

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ**  
**ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**

***“ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ***  
***ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ***  
***ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ – ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΟΣ***  
***ΝΕΟΥ ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ”***

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΕΥΓΕΝΙΑ ΜΕΧΛΕΡΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ν.Χ. ΜΑΡΚΑΤΟΣ**

**ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2007**

*Αφιερώνεται στους γονείς μου Δημήτρη και Ευμορφία  
και  
στην αδερφή μου Βαρβάρα*

## *Πρόλογος*

Η κυμαινόμενη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα λόγω των καιρικών και κλιματολογικών συνθηκών, ώθησε στην εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και στην ανάπτυξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα.

Αυτό αποτέλεσε και το κίνητρο για την παρούσα διπλωματική εργασία της οποίας στόχος είναι η μελέτη και αξιολόγηση διαφόρων μοντέλων της βιβλιογραφίας για την πρόβλεψη των συνιστωσών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας με τελικό στόχο τον υπολογισμό της ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού συλλέκτη καθώς και η ανάπτυξη ενός νέου εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης αξιόπιστο για τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της Πολυτεχνειούπολης, Ζωγράφου και δίνεται η δυνατότητα περαιτέρω μελέτης στο συγκεκριμένο τομέα.

Διαμέσου της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας δόθηκε η δυνατότητα περαιτέρω κατανόησης της πολύπλοκης φύσης της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως και της χρησιμότητας των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο μέλλον.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής του τμήματος Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Αποτελεί την προπτυχιακή εργασία της συγγραφέως στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των σπουδών της και απόκτησης του διπλώματός της.

Η συγγραφέας θα ήθελε να ευχαριστήσει τον Καθηγητή Νικόλαο-Χρήστο Μαρκάτο για την ευκαιρία που της δόθηκε να πραγματοποιήσει την προπτυχιακή της εργασία στο Εργαστήριο της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής.

Η συγγραφέας θα ήθελε επίσης να τονίσει ιδιαίτερα την σημαντική βοήθεια του Υποψήφιου Διδάκτορα Παναγιώτη Ζέρβα, ο οποίος επιμελήθηκε και παρακολούθησε την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελε να τον ευχαριστήσει από καρδιάς, διότι η συνεχής ενασχόλησή του και βοήθεια του, συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας.

Ακόμα, ευχαριστίες οφείλονται στον Αναπληρωτή Καθηγητή Ιωάννη Παλυβό για τις πολύ χρήσιμες επισημάνσεις και διορθώσεις που προέκυψαν κατά την ενδελεχή μελέτη της εργασίας, καθώς επίσης και στον Επίκουρο Καθηγητή Χαράλαμπο Σαρίμβη για την καθοδήγησή του κατά την ανάπτυξη του νέου μοντέλου.

Επίσης, ευχαριστίες οφείλονται και σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου για τη φιλοξενία σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Η συγγραφέας θα ήθελε τέλος να ευχαριστήσει τους γονείς της για την στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών της.

Τέλος, η συγγραφέας αφήνει ανοιχτά τα περιθώρια έρευνας πάνω στη συγκεκριμένη θεματική ενότητα με στόχο την περαιτέρω ανάπτυξη της.

*Ευγενία Μέχλερη,  
Νέα Ερυθραία, Νοέμβριος 2007*

## Περιεχόμενα

Λίστα πινάκων	i
Λίστα σχημάτων	iii
Λίστα διαγραμμάτων	iv
Ορολογία	xi
Περίληψη	xv
Abstract	xvi

### Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Βιβλιογραφία-Έρευνα	2
1.2.1	Μέθοδοι προσδιορισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας	2
1.2.2	Ωριαίες συσχετίσεις $\frac{I_{\alpha}}{I}$ και $K_T (\frac{I}{I_0})$	8
1.2.3	Ημερήσιες και μηνιαίες συσχετίσεις μεταξύ $\frac{I_{\alpha}}{I}$ και $K_T (\frac{I}{I_0})$	10
1.2.4	Γενικότερες δημοσιεύσεις	11

### Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Ηλιακή ακτινοβολία και φωτοβολταϊκοί συλλέκτες

2.1	Ηλιακή ακτινοβολία	14
2.1.1	Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας	14
2.1.2	Ύπαρξη ατμόσφαιρας-ακτινοβολία ενός ήλιου	15
2.1.3	Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας	18
2.1.3.1	Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της θέσης του ήλιου	18
2.1.3.2	Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της κίνησης της γης κατά τη διάρκεια του έτους	21
2.1.3.3	Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω κίνησης κατά τη διάρκεια της ημέρας	21
2.1.3.4	Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της γεωγραφικής θέσης του παρατηρητή	22
2.2	Η ηλιακή ακτινοβολία στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη	24
2.2.1	Εισαγωγή	24
2.2.2	Η επίδραση της κλίσης του συλλέκτη	24

2.2.3	Η επίδραση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας	27
2.2.4	Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη	28
2.2.4.1	Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας	28
2.2.4.2	Επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία	29
2.2.4.3	Συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη	30
2.2.5	Υπολογισμός της ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκού	31
2.2.6	Συμπέρασμα	31

### **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Περιγραφή του υπολογιστικού μοντέλου και των βιβλιογραφικών συσχετίσεων**

3.1	Περιγραφή του μοντέλου	32
3.1.1	Εισαγωγή	32
3.1.2	Μοντέλο	32
3.2	Βιβλιογραφικές συσχετίσεις	35
3.2.1	Εισαγωγή	35
3.2.2	Η συσχέτιση του Erbs	36
3.2.3	Η συσχέτιση του Page	38
3.2.4	Η συσχέτιση των Orgill and Hollands	39
3.2.5	Η συσχέτιση του Reindl	40
3.2.6	Η συσχέτιση της Καρατάσου	41

### **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Σύγκριση των βιβλιογραφικών συσχετίσεων**

4.1	Εισαγωγή	43
4.2	Σύγκριση των συσχετίσεων Page και Erbs	44
4.2.1	Χειμώνας	44
4.2.1.1	Χειμώνας-Ηλιόλουστες ημέρες	44
4.2.1.2	Χειμώνας-Ημέρες με λίγα σύννεφα	45
4.2.1.3	Χειμώνας-Συννεφιασμένες ημέρες	47
4.2.1.4	Χειμώνας-Βροχερές ημέρες	48
4.2.1.5	Χειμώνας-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας	49
4.2.2	Άνοιξη	50
4.2.2.1	Άνοιξη-Ηλιόλουστες ημέρες	50
4.2.2.2	Άνοιξη-Ημέρες με λίγα σύννεφα	51
4.2.2.3	Άνοιξη-Συννεφιασμένες ημέρες	52

4.2.2.4	Άνοιξη-Βροχερές ημέρες	54
4.2.2.5	Άνοιξη-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας	55
4.2.3	Καλοκαίρι	55
4.2.3.1	Καλοκαίρι-Ηλιόλουστες ημέρες	55
4.2.3.2	Καλοκαίρι-ημέρες με λίγα σύννεφα	57
4.2.3.3	Καλοκαίρι-συννεφιασμένες ημέρες	58
4.2.3.4	Καλοκαίρι-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας	60
4.2.4	Φθινόπωρο	60
4.2.4.1	Φθινόπωρο-Ηλιόλουστες ημέρες	60
4.2.4.2	Φθινόπωρο-Ημέρες με λίγα σύννεφα	62
4.2.4.3	Φθινόπωρο-Συννεφιασμένες ημέρες	63
4.2.4.4	Φθινόπωρο-Βροχερές ημέρες	64
4.2.4.5	Φθινόπωρο-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας	66
4.3	Γενικό συμπέρασμα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Ergs	66
4.4	Σύγκριση των συσχετίσεων Orgill and Hollands, Reindl και Καρατάσου	67
4.4.1	Χειμώνας	67
4.4.1.1	Χειμώνας-Ηλιόλουστες ημέρες	67
4.4.1.2	Χειμώνας-Ημέρες με λίγα σύννεφα	68
4.4.1.3	Χειμώνας-Συννεφιασμένες ημέρες	70
4.4.1.4	Χειμώνας-Βροχερές ημέρες	71
4.4.1.5	Χειμώνας-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας	73
4.4.2	Άνοιξη	73
4.4.2.1	Άνοιξη-Ηλιόλουστες ημέρες	73
4.4.2.2	Άνοιξη-Ημέρες με λίγα σύννεφα	74
4.4.2.3	Άνοιξη-Συννεφιασμένες ημέρες	75
4.4.2.4	Άνοιξη-Βροχερή ημέρα	76
4.4.2.5	Άνοιξη-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας	77
4.4.3	Καλοκαίρι	78
4.4.3.1	Καλοκαίρι-Ηλιόλουστες ημέρες	78
4.4.3.2	Καλοκαίρι-Ημέρες με λίγα σύννεφα	79
4.4.3.3	Καλοκαίρι-Συννεφιασμένες ημέρες	80
4.4.3.4	Καλοκαίρι-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας	81

4.4.4	Φθινόπωρο	81
4.4.4.1	Φθινόπωρο-Ηλιόλουστες ημέρες	81
4.4.4.2	Φθινόπωρο-Ημέρες με λίγα σύννεφα	82
4.4.4.3	Φθινόπωρο-Συννεφιασμένες ημέρες	83
4.4.4.4	Φθινόπωρο-Βροχερές ημέρες	84
4.4.4.5	Φθινόπωρο-Γελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας	85
4.5	Γενικό συμπέρασμα από τη σύγκριση των συσχετίσεων Orgill and Hollands, Reindl και Καρατάσου	86

### **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της διάχυτης ακτινοβολίας και στατιστικές μέθοδοι ανάλυσης**

5.1	Εισαγωγή	88
5.2	Βάση δεδομένων	88
5.3	Εισαγωγή στις στατιστικές μεθόδους ανάλυσης	89
5.3.1	Ανάλυση των στατιστικών μεθόδων	89
5.3.1.1	Συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ )	89
5.3.1.2	Μέσο % σφάλμα (MPE)	90
5.3.1.3	Μέσο σφάλμα (MBE)	90
5.3.1.4	RMSE (Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος)	90
5.3.1.5	Μέθοδος t-statistic (t-stat)	91
5.4	Ανάπτυξη της συσχέτισης	91
5.4.1	Εξαγωγή των συσχετίσεων με ενιαίο διάστημα $K_T$	92
5.4.1.1	Εξαγωγή γραμμικού μοντέλου	93
5.4.1.2	Εξαγωγή πολυωνυμικού μοντέλου 2 <sup>ου</sup> βαθμού	94
5.4.1.3	Εξαγωγή πολυωνυμικού μοντέλου 3 <sup>ου</sup> βαθμού	96
5.4.1.4	Συμπεράσματα από τα 3 μοντέλα για ενιαίο διάστημα $K_T$	97
5.4.2	Εξαγωγή του πολυωνυμικού μοντέλου με διαχωρισμό δύο διαστημάτων $K_T$	97
5.4.3	Συμπέρασμα για τα 4 μοντέλα	99
5.5	Περιγραφή των εξεταζόμενων συσχετίσεων	99
5.6	Πίνακας αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	100
5.7	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands	102
5.7.1	Άνοιξη	102

5.7.1.1	Άνοιξη-Ηλιόλουστη ημέρα	102
5.7.1.2	Άνοιξη-Ημέρα με λίγα σύννεφα	103
5.7.1.3	Άνοιξη-Συννεφιασμένη ημέρα	103
5.7.1.4	Άνοιξη-Βροχερή ημέρα	104
5.7.2	Χειμώνας	105
5.7.2.1	Χειμώνας-Ηλιόλουστη ημέρα	105
5.7.2.2	Χειμώνας-Ημέρα με λίγα σύννεφα	105
5.7.2.3	Χειμώνας-Συννεφιασμένη ημέρα	106
5.7.2.4	Χειμώνας-Βροχερή ημέρα	106
5.7.3	Καλοκαίρι	107
5.7.3.1	Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα	107
5.7.3.2	Καλοκαίρι-Ημέρα με λίγα σύννεφα	108
5.7.3.3	Καλοκαίρι-Συννεφιασμένη ημέρα	108
5.7.4	Φθινόπωρο	108
5.7.4.1	Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα	108
5.7.4.2	Φθινόπωρο-Ημέρα με λίγα σύννεφα	109
5.7.4.3	Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα	109
5.7.4.4	Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα	110
5.8	Υπολογισμός μέσω μηνιαίων $K_T$ και $K_D$	110
5.9	Εξαγωγή μηνιαίας συσχέτισης μεταξύ $K_T$ και $K_D$	112

## **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία**

6.1	Εισαγωγή	114
6.2	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των βιβλιογραφικών συσχετίσεων	114
6.3	Συμπεράσματα από την ανάπτυξη της νέας συσχέτισης	117
6.3.1	Συμπεράσματα από την εξαγωγή του μοντέλου με ενιαίο διάστημα $K_T$	118
6.3.2	Συμπεράσματα από την εξαγωγή της συσχέτισης με διαχωρισμό διαστημάτων $K_T$	120
6.3.3	Συμπέρασμα για τα 4 μοντέλα	121
6.4	Συμπεράσματα από τη στατιστική ανάλυση των μοντέλων	121
6.5	Συμπέρασμα από τη σύγκριση των διαγραμμάτων του συντελεστή αιθριότητας $K_T$ συναρτήσεως του $K_D$ για τη νέα συσχέτιση και τη συσχέτιση των Orgill and Hollands	122



6.6	Συμπεράσματα από τον υπολογισμό μέσω μηνιαίων $K_T$ και μέσω μηνιαίων $K_D$ και από την εξαγωγή της μηνιαίας συσχέτισης μεταξύ $K_D$ και $K_T$	122
6.7	Προτάσεις για μελλοντική εργασία	124
<b>Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφία</b>		125
<b>Παράρτημα Α</b>		
A.1	Εισαγωγή	130
A.2	Σύννεφα χαμηλού επιπέδου	130
A.3	Σύννεφα μεσαίου επιπέδου	130
A.4	Σύννεφα υψηλού επιπέδου	131
<b>Παράρτημα Β</b>		
B.1	Ανάλυση Παλινδρόμησης (Regression Analysis)	132
B.2	Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression)	132
B.3	Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (Method of least squares)	132
B.4	Συντελεστής Γραμμικής Συσχέτισης (Linear Correlation Coefficient)	133
B.5	Συντελεστής Προσδιορισμού $R^2$	134

## Λίστα πινάκων

### **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Ηλιακή ακτινοβολία και φωτοβολταϊκοί συλλέκτες**

<b>Πίνακας 2.1:</b>	Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα ( Air Mass)	17
<b>Πίνακας 2.2:</b>	Παραδείγματα τιμών του συντελεστή ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας	27

### **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Περιγραφή του υπολογιστικού μοντέλου και των βιβλιογραφικών συσχετίσεων**

<b>Πίνακας 3.1:</b>	Δεδομένα των πόλεων και χρονική διάρκεια των δεδομένων για τη συσχέτιση του Erbs	36
<b>Πίνακας 3.2:</b>	Πίνακας δεδομένων για τη συσχέτιση του Reindl	41
<b>Πίνακας 3.3:</b>	Υπολογισμός RMSE και MBE για 5 συσχετίσεις για την εκτίμηση της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια	42

### **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Σύγκριση των βιβλιογραφικών συσχετίσεων**

<b>Πίνακας 4.1:</b>	Διαχωρισμός του έτους σε εποχές	43
<b>Πίνακας 4.2:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το χειμώνα	49
<b>Πίνακας 4.3:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για την άνοιξη	55
<b>Πίνακας 4.4:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το καλοκαίρι	60
<b>Πίνακας 4.5:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το φθινόπωρο	66
<b>Πίνακας 4.6:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το χειμώνα	73
<b>Πίνακας 4.7:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για την άνοιξη	77
<b>Πίνακας 4.8:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το καλοκαίρι	81

<b>Πίνακας 4.9:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το φθινόπωρο	85
---------------------	---	----

## **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της διάχυτης ακτινοβολίας και στατιστικές μέθοδοι ανάλυσης**

<b>Πίνακας 5.1:</b>	Στατιστικοί συντελεστές για το γραμμικό μοντέλο με ενιαίο διάστημα $K_T$	93
<b>Πίνακας 5.2:</b>	Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 2 <sup>ο</sup> βαθμού με ενιαίο διάστημα $K_T$	95
<b>Πίνακας 5.3:</b>	Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 3 <sup>ο</sup> βαθμού με ενιαίο διάστημα $K_T$	96
<b>Πίνακας 5.4:</b>	Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 2 <sup>ο</sup> βαθμού με 2 διαστήματα $K_T$	98
<b>Πίνακας 5.5:</b>	Στατιστικές συγκρίσεις ωριαίων συσχετίσεων με δεδομένα Αθήνας-Υπολογισμός $R^2$ , MBE, RMSE, MPE, t-stat	100
<b>Πίνακας 5.6:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands	110
<b>Πίνακας 5.7:</b>	Μέσα μηνιαία $K_T$ και $K_D$	111

## **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία**

<b>Πίνακας 6.1:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το χειμώνα	115
<b>Πίνακας 6.2:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για την άνοιξη	115
<b>Πίνακας 6.3:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το καλοκαίρι	115
<b>Πίνακας 6.4:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το φθινόπωρο	116
<b>Πίνακας 6.5:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το χειμώνα	116
<b>Πίνακας 6.6:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για την άνοιξη	116
<b>Πίνακας 6.7:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το καλοκαίρι	117

<b>Πίνακας 6.8:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το φθινόπωρο	117
<b>Πίνακας 6.9:</b>	Στατιστικοί συντελεστές για το γραμμικό μοντέλο με ενιαίο διάστημα $K_T$	118
<b>Πίνακας 6.10:</b>	Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 2 <sup>ο</sup> βαθμού με ενιαίο διάστημα $K_T$	119
<b>Πίνακας 6.11:</b>	Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 3 <sup>ο</sup> βαθμού με ενιαίο διάστημα $K_T$	119
<b>Πίνακας 6.12:</b>	Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 2 <sup>ο</sup> βαθμού με 2 διαστήματα $K_T$	120
<b>Πίνακας 6.13:</b>	Στατιστικές συγκρίσεις ωριαίων συσχετίσεων με δεδομένα Αθήνας-Υπολογισμός $R^2$ , MBE, RMSE, MPE, t-stat	120
<b>Πίνακας 6.14:</b>	Συμπεράσματα από τη σύγκριση της νέας συσχέτισης και της Συσχέτισης των Orgill and Holland	121
<b>Πίνακας 6.15:</b>	Μέσα μηνιαία $K_T$ και $K_D$	122

### Λίστα Σχημάτων

<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Ηλιακή ακτινοβολία και φωτοβολταϊκοί συλλέκτες</b>		
<b>Σχήμα 2.1:</b>	Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας	14
<b>Σχήμα 2.2:</b>	Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας	15
<b>Σχήμα 2.3:</b>	Εξάρτηση της μάζας αέρα (AM) από την θέση του ήλιου	16
<b>Σχήμα 2.4:</b>	Η ουράνια σφαίρα με την φαινόμενη ετήσια κίνηση του ήλιου	19
<b>Σχήμα 2.5:</b>	Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο	20
<b>Σχήμα 2.6:</b>	Ορισμός των γωνιών ύψος του ήλιου και ζενιθιακής γωνίας	23
<b>Σχήμα 2.7:</b>	Η κίνηση του ήλιου σε σχέση με το φωτοβολταϊκό συλλέκτη	24

## Λίστα Διαγραμμάτων

### **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Περιγραφή του υπολογιστικού μοντέλου και των βιβλιογραφικών συσχετίσεων**

<b>Διάγραμμα 3.1:</b>	Ωριαία συσχέτιση του Erbs μεταξύ $\frac{I_d}{I}$ και $K_T$	37
	συγκρινόμενη με μέσα ωριαία δεδομένα για τις ΗΠΑ	
<b>Διάγραμμα 3.2:</b>	Σύγκριση των ωριαίων δεδομένων για την πόλη του Highett, Victoria με τη συσχέτιση του Erbs μεταξύ $\frac{I_d}{I}$ και $K_T$	38
<b>Διάγραμμα 3.3:</b>	Διάγραμμα $\frac{I_d}{I}$ και $K_T$ με τις εξισώσεις της προτεινόμενης συσχέτισης των Orgill and Hollands	39
<b>Διάγραμμα 3.4:</b>	Measured diffuse fraction vs. clearness index for Cape Canaveral, FL. for Reindl's correlation	40
<b>Διάγραμμα 3.5:</b>	Σύγκριση συσχετίσεων μεταξύ $\frac{I_d}{I}$ και $K_T$	41

### **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Σύγκριση των βιβλιογραφικών συσχετίσεων**

<b>Διάγραμμα 4.1:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Ηλιόλουστη ημέρα	44
<b>Διάγραμμα 4.2:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Ηλιόλουστη ημέρα	44
<b>Διάγραμμα 4.3:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Ηλιόλουστη ημέρα	45
<b>Διάγραμμα 4.4:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Ημέρα με λίγα σύννεφα	45
<b>Διάγραμμα 4.5:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Ημέρα με λίγα σύννεφα	46
<b>Διάγραμμα 4.6:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Ημέρα με λίγα σύννεφα	46
<b>Διάγραμμα 4.7:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Συννεφιασμένη ημέρα	47
<b>Διάγραμμα 4.8:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Συννεφιασμένη ημέρα	47

<b>Διάγραμμα 4.9:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Βροχερή ημέρα	48
<b>Διάγραμμα 4.10:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Βροχερή ημέρα	48
<b>Διάγραμμα 4.11:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Βροχερή ημέρα	49
<b>Διάγραμμα 4.12:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Ηλιόλουστη ημέρα	50
<b>Διάγραμμα 4.13:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Ηλιόλουστη ημέρα	50
<b>Διάγραμμα 4.14:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη-Ημέρα με λίγα σύννεφα	51
<b>Διάγραμμα 4.15:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη-Ημέρα με λίγα σύννεφα	51
<b>Διάγραμμα 4.16:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη-Ημέρα με λίγα σύννεφα	52
<b>Διάγραμμα 4.17:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη-Συννεφιασμένη ημέρα	52
<b>Διάγραμμα 4.18:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη-Συννεφιασμένη ημέρα	53
<b>Διάγραμμα 4.19:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη-Συννεφιασμένη ημέρα	53
<b>Διάγραμμα 4.20:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη-Βροχερή ημέρα	54
<b>Διάγραμμα 4.21:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη-Βροχερή ημέρα	54
<b>Διάγραμμα 4.22:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα	55
<b>Διάγραμμα 4.23:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα	56
<b>Διάγραμμα 4.24:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα	56
<b>Διάγραμμα 4.25:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Ημέρα με λίγα σύννεφα	57
<b>Διάγραμμα 4.26:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Ημέρα με λίγα σύννεφα	57

<b>Διάγραμμα 4.27:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Ημέρα με λίγα σύννεφα	58
<b>Διάγραμμα 4.28:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Συννεφιασμένη ημέρα	58
<b>Διάγραμμα 4.29:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Συννεφιασμένη ημέρα	59
<b>Διάγραμμα 4.30:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Συννεφιασμένη ημέρα	59
<b>Διάγραμμα 4.31:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα	60
<b>Διάγραμμα 4.32:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα	61
<b>Διάγραμμα 4.33:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα	61
<b>Διάγραμμα 4.34:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Ημέρα με λίγα σύννεφα	62
<b>Διάγραμμα 4.35:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Ημέρα με λίγα σύννεφα	62
<b>Διάγραμμα 4.36:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα	63
<b>Διάγραμμα 4.37:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα	63
<b>Διάγραμμα 4.38:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα	64
<b>Διάγραμμα 4.39:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα	64
<b>Διάγραμμα 4.40:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα	65
<b>Διάγραμμα 4.41:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα	65
<b>Διάγραμμα 4.42:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ηλιόλουστη ημέρα	67
<b>Διάγραμμα 4.43:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ηλιόλουστη ημέρα	67

<b>Διάγραμμα 4.44:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ηλιόλουστη ημέρα	68
<b>Διάγραμμα 4.45:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ημέρα με λίγα σύννεφα	68
<b>Διάγραμμα 4.46:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ημέρα με λίγα σύννεφα	69
<b>Διάγραμμα 4.47:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ημέρα με λίγα σύννεφα	69
<b>Διάγραμμα 4.48:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Συννεφιασμένη ημέρα	70
<b>Διάγραμμα 4.49:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Συννεφιασμένη ημέρα	70
<b>Διάγραμμα 4.50:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Συννεφιασμένη ημέρα	71
<b>Διάγραμμα 4.51:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Βροχερή ημέρα	71
<b>Διάγραμμα 4.52:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Βροχερή ημέρα	72
<b>Διάγραμμα 4.53:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Βροχερή ημέρα	72
<b>Διάγραμμα 4.54:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Ηλιόλουστη ημέρα	73
<b>Διάγραμμα 4.55:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Ηλιόλουστη ημέρα	74
<b>Διάγραμμα 4.56:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands,	74



	του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Ημέρα με λίγα σύννεφα	
<b>Διάγραμμα 4.57:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Ημέρα με λίγα σύννεφα	75
<b>Διάγραμμα 4.58:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Συννεφιασμένη ημέρα	75
<b>Διάγραμμα 4.59:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Συννεφιασμένη ημέρα	76
<b>Διάγραμμα 4.60:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Βροχερή ημέρα	76
<b>Διάγραμμα 4.61:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα	78
<b>Διάγραμμα 4.62:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα	78
<b>Διάγραμμα 4.63:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Ημέρα με λίγα σύννεφα	79
<b>Διάγραμμα 4.64:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Ημέρα με λίγα σύννεφα	79
<b>Διάγραμμα 4.65:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Συννεφιασμένη ημέρα	80
<b>Διάγραμμα 4.66:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Συννεφιασμένη ημέρα	80
<b>Διάγραμμα 4.67:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα	81
<b>Διάγραμμα 4.68:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα	82

<b>Διάγραμμα 4.69:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Ημέρα με λίγα σύννεφα	82
<b>Διάγραμμα 4.70:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Ημέρα με λίγα σύννεφα	83
<b>Διάγραμμα 4.71:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα	83
<b>Διάγραμμα 4.72:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα	84
<b>Διάγραμμα 4.73:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα	84
<b>Διάγραμμα 4.74:</b>	Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα	85

## **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη του εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της διάχυτης ακτινοβολίας και στατιστικές μέθοδοι ανάλυσης**

<b>Διάγραμμα 5.1:</b>	Κλάσμα διάχυτης ακτινοβολίας συναρτήσει του συντελεστή αιθριότητας για την περιοχή της Αθήνας	92
<b>Διάγραμμα 5.2:</b>	Διάγραμμα $K_{drec}$ και $K_{dpred}$ για το γραμμικό μοντέλο και για ενιαίο διάστημα $K_T$	94
<b>Διάγραμμα 5.3:</b>	Διάγραμμα $K_{drec}$ και $K_{dpred}$ για το πολυωνυμικό μοντέλο 2 <sup>ο</sup> βαθμού και για ενιαίο διάστημα $K_T$	95
<b>Διάγραμμα 5.4:</b>	Διάγραμμα $K_{drec}$ και $K_{dpred}$ για το πολυωνυμικό μοντέλο 3 <sup>ο</sup> βαθμού και για ενιαίο διάστημα $K_T$	96
<b>Διάγραμμα 5.5:</b>	Διάγραμμα $K_{drec}$ και $K_{dpred}$ για το πολυωνυμικό μοντέλο και για 2 διαστήματα $K_T$	98
<b>Διάγραμμα 5.6:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Ανοιξη- Ηλιόλουστη ημέρα	102
<b>Διάγραμμα 5.7:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Ανοιξη- Ημέρα με λίγα σύννεφα	103

<b>Διάγραμμα 5.8:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Άνοιξη- Συννεφιασμένη ημέρα	103
<b>Διάγραμμα 5.9:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Άνοιξη- Βροχερή ημέρα	104
<b>Διάγραμμα 5.10:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Χειμώνας- Ηλιόλουστη ημέρα	105
<b>Διάγραμμα 5.11:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Χειμώνας- Ημέρα με λίγα σύννεφα	105
<b>Διάγραμμα 5.12:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Χειμώνας- Συννεφιασμένη ημέρα	106
<b>Διάγραμμα 5.13:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Χειμώνας- Βροχερή ημέρα	106
<b>Διάγραμμα 5.14:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Καλοκαίρι- Ηλιόλουστη ημέρα	107
<b>Διάγραμμα 5.15:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Καλοκαίρι- Ημέρα με λίγα σύννεφα	107
<b>Διάγραμμα 5.16 :</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Καλοκαίρι- Συννεφιασμένη ημέρα	108
<b>Διάγραμμα 5.17 :</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Φθινόπωρο- Ηλιόλουστη ημέρα	108
<b>Διάγραμμα 5.18:</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Φθινόπωρο- Ημέρα με λίγα σύννεφα	106
<b>Διάγραμμα 5.19 :</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Φθινόπωρο- Συννεφιασμένη ημέρα	109
<b>Διάγραμμα 5.20 :</b>	Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-Φθινόπωρο- Βροχερή ημέρα	110
<b>Διάγραμμα 5.21:</b>	Ο συντελεστής αιθριότητας $K_T$ συναρτήσει των ωρών για τη διάρκεια του έτους 2004	111
<b>Διάγραμμα 5.22 :</b>	Διάγραμμα μηνιαίας συσχέτισης μεταξύ μηνιαίου $K_T$ και $K_D$	112
<b>Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία</b>		
<b>Διάγραμμα 6.1:</b>	Κλάσμα διάχυτης ακτινοβολίας συναρτήσει του συντελεστή αιθριότητας για την περιοχή της Αθήνας	117
<b>Διάγραμμα 6.2:</b>	Διάγραμμα μηνιαίας συσχέτισης μεταξύ μηνιαίου $K_T$ και $K_D$	123

### Ορολογία (Nomenclature)

H:	Μέση μηνιαία ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία	[MJ/m <sup>2</sup> ]
H <sub>0</sub> :	Μέση μηνιαία ημερήσια ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας	[MJ/m <sup>2</sup> ]
H':	Μέση μηνιαία ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο έδαφος πριν υποστεί πολλαπλές ανακλάσεις μεταξύ εδάφους-ατμόσφαιρας	[MJ/m <sup>2</sup> ]
S:	Μέση μηνιαία ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας	[hours]
S <sub>0</sub> :	Μέση μηνιαία ημερήσια μέγιστη διάρκεια ηλιοφάνειας	[h]
S <sub>0</sub> ':	Μέση μηνιαία ημερήσια μέγιστη διάρκεια ηλιοφάνειας με το ύψος του ήλιου μεγαλύτερο από 5°	[h]
α,β:	Παράμετροι προσομοίωσης	
r:	Συντελεστής συσχέτισης	
t:	Ηλιακός χρόνος	[h]
σ:	Τυπική απόκλιση	
I:	Ωριαία ολική ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια	[KJ/m <sup>2</sup> ]
I <sub>0</sub> :	Ωριαία ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια	[KJ/m <sup>2</sup> ]
I <sub>d</sub> :	Ωριαία διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια	[KJ/m <sup>2</sup> ]
I <sub>b</sub> :	Ωριαία άμεση ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια	[KJ/m <sup>2</sup> ]

$K_T$ :	Το κλάσμα $I/I_0$	
$K_D$ :	Το κλάσμα $I_d/I$	
$G_{SC}$ :	Ηλιακή σταθερά	[W/m <sup>2</sup> ]
$\theta_Z$ :	Ζενιθιακή γωνία	[μοίρες]
$f_{PV}$ :	Ο συντελεστής μείωσης της απόδοσης του συλλέκτη, λόγω υψηλών θερμοκρασιών, σκόνης στην επιφάνεια του συλλέκτη κλπ	
$Y_{PV}$ :	Η ονομαστική ισχύς του συλλέκτη	
$I_S$ :	Η ακτινοβολία ενός ήλιου ίση με 1kW/m <sup>2</sup>	
$L_{loc}$ :	Το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή	[μοίρες]
$r_g$ :	Η αντανάκλαση του εδάφους	
GMT:	Η τοπική ωρολογιακή ζώνη αριστερά του GMT	[ώρες]
$\phi$ :	Το γεωγραφικό πλάτος της θέσης του παρατηρητή	[μοίρες]
$g$ :	Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνειά του και την κατεύθυνση προς νότο	[μοίρες]
$\beta$ :	Η κλίση του συλλέκτη, δηλαδή η γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο	[μοίρες]
$\delta$ :	Ηλιακή απόκλιση	

$G_{on}$ :	Ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια	[KJ/m <sup>2</sup> ]
$t_S$ :	Ηλιακός χρόνος	[ώρες]
$\omega$ :	Ωριαία γωνία του ήλιου	[μοίρες]
$\omega_1$ :	Ωριαία γωνία του ήλιου στην αρχή της ώρας	[μοίρες]
$\omega_2$ :	Ωριαία γωνία του ήλιου στο τέλος της ώρας	[μοίρες]
$\beta$ :	Η γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο, (ονομάζεται κλίση του συλλέκτη)	[°]
$\gamma$ :	Η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνειά του και την κατεύθυνση προς νότο(ονομάζεται αζιμούθια γωνία του συλλέκτη)	[°]
$\theta$ :	Η γωνία πρόσπτωσης της ακτινικής(ή άμεσης) ακτινοβολίας του ήλιου, δηλαδή η γωνία των ηλιακών ακτίνων με την κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη	[°]
$\varphi$ :	Το γεωγραφικό πλάτος της θέσης ( $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$ )	
$R_b$ :	Ποσοστό της ακτινοβολίας σε κεκλιμένη προς οριζόντια επιφάνεια	
$\rho_g$ :	Ο συντελεστής ανάκλασης	
$f_{PV}$ :	Ο συντελεστής μείωσης της αποδόσεως του συλλέκτη, λόγω υψηλών θερμοκρασιών, σκόνης στην επιφάνεια του συλλέκτη κλπ.	
$Y_{PV}$ :	Η ονομαστική ισχύς του συλλέκτη	

$I_T$ :	Η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του Συλλέκτη	
$R^2$ :	Συντελεστής προσδιορισμού	
t- stat:	Στατιστικός συντελεστής	
E:	Μια εξίσωση χρόνου σε ώρες	
$t_S$ :	Ο ηλιακός χρόνος	[ώρες]
$t_C$ :	Ο τοπικός χρόνος	[ώρες]
$L_{loc}$ :	Το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή	[μοίρες]
$T_C$ :	Η τοπική ωρολογιακή ζώνη αριστερά του GMT	[ώρες]
$\frac{H_d}{H}$ :	Ο λόγος της μέσης μηνιαίας διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας προς την μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία	
$\overline{K_T}$ :	Ο λόγος της μέσης μηνιαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας προς την ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας (δείκτης αιθριότητας)	
$\overline{K_D}$ :	Ο λόγος $\frac{H_d}{H}$	

### Συντομεύσεις (Abbreviations)

MBE:	mean bias error	Μέσο σφάλμα
MAB:	mean absolute bias error	Μέσο απόλυτο σφάλμα
RMSE:	root mean square error	Ρίζα του τετραγωνικού μέσου σφάλματος

## Τίτλος θέματος

**«Ανάλυση και Αξιολόγηση των Κύριων Μοντέλων Προσδιορισμού των Συνιστωσών της Ολικής Ηλιακής Ακτινοβολίας σε Οριζόντιο Επίπεδο - Ανάπτυξη ενός Νέου Εμπειρικού Μοντέλου»**

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία έγινε αρχικά παρουσίαση διαφόρων βιβλιογραφικών συσχετίσεων προσδιορισμού της διάχυτης ακτινοβολίας, όπως η συσχέτιση του Page, του Erbs, των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου.

Οι συσχετίσεις αυτές συγκρίθηκαν μεταξύ τους και με τις καταγεγραμμένες τιμές διάχυτης ακτινοβολίας και έγινε ποιοτική ανάλυση διαμέσου διαγραμμάτων για τις τέσσερις εποχές του έτους και τέσσερις χαρακτηριστικούς τύπους ημερών (ηλιόλουστη, με λίγα σύννεφα, συννεφιασμένη και βροχερή).

Στη συνέχεια με τη χρήση των δεδομένων του έτους 2004 για την Αθήνα εξήχθη ένα πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού με διαχωρισμό δύο διαστημάτων μεταξύ του συντελεστή αιθριότητας  $K_T$  και του λόγου  $I_d/I$  με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,8$  και  $RMSE=0,046$ .

Για όλες τις εξεταζόμενες βιβλιογραφικές συσχετίσεις όπως και για το νέο μοντέλο υπολογίστηκαν οι στατιστικοί συντελεστές και παρουσιάζονται υπό τη μορφή πίνακα. Έγινε ποιοτική ανάλυση διαμέσου διαγραμμάτων και σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands, η οποία ήταν η καλύτερη από τις βιβλιογραφικές συσχετίσεις.

Επιπλέον, υπολογίστηκαν τα μέσα μηνιαία  $K_T$  και  $K_D$  και εξήχθη μια συσχέτιση μεταξύ τους με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,91$  και  $RMSE=0,0095$ .



## Thesis title

### **“Analysis and Evaluation of Models Predicting the Components of Global Solar Irradiance on Horizontal Surfaces - Development of a New Empirical Model”**

#### **Abstract**

In this work several correlations of predicting diffuse radiation were presented such as Page, Erbs, Orgill and Hollands and Karatasou. These correlations were compared between them and with the recorded data of diffuse radiation.

A quality control was performed with the presentation of diagrams for the four seasons of the year and four characteristic days (sunny, with a few clouds, cloudy and rainy day respectively).

A new polynomial 2<sup>nd</sup> order model of predicting diffuse radiation was developed based on the data of one year (2004), for Athens with coefficient of determination,  $R^2=0,8$  and Root Mean Square Error,  $RMSE=0,046$ . Thereafter, a statistical analysis was performed giving the prediction of the statistical coefficients for a more detailed analysis. A quality control between the new empirical model and the correlation of Orgill and Hollands was accomplished.

Finally, the mean monthly values of  $K_T$  and  $K_D$  were calculated and a correlation between them was developed giving a coefficient of determination  $R^2=0,91$  και  $RMSE=0,0095$ .



## 1.1 Εισαγωγή

Η αυξανόμενη και αλόγιστη χρήση των συμβατικών καυσίμων αποτελεί μια από τις κυριότερες αιτίες για σειρά περιβαλλοντικών προβλημάτων του πλανήτη μας όπως η επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, η όξινη βροχή, το νέφος των αστικών περιοχών. Μια από τις πλέον ενδιαφέρουσες λύσεις αντιμετώπισης της περιβαλλοντικής υποβάθμισης, αποτελεί η συστηματική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαίτερα της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας. Η ηλιακή ακτινοβολία, μέσω ημιαγωγών στοιχείων, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια συμβάλλοντας στη μη επιβάρυνση του περιβάλλοντος με ρύπους του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ), που εκπέμπουν οι συμβατικές μονάδες παραγωγής, και στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία.

Το φαινόμενο της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας απ' ευθείας σε ηλεκτρική, μέσω ημιαγωγών στοιχείων, ονομάστηκε φωτοβολταϊκό. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο παρατηρήθηκε από πολύ παλαιά (1839). Η κατασκευή του πρώτου ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου έγινε μετά, ένα περίπου αιώνα (1937), αλλά η ουσιαστική χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές άρχισε στις αρχές της 10-ετίας του 1950, όταν επιτεύχθηκε η παρασκευή καθαρού πυριτίου με την μέθοδο της τηγμένης ζώνης και οι σχηματισμοί διόδων πυριτίου με διάχυση προσμίξεων. Οι τεχνολογικές αυτές πρόοδοι οδήγησαν στην κατασκευή των σημερινών ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων και στη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους.

Για τον υπολογισμό της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του κεκλιμένου συλλέκτη, είναι απαραίτητη η γνώση των συνιστωσών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Για το σκοπό αυτό, έχουν διατυπωθεί διάφορες συσχετίσεις διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας. Οι σημαντικότερες από αυτές συσχετίζουν το λόγο της διάχυτης προς την ολική με το συντελεστή αιθριότητας, έτσι ώστε στη συνέχεια να υπολογίσουμε τις επιμέρους συνιστώσες.

## 1.2 Βιβλιογραφία-Έρευνα

Στη βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε εντοπίστηκαν αρχικά κάποια είδη εργασιών τα οποία αναφέρονται σε διάφορες μεθόδους προσδιορισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

Ο προσδιορισμός αυτός είναι απαραίτητος για δύο κυρίως λόγους:

- Για το σωστό σχεδιασμό ηλιακών θερμικών ή ηλιακών ενεργειακών συστημάτων, όπως φωτοβολταϊκών και για την πρόβλεψη της ημερήσιας ή της μετέπειτα απόδοσής τους.
- Για το χειρισμό τόσο της ηλιακής ενεργειακής πηγής, όπως η έξοδος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, όσο και των ενεργειακών φορτίων.

Επίσης βρέθηκαν διάφορες συσχετίσεις μεταξύ του λόγου της διάχυτης ακτινοβολίας προς την ολική,  $\frac{I_d}{I}$  και του συντελεστή αιθριότητας,  $K_T$ . Οι συσχετίσεις αυτές ήταν ωριαίες, ημερήσιες και μηνιαίες όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### 1.2.1 Μέθοδοι προσδιορισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας

#### [J.A. Davies *et al*, 1981]

Η εργασία αυτή περιγράφει το μοντέλο MAC, το οποίο εκτιμά την ολική ηλιακή ακτινοβολία και τις συνιστώσες της χρησιμοποιώντας δεδομένα για 6 σταθμούς του Καναδά για 9 χρόνια (1968-1976). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί πληροφορίες για τα σύννεφα δεχόμενο την ύπαρξη των στιβάδων. Γίνεται επίσης σύγκριση μεταξύ ενός μοντέλου που δεν χωρίζεται ανά στιβάδες όπως και ενός μοντέλου δεχόμενο πλήρη ηλιοφάνεια.(Rietveld's model). Το μοντέλο MAC έχει τα καλύτερα αποτελέσματα. Το μοντέλο Rietveld μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γρήγορες εκτιμήσεις, δεν δίνει όμως αξιόπιστα αποτελέσματα όπως το MAC. Έγινε επίσης δοκιμή του μοντέλου MAC χωρίς το διαχωρισμό σε στιβάδες, χωρίς όμως καλά αποτελέσματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σύγκριση του μοντέλου MAC με μια προηγούμενη μελέτη έδωσε RMSE 11-15% για την ολική ακτινοβολία σε μία ημέρα, το οποίο μειώνεται σε 10% για έναν μέσο όρο 2-3 ημερών. Για τη διάχυτη και την άμεση ακτινοβολία το σφάλμα είναι 25% και μειώνεται σε 10% για ένα μέσο όρο περιόδων μεγαλύτερων από 10-15 ημέρες.

Σημείωση: Η μελέτη που αναφέρθηκε είναι η εξής: F.C.Hooper, C.R.Altwater, A.F.Brunger, J.A.Davies, J.E.Hay, D.C.McKay, and T.K.Won, "The Canadian solar radiation data base", ASHRAE Trans, 85, 497-506(1979).

#### [P.C. Jain, 1984]

Στην εργασία αυτή αναλύονται τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας και διάρκειας της ηλιοφάνειας τα οποία έχουν καταγραφεί στο Ινστιτούτο της

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Τεργέστης για μία περίοδο 11 χρόνων (1972-1982), χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Angstrom  $H = H_0(a + bS/S_0)$  και την εξίσωση  $H' = H_0(a + bS/S_0')$  προτεινόμενη από τον Hay η οποία ενσωματώνει τις πολλαπλές ανακλάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ της επιφάνειας της γης και της ατμόσφαιρας έτσι ώστε οι σταθερές  $a$  και  $b$  να μην παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση κάθε χρόνο. Οι σταθερές της συσχέτισης υπολογίζονται για κάθε χρόνο χωριστά. Ο συντελεστής συσχέτισης  $r$  είναι ίσος ή και μεγαλύτερος από 0,89 το οποίο δείχνει μια ικανοποιητική συσχέτιση. Η εξίσωση του Hay δεν μείωσε τη διακύμανση των σταθερών, ούτε και έδωσε καλύτερες τιμές. Στην εργασία αυτή, αναλύεται επίσης η ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία. Οι ωριαίες/ημερήσιες μέσες τιμές των 11 χρόνων απεικονίζονται σε διάγραμμα σε συνάρτηση με τον ηλιακό χρόνο για τους 12 μήνες του χρόνου.

Η καμπύλη κανονικής κατανομής (Κατανομή Gauss)

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-12)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1.1)$$

φαίνεται ότι είναι κοντά στις πειραματικές τιμές στο διάγραμμα  $t$ (ωριαία ηλ.ακτινοβολία/ημερήσια) συναρτήσεως του ηλιακού χρόνου. Η μέση τιμή της κανονικής κατανομής υπολογίζεται για το ηλιακό μεσημέρι και οι τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  βρίσκονται για κάθε μήνα, συγκρίνοντας τις θεωρητικές και τις πειραματικές τιμές για το ηλιακό μεσημέρι. Οι τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$  έχουν γραμμική συσχέτιση ( $r=0,996$ ) με το  $S_0$  (η διάρκεια της ηλιοφάνειας σε ώρες):

$$\sigma = 0,461 + 0,192S_0 \quad (1.2)$$

Μέσω αυτής είναι εύκολο να υπολογιστεί η ωριαία ακτινοβολία από τις ημερήσιες τιμές ακόμα και για ένα μικρότερο διάστημα τιμών σε διεθνές επίπεδο.

### [J.M. Gordon *et al*, 1988]

Η εργασία αυτή περιγράφει την μηνιαία ανάλυση των ωριαίων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας για ένα ευρύ πεδίο κλιματικών σταθμών που παρουσιάζουν εναλλαγές ως προς τη θερμοκρασία και τις συνθήκες. Οι στατιστικές τιμές που

προέκυψαν για ξεχωριστές ώρες είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη συσχέτιση του Liu and Jordan για την ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία.

### **[A. Baig *et al*, 1989]**

Σε αυτή την εργασία, παρουσιάζεται ένα μοντέλο βασισμένο σε μια τροποποιημένη εκδοχή μιας συνάρτησης τύπου Gauss για την εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για μια μέρα με ηλιοφάνεια. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συμφωνούν με τις καταγεγραμμένες τιμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την ανάπτυξη μιας σχέσης μεταξύ του ποσοστού της ωριαίας προς την ημερήσια ολική ακτινοβολία και της διάρκειας της ημέρας(του χρόνου μεταξύ ανατολής και δύσης). Αυτό μας βοήθησε να υπολογίσουμε τη διανομή της ηλιακής ακτινοβολίας για μια οποιαδήποτε μέρα του χρόνου.

### **[J.A. Davies *et al*, 1989]**

Σε αυτή την εργασία αξιολογούνται 12 μοντέλα τα οποία υπολογίζουν την ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με δεδομένα από 7 διαφορετικές χώρες. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι απλά και στηρίζονται σε συγκεκριμένες μετεωρολογικές παρατηρήσεις. Δύο από αυτά στηρίζουν τη μεθοδολογία τους στις στιβάδες που δημιουργούνται από τα σύννεφα και στον τύπο τους, τα 3 στηρίζονται στο ολικό ποσό των σύννεφων, τα 4 χρησιμοποιούν την κλασματική ηλιοφάνεια ενώ τα υπόλοιπα 4 διαχωρίζουν την ολική ακτινοβολία σε διάχυτη και άμεση.

Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 15 σταθμούς, 4 από την Αυστραλία, 4 Ευρωπαϊκούς, 3 από τον Καναδά και 4 Αμερικάνικους. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα 3 χρόνων για κάθε σταθμό. Η απόδοση του μοντέλου ελέγχθηκε με τον υπολογισμό του μέσου σφάλματος (MBE), του μέσου απόλυτου σφάλματος (MAB) και ρίζα του τετραγωνικού μέσου σφάλματος (RMSE).

Η σύγκριση των παραπάνω μοντέλων έδειξε ότι τα μοντέλα με το διαχωρισμό σε στιβάδες έδωσαν την καλύτερη εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα 4 τελευταία της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας. Τα υπόλοιπα, αν και παρουσιάζουν απόκλιση για κάποιες συννεφιασμένες ημέρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η απόκλιση τους αυτή οφείλεται περισσότερο σε ελλιπή μετεωρολογικά δεδομένα παρά σε αδυναμίες των μοντέλων.

**[R. Festa *et al*, 1991]**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια στατιστική ανάλυση της ηλιακής ολικής ημερήσιας ακτινοβολίας για τη Γενεύη στην Ιταλία, χρησιμοποιώντας δεδομένα 9 χρόνων. Οι διάφορες διακυμάνσεις στις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας κανονικοποιήθηκαν ως προς τη μέση τιμή με βάση την τυπική απόκλιση. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση υπολογίστηκαν με 2 εκτιμήσεις: με τη συνάρτηση Fourier και με βάση τη “μέθοδο των μηνιαίων μέσων τιμών”. Με βάση τις διορθωμένες τιμές δημιουργήθηκε ένα Autoregressive model (AR) σειράς I. Και για τους δύο τρόπους υπολογισμού ο παράγοντας του μοντέλου AR μελετήθηκε με 2 τρόπους: Αρχικά κρατώντας τον σταθερό με το χρόνο και στη συνέχεια μεταβάλλοντάς τον από μέρα σε μέρα του χρόνου. Το αποτέλεσμα των συνδυασμών των 4 παραπάνω μεθόδων ήταν εξίσου ικανοποιητικό.

