



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

Στοχαστική διερεύνηση της χρονικής μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας

Διπλωματική Εργασία

Ιωάννης Κουντούρης

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Παναγιώτης Δημητριάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Αθήνα, Νοέμβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

Στοχαστική διερεύνηση της χρονικής μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας

Διπλωματική Εργασία

Ιωάννης Κουντούρης

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Παναγιώτης Δημητριάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Αθήνα, Νοέμβριος 2017

Copyright © Κουντούρης Ιωάννης, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του Ιωάννη Κουντούρη. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Κουντούρης Ιωάννης, 2017

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Ιωάννης Κουντούρης (2017)

Στοχαστική διερεύνηση της χρονική μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας.

Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
Αθήνα.

Ioannis Koudouris (2017)

Investigation on the stochastic nature of the solar radiation process

Department of Water Resources & Environmental Engineering, School of Civil
Engineering, National Technical University of Athens.

Ευχαριστίες.

Με την εκπόνηση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, σηματοδοτείται και το τέλος της πενταετούς φοίτησής μου, στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Όμως όπου υφίσταται ένα τέλος, συνάμα σηματοδοτείται και η απαρχή ενός νέου κεφαλαίου ζωής.

Μελετώντας και γράφοντας την παρούσα εργασία, αναλογιζόμουν και σκεφτόμουν με νοσταλγία, την πληθώρα όμορφων στιγμών, που περάσανε τα τελευταία πέντε χρόνια εντός και εκτός της σχολής.

Συνειδητοποιώ ότι, σε όλη την διάρκεια της πενταετούς φοίτησης, όχι μόνο απόκτησα θεμελιώδεις βάσεις, γνώσεις και μία δόση εμπειρίας ως προς το επάγγελμα του Πολιτικού Μηχανικού, αλλά ωρίμασα, ερωτεύτηκα και γνώρισα υπέροχα και ξεχωριστά άτομα, που έχω την τιμή να αποκαλώ φίλους. Όλοι σας, ο καθένας με διαφορετική προσωπικότητα μεν και σε διαφορετικό χρόνο δε, βοηθήσατε στη διαμόρφωση του τωρινού μου χαρακτήρα. Προς όλους εσάς, που μου χαρίσατε ανεξίτηλες στιγμές και αναμνήσεις, οι οποίες θα με συντροφεύουν στα επόμενα βήματα της ζωής μου, θέλω να απευθύνω θερμές ευχαριστίες και να σας ευχηθώ από τα βάθη της καρδιάς μου υγεία, τύχη και πάντα χαμογελαστοί να ομορφαίνετε την ζωή των γύρω σας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον επιβλέποντα καθηγητή και κοσμήτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, κ. Δημήτρη Κουτσογιάννη, για τις κρίσιμες και καθοριστικές συμβουλές του, σε καίρια ζητήματα που αφορούσαν την διπλωματική εργασία, καθώς και για την προσπάθειά του, να μας μεταδώσει το «μικρόβιο» των στοχαστικών μεθόδων, που με οδήγησε, στην ανακάλυψη νέων προοπτικών, ξεφεύγοντας από τις κλασικές γνώσεις του πολιτικού μηχανικού.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Μαμάση, αναπληρωτή καθηγητή ΕΜΠ, για την απλόχερη συνεισφορά του, σε εμπειρικές γνώσεις, πάνω στα ζητήματα της εργασίας, καθώς και στην συγκομιδή δεδομένων.

Καθοριστικός υπήρξε επίσης στο όλο εγχείρημα, ο ρόλος του Διδάκτορα Δημητριάδη Παναγιώτη, ο οποίος αποτελεί πρότυπο, όχι μόνο επιστήμονα και ερευνητή αλλά και ανθρώπινου ήθους και πνεύματος. Τον ευχαριστώ πολύ, για την πολύτιμη συνδρομή του, όλους αυτούς του μήνες προσπάθειας, για την απλόχερη και ανιδιοτελή μεταλαμπάδευση γνώσεων και για τον χρόνο τον οποίο αφιέρωσε στην συνεργασία μας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Ηλιοπούλου Άννυ, για την βοήθεια και τις συμβουλές της, σε θέματα που αφορούσαν την διπλωματική εργασία.

Εκφράζω επίσης, τις ευχαριστίες μου, στους παιδικούς μου φίλους, Λαμπρινάκο Γεώργιο, Σούκα Γεώργιο, Καλογεροπούλου Ντέμη, Ψαρέλη Γεώργιο, Οικονομίδη Βασίλειο, Τζιβάκη Μανώλη και Παππά Απόστολο, για την φιλία τους, που μπορεί οι πορείες μας να χωρίστηκαν με την έναρξη της φοιτητικής μας ζωής αλλά η συνεχόμενη στήριξή τους δεν έπαψε να υπάρχει όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου, Κουντούρη Κωνσταντίνο και Δρακάτου - Κουντούρη Αφροδίτη, καθώς και την αδελφή μου, Κουντούρη Γεωργία, για την ηθική και υλική στήριξη τους, όλα αυτά τα χρόνια, που συνέβαλαν πρακτικά στη διαμόρφωση του χαρακτήρα μου και την ευόδωση των στόχων μου. Η εμπιστοσύνη τους στις ικανότητες μου σε όλες τις εκφάνσεις της ζωής, αποτέλεσε κινητήρια δύναμη για εμένα.

Ιωάννης Κουντούρης
Νοέμβριος 2017, Αθήνα

Αφιέρωση

*Στην οικογένεια μου και στους διαχρονικά, κατά τα εκπαιδευτικά μου χρόνια
δασκάλους μου.*



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στοχαστική διερεύνηση της χρονικής μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας

