές ακτινοβολίας σε σχέση με τη προγνωστικές τιμές για τη γεωγραφική θέση του κάθε σταθμού. Η μείωση των σφαλμάτων είναι μικρή και πιο έντονη τις ανέφελες ημέρες, ενώ τις υπόλοιπες ημέρες οι τιμές τους πλησιάζουν το μοντέλο αναφοράς.

Η τρίτη μέθοδος χρησιμοποιεί τον παράγοντα της νεφοκάλυψης για την εύρεση της ηλιακής ακτινοβολίας και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα τις ημέρες όπου υπάρχει νέφωση καθώς και τις ανέφελες ημέρες. Συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους υπερτερεί κατά τη χειμερινή περίοδο και κατά τις νεφοσκεπείς ημέρες καθώς οι προβλεπόμενες τιμές προσεγγίζουν καλύτερα τη πραγματική τιμή της ακτινοβολίας.

Μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν έχουμε ακριβή γνώση του είδους των νεφών και ότι λαμβάνεται αποκλειστικά μία παράμετρος για την εύρεση της ακτινοβολίας.

Η τέταρτη μέθοδος αποτελεί μία προσπάθεια να εξαλειφθούν τα συστηματικά σφάλματα που συναντώνται κατά τις νεφοσκεπείς ημέρες. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι άμεσα συνδεδεμένα με τις συνθήκες που εισάγονται. Επομένως οι αυξημένες τιμές του συντελεστή συσχέτισης για τις ημέρες που συγκρίνονται, συνεπάγονται και μεγαλύτερη ελάττωση στα συστηματικά σφάλματα.

Κατά τον υπολογισμό της συνολικής παραγόμενης ισχύς των φωτοβολταϊκών μονάδων η οποία προβλέπεται από τις τέσσερις μεθόδους καταλήγουμε στο ότι η πρώτη (6.3.1) και η τρίτη μέθοδος (6.3.3) δίνουν μικρότερες αποκλίσεις από τις παρατηρούμενες τιμές όταν εφαρμόζονται ξεχωριστά για τις ημέρες χωρίς νέφωση και για τις ημέρες με νέφωση αντίστοιχα. Επιπλέον οι μέθοδοι 6.3.2 και 6.3.4 έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να εφαρμόζονται σε όλες τις ημέρες του έτους και να δίνουν ικανοποιητικές τιμές.

Βιβλιογραφία

Bofinger, S., Heilscher, G., 2006. Solar Electricity Forecast – Approaches and first results. In: 21st PV Conference. Dresden, Germany.

Breitkreuz H., “Solare Strahlungsprognosen für energiewirtschaftliche Anwendungen—Der Einfluss von Aerosolen auf das sichtbare Strahlungsangebot”, Ph.D. dissertation, Würzburg Univ., Germany, 2008.

Cao S., Cao J. Forecast of solar irradiance using recurrent neural networks combined with wavelet analysis, *Applied Thermal Engineering*, 25 (2005), pp. 161–172.

J.C. Cao, S.H. Cao Study of forecasting solar irradiance using neural networks with preprocessing sample data by wavelet analysis, *Energy*, 31 (15) (2006), pp. 3435–3445.

J. Cao, X. Lin Application of the diagonal recurrent wavelet neural network to solar irradiation forecast assisted with fuzzy technique, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21 (2008), pp. 1255–1263.

Janjic, Z. and A. Wiin-Nielsen, 1977: On geostrophic adjustment and numerical procedures in a rotating fluid. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 34, 297–310.

Janjic, Z.I. and F. Mesinger, 1989: Response to small-scale forcing on two staggered grids used in finite-difference models of the atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 115, 1167–1176.

Janjic, Z.I., 1974: A stable centered difference scheme free of the two-grid-interval noise. *Monthly Weather Review*, Vol. 102, 319–323.

Diagne H. M., Mathieu D., Lauret Phelippe, Boland John, Solar Irradiation Forecasting: State of the art and proposition for future developments for small scale insular grids., *Renewable Energy Forum*, 2012, WREF 2012, Denver, U.S.A., May 2012.

Duffie J. A., Beckman W. A., *Solar engineering of thermal processes*.

Gadd, A.J., 1974: An economical explicit integration scheme. *Meteorological Office Techn. Note* 44, 7 pp.

Girodo M., “Solarstrahlungsvorhersage auf der Basis numerischer Wettermodelle”, Ph.D. dissertation, Oldenburg Univ., Germany, 2006.

Guarnieri R. A., Pereira E. B., and Chou S. C., “Solar radiation forecast using artificial neural networks in South Brazil,” in *Proc. 8 ICSHMO*, Foz do Iguaçu, Brazil, Apr. 24–28, 2006, pp. 1777–1785, INPE.

Grell G. A., Dudhia J., and Stauffer D. R., A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), Tech. Note NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research. Boulder, CO, 1995.

Heinemann D., Lorenz E., and Girodo M., “Forecasting of solar radiation”, in Solar Energy Resource Management for Electricity Generation. From Local Level to Global Scale, Dunlop E. D., Wald L., and Sári M., Hauppauge Eds., NY: Nova, 2005.

Heinemann D., Lorenz E., Girodo M., Forecasting of solar radiation Dunlop E.D., Wald L., Šári M. (Eds.), Solar Energy Resource Management for Electricity Generation from Local Level to Global Scale, Nova Science Publishers, Hauppauge (2006).