**[Enrique D. Albizzati *et al*, 1997]**

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζονται υπολογισμοί και προβλέψεις για την ηλιακή ακτινοβολία για μια περίοδο 10 χρόνων σε οριζόντιο επίπεδο στην Santa Fe (31° 39'S, 60° 43'W) στην Αργεντινή και αναφέρονται ως δεδομένα μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας για κάθε μήνα με βάση ένα επιβεβαιωμένο θεωρητικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το μοντέλο συγκρινόμενα με μετρήσεις ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για ημέρες χωρίς σύννεφα δίνουν μικρότερες τιμές. Επίσης, μετά από σύγκριση των καταγεγραμμένων τιμών με αυτές υπολογιζόμενες από το μοντέλο του Page, παρατηρείται μια αύξηση για τη διάχυτη ακτινοβολία, ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες και την άνοιξη, ενώ η άμεση και ολική ακτινοβολία παρουσιάζουν μείωση.

**[G. Mihalakakou *et al*, 1999]**

Η παρούσα εργασία περιγράφει μια εκτίμηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας με τη χρήση νευρωνικών δικτύων. Προβλέπονται οι μελλοντικές ωριαίες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας για έναν ορισμένο αριθμό ετών με βάση τη γνώση προηγούμενων τιμών με τη χρήση νευρωνικών δικτύων.

Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με βάση καταγεγραμμένες τιμές και τα αποτελέσματα είναι τόσο καλά ώστε το μοντέλο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί

**[L.T. Wong *et al*, 2001]**

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται διάφορα ηλιακά μοντέλα τα οποία υπολογίζουν την μέση ωριαία και ημερήσια ακτινοβολία, την ολική, την άμεση και την διάχυτη. Χρησιμοποιήθηκαν 7 μοντέλα τα οποία στηρίζονται στην εξίσωση Angstrom-Prescott για την πρόβλεψη της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με τις ώρες ηλιοφάνειας. Επίσης προβλέπεται η μέση ημερήσια ολική ακτινοβολία για το Hong-Kong. Συζητιούνται επίσης εκτιμήσεις για μηνιαίες μέσες τιμές ωριαίων δεδομένων ηλιακής ολικής ακτινοβολίας. Παρουσιάζονται δύο παραμετρικά μοντέλα (Iqbal model και ASHRAE model) και μέσω αυτών υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία για το Hong-Kong. Γίνονται τέλος συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων και των καταγεγραμμένων τιμών.

**[A.S.S. Dorvlo *et al*, 2002]**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται μέθοδοι τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας, αφού πριν υπολογισθεί ο δείκτης αιθριότητας της ατμόσφαιρας  $K_T$ .

Ερευνήθηκαν τα μοντέλα RBF (Radial Basis Functions)(Συναρτήσεις ακτινικής βάσης) και MLP (Multilayer Perception-Πολυστρωματική αντίληψη) με τη χρήση δεδομένων από 6 σταθμούς στο Ομάν.

Βρέθηκε ότι και τα δύο μοντέλα είχαν καλή απόδοση με βάση το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των πειραματικών και των μετρούμενων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά προτιμάται το μοντέλο RBF, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε τοποθεσία στο Ομάν.

**[C.A. Gueymard, 2003]**

Στην εργασία αυτή, ερευνώνται διάφορα μοντέλα προσδιορισμού της ηλιακής ακτινοβολίας. Επιλέχθηκαν 19 μοντέλα από μια εκτενή βιβλιογραφική έρευνα. Επίσης αναπτύχθηκαν 2 νέα μοντέλα. Η εργασία βασίστηκε στον κώδικα SMARTS, ο οποίος παρέχει 2064 αναφορικές τιμές άμεσης ακτινοβολίας, οι οποίες είναι αποτέλεσμα συνδυασμών ηλιακών θέσεων και καταστάσεων της ατμόσφαιρας. Βρέθηκαν διάφορα λάθη στα μοντέλα που αναπτύχθηκαν και σε ορισμένες περιπτώσεις διορθώθηκαν.



Σαν αποτέλεσμα αυτής της θεωρητικής μελέτης, βγήκε το συμπέρασμα ότι τα λεπτομερή μοντέλα υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας παρέχουν πολύ καλά αποτελέσματα, όπως επίσης και ότι τα μοντέλα που χρησιμοποιούν τον συντελεστή τυρβότητας του Linke, δεν είχαν καλά αποτελέσματα.

Μετά από λεπτομερή μελέτη των μοντέλων τα 4 που προτάθηκαν ως αυτά με την καλύτερη απόδοση είναι: CPRC2, MLTW2, REST και Yang. Το νέο μοντέλο MLTW2 παρέχει τα καλύτερα αποτελέσματα σε όλα τα τεστ.

**[S.N. Kaplanis *et al*, 2005]**

Αυτή η εργασία περιγράφει δύο νέες αξιόπιστες προσεγγίσεις για την εκτίμηση της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια ακόμα και με τη χρήση ενός υπολογιστή τσέπης. Οι υπολογιζόμενες τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας συγκρίνονται με εκτιμήσεις από δύο υπάρχοντα μοντέλα (METEONORM και Baig *et al*) και με καταγεγραμμένες τιμές ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για τις δύο μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας (Αθήνα και Θεσσαλονίκη). Οι δύο μεθοδολογίες που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε περιοχή της Ελλάδας.

**[A. Mellit *et al*, 2005]**

Ο συνδυασμός της κυματικής θεωρίας και των νευρωνικών δικτύων, οδήγησε στην ανάπτυξη των κυματικών δικτύων. Τα κυματικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς σε ποικίλες μηχανικές εφαρμογές.

Στην παρούσα εργασία, ερευνάται η χρήση ενός προσαρμόσιμου κυματικού δικτύου για την εύρεση ενός κατάλληλου μοντέλου πρόβλεψης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Η ολική ηλιακή ακτινοβολία, θεωρείται η πιο σημαντική παράμετρος στην πρόβλεψη της απόδοσης των ανανεώσιμων ενεργειακών συστημάτων, ειδικότερα μεγάλων διαστάσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Για το σκοπό αυτό, συγκεντρώθηκαν δεδομένα ημερήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας για την περίοδο από 1981 έως 2001 από ένα μετεωρολογικό σταθμό στην Αλγερία. Το κυματικό δίκτυο “εκπαιδεύτηκε” είτε με 19 χρόνων δεδομένα, είτε με δεδομένα ενός έτους. Και στις δύο περιπτώσεις, η ολική ηλιακή ακτινοβολία του έτους 2001, χρησιμοποιήθηκε για εξακρίβωση του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα, έδειξαν μια ακρίβεια στην πρόβλεψη του μοντέλου γύρω στο 97%, ενώ το μέσο απόλυτο επί τοις εκατό σφάλμα δεν ήταν περισσότερο από 6%.

Επιπλέον, το μοντέλο συγκρίθηκε με διάφορες εφαρμογές νευρωνικών δικτύων και κλασικά μοντέλα. Βρέθηκε ότι οι αλγόριθμοι για τα κυματικά μοντέλα χρειάζονται μικρότερο αριθμό επαναλήψεων από τα άλλα νευρωνικά μοντέλα.

Το μοντέλο μπορεί να γενικοποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί σε άλλες τοποθεσίες και για άλλα μετεωρολογικά δεδομένα, όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η διάρκεια της ηλιοφάνειας.

Τέλος παρουσιάζεται μια εφαρμογή, η οποία χρησιμοποιεί το μοντέλο αυτό για τον υπολογισμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία του μοντέλου αυτού.

#### **[P.L. Zervas *et al*, 2007]**

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσδιορισμού της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια. Η μεθοδολογία βασίζεται σε τεχνικές νευρωνικών δικτύων και εφαρμόστηκε στα μετεωρολογικά δεδομένα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στην περιοχή Ζωγράφου, Αθήνα (37° 58' 26''B, 23° 47' 16'' A) . Η έρευνα της συσχέτισης μεταξύ διαφόρων μετεωρολογικών συνθηκών, η διάρκεια των ωρών της ημέρας και η αντιπροσωπευτική κορυφή μίας συνάρτησης τύπου Gauss, παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του μοντέλου. Οι μετεωρολογικές συνθήκες κατηγοριοποιούνται σε 6 διαφορετικές καταστάσεις ενώ η διάρκεια των ωρών της ημέρας υπολογίζεται από κάποιες εξισώσεις. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μία διορθωτική μεθοδολογία στη συνάρτηση τύπου Gauss για τις 6 διαφορετικές μετεωρολογικές καταστάσεις. Τέλος η αξιοπιστία του μοντέλου που αναπτύχθηκε ερευνάται μέσω μίας διαδικασίας αξιολόγησης.

#### **1.2.2 Ωριαίες συσχετίσεις μεταξύ $\frac{I_d}{I}$ και $K_T \left(\frac{I}{I_0}\right)$**

#### **[J.F. Orgill *et al*, 1976]**

Η εργασία αυτή παρουσιάζει μια ανάλυση της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια και προτείνει μια εξίσωση για τον υπολογισμό του ωριαίου κλάσματος της διάχυτης προς την ολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια. Τα αποτελέσματα της νέας συσχέτισης συγκρίνονται με αποτελέσματα προηγούμενων συσχετίσεων.

**[D.G. Erbs *et al*, 1981]**

Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα από τέσσερις τοποθεσίες των ΗΠΑ, για την εξαγωγή μιας σχέσης μεταξύ του ωριαίου κλάσματος της διάχυτης ακτινοβολίας και του δείκτη αιθριότητας της ατμόσφαιρας. Η σχέση αυτή, συγκρίνεται με τη συσχέτιση των Orgill and Hollands's και με ένα σύνολο δεδομένων από το Highett της Αυστραλίας και παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια.

Χρησιμοποιείται το πρόγραμμα προσομοίωσης TRNSYS για τον υπολογισμό της ετήσιας απόδοσης των ηλιακών ενεργειακών συστημάτων που χρησιμοποιούν τις διάφορες συσχετίσεις. Τέλος αναπτύσσεται μια εποχιακή ημερήσια συσχέτιση της διάχυτης ακτινοβολίας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την εξαγωγή μιας μηνιαίας συσχέτισης.

**[D.T. Reindl *et al*, 1990]**

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η επιρροή των κλιματικών και γεωμετρικών μεταβλητών στο κλάσμα της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας, στηριζόμενοι σε 22.000 μετρήσεις από 5 ευρωπαϊκούς και αμερικάνικους σταθμούς. Ο στόχος είναι να προσδιορίσουμε αν άλλες προβλεπόμενες μεταβλητές, εκτός από το συντελεστή αιθριότητας, μπορούν να μειώσουν το σφάλμα της συσχέτισης των Liu and Jordan. Μέσω βηματικής παλινδρόμησης, οι 28 πιθανές μεταβλητές, μειώθηκαν σε 4: ο συντελεστής αιθριότητας, το ηλιακό ύψος, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η σχετική υγρασία. Αναπτύχθηκε μια συσχέτιση μεταξύ των 4 αυτών παραμέτρων για τον προσδιορισμό του λόγου  $\frac{I_d}{I}$ , για συγκεκριμένες περιοχές του  $K_T$ .

Μια δεύτερη συσχέτιση αναπτύχθηκε μεταξύ του ηλιακού ύψους και του συντελεστή αιθριότητας, όταν οι άλλες δύο παράμετροι δεν είναι διαθέσιμες. Τέλος, αναπτύχθηκε μία συσχέτιση ίδιου τύπου με των Liu and Jordan με μόνη παράμετρο το  $K_T$ .

Οι συσχετίσεις παρουσίασαν εξάρτηση τόπου αλλά και εποχιακή εξάρτηση, αφού τα μεγαλύτερα σφάλματα είναι το φθινόπωρο και το χειμώνα.

**[S. Karatasou *et al*, 2003]**

Ο σωστός σχεδιασμός και η απόδοση των ηλιακών ενεργειακών συστημάτων απαιτεί την ακριβή πρόβλεψη της ηλιακής ενέργειας. Η συσχέτιση που προτάθηκε από τους Liu and Jordan οι οποίοι βρήκαν ότι η κατανομή μεταξύ συννεφιασμένων και αίθριων ημερών συναρτήσει των ωρών είναι όμοιες για περιοχές με το ίδιο  $\overline{K_T}$  ανεξάρτητα του γεωγραφικού πλάτους μεταξύ της διάχυτης και της ολικής ακτινοβολίας, χρησιμοποιήθηκε αρκετά με εξαιρετικά αποτελέσματα. Η εργασία αυτή παρουσιάζει μια ανάλυση της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια. Χρησιμοποιήθηκαν ωριαία δεδομένα για την Αθήνα, Ελλάδα για την εξαγωγή σχέσεων μεταξύ του κλάσματος της διάχυτης προς ολικής ακτινοβολίας και του συντελεστή αιθριότητας για ωριαίες και ημερήσιες τιμές. Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν συγκρίθηκαν με αυτά προηγούμενων εξισώσεων. Για τις αστικές συνθήκες της Αθήνας, η συσχέτιση που βρέθηκε ανταποκρινόταν στα πειραματικά δεδομένα.

**1.2.3 Ημερήσιες και μηνιαίες συσχετίσεις μεταξύ**

$$\frac{H_d}{H} \text{ και } \overline{K_T} \left( \frac{H}{H_0} \right)$$

**[Lalas D.P *et al*, 1987]**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται συσχετίσεις για τον υπολογισμό του ημερήσιου  $H_d$  και μηνιαίου  $\overline{H_d}$  με βάση το συντελεστή αιθριότητας,  $K_T$  με τη χρήση δεδομένων από Αθήνα, Κύθνο και Ρόδο. Η συσχέτιση που εξήχθη είναι πολυωνυμική 1<sup>ου</sup> βαθμού και δεν εξαρτάται από τις εποχές. Επίσης η συσχέτιση επηρεάζεται από τη μόλυνση της ατμόσφαιρας μόνο τους καλοκαιρινούς μήνες και για υψηλές τιμές του  $K_T$ .

Η ημερήσια συσχέτιση που εξήχθη είναι η εξής:

$$K_D = 1,36 - 1,60K_T \quad \text{για} \quad 0,22 < K_T < 0,8 \quad (1.3)$$

$$K_D = 0,98 \quad \text{για} \quad K_T < 0,22$$

με  $R^2=0,883$  και τυπική απόκλιση  $s=0,0717$ .

Τέλος με το μέσο όρο των ημερήσιων τιμών διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας βρέθηκαν οι μηνιαίες τιμές  $\overline{K_D}$  και έγινε συσχέτιση με το μηνιαίο  $\overline{K_T}$

**[Paliatsos A.G *et al*, 2003]**

Η εργασία αυτή συσχετίζει πειραματικές τιμές με μοντελοποιημένες τιμές του ολικού  $K_T$  και του κλάσματος  $\frac{H_d}{H}$  για την περιοχή της Αθήνας. Οι πειραματικές τιμές προέρχονται από μετρήσεις ολικής ημερήσιας ακτινοβολίας και διάχυτης σε οριζόντια επιφάνεια, ενώ οι μοντελοποιημένες προέρχονται από εκφράσεις γραμμικών συσχετίσεων που προσαρμόζονται στις πειραματικές. Οι συσχετίσεις δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα για τις περιόδους 1990-2000. Η μελέτη αυτή συσχετίζει επίσης τις τιμές του  $K_T$  με τη συγκέντρωση του μαύρου καπνού (BS)- (black smoke) και συμπεραίνει ότι δεν επηρεάζεται το  $K_T$  από τη συγκέντρωση του νέφους.

**[S. Tarhan *et al*, 2004]**

Στην εργασία αυτή, πραγματοποιήθηκε ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας για την περιοχή της Τουρκίας σε 4 επαρχίες. Η μέγιστη μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία κυμάνθηκε μεταξύ 20,05 και 23,71 MJ/m<sup>2</sup>. Η μέγιστη μέση μηνιαία διάρκεια ηλιοφάνειας κυμάνθηκε από 6,89 έως 11 ώρες. Για την πρόβλεψη της μέσης μηνιαίας ολικής ακτινοβολίας, αναπτύχθηκε μια πολυωνυμική εξίσωση 4<sup>ου</sup> βαθμού. Αναπτύχθηκε επίσης ένα υβριδικό μοντέλο βασισμένο σε προβλέψεις 6 διαφορετικών μοντέλων για τον υπολογισμό της διάχυτης και άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Διάφορες στατιστικές αναλύσεις, έδειξαν ότι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στη μελέτη αυτή είναι κατάλληλα για την πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας.

### 1.2.4 Γενικότερες δημοσιεύσεις

**[S. Barbado *et al*, 1980]**

Στην εργασία αυτή η διάχυτη ακτινοβολία συσχετίζεται με μεταβλητές των οποίων η μέτρηση είναι ευκολότερη. Παρουσιάζονται δύο διαφορετικά είδη συσχετίσεων: α) η διάχυτη ακτινοβολία συναρτήσει της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας, β) η διάχυτη ακτινοβολία συναρτήσει της σχετικής ηλιοφάνειας και της ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας. Βασισμένοι στις παραπάνω συσχετίσεις προτάθηκαν εμπειρικές εξισώσεις και υπολογίστηκαν οι συντελεστές

τους με βάση πειραματικά δεδομένα από τρεις Ιταλικούς σταθμούς. Η ακρίβεια των επιμέρους συσχετίσεων επιβεβαιώθηκε με τον υπολογισμό του σχετικού σφάλματος εκτίμησης. Για τη σύγκριση των συσχετίσεων μεταξύ τους, που έχουν διαφορετικούς βαθμούς ελευθερίας, χρησιμοποιήθηκε το τεστ του Gauss υπολογίζοντας την παρακάτω ποσότητα, με κάποιες διαφοροποιήσεις:

$$\Omega = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{v_{s,i} - v_{c,i}}{v_{s,i}} \right)^2}{n - m} \quad (1.4)$$

όπου: n το πλήθος των ζευγών πειραματικών και υπολογιζόμενων τιμών,

$v_{s,i}$  οι πειραματικές τιμές

$v_{c,i}$  οι υπολογιζόμενες τιμές και

m οι βαθμοί ελευθερίας.

Οι τιμές της διάχυτης ακτινοβολίας που εξάγονται από τις παραπάνω συσχετίσεις συμφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα.

**[P.S. Koronakis, 1985]**

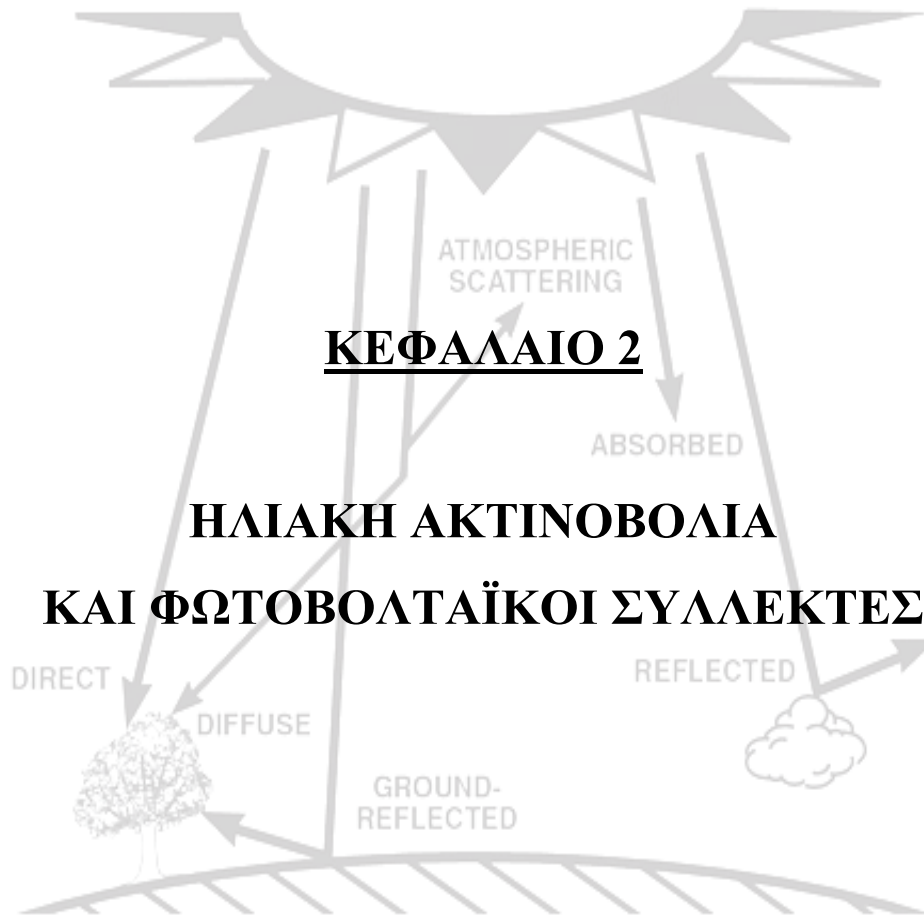
Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται κάποιες πληροφορίες για τη σωστή επιλογή της γωνίας του ηλιακού συλλέκτη. Αναλύονται οι μέσες μηνιαίες τιμές της ολικής ακτινοβολίας με μία απλή συσχέτιση σε συνιστώσες διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας. Οι τιμές των συνιστωσών αυτών χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των μέσων μηνιαίων και ημερήσιων τιμών σε μια κεκλιμένη επιφάνεια. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής τοποθετούνται σε διάγραμμα συναρτήσεως της γωνίας κλίσεως του συλλέκτη για το καλοκαίρι, το χειμώνα και για όλο το χρόνο γενικότερα. Οι τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία προέρχονται από: α) το Διεθνές Παρατηρητήριο Αθηνών για τα έτη 1957-1981, β) την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία για τα έτη 1977-1982, γ) Επιστημονικές Δημοσιεύσεις για τη δημόσια ενέργεια για την Ελλάδα για τα έτη 1982-1983, απ' όπου εξήχθησαν και δεδομένα για τη διάχυτη ακτινοβολία.

**[Stone R.G *et al*, 1993]**

Στην εργασία αυτή, προτείνεται ο υπολογισμός του δείκτη t-statistic για την αξιολόγηση και τη σύγκριση των μοντέλων εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο στατιστικός αυτός δείκτης εκφράζεται μέσω μίας σχέσης που συνδέει το μέσο ριζικό τετραγωνικό σφάλμα με το μέσο σφάλμα. Χρησιμοποιώντας δεδομένα ηλιακής ενέργειας, εξήχθη το συμπέρασμα ότι ο υπολογισμός των δύο παραπάνω σφαλμάτων ξεχωριστά, μπορεί να οδηγήσει στη λάθος επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου, ενώ ο στατιστικός δείκτης σε συνδυασμό με τα επιμέρους σφάλματα, καταλήγει σε σωστά συμπεράσματα. Επίσης ο στατιστικός δείκτης έχει το πλεονέκτημα ότι δίνει τη δυνατότητα να προσδιοριστεί η στατιστική αξιοπιστία των εκτιμήσεων ενός μοντέλου με ένα καλό επίπεδο αξιοπιστίας.

**[Koray Ulgen *et al*, 2003]**

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκαν εμπειρικές συσχετίσεις για την εξαγωγή μίας σχέσης μεταξύ του ημερήσιου κλάσματος  $\frac{H_d}{H}$  και του ημερήσιου δείκτη αιθριότητας  $K_T$  για την πόλη της Σμύρνης στα παράλια της Μικράς Ασίας. Οι μετρήσεις της ωριαίας ολικής και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια, πραγματοποιήθηκαν στον Ηλιακό Μετεωρολογικό Σταθμό του Ηλιακού Ενεργειακού Ινστιτούτου στο Πανεπιστήμιο Ege για μια περίοδο 5 ετών (1994-1998). Τα μοντέλα που εξάγονται, συγκρίνονται στη συνέχεια με 16 μοντέλα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία με βάση των υπολογισμό των στατιστικών δεικτών: ο συντελεστής προσδιορισμού-  $R^2$ , το μέσο επί τοις εκατό σφάλμα (MPE-mean percentage error), το μέσο σφάλμα (MBE-mean bias error), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE-root mean square error) και ο στατιστικός δείκτης t-stat. Τα μοντέλα που εξήχθησαν δίνουν καλύτερα αποτελέσματα για την περιοχή της Σμύρνης σε σχέση με τα βιβλιογραφικά. Όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι ανεξάρτητα του τύπου για τον υπολογισμό της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, τουλάχιστον για την περιοχή της Σμύρνης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ



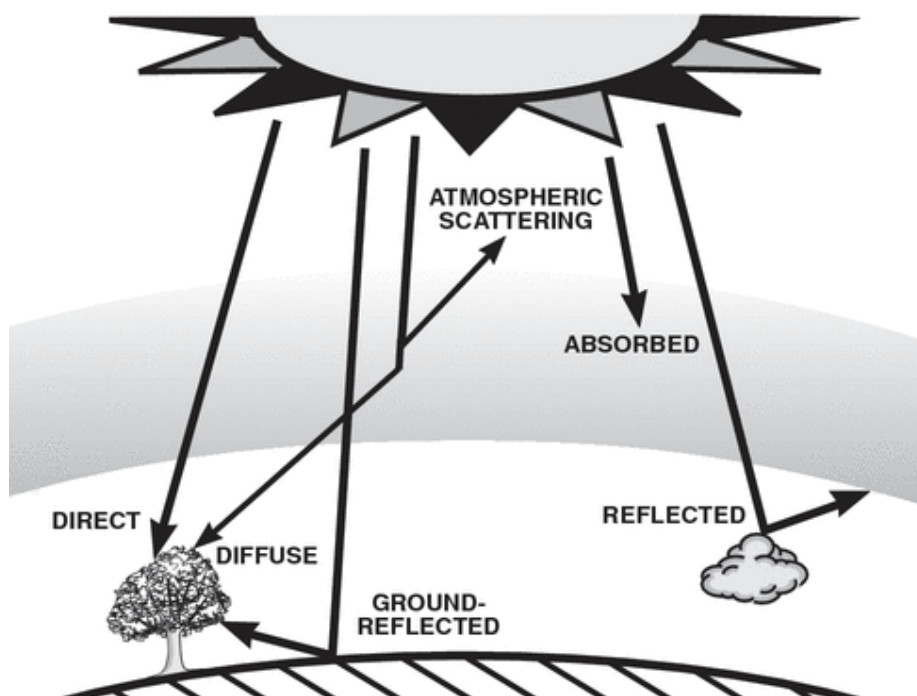
## 2.1 Ηλιακή ακτινοβολία ( Lorenzo E, 2003)

### 2.1.1 Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Με μια καλή προσέγγιση, ο ήλιος συμπεριφέρεται σαν μια τέλεια πηγή εκπομπής ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) σε μια θερμοκρασία κοντά στους 5800K. Το αποτέλεσμα της ενέργειας αυτής που εκπέμπει ο ήλιος κατακόρυφα πάνω σε μια επιφάνεια έξω από την ατμόσφαιρα της γης που απέχει 1 AU από τον ήλιο είναι γνωστή σαν ηλιακή σταθερά

$$G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2 \quad (2.1)$$

Η ακτινοβολία που πέφτει σε ένα συλλέκτη πάνω από την ατμόσφαιρα της γης, γνωστή σαν "extraterrestrial radiation", αποτελείται αποκλειστικά και μόνο από ακτινοβολία που ταξιδεύει σε μια ευθεία γραμμή από τον ήλιο.



Σχήμα 2.1 Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης επιδέχεται κάποιες μετατροπές αλληλεπιδρώντας με διάφορα συστατικά της. Κάποια από αυτά, όπως τα σύννεφα, την αντανακλούν. Άλλα, όπως το όζον, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα την απορροφούν. Οι σταγόνες του νερού και τα αιωρούμενα σωματίδια σκόνης προκαλούν σκέδαση. Το αποτέλεσμα όλων αυτών των διαδικασιών είναι η

αποσύνθεση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα δέκτη στην επιφάνεια της γης σε καθαρά διαφοροποιούμενα συστατικά.

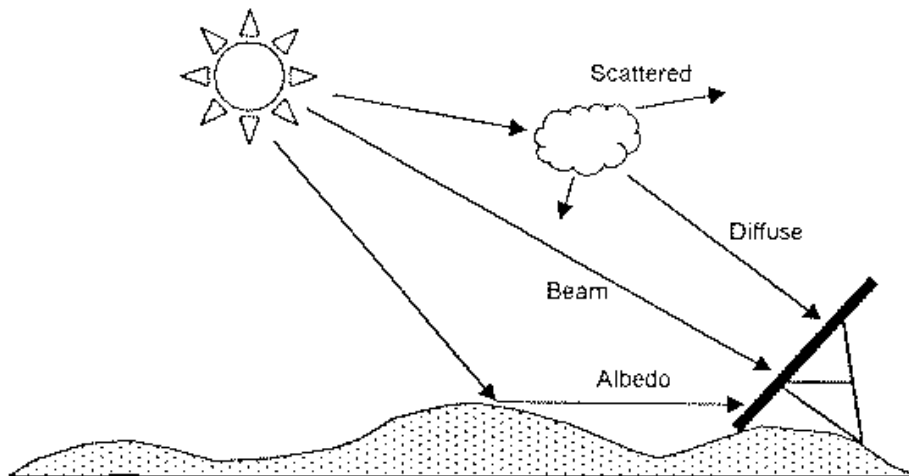
Η "απευθείας" ή "ακτινική" ακτινοβολία (Direct or Beam radiation), προσπίπτει καταευθείαν στην επιφάνεια του συλλέκτη χωρίς αντανάκλαση ή διασπορά.

Η "διάχυτη" ακτινοβολία (Diffuse radiation), είναι όλη η υπόλοιπη ακτινοβολία που προέρχεται από αυτήν που διαχέεται στην ατμόσφαιρα.

Η ολική ακτινοβολία που πέφτει σε μια επιφάνεια είναι το άθροισμα των παραπάνω και είναι γνωστή σαν "συνολική" ακτινοβολία (Global radiation).

Επί πλέον, όταν ο συλλέκτης εγκαθίσταται με κλίση προς το οριζόντιο επίπεδο, όπως και συνηθίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, προστίθεται και ένα μικρό σχετικά ποσοστό προερχόμενο από ανάκλαση σε παρακείμενα αντικείμενα (Albedo radiation).

Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας, προέρχεται από την ακτινική ακτινοβολία, σημαντική είναι όμως και η συμβολή της διάχυτης.

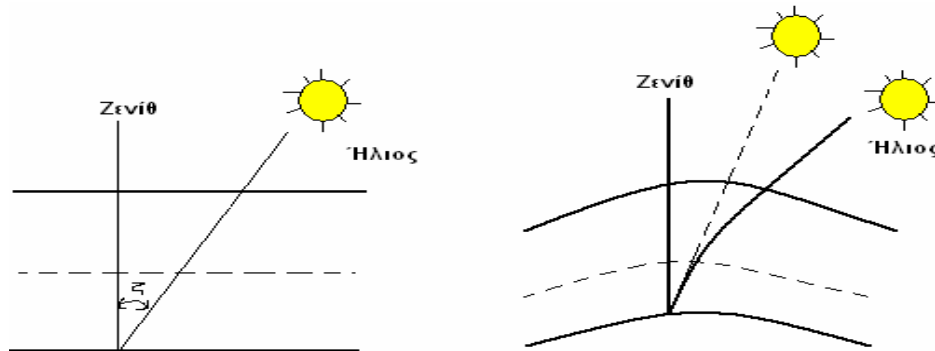


Σχήμα 2.2 Οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας

### 2.1.2 Ύπαρξη ατμόσφαιρας-ακτινοβολία ενός ήλιου

Συμβατικά, ως στοιχείο χαρακτηρισμού της επίδρασης που έχει η ύπαρξη της ατμόσφαιρας, όταν δεν υπάρχουν σύννεφα, λαμβάνεται το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην γήινη ατμόσφαιρα, μέχρι τη στάθμη της θάλασσας και ονομάζεται αέριος μάζα (air mass), AM. Το μήκος της αέριας μάζας, αν αγνοηθεί η καμπυλότητα της γης, ισούται με το πάχος του στρώματος της ατμόσφαιρας δια του

συνημίτονου της ζενιθιακής γωνίας  $\theta_z$ , δηλαδή της γωνίας που σχηματίζει η ευθεία γη-ήλιος με την κατακόρυφο (ζενίθ) στο συγκεκριμένο σημείο (Σχήμα 2.3). Δηλαδή η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα λαμβάνοντας υπόψη την καμπυλότητα της γης (Σχήμα 2.3), σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η καμπυλότητα της γης.



**Σχήμα 2.3** Εξάρτηση της μάζας αέρα (AM) από την θέση του ήλιου

Η ηλιακή σταθερά  $G_{sc}$  στην κλίμακα μάζας αέρα σημειώνεται ως AM0 και συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που να απέχει όση είναι η μέση απόσταση της γης από τον ήλιο. Επίσης, ως AM1 συμβολίζεται η θέση του ήλιου στην κατακόρυφο, στο ζενίθ, που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια, ως AM1.5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον ήλιο σε γωνία  $45^\circ$  από το ζενίθ, ως AM2 με τον ήλιο σε γωνία  $60^\circ$  κλπ.

Στον πίνακα 2.1 γράφονται οι πυκνότητες της ισχύος και η μέση ενέργεια των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας σε διάφορες πρότυπες συνθήκες στην κλίμακα μάζας αέρα.

Πάντως, η παραπάνω προτυποποίηση δεν είναι πάρα πολύ αυστηρή. Έτσι π.χ. εκτός από τις τιμές του πίνακα, η AM0 αναφέρεται επίσης ως  $1.353\text{kW}/\text{m}^2$  ή συνηθέστερα  $1.367\text{kW}/\text{m}^2$  και η AM2 ως  $0.740\text{kW}/\text{m}^2$ .

**Πίνακας 2.1** Οι πρότυπες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας στην κλίμακα μάζας αέρα (Air Mass)

Τιμή μάζας αέρα	Συμβατικές συνθήκες	Ισχύς	Μέση ενέργεια των φωτονίων
AM0	Στο διάστημα έξω από την ατμόσφαιρα	$1350\text{W}/\text{m}^2$	1,48eV
AM1	Ο ήλιος στο ζενίθ. Κάθετη πρόσπτωση σε επιφάνεια στη στάθμη της θάλασσας	1060	1,32
AM2	Απόσταση του ήλιου $60^\circ$ από το ζενίθ	880	1,38
AM3	Απόσταση του ήλιου $70,5^\circ$ από το ζενίθ	750	1,21

Η ηλιακή ακτινοβολία AM1.5 έχει πυκνότητα  $935\text{W}/\text{m}^2$  και αποτελεί χονδρικά μια αρκετά αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που περίπου δέχεται μια επιφάνεια κάθετη προς την ακτινοβολία και στις ευνοϊκότερες δυνατές συνθήκες αιχμής (καλοκαίρι, μεσημέρι, καθαρός ουρανός κλπ.). Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλεύεται στα  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , ονομάζεται συμβατικά ακτινοβολία ενός ήλιου (ή ενός πλήρους ήλιου) και χρησιμοποιείται για την έκφραση της ισχύος αιχμής (peak)- $W_p$  των Φ/Β στοιχείων, η οποία και λαμβάνεται ως η ονομαστική ισχύς αυτών.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μέγιστη ισχύς της ακτινοβολίας το ηλιακό μεσημέρι στις ευνοϊκότερες ημέρες του έτους, δεν διαφέρει πολύ από τόπο σε τόπο και η τιμή

$1\text{kW}/\text{m}^2$  αποτελεί μια πολύ χονδρική, αλλά πάντως γενικά αποδεκτή προσέγγιση. Όταν ο ουρανός έχει σύννεφα, η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης γίνεται ανώμαλη (Intermittent radiation). Οι παρατηρούμενες απότομες πτώσεις της έντασης οφείλονται στην παρεμβολή ενός νέφους που μετακινεί ο άνεμος. Επίσης, το γρήγορο πέρασμα ενός σμήνους πουλιών ή ενός αεροπλάνου μέσα από τη δέσμη του ηλιακού φωτός που δέχεται ο συλλέκτης, καταγράφεται σαν μια πολύ οξεία στιγμιαία πτώση της έντασης της ακτινοβολίας. Παρατηρούμε, ακόμη, εξάρσεις που ξεπερνούν τις κανονικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού. Προφανώς στα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα θα συμβαίνει αθροιστική επίδραση της άμεσης ακτινοβολίας από τον ήλιο, μέσα από ένα άνοιγμα των νεφών και της ανακλώμενης από τα σύννεφα.

### **2.1.3 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας**

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας και η φωτονική της σύσταση παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ανάλογα με την ώρα, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία, σε αιωρούμενα σωματίδια και σε άλλα συστατικά. Επίσης επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό και από άλλους προβλεπόμενους ή απρόβλεπτους παράγοντες, όπως οι ηλιακές κηλίδες και εκρήξεις, η ατμοσφαιρική ρύπανση κλπ.

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, η οποία εξαρτάται από την κίνηση της γης περί τον ήλιο, μπορεί να υπολογίζεται με ακρίβεια με βάση γεωμετρικές σχέσεις. Αντίθετα η μείωση που υφίσταται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διαδρομή της στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται από την κατάστασή της ατμόσφαιρας.

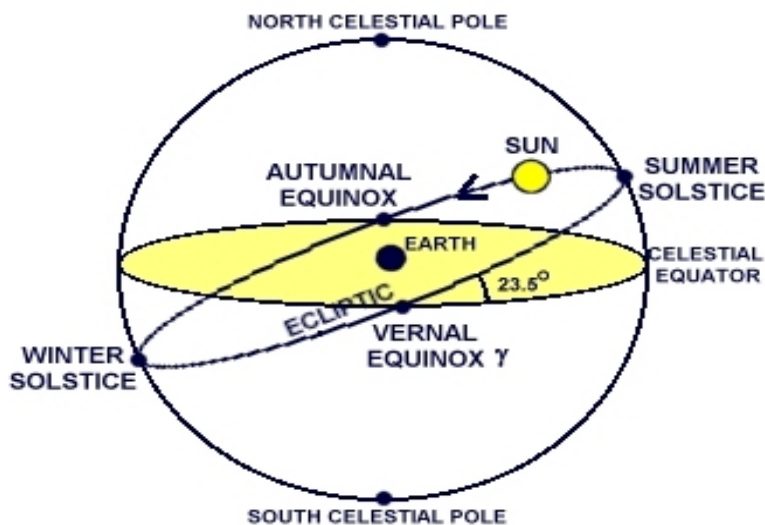
#### **2.1.3.1 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της θέσης του ήλιου**

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η σχετική θέση του ήλιου και της γης, που περιγράφεται απλούστερα με βάση

την ουράνια σφαίρα, στο κέντρο της οποίας θεωρείται ότι βρίσκεται η γη. Το επίπεδο του ισημερινού της γης τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ουράνιο ισημερινό και ο πολικός άξονας της γης στους ουράνιους πόλους. Η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές, σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης ( $\delta$ ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου, και στο επίπεδο του ισημερινού. Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο φαίνεται ως η κίνηση του ήλιου στην ουράνια σφαίρα, σε ελλειπτική τροχιά, το επίπεδο της οποίας ονομάζεται εκλειπτική και σχηματίζει γωνία  $23.45^\circ$  με το επίπεδο του ουράνιου ισημερινού. Η γωνία  $\delta$  μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα του ήλιου και της γης και του επιπέδου του ισημερινού, ονομάζεται ηλιακή απόκλιση (declination) και υπολογίζεται από τη σχέση:

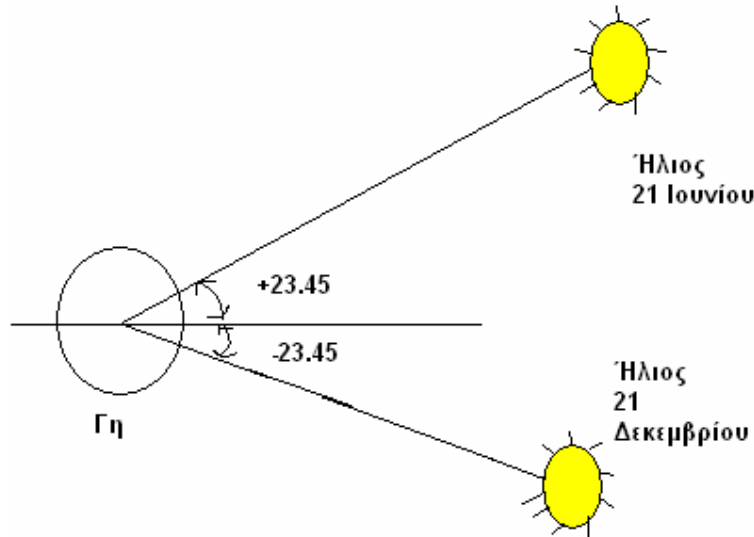
$$\delta = 23.45 \sin \frac{360(284 + n)}{365} \quad (2.2)$$

όπου  $n=1$  (1<sup>η</sup> Ιανουαρίου) έως 365 (31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου) ημέρα του έτους.



**Σχήμα 2.4** Η ουράνια σφαίρα με την φαινόμενη ετήσια κίνηση του ήλιου

Είναι  $\delta=0$  κατά την εαρινή ισημερία (21 Μαρτίου) και την φθινοπωρινή ισημερία (21 Σεπτεμβρίου), οπότε ο ήλιος ανατέλλει ακριβώς στην ανατολή και δύει στη δύση. Επίσης είναι  $\delta=23.45^\circ$  την 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) και  $\delta=-23.45^\circ$  την 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο).



**Σχήμα 2.5** Η ακραία απόκλιση του ήλιου κατά το θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο

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

Ιδιαίτερα χρήσιμα μεγέθη για τη γενική εκτίμηση της καθημερινής και της εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σ' έναν τόπο, είναι η θεωρητική ηλιοφάνεια, δηλαδή το χρονικό διάστημα από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια που δείχνει το μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν καλύπτεται από σύννεφα. Επίσης, ο αριθμός των ηλιοφεγγών ημερών, στη διάρκεια των οποίων ο ήλιος δεν καλύπτεται καθόλου από σύννεφα, καθώς και των ανήλιων ημερών, που ο ήλιος καλύπτεται από σύννεφα σε όλη τη διάρκεια της ημέρας.

### **2.1.3.2 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της κίνησης της γης κατά τη διάρκεια του έτους**

Όπως είναι γνωστό η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του 24-ώρου, λόγω περιστροφής της γης περί τον άξονά της, και κατά την

διάρκεια του έτους, λόγω περιστροφής της γης στο επίπεδο της εκλειπτικής. Η μεταβολή της απόστασης της γης από τον ήλιο έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας.

Αν  $G_{on}$  είναι η ένταση της ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, που εκφράζει και την ακτινική ακτινοβολία (Direct or Beam radiation), αφού εκτός της ατμόσφαιρας δεν υπάρχουν οι υπόλοιπες συνιστώσες της ακτινοβολίας, σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ήλιου και  $G_{SC}$  η μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς, θα είναι:

$$G_{on} = G_{SC} (1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} n) \quad (2.3)$$

όπου  $n=1$  (1<sup>η</sup> Ιανουαρίου) έως 365 (31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου) η ημέρα του έτους.

### 2.1.3.3 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω κίνησης κατά τη διάρκεια της ημέρας

Η ημερήσια κίνηση της γης απεικονίζεται με την ημερήσια περιστροφή της ουράνιας σφαίρας περί τον πολικό άξονα και η στιγμιαία θέση του ήλιου περιγράφεται από την ωριαία γωνία  $\omega$ , η οποία ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του μεσημβρινού που περνάει από τον ήλιο και του μεσημβρινού που περνάει από τη θέση της εγκατάστασης. Είναι  $\omega=0$  κατά το ηλιακό μεσημέρι και αυξάνει με ρυθμό  $15^\circ/h=0.25/min$ . Λαμβάνεται  $\omega < 0$  για πμ και  $\omega > 0$  για μμ.

Η ωριαία γωνία του ήλιου  $\omega$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega = (t_s - 12)15 \quad (2.4)$$

όπου  $\omega$ , η ωριαία γωνία του ήλιου σε ώρες

$t_s$ , ο ηλιακός χρόνος σε ώρες.

Ο ηλιακός χρόνος είναι ο χρόνος που μετράται με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ήλιου στον ουρανό και δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο του ωρολογίου.

Οι δύο χρόνοι συνδέονται με τη σχέση:

$$t_s = t_c + \left(\frac{L_{loc}}{15}\right) - T_c + E \quad (2.5)$$

όπου  $t_s$ , ο ηλιακός χρόνος σε ώρες

$t_c$ , ο τοπικός χρόνος σε ώρες



$L_{loc}$ , το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή σε μοίρες

$T_C$ , η τοπική ωρολογιακή ζώνη αριστερά του GMT σε ώρες

(για την Ελλάδα +2hours)

E, μια εξίσωση χρόνου σε ώρες

$$E=3.82(0.000075+0.001868\cos B-0.032077\sin B-0.014615\cos 2B-0.04089\sin 2B)$$

(Iqbal M, 1983)

$$\text{όπου } B=360 \frac{n-1}{365}$$

$n=1$  (1<sup>η</sup> Ιανουαρίου) έως 365 (31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου) η ημέρα του έτους.

Η εξίσωση του χρόνου E είναι ένας παράγοντας που συνεκτιμά τις επιδράσεις της στροφής των αξόνων της γης κατά την περιστροφή της στο επίπεδο της εκλειπτικής και της εκκεντρότητας της τροχιάς της.

#### 2.1.3.4 Μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της γεωγραφικής θέσης του παρατηρητή

Λόγω της γεωγραφικής θέσης ενός παρατηρητή πάνω στην επιφάνεια της γης, προσφέρεται να οριστεί ένα σύστημα συντεταγμένων με βάση την κατακόρυφο, η οποία τέμνει την ουράνια σφαίρα στο ζενίθ και το ναδίρ, και τον ορίζοντα που είναι το επίπεδο το κάθετο στον άξονα αυτόν. Η γωνία  $\theta_z$  μεταξύ του ζενίθ και της ευθείας όρασης του ήλιου ονομάζεται γωνία ζενίθ ή ζενιθιακή γωνία, η δε συμπληρωματική της  $\alpha=90^\circ-\theta_z$ , ονομάζεται ύψος του ήλιου. Η άλλη πολική συντεταγμένη για τον προσδιορισμό της θέσης του ήλιου είναι η αζιμούθια γωνία  $\psi$ , μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ήλιου στο επίπεδο του ορίζοντα και του νότου. Είναι  $\psi=0^\circ$  στο νότο,  $\psi=90^\circ$  στη δύση,  $\psi=-90^\circ$  στην ανατολή και  $\psi=180^\circ$  στο βορρά.

Για οριζόντιες επιφάνειες, που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι οι στατιστικές μετρήσεις αναφέρονται συνήθως στο οριζόντιο επίπεδο, ισχύουν μεταξύ των παραπάνω γωνιών οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2.6)$$

όπου:  $\phi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος της θέσης της εγκατάστασης και  $\theta_z + \alpha = 90^\circ$ .

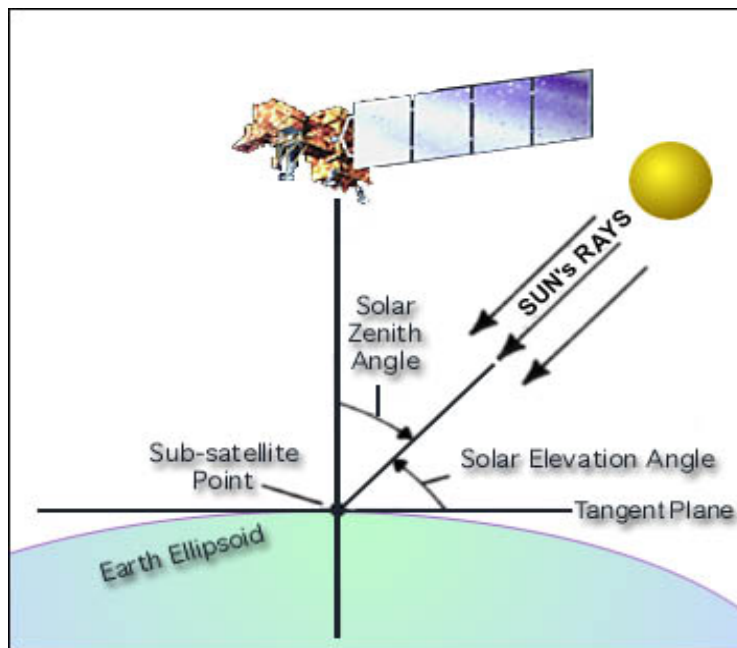
Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για  $\theta_z > 90^\circ$ .