Ιωάννης Κουντούρης

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπων: Παναγιώτης Δημητριάδης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Νοέμβριος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την εκμετάλλευση όλο και περισσότερο του ορυκτού πλούτου της γης, εμφανίζεται επιτακτική η ανάγκη στροφής της ανθρωπότητας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Από τις αρχές του 21ου αιώνα η επιστημονική κοινότητα, έχει πραγματοποιήσει τεράστια άλματα, με σκοπό την εκμετάλλευση όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μία από τις πλέον ευρέως γνωστές, είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία αποτελεί από τις βασικότερες μορφές, στην οποία ο ανθρώπινος παράγοντας, πρόκειται να στηριχθεί στο μέλλον. Όμως η μεταβλητότητα της ηλιακής ακτινοβολίας, επιδρά σε σημαντικό βαθμό στα συστήματα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας, κυρίως στα φωτοβολταϊκά συστήματα, που χαρακτηρίζονται, από μια γρήγορη και μη γραμμική απόκριση στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Η πρόβλεψη απόδοσης αυτών των συστημάτων βασίζεται, σε ωριαία ή ημερήσια δεδομένα, επειδή αυτά τα δεδομένα, είναι συνήθως τα μόνα διαθέσιμα. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη ότι, η παρουσία των νεφών τροποποιεί την παγκόσμια ακτινοβολία και γνωρίζοντας ότι οι διαδικασίες που αφορούν τα σύννεφα, τείνουν να είναι πολύ δυναμικές, αναμένεται μεγάλη μεταβλητότητα των ημερήσιων και συνεπώς και των ωριαίων τιμών. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας, είναι η προσπάθεια διερεύνησης της στοχαστικής φύσης και της χρονικής εξέλιξης της ηλιακής ακτινοβολίας, με ημερήσιο και ωριαίο βήμα, σε μηνιαίο επίπεδο, με τελικό στόχο την δημιουργία ενός στοχαστικού μοντέλου αναπαραγωγής ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας. Για το συγκεκριμένο αυτό σκοπό, πραγματοποιήθηκε ανάλυση, αρχικά σε σταθμούς στον ελληνικό χώρο και στην συνέχεια επεκτάθηκε η έρευνα σε παγκόσμια κλίμακα. Με την βοήθεια μίας κατανομής σε ημερήσια κλίμακα και ενός αθροίσματος δύο κατανομών σε ωριαία κλίμακα, κάνοντας χρήση του συντελεστή αιθριότητας (K_T), λόγω της περιοδικότητας που εμφανίζει η διεργασία, επιτεύχθηκε η πλήρης περιγραφή της ηλιακής ακτινοβολίας. Εν συνεχεία, με την βοήθεια στατιστικών test υπόθεσης και κριτηρίων επιλογής κατανομών, επαληθεύθηκε η ερευνά. Έτσι πραγματοποιήθηκε η δημιουργία ενός ψευδο-κυκλοστάσιμου μοντέλου μακροπρόθεσμης εμμονής, με σκοπό την αναπαραγωγή του συντελεστή αιθριότητας K_T και συνεπώς της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε παγκόσμια κλίμακα. Το μοντέλο ελέγχεται και ικανοποιεί την διατήρηση της κατανομής, συνεπώς των τεσσάρων κεντρικών ροπών (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία και κύρτωση), καθώς και την παράμετρο Hurst που εκφράζει την (μακροπρόθεσμη) εμμονή και συσχέτιση.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES & ENVIRONMENTAL ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Investigation on the stochastic nature of the solar radiation process

Ioannis Koudouris

Supervisor: Dr. Demetris Koutsoyiannis, Professor of NTUA
Co-supervisor: Dr. Panayiotis Dimitriadis

November 2017

ABSTRACT

With the progress of technology and the increasingly exploitation of the mineral wealth of the earth, there is an urgent need to turn humanity into renewable energy sources. Since the beginning of the 21st century, the scientific community has made huge leaps to exploit all renewable energy sources. One of the most widely known is solar radiation, which is one of the most important forms in which the human factor is going to rely in the future. However, the variability of solar radiation has a significant impact on solar energy conversion systems, mainly in photovoltaic systems, characterized by a fast and non-linear response to incident solar radiation. The performance prediction of these systems is based on hourly or daily data because these are usually the only ones available. However, given that the presence of clouds modifies global radiation and knowing that the processes concerning the clouds tend to be very dynamic, great variability of the daily and hence hourly values is expected. The aim of this work is to investigate the stochastic nature and time evolution of solar radiation process in a daily and hourly step on a monthly basis scale, with the ultimate goal of creating a stochastic model capable of generating hourly solar radiation. For this purpose, an analysis was initially made at stations in the Greek area and then the research was expanded on a global scale. We propose a distribution that can adequately describe daily radiation and a new distribution consist of the sum of two distributions that is capable of fitting hourly solar radiation. Also, we use the clear sky index coefficient (K_T) due to the double periodicity of the process, so a complete description of the solar radiation in all scales was achieved. As an extension we use statistical case tests and selection criteria, in order to verify the good fitting of the distribution. Finally, we propose the first pseudo-cyclostationary with long term persistence behaviour model capable of reproducing the clear sky index coefficient (K_T) and so the hourly solar radiation. The model can maintain and preserve the probability density function and so the first four central moments i.e. (mean, standard deviation, asymmetry and kurtosis) and also the parameter Hurst which indicates correlation and a long-term persistence behaviour.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Στόχοι εργασίας	1
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	3
2.1	Εισαγωγικά στοιχεία και συλλογιστική πορεία	3
2.2	Τρόποι Μέτρησης ωριαίας ακτινοβολίας και όργανα μέτρησης	5
2.2.1	Το πυρονόμετρο	5
2.2.2	Το πυρηλιόμετρο	7
2.2.3	Το ακτινόμετρο.....	8
2.3	Γενικά στοιχεία υπολογισμού ωριαίας εξωγήινης ακτινοβολίας	9
2.3.1	Γεωγραφικό πλάτος (φ).....	9
2.3.2	Ηλιακή απόκλιση (δ)	10
2.3.3	Ωριαία γωνία (ω)	11
2.3.4	Ο τοπικός ηλιακός χρόνος – ηλιακή ώρα (St)	12
2.4	Βασικές γωνίες της εκλειπτικής τροχιάς του ήλιου.....	13
2.4.1	Ύψος του ήλιου (β).....	13
2.4.2	Ζενίθια γωνία (θ_z)	14
2.4.3	Αζιμούθιο (φ_s ή Az)	14
2.4.4	Το επίπεδο πρόσπτωσης των ακτίνων του ήλιου περιγράφεται με τις εξής γωνίες.....	14
2.5	Εξωγήινη Ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας.....	14
3	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	19
3.1	Ημερήσια δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας	19
3.2	Ωριαία δεδομένα Ηλιακής ακτινοβολίας	21
3.3	Ημερήσια δεδομένα συντελεστή αιθριότητας Κτ	22
3.4	Ωριαία δεδομένα συντελεστή αιθριότητας Κτ.....	22
4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΩΡΙΑΙΑΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΙΘΡΙΟΤΗΤΑΣ	25
4.1	Εισαγωγικά στοιχεία ανάλυσης και συλλογιστική πορεία όλων των χρονικών κλιμάκων.....	25
4.1.1	Η κατανομή Beta	28
4.1.2	Η κατανομή Kumaraswamy	29
4.1.3	Σύγκριση Kumaraswamy με Beta και επιλογή κατανομής	30
4.2	Ημερήσια ανάλυση ηλιακής ακτινοβολίας	30
4.2.1	Δοκιμή προσαρμογής και κριτήριο επιλογής μοντέλου για την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολίαγια την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία	32
4.2.2	Υπολογισμός παραμέτρων κατανομής Kumaraswamy για την ημερήσια ακτινοβολία ..	34
4.3	Ωριαία ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	35
4.4	Ημερήσια ανάλυση συντελεστή αιθριότητας ΚΤ σε ετήσια κλίμακα.	36
4.5	Ωριαία ανάλυση του συντελεστή αιθριότητας ΚΤ	39
4.5.1	Μελέτη ετεροσυσχετίσεων μεταξύ ωριαίων συντελεστών ΚΤ	54
4.6	Στοχαστική δομή του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας ΚΤ	56