Kallos, G., S. Nickovic, A. Papadopoulos, D. Jovic, O. Kakaliagou, N. Misirlis, L. Boukas, N. Mimikou, G. Sakellaris, J. Papageorgiou, E. Anadranistakis, and M. Manousakis, 1997: The regional weather forecasting system SKIRON: An overview, in: *Proceedings of the International Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments*, G. Kallos, V. Kotroni, and K. Lagouvardos, ed., ISBN: 960-8468-22-1, University of Athens, Greece, pp. 109-122.

Kaplanis S.N. New methodologies to estimate the hourly global solar radiation; comparisons with existing models, *Renewable Energy*, 31 (2006), pp. 781–790.

Kemmoku Y., Orita S., Nakagawa S., Sakakibara T.. Daily insolation forecasting using a multi-stage neural network, *Solar Energy*, 66 (3) (1999), pp. 193–199.

Lorenz E, Heinemann D, Hammer A. Short-term forecasting of solar radiation based on satellite data. *Proceedings Eurosun (ISES Europe Solar Congress)*, 2004; Freiburg, Germany.

Lorenz E., Hurka J., Heinemann D. and Beyer H. G., Irradiance Forecasting for the Power Prediction of Grid-Connected Photovoltaic Systems, *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, vol. 2, no. 1, March 2009.

Liou K. N., *An introduction to atmospheric radiation*, second edition.

Luque A., Hegedus S., *Handbook of photovoltaic science and engineering*.

Mathiesen P., Kleissl J. Evaluation of numerical weather prediction for intra-day solar forecasting in the CONUS, *Solar Energy*, 85 (5) (2011), pp. 967–977.

Mesinger, F, 1974: An economical explicit scheme which inherently prevents the false two-grid-interval wave in the forecast fields. *Proc. Symp. on Difference and Spectral Methods for Atmosphere and Ocean Dynamics Problems*, Novosibirsk, 17-22 September 1973, *Acad. Sci., Novosibirsk, Part II*, 18-34.

Mesinger, F. and A., Arakawa, 1976: *Numerical Methods Used in Atmospheric Models*. Vol. I, GARP Publications Series No. 17, WMO, Geneva, Case Postal No. 2300, CH-1211 Geneve 2, 64 pp.

- Mesinger, F., 1973: A method for construction of second-order accuracy difference schemes permitting no false two-grid-interval wave in the height field. *Tellus*, Vol. 25, 444-458.
- Mesinger, F., 1977: Forward-backward scheme, and its use in a limited area model. *Contributions to Atmospheric Physics*, Vol. 50, 200-210.
- Mesinger, F., 1984: A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, Vol. 44, No. 1-4, 195-202.
- Mesinger, F., T.L Black, and Z. I. Janjic, 1988: A summary of the NMC step-mountain (ETA) coordinate model. *Proc. Workshop on Limited-area Modeling Intercomparison*, Boulder, Colorado, NCAR, 91-98.
- A. Mellit, M. Benghane, S.A. Kalogirou An adaptive wavelet-network model for forecasting daily total solar radiation, *Applied Energy*, 83 (2006), pp. 705–722.
- Pelland S., Galanis G., Kallos G., Solar and photovoltaic forecasting through post-processing of the Global Environmental Multiscale numerical weather prediction model, *Progress in photovoltaics, research and applications*, 2011.
- Perez R., Moore K., and Stackhouse P., “Forecasting solar radiation—Preliminary evaluation of an approach based upon the national forecast database”, *Solar Energy*, vol. 81, no. 6, pp. 809–812, 2007.
- Perez R, Kivalov S, Schlemmer J, Hemker K, Jr., Renne´ D, Hoff TE. Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US. *Proceedings SES Annual Conference*, 2009; Buffalo, New York.
- Reikard G. Predicting solar radiation at high resolutions: a comparison of time series forecasts. *Solar Energy* 2009; 83(3): 342–349.
- Rogers, S., 2007. 2D weighted polynomial fitting and evaluation. *Matlab Central File Exchange*.
- Sfetsos A., Coonick A.H. Univariate and Multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques, *Solar Energy*, 68 (2000), pp. 169–178.
- Simmons, A.J., and D.M. Burridge, 1981: An energy and angular-momentum conserving vertical finite-difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 758-766.
- Spyrou C., Mitsakou C., Kallos G., Louka P., and Vlastou G., 2010: An improved limited area model for describing the dust cycle in the atmosphere. *Journal Of Geophysical Research*, 115, D17211, doi:10.1029/2009JD013682, 2010.
- Zamora R. J., Solomon S., Dutton E. G., Bao J. W., Trainer M., Portmann R. W., White A. B., Nelson D. W., and McNider R. T., “Comparing MM5 radiative fluxes

with observations gathered during the 1995 and 1999 Nashville southern oxidants studies” , *J. Geophys. Res.*, vol. 108, pp. 1–13, 2003.

Zamora R., Dutton E., Trainer M., McKeen S., Wilczak J., and Hou Y., “The accuracy of solar irradiance calculations used in mesoscale numerical weather prediction”, *Monthly Weath. Rev.*, vol. 133, pp.783–792, 2005.

Vasiljevic, D., 1982: The effect of Mesinger's procedure for preventing grid separation on the geostrophic mode. *Contributions to Atmospheric Physics*, Vol. **55**, 177-181.

Wilks, D. S, 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 233-283.