Η ωριαία γωνία  $\omega_s$  κατά την οποία δύει ο ήλιος, προκύπτει προφανώς αν τεθεί  $\theta_z=90^\circ$ , οπότε:

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = \tan \phi \tan \delta \quad (2.7)$$

Συνεπώς ο ήλιος θα ανατέλλει σε γωνία  $-\omega_s$  και θα δύει σε  $+\omega_s$ . Επίσης αν είναι N (σε ώρες) η διάρκεια της ημέρας, δηλαδή ο χρόνος από την ανατολή μέχρι τη δύση του ήλιου θα είναι:

$$N = 2 \frac{24}{360} \omega_s = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.8)$$



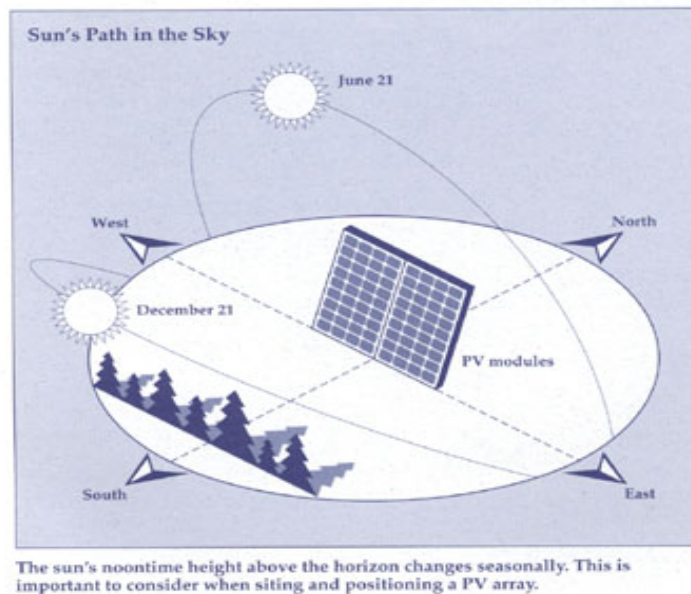
Σχήμα 2.6 Ορισμός των γωνιών ύψος του ήλιου και ζενιθακής γωνίας

## 2.2 Η ηλιακή ακτινοβολία στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη

### 2.2.1 Εισαγωγή

Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη διαφέρει από αυτήν που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο όταν ο συλλέκτης έχει εγκατασταθεί υπό κάποια κλίση σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Η υπό γωνία εγκατάσταση του

συλλέκτη συνηθίζεται για λόγους μέγιστης εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας και μια τέτοια τοποθέτηση προσδίδει επιπλέον χαρακτηριστικά στην ηλιακή ακτινοβολία, που εξετάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.



Σχήμα 2.7 Η κίνηση του ήλιου σε σχέση με το φωτοβολταϊκό συλλέκτη

### 2.2.2 Η επίδραση της κλίσης του συλλέκτη

Η απορροφούμενη ακτινοβολία είναι μέγιστη όταν οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα στο επίπεδο του συλλέκτη. Συνεπώς για να επιτευχθεί η λήψη της μέγιστης ποσότητας της ηλιακής ενέργειας θα έπρεπε ο συλλέκτης να στρέφεται συνεχώς ώστε να παρακολουθεί την πορεία του ήλιου, πράγμα όμως που κατά κανόνα αυξάνει αδικαιολόγητα το κόστος της εγκατάστασης και εφαρμόζεται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις.

Στην πράξη, κατά γενικό κανόνα, η θέση των συλλεκτών, δηλαδή του προσανατολισμού και της κλίσης τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο, παραμένει αμετάβλητη ή το πολύ προβλέπεται η χειροκίνητη μεταβολή της κλίσης τους μια ή δύο φορές το έτος.

Στην γενικότερη περίπτωση, η θέση του συλλέκτη προσδιορίζεται από τη γωνία  $\beta$  που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο, (ονομάζεται κλίση του συλλέκτη), και την γωνία  $\gamma$  που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνειά του και την κατεύθυνση προς νότο (ονομάζεται αζιμούθια γωνία του συλλέκτη).

Για μια τέτοια τυχούσα θέση του συλλέκτη, αν είναι:

(1):  $\theta$  η γωνία πρόσπτωσης της ακτινικής (ή άμεσης) ακτινοβολίας του ήλιου, δηλαδή η γωνία των ηλιακών ακτίνων με την κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη,

(2):  $\phi$  το γεωγραφικό πλάτος της θέσης ( $-90^\circ < \phi < 90^\circ$ ) και

(3):  $\omega$  η ωριαία γωνία του ήλιου,

αποδεικνύεται ότι ισχύει η σχέση(για το βόρειο ημισφαίριο):

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \\ & \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \\ & \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (2.9)$$

Σημειώνεται, ότι δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για  $\theta > 90^\circ$ .

(Για το νότιο ημισφαίριο, θα πρέπει να αντιστραφεί το πρόσημο στον 2<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> από τους πέντε προσθετέους της παραπάνω σχέσης)

Για κάθετη επιφάνεια, αρκεί να τεθεί  $\beta = 90^\circ$ . Για οριζόντιες επιφάνειες, αρκεί να τεθεί  $\beta = 0^\circ$ , οπότε η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με το ζενίθ, ώστε  $\theta = \theta_z$ . Επίσης για  $\omega = 0$ , προκύπτει η γωνία πρόσπτωσης κατά το μεσημέρι.

Για κεκλιμένες επιφάνειες που βρίσκονται στο βόρειο ημισφαίριο και είναι στραμμένες στο νότο, οπότε  $\gamma = 0^\circ$ , προκύπτει:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega \quad (2.10)$$

Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει νόημα υπολογισμού της παραπάνω σχέσης για  $\theta > 90^\circ$ . (Για το νότιο ημισφαίριο, αρκεί να τεθεί η αρνητική τιμή της γωνίας  $\phi$ )

Συχνά οι ηλιακοί συλλέκτες εγκαθίστανται ώστε να στρέφονται προς το νότο, εκτός βέβαια αν ο προσανατολισμός τους επιβάλλεται από τον τρόπο της εγκατάστασης.

Για εγκαταστάσεις στο βόρειο ημισφαίριο η μέγιστη απολαβή επιτυγχάνεται όταν ο συλλέκτης προσανατολίζεται στον νότο και η κλίση του συλλέκτη είναι ίση με τη γεωγραφική παράλληλο του τόπου, ενώ εάν η κλίση μπορεί να μεταβάλλεται χειροκίνητα (σε χρονικά διαστήματα μηνών, π.χ. ανά εποχή του έτους) ενδείκνυται η κλίση να μειώνεται κατά  $10^\circ$  έως  $15^\circ$  κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και να αυξάνεται κατά το ίδιο ποσοστό κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη είναι διαφορετική για κάθε εποχή. Τα παραπάνω αποτελούν προσεγγίσεις που εφαρμόζονται σε μικρές εγκαταστάσεις, ενώ για μεγάλες πρέπει να γίνεται αναλυτική μελέτη.

Παρακάτω, δίνεται ένα παράδειγμα της βέλτιστης κλίσης για τον ηλιακό συλλέκτη στις σημαντικότερες ημερομηνίες του έτους.

Για να εξουδετερωθεί η διαφορά αυτή, βρέθηκε ότι αν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετηθούν ώστε να σχηματίζουν γωνία με το οριζόντιο επίπεδο ίση με  $(\Phi+15)$  μοίρες ( $\Phi$  το γεωγραφικό πλάτος του τόπου), η συνολική ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τα πλαίσια γίνεται μεγαλύτερη το χειμώνα και μικρότερη το καλοκαίρι με αποτέλεσμα να υπάρχει σχεδόν σταθερότητα κατά τη διάρκεια του έτους. Δηλαδή, η μικρότερη ηλιοφάνεια κατά τις χειμερινές μέρες αντισταθμίζεται με την πιο κάθετη τοποθέτηση των πλαισίων προς τις ηλιακές ακτίνες και η μεγάλη ηλιοφάνεια κατά τις καλοκαιρινές μέρες δίνει λιγότερη ηλιακή ενέργεια με την πιο πλάγια τοποθέτησή τους στις ηλιακές ακτίνες.

Έτσι πρακτικά η ηλιακή ενέργεια που δέχονται τα πλαίσια το χειμώνα είναι ίση περίπου με αυτή που δέχονται το καλοκαίρι. Επί πλέον, η ενέργεια αυτή είναι ίση περίπου με εκείνη που δέχονται τα πλαίσια την άνοιξη και το φθινόπωρο και έτσι διατηρείται σταθερότητα για όλο το χρόνο.

Οι τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατά μέσο όρο κάθε μέρα για τις διάφορες εποχές του έτους, καταγράφονται στους διεθνείς χάρτες. Σημειώνεται ότι οι τιμές που αναγράφονται στους πίνακες αποτελούν μέσο όρο και καλύπτουν γενικά όλη την Ελλάδα. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν δεν υπάρχουν πιο ακριβή στοιχεία για την περιοχή που θα εγκατασταθεί το φωτοβολταϊκό σύστημα. Τέτοια στοιχεία παρέχονται από τους κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς ή άλλα αρμόδια τμήματα του κράτους.

Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της μέγιστης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δεν είναι αναγκαστικό να συμπίπτει με το ωρολογιακό μεσημέρι. Στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12:25 τον χειμώνα και 13:25 το καλοκαίρι, όταν ισχύει η θερινή ώρα

### **2.2.3 Η επίδραση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας**

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που έρχεται σαν δέσμη από τον ήλιο. Για τις άλλες, από ενεργειακή άποψη λιγότερο σημαντικές μορφές της ηλιακής ακτινοβολίας, ο κυριότερος παράγοντας είναι η απόλυτη τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου.

Έτσι, όσο η κλίση απέχει περισσότερο από το οριζόντιο, τόσο μεγαλύτερο ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος δέχεται ο συλλέκτης, αλλά και τόσο μικρότερο ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό. Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους, είναι περίπου 10-15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους. Έτσι, ο συλλέκτης αντικρίζει περισσότερο τον ουρανό και δέχεται αφθονότερα την ηλιακή ακτινοβολία.

Η ποσότητα της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό που καλύπτει την επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία. Η ικανότητα της ανάκλασης, εκφράζεται από ένα συντελεστή που κυμαίνεται από 0 για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, μέχρι 1 για πλήρη ανάκλαση. Στον παρακάτω πίνακα, δίνονται ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης για ορισμένα από τα είδη επιφανειών που συμβαίνει να έχει το περιβάλλον στις περιοχές όπου τοποθετούνται οι ηλιακοί συλλέκτες.

**Πίνακας 2.2** Παραδείγματα τιμών του συντελεστή ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Είδος επιφάνειας	Συντελεστής ανάκλασης
Επιφάνεια νερού, θάλασσα	0,05
Ασφαλτόστρωμα	0,07
Αγρός με σκοτεινόχρωμο χώμα	0,08
Πράσινος αγρός	0,15
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0,24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου ή χρωματισμένη με ανοιχτό χρώμα	0,30
Χιόνι	0,60

#### **2.2.4 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη**

Δεδομένου ότι οι μετρήσεις της εντάσεως της ηλιακής ακτινοβολίας γίνονται συνήθως στο οριζόντιο επίπεδο, ενδιαφέρει η συσχέτιση μεταξύ της μετρούμενης εντάσεως της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και εκείνης που προσπίπτει στο συλλέκτη.

### 2.2.4.1 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας

Αν  $G_{on}$  είναι η ένταση της άμεσης (ακτινικής) ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας, μετρούμενη σε κάθετο προς τις ακτίνες επίπεδο, τότε η ένταση στο οριζόντιο επίπεδο θα είναι:

$$G_o = G_{on} \cos \theta_z \quad (2.11)$$

όπου  $G_o$ , η ένταση στο οριζόντιο επίπεδο εκτός της ατμόσφαιρας  
 $\cos \theta_z$ , η τιμή που υπολογίζεται από την σχέση

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση στο πεδίο του χρόνου, η ωριαία μέση ακτινοβολία που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο σε κάθε ώρα του χρόνου δίνεται από τη σχέση:

$$I_{oh} = \frac{12}{\pi} G_{on} [\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi}{180} (\omega_2 - \omega_1) \sin \delta \sin \phi] \quad (2.12)$$

όπου  $\omega_1$ , η ωριαία γωνία του ήλιου στην αρχή της ώρας

$\omega_2$ , η ωριαία γωνία του ήλιου στο τέλος της ώρας

Η πρώτη τιμή που παίρνει η  $\omega_1$  είναι η  $-\omega_s$ , η ωριαία γωνία της ανατολής του ήλιου και η τελευταία τιμή της  $\omega_2$  είναι η  $+\omega_s$ , η ωριαία γωνία της δύσης του ήλιου. Σημειώνεται ότι η ωριαία γωνία του ήλιου αυξάνεται από την ανατολή μέχρι τη δύση με ρυθμό 15°/h.

### 2.2.4.2 Επίδραση της ατμόσφαιρας στην ηλιακή ακτινοβολία

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός από τις μεταβολές που υφίσταται λόγω της κίνησης της γης περί τον ήλιο, και οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν με βάση γεωμετρικές σχέσεις, υφίσταται έντονες διακυμάνσεις λόγω της παρεμβολής της ατμόσφαιρας. Οι μειώσεις αυτές μπορεί να διακρίνονται ανάλογα με το αν πρόκειται για αίθρια ατμόσφαιρα, δηλαδή δεν υπάρχουν νέφη, ή μη αίθρια (νεφελώδη) ατμόσφαιρα, χωρίς όμως να μπορεί να γίνει σαφής διάκριση. Οπωσδήποτε όμως λόγω των σημαντικών επιπτώσεων της αιθριότητας της ατμόσφαιρας στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, οι υπολογισμοί της ενεργειακής απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών γίνονται λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα στατιστικών μετρήσεων.

Έτσι από τις μετρήσεις της ηλιακής συνολικής ενέργειας  $I$  σε οριζόντιο επίπεδο στην τοποθεσία της εγκατάστασης, μπορεί να υπολογισθεί ο συντελεστής αιθριότητας της ατμόσφαιρας από το πηλίκο:

$$K_T = \frac{I}{I_{oh}} \quad (2.13)$$

όπου  $I$ , η μετρούμενη ολική ένταση της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

$I_{oh}$ , η ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας στην ίδια θέση.

Οι τιμές τους αναφέρονται συνήθως σε ημερήσιες μέσες τιμές, που προκύπτουν από μετρήσεις στη διάρκεια ενός μηνός. Ο  $K_T$  αποτελεί χαρακτηριστικό του τόπου εγκατάστασης και συχνά δίδεται σε πίνακες ως μέση μηνιαία τιμή. Έχει αποδειχθεί στατιστικά ότι ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος, το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο η συνολική ημερήσια ακτινοβολία είναι μικρότερη ή ίση από ορισμένη τιμή εξαρτάται άμεσα από την τιμή του  $K_T$ . Είναι επίσης διαπιστωμένο, ότι όσο περισσότερο αίθρια είναι η ατμόσφαιρα τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ακτινοβολίας και μικρότερο το ποσοστό της διάχυτης επί της ολικής.

Από διάφορες σχέσεις συσχέτισης διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας που έχουν διατυπωθεί, υπολογίζουμε το λόγο της διάχυτης ακτινοβολίας  $I_d$  προς την ολική  $I$ , ως συνάρτηση του συντελεστή αιθριότητας  $K_T$ , έτσι ώστε στη συνέχεια να διαχωρίσουμε την ολική ακτινοβολία από τις συνιστώσες της.

Από διάφορες εξισώσεις, όπως του Erbs (*Erbs et al, 1982*), του Page (*Page J, 1961*) κλπ., και γνωρίζοντας την μετρούμενη συνολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, υπολογίζεται η διάχυτη ακτινοβολία. Η άμεση ή ακτινική ακτινοβολία  $I_b$  που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο είναι το υπόλοιπο μέρος της ολικής ακτινοβολίας:

$$I_b = I - I_d \quad (2.14)$$

όπου  $I_b$ , η ακτινική ακτινοβολία

$I_d$ , η διάχυτη ακτινοβολία και  $I$ , η ολική ακτινοβολία

#### 2.2.4.3 Συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο συλλέκτη

Πριν από τον υπολογισμό της συνολικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του κεκλιμένου συλλέκτη προσδιορίζονται τρεις ακόμα συντελεστές.



Το μέρος της απευθείας ή ακτινικής ακτινοβολίας που πέφτει στην κεκλιμένη επιφάνεια προς αυτή που υπολογίζεται στην οριζόντια επιφάνεια, ως ποσοστό δίνεται από το ακόλουθο πηλίκο:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.15)$$

όπου  $\cos \theta$  και  $\cos \theta_z$  υπολογίζονται από τις σχέσεις αντίστοιχα.

Ο ακόλουθος συντελεστής εκφράζει την ατμοσφαιρική διαπερατότητα (atmospheric transmittance) της ακτινικής ακτινοβολίας και δίνει μια εκτίμηση για το μέγεθος της διάχυτης ακτινοβολίας:

$$A_i = \frac{I_b}{I_{oh}} \quad (2.16)$$

όπου  $I_b$ , η ακτινική ακτινοβολία

$I_{oh}$ , η ακτινοβολία στο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας

Ο τελευταίος συντελεστής υπολογίζει την φωτεινότητα του ορίζοντα (horizon brightening) και σχετίζεται με τη συννεφιά (cloudiness):

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \quad (2.17)$$

όπου  $I_b$ , η ακτινική ακτινοβολία

$I$ , η συνολική ακτινοβολία

Η συνολική ακτινοβολία  $I_T$  που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) [1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right)] + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.18)$$

όπου  $\rho_g$ , ο συντελεστής ανάκλασης

Οι υπόλοιπες παράμετροι έχουν υπολογισθεί παραπάνω.

### 2.2.5 Υπολογισμός της ισχύος εξόδου φωτοβολταϊκού

Η στιγμιαία ισχύς εξόδου ενός Φ/Β συλλέκτη, ως ποσοστό της συνολικής ηλιακής που προσπίπτει στην επιφάνειά του, δίνεται από τη σχέση:

$$P_{PV} = f_{PV} Y_{PV} \left( \frac{I_T}{I_S} \right) \quad (2.19)$$

όπου  $P_{PV}$ , η έξοδος του συλλέκτη σε kW

$f_{PV}$ , ο συντελεστής μείωσης της αποδόσεως του συλλέκτη, λόγω

υψηλών θερμοκρασιών, σκόνης στην επιφάνεια του συλλέκτη κλπ.

$Y_{PV}$ , η ονομαστική ισχύς του συλλέκτη

$I_T$ , η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη,

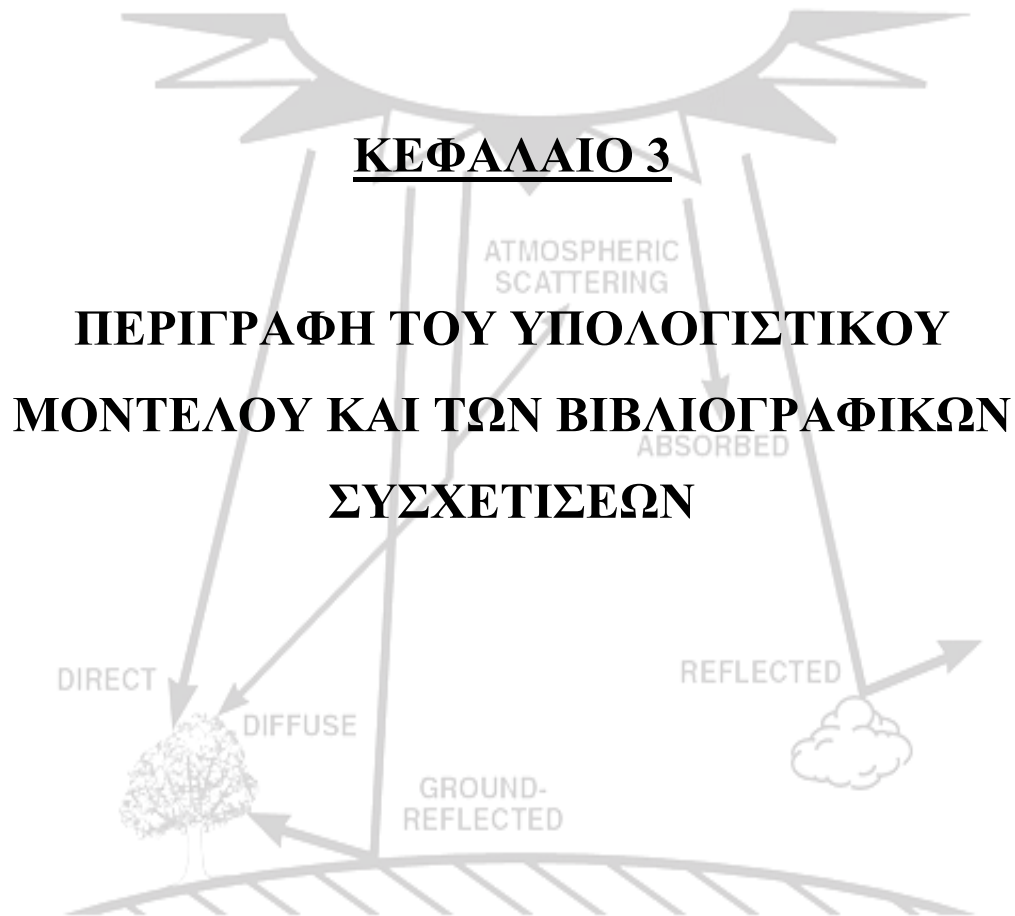
όπως έχει υπολογισθεί

$I_S$ , η ακτινοβολία ενός ήλιου ίση με  $1\text{kW}/m^2$ .

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω σχέση υπολογισμού της ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού συλλέκτη είναι μία πολύ απλοϊκή σχέση υπολογισμού της ισχύος, ενώ στην πραγματικότητα λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες που την επηρεάζουν, όπως οι ιδιότητες του υλικού, η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου, οι οποίες συμπεριλαμβάνονται σε μία πιο πολύπλοκη εξίσωση.

### 2.2.6 Συμπέρασμα

Τελικά υπολογίζοντας όλα τα παραπάνω σκοπός είναι ο υπολογισμός της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη  $I_T$  από δεδομένα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία, την ατμοσφαιρική διαπερατότητα και το ποσοστό της ακτινοβολίας που φτάνει στην ατμόσφαιρα.



### 3.1 Περιγραφή του μοντέλου

#### 3.1.1 Εισαγωγή

Το μοντέλο που περιγράφεται παρακάτω, έχει ως στόχο τον υπολογισμό των συνιστωσών που προσπίπτουν σε μια κεκλιμένη επιφάνεια για τον περαιτέρω υπολογισμό της ισχύος εξόδου ενός φωτοβολταϊκού συλλέκτη.

Στο 1<sup>ο</sup> μέρος της εργασίας αυτής, χρησιμοποιώντας ωριαία δεδομένα ολικής ηλιακής ακτινοβολίας και ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας για την περιοχή της Αθήνας για το έτος 2004, υπολογίζονται οι συνιστώσες της ολικής ακτινοβολίας, διάχυτη και άμεση με τη χρήση διάφορων ωριαίων συσχετίσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία μεταξύ του συντελεστή αιθριότητας  $K_T = \frac{I}{I_{oh}}$  και του ποσοστού της διάχυτης προς

την ολική ακτινοβολία  $\frac{I_d}{I}$ .

Τα αποτελέσματα από τις διαφορετικές συσχετίσεις, συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με καταγεγραμμένες τιμές διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας, ώστε να γίνει μια ποιοτική εκτίμηση για τη χρήση της καταλληλότερης συσχέτισης για τη συγκεκριμένη περιοχή.

#### 3.1.2 Μοντέλο

Στο παρακάτω κεφάλαιο περιγράφεται το μοντέλο που διαμορφώθηκε σε περιβάλλον Matlab, πάνω στο οποίο εργαστήκαμε και βγάλαμε όλα τα συμπεράσματα.

Αρχικά εισάγαμε τα εξής δεδομένα:

$f_{PV}$ : ο συντελεστής μείωσης της απόδοσης του συλλέκτη, λόγω υψηλών θερμοκρασιών, σκόνης στην επιφάνεια του συλλέκτη κλπ. Θέτουμε  $f_{PV}=0.9$

$Y_{PV}$ : η ονομαστική ισχύς του συλλέκτη. Θέτω  $Y_{PV}=1$

$I_s$ : η ακτινοβολία ενός ήλιου ίση με  $1kW/m^2$

$\phi$ : το γεωγραφικό πλάτος της θέσης του παρατηρητή(σε μοίρες). Θέτουμε  $\phi=37.97$

Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Περιγραφή του Υπολογιστικού Μοντέλου και των Βιβλιογραφικών  
Συσχετίσεων

$L_{loc}$ : το γεωγραφικό μήκος της θέσης του παρατηρητή(σε μοίρες). Θέτουμε

$$L_{loc} = 23,79$$

GMT: η τοπική ωρολογιακή ζώνη αριστερά του GMT σε ώρες. Για την Ελλάδα +2

$r_g$ : η αντανάκλαση του εδάφους ίση με 0.2

$g$ : η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνειά του και την κατεύθυνση προς νότο(σε μοίρες)( $g=0$ )

$\beta$ : η κλίση του συλλέκτη, δηλαδή η γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο(σε μοίρες). Θέτουμε  $\beta=32^\circ$

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα που εισάγουμε, υπολογίζουμε την ωριαία ολική ηλιακή ακτινοβολία  $I$  ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )

Στη συνέχεια ανά ημέρα για όλο το χρόνο υπολογίζεται η ηλιακή απόκλιση  $\delta$ , το  $E$  (εξίσωση χρόνου) και το  $G_{on}$  που είναι η ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια σε  $\text{kW}/\text{m}^2$ .

Ανάλογα, υπολογίζεται ανά ώρα για μια μέρα του έτους η ηλιακή απόκλιση  $\delta$ , το  $E$ , το  $G_{on}$  και ο ηλιακός χρόνος  $t_s$

Τέλος, ανά ώρα για όλο το έτος υπολογίζονται τα εξής:

Η ωριαία γωνία του ήλιου -σε μοίρες- ( $\omega$ ), η ωριαία γωνία του ήλιου στην αρχή της ώρας ( $\omega_1$ ), η ωριαία γωνία του ήλιου στο τέλος της ώρας ( $\omega_2$ ), η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ήλιου στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη, η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ήλιου σε μια οριζόντια επιφάνεια που ονομάζεται ζενιθιακή γωνία, το ποσοστό της ακτινικής ακτινοβολίας που πέφτει στην κεκλιμένη επιφάνεια προς αυτή που υπολογίζεται στην οριζόντια επιφάνεια ( $R_b$ ).

Οι εξισώσεις οι οποίες υπολογίζουν τα παραπάνω είναι οι εξής:

Η ωριαία γωνία του ήλιου  $\omega$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega = (t_s - 12)15 \quad (3.1)$$

Η ωριαία γωνία του ήλιου στην αρχή της ώρας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_1 = (t_s - 0.5 - 12)15 \quad (3.2)$$

και στο τέλος της ώρας από τη σχέση:

Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Περιγραφή του Υπολογιστικού Μοντέλου και των Βιβλιογραφικών Συσχετίσεων

$$\omega_1 = (t_s + 0.5 - 12)15 \quad (3.3)$$

όπου  $t_s$ , ο ηλιακός χρόνος σε ώρες.

Η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ήλιου στο φωτοβολταϊκό συλλέκτη είναι:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \\ & \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \\ & \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3.4)$$

όπου:

$\theta$ , η γωνία πρόσπτωσης της ακτινικής(ή άμεσης) ακτινοβολίας του ήλιου, δηλαδή η γωνία των ηλιακών ακτίνων με την κάθετο στην επιφάνεια του συλλέκτη,

$\phi$ , το γεωγραφικό πλάτος της θέσης ( $-90^\circ < \phi < 90^\circ$ )

$\omega$ , η ωριαία γωνία του ήλιου,

$\beta$ , η γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο,(ονομάζεται κλίση του συλλέκτη), και τέλος

$\gamma$ , η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνειά του και την κατεύθυνση προς νότο(ονομάζεται αζιμούθια γωνία του συλλέκτη).

Η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ήλιου σε μια οριζόντια επιφάνεια που ονομάζεται ζενιθιακή γωνία είναι:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (3.5)$$

όπου:  $\delta$  η ηλιακή απόκλιση (η γωνία μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα της γης και του ήλιου και του επιπέδου του ισημερινού και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 \sin \frac{360(284 + n)}{365} \quad (3.6)$$

όπου  $n=1$  (1<sup>η</sup> Ιανουαρίου) έως 365 (31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου) ημέρα του έτους.

Τέλος το ποσοστό της ακτινικής ακτινοβολίας που πέφτει στην κεκλιμένη επιφάνεια προς αυτή που υπολογίζεται στην οριζόντια επιφάνεια ( $R_b$ ), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.7)$$

Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Περιγραφή του Υπολογιστικού Μοντέλου και των Βιβλιογραφικών Συσχετίσεων

Υπολογίζουμε στη συνέχεια με βάση τα παραπάνω, την ωριαία μέση ηλιακή ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο σε κάθε ώρα του χρόνου  $I_{oh}$  από τη σχέση:

$$I_{oh} = \frac{12}{\pi} G_{on} [\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi}{180} (\omega_2 - \omega_1) \sin \delta \sin \phi] \quad (3.8)$$

Τέλος υπολογίζεται, ο συντελεστής αιθριότητας της ατμόσφαιρας  $K_T = \frac{I}{I_{oh}}$ .

Μετά μέσω διαφορετικών συσχετίσεων, όπως του Erbs ή του Page, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο 3.2, υπολογίζουμε την διάχυτη ακτινοβολία  $I_d$  και την ακτινική ακτινοβολία  $I_b$  ως τη διαφορά μεταξύ του  $I$  και του  $I_d$

Οι τελικοί υπολογισμοί έχουν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά του Φ/Β συλλέκτη, όπως οι συντελεστές  $A_i$  και  $f$ , η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη  $I_T$  και τέλος η ισχύς εξόδου του Φ/Β συλλέκτη  $P_{PV}$ , τα οποία υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$A_i = \frac{I_b}{I_{oh}} \quad (3.9)$$

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \quad (3.10)$$

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) [1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right)] + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.11)$$

$$P_{PV} = f_{PV} Y_{PV} \left( \frac{I_T}{I_S} \right) \quad (3.12)$$

όπου  $\rho_g$ , ο συντελεστής ανάκλασης από το έδαφος

$f_{PV}$ , ο συντελεστής μείωσης της αποδόσεως του συλλέκτη, λόγω

υψηλών θερμοκρασιών, σκόνης στην επιφάνεια του συλλέκτη κλπ.

$Y_{PV}$ , η ονομαστική ισχύς του συλλέκτη

$I_T$ , η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια του

συλλέκτη, όπως έχει υπολογισθεί

$I_S$ , η ακτινοβολία ενός ήλιου ίση με  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ .

## 3.2 Βιβλιογραφικές συσχετίσεις

### 3.2.1 Εισαγωγή

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται οι βιβλιογραφικές συσχετίσεις μεταξύ του λόγου της διάχυτης και της ολικής ακτινοβολίας  $\frac{I_d}{I}$  και του συντελεστή αιθριότητας  $K_T$ .

### 3.2.2 Η συσχέτιση του Erbs (*Erbs et al, 1982*)

Σύμφωνα με την ωριαία συσχέτιση του Erbs, μεταξύ της διάχυτης ακτινοβολίας  $I_d$  και της ολικής ακτινοβολίας  $I$ , ο λόγος  $\frac{I_d}{I}$  ως συνάρτηση μόνον του συντελεστή αιθριότητας  $K_T$ , δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09K_T & K_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604K_T + 4.388K_T^2 - 16.638K_T^3 + 12.336K_T^4 & \text{για } 0.22 < K_T \leq 0.80 \\ 0.165 & K_T > 0.80 \end{cases} \quad (3-13)$$

Ο Erbs σύλλεξε δεδομένα για τέσσερις πόλεις των Η.Π.Α όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:



Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Περιγραφή του Υπολογιστικού Μοντέλου και των Βιβλιογραφικών Συσχετίσεων

**Πίνακας 3.1** Δεδομένα των πόλεων και χρονική διάρκεια των δεδομένων για τη συσχέτιση του Erbs

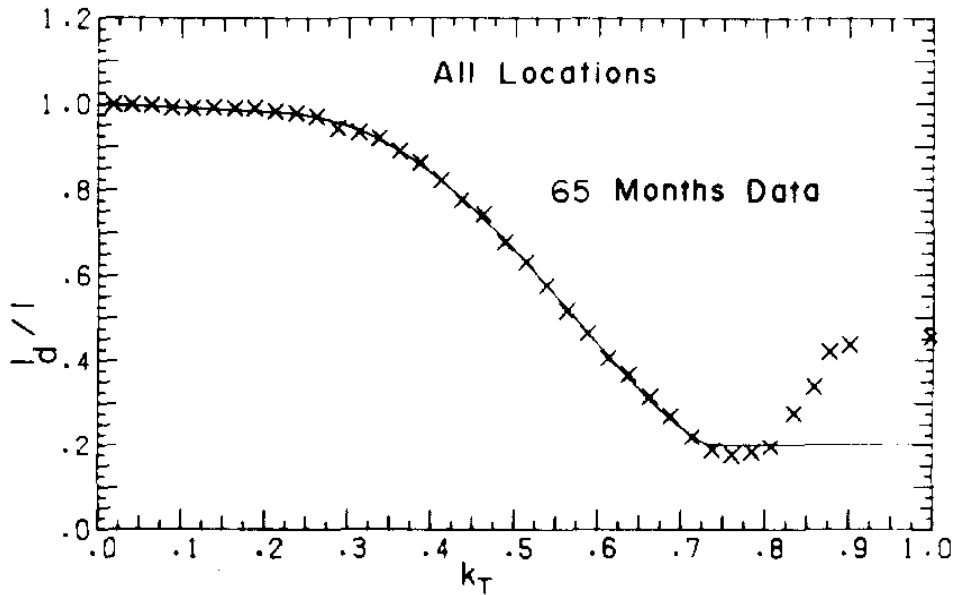
Station Name	Fort Hood TX	Livermore CA	Raleigh NC	Maynard MA	Albuquerque NM
Station Number	03902	32899	32900	-0042	23050
Latitude (Deg.N)	31.08	37.70	35.87	42.42	35.05
Longitude (Deg.W)	97.85	121.70	78.78	71.48	106.62
Altitude(ft)	1080	486	441	203	5314
Data Period Begin (Day/Mo/Yr)	1/9/74	1/8/74	20/3/75	1/1/75	1/1/61
Data Period End (Day/Mo/Yr)	30/6/76	30/10/75	1/4/76	31/12/76	31/12/64

Τα δεδομένα που χρησιμοποίησε για την εξαγωγή της συσχέτισής του και που αφορούν τις παραπάνω πόλεις περιλαμβάνουν για κάθε ώρα την άμεση ακτινοβολία, την ολική ακτινοβολία, το μέσο ηλιακό ύψος, την κλίση, την ημερομηνία και την ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας.

Αυτά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν εξετάστηκαν ως προς τους εξής περιορισμούς:

Για το αν η ολική ακτινοβολία μετά τη δύση και πριν την ανατολή είναι μηδενική, αν η άμεση ξεπερνά την ολική, αν η ολική είναι μεγαλύτερη από την ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας και τέλος αν η άμεση είναι μηδέν όταν έχουμε μεγάλο  $K_T$ .

Τα δεδομένα που παρουσίαζαν τα παραπάνω χαρακτηριστικά (λιγότερο από 1%), διαγράφηκαν.

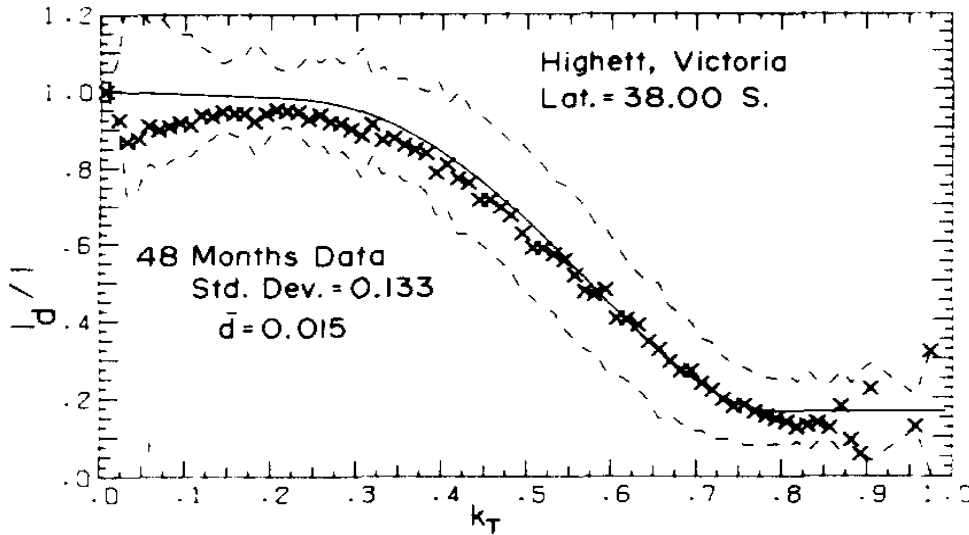


**Διάγραμμα 3.1** Ωριαία συσχέτιση του Erbs μεταξύ  $\frac{I_d}{I}$  και  $K_T$  συγκρινόμενη με μέσα ωριαία δεδομένα για τις ΗΠΑ.

Ο Erbs διαπίστωσε ότι το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας προς την ολική  $\frac{I_d}{I}$ , σχετίζεται άμεσα με το  $K_T$ , το οποίο είναι ένας δείκτης αιθριότητας της ατμόσφαιρας. Γενικά, όσο πιο καθαρή είναι η ατμόσφαιρα, τόσο λιγότερο ποσοστό της ολικής ακτινοβολίας διαχέεται, δηλαδή έχουμε λιγότερο  $I_d$ .

Βρέθηκαν οι μέσες ωριαίες τιμές  $\frac{I_d}{I}$  και  $K_T$  ανά διαστήματα  $K_T=0.025$  και παρουσιάστηκαν στο παραπάνω διάγραμμα, απ' όπου και εξήχθησαν οι αναλυτικές εξισώσεις.

Επίσης, για να επιβεβαιωθεί η δυνατότητα χρήσης της παραπάνω συσχέτισης σε περιοχές εκτός από αυτές τις 4, έγινε συλλογή δεδομένων από την περιοχή Highett, Victoria, Australia με γεωγραφικό πλάτος  $38^\circ$  νότια για τα έτη 1966-69:



**Διάγραμμα 3.2** Σύγκριση των ωριαίων δεδομένων για την πόλη του Highett, Victoria με τη συσχέτιση του Erbs μεταξύ  $\frac{I_d}{I}$  και  $K_T$

### 3.2.3 Η συσχέτιση του Page (Page J, 1961)

Σύμφωνα με τη μηνιαία συσχέτιση του Page μεταξύ της διάχυτης ακτινοβολίας  $I_d$  και της ολικής ακτινοβολίας  $I$ , ο λόγος  $\frac{I_d}{I}$  ως συνάρτηση μόνον του συντελεστή αιθριότητας  $K_T$ , δίνεται από την εξίσωση:

$$\begin{aligned} \frac{I_d}{I} &= 0 \text{ για } K_T \geq \frac{1.0}{1.13} \\ \frac{I_d}{I} &= 1.0 - 1.13K_T \end{aligned} \quad (3.14)$$

### 3.2.4 Η συσχέτιση των Orgill and Hollands (Orgill and Hollands, 1977)

Σύμφωνα με την ωριαία συσχέτιση των Orgill and Hollands μεταξύ της διάχυτης ακτινοβολίας  $I_d$  και της ολικής ακτινοβολίας  $I$ , ο λόγος  $\frac{I_d}{I}$  ως συνάρτηση μόνον του συντελεστή αιθριότητας  $K_T$ , δίνεται από την εξίσωση:

Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Περιγραφή του Υπολογιστικού Μοντέλου και των Βιβλιογραφικών Συσχετίσεων

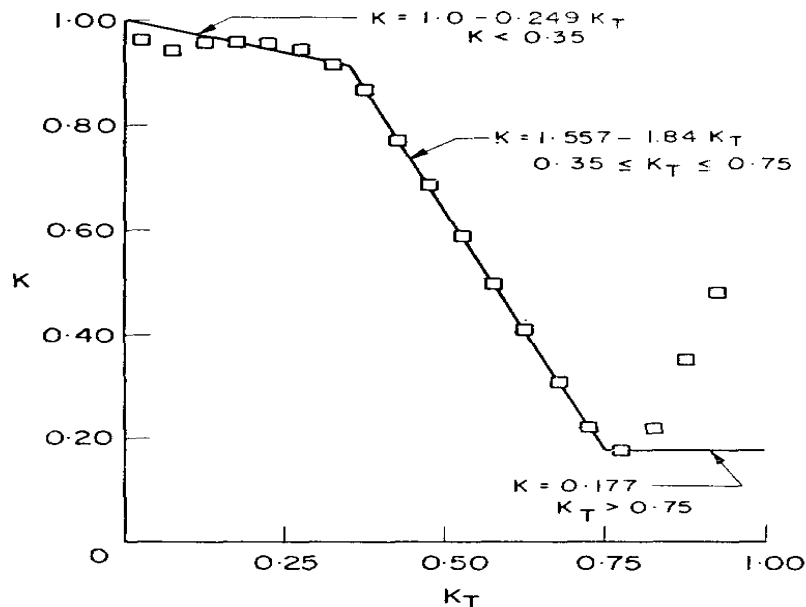
$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.557 - 1.84K_T & 0.35 \leq K_T \leq 0.75 \\ 0.177 & \text{για } K_T > 0.75 \\ 1.0 - 0.249K_T & 0 \leq K_T \leq 0.35 \end{cases} \quad (3.15)$$

Οι Orgill and Hollands, βασίστηκαν σε ωριαία δεδομένα για το Τορόντο του Καναδά. Συγκεκριμένα, συνέλεξαν τιμές ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια στο αεροδρόμιο του Τορόντο για την περίοδο από το Σεπτέμβριο του 1967 έως τον Αύγουστο του 1971.

Από αυτές, το κλάσμα  $K_T$  της ολικής ωριαίας ακτινοβολίας προς την ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας, μετρήθηκαν για κάθε ώρα, όπως επίσης και το κλάσμα  $\frac{I_d}{I}$ .

Στη συνέχεια, για διαστήματα  $K_T$  0.05, ομαδοποιήθηκαν οι τιμές του  $K$  και έγινε το αντίστοιχο διάγραμμα.

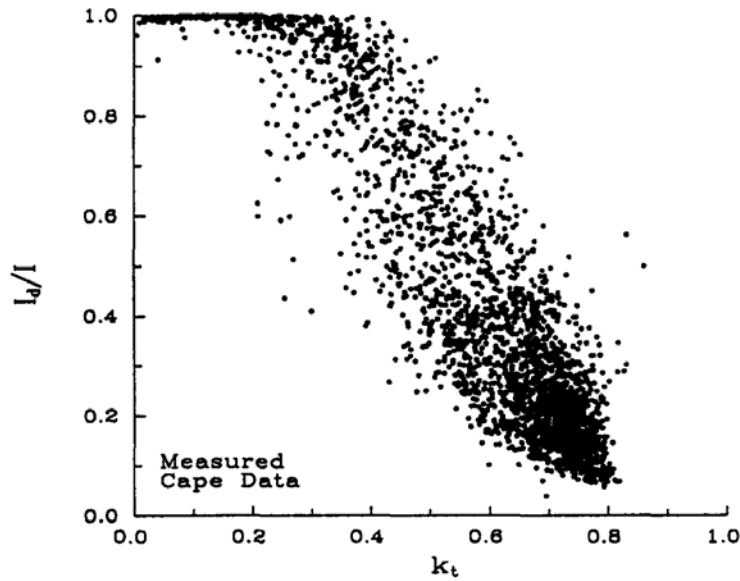
Λόγω σφαλμάτων στα όργανα μετρήσεως, κάποιες τιμές  $I$  δεν λήφθηκαν υπόψη, ώστε τελικά η συσχέτιση να γίνει για 12,704 ωριαίες περιόδους.



**Διάγραμμα 3.3** Διάγραμμα  $\frac{I_d}{I}$  και  $K_T$  με τις εξισώσεις της προτεινόμενης συσχέτισης των

Orgill and Hollands

### 3.2.5 Η συσχέτιση του Reindl (Reindl et al, 1990)



Διάγραμμα 3.4 Measured diffuse fraction vs. clearness index for Cape Canaveral, FL. for Reindl's correlation

Σύμφωνα με την ωριαία συσχέτιση του Reindl, μεταξύ της διάχυτης ακτινοβολίας  $I_d$  και της ολικής ακτινοβολίας  $I$ , ο λόγος  $\frac{I_d}{I}$  ως συνάρτηση μόνον του συντελεστή αιθριότητας  $K_T$ , δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.020 - 0.248K_T & 0 \leq K_T \leq 0.3 \\ 1.45 - 1.67K_T & \text{για } 0.3 < K_T < 0.78 \\ 0.147 & 0.78 \leq K_T \end{cases} \quad (3.16)$$

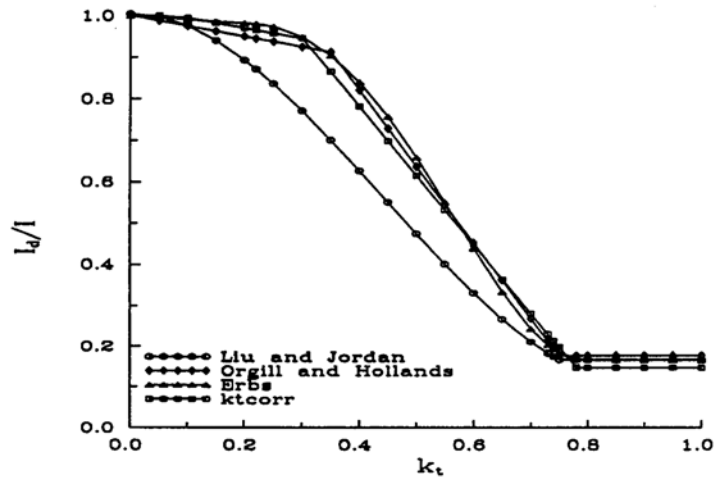
Ο Reindl συνέλεξε δεδομένα από 5 τοποθεσίες της Ευρώπης και της Αμερικής, όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.2 Πίνακας δεδομένων για τη συσχέτιση του Reindl

Site Location	United States		European			
	Albany	Cape Canaveral	Copenhagen	Hamburg	Valentia	Oslo
Latitude	42.7° north	28.4° north	55.7° north	53.5° north	51.95° north	59.56° north
Longitude	73.8° west	80.6° west	12.6° east	10.0° east	10.22° west	10.41° east
Standard Meridian	75.0° west	75.0° west	15.0° east	15.0° east	0.0°	15.0° east
Data Period (From)	1/1/79	1/1/80	1/1/*	1/1/*	1/1/*	1/1/79
Data Period (To)	12/31/82	12/31/80	12/31/*	12/31/*	12/31/*	12/31/79

\* Year of dataset unknown.

Στο παρακάτω διάγραμμα, παρουσιάζεται η συσχέτιση του Reindl όπως και των Erbs, Liu and Jordan και Orgill and Hollands. Όλες οι παραπάνω συσχετίσεις εξήχθησαν με τον ίδιο τρόπο, χρησιμοποιώντας όμως ένα διαφορετικό σύνολο δεδομένων.



Διάγραμμα 3.5 Σύγκριση συσχετίσεων μεταξύ  $\frac{I_d}{I}$  και  $K_T$  για τη συσχέτιση του Reindl

### 3.2.6 Η συσχέτιση της Καρατάσου (Karatasou et al, 2003)

Σύμφωνα με τη συσχέτιση της Καρατάσου, μεταξύ της διάχυτης ακτινοβολίας  $I_d$  και της ολικής ακτινοβολίας  $I$ , ο λόγος  $\frac{I_d}{I}$  ως συνάρτηση μόνον του συντελεστή αιθριότητας  $K_T$ , δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.4926K_T^3 - 2.4156K_T^2 - 0.05K_T + 0.9995 \\ 0.20 \end{cases} \text{ για } \begin{cases} K_T \leq 0.78 \\ K_T > 0.78 \end{cases} \quad (3.17)$$

Τα δεδομένα ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκαν, προέρχονται από το Πανεπιστήμιο Αθηνών, στην Πεντέλη (39.049°B, 23.863°A και 500μ. από την επιφάνεια της θάλασσας), για την περίοδο από τον Ιανουάριο 1996 έως το Δεκέμβριο 1998.

Για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο περιορισμών, το οποίο απέκλισε ένα ποσοστό της τάξης του 7%, ώστε ο τελικός αριθμός των δεδομένων να ανέρχεται σε 9000 ωριαίες τιμές ολικής και διάχυτης ακτινοβολίας.