4.6.1	Εισαγωγικά στοιχεία δυναμικής φαινομένου Hurst Kolmogorov	56
4.6.2	Το κλιμακόγραμμα ως εργαλείο και τα αποτελέσματα των 40 σταθμών	57
5	ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	59
5.1	Σύνθεση στοχαστικού μοντέλου	59
5.2	Εφαρμογή του μοντέλου	62
5.2.1	Σταθμός Denver	62
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73
7.1	Ξενόγλωσσες.....	73
7.2	Ελληνόγλωσσες	74
7.3	Ηλεκτρονικές Ιστοσελίδες.....	75
8	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	77
8.1	Acknowledgments.....	77
8.2	Κώδικες (Scripts) σε περιβάλλον matlab	77
8.2.1	Δημιουργία και σύνθεση ενιαίων βάσεων δεδομένων	77
8.2.2	Προσαρμογή της κατανομής, εύρεση παραμέτρων και υπολογισμός του κλιμακογράμματος	78
8.2.3	Έυρεση της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης και κανονικοποίηση των χρονοσειρών.....	78
8.2.4	Έυρεση κλιμακογράμματος κανονικοποιημένης χρονοσειράς.....	79
8.2.5	Διαγράμματα κατανομών προσαρμογής	79
8.2.6	Υπολογισμός ετεροσυσχετίσεων μεταξύ όλων των ωρών και δημιουργία διαγραμμάτων με χρονική υστέρηση ένα (lag 1)	79
8.2.7	Υπολογισμός κλιμακογράμματος θορύβων και εύρεση παραμέτρου Hurst.....	80
8.2.8	Εφαρμογή μοντέλου και αναδιάταξη συνθετικής χρονοσειράς.....	80
8.2.9	Υπολογισμός κατανομών αθροιστικής πιθανότητας, πυκνότητας πιθανότητας και κλιμακογραμμάτος για την συνθετική χρονοσειρά.....	81
8.2.10	Υπολογισμός Ετεροσυσχετίσεων συνθετικής χρονοσειράς μεταξύ διαδοχικών ωρών και δημιουργία διαγραμμάτων.....	82

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 2.1 : Απεικόνιση άμεσης (beam), της διάχυτης (diffuse) και της ανακλώμενης (ground reflected ή albedo).....	4
Σχήμα 2.2 : Πυρόμετρο	7
Σχήμα 2.3 : Το όργανο πυρηλιόμετρο.....	8
Σχήμα 2.4 : Το όργανο ακτινόμετρο	9
Σχήμα 2.5 : Το γεωγραφικό μήκος.....	10
Σχήμα 2.6 : Εικονική απεικόνιση της ηλιακής απόκλισης.....	11
Σχήμα 2.7 : Σχηματική επεξήση της ωριαίας γωνίας.....	12
Σχήμα 2.8 : Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ήλιου	13
Σχήμα 3.1 Χάρτης με τους 40 σταθμούς της NRLE- NSRDB	23
Σχήμα 4.1 Μορφές Cdf, Pdf της κατανομής Beta για διαφορετικές παραμέτρους a,b.....	29
Σχήμα 4.2 Μορφές Cdf, Pdf της κατανομής Kumaraswamy για διαφορετικές παραμέτρους a,b	29
Σχήμα 4.3 Γεωγραφικό μήκος και πλάτος για την εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος.....	40
Σχήμα 4.4 Τοποθεσία σταθμού Barrow στην Αλάσκα	45
Σχήμα 4.5 Τοποθεσία σταθμού Elizabeth City	50
Σχήμα 4.6 Τοποθεσία σταθμού DENVER/CENTENNIAL	54

Πίνακας διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1 Ωριαία εξωτερική ακτινοβολία.....	16
Διάγραμμα 2.2 Αναλυτική απεικόνιση των πρώτων 720 ωρών	16
Διάγραμμα 2.3 Απεικόνιση της διπλής περιοδικότητας της εξωτερικής ωριαίας ακτινοβολίας	17
Διάγραμμα 2.4 Διαφορά ημερήσιας εξωτερικής ακτινοβολίας με δύο τρόπους.....	17
Διάγραμμα 3.1 Data comparison	20
Διάγραμμα 3.2 Cross-correlation between Nasa-See & Observed.....	20
Διάγραμμα 3.3 Χαρακτηριστικό διάγραμμα μετρημένης ακτινοβολίας στην εξωτερική ατμόσφαιρα και στην επιφάνεια της γης, μήκος δεδομένων ενός χρόνου για τον σταθμό του Denver (από την βάση της NRLE- NSRDB)	21
Διάγραμμα 3.4 Ημερήσιος συντελεστής K_T για Αθήνα	22
Διάγραμμα 3.5 Ωριαία διακύμανση K_T μέσα στον χρόνο για τον σταθμό του Denver	23
Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα διπλής περιοδικότητας για την χρονοσειρά από τον σταθμό της Ψυττάλειας.....	26
Διάγραμμα 4.2 Ημερήσια διακύμανση της ωριαίας ακτινοβολίας για την δέκατη ώρα του Αυγούστου της χρονοσειράς από τον σταθμό της Ψυττάλειας	27
Διάγραμμα 4.3 Διαγράμματα προσαρμογής της κατανομής Kumaraswamy στην εμπειρική κατανομή για τον σταθμό της Αστυπάλαιας σε ημερήσια χρονική κλίμακα με μηνιαίο βήμα..	32
Διάγραμμα 4.4 Επιλογή μοντέλου για περιθωρία συνάρτηση με σκοπό την περιγραφή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε μηνιαίο επίπεδο σύμφωνα με τα AIC, KS, CvM και AD test	33
Διάγραμμα 4.5 Αποτελέσματα από τα test καλής προσαρμογής κατανομής για την περιγραφή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε μηνιαίο επίπεδο.	34
Διάγραμμα 4.6 Διάγραμμα των παραμέτρων a της κατανομής Kumaraswamy με τέσσερις διαφορετικές μεθόδους.	34
Διάγραμμα 4.7 Διάγραμμα των παραμέτρων b της κατανομής Kumaraswamy με τέσσερις διαφορετικές μεθόδους.	35
Διάγραμμα 4.8 Διαγράμματα (α, β) ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας με σκοπό τον εντοπισμό της νέφωσης.....	36
Διάγραμμα 4.9 Διαγράμματα εμπειρικής κατανομής ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας	36
Διάγραμμα 4.10 Ενδεικτικές ημερήσιες χρονοσειρές K_T για Αθήνα και Καμπάλα	37
Διάγραμμα 4.11 Εμπειρική κατανομή ημερήσιου K_T σε ετήσια χρονική κλίμακα και Cdf Kumaraswamy για σταθμό Μόσχας.....	37
Διάγραμμα 4.12 Εμπειρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας ημερήσιου σε ετήσια χρονική κλίμακα K_T και Pdf Kumaraswamy για σταθμό Μόσχας.....	38
Διάγραμμα 4.13 Εμπειρική κατανομή ημερήσιου K_T σε ετήσια χρονική κλίμακα και Cdf Kumaraswamy για σταθμό Καμπάλας	38
Διάγραμμα 4.14 Εμπειρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας ημερήσιου σε ετήσια χρονική κλίμακα K_T και Pdf Kumaraswamy για σταθμό Καμπάλας.....	38
Διάγραμμα 4.15 Εμπειρική κατανομή ημερήσιου K_T σε ετήσια χρονική κλίμακα και Cdf Kumaraswamy για σταθμό Αθήνας.....	39
Διάγραμμα 4.16 Εμπειρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας ημερήσιου σε ετήσια χρονική κλίμακα K_T και Pdf Kumaraswamy για σταθμό Αθήνας	39

Διάγραμμα 4.17 Διάγραμμα διπλής περιοδικότητας για τον ωριαίο συντελεστή K_T στον σταθμό της Αθήνας	40
Διάγραμμα 4.18 Χαρακτηριστικό παράδειγμα ανεπάρκειας προσαρμογής της Kumaraswamy κατανομής (Cdf) στην εμπειρική (δεδομένα σταθμού Αθήνας).	41
Διάγραμμα 4.19 Διαγράμματα ωριαίας χρονοσειράς K_T , Εμπειρικής-Kumaraswamy, Cdf-Pdf για 14:00/2 σταθμός Ψυττάλειας.....	42
Διάγραμμα 4.20 Διαγράμματα ωριαίας χρονοσειράς K_T , Εμπειρικής-Kumaraswamy, Cdf-Pdf για 9:00/6 σταθμός Ψυττάλειας.....	42
Διάγραμμα 4.21 Διαγράμματα ωριαίας χρονοσειράς K_T , Εμπειρικής-Kumaraswamy, Cdf-Pdf για 19:00/2 σταθμός Ψυττάλειας.....	42
Διάγραμμα 4.22 Διαγράμματα ωριαίας χρονοσειράς K_T , Εμπειρικής-Kumaraswamy, Cdf-Pdf για 12:00/9 σταθμός Ψυττάλειας.....	43
Διάγραμμα 4.23 Διαγράμματα κατανομών Pdf Kumaraswamy ωριαίου συντελεστή K_T για τον μήνα Απρίλιο με σκοπό τον εντοπισμό ασυμμετρίας	44
Διάγραμμα 4.24 Διαγράμματα κατανομών Pdf Kumaraswamy ωριαίου συντελεστή K_T για τον μήνα Ιούνιο με σκοπό τον εντοπισμό ασυμμετρίας	44
Διάγραμμα 4.25 Διάγραμμα σφαλμάτων των 288 χρονοσειρών της χρονοσειράς για τον σταθμό Barrow (Αλάσκα).....	46
Διάγραμμα 4.26 Χαρακτηριστικά διαγράμματα καλής και κακή προσαρμογής της σύνθετης κατανομής διπλού αθροίσματος Kumaraswamy για τον σταθμό Barrow (Αλάσκα).....	49
Διάγραμμα 4.27 Χαρακτηριστικά διαγράμματα καλής και κακής προσαρμογής της σύνθετης κατανομής διπλού αθροίσματος Kumaraswamy στην εμπειρική δικόρυφη κατανομή για τον σταθμό Elizabeth City (Βόρεια Καρολίνα).....	53
Διάγραμμα 4.28 Διαγράμματα κατανομών Pdf Kumaraswamy ωριαίου συντελεστή K_T για τον μήνα Σεπτέμβριο με σκοπό τον εντοπισμό ασυμμετρίας για τον σταθμό Elizabeth city (Βόρεια Καρολίνα).....	54
Διάγραμμα 4.29 Διάγραμμα ετεροσυσχετίσεων για τον σταθμό του Denver δωδέκατης ώρας όλων των μηνών για υστέρηση από 1εως12	55
Διάγραμμα 4.30 Ετεροσυσχετίσεις ωριαίου συντελεστή K_T για υστέρηση ένα σε μηνιαία κλιμακα , για τον σταθμό Denver	55
Διάγραμμα 4.31 Ετεροσυσχετίσεις ωριαίου συντελεστή K_T για υστέρηση ένα σε μηνιαία κλιμακα , για τον σταθμό Elizabeth City	56
Διάγραμμα 4.32 Ενδεικτικά εμπειρικά κλιμακογράμματα για σταθμούς της Αμερική οι οποίοι διευθετούν πάνω από 14 χρόνια μετρήσεων	58
Διάγραμμα 5.1 Σύγκριση μεταξύ γκαουσιανού θορύβου με συσχέτιση και χωρίς.....	61
Διάγραμμα 5.2 Σύγκριση κλίσης κλιμακογράμματος μεταξύ γκαουσιανού θορύβου με και χωρίς συσχέτιση	62
Διάγραμμα 5.3 Συνθετική χρονοσειρά συντελεστή αιθριότητας για τον σταθμό Denver	62
Διάγραμμα 5.4 Ενδεικτικά συγκριτικά στοιχεία για τις κεντρικές ροπές και διαγράμματα καλή και κακής προσαρμογής των κατανομών πυκνότητας πιθανότητας και αθροιστικής πιθανότητας για τον σταθμό Denver.....	68
Διάγραμμα 5.5 Σύγκριση κλιμακογράμματος μοντελοποιημένου και εμπειρικού συντελεστή αιθριότητας.....	68
Διάγραμμα 5.6 Διάγραμμα ετεροσυσχετίσεων συνθετικού ωριαίου συντελεστή αιθριότητας μεταξύ διαδοχικών ωρών lag(1) για τον σταθμό Denver.....	69

Αν δεν θες να χάσεις τα μάτια και το μυαλό σου, να ακολουθείς τον ήλιο, περπατώντας στη σκιά.

Φρήντριχ Νίτσε, 1844-1900

Χώρες του ήλιου και δεν μπορείτε ν' αντικρίσετε τον ήλιο.