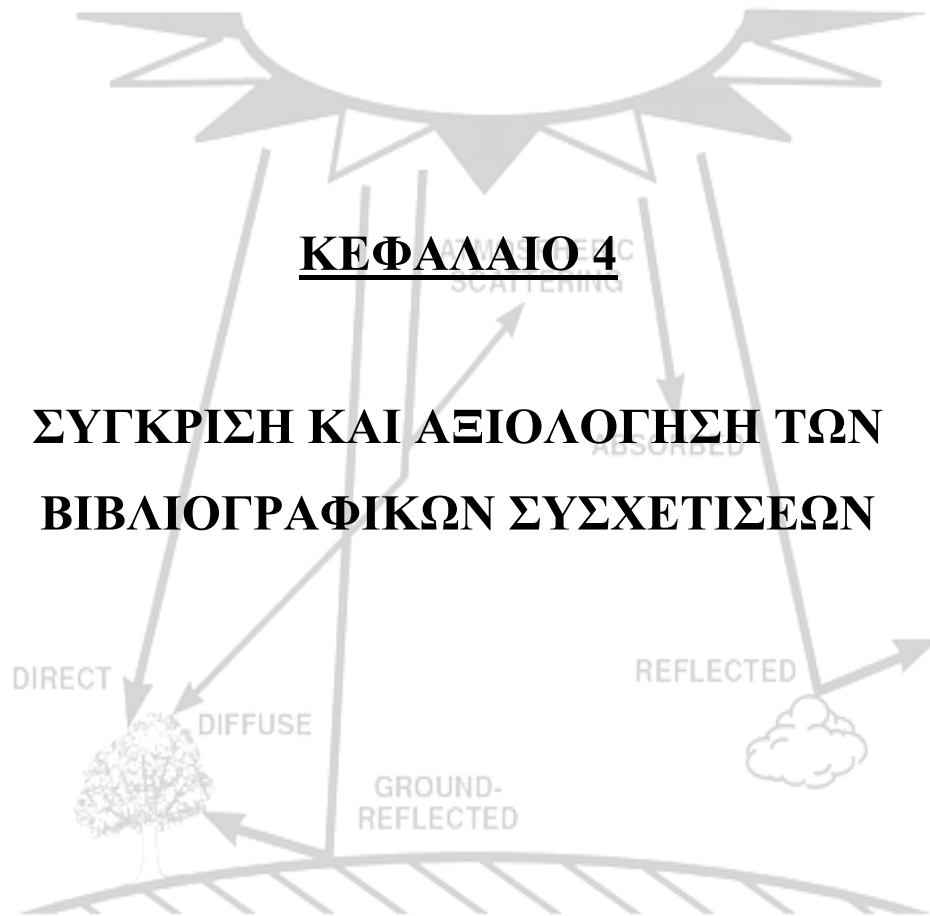
### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Περιγραφή του Υπολογιστικού Μοντέλου και των Βιβλιογραφικών Συσχετίσεων

Για ένα διάστημα  $K_T=0.0125$ , βρέθηκαν οι μέσες τιμές  $\frac{I_d}{I}$  και  $K_T$  και παρατέθηκε το σχετικό διάγραμμα απ' όπου και εξήχθη η συσχέτιση.

Η τυπική απόκλιση, ήταν της τάξης του 26%, ενώ για την αξιολόγηση του μοντέλου και την σύγκρισή του με άλλα υπολογίστηκε το μέσο σφάλμα και το ριζικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα, όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 3.3** Υπολογισμός RMSE και MBE για 5 συσχετίσεις για την εκτίμηση της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια

Συσχετίσεις	RMSE (Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος)	MBE (μέσο σφάλμα)
Karatasou	0.1763	0.0025
Orgill and Hollands	0.3995	-0.0317
Erbs et al	0.4079	0.0208
Reindl et al	0.1871	-0.0187
Liu and Jordan	0.2098	-0.0382





## 4.1 Εισαγωγή

Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα της εργασίας μας βγάλαμε διάφορα συμπεράσματα που αφορούν τα εξής:

- Σύγκριση των αποτελεσμάτων της διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας που προέκυψαν μέσω των συσχετίσεων του Page, του Erbs, των Orgill and Hollands, του Reindl, με τις καταγεγραμμένες τιμές. Η σύγκριση έγινε για όλο το έτος και χωρίστηκε σε εποχές και μετέπειτα σε χαρακτηριστικές μέρες. Δηλαδή μέρες με ήλιο, ημέρες με λίγα σύννεφα, ημέρες τελείως συννεφιασμένες όπως επίσης και μέρες με βροχή, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 4.1** Διαχωρισμός του έτους σε εποχές

<b>Εποχή</b>	<b>Περίοδος έτους</b>
Χειμώνας	21 Δεκεμβρίου-20 Μαρτίου
Άνοιξη	21 Μαρτίου-20 Ιουνίου
Καλοκαίρι	21 Ιουνίου-20 Σεπτεμβρίου
Φθινόπωρο	21 Σεπτεμβρίου-20 Δεκεμβρίου

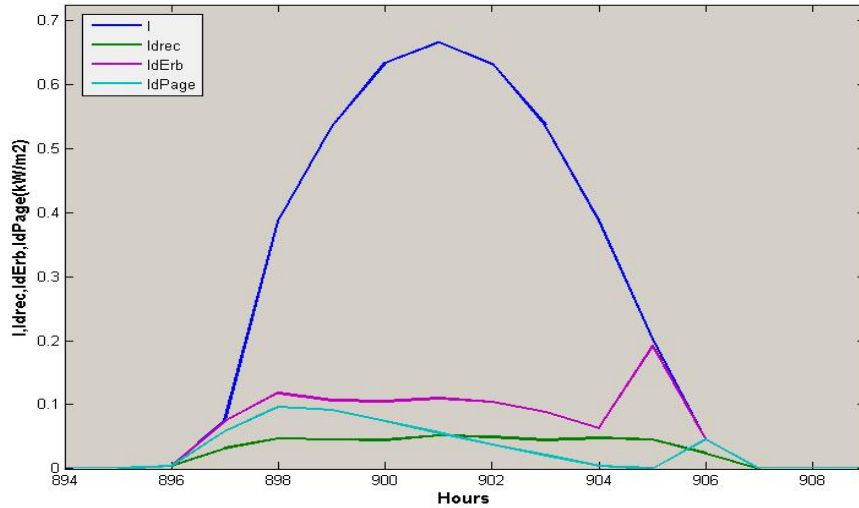
Για να είναι τα συμπεράσματά μας αξιόπιστα, μελετήσαμε αρκετά διαγράμματα από τις χαρακτηριστικές μέρες και παρουσιάσαμε τα αποτελέσματα μας σε πίνακες για ευκολότερη ανάγνωση.

- Σύγκριση των διαφορετικών συσχετίσεων μεταξύ τους και εξαγωγή συμπερασμάτων για το πια είναι καταλληλότερη για χρήση σε συγκεκριμένες ημέρες και ποια πρέπει να αποφεύγεται λόγω μεγάλης απόκλισής της από τα καταγεγραμμένα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε πίνακες.

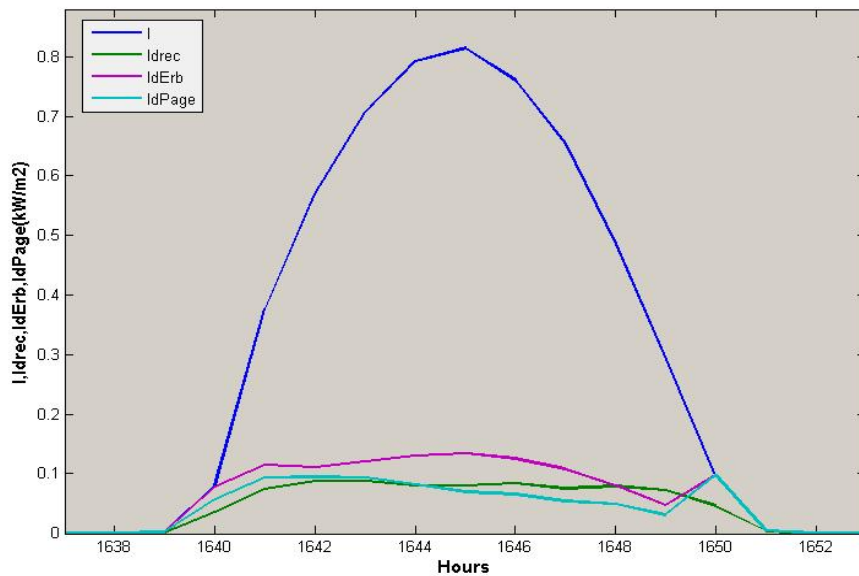
## 4.2 Σύγκριση των συσχετίσεων Page και Erbs

### 4.2.1 Χειμώνας

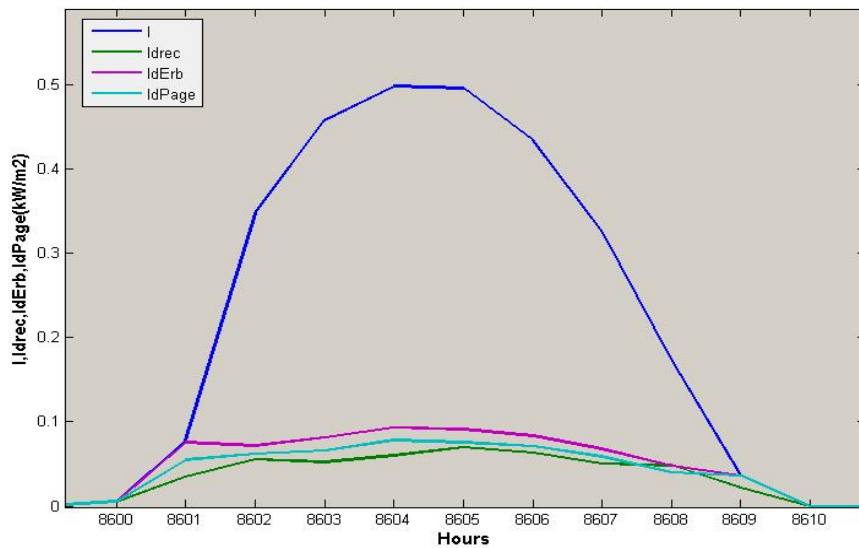
#### 4.2.1.1 Χειμώνας-ηλιόλουστες ημέρες



Διάγραμμα 4.1 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας-Ηλιόλουστη ημέρα



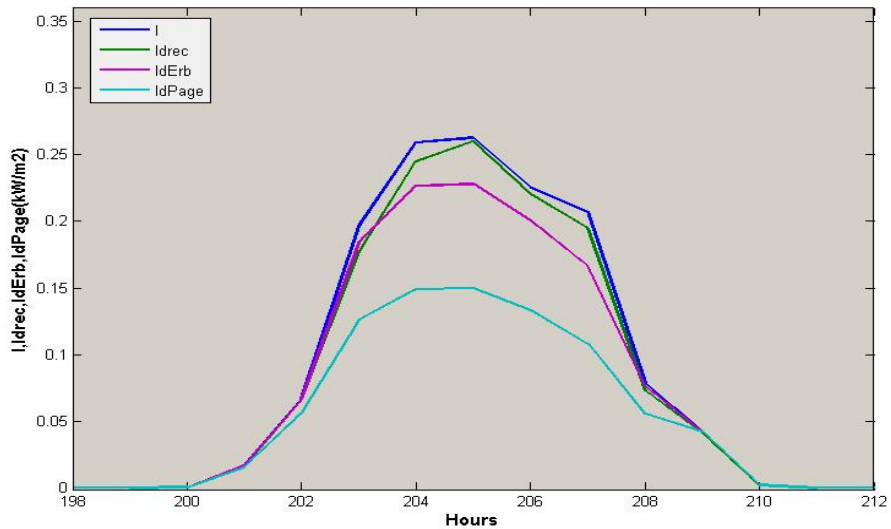
Διάγραμμα 4.2 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας-Ηλιόλουστη ημέρα



**Διάγραμμα 4.3** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Ηλιόλουστη ημέρα

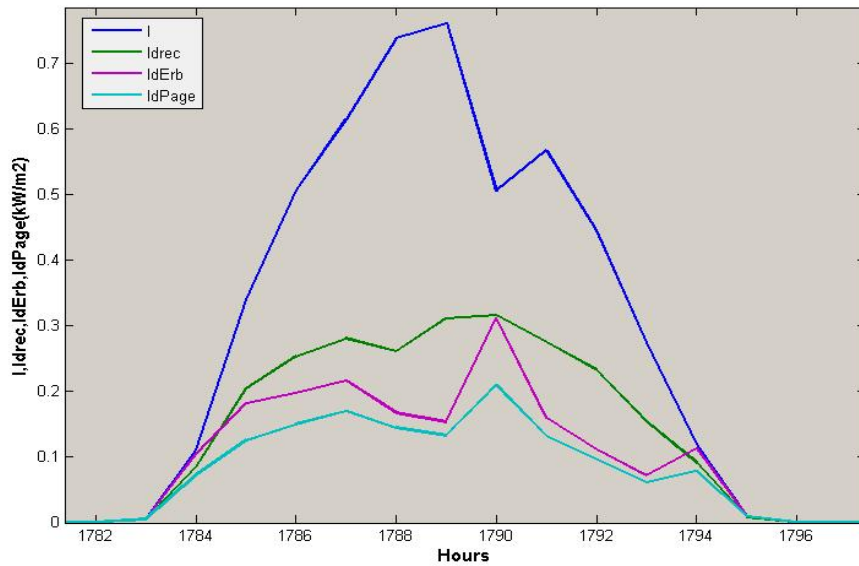
**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Page είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές από του Erbs.

#### 4.2.1.2 Χειμώνας-ημέρες με λίγα σύννεφα

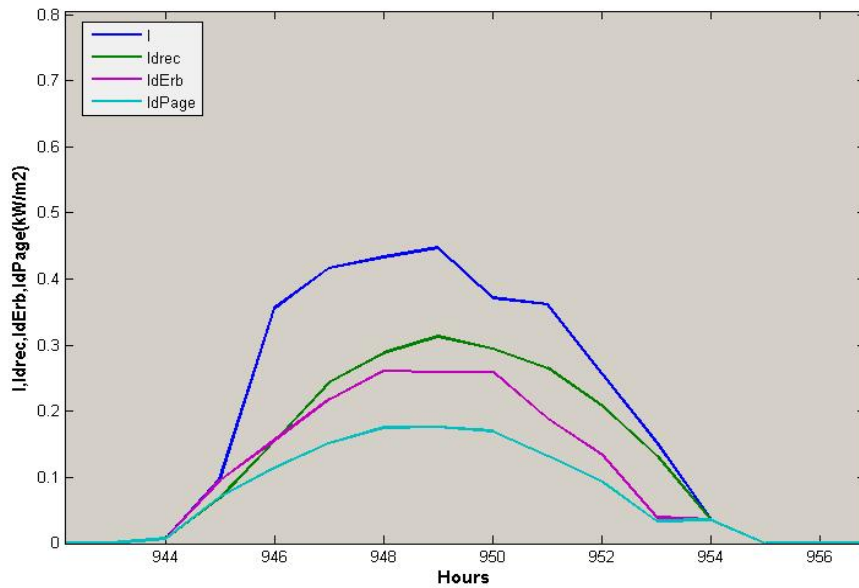


**Διάγραμμα 4.4** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Ημέρα με λίγα σύννεφα

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Σύγκριση και Αξιολόγηση των Βιβλιογραφικών Συσχετίσεων



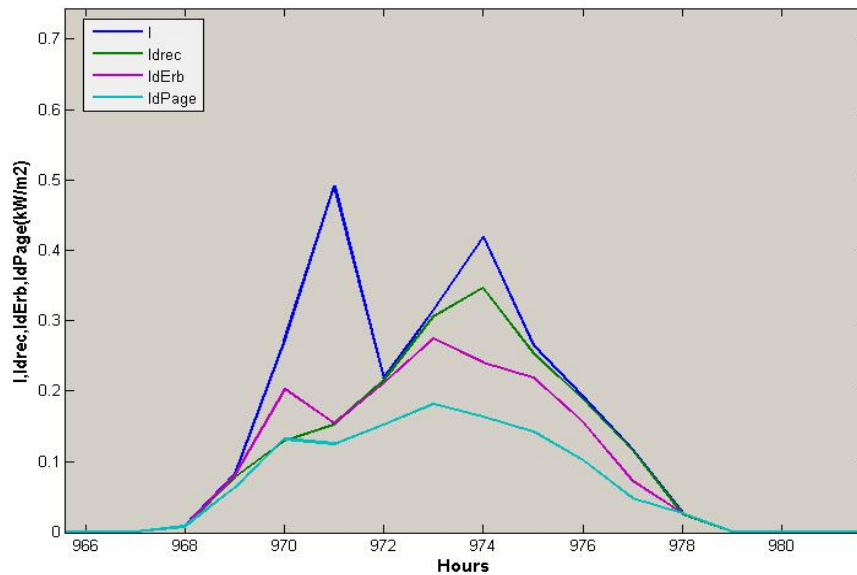
**Διάγραμμα 4.5** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας-  
Ημέρα με λίγα σύννεφα



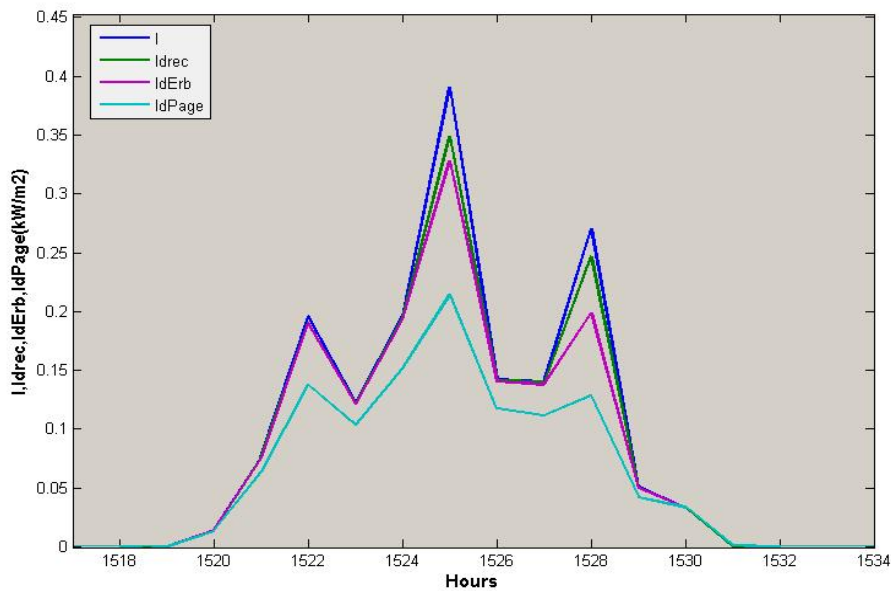
**Διάγραμμα 4.6** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας-  
Ημέρα με λίγα σύννεφα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές από του Page.

### 4.2.1.3 Χειμώνας-Συννεφιασμένες ημέρες



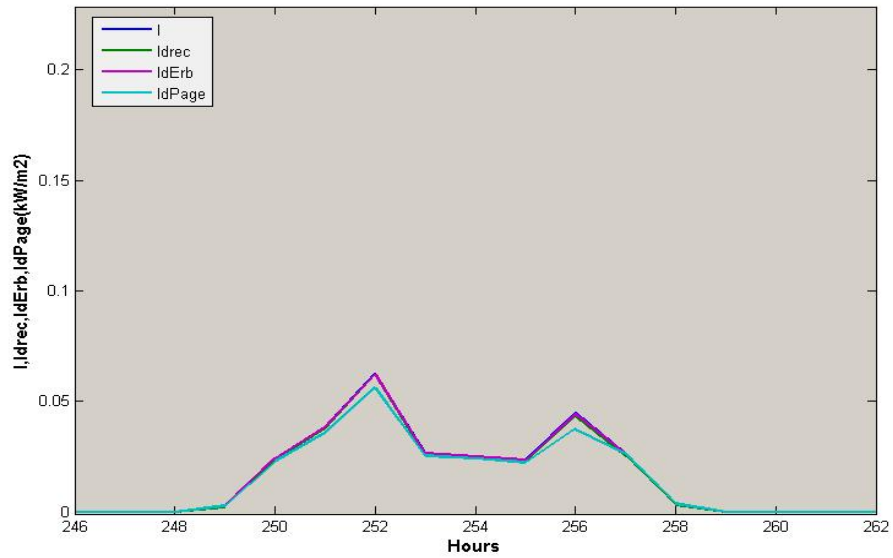
Διάγραμμα 4.7: Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Συννεφιασμένη ημέρα



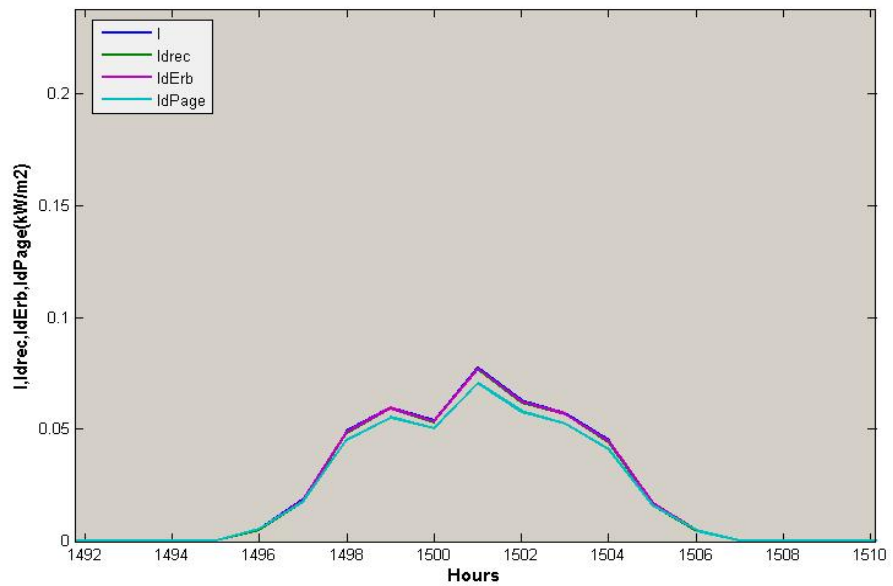
Διάγραμμα 4.8 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Συννεφιασμένη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές από τη συσχέτιση του Page.

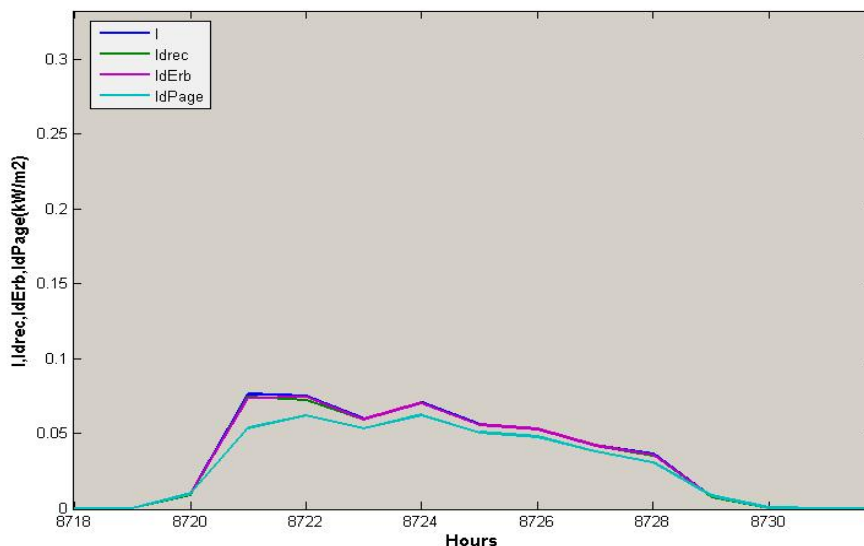
#### 4.2.1.4 Χειμώνας-βροχερές ημέρες



Διάγραμμα 4.9 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Βροχερή ημέρα



Διάγραμμα 4.10 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Βροχερή ημέρα



**Διάγραμμα 4.11** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Χειμώνας- Βροχερή ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs προσεγγίζει ακριβώς τις καταγεγραμμένες τιμές σε σχέση με τη συσχέτιση του Page.

#### 4.2.1.5 Χειμώνας-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει όλα τα συμπεράσματα που εξήχθησαν:

**Πίνακας 4.2** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το χειμώνα

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<b>Page</b>	☀☀	☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀
<b>Erbs</b>	☀☀	☀☀	☀☀☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀

☀: όχι καλή

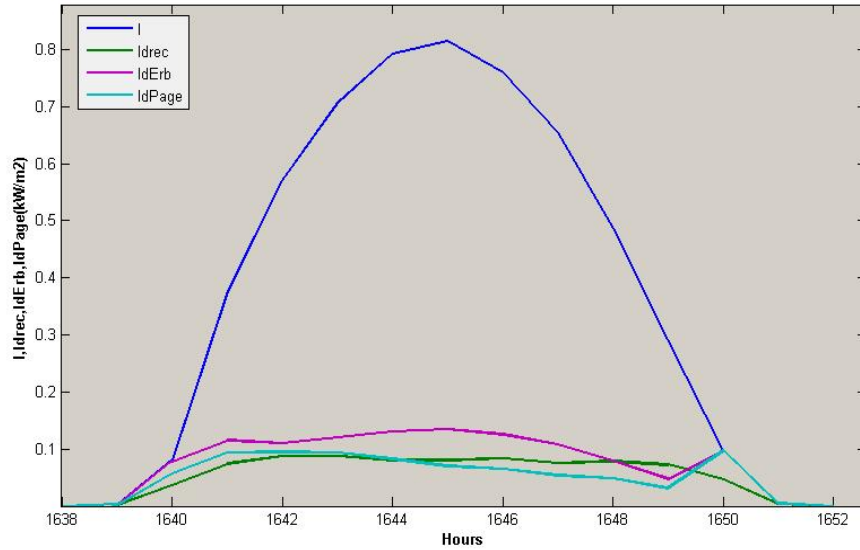
☀☀: καλή

☀☀☀☀: αρκετά καλή

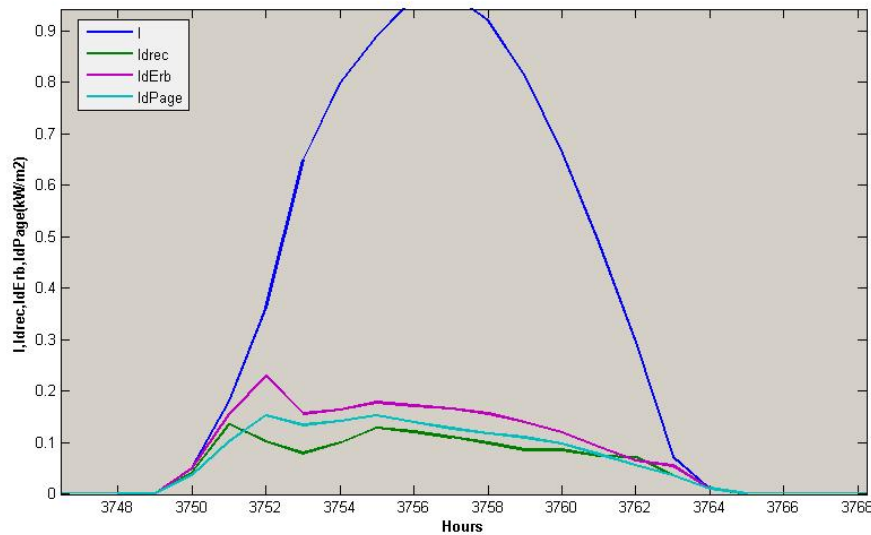
☀☀☀☀☀☀: πολύ καλή

## 4.2.2 Άνοιξη

### 4.2.2.1 Άνοιξη-ηλιόλουστες ημέρες



Διάγραμμα 4.12 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Ηλιόλουστη ημέρα

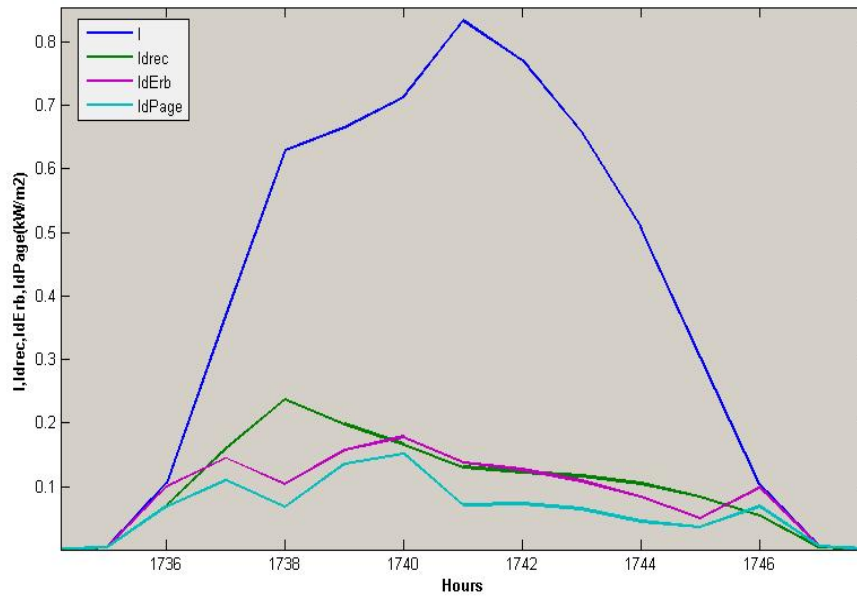


Διάγραμμα 4.13 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Ηλιόλουστη ημέρα

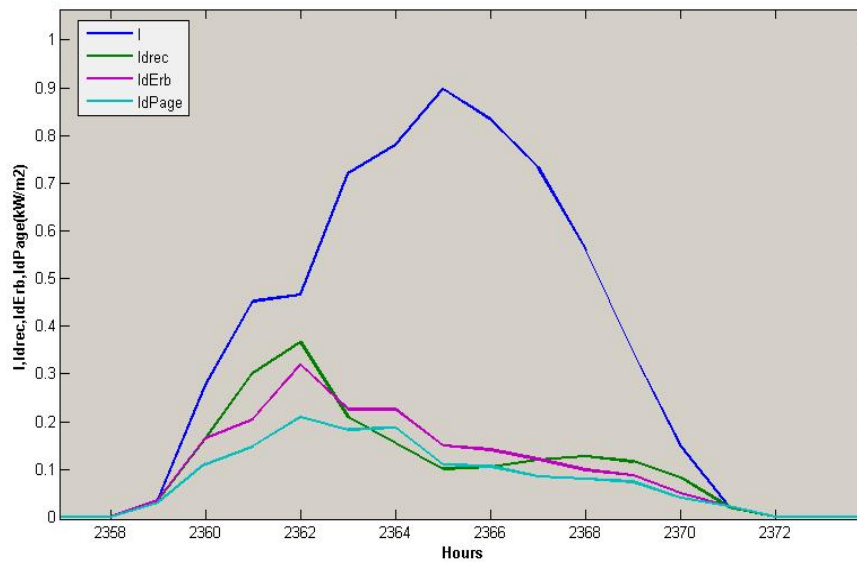
**Συμπέρασμα:** Η συσχέτιση του Page πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές από τη συσχέτιση του Erbs.



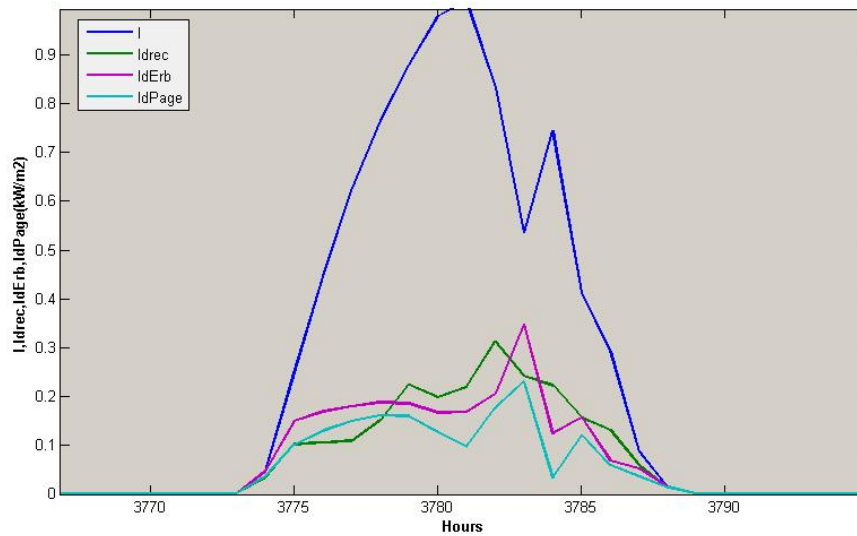
#### 4.2.2.2 Άνοιξη-ημέρες με λίγα σύννεφα



Διάγραμμα 4.14 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Ημέρα με λίγα σύννεφα



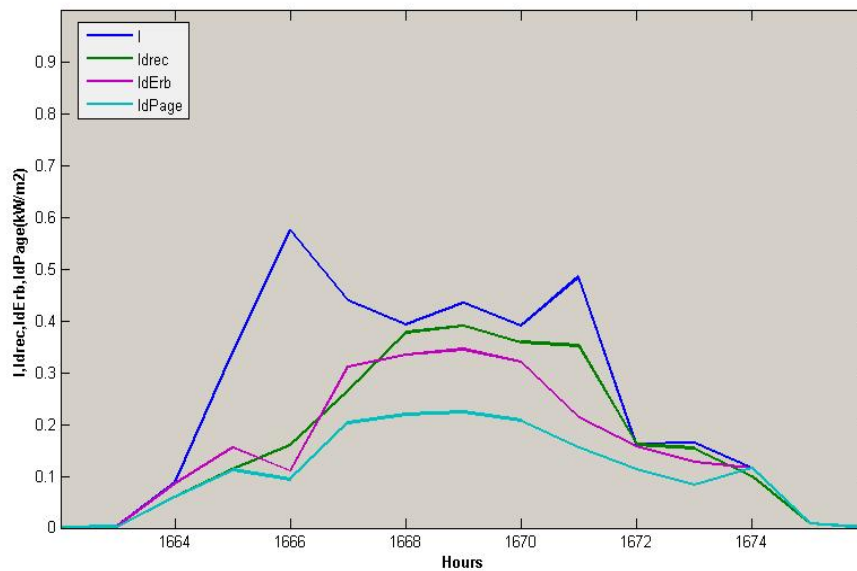
Διάγραμμα 4.15 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Ημέρα με λίγα σύννεφα



**Διάγραμμα 4.16** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Ημέρα με λίγα σύννεφα

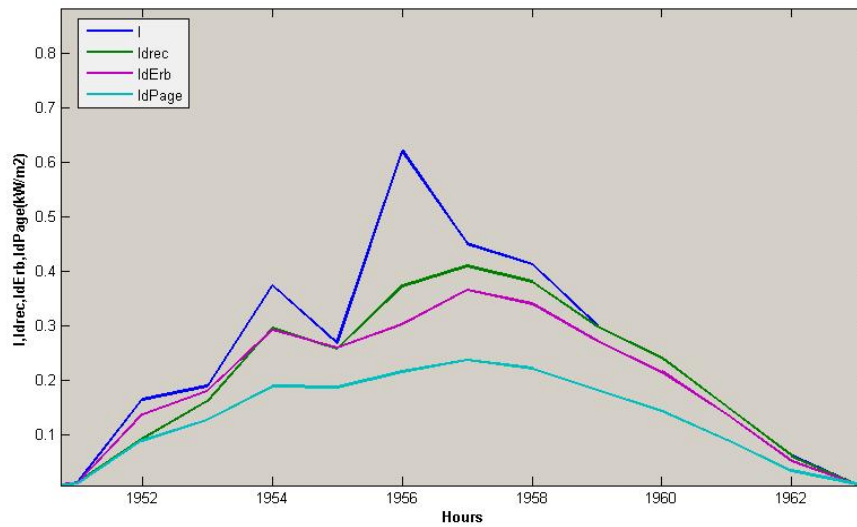
**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs πλησιάζει περισσότερο τις καταγεγραμμένες από τη συσχέτιση του Page.

#### 4.2.2.3 Άνοιξη-συννεφιασμένες ημέρες

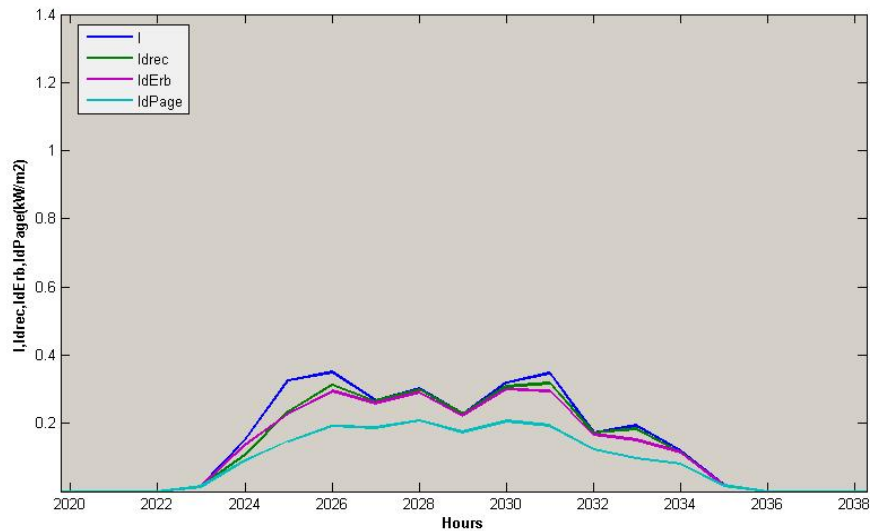


**Διάγραμμα 4.17** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Συννεφιασμένη ημέρα

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Σύγκριση και Αξιολόγηση των Βιβλιογραφικών Συσχετίσεων



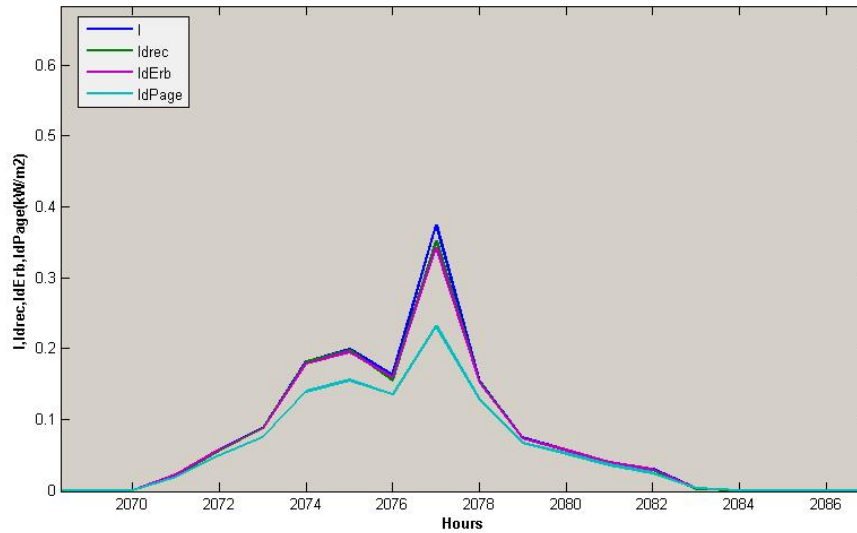
**Διάγραμμα 4.18** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Συννεφιασμένη ημέρα



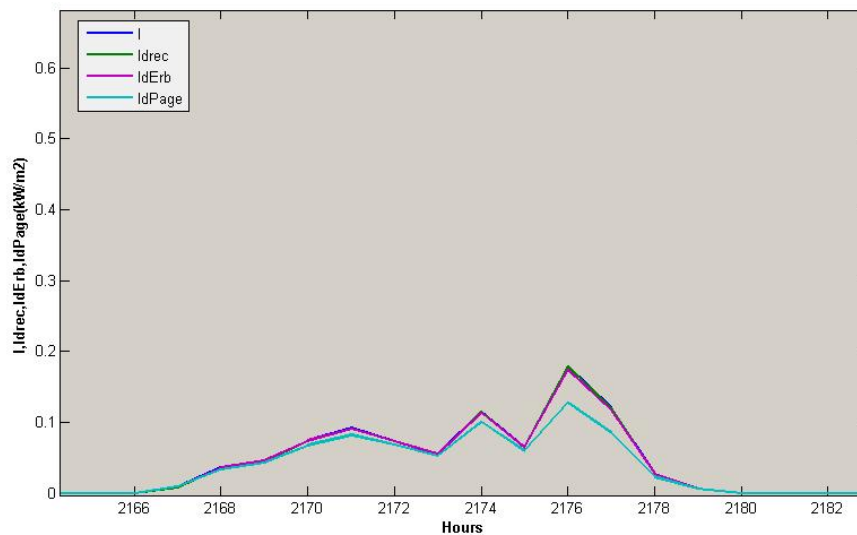
**Διάγραμμα 4.19** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Συννεφιασμένη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs είναι πολύ κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές σε σχέση με τη συσχέτιση του Page και είναι αξιόπιστη για τις συννεφιασμένες ημέρες της άνοιξης.

#### 4.2.2.4 Άνοιξη-βροχερές ημέρες



Διάγραμμα 4.20 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Βροχερή ημέρα



Διάγραμμα 4.21 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Άνοιξη- Βροχερή ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό η ακρίβεια της συσχέτισης του Erbs για τις βροχερές ημέρες της άνοιξης, ενώ η συσχέτιση του Page αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί δεν είναι τόσο ακριβής όσο του Erbs.

#### 4.2.2.5 Άνοιξη-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει όλα τα συμπεράσματα που εξήχθησαν:

**Πίνακας 4.3** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για την άνοιξη

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<i>Page</i>	☀	☀	☀☀	☀☀☀☀
<i>Erbs</i>	☀	☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀

☀: όχι καλή

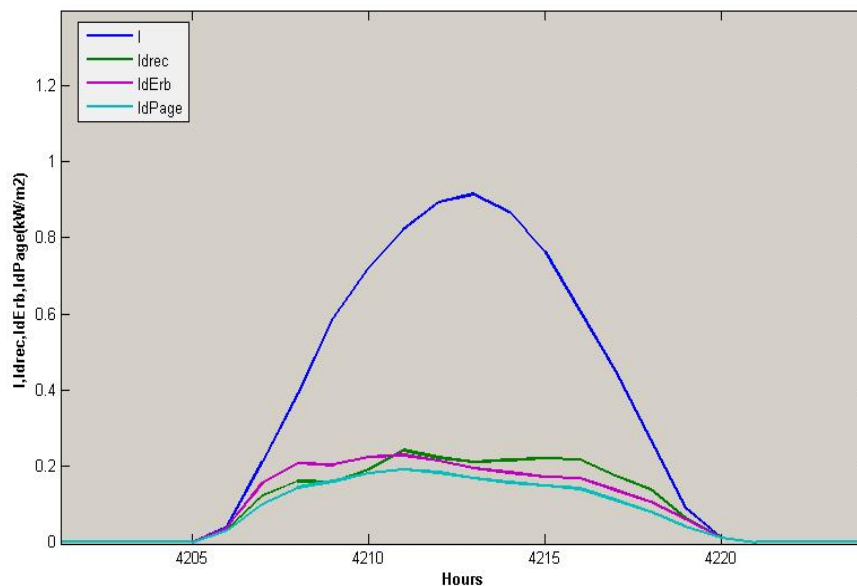
☀☀: καλή

☀☀☀☀: αρκετά καλή

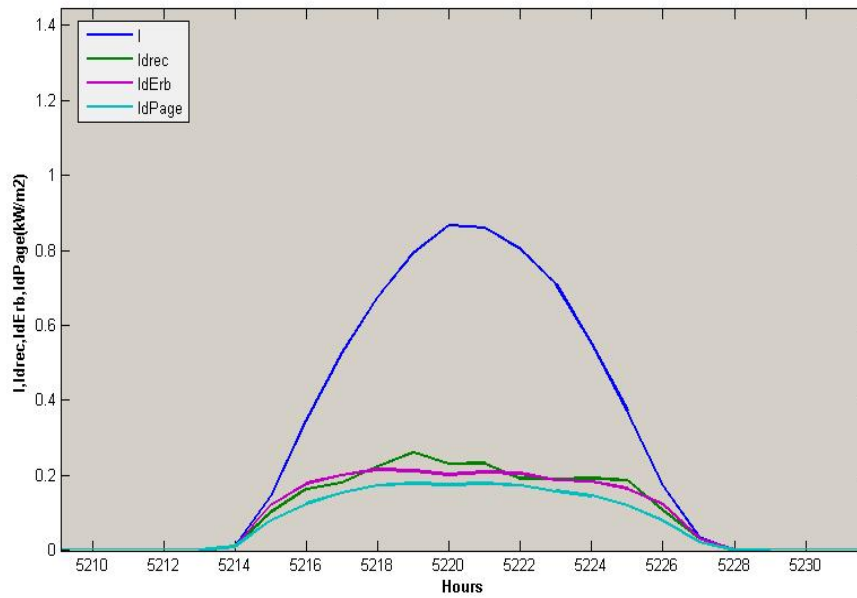
☀☀☀☀☀☀: πολύ καλή

#### 4.2.3 Καλοκαίρι

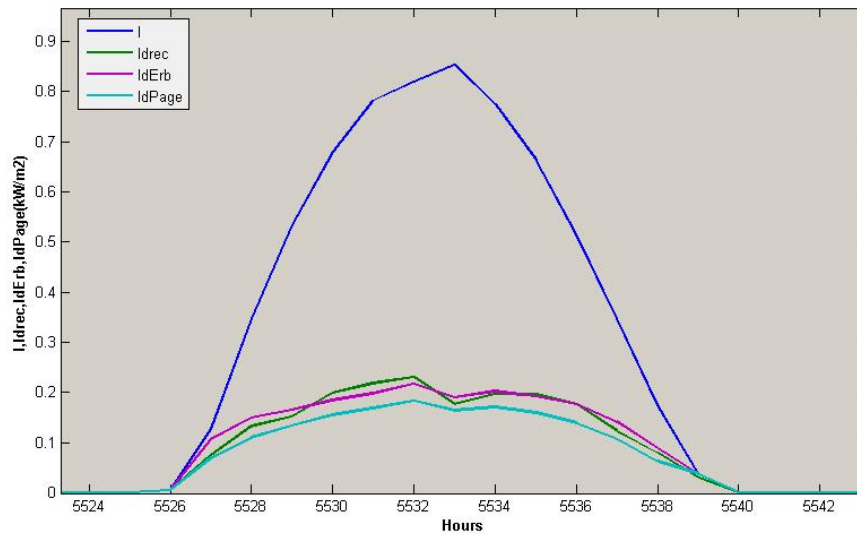
##### 4.2.3.1 Καλοκαίρι-ηλιόλουστες ημέρες



**Διάγραμμα 4.22** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα



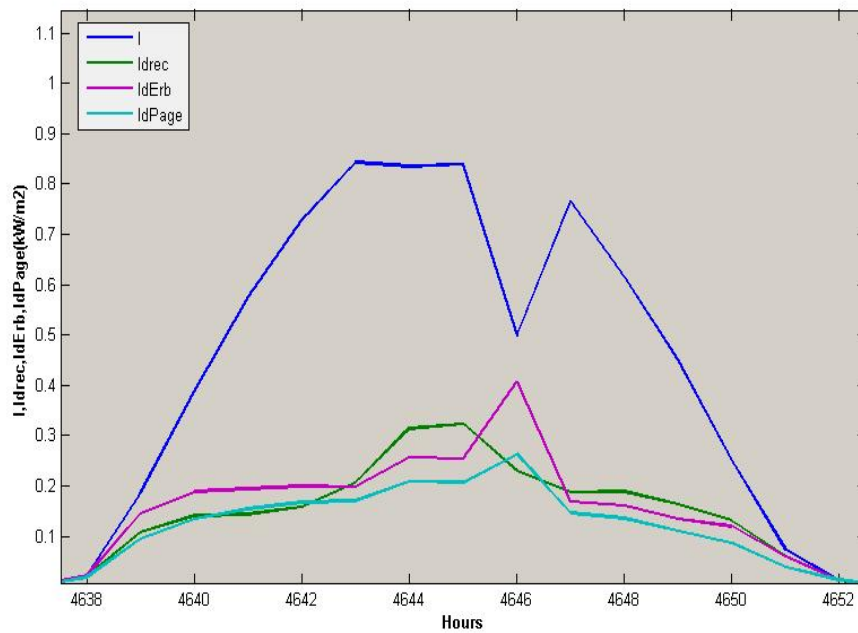
Διάγραμμα 4.23 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα



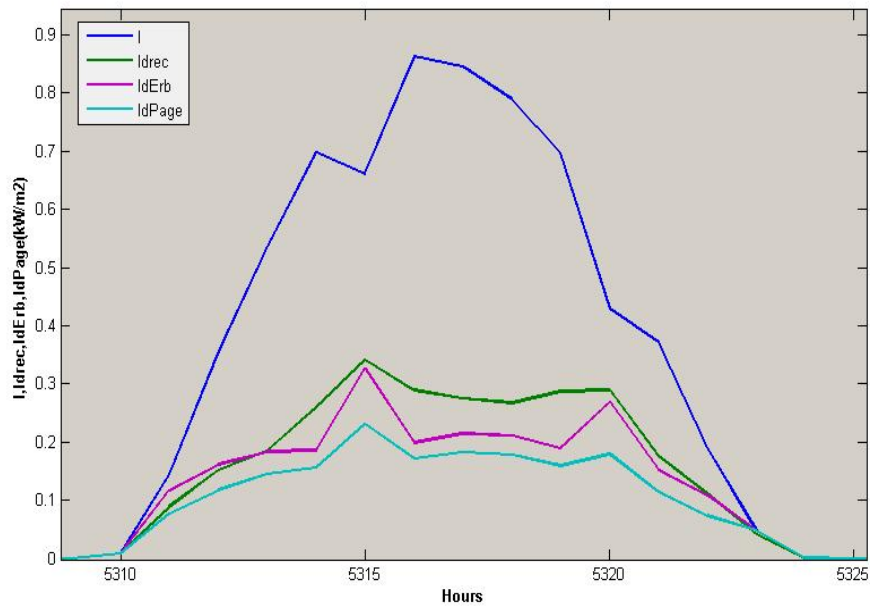
Διάγραμμα 4.24 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες από τη συσχέτιση του Page.