Χώρες του ανθρώπου και δεν μπορείτε ν' αντικρίσετε τον άνθρωπο.

Γιώργος Σεφέρης, 1900-1971

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχοι εργασίας

1. Η κατανόηση της αιτιοκρατικότητας για την διεργασία της ηλιακής ακτινοβολίας σε όλες τις χρονικές κλίμακες.
2. Η πρόταση νέας κατανομής για την διεργασία της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας και κατ' επέκταση της ημερήσιας κλίμακας.
3. Ο στατιστικός έλεγχος των προηγούμενων κατανομών.
4. Η αξιοποίηση του συντελεστή αιθριότητας K_T (clear sky index) για την περιγραφή της ηλιακής ακτινοβολίας και η πρόταση για νέα κατανομή σε ωριαίο και ημερήσιο επίπεδο του συντελεστή.
5. Η μελέτη της στοχαστικής φύσης και δομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του συντελεστή αιθριότητας K_T .
6. Η μελέτη των ετεροσυσχετίσεων των ωρών για τον συντελεστή K_T .
7. Η δημιουργία ενός ψευδο-κυκλοστάσιμου μοντέλου μακροπρόθεσμης εμμονής με σκοπό την αναπαραγωγή του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας και συνεπώς της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας.
8. Τέλος η εφαρμογή του μοντέλου και η σύγκριση των παραχθέντων αποτελεσμάτων με τα εμπειρικά μετρημένα δεδομένα.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία και συλλογιστική πορεία

Η ηλιακή ενέργεια είναι αποτέλεσμα των ισχυρών θερμοπυρηνικών αντιδράσεων που γίνονται στον πυρήνα του ήλιου. Έρχεται στη γη με τη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας, σε πακέτα ενέργειας που αντιστοιχούν στα διάφορα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος.

Η ακτινοβολία που προσπίπτει στα όρια της ατμόσφαιρας (εξωγήινη ακτινοβολία, extra-terrestrial radiation, G_0), παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις, οι οποίες οφείλονται στην μεταβολή της απόστασης ήλιου-γης κατά τη διάρκεια του χρόνου και τη δραστηριότητα στο εσωτερικού του ήλιου.

Μέγεθος αναφοράς για την ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας είναι η **ηλιακή σταθερά** (solar constant, G_{sc}), η οποία αντιστοιχεί στην ροή ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας, για τη μέση απόσταση ήλιου-γης.

Η σύγχρονη τιμή που προτείνει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Μετεωρολογίας, για την **ηλιακή σταθερά** είναι περίπου **1367 W/m²**.

Κατά την είσοδο της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, ένα μέρος της ανακλάται πίσω στο διάστημα, ένα μέρος της απορροφάτε από την ατμόσφαιρα και το υπόλοιπο ταξιδεύει μέσα σε αυτή μέχρι την επιφάνεια της γης.

Η μορφή με την οποία θα φθάσει στην επιφάνεια της γης είναι, είτε ως **άμεση** ακτινοβολία, δηλαδή ως δέσμη ακτινών που προέρχεται κατευθείαν από τον ήλιο, είτε ως **διάχυτη**, δηλαδή ακτινοβολία που έχει πρώτα σκεδαστεί και ανακλαστεί στα διάφορα σωματίδια και σταγονίδια της ατμόσφαιρας και γι' αυτό μη σταθερής κατεύθυνσης, προερχόμενη από όλο τον ουράνιο θόλο.

Στην επιφάνεια της γης, φθάνει περίπου το 50% της εξωγήινης ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, αφού το 30% περίπου αυτής ανακλάται πίσω στο διάστημα και το υπόλοιπο 20% απορροφάτε από την ατμόσφαιρα.

Από την ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης, ένα μέρος απορροφάτε από αυτή και ένα άλλο ανακλάται και πάλι πίσω στην ατμόσφαιρα.

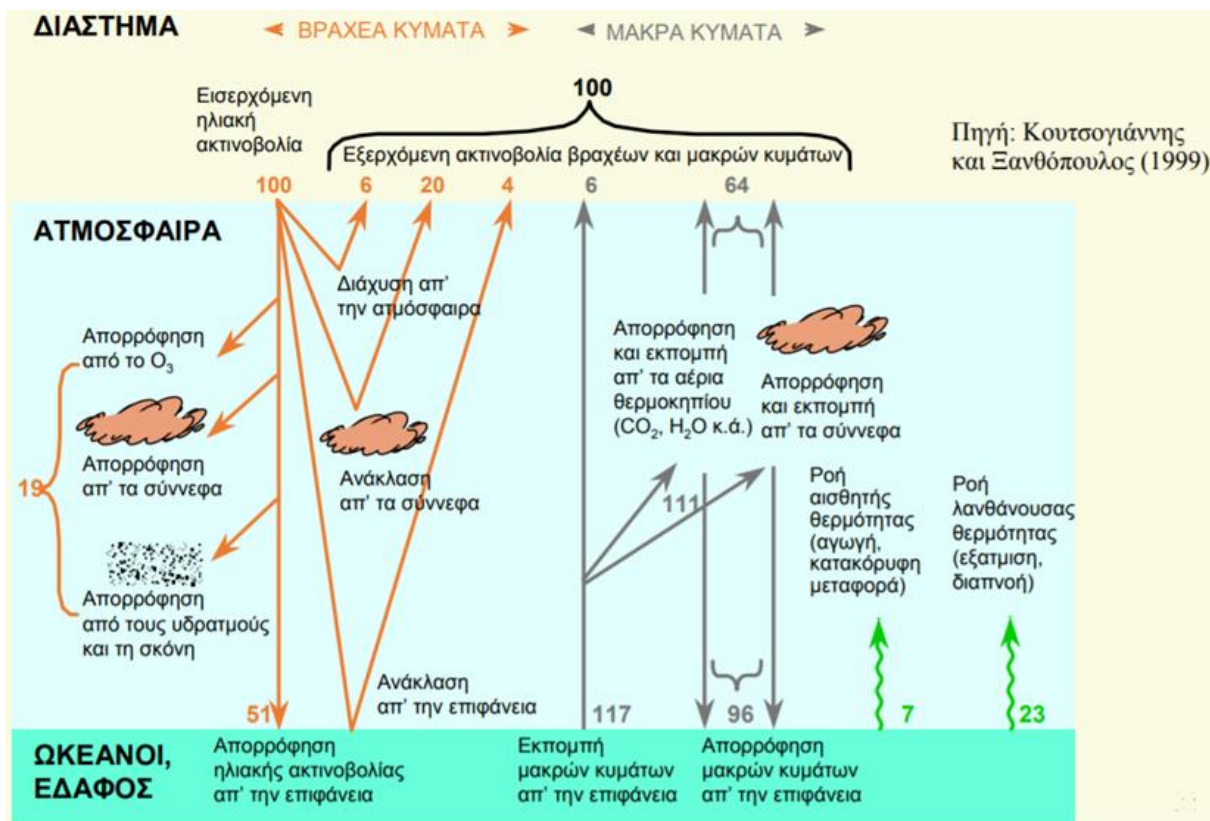
Η ακτινοβολία που δέχονται τα σώματα στην επιφάνεια της γης και που ενδιαφέρει τις εφαρμογές αξιοποίησης της, ονομάζεται **ολική ακτινοβολία** (total radiation) και αποτελείται από το άθροισμα της **άμεσης** (beam), της **διάχυτης** (diffuse) και της **ανακλώμενης** (ground reflected ή albedo) ακτινοβολίας.