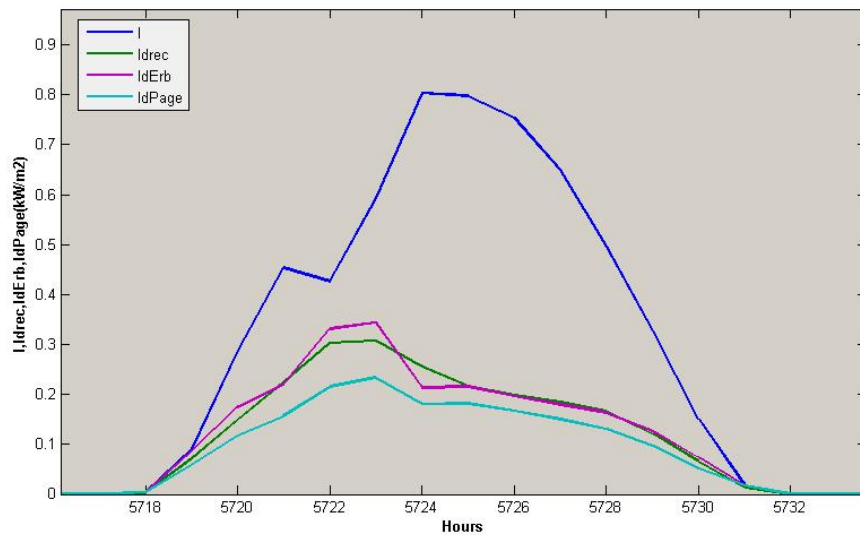
### 4.2.3.2 Καλοκαίρι-Ημέρες με λίγα σύννεφα



Διάγραμμα 4.25 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-  
Ημέρα με λίγα σύννεφα



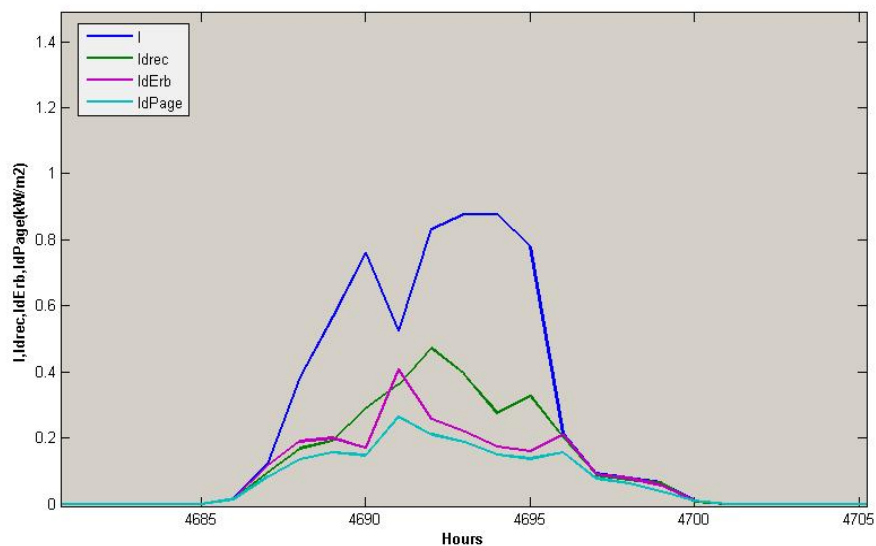
Διάγραμμα 4.26 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-  
Ημέρα με λίγα σύννεφα



**Διάγραμμα 4.27** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-  
Ημέρα με λίγα σύννεφα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs είναι πιο κοντά από τη συσχέτιση του Page.

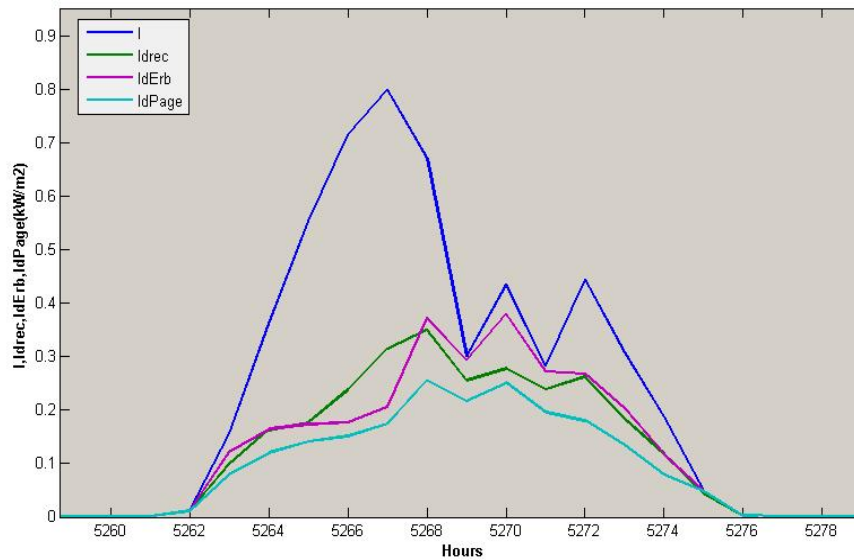
#### 4.2.3.3 Καλοκαίρι-Συννεφιασμένες ημέρες



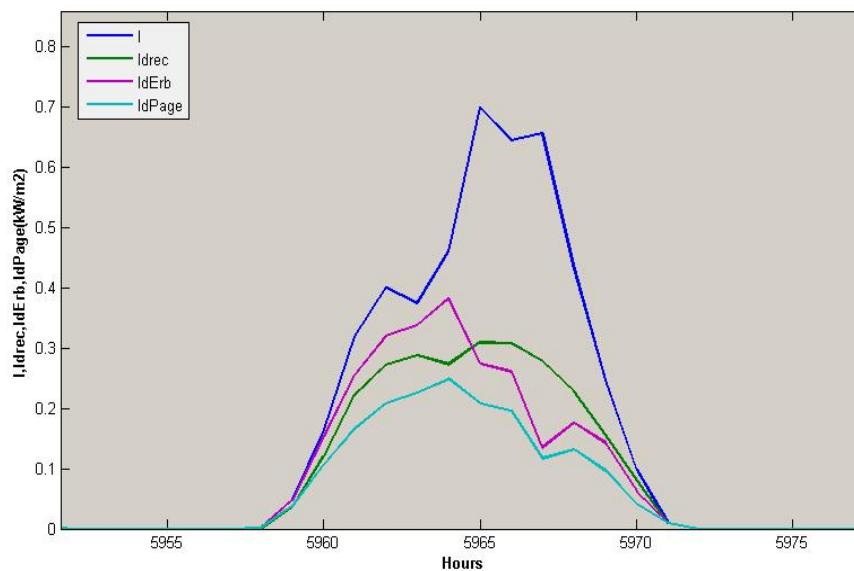
**Διάγραμμα 4.28** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-



Συννεφιασμένη ημέρα



Διάγραμμα 4.29 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Συννεφιασμένη ημέρα



Διάγραμμα 4.30 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Καλοκαίρι-Συννεφιασμένη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs, είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές από τη συσχέτιση του Page.

#### 4.2.3.4 Καλοκαίρι-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει όλα τα συμπεράσματα που εξήχθησαν:

**Πίνακας 4.4** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το καλοκαίρι

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας		
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα
<i>Page</i>	☀	☀☀	☀☀☀
<i>Erbs</i>	☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀

☀: όχι καλή

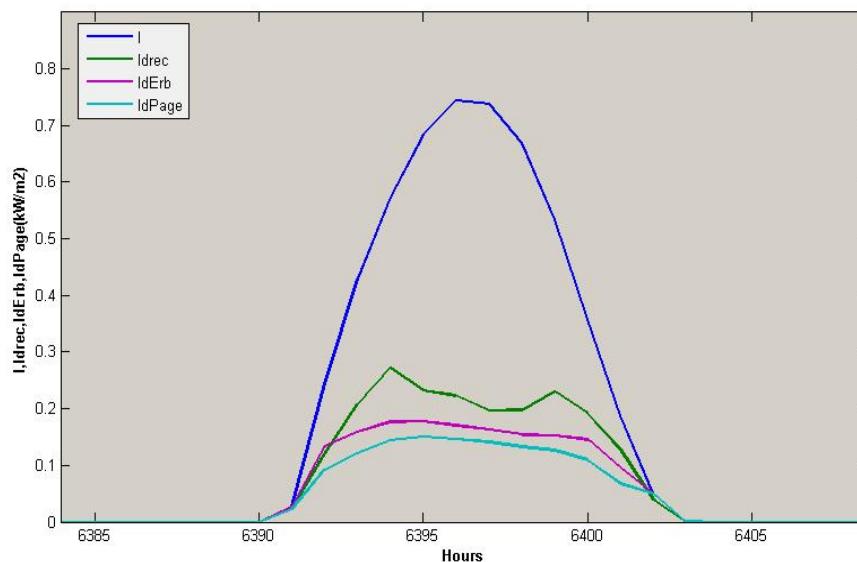
☀☀: καλή

☀☀☀: αρκετά καλή

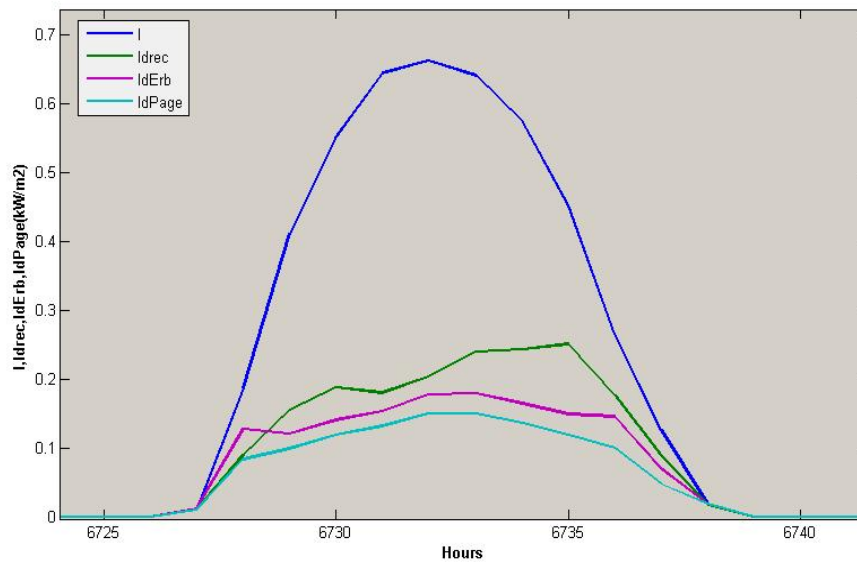
☀☀☀☀: πολύ καλή

#### 4.2.4 Φθινόπωρο

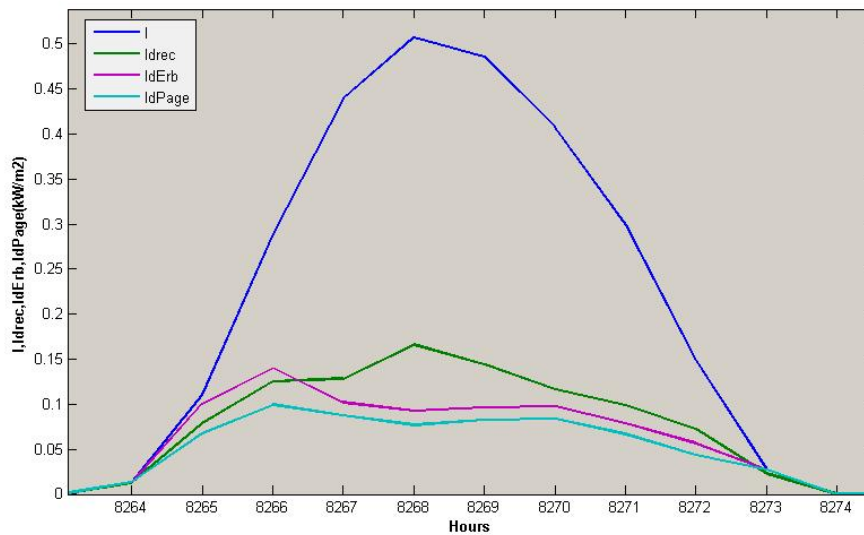
##### 4.2.4.1 Φθινόπωρο-ηλιόλουστες ημέρες



**Διάγραμμα 4.31** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα



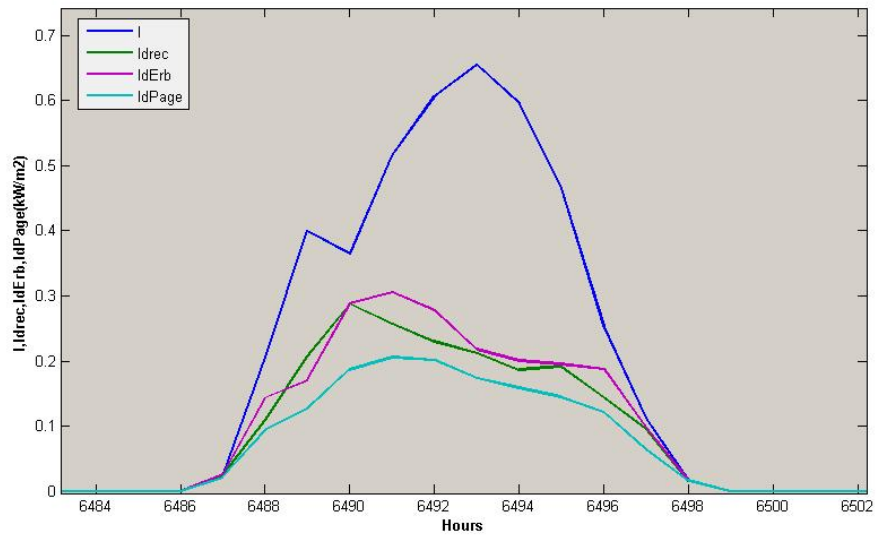
Διάγραμμα 4.32 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα



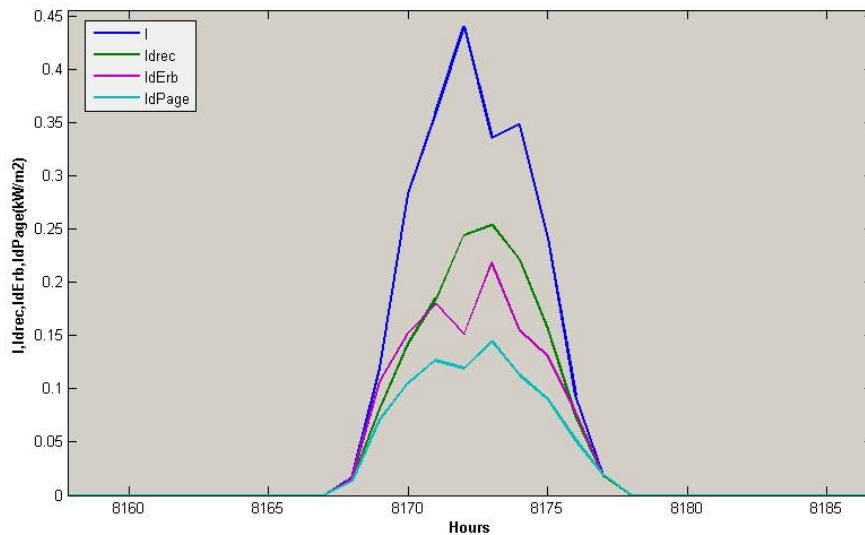
Διάγραμμα 4.33 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs προσεγγίζει καλύτερα τις καταγεγραμμένες τιμές από τη συσχέτιση του Page.

#### 4.2.4.2 Φθινόπωρο-Ημέρες με λίγα σύννεφα



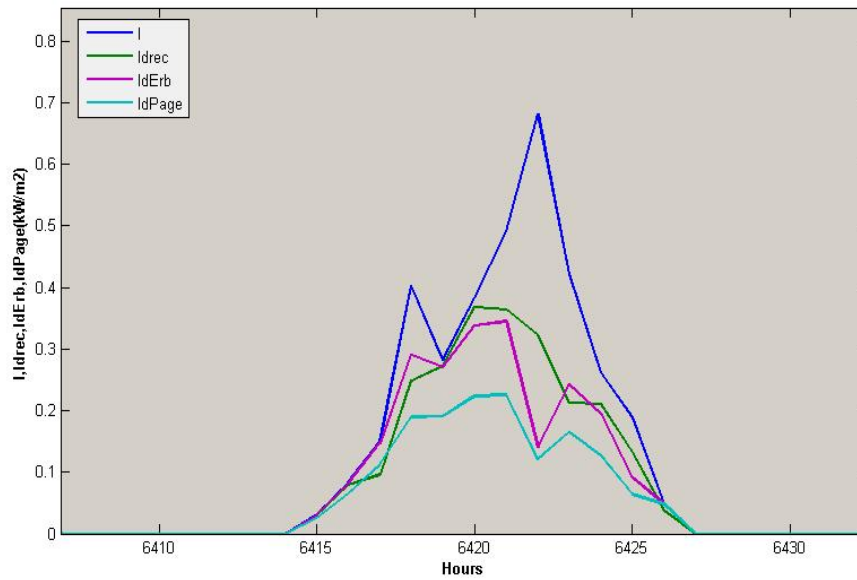
Διάγραμμα 4.34 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-  
Ημέρα με λίγα σύννεφα



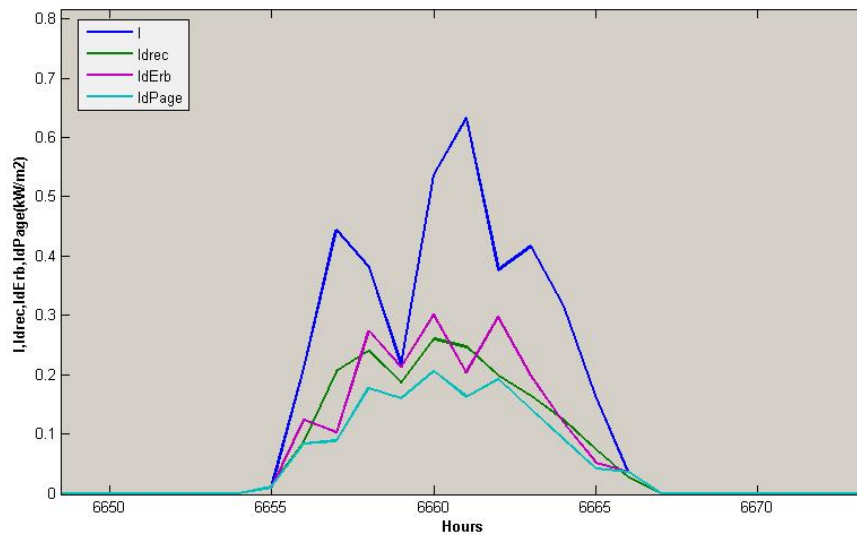
Διάγραμμα 4.35 Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-  
Ημέρα με λίγα σύννεφα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές από τη συσχέτιση του Page.

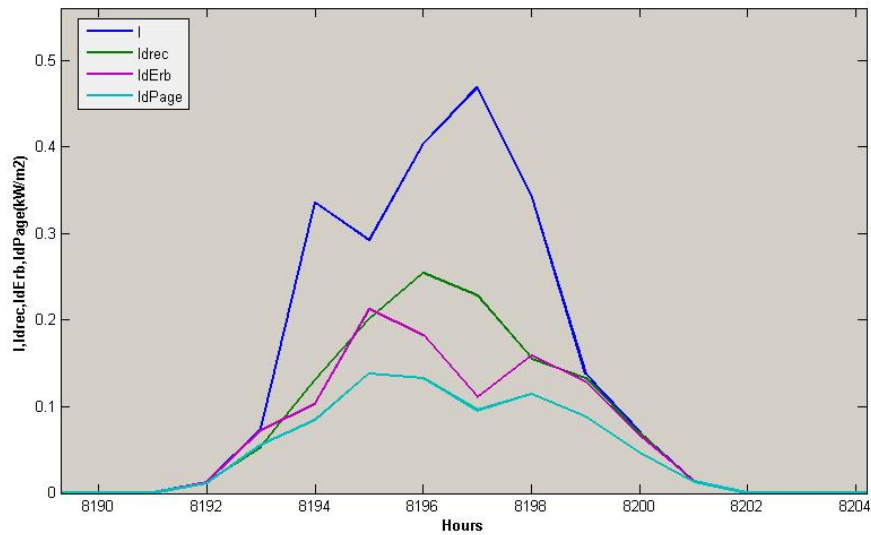
#### 4.2.4.3 Φθινόπωρο-Συννεφιασμένες ημέρες



**Διάγραμμα 4.36** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα



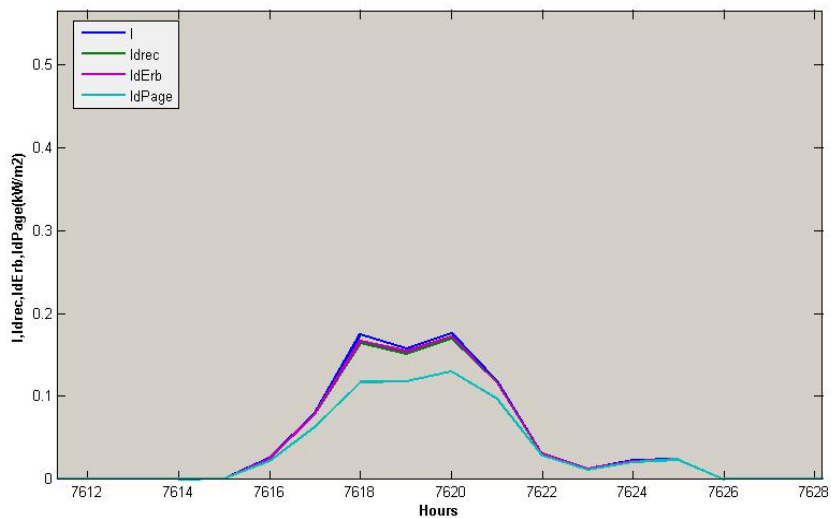
**Διάγραμμα 4.37** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα



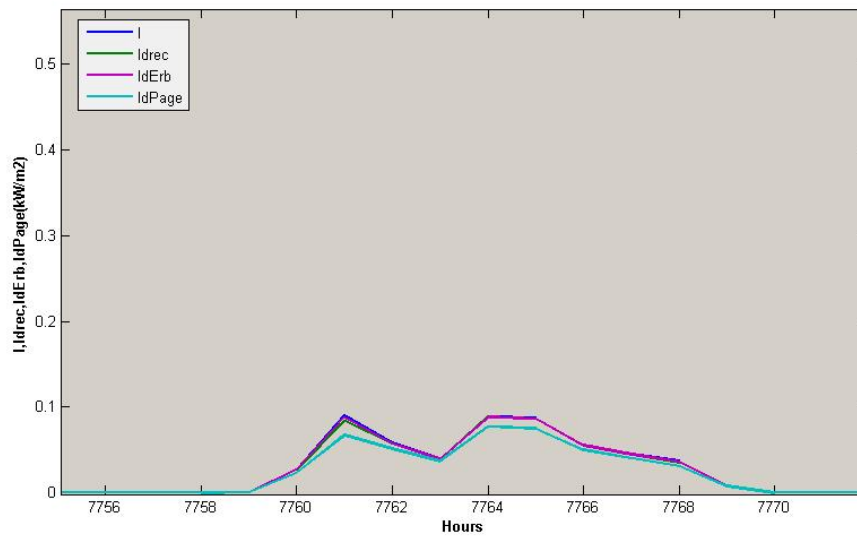
**Διάγραμμα 4.38** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση του Erbs έχει μικρότερες αποκλίσεις από τη συσχέτιση του Page.

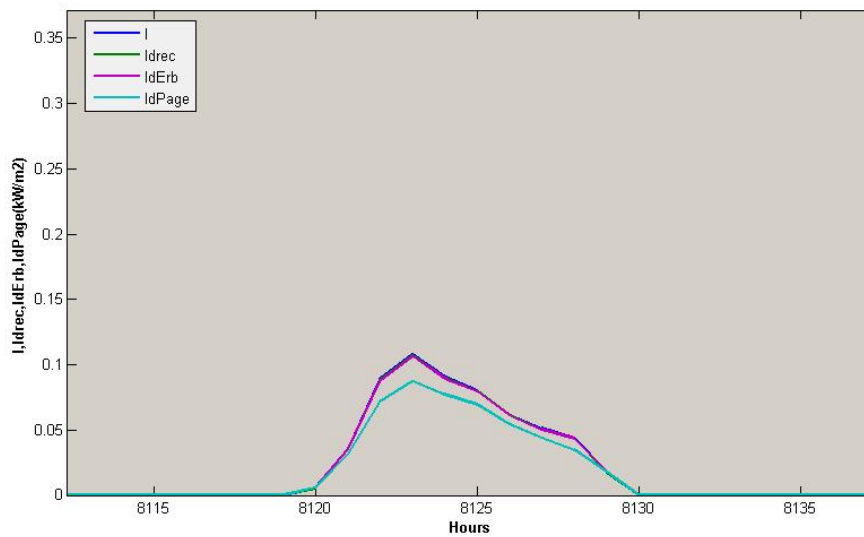
#### 4.2.4.4 Φθινόπωρο-Βροχερές ημέρες



**Διάγραμμα 4.39** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα



**Διάγραμμα 4.40** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα



**Διάγραμμα 4.41** Σύγκριση της συσχέτισης του Page και του Erbs-Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα για τις βροχερές ημέρες του φθινοπώρου είναι ότι η συσχέτιση του Erbs είναι πολύ ακριβής σε σχέση με τις καταγεγραμμένες τιμές. Η συσχέτιση του Page είναι εξίσου καλή.

#### 4.2.4.5 Φθινόπωρο-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει όλα τα συμπεράσματα που εξήχθησαν:

**Πίνακας 4.5:** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το φθινόπωρο

<i>Συσχέτιση</i>	<i>Χαρακτηρισμός ημέρας</i>			
	<i>Ηλιόλουστη</i>	<i>Λίγα σύννεφα</i>	<i>Αρκετά σύννεφα</i>	<i>Βροχή</i>
<i>Page</i>	☀☀	☀☀	☀☀	☀☀☀☀
<i>Erbs</i>	☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀

☀: όχι καλή

☀☀: καλή

☀☀☀☀: αρκετά καλή

☀☀☀☀☀☀: πολύ καλή

### 4.3 Γενικό συμπέρασμα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs

Το γενικό συμπέρασμα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs είναι ότι η συσχέτιση του Erbs είναι ιδανική για τις βροχερές και συννεφιασμένες ημέρες για όλες τις εποχές. Τις ημέρες με λίγα σύννεφα αν και παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις είναι καλύτερη από τη συσχέτιση του Page, ενώ για τις ηλιόλουστες ημέρες καμία από τις δύο συσχετίσεις δεν πλησιάζει τις καταγεγραμμένες τιμές ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

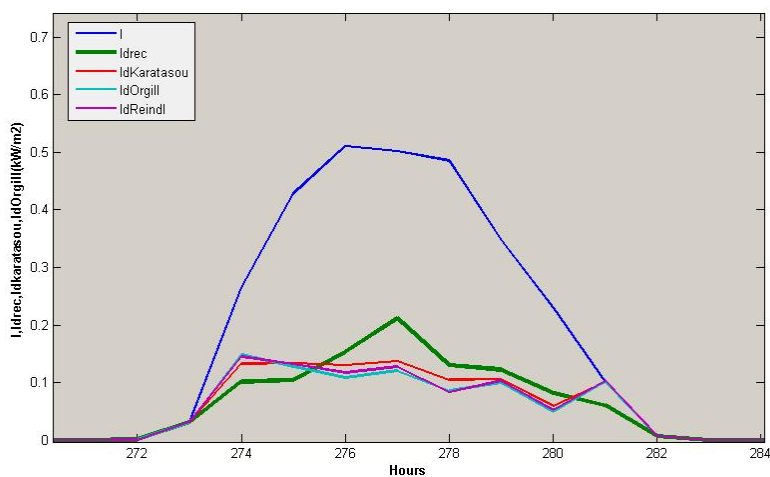
Άρα η συσχέτιση του Erbs μπορεί να χρησιμοποιείται όλη τη διάρκεια του έτους με κάποιες μεγαλύτερες αποκλίσεις κατά τις ηλιόλουστες ημέρες.



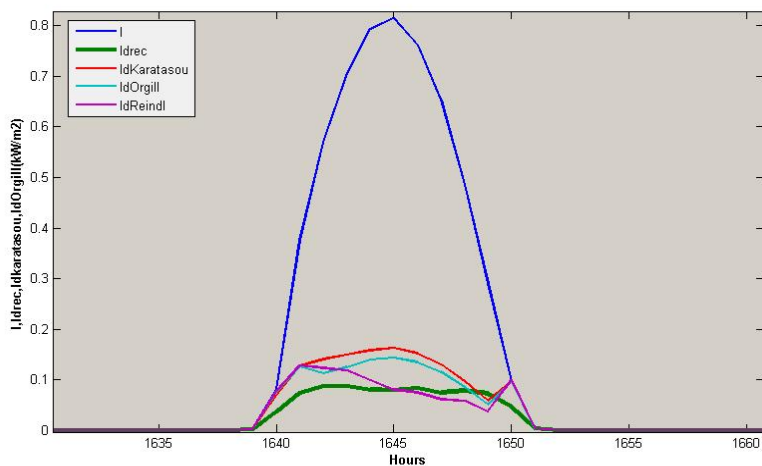
## 4.4 Σύγκριση των συσχετίσεων Orgill and Hollands, Reindl και Καρατάσου

### 4.4.1 Χειμώνας

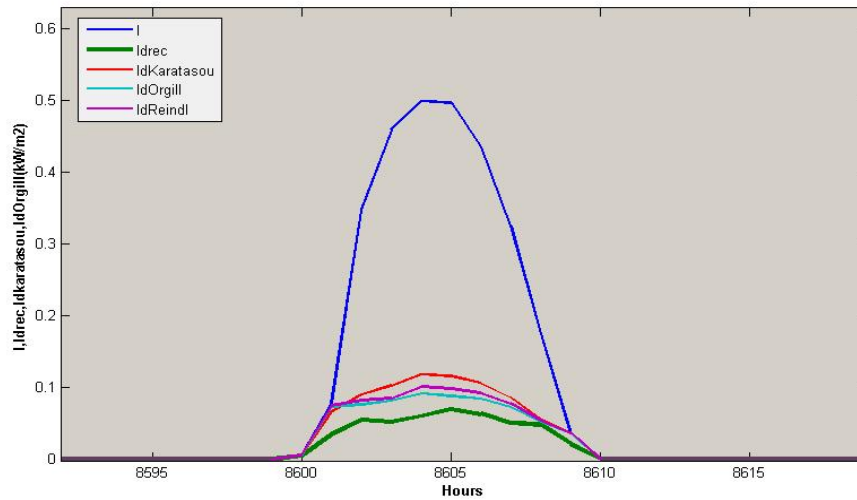
#### 4.4.1.1 Χειμώνας-ηλιόλουστες ημέρες



Διάγραμμα 4.42 Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ηλιόλουστη ημέρα



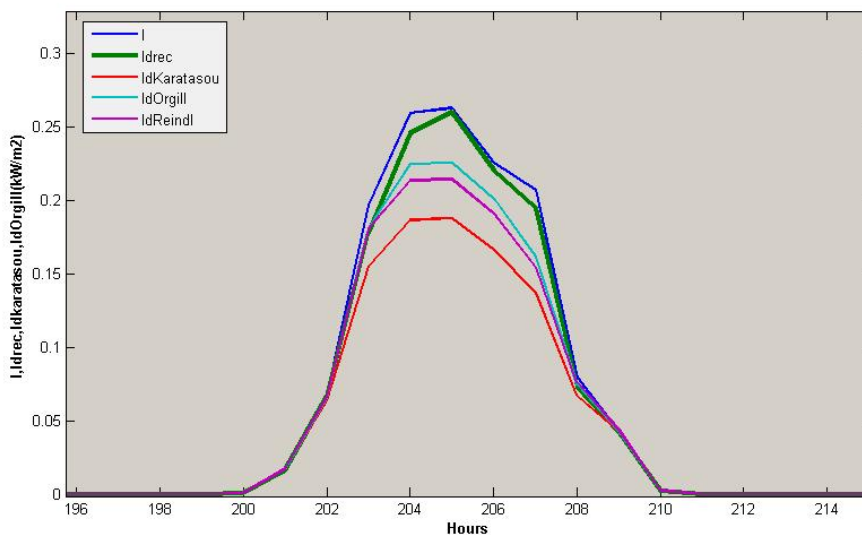
Διάγραμμα 4.43 Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ηλιόλουστη ημέρα



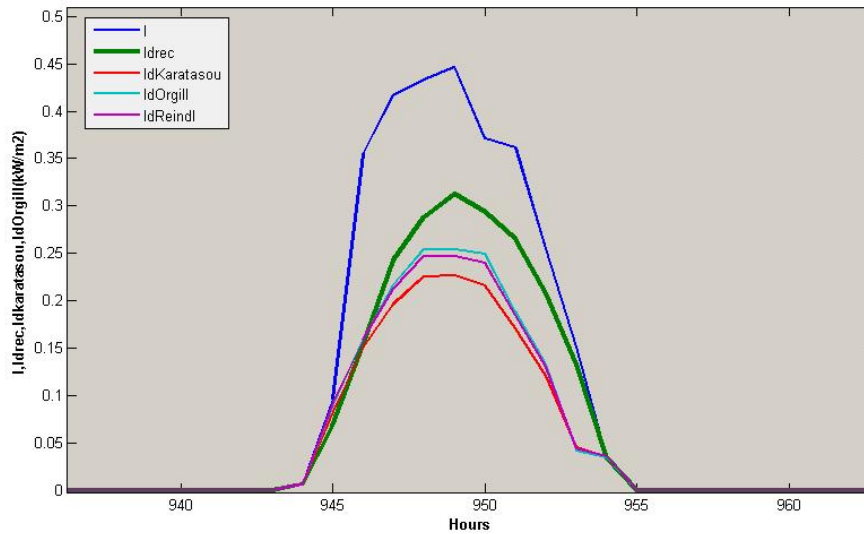
**Διάγραμμα 4.44** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ηλιόλουστη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα διαγράμματα 4.42-4.44 συμπεραίνεται ότι οι συσχετίσεις που εξετάζονται δεν προσεγγίζουν τις καταγεγραμμένες τιμές και παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις με λίγο καλύτερη τη συσχέτιση του Reindl.

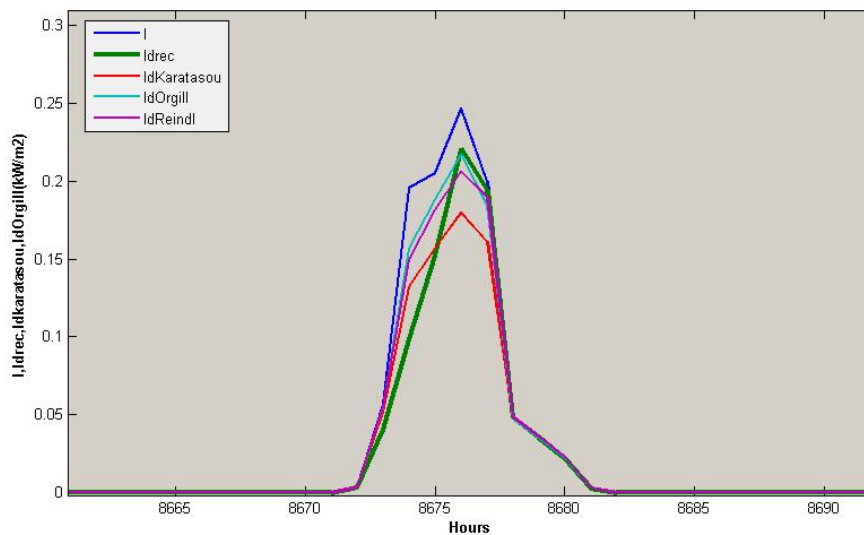
#### 4.4.1.2 Χειμώνας-Ημέρες με λίγα σύννεφα



**Διάγραμμα 4.45** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ημέρα με λίγα σύννεφα



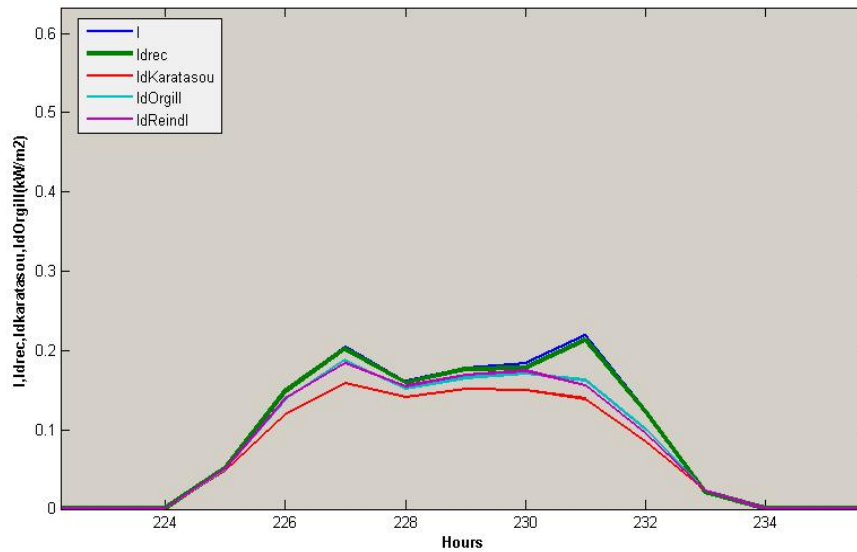
**Διάγραμμα 4.46** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ημέρα με λίγα σύννεφα



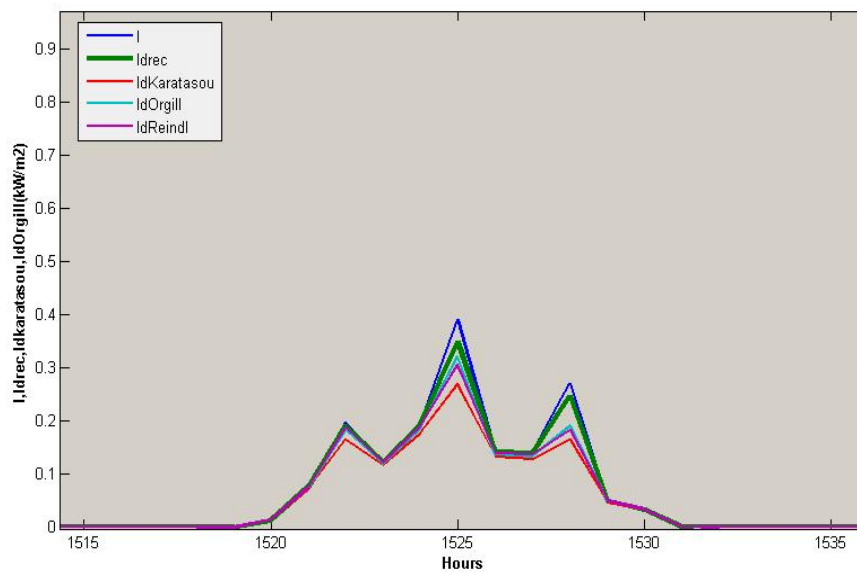
**Διάγραμμα 4.47** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Ημέρα με λίγα σύννεφα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση των Orgill and Hollands πλησιάζει τις καταγεγραμμένες τιμές περισσότερο από τις άλλες συσχετίσεις.

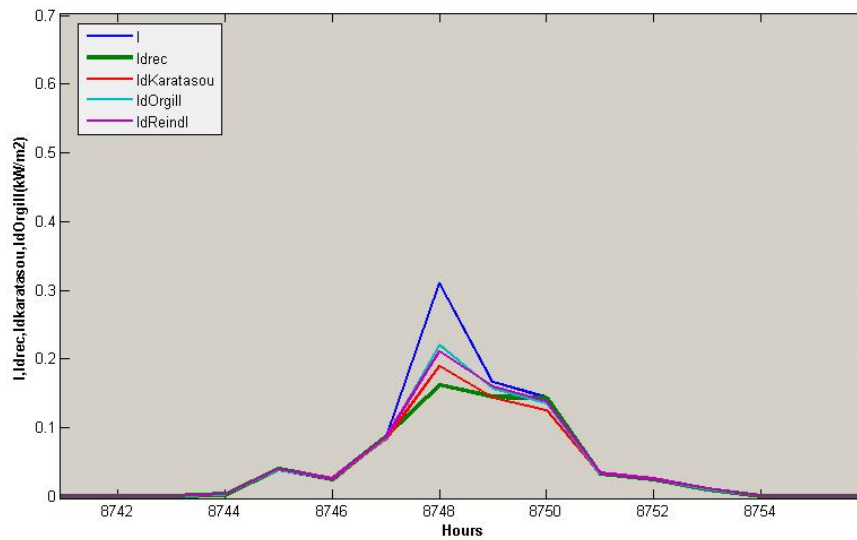
#### 4.4.1.3 Χειμώνας-Συννεφιασμένες ημέρες



**Διάγραμμα 4.48** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Συννεφιασμένη ημέρα



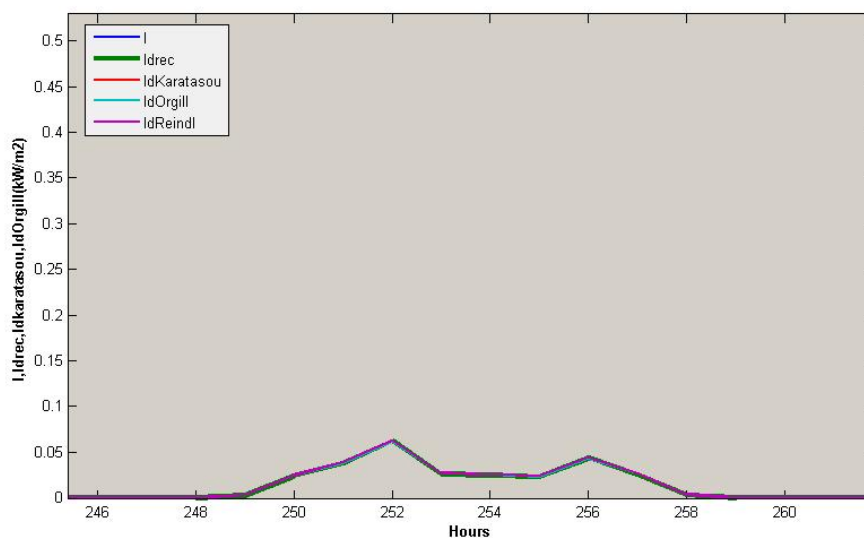
**Διάγραμμα 4.49** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Συννεφιασμένη ημέρα



**Διάγραμμα 4.50** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Συννεφιασμένη ημέρα

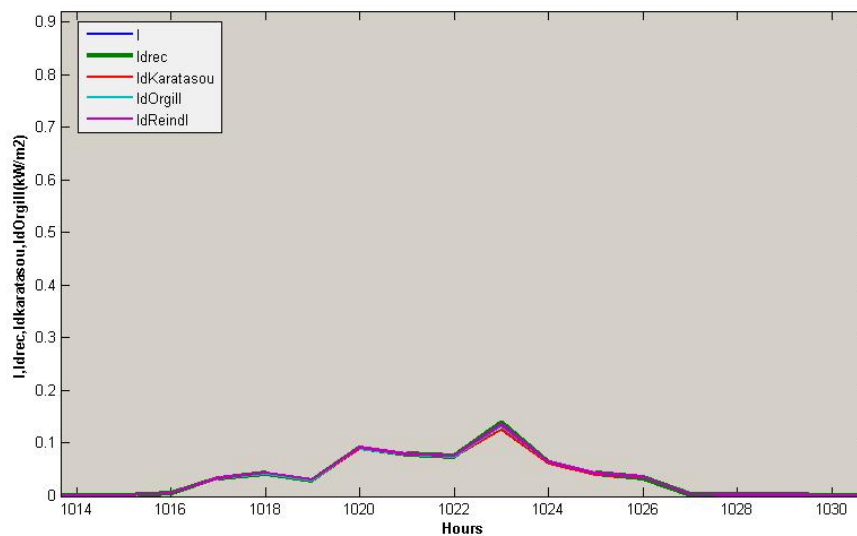
**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι και οι τρεις συσχετίσεις βρίσκονται κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές, με αυτή των Orgill and Hollands να τις πλησιάζει περισσότερο.

#### 4.4.1.4 Χειμώνας-Βροχερές ημέρες

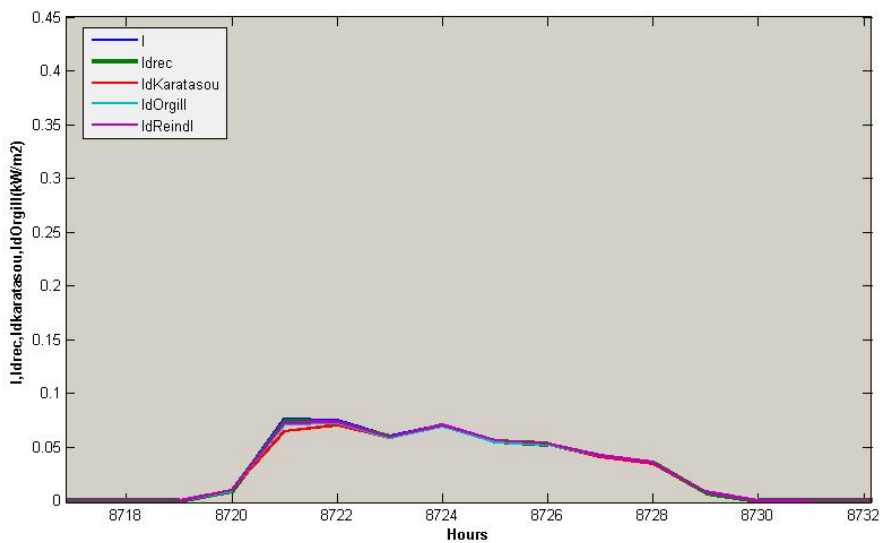


**Διάγραμμα 4.51** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Βροχερή ημέρα

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Σύγκριση και Αξιολόγηση των Βιβλιογραφικών Συσχετίσεων



**Διάγραμμα 4.52** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Βροχερή ημέρα



**Διάγραμμα 4.53** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Χειμώνας-Βροχερή ημέρα

**Συμπέρασμα:** Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα και οι τρεις συσχετίσεις πλησιάζουν τις καταγεγραμμένες τιμές και είναι πολύ ακριβείς ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τις βροχερές ημέρες του χειμώνα. Η συσχέτιση της Καρατάσου έχει μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τις άλλες συσχετίσεις αλλά όχι σημαντικές.