Τα ποσοστά καθεμιάς στην ατμόσφαιρα εξαρτώνται από την σύνθεση και τη κατάσταση της τελευταίας, (παρουσία και ποσοστό νεφοκάλυψης, σύνθεση σωματιδίων και αερίων κλπ).

Η **άμεση ακτινοβολία** ακόμα και σε συνθήκες πλήρως καθαρού ουρανού δεν ξεπερνά το 85% της ακτινοβολίας που φθάνει στην γη και είναι ενεργειακά πιο αποδοτική σε σχέση με τη **διάχυτη** γιατί παρουσιάζει υψηλή συγκεντρωτικότητα.

Αντίθετα, σε συννεφιασμένες μέρες, σχεδόν όλη η ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης είναι **διάχυτη**.

Η **ανακλώμενη** ακτινοβολία εξαρτάται από την **ανακλαστικότητα** της επιφάνειας στην περιοχή που εξετάζεται. Η τελευταία εκφράζεται με τον συντελεστή **ανακλαστικότητας**, ρ , ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 0 (πλήρης απορρόφηση) και 1 (πλήρης ανάκλαση) και χαρακτηρίζει τις διάφορες επιφάνειες. Ενδεικτικά χαρακτηριστικές τιμές του σε διάφορες επιφάνειες είναι 0,95 για το παλιό χιόνι, 0,06 για το νερό, και 0,20 για το έδαφος.



Σχήμα 2.1 : Απεικόνιση άμεσης (beam), της διάχυτης (diffuse) και της ανακλώμενης (ground reflected ή albedo).

Η πραγματική ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης όπως προαναφέρθηκε, εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την κατάσταση της ατμόσφαιρας.

Η ύπαρξη κυρίως νεφοκάλυψης, καθώς και διαφόρων αερίων και στερεών σωματιδίων της ατμόσφαιρας, οδηγεί στην απορρόφηση, διάθλαση και ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας μειώνοντας την ένταση της.

Συνεπώς η τελική ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της γης, αποτελεί ένα ποσοστό της εξωγήινης. Το ποσοστό αυτό ονομάζεται **συντελεστής αιθριότητας (Κ_τ)** και αποτελεί τον λόγο της **πραγματικής ακτινοβολίας**, προς την **εξωγήινη ακτινοβολία**, μετρούμενες αμφότερες σε οριζόντιο επίπεδο. Επιπλέον ο συντελεστής ορίζεται αντίστοιχα ανάλογα με την χρονική κλίμακα που εξετάζουμε. Οι πιο συνηθισμένες μορφές είναι, η ωριαία, ημερήσια και μηνιαία.

Συνεπώς ο συντελεστής Κ_τ ισούται με:

$$k_t = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

Όπου I η ωριαία πραγματική ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της γης και I₀ η ωριαία εξωγήινη ακτινοβολία υπολογισμένη σε οριζόντιο επίπεδο. Αντίστοιχα ορίζονται ο ημερήσιος και ο μηνιαίος συντελεστής αιθριότητας.

2.2 Τρόποι Μέτρησης ωριαίας ακτινοβολίας και όργανα μέτρησης

Η μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί διαχρονικά ένα ζητούμενο για μελετητές και μετεωρολόγους και για το λόγο αυτό έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την εύρεση των κατάλληλων οργάνων, προκειμένου να καταλήγουμε σε σωστά συμπεράσματα με σχετικά απλούς και εύχρηστους μηχανισμούς.

Οι περισσότεροι από αυτούς τους μηχανισμούς χρησιμοποιούν όργανα και αισθητήρες που βασίζουν τη λειτουργία τους σε σύγκριση θερμοκρασίας αλλά και καταγραφή ροής θερμότητας. Αυτό κυρίως εφαρμόζεται με τα θερμοστοιχεία στους αισθητήρες ροής θερμότητας.

Διακρίνουμε τρία όργανα μετρήσεων το **πυρονόμετρο**, το **πυρηλιόμετρο** και το **ακτινόμετρο**.

Η επιλογή του κατάλληλου οργάνου, γίνεται ανάλογα, με τη συνιστώσα της ακτινοβολίας που ζητάμε, την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θέλουμε και την οικονομική δυνατότητα που έχουμε.

2.2.1 Το πυρανόμετρο

Το **Πυρανόμετρο** αποτελεί το πιο διαδεδομένο και αξιόπιστο όργανο μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας, βασίζει την λειτουργία του, στην αρχή λειτουργίας των αισθητήρων ροής θερμότητας και μετρά την συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει σε οριζόντια επιφάνεια (G_{global}) .

Τα σύγχρονα πυρανόμετρα αποτελούνται από ένα ή δύο ομόκεντρους θόλους που κατασκευάζονται από γυαλί ή ακριλικό πλαστικό και στο εσωτερικό τους υπάρχει μία μαύρη επιφάνεια με κεραμικό υπόστρωμα, κάτω από την οποία υπάρχουν εκατοντάδες θερμοστοιχεία.

Η διαφορά της θερμότητας που παράγει η μαύρη επιφάνεια σε σχέση με μία άσπρη που ανακλά το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, δημιουργεί ηλεκτρικό σήμα. Το σήμα του πυρανομέτρου είναι της τάξης mV και οδηγείται σε κατάλληλη συσκευή μέτρησης.

Ο γυάλινος θόλος που αναφέραμε παραπάνω είναι πολύ σημαντικός για την σωστή χρήση του πυρανόμετρου διότι:

- Φροντίζει να μονώνονται θερμικά οι αισθητήρες, αποκλείοντας τις θερμικές διαδικασίες συναγωγής για τη μεταφορά (απώλεια) θερμότητας προς την άνω όψη της διάταξης.
- Αποκλείει ρεύματα αέρα να προσεγγίσουν τους αισθητήρες καθώς και άλλους σωματιδιακούς ρύπους πχ. σκόνη που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τη λειτουργία τους και αυτοκαθαρίζεται με την απλή βροχή.
- Αποτελεί τον χώρο εναπόθεσης του φίλτρου απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ώστε να προσδιορίζεται η φασματική απόκριση της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο εσωτερικό της διάταξης.

Προκειμένου να γίνει μέτρηση της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας τα πυρανόμετρα εφοδιάζονται και με ένα δαχτυλίδι το οποίο τοποθετείται στην διεύθυνση του ήλιου για όλο το γεωγραφικό πλάτος των 0ο-90ο Βορά και Νότου, έτσι ώστε να σκιάζεται ο γυάλινος θόλος συνεχώς κατά τη διάρκεια της ημέρας .

Σκοπός του δαχτυλιδιού είναι να συλλάβει την απ' ευθείας ακτινοβολία του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας χωρίς επαναριθμηση. Κάθε λίγες ημέρες η θέση του δαχτυλιδιού πρέπει να επαναπροσαρμόζεται στην κλίση του ήλιου.

Τα πυρανόμετρα χρησιμοποιούν αισθητήρες τύπου thermopile και προδιαγράφονται και βαθμονομούνται από συγκεκριμένα πρότυπα ISO, που υιοθετούνται από τον παγκόσμιο οργανισμό μετεωρολογίας (WMO). Έτσι ανάλογα με την ποιότητά τους ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Την Secondary standard, που αντιστοιχεί στα καλύτερα όργανα και πρότυπα.
- Την First class, που αντιστοιχεί σε μεσαίας κατηγορίας όργανα.
- Την Second class, που αντιστοιχεί σε χαμηλού κόστους και ποιότητας όργανα.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες μετρήσεις που αναλύουμε στην παρούσα εργασία προέρχονται από σταθμούς που χρησιμοποιούν πυρανόμετρα τα οποία όμως δεν αναφέρουν σε τι πρότυπο υπάγονται, συνεπώς σφάλματα μετρήσεων της τάξεως ± 10 w/m² θεωρούνται αποδεκτά ιδιαίτερα τις πρωινές και απογευματινές ώρες.



Σχήμα 2.2 : Πυρανόμετρο

2.2.2 Το πυρηλιόμετρο

Το **Πυρηλιόμετρο** είναι το καταλληλότερο και αποδοτικότερο όργανο μέτρησης όταν το πεδίο ενδιαφέροντος είναι η μέτρηση της άμεσης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας (Gbeam).

Το πρώτο **πυρηλιόμετρο** προέρχεται από το Γάλλο Φυσικό Claude Pouillet(1837), που παρατήρησε με αυτό, την αύξηση της θερμοκρασίας μιας ορισμένης ποσότητας , υπό την επίδραση του ηλιακού φωτός σε ορισμένο χρόνο.

Σημαντική βελτίωση του πρώτου πυρηλιομέτρου, αποτελεί το πυρηλιόμετρο αντιστάθμισης του Angstrom.

Το πυρηλιόμετρό αυτό, αποτελείται από δυο μαύρα φύλλα μαγγανίου. Στο ένα φύλλο επιδρά η ηλιακή ακτινοβολία, ενώ το άλλο παραμένει στην σκιά και θερμαίνεται με ηλεκτρικό ρεύμα, ώσπου να φθάσει τη θερμοκρασία του άλλου που ακτινοβολείται από τον ήλιο. Μετρείται η ποσότητα του ρεύματος που χρειάζεται για να φθάσουν τα δυο φύλλα στην ίδια θερμοκρασία και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται, αν διαιρεθεί η ποσότητα αυτή με την επιφάνεια ανά cm^2 .



Σχήμα 2.3 : Το όργανο πυρηλιόμετρο

2.2.3 Το ακτινόμετρο

Το **Ακτινόμετρο** χρησιμοποιείται κυρίως από την μετεωρολογία για τη μέτρηση της άμεσης συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας, σε αντιστοιχία με το πυρηλιόμετρο,

Ο βασικός τύπος του ακτινομέτρου αποτελείται από δύο λεπτές ταινίες πλατίνας μαυρισμένες ηλεκτρολυτικά και οι οποίες σχηματίζουν μία γέφυρα wheatstone, με την μία ταινία εκτεθειμένη στην ηλιακή ακτινοβολία, την άλλη σε κάλυψη από αυτή και το όλο σύστημα προφυλαγμένο από διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία.

Η άνοδος της θερμοκρασίας της εκτεθειμένης στην ακτινοβολία ταινίας προκαλεί αύξηση της ηλεκτρικής της αντίστασης και μία απόκλιση της βελόνας ενός ευαίσθητου γαλβανομέτρου.

Για να μετρηθεί η ενέργεια της ακτινοβολίας που δέχεται το ακτινόμετρο, διοχετεύεται ρεύμα μέσα από την προστατευόμενη από την ακτινοβολία ταινία, (ταινία αναφοράς), μέχρι το γαλβανόμετρο να δείξει την ίδια απόκλιση, όπως εκείνη της ταινίας που ακτινοβολείται και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται, αν διαιρεθεί η ποσότητα αυτή με την επιφάνεια ανά cm^2 .

Ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται αντί των ταινιών πλατίνας, (στρώματα ημιαγωγών, υπεραγωγοί, μίγματα οξειδίων μαγγάνιου, κοβαλτίου, νιοβίου κλπ), το ακτινόμετρο εφαρμόζεται αποδοτικότερα ή όχι, σε διαφορετικά μήκη κύματος ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.4 : Το όργανο ακτινόμετρο

2.3 Γενικά στοιχεία υπολογισμού ωριαίας εξωγήινης ακτινοβολίας

Ο υπολογισμός της ημερήσιας και ωριαίας εξωγήινης ακτινοβολίας G_0 κρίθηκε αναγκαίος στους σταθμούς όπου δεν υπήρχαν οι απαραίτητες μετρήσεις με τελικό σκοπό την δημιουργία του συντελεστή αιθριότητας Κτ.

Η ακτινοβολία ακολουθεί ένα ντετερμινιστικό μοντέλο το οποίο εξαρτάται από την γεωμετρία του ήλιου και τις αντίστοιχες συντεταγμένες της τοποθεσίας ενδιαφέροντος στην περιοχή της ατμόσφαιρας της γης. Επίσης δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η συνθετική εξωγήινη ακτινοβολία υπολογίζεται για οριζόντια επιφάνεια πρόσπτωσης, δηλαδή εφαπτόμενη στην γη την συγκεκριμένη τοποθεσία σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση πχ κεκλιμένη το μοντέλο διαφοροποιείται.

Παρακάτω αναφέρονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία που αξιοποιούνται για τον υπολογισμό της ωριαίας εξωγήινης ακτινοβολίας.