#### 4.4.1.5 Χειμώνας-Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει όλα τα συμπεράσματα που εξήχθησαν:

Πίνακας 4.6 Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το χειμώνα

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<i>Orgill and Hollands</i>	☀	☀☀	☀☀☀	☀☀☀☀
<i>Reindl</i>	☀	☀☀☀	☀☀	☀☀☀☀
<i>Καρατάσου</i>	☀	☀☀	☀☀	☀☀☀☀

☀: όχι καλή

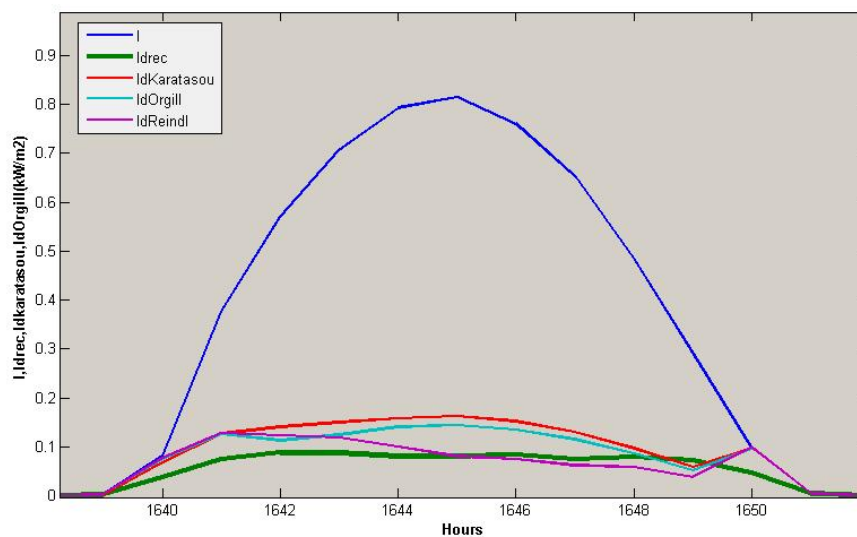
☀☀: καλή

☀☀☀: αρκετά καλή

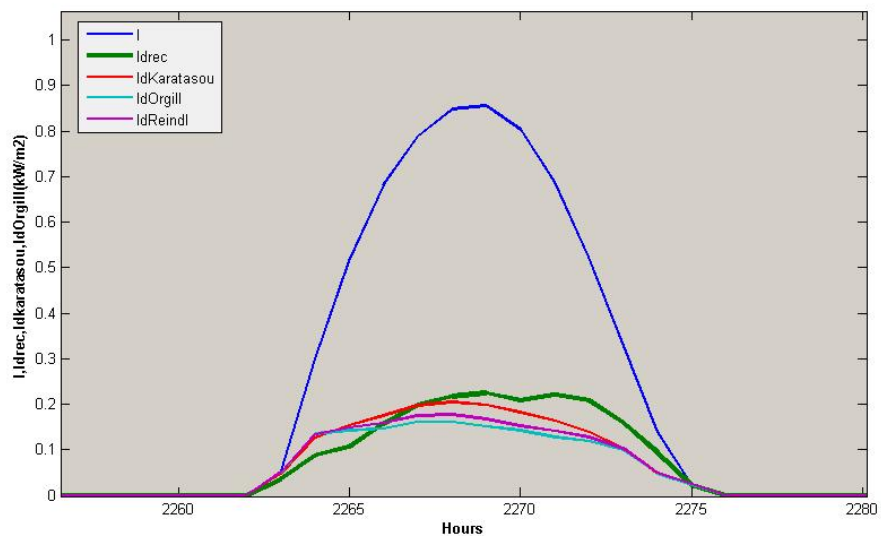
☀☀☀☀: πολύ καλή

#### 4.4.2 Άνοιξη

##### 4.4.2.1 Άνοιξη-ηλιόλουστες ημέρες



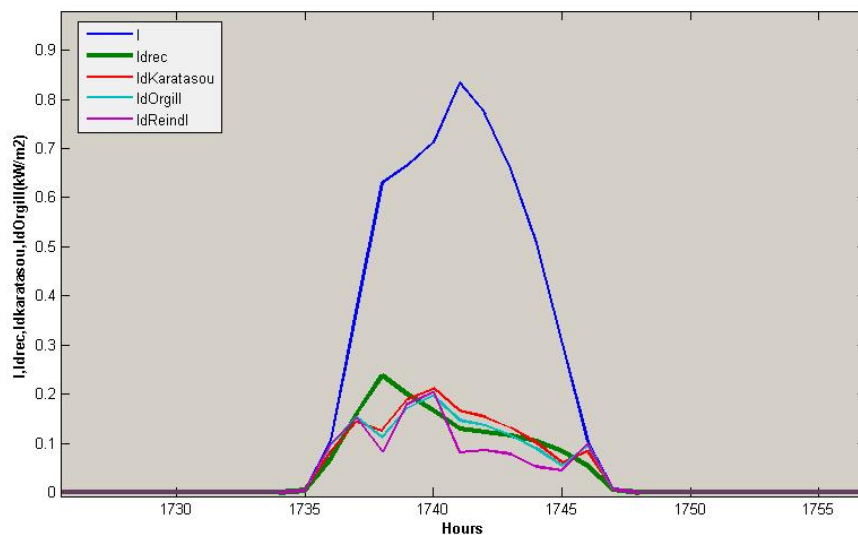
Διάγραμμα 4.54 Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Ηλιόλουστη ημέρα



**Διάγραμμα 4.55** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Ηλιόλουστη ημέρα

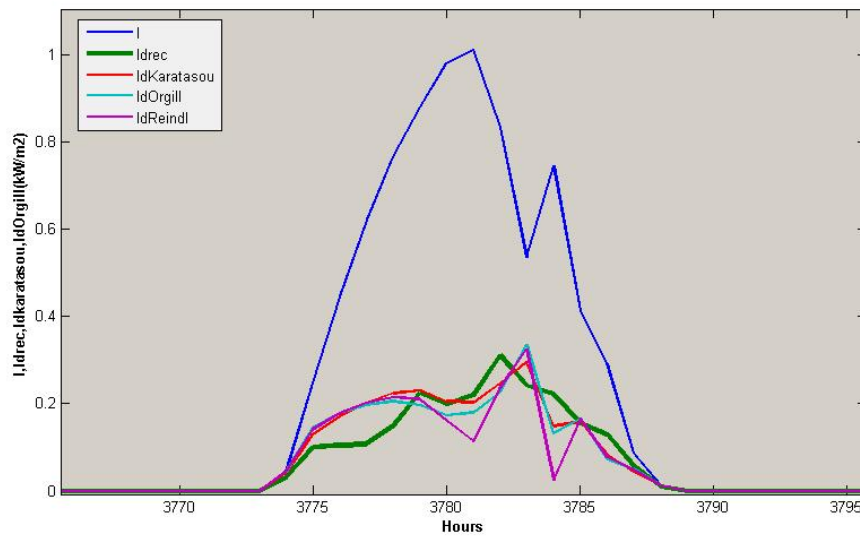
**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα για τις ηλιόλουστες ημέρες της άνοιξης συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση της Καρατάσου και του Reindl είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές.

#### 4.4.2.2 Άνοιξη-ημέρες με λίγα σύννεφα



**Διάγραμμα 4.56** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Ημέρα με λίγα σύννεφα

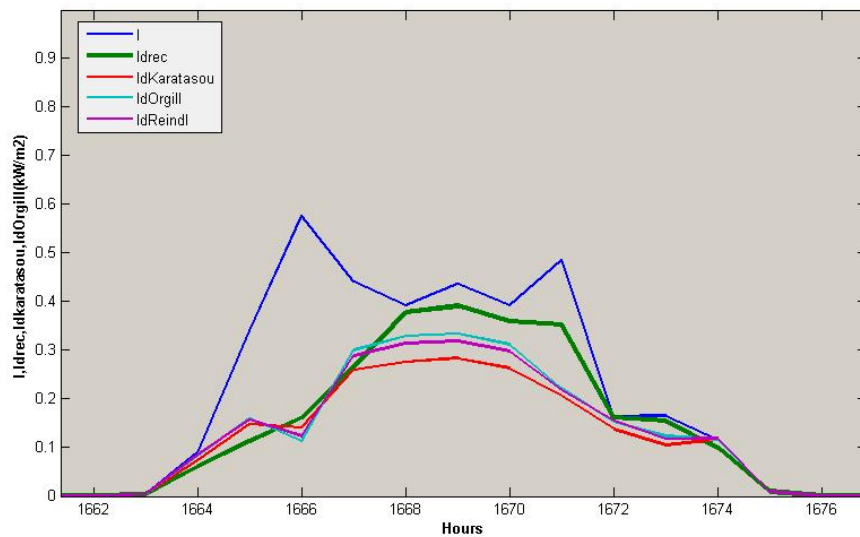




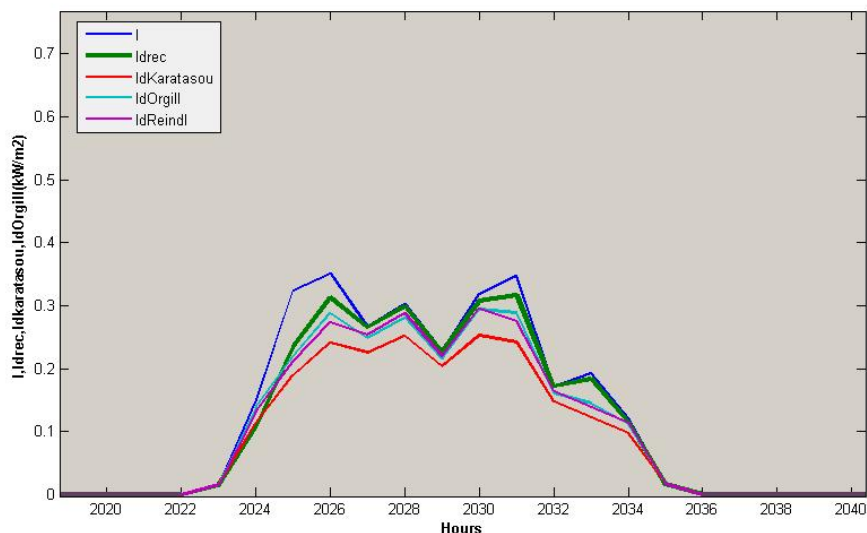
**Διάγραμμα 4.57** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Ημέρα με λίγα σύννεφα

**Συμπέρασμα:** Από τα διαγράμματα 4.73 και 4.74 συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση της Καρατάσου και των Orgill and Hollands προσεγγίζουν περισσότερο τις καταγεγραμμένες τιμές.

#### 4.4.2.3 Άνοιξη-Συννεφιασμένες ημέρες



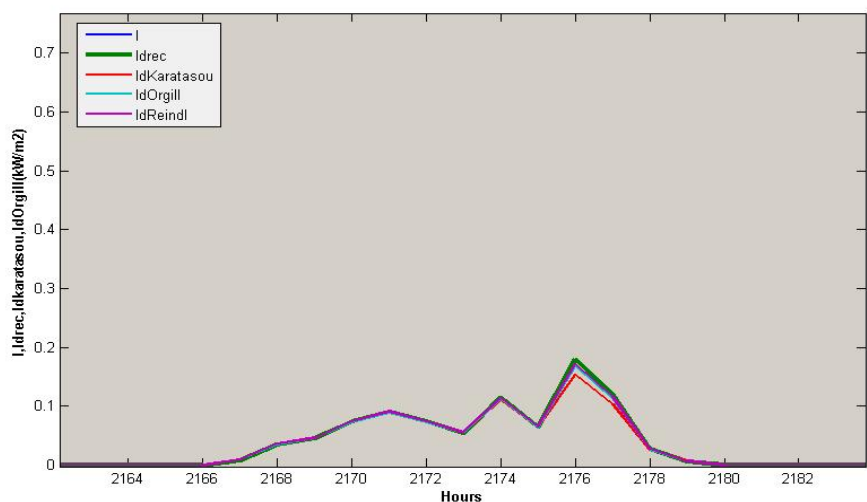
**Διάγραμμα 4.58:** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Συννεφιασμένη ημέρα



**Διάγραμμα 4.59** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Συννεφιασμένη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα διαγράμματα 4.75 και 4.76 συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση των Orgill and Hollands είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές συγκρινόμενη με τις άλλες δύο συσχετίσεις. Η συσχέτιση του Reindl προσεγγίζει εξίσου καλά τις καταγεγραμμένες τιμές.

#### 4.4.2.4 Άνοιξη-Βροχερή ημέρα



**Διάγραμμα 4.60** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Άνοιξη-Βροχερή ημέρα

**Συμπέρασμα:** Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα για μια βροχερή ημέρα της άνοιξης συμπεραίνεται ότι και οι τρεις συσχετίσεις προσεγγίζουν εξίσου καλά τις καταγεγραμμένες τιμές.

#### 4.4.2.5 Άνοιξη- Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας

Πίνακας 4.7 Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για την άνοιξη

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<i>Orgill and Hollands</i>	☀	☀☀	☀☀☀	☀☀☀☀
<i>Reindl</i>	☀	☀	☀☀	☀☀☀☀
<i>Καρατάσου</i>	☀	☀☀	☀	☀☀☀☀

☀: όχι καλή

☀☀: καλή

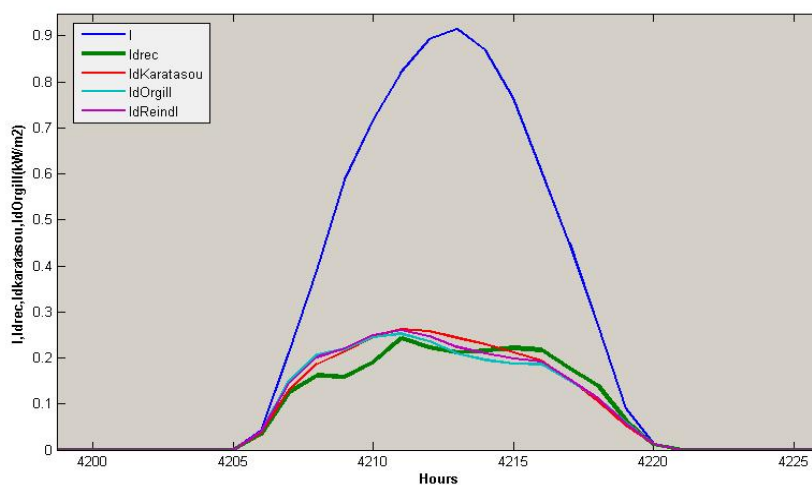
☀☀☀: αρκετά καλή

☀☀☀☀: πολύ καλή

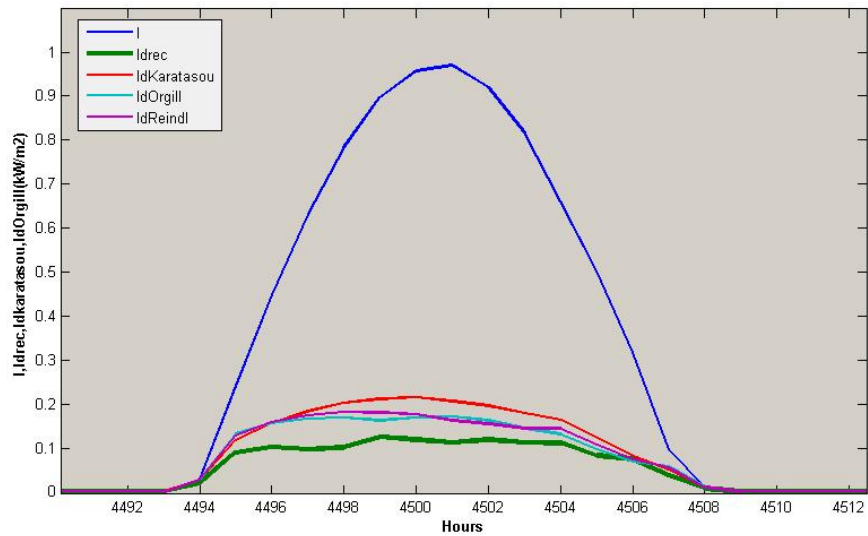
Ο παραπάνω πίνακας δείχνει την ακρίβεια των συσχετίσεων τις βροχερές ημέρες και την όχι καλή προσέγγιση τις ηλιόλουστες.

### 4.4.3 Καλοκαίρι

#### 4.4.3.1 Καλοκαίρι-ηλιόλουστες ημέρες



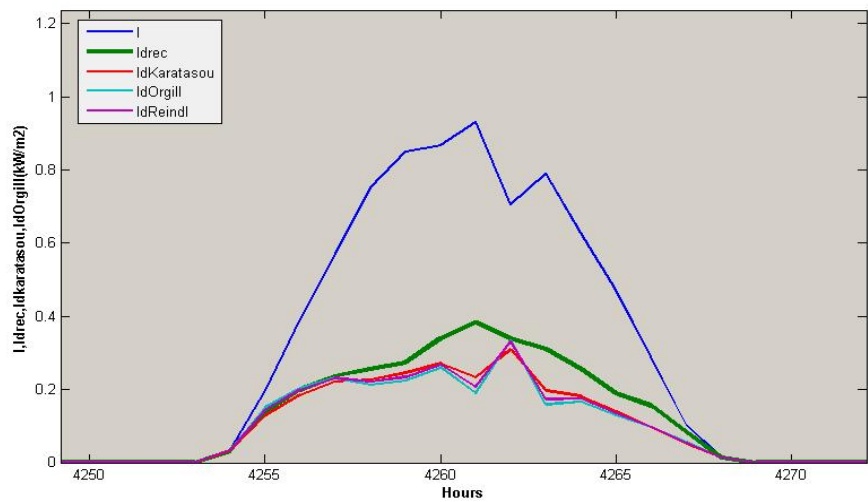
Διάγραμμα 4.61 Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα



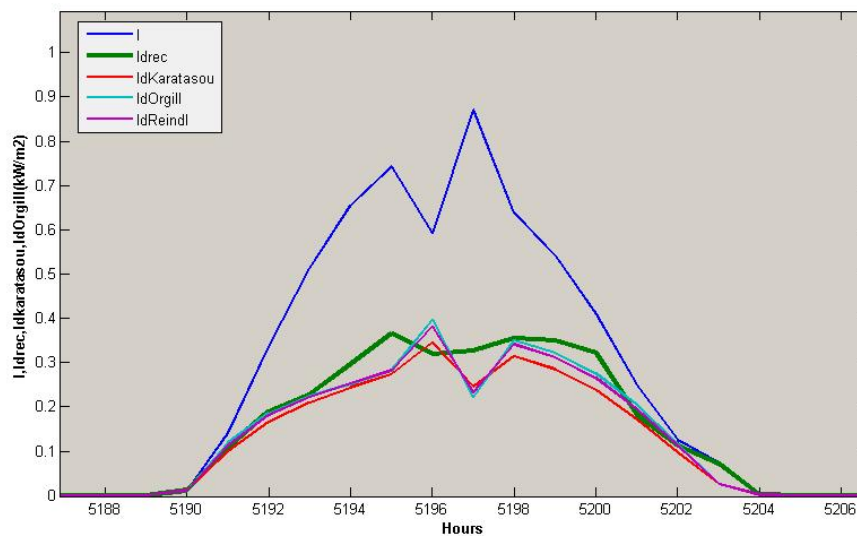
**Διάγραμμα 4.62** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα διαγράμματα 4.61 και 4.62 συμπεραίνεται ότι για τις ηλιόλουστες ημέρες του καλοκαιριού πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές είναι η συσχέτιση του Orgill. Οι άλλες συσχετίσεις προσεγγίζουν αρκετά τις καταγεγραμμένες τιμές.

#### 4.4.3.2 Καλοκαίρι-Ημέρες με λίγα σύννεφα



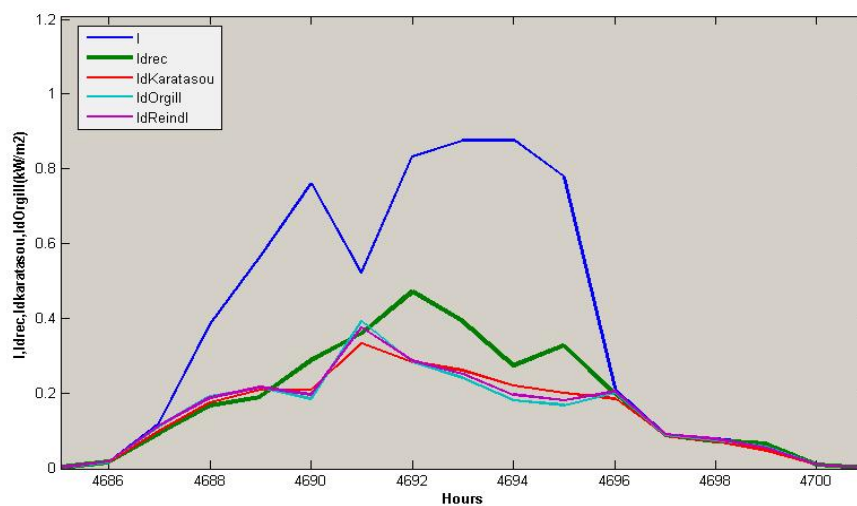
**Διάγραμμα 4.63** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Ημέρα με λίγα σύννεφα



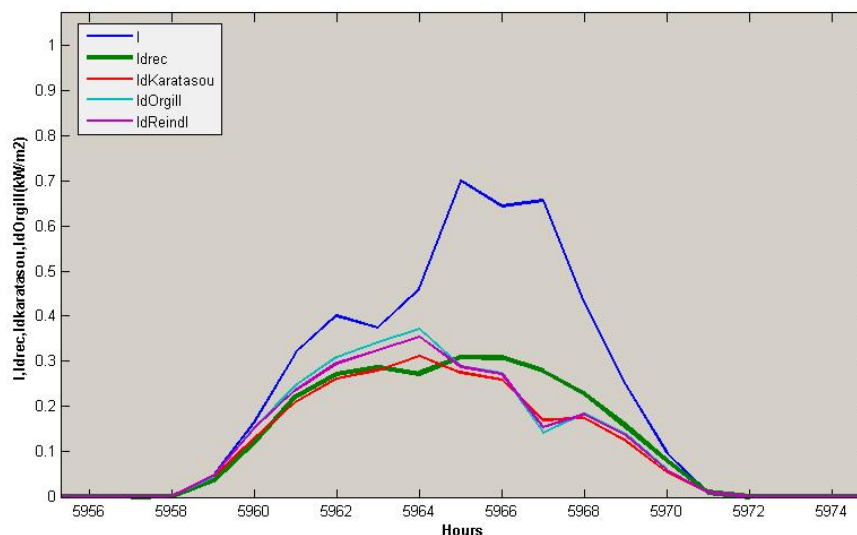
**Διάγραμμα 4.64** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Ημέρα με λίγα σύννεφα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι και οι τρεις συσχετίσεις παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά για τις ημέρες του καλοκαιριού με λίγα σύννεφα, με τη συσχέτιση του Orgill να είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές.

#### 4.4.3.3 Καλοκαίρι-Συννεφιασμένες ημέρες



**Διάγραμμα 4.65** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Συννεφιασμένη ημέρα



**Διάγραμμα 4.66** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Καλοκαίρι-Συννεφιασμένη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση της Καρατάσου προσεγγίζει περισσότερο τις καταγεγραμμένες τιμές. Και οι τρεις συσχετίσεις όμως προσεγγίζουν τις καταγεγραμμένες τιμές.

#### 4.4.3.4 Καλοκαίρι- Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας

**Πίνακας 4.8** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το καλοκαίρι

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας		
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα
<i>Orgill and Hollands</i>	☀☀☀	☀☀☀	☀☀☀
<i>Reindl</i>	☀☀	☀☀	☀☀☀
<i>Καρατάσου</i>	☀☀	☀☀	☀☀☀

☀: όχι καλή

☀☀: καλή

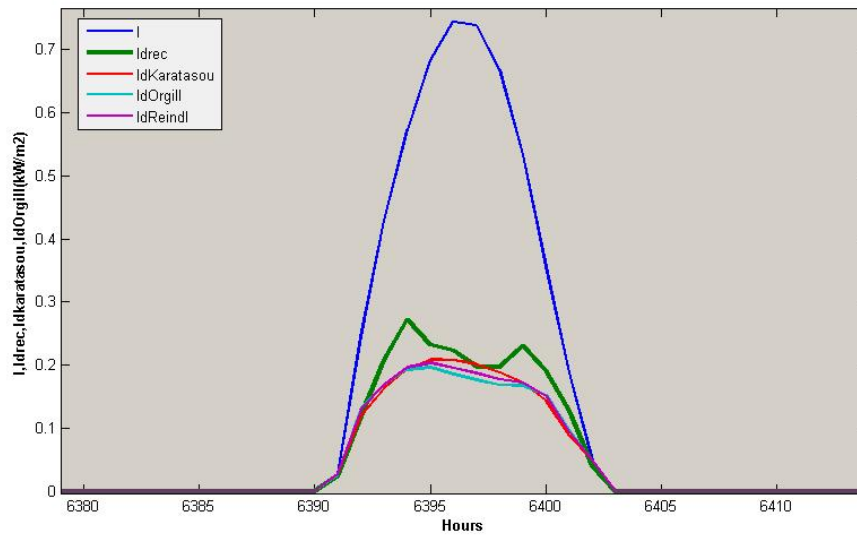
☀☀☀: αρκετά καλή

☀☀☀☀: πολύ καλή

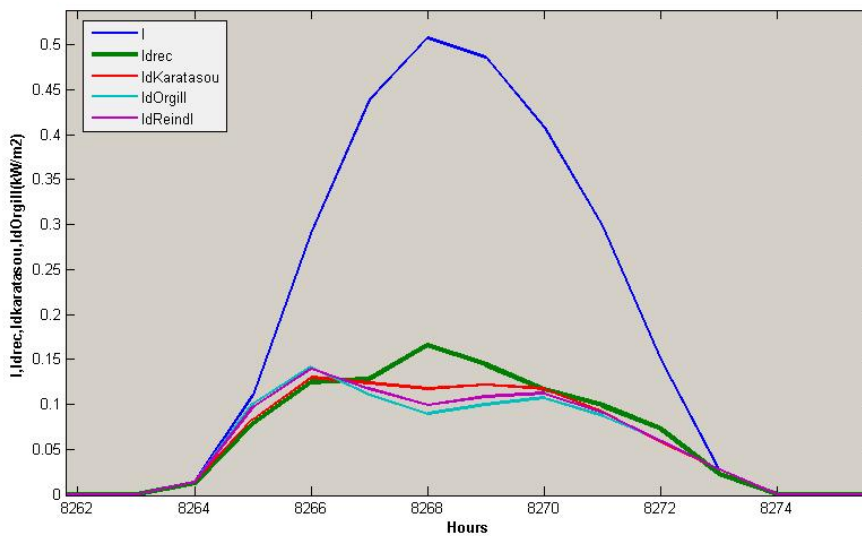
Ο παραπάνω πίνακας δείχνει ότι η συσχέτιση των Orgill and Hollands προσεγγίζει λίγο καλύτερα τις καταγεγραμμένες τιμές από τις άλλες δύο συσχετίσεις, οι οποίες όμως δεν έχουν και μεγάλη απόκλιση.

#### 4.4.4 Φθινόπωρο

##### 4.4.4.1 Φθινόπωρο-ηλιόλουστες ημέρες



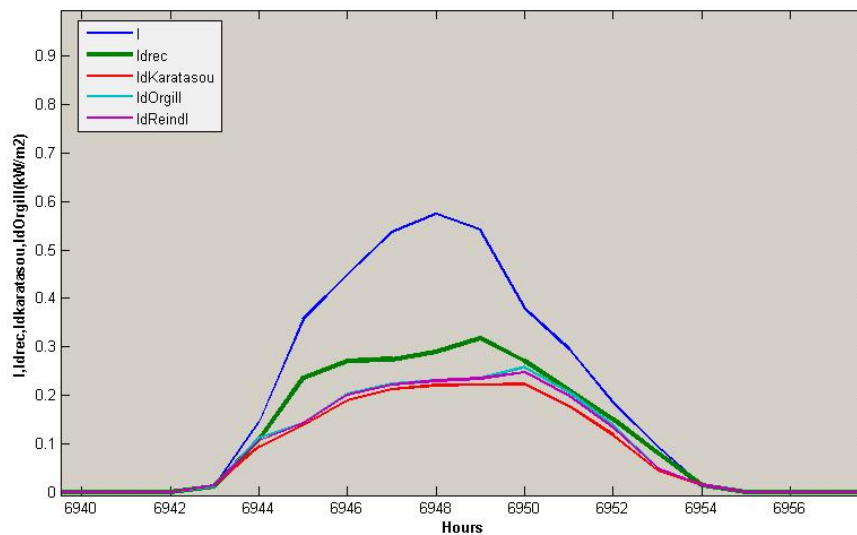
**Διάγραμμα 4.67** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα



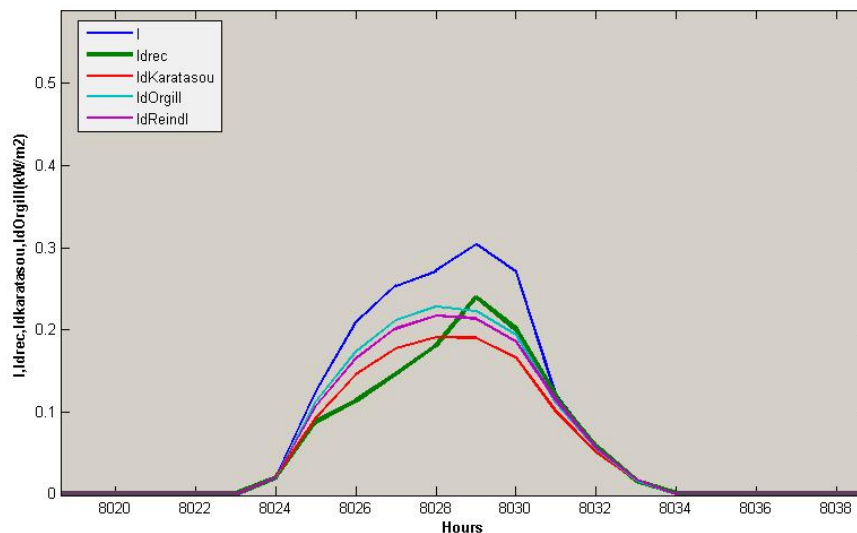
**Διάγραμμα 4.68** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Η συσχέτιση της Καρατάσου προσεγγίζει περισσότερο τις καταγεγραμμένες τιμές, χωρίς όμως σημαντικές αποκλίσεις από τις άλλες συσχετίσεις.

#### 4.4.4.2 Φθινόπωρο-Ημέρες με λίγα σύννεφα



Διάγραμμα 4.69 Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Ημέρα με λίγα σύννεφα

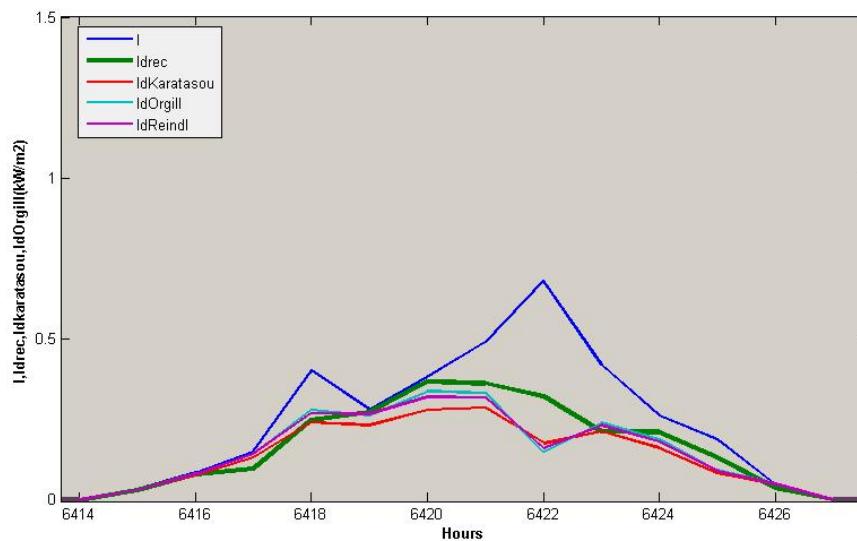


Διάγραμμα 4.70 Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Ημέρα με λίγα σύννεφα

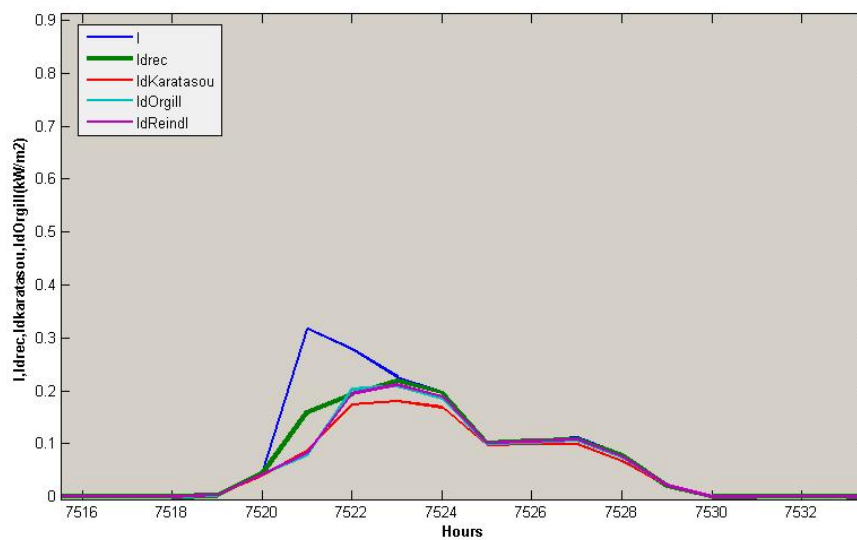
**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση των Orgill and Hollands προσεγγίζει καλύτερα τις καταγεγραμμένες τιμές. Και οι τρεις συσχετίσεις παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά.



#### 4.4.4.3 Φθινόπωρο-Συννεφιασμένες ημέρες



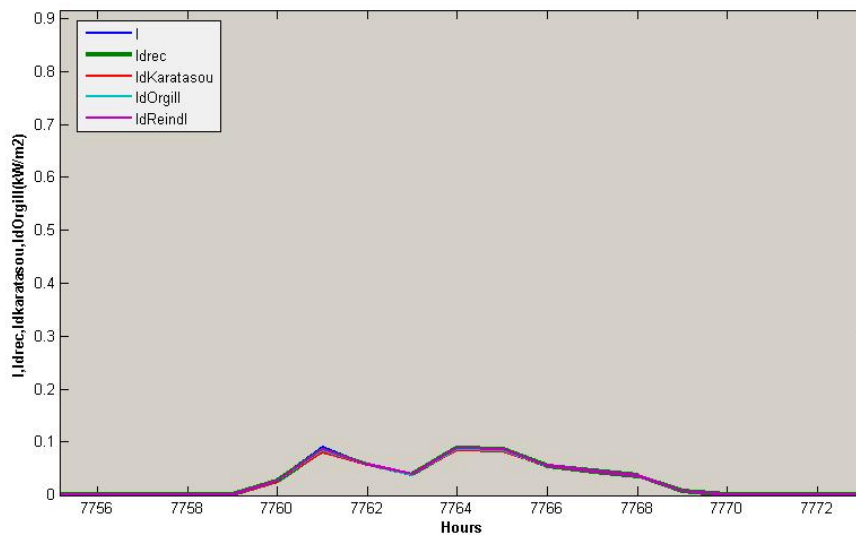
**Διάγραμμα 4.71** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα



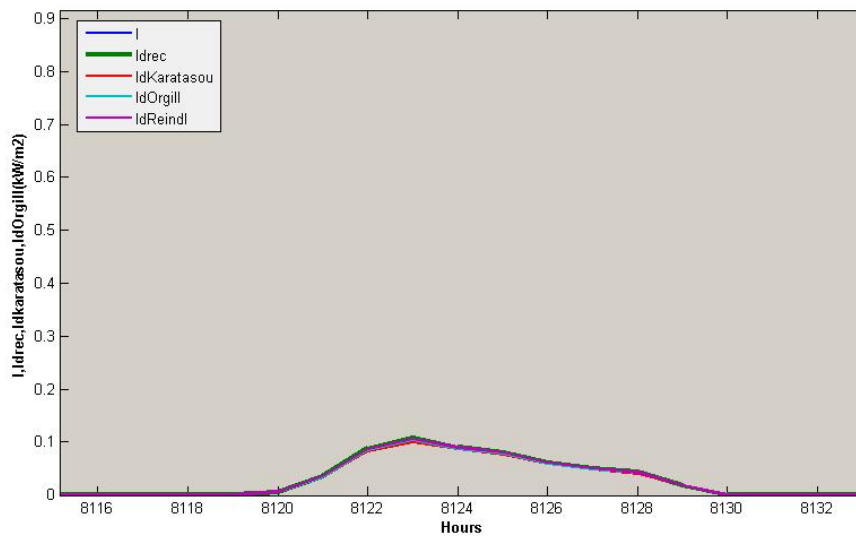
**Διάγραμμα 4.72** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η συσχέτιση των Orgill and Hollands προσεγγίζει καλύτερα τις καταγεγραμμένες τιμές από τις άλλες συσχετίσεις, χωρίς όμως σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

#### 4.4.4.4 Φθινόπωρο-Βροχερές ημέρες



**Διάγραμμα 4.73** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα



**Διάγραμμα 4.74** Σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου-Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα

**Συμπέρασμα:** Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι και οι τρεις συσχέτισεις είναι πολύ ακριβείς σε σχέση με τις καταγεγραμμένες τιμές για τις βροχερές ημέρες του φθινοπώρου.

#### 4.4.4.5 Φθινόπωρο- Τελικό συμπέρασμα-Συγκεντρωτικός πίνακας

Πίνακας 4.9 Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το φθινόπωρο

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<i>Orgill and Hollands</i>	☀☀	☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀
<i>Reindl</i>	☀☀	☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀
<i>Καρατάσου</i>	☀☀	☀☀	☀☀	☀☀☀☀☀☀

☀: όχι καλή

☀☀: καλή

☀☀☀: αρκετά καλή

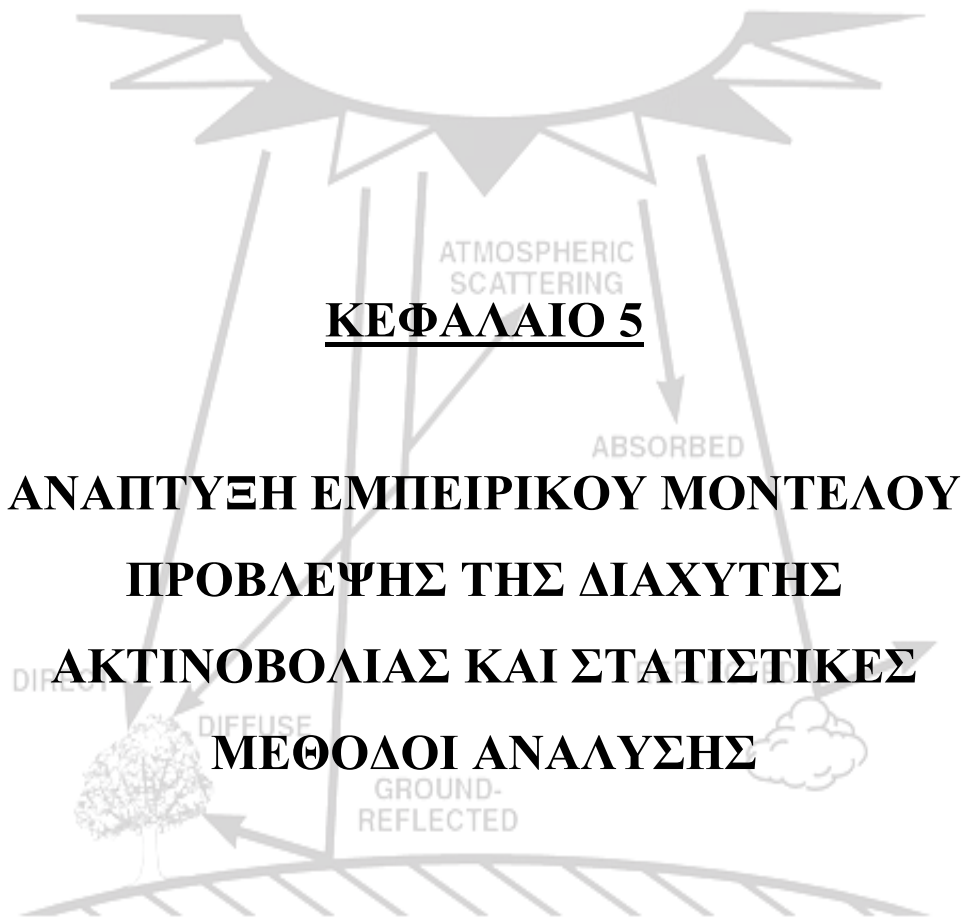
☀☀☀☀: πολύ καλή

#### 4.5 Γενικό συμπέρασμα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου είναι ότι οι τρεις συσχετίσεις έχουν παρόμοια προσέγγιση ως προς τις καταγεγραμμένες τιμές.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τις βροχερές ημέρες η απόκλιση και των τριών συσχετίσεων είναι αμελητέα.

Συγκεκριμένα η συσχέτιση των Orgill and Hollands είναι η ιδανικότερη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις χαρακτηριστικές ημέρες και για όλες τις εποχές.



## 5.1 Εισαγωγή

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η περιγραφή των εξισώσεων που εξήχθησαν για τον υπολογισμό του κλάσματος της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας προς την ολική προσπίπτουσα σε οριζόντιο επίπεδο, για την περιοχή της Αθήνας.

Αρχικά εξήχθη μια γραμμική εξίσωση για όλο το διάστημα του  $K_T$  και στη συνέχεια χωρίστηκαν διαστήματα και εξήχθησαν οι αντίστοιχες εξισώσεις.

## 5.2 Βάση δεδομένων

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των συσχετίσεων καταγράφηκαν στο σταθμό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην Αθήνα, περίπου 4.5 χλμ. ανατολικά από την Πλατεία Συντάγματος, στο δυτικό μέρος του Υμηττού. (37°58'26"B, 23°47'16"A, υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας 219μ). Τα δεδομένα αυτά είναι ωριαίες τιμές διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντια επιφάνεια υπολογισμένες σε  $\frac{W}{m^2}$  για την περίοδο ενός έτους (1<sup>η</sup> Ιανουαρίου

2004 - 31 Δεκεμβρίου 2004).

Για την εύρεση των ιδανικότερων σχέσεων διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας συναρτήσει του συντελεστή αιθριότητας είναι απαραίτητη η χρήση δεδομένων περιορισμένων σε σφάλματα. Για το λόγο αυτό στα δεδομένα του έτους 2004 έγιναν δύο τύποι ελέγχων.

Αρχικά έγινε ένας έλεγχος ποιότητας ώστε να περιοριστούν τα δεδομένα που υπερβαίνουν φυσικές αρχές. Συνολικά, υιοθετήθηκαν 6 κριτήρια. Τα 3 βασικά κριτήρια προτάθηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, *Daylight 1993* και συμπληρώθηκαν με κάποια επιπλέον ώστε ο ποιοτικός έλεγχος να είναι πλήρης.

Τα δεδομένα περιορίστηκαν όταν:

$$I_d > 1.1I_o, I > 1.2I_o, I_d > 0.8I_o, I < 5 \frac{W}{m^2}, \text{ όταν το ηλιακό ύψος ήταν } < 3^\circ \text{ και τέλος}$$

$$\text{όταν } I_b > I_o.$$

Στον δεύτερο τύπο ελέγχου, τα δεδομένα που αποκλείστηκαν μπορεί να μην ξεπερνούν φυσικά όρια, αλλά κατηγοριοποιούνται ως "extreme". Η κατηγοριοποίηση αυτή, οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν κάποιοι συνδυασμοί κλάσματος διάχυτης

ακτινοβολίας  $\frac{I_a}{I}$  και συντελεστή αιθριότητας  $K_T$  που δεν δίνουν αξιόπιστα ζευγάρια τιμών. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά όρια με στόχο την ταυτοποίηση των τιμών αυτών σε συνεφιασμένες και ηλιόλουστες συνθήκες αντίστοιχα.

$$\text{Περίπτωση 1:} \quad \frac{I_a}{I} < 0.9 \quad K_T < 0.20$$

$$\text{Περίπτωση 2:} \quad \frac{I_a}{I} > 0.8 \quad K_T > 0.60$$

Λιγότερο από 4% και 3,5% των δεδομένων περιορίστηκαν βασιζόμενοι στις περιπτώσεις 1 και 2 αντίστοιχα. Η αρχική βάση δεδομένων αποτελείται από 8760 ώρες. Στη συνέχεια αφαιρώντας τις μηδενικές τιμές οι τιμές περιορίστηκαν σε 4094 και με εφαρμογή των περιορισμών της ενότητας 5.2 η τελική βάση δεδομένων αποτελείται από 4007 τιμές.

### 5.3 Εισαγωγή στις στατιστικές μεθόδους ανάλυσης

Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν διάφορες στατιστικές μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων που εκτιμούν τις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας.

Μεταξύ αυτών, ο συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2$ ), το μέσο % σφάλμα, MPE, (mean percentage error), το MBE (mean bias error), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, RMSE, (root mean square error) και το t-statistic (t-stat) το οποίο συγκρίνει τα δύο τελευταία σφάλματα, είναι αυτά που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες μεθόδους αξιολόγησης.

#### 5.3.1 Ανάλυση των στατιστικών μεθόδων

##### 5.3.1.1 Συντελεστής προσδιορισμού

Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών τιμών και των υπολογιζόμενων από τις επιμέρους συσχετίσεις και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (I_d - I_{dmean})(I_{drec} - I_{drecmean})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (I_d - I_{dmean})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n (I_{drec} - I_{drecmean})^2 \right]}} \quad (5.1)$$

όπου n ο αριθμός των μετρήσεων.

### 5.3.1.2 Μέσο % σφάλμα (MPE)

Το μέσο επί τοις εκατό σφάλμα ορίζεται ως το ποσοστό της απόκλισης των μέσων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας που προσδιορίζονται από τις εξισώσεις από τις καταγεγραμμένες τιμές.

Το σχετικό % σφάλμα ε ορίζεται επίσης ως εξής:

$$\epsilon = \left[ \frac{(I_{drec} - I_d)}{I_{drec}} \right] \times 100 \quad (5.2)$$

### 5.3.1.3 Μέσο σφάλμα (MBE)

Το μέσο σφάλμα MBE δίνεται από την εξίσωση:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (I_d - I_{drec})}{n} \quad (5.3)$$

Δίνει πληροφορίες για τη μακροπρόθεσμη απόδοση των συσχετίσεων, επιτρέποντας μια σύγκριση μεταξύ της απόκλισης των μετρούμενων και των υπολογιζόμενων τιμών μίας προς μία. Παίρνει θετικές και αρνητικές τιμές. Η ιδανική του τιμή είναι το μηδέν. Το αρνητικό στοιχείο στην αξιοπιστία του είναι ότι μια υποεκτίμηση σε μία τιμή μπορεί να εξισορροπήσει μία υπερεκτίμηση σε μία άλλη τιμή, ώστε το αποτέλεσμα να μην είναι το σωστό.

### 5.3.1.4 RMSE (Ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος)

Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (I_d - I_{drec})^2 / n} \quad (5.4)$$

Δίνει πληροφορίες για την άμεση απόδοση των συσχετίσεων. Η τιμή του είναι θετική με ιδανική τιμή το μηδέν.

Το αρνητικό στοιχείο στον υπολογισμό αυτού του στατιστικού δείκτη, είναι ότι η ύπαρξη μικρού αριθμού σφαλμάτων μπορεί να αυξήσει εύκολα την τιμή του.

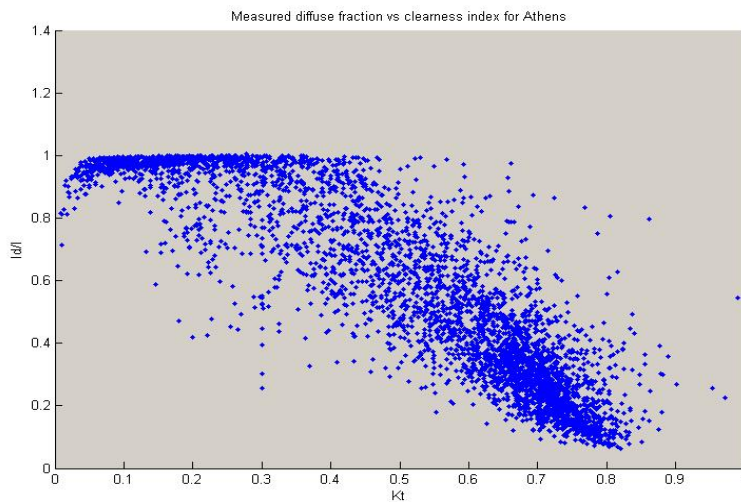
### 5.3.1.5 Μέθοδος t-statistic (t-stat)

Για να προσδιοριστεί αν μια εξίσωση υπολογίζει τιμές που έχουν στατιστική σημασία, δηλαδή τιμές που δεν απέχουν και πολύ από τις πραγματικές, ο Stone (1993), πρότεινε τον υπολογισμό του συντελεστή t-stat, ο οποίος ορίζεται από την εξίσωση 5.9. Ο Stone (Stone R.G, 1993), χρησιμοποιώντας δεδομένα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, έδειξε ότι ο υπολογισμός του RMSE και του MBE ξεχωριστά δεν δίνουν αξιόπιστες πληροφορίες για την απόδοση του μοντέλου που εξετάζεται και μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα. Όσο μικρότερη η τιμή του t-stat, τόσο καλύτερο το μοντέλο.

$$t \text{ stat} = \sqrt{\frac{(n - 1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (5.5)$$

## 5.4 Ανάπτυξη της συσχέτισης

Για την εξαγωγή της σχέσης μεταξύ του κλάσματος της διάχυτης ακτινοβολίας και του συντελεστή αιθριότητας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ενός έτους (2004), όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



**Διάγραμμα 5.1** Κλάσμα διάχυτης ακτινοβολίας συναρτήσει του συντελεστή αιθριότητας για την περιοχή της Αθήνας



Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα των δεδομένων του έτους 2004, μία τιμή  $K_T$  αντιστοιχεί σε περισσότερες από μία τιμές  $K_D$ . Από αυτό εύκολα συμπεραίνεται ότι τα δεδομένα εξαρτώνται από κάποιες άλλες παραμέτρους, όπως η υγρασία και η εποχικότητα. Αναλυτικότερα, όσον αφορά την υγρασία, η ύπαρξη σταγονιδίων νερού στην ατμόσφαιρα προκαλεί πολλές αντανακλάσεις στην ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διάχυτη ακτινοβολία. Επίσης, ανά εποχή του έτους και λόγω της ύπαρξης διαφόρων στιβάδων σύννεφων, η ακτινοβολία μπορεί να υποστεί διάφορες αντανακλάσεις με αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση των τιμών της διάχυτης ακτινοβολίας.

#### 5.4.1 Εξαγωγή των συσχετίσεων με ενιαίο διάστημα $K_T$

Για την εξαγωγή της καταλληλότερης συσχέτισης με ενιαίο διάστημα  $K_T$ , έγινε σύγκριση μεταξύ των συντελεστών προσδιορισμού  $R^2$  των  $K_D$  και από τις δύο πολυωνυμικές εξισώσεις επιλέχθηκε η πολυωνυμική 2<sup>ου</sup> βαθμού καθώς οι δύο συντελεστές προσδιορισμού δεν διέφεραν και πολύ και έτσι προτιμήθηκε η απλούστερη. Για τη γραμμική εξίσωση ο συντελεστής προσδιορισμού του  $K_D$  ήταν 0,788, για την πολυωνυμική 2<sup>ου</sup> βαθμού 0,82517 και για του 3<sup>ου</sup> βαθμού 0,82563. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για πολυωνυμική εξίσωση βαθμού μεγαλύτερου του 3<sup>ου</sup> δεν υπήρχε καμία βελτίωση του συντελεστή προσδιορισμού. Επίσης, θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού αναφέρονται στο κλάσμα  $\frac{I_d}{I}$  ενώ οι πίνακες των στατιστικών συντελεστών αναφέρονται στις τιμές των συντελεστών προσδιορισμού του  $I_d$  ώστε να γίνει περαιτέρω η σύγκριση με τις βιβλιογραφικές συσχετίσεις.

##### 5.4.1.1 Εξαγωγή γραμμικού μοντέλου

Χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα του  $K_T$  και του κλάσματος  $\frac{I_d}{I}$  και χωρίς να γίνει διαχωρισμός διαστημάτων εξήχθη ένα γραμμικό μοντέλο της μορφής:

$$\frac{I_d}{I} = 1.1875 - 1.224K_T \quad (5.6)$$

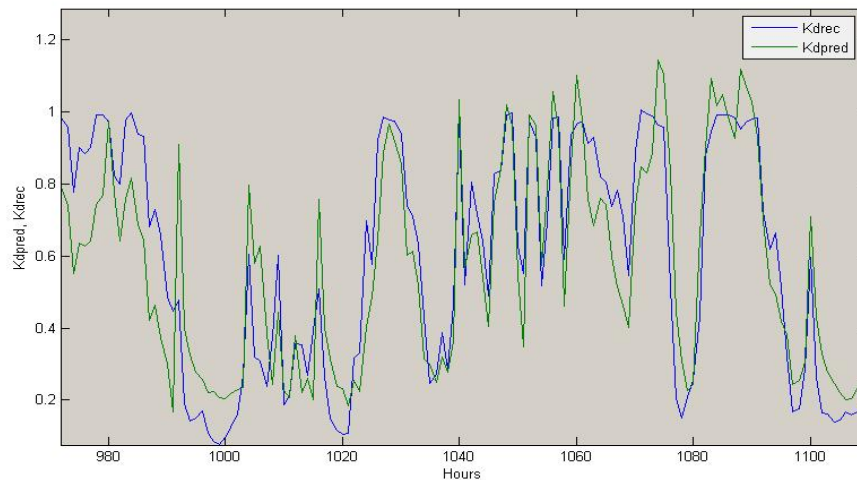
Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη Εμπειρικού μοντέλου Πρόβλεψης της Διάχυτης Ακτινοβολίας και Στατιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των στατιστικών συντελεστών για το γραμμικό μοντέλο με ενιαίο διάστημα  $K_T$ .

Πίνακας 5.1 Στατιστικοί συντελεστές για το γραμμικό μοντέλο με ενιαίο διάστημα  $K_T$

Στατιστικοί συντελεστές	Τιμή
$R^2$	0,747
MBE	0,004
MBE (Απόλυτη τιμή, %)	5,704
MPE	0,001
RMSE	0,052
t-stat	5,917

Το επόμενο διάγραμμα δείχνει για κάποια δεδομένα το προβλεπόμενο  $K_d$  καθώς και το καταγεγραμμένο ως συνάρτηση του  $K_T$ :



Διάγραμμα 5.2 Διάγραμμα  $K_{drec}$  και  $K_{dpred}$  για το γραμμικό μοντέλο και για ενιαίο διάστημα

$K_T$

#### 5.4.1.2 Εξαγωγή πολυωνυμικού μοντέλου 2<sup>ου</sup> βαθμού

Χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα του  $K_T$  και του κλάσματος  $\frac{I_a}{I}$  και χωρίς να γίνει διαχωρισμός διαστημάτων εξήχθη ένα πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού της μορφής:

$$\frac{I_a}{I} = -0,9921K_T^2 - 0,3292K_T + 1,0394 \quad (5.7)$$

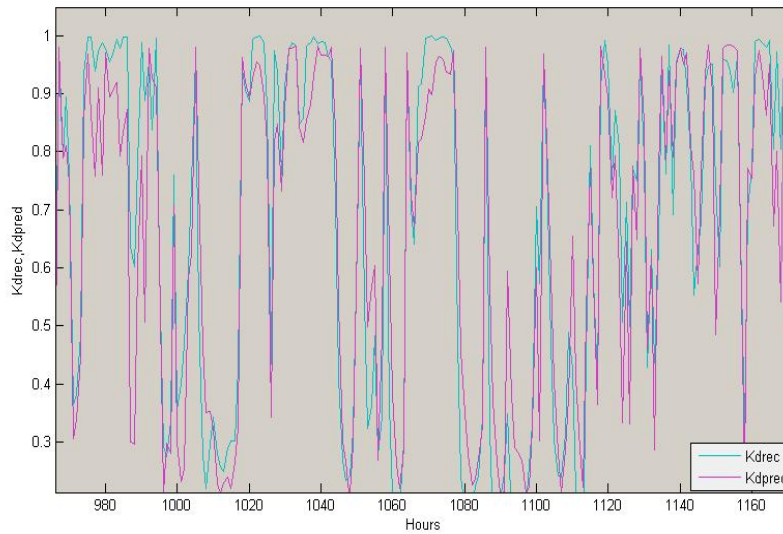
Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού με ενιαίο διάστημα  $K_T$ .

**Πίνακας 5.2** Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού με ενιαίο διάστημα  $K_T$

Στατιστικοί συντελεστές	Τιμή
$R^2$	0,783
MBE	0,003
MBE (Απόλυτη τιμή, %)	4,879
MPE	0,001
RMSE	0,048
t-stat	4,650

Το επόμενο διάγραμμα δείχνει για κάποια δεδομένα το προβλεπόμενο  $K_d$  καθώς και το καταγεγραμμένο ως συνάρτηση του  $K_T$ :

Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη Εμπειρικού μοντέλου Πρόβλεψης της Διάχυτης Ακτινοβολίας και Στατιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης



**Διάγραμμα 5.3** Διάγραμμα  $K_{drec}$  και  $K_{dpred}$  για το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ο</sup> βαθμού και για ενιαίο διάστημα  $K_T$

#### 5.4.1.3 Εξαγωγή πολυωνυμικού μοντέλου 3<sup>ο</sup> βαθμού

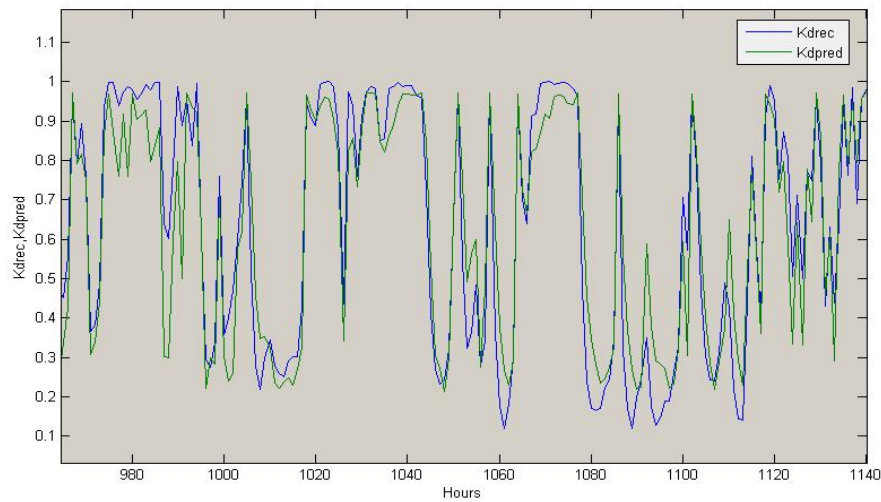
Χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα του  $K_T$  και του κλάσματος  $\frac{I_d}{I}$  και χωρίς να γίνει διαχωρισμός διαστημάτων εξήχθη ένα πολυωνυμικό μοντέλο 3<sup>ο</sup> βαθμού της μορφής:

$$\frac{I_d}{I} = 3,4678K_T^3 - 5,7214K_T^2 + 1,5038K_T + 0,86825 \quad (5.8)$$

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τους στατιστικούς συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 3<sup>ο</sup> βαθμού με ενιαίο διάστημα  $K_T$

**Πίνακας 5.3** Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 3<sup>ο</sup> βαθμού με ενιαίο διάστημα  $K_T$

Στατιστικοί συντελεστές	Τιμή
$R^2$	0,795
MBE	0,002
MBE (Απόλυτη τιμή, %)	5,862
MPE	0,001
RMSE	0,046
t-stat	3,250



**Διάγραμμα 5.4** Διάγραμμα  $K_{drec}$  και  $K_{dpred}$  για το πολυωνυμικό μοντέλο 3<sup>ου</sup> βαθμού και για ενιαίο διάστημα  $K_T$

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει για κάποια δεδομένα το προβλεπόμενο  $\frac{I_d}{I}$  καθώς και το καταγεγραμμένο ως συνάρτηση του  $K_T$ .

#### 5.4.1.4 Συμπέρασμα από τα 3 μοντέλα για ενιαίο διάστημα $K_T$

Από τη σύγκριση των 3 μοντέλων για το ενιαίο διάστημα  $K_T$  προκύπτει ότι τους καλύτερους στατιστικούς δείκτες έχει το πολυωνυμικό μοντέλο 3<sup>ου</sup> βαθμού, αλλά λόγω της μικρής διαφοράς σε σχέση με το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού, επιλέγεται ο μικρότερος βαθμός πολυωνύμου για λόγους υπολογιστικής απλοποίησης.

#### 5.4.2 Εξαγωγή του πολυωνυμικού μοντέλου με διαχωρισμό δύο διαστημάτων $K_T$

Για την εξαγωγή της συσχέτισης με διαχωρισμό δύο διαστημάτων αρχικά έπρεπε να γίνει η επιλογή των διαστημάτων. Τα διαστήματα που επιλέχθηκαν είναι  $K_T \leq 0,75$  και  $K_T > 0,75$ . Για  $K_T \leq 0,75$  εξήχθη μια πολυωνυμική εξίσωση 2<sup>ου</sup> βαθμού αφού

Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη Εμπειρικού μοντέλου Πρόβλεψης της Διάχυτης Ακτινοβολίας και Στατιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης

ερευνήθηκαν όλες οι πιθανές περιπτώσεις βαθμού πολυωνυμικών εξισώσεων όπως και η γραμμική. Το κριτήριο επιλογής ήταν η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ , ο οποίος για την γραμμική ήταν της τάξεως του 0,793 ενώ για την πολυωνυμική 3<sup>ου</sup> βαθμού ήταν 0,832 και δεν απέχει πολύ από την τιμή της πολυωνυμικής εξίσωσης 2<sup>ου</sup> βαθμού ( $R^2=0,83189$ ). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού αναφέρονται στο κλάσμα  $\frac{I_d}{I}$  ενώ οι πίνακες των στατιστικών συντελεστών αναφέρονται στις τιμές των συντελεστών προσδιορισμού του  $I_d$  ώστε να γίνει περαιτέρω η σύγκριση με τις βιβλιογραφικές συσχετίσεις.

Η σταθερή τιμή που επιλέχθηκε για  $K_T > 0,75$  βασίστηκε στην τήρηση της συνέχειας της εξίσωσης μεταξύ των δύο κλάδων και βρέθηκε ίση με 0,1911.

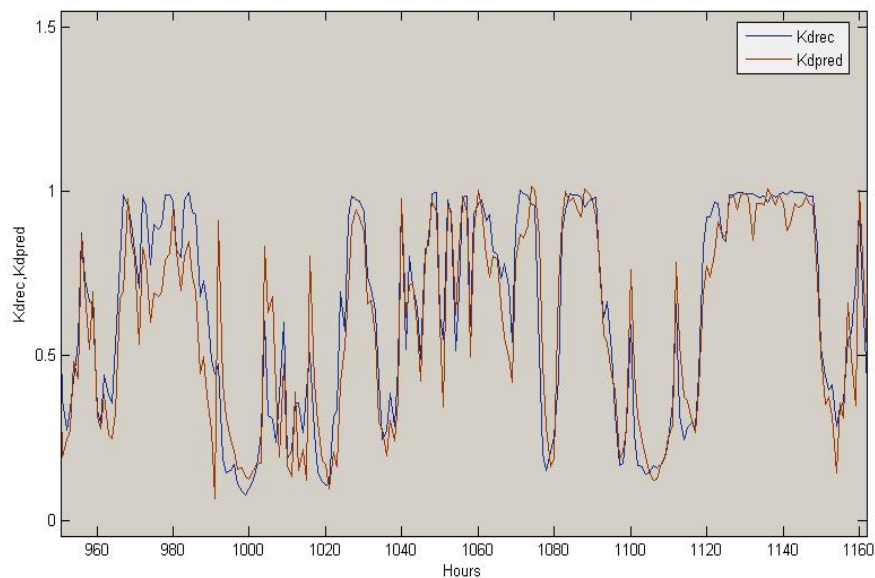
Η πολυωνυμική συσχέτιση 2<sup>ου</sup> βαθμού που εξήχθη είναι η εξής:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} -1,522K_T^2 - 0,085503K_T + 0,98308 & K_T \leq 0,75 \\ 0,1911 & K_T > 0,75 \end{cases} \quad (5.9)$$

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τους στατιστικούς συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού με 2 διαστήματα  $K_T$

**Πίνακας 5.4** Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού με 2 διαστήματα  $K_T$

Στατιστικοί συντελεστές	Τιμή
$R^2$	0,800
MBE	-0,002
MBE (Απόλυτη τιμή, %)	8,654
MPE	0,002
RMSE	0,046
t-stat	3,771



**Διάγραμμα 5.5** Διάγραμμα  $K_{drec}$  και  $K_{dpred}$  για το πολυωνυμικό μοντέλο και για 2 διαστήματα

$$K_T$$

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει για κάποια δεδομένα το προβλεπόμενο  $K_d$  καθώς και το καταγεγραμμένο ως συνάρτηση του  $K_T$ .

### 5.4.3 Συμπέρασμα για τα 4 μοντέλα

Από τη σύγκριση των παραπάνω μοντέλων και με βάση το συντελεστή προσδιορισμού και το RMSE που είναι οι βασικότεροι στατιστικοί δείκτες σύγκρισης των μοντέλων, είναι φανερό ότι το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού με διαχωρισμό 2 διαστημάτων δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.

### **5.5 Περιγραφή των εξεταζόμενων συσχετίσεων**

Οι συσχετίσεις για τις οποίες γίνεται η στατιστική ανάλυση και υπολογίζονται οι στατιστικοί συντελεστές με στόχο τη μεταξύ τους σύγκριση και την απόκλιση τους από τις καταγεγραμμένες τιμές είναι:

Η συσχέτιση του Page, του Erbs, των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.



## 5.6 Πίνακας αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

**Πίνακας 5.5:** Στατιστικές συγκρίσεις ωριαίων συσχετίσεων με δεδομένα Αθήνας-Υπολογισμός  $R^2$ , MBE, RMSE, MPE, t-stat

<i>ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ</i>	$R^2$	<i>MBE</i>	<i>MBE</i> (Απόλυτη τιμή,%)	<i>MPE</i>	<i>RMSE</i>	<i>t-stat</i>
<i>1<sup>ου</sup> βαθμού πολυωνυμικές συσχετίσεις</i>						
<b>Page (1961)</b>	0,791	0,047	34,829	0,008	0,073	54,641
<b>Reindl (1990)</b>	0,788	0,006	10,598	0,002	0,047	8,416
<i>Υψηλότερου βαθμού πολυωνυμικές συσχετίσεις</i>						
<b>Erbs et al (1982)</b>	0,726	0,009	12,105	0,003	0,051	12,110
<b>Orgill and Hollands (1977)</b>	0,749	0,006	10,143	0,002	0,048	8,228
<b>Karatasou (2003)</b>	0,778	0,006	12,518	0,003	0,049	9,274
<b>Νέα συσχέτιση</b>	0,800	-0,002	8,654	0,002	0,046	3,771

Από τον πίνακα 5.5 μπορούν να εξαχθούν κάποια πολύ χρήσιμα συμπεράσματα:

- Μεταξύ των πολυωνυμικών εξισώσεων 1<sup>ου</sup> βαθμού, η συσχέτιση του Reindl είναι πιο ακριβής από τη συσχέτιση του Page.
- Μεταξύ των πολυωνυμικών εξισώσεων υψηλότερου βαθμού η νέα συσχέτιση δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα στηριζόμενη στους υπολογισμούς του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  και του στατιστικού δείκτη RMSE, οι οποίοι όπως έχει αναφερθεί είναι οι πιο αξιόπιστοι δείκτες.
- Οι τιμές των στατιστικών συντελεστών της συσχέτισης του Page απέχουν αρκετά από τις άλλες συσχετίσεις, διότι η συσχέτιση του Page έχει εξαχθεί για μηνιαίες τιμές. Παρόλα αυτά από βιβλιογραφικές πληροφορίες μπορεί να χρησιμοποιείται και για ωριαίες τιμές δεδομένων.

Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη Εμπειρικού μοντέλου Πρόβλεψης της Διάχυτης Ακτινοβολίας και Στατιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης

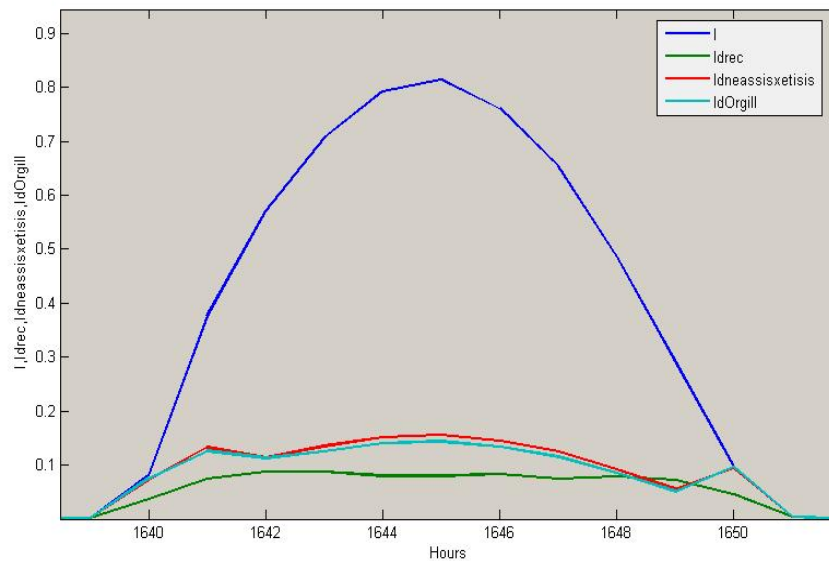
- Ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$  είναι αρκετά ικανοποιητικός για όλες τις συσχετίσεις.
- Η συσχέτιση του Reindl έχει καλύτερο συντελεστή προσδιορισμού παρόλο που η σύγκριση από τα διαγράμματα έδειξε ότι η συσχέτιση των Orgill and Hollands είναι πιο κοντά τις καταγεγραμμένες τιμές. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από την καλύτερη προσέγγιση της συσχέτισης του Reindl τις ηλιόλουστες ημέρες, ημέρες με μεγάλες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας οι οποίες ουσιαστικά «συνεισφέρουν» περισσότερο κατά τον υπολογισμό των διαφόρων δεικτών σε σχέση με τις υπόλοιπες –πιο νεφοσκεπείς- ημέρες.
- Η συσχέτιση του Page -η οποία συνολικά είναι η χειρότερη από τις συγκρινόμενες συσχετίσεις- δίνει εξίσου καλό συντελεστή προσδιορισμού με όλες τις συσχετίσεις. Αυτό το συμπέρασμα μπορεί να αιτιολογηθεί ως εξής: Ο συντελεστής προσδιορισμού στην πραγματικότητα δείχνει κατά πόσο η συσχέτιση διέρχεται από κάποια σημεία ανεξάρτητα τι συμβαίνει στις ενδιάμεσες περιοχές.
- Για να είναι πιο αξιόπιστοι οι δείκτες και η αξιολόγηση των μοντέλων θα έπρεπε να υπολογιστούν οι δείκτες ανά εποχή και ίσως και ανά χαρακτηριστικό τύπο ημερών.
- Επιπλέον θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλη τη διάρκεια της αξιολόγησης και σύγκρισης των συσχετίσεων κάποιοι δείκτες αν χρησιμοποιηθούν μεμονωμένοι για να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένες εκτιμήσεις. Έτσι, η συνολική αξιολόγηση και συνεκτίμηση όλων των διαθέσιμων δεικτών κρίνεται ως η πιο ορθή για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων.
- Οι εξεταζόμενες συσχετίσεις εξετάστηκαν επίσης ως προς τη συνέχεια τους, όταν γινόταν ο διαχωρισμός των επιμέρους κλάδων για την εξαγωγή διαφορετικών εξισώσεων και βρέθηκαν συνεχείς.

## 5.7 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands

Σε αυτή την ενότητα θα συγκρίνουμε τη νέα συσχέτιση που εξήχθη με τη συσχέτιση των Orgill και Hollands, η οποία όπως δείξαμε και στο Κεφάλαιο 4 αποτελεί την πλέον αξιόπιστη για τα διαθέσιμα δεδομένα.

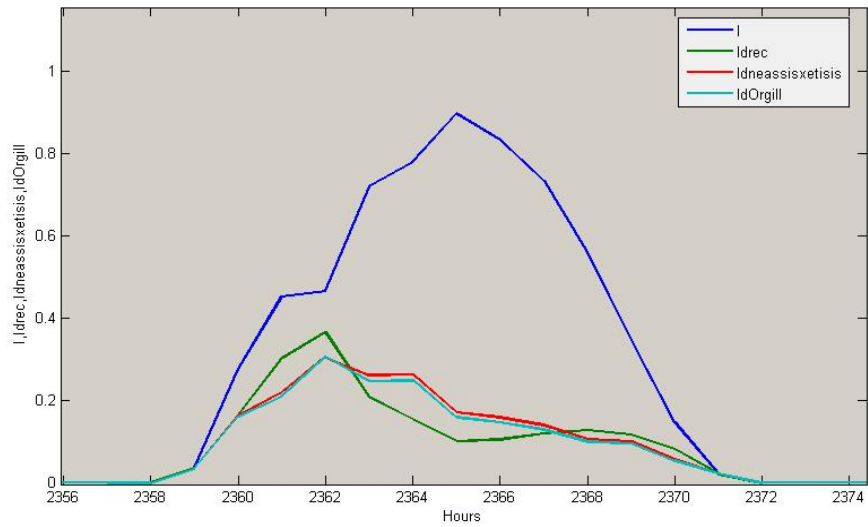
### 5.7.1 Άνοιξη

#### 5.7.1.1 Άνοιξη- Ηλιόλουστη ημέρα



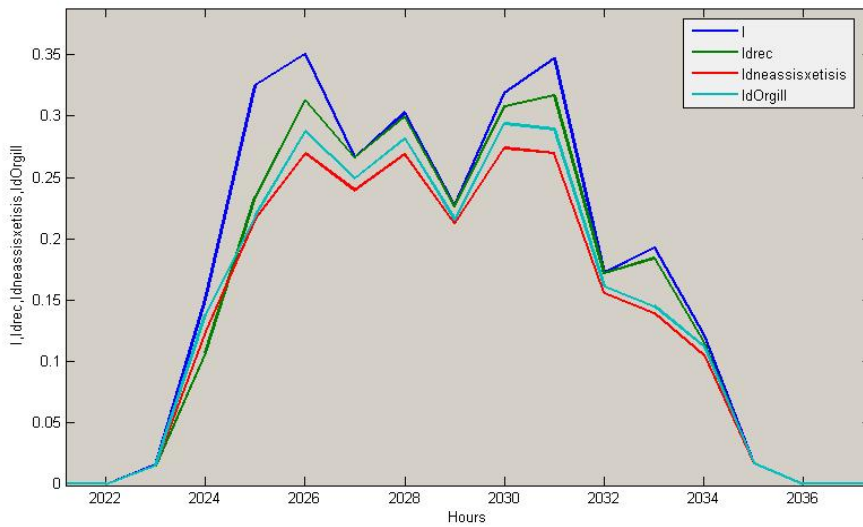
**Διάγραμμα 5.6** Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-  
Άνοιξη- Ηλιόλουστη ημέρα

### 5.7.1.2 Άνοιξη-Ημέρα με λίγα σύννεφα



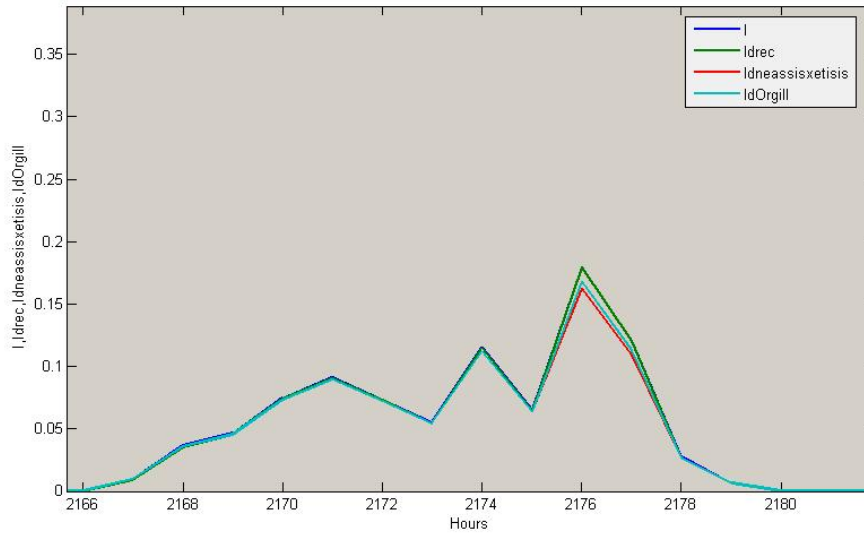
Διάγραμμα 5.7 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Άνοιξη- Ημέρα με λίγα σύννεφα

### 5.7.1.3 Άνοιξη- Συννεφιασμένη ημέρα



Διάγραμμα 5.8 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Άνοιξη- Συννεφιασμένη ημέρα

#### 5.7.1.4 Άνοιξη-Βροχερή ημέρα

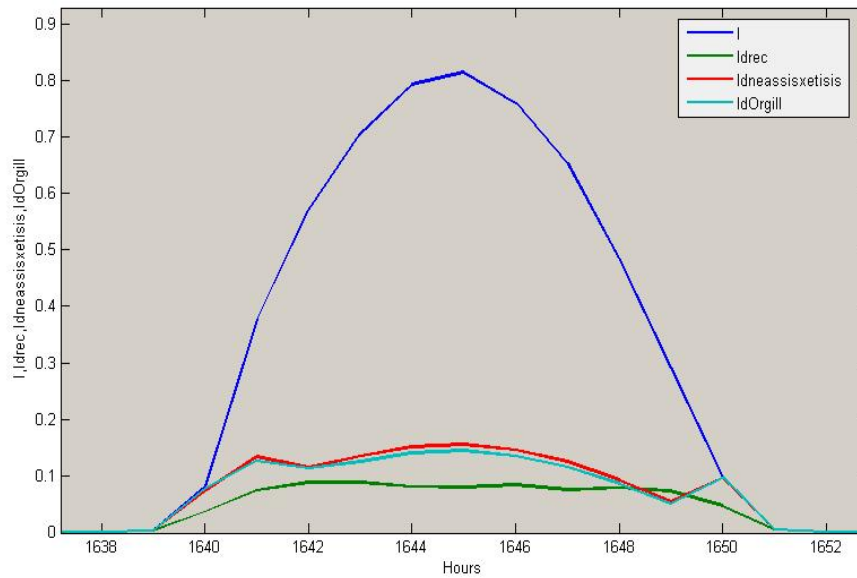


**Διάγραμμα 5.9** Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands-  
Άνοιξη- Βροχερή ημέρα

**Συμπέρασμα:** Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι η συσχέτιση των Orgill and Hollands είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές από τη νέα, η οποία όμως τις προσεγγίζει ικανοποιητικά.

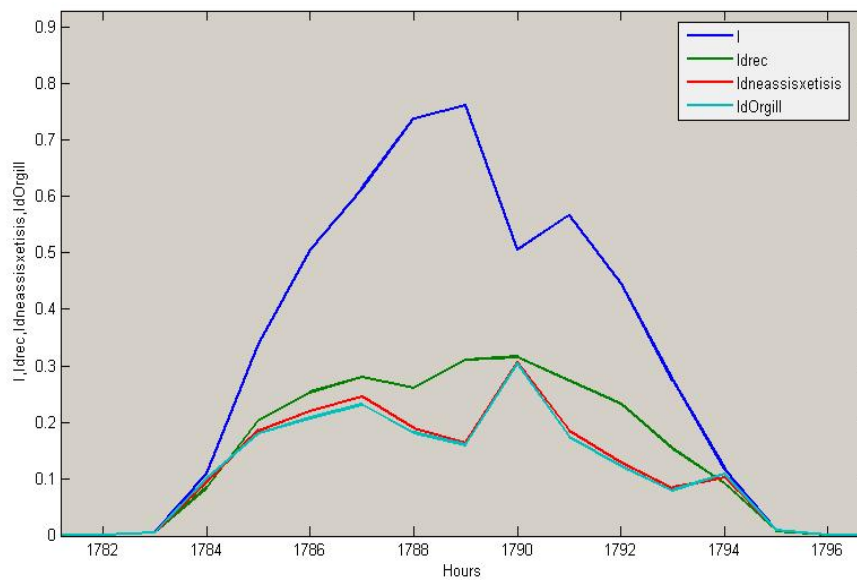
## 5.7.2 Χειμώνας

### 5.7.2.1 Χειμώνας-Ηλιόλουστη ημέρα



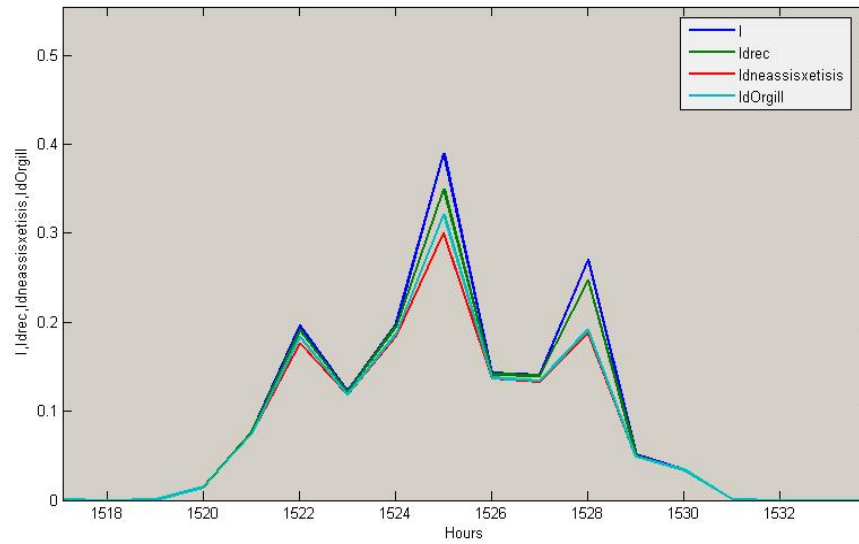
Διάγραμμα 5.10 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Χειμώνας- Ηλιόλουστη ημέρα

### 5.7.2.2 Χειμώνας-Ημέρα με λίγα σύννεφα



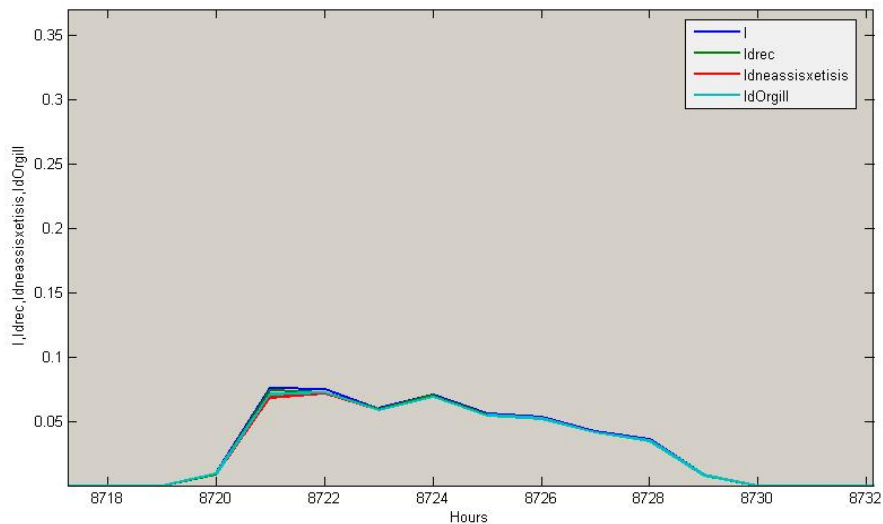
Διάγραμμα 5.11 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Χειμώνας- Ημέρα με λίγα σύννεφα

### 5.7.2.3 Χειμώνας-Συννεφιασμένη ημέρα



Διάγραμμα 5.12 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Χειμώνας- Συννεφιασμένη ημέρα

### 5.7.2.4 Χειμώνας-Βροχερή ημέρα

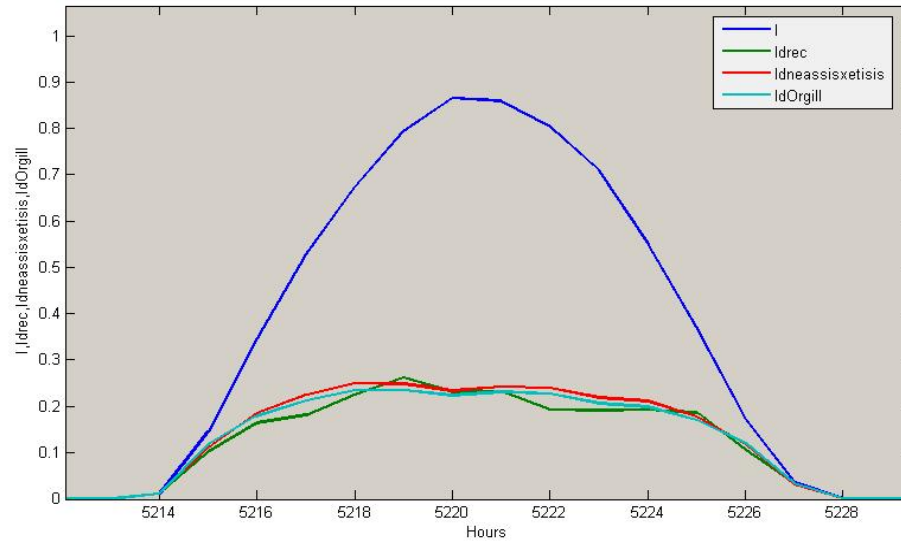


Διάγραμμα 5.13 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Χειμώνας- Βροχερή ημέρα

**Συμπέρασμα:** Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι και οι δύο συσχέτισεις είναι πολύ κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές με πιο καλή τη συσχέτιση των Orgill and Hollands.

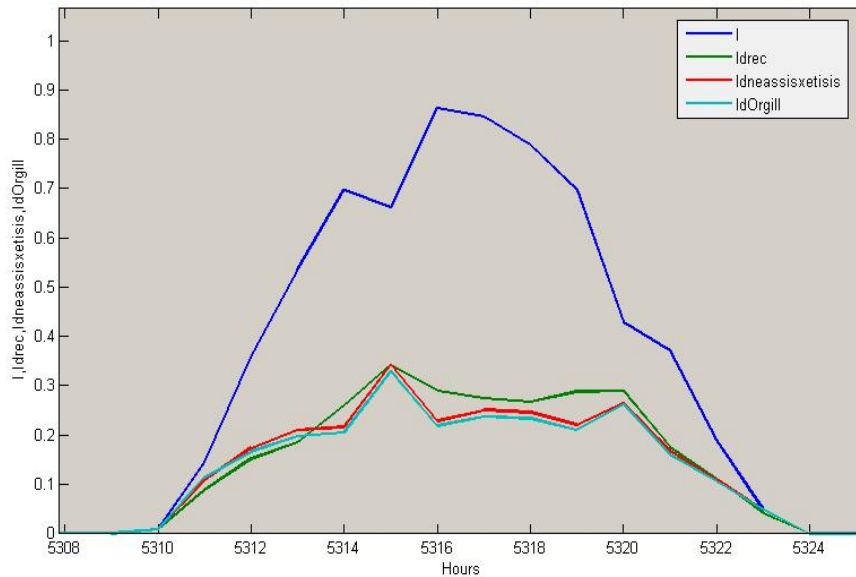
### 5.7.3 Καλοκαίρι

#### 5.7.3.1 Καλοκαίρι-Ηλιόλουστη ημέρα



Διάγραμμα 7.14 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Καλοκαίρι- Ηλιόλουστη ημέρα

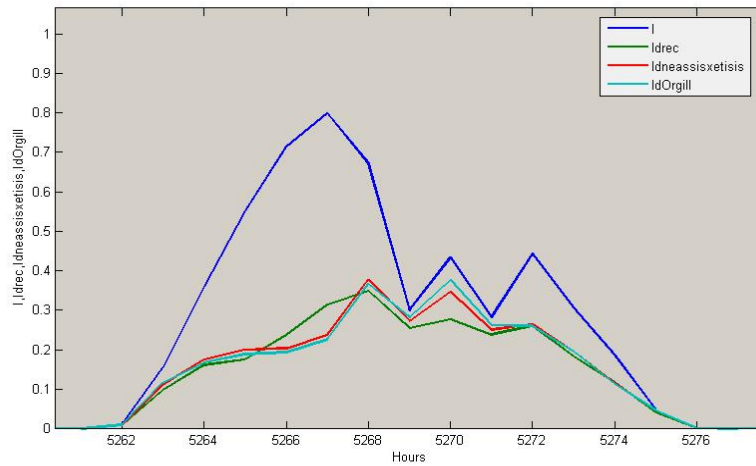
#### 5.7.3.2 Καλοκαίρι- Ημέρα με λίγα σύννεφα



Διάγραμμα 5.15 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Καλοκαίρι- Ημέρα με λίγα σύννεφα



### 5.7.3.3 Καλοκαίρι- Ημέρα συννεφιασμένη

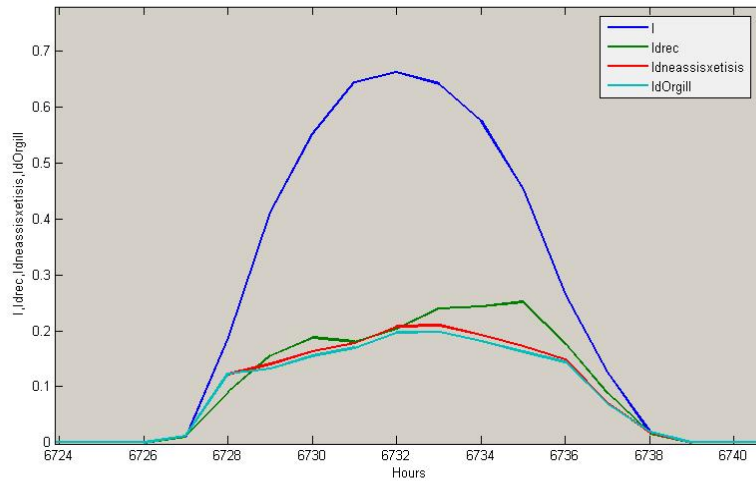


**Διάγραμμα 5.16** Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Καλοκαίρι- Συννεφιασμένη ημέρα

**Συμπέρασμα:** Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι τις ημέρες του καλοκαιριού η νέα συσχέτιση προσεγγίζει αρκετά τις καταγεγραμμένες τιμές όπως και η συσχέτιση των Orgill and Hollands με μεγαλύτερη όμως απόκλιση.

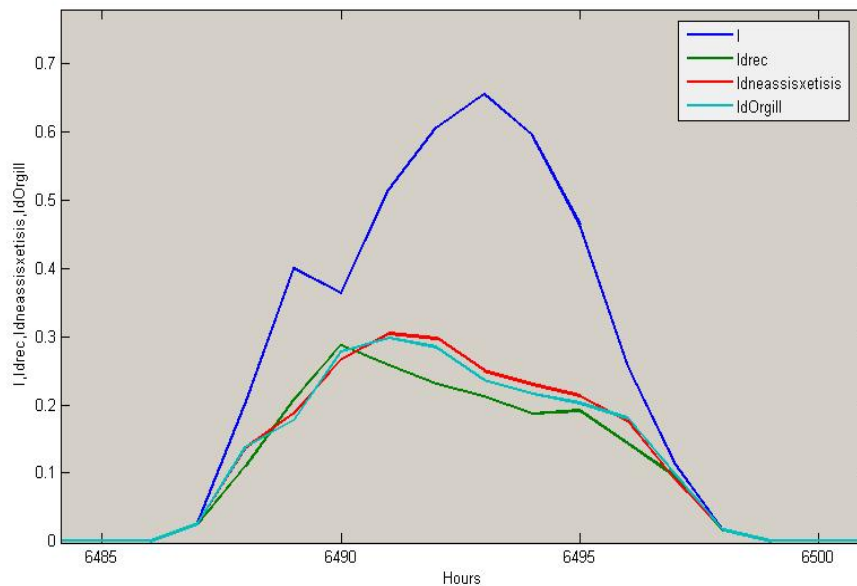
## 5.7.4 Φθινόπωρο

### 5.7.4.1 Φθινόπωρο-Ηλιόλουστη ημέρα



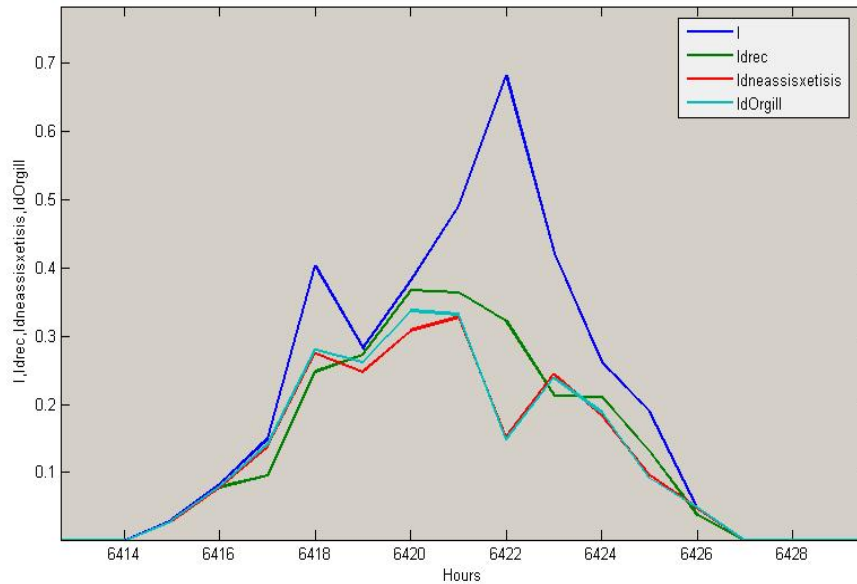
Διάγραμμα 5.17 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Φθινόπωρο- Ηλιόλουστη ημέρα

### 5.7.4.2 Φθινόπωρο-Ημέρα με λίγα σύννεφα



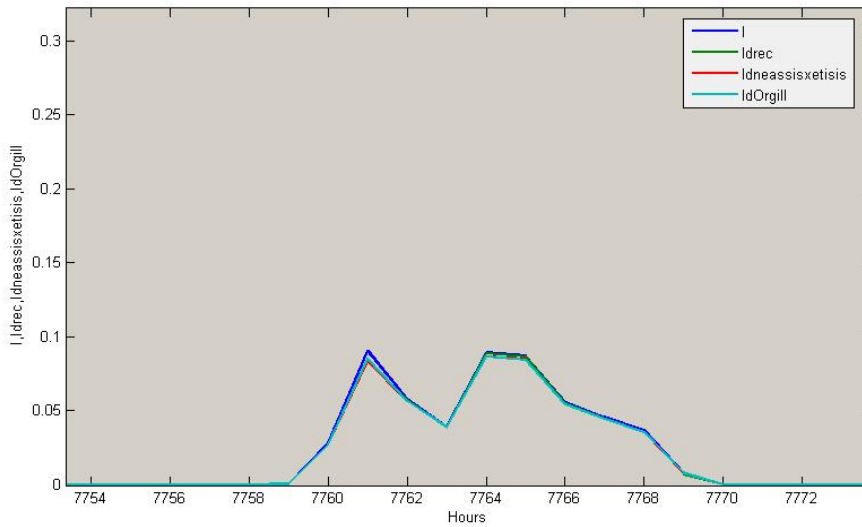
Διάγραμμα 5.18 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Φθινόπωρο- Ημέρα με λίγα σύννεφα

### 5.7.4.3 Φθινόπωρο-Συννεφιασμένη ημέρα



Διάγραμμα 5.19 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Φθινόπωρο- Συννεφιασμένη ημέρα

### 5.7.4.4 Φθινόπωρο-Βροχερή ημέρα



Διάγραμμα 5.20 Σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands- Φθινόπωρο- Βροχερή ημέρα

**Συμπέρασμα:** Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνεται ότι και οι δύο συσχετίσεις είναι κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές με λίγο καλύτερη τη συσχέτιση των Orgill and Hollands.

Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη Εμπειρικού μοντέλου Πρόβλεψης της Διάχυτης Ακτινοβολίας και Στατιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης

Τα παραπάνω συμπεράσματα φαίνονται στον πίνακα 5.6 που παρουσιάζεται στη συνέχεια:

**Πίνακας 5.7:** Συμπεράσματα από τη σύγκριση της συσχέτισης των Orgill and Hollands και της νέας συσχέτισης για όλες τις εποχές

Συσχέτιση	Εποχή			
	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας
<i>Orgill and Hollands</i>	☼☼☼☼	☼☼☼☼☼	☼☼☼☼	☼☼☼☼
<i>Νέα</i>	☼☼☼☼	☼☼☼☼	☼☼☼☼	☼☼☼☼

☼: όχι καλή

☼☼☼☼☼: πολύ καλή

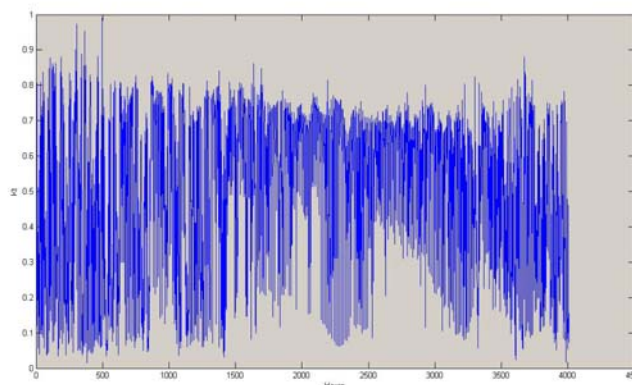
☼☼☼☼☼☼: αρκετά καλή

☼☼☼☼: καλή

### 5.8 Υπολογισμός μέσω μηνιαίων $\overline{K_T}$ και μέσω μηνιαίων $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$

Στο παρακάτω κεφάλαιο υπολογίστηκαν οι τιμές των μέσων μηνιαίων  $\overline{K_T}$  και  $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$ . Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει γραφικά το συντελεστή αιθριότητας,  $K_T$  για ένα ολόκληρο έτος (2004).

Για να επιτευχθεί ο υπολογισμός των τιμών του  $K_T$ , περιοριστήκαμε αρχικά στις ώρες ημέρας και έτσι για κάθε μήνα προσδιορίστηκαν οι ώρες που αντιστοιχούν σε αυτά τα διαστήματα. Αυτός ο διαχωρισμός καθώς και οι μέσες μηνιαίες τιμές που υπολογίστηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.



**Διάγραμμα 5.21** Ο συντελεστής αιθριότητας  $K_T$  συναρτήσει των ωρών για τη διάρκεια του έτους 2004

Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη Εμπειρικού μοντέλου Πρόβλεψης της Διάχυτης Ακτινοβολίας και Στατιστικές Μέθοδοι Ανάλυσης

Πίνακας 5.8 Μέσες μηνιαίες τιμές του  $\overline{K_T}$  και του λόγου  $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$

Μήνας	Διάρκεια ωρών	$\overline{K_T}$	$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$
Ιανουάριος	1:300	0,4022	0,6757
Φεβρουάριος	300:600	0,3933	0,6950
Μάρτιος	600:930	0,4724	0,6144
Απρίλιος	930:1300	0,4953	0,6199
Μάιος	1300:1700	0,5483	0,4761
Ιούνιος	1700:2110	0,5834	0,4095
Ιούλιος	2110:2545	0,5804	0,4367
Αύγουστος	2545:2910	0,6002	0,4250
Σεπτέμβριος	2910:3270	0,5775	0,5043
Οκτώβριος	3270:3595	0,5109	0,6179
Νοέμβριος	3595:3880	0,4497	0,6549
Δεκέμβριος	3880:4094	0,3828	0,7210

Υπολογίστηκε επίσης μια μέση τιμή του συντελεστή  $\overline{K_T}$  για τη διάρκεια του έτους 2004 και βρέθηκε ίση με 0,5112.

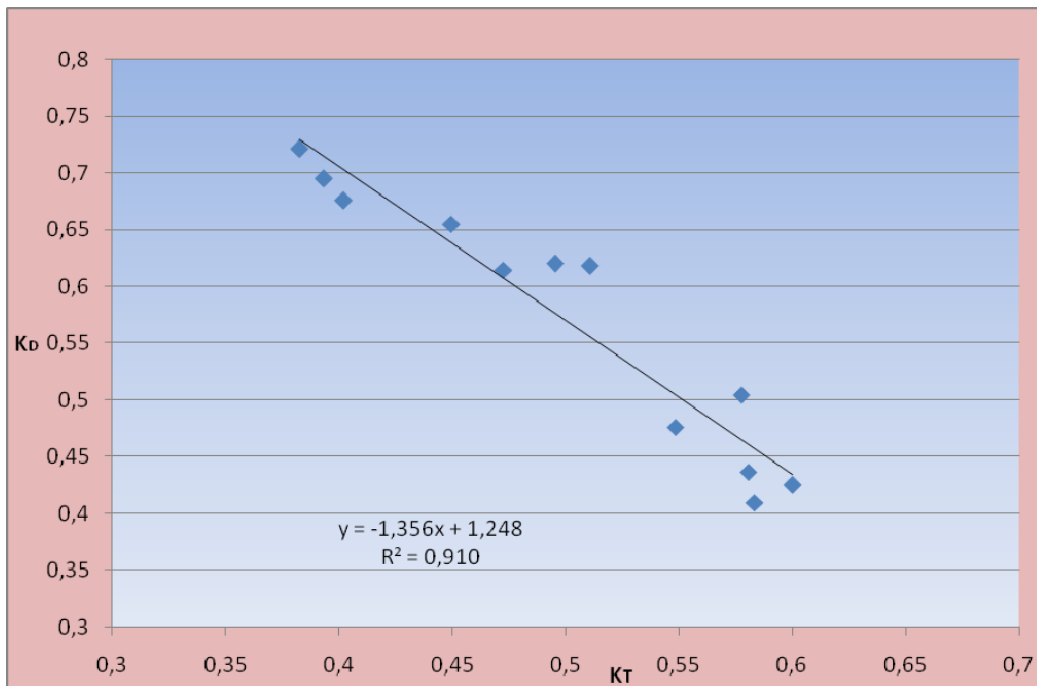
Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι πιο συννεφιασμένοι μήνες του έτους 2004 είναι με φθίνουσα σειρά ο Δεκέμβριος, ο Φεβρουάριος και ο Ιανουάριος. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού είναι το διάστημα κατά τη διάρκεια του χειμώνα.
- Ο πιο ηλιόλουστος μήνας του έτους (με τη μεγαλύτερη τιμή του  $\overline{K_T}$ ) είναι ο Αύγουστος.

- Οι μήνες της άνοιξης (Μάρτιος και Απρίλιος) είναι αρκετά συννεφιασμένοι σε σχέση με τους μήνες του καλοκαιριού.

### 5.9 Εξαγωγή μηνιαίας συσχέτισης μεταξύ του λόγου $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$ και του $\overline{K_T}$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές του παραπάνω πίνακα για τα μέσα μηνιαία  $\overline{K_T}$  και το λόγο  $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$  έγινε η εξαγωγή μίας γραμμικής συσχέτισης όπως φαίνεται παρακάτω:



**Διάγραμμα 5.22** Διάγραμμα μηνιαίας συσχέτισης μεταξύ μηνιαίου  $\overline{K_T}$  και του λόγου  $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$

Όπως παρατηρείται από το παραπάνω διάγραμμα η μηνιαία συσχέτιση είναι γραμμική της μορφής:

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = -1,356 \overline{K_T} + 1,248$$

Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι  $R^2=0,91$  και  $RMSE=0,0095$ .



**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ  
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

## 6.1 Εισαγωγή

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρατίθενται συγκεντρωτικά τα διάφορα συμπεράσματα που εξήχθησαν από όλη την εργασία.

Γενικότερα, η συγκεκριμένη εργασία κινήθηκε σε τρεις βασικούς άξονες εξαγωγής αποτελεσμάτων και αξιολόγησής τους:

- ✓ Σύγκριση των βιβλιογραφικών συσχετίσεων του Page, του Erbs, των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για τις χαρακτηριστικές ημέρες των τεσσάρων εποχών του έτους.
- ✓ Υπολογισμός των στατιστικών συντελεστών των συσχετίσεων που αναλύθηκαν για πιο λεπτομερή ανάλυση.
- ✓ Εξαγωγή ενός καινούριου εμπειρικού μοντέλου βασιζόμενο σε δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας ενός έτους (2004) για την περιοχή της Αθήνας.
- ✓ Υπολογισμός των μέσων μηνιαίων  $K_T$  και των μέσων μηνιαίων  $K_D$  για το έτος 2004 και εξαγωγή μιας μηνιαίας συσχέτισης μεταξύ τους.

## 6.2 Συμπεράσματα από τη σύγκριση των βιβλιογραφικών συσχετίσεων

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των βιβλιογραφικών συσχετίσεων με διαχωρισμό του έτους σε εποχές και με βάση τέσσερις χαρακτηριστικούς τύπους ημερών είναι:

- Το γενικό συμπέρασμα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs είναι ότι η συσχέτιση του Erbs είναι ιδανική για τις βροχερές και συννεφιασμένες ημέρες για όλες τις εποχές. Τις ημέρες με λίγα σύννεφα αν και παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκλίσεις είναι καλύτερη από τη συσχέτιση του Page, ενώ για τις ηλιόλουστες ημέρες καμία από τις δύο συσχετίσεις δεν πλησιάζει τις καταγεγραμμένες τιμές ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί.
- Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου είναι ότι οι τρεις συσχετίσεις έχουν παρόμοια προσέγγιση ως προς τις καταγεγραμμένες τιμές.
- Η συσχέτιση των Orgill and Hollands είναι η ιδανικότερη για χρήση σε όλες τις εποχές και για όλους τους χαρακτηριστικούς τύπους ημερών.



Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία

- Όλες οι εξεταζόμενες συσχετίσεις δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα με μικρές αποκλίσεις από τις καταγεγραμμένες τιμές για τις βροχερές ημέρες όλου του έτους.
- Τα παραπάνω συμπεράσματα φαίνονται από τους πίνακες που παρατίθενται παρακάτω και αφορούν ξεχωριστά κάθε εποχή και ξεχωριστά σύγκριση των συσχετίσεων του Erbs και του Page και της Καρατάσου, του Reindl και των Orgill and Hollands.

**Πίνακας 6.1** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το χειμώνα

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<i>Page</i>	☀☀	☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀
<i>Erbs</i>	☀☀	☀☀	☀☀☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀

☀: όχι καλή

☀☀: καλή

☀☀☀☀: αρκετά καλή

☀☀☀☀☀☀: πολύ καλή

**Πίνακας 6.2** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για την άνοιξη

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<i>Page</i>	☀	☀	☀☀	☀☀☀☀
<i>Erbs</i>	☀	☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀

**Πίνακας 6.3** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το καλοκαίρι

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας		
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα
<i>Page</i>	☀	☀☀	☀☀
<i>Erbs</i>	☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀

Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εργασία

**Πίνακας 6.4:** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων του Page και του Erbs για το φθινόπωρο

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<i>Page</i>	☀☀	☀☀	☀☀	☀☀☀☀
<i>Erbs</i>	☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀

**Πίνακας 6.5** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το χειμώνα

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<i>Orgill and Hollands</i>	☀	☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀
<i>Reindl</i>	☀	☀☀☀☀	☀☀	☀☀☀☀☀☀
<i>Καρατάσου</i>	☀	☀☀	☀☀	☀☀☀☀

**Πίνακας 6.6** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για την άνοιξη

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<i>Orgill and Hollands</i>	☀	☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀
<i>Reindl</i>	☀	☀	☀☀	☀☀☀☀☀☀
<i>Καρατάσου</i>	☀	☀☀	☀	☀☀☀☀

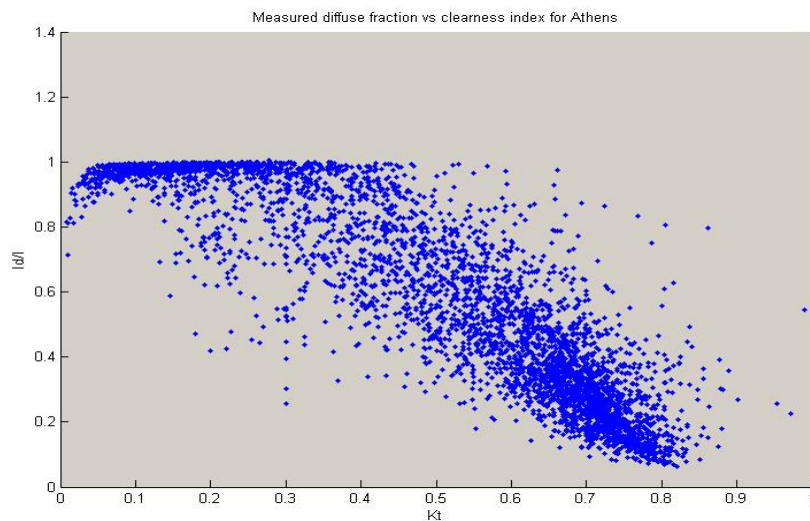
**Πίνακας 6.7** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το καλοκαίρι

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας		
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα
<i>Orgill and Hollands</i>	☀☀☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀
<i>Reindl</i>	☀☀	☀☀	☀☀☀☀
<i>Καρατάσου</i>	☀☀	☀☀	☀☀☀☀

**Πίνακας 6.8** Συμπεράσματα από τη σύγκριση των συσχετίσεων των Orgill and Hollands, του Reindl και της Καρατάσου για το φθινόπωρο

Συσχέτιση	Χαρακτηρισμός ημέρας			
	Ηλιόλουστη	Λίγα σύννεφα	Αρκετά σύννεφα	Βροχή
<i>Orgill and Hollands</i>	☀☀	☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀
<i>Reindl</i>	☀☀	☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀☀☀☀
<i>Καρατάσου</i>	☀☀	☀☀	☀☀	☀☀☀☀☀☀

### 6.3 Συμπεράσματα από την ανάπτυξη της νέας συσχέτισης



**Διάγραμμα 6.1** Κλάσμα διάχυτης ακτινοβολίας συναρτήσει του συντελεστή αιθριότητας για την περιοχή της Αθήνας

Για την εξαγωγή των συσχετίσεων μεταξύ του συντελεστή αιθριότητας  $K_T$  και του  $K_D$  χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ενός έτους (2004) για την Αθήνα αφού εξετάστηκαν ως προς τους περιορισμούς που περιγράφονται στην ενότητα 5.2 και κατόπιν περιορισμού των μηδενικών τιμών, ώστε η τελική βάση δεδομένων να αποτελείται από 4007 δεδομένα.

### 6.3.1 Συμπεράσματα από την εξαγωγή του μοντέλου με ενιαίο διάστημα $K_T$

Για την εξαγωγή της καταλληλότερης συσχέτισης με ενιαίο διάστημα  $K_T$ , έγινε σύγκριση μεταξύ των συντελεστών προσδιορισμού  $R^2$  των  $K_D$  και από τις δύο πολυωνυμικές εξισώσεις επιλέχθηκε η πολυωνυμική 2<sup>ο</sup> βαθμού καθώς οι δύο συντελεστές προσδιορισμού δεν διέφεραν και πολύ. Για τη γραμμική εξίσωση ο συντελεστής προσδιορισμού του  $K_D$  ήταν 0,788, για την πολυωνυμική 2<sup>ο</sup> βαθμού 0,82517 και για του 3<sup>ο</sup> βαθμού 0,82563. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για πολυωνυμική εξίσωση βαθμού μεγαλύτερου του 3<sup>ο</sup> δεν υπήρχε καμία βελτίωση του συντελεστή προσδιορισμού.

- Η εξίσωση του γραμμικού μοντέλου που εξήχθη φαίνεται παρακάτω όπως και ο πίνακας με τους στατιστικούς δείκτες.

$$\frac{I_d}{I} = 1.1875 - 1.224K_T \quad (6.1)$$

**Πίνακας 6.9** Στατιστικοί συντελεστές για το γραμμικό μοντέλο με ενιαίο διάστημα  $K_T$

Στατιστικοί συντελεστές	Τιμή
$R^2$	0,747
MBE	0,004
MBE (Απόλυτη τιμή, %)	5,704
MPE	0,001
RMSE	0,052
t-stat	5,917

- Η εξίσωση του πολυωνυμικού μοντέλου 2<sup>ο</sup> βαθμού και ο αντίστοιχος πίνακας είναι:

$$\frac{I_d}{I} = -0,9921K_T^2 - 0,3292K_T + 1,0394 \quad (6.2)$$

**Πίνακας 6.10** Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ο</sup> βαθμού με ενιαίο διάστημα  $K_T$

Στατιστικοί συντελεστές	Τιμή
$R^2$	0,783
MBE	0,003
MBE (Απόλυτη τιμή, %)	4,879
MPE	0,001
RMSE	0,048
t-stat	4,650

- Η εξίσωση του πολυωνυμικού μοντέλου 3<sup>ο</sup> βαθμού και ο πίνακας με τους στατιστικούς συντελεστές είναι:

$$\frac{I_d}{I} = 3,4678K_T^3 - 5,7214K_T^2 + 1,5038K_T + 0,86825 \quad (6.3)$$

**Πίνακας 6.11** Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 3<sup>ο</sup> βαθμού με ενιαίο διάστημα  $K_T$

Στατιστικοί συντελεστές	Τιμή
$R^2$	0,795
MBE	0,002
MBE (Απόλυτη τιμή, %)	5,862
MPE	0,001
RMSE	0,046
t-stat	3,250

Από τη σύγκριση των 3 μοντέλων για το ενιαίο διάστημα  $K_T$  προκύπτει ότι τους καλύτερους στατιστικούς δείκτες έχει το πολυωνυμικό μοντέλο 3<sup>ο</sup> βαθμού, αλλά λόγω της μικρής διαφοράς σε σχέση με το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ο</sup> βαθμού, επιλέγεται ο μικρότερος βαθμός πολυωνύμου.

### 6.3.2 Συμπεράσματα από την εξαγωγή συσχέτισης με διαχωρισμό διαστημάτων $K_T$

Για την εξαγωγή της συσχέτισης με διαχωρισμό δύο διαστημάτων αρχικά έπρεπε να γίνει η επιλογή των διαστημάτων. Τα διαστήματα που επιλέχθηκαν είναι  $K_T \leq 0,75$  και  $K_T > 0,75$ . Για  $K_T \leq 0,75$  εξήχθη μια πολυωνυμική εξίσωση 2<sup>ου</sup> βαθμού αφού ερευνήθηκαν όλες οι πιθανές περιπτώσεις βαθμού πολυωνυμικών εξισώσεων όπως και η γραμμική. Το κριτήριο επιλογής ήταν η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ , ο οποίος για μεν τη γραμμική ήταν της τάξεως του 0,793 ενώ για την πολυωνυμική 3<sup>ου</sup> βαθμού ήταν 0,832 και δεν απέιχε πολύ από την τιμή της πολυωνυμικής εξίσωσης 2<sup>ου</sup> βαθμού ( $R^2=0,83189$ ).

Η σταθερή τιμή που επιλέχθηκε για  $K_T > 0,75$  βασίστηκε στην τήρηση της συνέχειας της εξίσωσης μεταξύ των δύο κλάδων και βρέθηκε ίση με 0,1911.

✓ Η πολυωνυμική συσχέτιση 2<sup>ου</sup> βαθμού που εξήχθη είναι η εξής:

$$\frac{I_a}{I} = \begin{cases} -1,522K_T^2 - 0,085503K_T + 0,98308 & K_T < 0,75 \\ 0,1911 & K_T > 0,75 \end{cases} \quad (6.4)$$

**Πίνακας 6.12** Στατιστικοί συντελεστές για το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού με 2 διαστήματα  $K_T$

Στατιστικοί συντελεστές	Τιμή
$R^2$	0,800
MBE	-0,002
MBE (Απόλυτη τιμή, %)	8,654
MPE	0,002
RMSE	0,046
t-stat	3,771

### 6.3.3 Συμπέρασμα για τα 4 μοντέλα

Από τη σύγκριση των παραπάνω μοντέλων και με βάση το συντελεστή προσδιορισμού και το RMSE που είναι οι βασικότεροι στατιστικοί δείκτες σύγκρισης των μοντέλων, είναι φανερό ότι το πολυωνυμικό μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού με διαχωρισμό 2 διαστημάτων δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Η εξίσωση που προτείνουμε ως καλύτερη είναι:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} -1,522K_T^2 - 0,085503K_T + 0,98308 & K_T \leq 0,75 \\ 0,1911 & K_T > 0,75 \end{cases}$$

#### 6.4 Συμπεράσματα από τη στατιστική ανάλυση των μοντέλων

**Πίνακας 6.13:** Στατιστικές συγκρίσεις ωριαίων συσχετίσεων με δεδομένα Αθήνας-Υπολογισμός  $R^2$ , MBE, RMSE, MPE, t-stat

<i>ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ</i>	$R^2$	MBE	MBE (Απόλυτη τιμή,%)	MPE	RMSE	t-stat
<i>1<sup>ο</sup> βαθμού πολυωνυμικές συσχετίσεις</i>						
<b>Page (1961)</b>	<b>0,791</b>	0,047	34,829	0,008	<b>0,073</b>	54,641
<b>Reindl (1990)</b>	<b>0,788</b>	0,006	10,598	0,002	<b>0,047</b>	8,416
<i>Υψηλότερου βαθμού πολυωνυμικές συσχετίσεις</i>						
<b>Erbs et al (1982)</b>	<b>0,726</b>	0,009	12,105	0,003	<b>0,051</b>	12,110
<b>Orgill and Hollands (1977)</b>	<b>0,749</b>	0,006	10,143	0,002	<b>0,048</b>	8,228
<b>Karatasou (2003)</b>	<b>0,778</b>	0,006	12,518	0,003	<b>0,049</b>	9,274
<b>Νέα συσχέτιση</b>	<b>0,800</b>	-0,002	8,654	0,002	<b>0,046</b>	3,771

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι η νέα συσχέτιση που εξήχθη δίνει τους καλύτερους στατιστικούς δείκτες σε σχέση με τις άλλες βιβλιογραφικές συσχετίσεις που εξετάστηκαν.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι η συσχέτιση των Orgill and Hollands είναι πιο κοντά στις καταγεγραμμένες τιμές συγκρινόμενη με τις άλλες συσχετίσεις, παρόλο που η συσχέτιση του Reindl και του Page έχουν καλύτερους συντελεστές προσδιορισμού. Αυτό εξηγείται από την ερμηνεία του ορισμού του συντελεστή προσδιορισμού, ο οποίος δεν λαμβάνει υπόψη την ενδιάμεση περιοχή παρά μόνο αν τα δεδομένα που υπάρχουν δίνουν ευθεία γραμμή, οπότε και δεν είναι αξιόπιστος για

την εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων. Επίσης η συσχέτιση του Reindl λόγω του ότι έχει καλύτερη προσέγγιση τις ημέρες με μεγάλη ηλιοφάνεια, εμφανίζεται με καλύτερο συντελεστή προσδιορισμού, χωρίς όμως να έχει τόσο καλή συμπεριφορά όσο η συσχέτιση των Orgill and Hollands.

### 6.5 Συμπέρασμα από τη σύγκριση των διαγραμμάτων του συντελεστή αιθριότητας $K_T$ συναρτήσεως του $K_D$ για τη νέα συσχέτιση και τη συσχέτιση των Orgill and Hollands

Παρατηρώντας και τις δύο συσχετίσεις για όλες τις εποχές, η συσχέτιση των Orgill and Hollands προσεγγίζει περισσότερο τις καταγεγραμμένες τιμές, όμως και η νέα συσχέτιση είναι αρκετά ικανοποιητική, όπως φαίνεται και στον πίνακα 6.15:

**Πίνακας 6.14** Συμπεράσματα από τη σύγκριση της νέας συσχέτισης και της συσχέτισης των Orgill and Hollands για τις τέσσερις εποχές

Συσχέτιση	Εποχή			
	Άνοιξη	Καλοκαίρι	Φθινόπωρο	Χειμώνας
Orgill and Hollands	☀☀☀	☀☀☀☀	☀☀☀	☀☀☀
Νέα	☀☀☀	☀☀☀	☀☀☀	☀☀☀

☀: όχι καλή

☀☀☀☀: πολύ καλή

☀☀☀☀: αρκετά καλή

☀☀: καλή

### 6.6 Συμπεράσματα από τον υπολογισμό μέσω μηνιαίων $K_T$ και

μέσω μηνιαίων  $\frac{H_d}{H}$  και από την εξαγωγή της μηνιαίας συσχέτισης

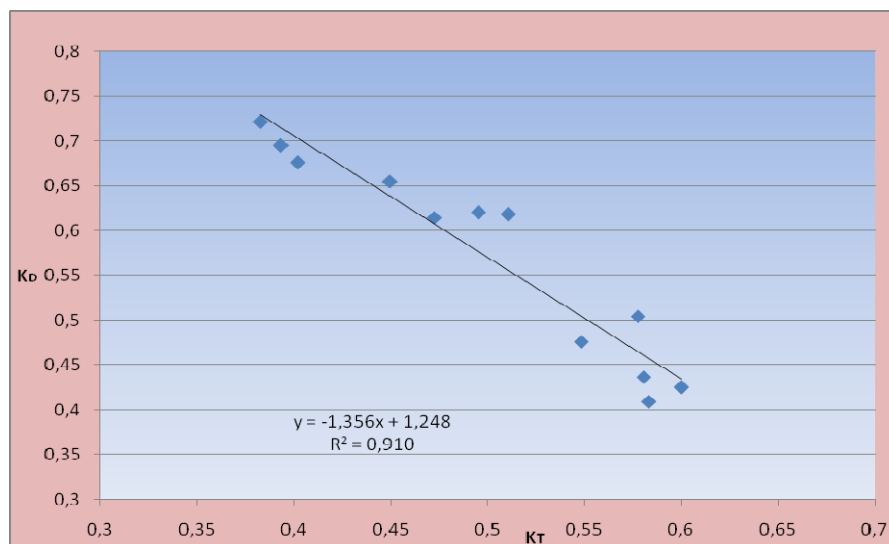
μεταξύ  $\frac{H_d}{H}$  και  $\overline{K_T}$

Υπολογίζοντας τις μέσες τιμές του συντελεστή αιθριότητας  $\overline{K_T}$  και του  $K_D$  αρχικά κατασκευάστηκε ο παρακάτω πίνακας. Στη συνέχεια με χρήση των δεδομένων μέσω μηνιαίων  $K_T$  και  $K_D$ , εξήχθη μία γραμμική συσχέτιση μεταξύ τους με έναν συντελεστή προσδιορισμού  $R^2=0,91$  και  $RMSE=0,0095$  όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Πίνακας 6.15 Μέσες μηνιαίες τιμές του  $\overline{K_T}$  και του λόγου  $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$

Μήνας	Διάρκεια ωρών	$\overline{K_T}$	$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$
Ιανουάριος	1:300	0,4022	0,6757
Φεβρουάριος	300:600	0,3933	0,6950
Μάρτιος	600:930	0,4724	0,6144
Απρίλιος	930:1300	0,4953	0,6199
Μάιος	1300:1700	0,5483	0,4761
Ιούνιος	1700:2110	0,5834	0,4095
Ιούλιος	2110:2545	0,5804	0,4367
Αύγουστος	2545:2910	0,6002	0,4250
Σεπτέμβριος	2910:3270	0,5775	0,5043
Οκτώβριος	3270:3595	0,5109	0,6179
Νοέμβριος	3595:3880	0,4497	0,6549
Δεκέμβριος	3880:4094	0,3828	0,7210



**Διάγραμμα 6.3** Διάγραμμα μηνιαίας συσχέτισης μεταξύ μηνιαίου  $\overline{K_T}$  και του λόγου  $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$

## 6.7 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για μελλοντική εργασία και έρευνα:

- Μελέτη άλλων ωριαίων συσχετίσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία ώστε να συγκριθούν μεταξύ τους και με τις καταγεγραμμένες τιμές διάχυτης ακτινοβολίας, όπως πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.
- Προσαρμογή του υπάρχοντος κώδικα έτσι ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή ημερήσιων και μηνιαίων συσχετίσεων για περαιτέρω ανάλυση και με περισσότερα δεδομένα από περισσότερα έτη.
- Εξαγωγή των διαγραμμάτων του νέου εμπειρικού μοντέλου για σύγκριση με τις ήδη υπάρχουσες βιβλιογραφικές συσχετίσεις για τους χαρακτηριστικούς τύπους ημερών των τεσσάρων εποχών του έτους.
- Μελέτη των διαφόρων συσχετίσεων με διαχωρισμό του έτους όχι σε εποχές αλλά σε δύο τύπους ημερών (ψυχρή και θερμή) και με βάση τις χαρακτηριστικότερες ημέρες κάθε εποχής.
- Υπολογισμός των στατιστικών συντελεστών για κάθε εποχή ξεχωριστά και όχι για ολόκληρο το έτος, ώστε να γίνει μια πιο λεπτομερής ανάλυση.
- Υπολογισμός των στατιστικών συντελεστών ανά εποχή ώστε να αποφεύγεται η λανθασμένη εξαγωγή συμπερασμάτων λόγω καλύτερης απόδοσης συσχετίσεων σε χαρακτηριστικούς τύπους ημερών.
- Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των νέων συσχετίσεων να εξεταστούν ως προς άλλες παραμέτρους όπως η εποχικότητα και η υγρασία για την περαιτέρω ανάλυση της βάσης δεδομένων ως προς παραμέτρους τις οποίες δεν έχουμε λάβει υπόψη.



***Βιβλιογραφία***

- Aksoy B, Estimated average global radiation for Turkey and its comparison with observations, *Renewable Energy* 1997;10:625–33
- Albizzati ED, Rossetti GH, Alfano OM. *Measurements and predictions of solar radiation incident on horizontal surfaces at Santa Fe, Argentina (31° 39'S, 60° 43'W)*". *Renewable Energy* 1997;11:469-78
- Angstrom AK, *Solar and atmospheric radiation, Q.J.R.M.S.1924*; 20:121-126
- ASHRAE handbook: *HVAC applications*. Atlanta(GA): ASHRAE, 1999
- Bahel V, Srinivasan R and Bakhsh H, *Statistical comparison of correlations for estimation of global horizontal solar radiation, Energy* 1987; 12:1309-1316
- Baig A, Achter P, Mufti A. *A novel approach to estimate the clear day global radiation*. *Renewable Energy* 1991;1:119–23
- Barbado S, Cannata G, Coppilino S, Leone C, Sinagra E, Diffuse radiation statistics for Italy. *Solar Energy* 1981;26:429–35
- Benson RB, Paris MV, Sherry JE and Justus CG, *Estimation of daily and monthly direct, diffuse and global solar radiation from sunshine duration measurements*, *Solar Energy* 1984; 32:523-535
- Bird R and Hulstrom RL, *A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces*. SERI/TR-642-761. Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, U.S.A., 1981
- Black JN, Bonython CW and Prescott JA, *Solar radiation and the duration of sunshine, Q.J.R.M.S.1954* ;84:231-235
- C.C.Y. Ma and Iqbal M, *Statistical comparison of solar radiation correlations-Monthly average global and diffuse radiation on horizontal surfaces, Solar Energy* 1984; 33:143-148
- Choudhury NKD, Solar radiation at New Delhi, *Solar Energy* 1963;7:44.
- Climatological Bulletin, Global Radiation Measurements on the Horizontal. National Observatory of Athens (1957-1981)
- Collares-Pereira M, Rabl A. The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values, *Solar Energy* 1979; 22:155-164
- Davies JA, McKay DC. *Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces*. *Solar Energy* 1989;43:153-68

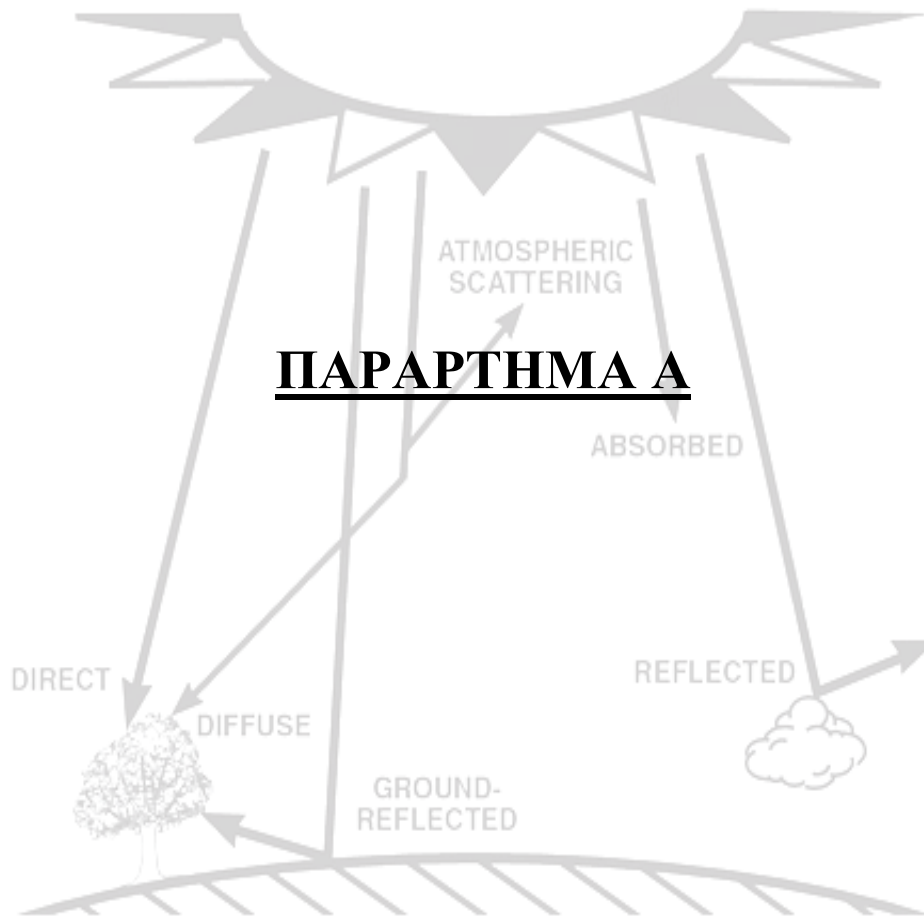
- Dorvlo ASS, Jervase JA, Al-Lawati A. Solar radiation estimation using artificial neural networks. *Applied Energy* 2002;71:307-19
- Duffie J.A, Beckman W.A, *Solar Engineering on Thermal Processes* , third edition, John Wiley & Sons, LTD, New York, 2006
- Eduardo Lorenzo, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Energy Collected and Delivered by PV Modules*, Edited by A. Luque and S. Hegedus, 2003.
- Erbs D.G., Klein S.A and Duffie J.A, “*Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly –average global radiation*”, *Solar Energy* 1982; 28(4): 293-302
- Ertekin C, Yaldiz O, Comparison of some existing models for estimating global radiation for Antalya (Turkey), *Energy Conversion and Management* 2000;41:311-30
- Garrison JD, *A study of the division of global irradiance into direct and diffuse irradiance at thirty three U.S. sites*, *Solar Energy* 1985; 35:341-351
- Gopinathan KK and Soler A. *Diffuse radiation models and monthly-average, daily, diffuse data for a wide latitude range*. *Energy* 1996; 20(7):65–67
- Gordon JM, Reddy TA. *Time series analysis of hourly global horizontal solar radiation*. *Solar Energy* 1988;41:423–9
- Graybill FA, Iyer HK, *Regression Analysis, Concepts and Applications*. California: International Thompson Publishing; 1994
- Gueymard C. Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. *Solar Energy* 1993;51:121-38
- Gueymard GA. *Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment*. *Solar Energy* 2003;74:355-79
- Gunes M, Analysis of daily total horizontal solar radiation measurements in Turkey, *Energy Sources* 2001;23:563–70
- Hamilton HL and Jackson A, *A shield for obtaining diffuse sky radiation from portions of the sky*, *Solar Energy* 1985; 34:121-123
- Halouani N, Nguyen CT and Vo-Ngoc D, *Calculation of monthly global solar radiation on horizontal surfaces using daily hours of bright sunshine*, *Solar Energy* 1993; **50**:247-258
- Hooper FC, Altwater CR, Brunger AF, Davies JA, Hay JE, McKay DC and Won TK, “*The Canadian solar radiation data base*”, *ASHRAE Trans* 1979;85:497-506

- Iberiah FJK, On the relation between diffuse and global radiation, *Solar Energy* 1983;31:119–24
- Iqbal M. *An introduction to solar radiation*. Toronto: Academic press, 1983
- Jacovides CP, Hajioannou L, Pashiardis S and Stefanou L. *On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus*. *Solar Energy* 1996; 56(6):565-572
- Jain PC, Jain S, Ratto CF. *A new model for obtaining horizontal instantaneous global and diffuse radiation from daily values*. *Solar Energy* 1988;41:397-404
- Kallos G, Strathi A and Kritikou S. *On the relationship of beam transmittance on clearness index for Athens, Greece*. *Solar Energy* 1989;7:171
- Kaplanis SN. *New methodologies to estimate the hourly global solar radiation; Comparisons with existing models*. *Renewable Energy* 2006;31:781-90
- Karatasou S, Santamouris M, Geros V, Analysis of experimental data on diffuse solar radiation in Athens, Greece, for building applications. *International Journal of Sustainable Energy* March-June 2003;23, No. 1-2:1-11
- Kaygusuz K, Ayhan T, Analysis of solar radiation data for Trabzon, Turkey, *Energy Conversion and Management* 1999;40:545–56
- Koronakis PS. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area, *Solar Energy* 1986; 36: 217-225
- Lalas DP, Petrakis M, Papadopoulos C, Correlations for the estimation of the diffuse radiation component in Greece, *Solar Energy* 1987;39, No. 5:455-458
- Lalas DP. Models to predict meteorological condition conducive to air pollution episodes: Phase I Dept. of Meteorology, University of Athens Report to E.E.C. Directorate-General XI, Contract B6612/9, February 1984
- Lalas DP, Pissimanis DK and Notaridou VA, *Methods of estimation of the intensity of solar radiation on a tilted surface and tabulated data for 30, 45 and 60 in Greece*. *Technica Chronica* 1982; 2(3-4):129-181
- LeBaron B, Dirmhirn I. Strengths and limitations of Liu and Jordan model to determine diffuse from global irradiance, *Solar Energy* 1983; 31:167-172
- Liu BYH, Jordan R C. *The inter-relationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation*. *Solar Energy* 1960; 4(3):1-19
- Measurements for development of solar and aeolic potential of Greece for energy purposes*. Scientific publications of the Public Power Co. of Greece (PPC) Vols. I, II, III and IV (1976-1981)

- Mellit A, Benghanem M, Kalogirou SA. An adaptive wavelet-network model for forecasting daily solar radiation. *Applied Energy* 2006;83:705-22
- Mihalakakou G, Santamouris M, Asimakopoulos DN, The total solar radiation time series simulation in Athens using neural networks. *Applied Climatology* 2000;66:185-97
- Nijegorodov N, Adedoyin JA, Devan KRS. *A new analytical-empirical model for the instantaneous diffuse radiation and experimental investigation of its validity*. *Renewable Energy* 1997;11:341-50
- Orgill JF and Hollands KGT. “*Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface*”, *Solar Energy* 1977; 19, 357-359
- Page J, *Proc. U.N. Conf. New Sources Energy*, 378-390 (1961)
- Paliatsos A.G, Kambezidis H.D, Antoniou A, Diffuse solar irradiation at a location in the Balkan Peninsula, *Renewable Energy* 28 (2003), 2147-2156
- Rahman S and Chowdhury BH, *Simulation of photovoltaic power systems and their performance prediction. IEEE Transactions on Energy Conversion* 3, 440-446 (1988)
- Reindl DT, Beckman WA, Duffie JA. *Diffuse fraction corrections*. *Solar Energy* 1990;45(1):1-7
- Samuel TDMA. Estimation of global radiation for Sri Lanka, *Solar Energy* 1991;47:333
- Sears RD, Flocchini RG and Hatfield JL, *Correlations of total, diffuse and direct solar radiation with the percentage of possible sunshine for Davis, California*, *Solar Energy* 1980; 27:357-360
- Sefa Tarhan, Ahmet Sari, Model selection for global and diffuse radiation over the Central Black Sea (CBS) region of Turkey, *Energy Conversion and Management* 46 (2005) 605-613
- Skartveit A and Olseth JA, *A model for the diffuse fraction of hourly global radiation*, *Solar Energy* 1987; 38; 271-274
- Stanhill G, *Diffuse sky and cloud radiation in Israel*. *Solar Energy* 1966;19:96
- Stone RG, *Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models*, *Solar Energy* 1993;5 I, No. 4:289-291
- Suehrecke H and McCormick PG. *The diffuse fraction of instantaneous solar radiation*. *Solar Energy* 1988;40:423-430

- Tuller SE, *The relationship between diffuse total, and extra-terrestrial solar radiation. Solar Energy* 1976; IS:259
- Tasdemiroglou E, Sever R, Estimation of monthly average daily horizontal diffuse radiation in Turkey, *Energy* 1991;16:787–90
- Tiris M, Tiris C, Ture I.E, Correlations of monthly-average daily global diffuse and beam radiations with hours of bright sunshine in Gebze, Turkey, *Energy Conversion and Management* 1996;37:1417–21
- Ulgen K, HepBasli A, *Comparison of the diffuse fraction of daily and monthly Global radiation for Izmir, Turkey*, *Energy Sources* 2003;25:637–649
- Unpublished records of global radiation measurements on the horizontal for Tympaki, N. Filadelfia, Aliarto, Andravida, Arta and Komotini. National Weather Service of Greece (EMY) (1977-1982)
- Wong LT, Chow WK. *Solar radiation model*. *Applied Energy* 2001;69:191-224
- Worthing AG and Geffner J, *Elaborazione dei dati sperimentali*, C.E.A. Milano, (1965)
- Zervas P.L, Sarimveis H, Palyvos J.A, Markatos N.C.G, *Prediction of daily global solar irradiance on horizontal surfaces based on neural-network techniques*, *Renewable Energy* (In Press), (2007)





Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η βασική ταξινόμηση των σύννεφων στην ατμόσφαιρα, ώστε να γίνει πιο κατανοητή η χρήση ενός μοντέλου πρόβλεψης της ηλιακής ακτινοβολίας βασισμένο σε αυτή.

### **A.1 Εισαγωγή**

Τα σύννεφα υπάρχουν σε οποιοδήποτε επίπεδο της ατμόσφαιρας όπου υπάρχει επαρκής ποσότητα σταγονιδίων νερού ώστε να είναι δυνατή η συμπύκνωση. Η στιβάδα της ατμόσφαιρας με τη μεγαλύτερη ποσότητα σε σύννεφα είναι η τροπόσφαιρα. Λόγω διαφορετικών θερμοκρασιών και διαφορών στην κίνηση του αέρα, τα σύννεφα διαφέρουν στη δομή και στη σύσταση (συνδυασμός κρυσταλλικού πάγου και νερού).

Κατηγοριοποιούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες: Σύννεφα χαμηλού επιπέδου, μεσαίου και υψηλού.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας.

### **A.2 Σύννεφα χαμηλού επιπέδου**

Βρίσκονται στις κατώτερες στιβάδες της ατμόσφαιρας. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας αντανακλούν μικρότερες ποσότητες φωτός και επομένως δεν έχουν μεγάλη αντίθεση. Επίσης είναι δύσκολη η διάκρισή τους.

Αν παρατηρηθούν από μικρή απόσταση είναι εύκολη η διάκριση των παραγμένων κινήσεών τους και η συνεχείς αλλαγές στη δομή τους. Κινούνται αδιάκοπα με την ταχύτητα του ανέμου, όπως στο έδαφος.

Ανάλογα με κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μορφής υπάρχουν τρεις υποκατηγορίες: cumulus, stratocumulus, stratus.

### **A.3 Σύννεφα μεσαίου επιπέδου**

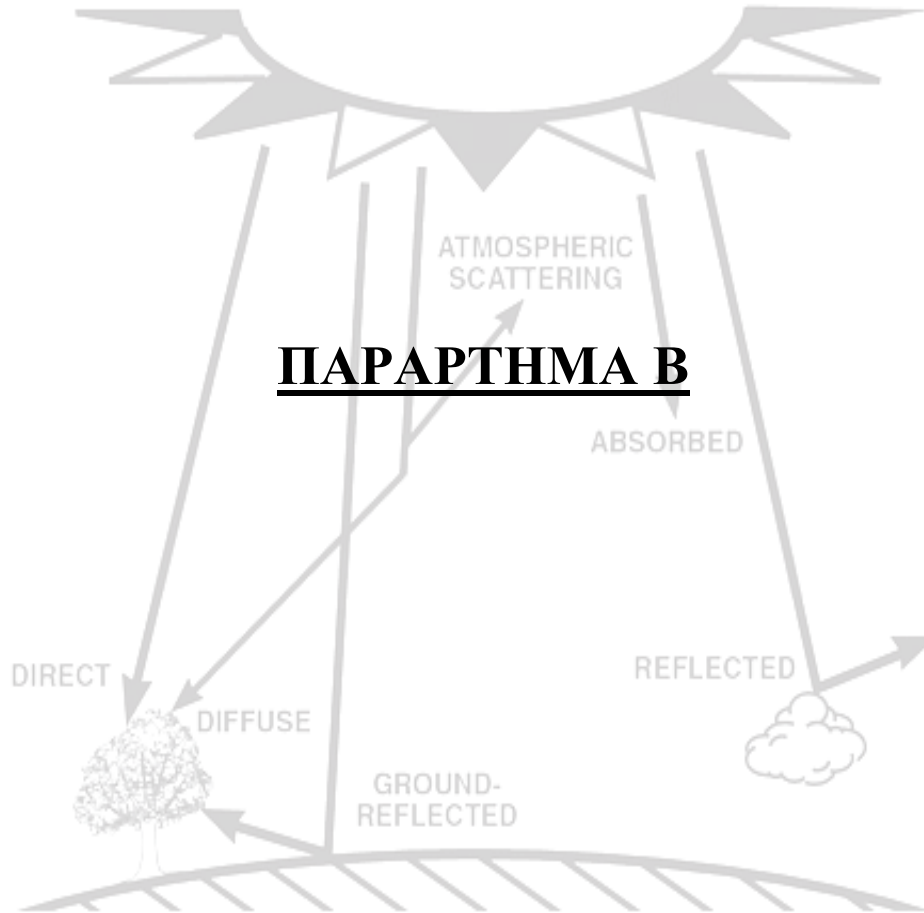
Βρίσκονται στα μεσαία στρώματα, είναι πιο λαμπερά και λιγότερο κατακερματισμένα σε εμφάνιση λόγω της απόστασης από το έδαφος και της μεγαλύτερης ποσότητας κρυστάλλων πάγου.

Το πάχος τους ποικίλει. Κινούνται με μικρότερες ταχύτητες από αυτά του χαμηλού επιπέδου με τη φορά του ανέμου, όχι όμως και με την ίδια ταχύτητα.

Διακρίνονται σε τρεις υποκατηγορίες: alto cumulus, altostratus, nimbostratus.

#### **Α.4 Σύνεφα υψηλού επιπέδου**

Βρίσκονται στα υψηλότερα επίπεδα της τροπόσφαιρας και έχουν μεγάλη λάμψη λόγω της ύπαρξης πολλών κρυστάλλων πάγου. Ποικίλλουν σε σχήμα, πάχος και κάλυψη. Κινούνται ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου και συνήθως είναι πολύ λεπτά. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή τους: cirrus, cirrostratus, cirrocumulus.



## **B1 Ανάλυση Παλινδρόμησης (Regression Analysis)**

Είναι ο κλάδος της στατιστικής ο οποίος εξετάζει τη σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών, ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη της μιας από τις υπόλοιπες.

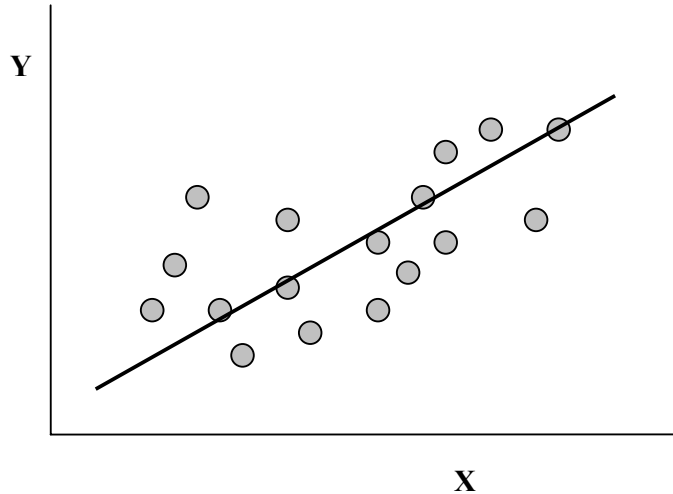
## **B2 Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression)**

Μιας εξαρτημένης μεταβλητή  $Y$  από την εξαρτημένη μεταβλητή  $X$  είναι η σχέση  $y = \alpha + \beta \cdot x$  όπου  $\alpha$  και  $\beta$  είναι παράμετροι. Ο προσδιορισμός των  $\alpha$  και  $\beta$  δίνει μια προσεγγιστική ευθεία, που συνδέει τις τιμές της  $Y$  δοθέντων των τιμών της  $X$ .

Η ευθεία που προκύπτει λέγεται **ευθεία παλινδρόμησης της  $Y$  πάνω στην  $X$** .

Η ευθεία αυτή μπορεί να κατασκευασθεί εμπειρικά ή μέσω μαθηματικών μεθόδων, όπως είναι η μέθοδος **ελαχίστων τετραγώνων**.

Σκοπός είναι το άθροισμα των τετραγώνων των κατακόρυφων αποστάσεων των σημείων  $(X, Y)$  από την ευθεία να είναι ελάχιστο.



**Διάγραμμα B1:** Γραμμική παλινδρόμηση των μεταβλητών  $X$  και  $Y$

### **B3 Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων (Least Squares Method)**

Με την μέθοδο αυτή προσδιορίζονται οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  από τους τύπους:

$$\hat{\beta} = \frac{\nu \sum_{i=1}^{\nu} x_i y_i - (\sum_{i=1}^{\nu} x_i)(\sum_{i=1}^{\nu} y_i)}{\nu \sum_{i=1}^{\nu} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{\nu} x_i)^2} \quad [\text{B.1}]$$

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \cdot \bar{x} \quad [\text{B.2}]$$

η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων θα είναι η :

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot x \quad [\text{B.3}]$$

Το  $\hat{\alpha}$  είναι η τεταγμένη του σημείου στο οποίο η ευθεία τέμνει τον άξονα  $y'y$  ενώ το  $\hat{\beta}$ , που είναι ο συντελεστής διεύθυνσης της ευθείας, εκφράζει την μεταβολή της μεταβλητής  $Y$  όταν η μεταβλητή  $X$  μεταβληθεί κατά μια μονάδα.

### **B4 Συντελεστής Γραμμικής Συσχέτισης (Linear Correlation Coefficient)**

Είναι το μέτρο που εκφράζει την συγκέντρωση των σημείων ενός διαγράμματος διασποράς γύρω από την ευθεία παλινδρόμησης.

Αν  $X$  και  $Y$  δύο μεταβλητές μεγέθους  $\nu$  τότε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι ο εξής:

## Παράρτημα Β

$$r(X, Y) = r = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\nu} (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{\nu} (y_i - \bar{y})^2}} \quad [\text{B.4}]$$

Εάν οι μέσες τιμές δεν είναι ακέραιοι αριθμοί, τότε ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης  $r$  δίνεται από τον τύπο:

$$r = \frac{\nu \sum_{i=1}^{\nu} x_i y_i - (\sum_{i=1}^{\nu} x_i) \cdot (\sum_{i=1}^{\nu} y_i)}{\sqrt{\nu \sum_{i=1}^{\nu} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{\nu} x_i)^2} \cdot \sqrt{\nu \sum_{i=1}^{\nu} y_i^2 - (\sum_{i=1}^{\nu} y_i)^2}} \quad [\text{B.5}]$$

Ιδιότητες του  $r$ :

1. Εάν  $0 < r < 1$  τότε οι  $X$  και  $Y$  είναι **θετικά γραμμικά συσχετισμένες**.
2. Εάν  $-1 < r < 0$  τότε οι  $X$  και  $Y$  είναι **αρνητικά γραμμικά συσχετισμένες**.
3. Εάν  $r = 1$  τότε έχουμε τέλεια θετική γραμμική συσχέτιση και όλα τα σημεία βρίσκονται πάνω στην ευθεία  $y = \alpha + \beta \cdot x$  και  $\beta > 0$ . Αντίστοιχα αν  $r = -1$  και  $\beta < 0$ .
4. Εάν  $r = 0$  τότε δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών  $X$  και  $Y$ . Οπότε λέμε ότι είναι **γραμμικά ασυσχετίστες**.

### **B5 Συντελεστής Προσδιορισμού $R^2$**

Είναι ο συντελεστής με τον οποίο μπορούμε να ελέγξουμε την αξία του απλού γραμμικού μοντέλου, το οποίο προσαρμόζουμε στα δεδομένα. **Ο συντελεστής προσδιορισμού εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας της μεταβλητής  $Y$  που εξηγείται από την μεταβλητή  $X$ . Όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή του  $R^2$  στην μονάδα, τόσο πιο ισχυρή γίνεται η γραμμική σχέση εξάρτησης των μεταβλητών  $Y$  και  $X$ .**