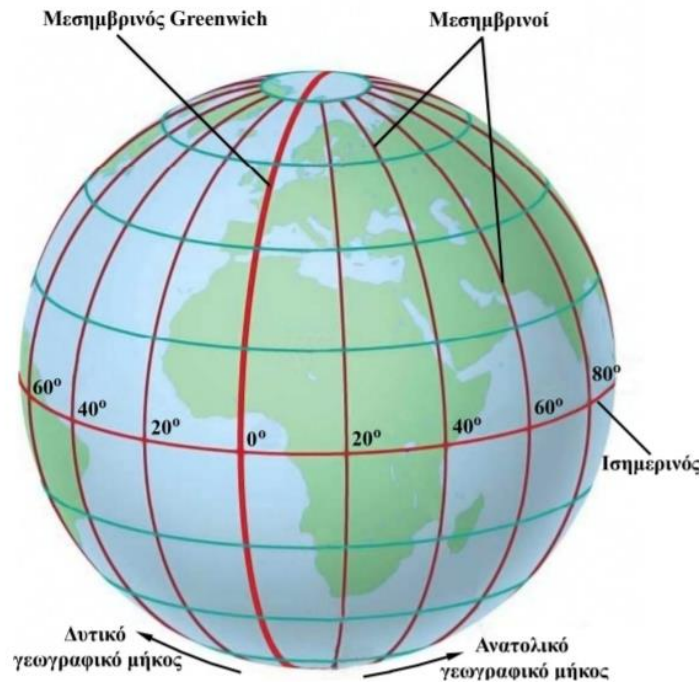
2.3.1 Γεωγραφικό πλάτος (φ)

Όπως είναι γνωστό η Γη χωρίζεται σε τομείς, με σκοπό τον προσδιορισμό οποιασδήποτε θέσης πάνω στην επιφάνεια της. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια κάθετων ημικυκλίων που ονομάζονται μεσημβρινοί και παράλληλων κύκλων που ονομάζονται παράλληλοι.

Αρχή του συστήματος είναι ο μεσημβρινός του Γκρίνουιτς (Greenwich) και ο Ισημερινός και οποιοδήποτε σημείο τομής τους, αποτελεί σημείο αναφοράς πάνω στην επιφάνεια της γης.

Η Γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του Ισημερινού και μία νοητή γραμμή που ενώνει το κέντρο της Γης, με την τοποθεσία που πρόκειται να προσδιοριστεί, ονομάζεται **γεωγραφικό πλάτος φ** , (Geographic Latitude) και παίρνει θετικές τιμές στο Βόρειο ημισφαίριο.

Αντίστοιχα, η γωνία από τον πρώτο μεσημβρινό, ονομάζεται **γεωγραφικό μήκος α** ή αλλιώς Local (Geographic Longitude) και το πρόσημο της είναι διαφορετικό δυτικά και ανατολικά του μεσημβρινού του Greenwich. Το ζεύγος (α, φ) αποτελούν τις συντεταγμένες του τόπου.



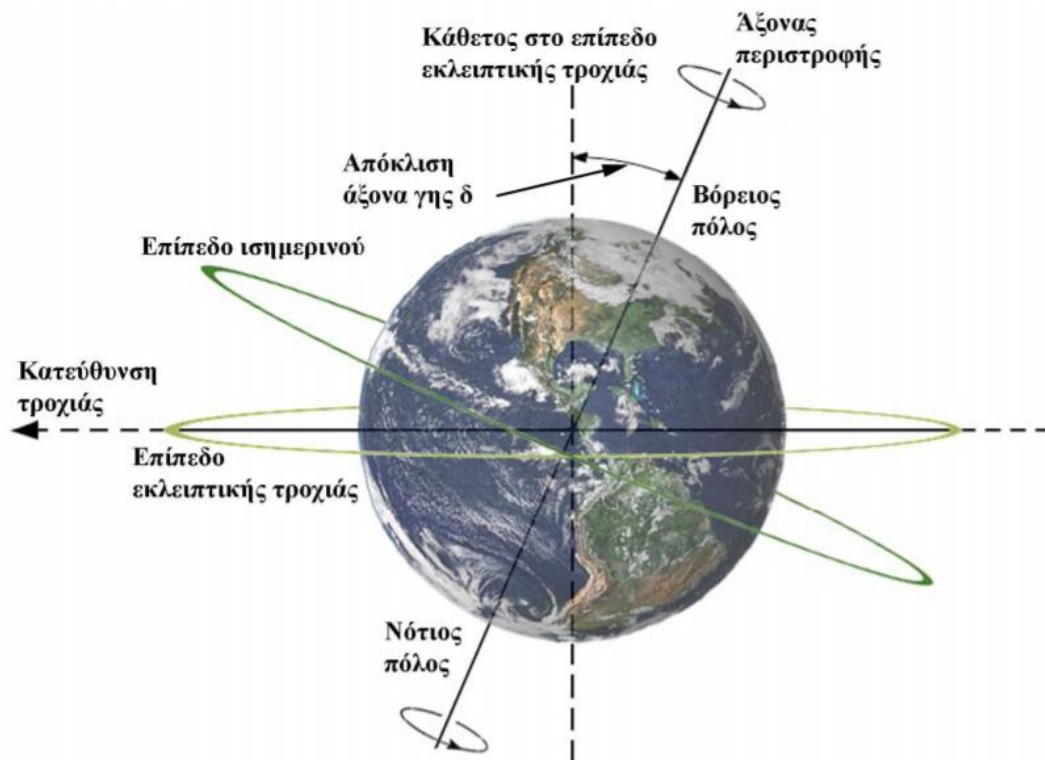
Σχήμα 2.5 : Το γεωγραφικό μήκος

2.3.2 Ηλιακή απόκλιση (δ)

Η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο, σε ένα επίπεδο που ονομάζεται επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς. Ο άξονας βορρά – νότου της γης, αποκλίνει από την κάθετο στο επίπεδο εκλειπτικής τροχιάς κατά την διάρκεια του έτους, κατά μία μεταβαλλόμενη γωνία.

Η γωνία αυτή, η οποία σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα βορρά – νότου και στο επίπεδο της εκλειπτικής τροχιάς της γης, ονομάζεται απόκλιση άξονα γης (earth declination) και έχει καθιερωθεί να συμβολίζεται διεθνώς, με το ελληνικό γράμμα δ . Είναι συνάρτηση της μέρας του χρόνου (J) και κοινή για όλα τα σημεία στη γη και λαμβάνει τιμές από $-23,45^\circ$ έως $23,45^\circ$ περίπου:

$$\delta = -0,49 \cos \left(\frac{2\pi J}{365} + 0,16 \right) \quad (2)$$



Σχήμα 2.6 : Εικονική απεικόνιση της ηλιακής απόκλισης

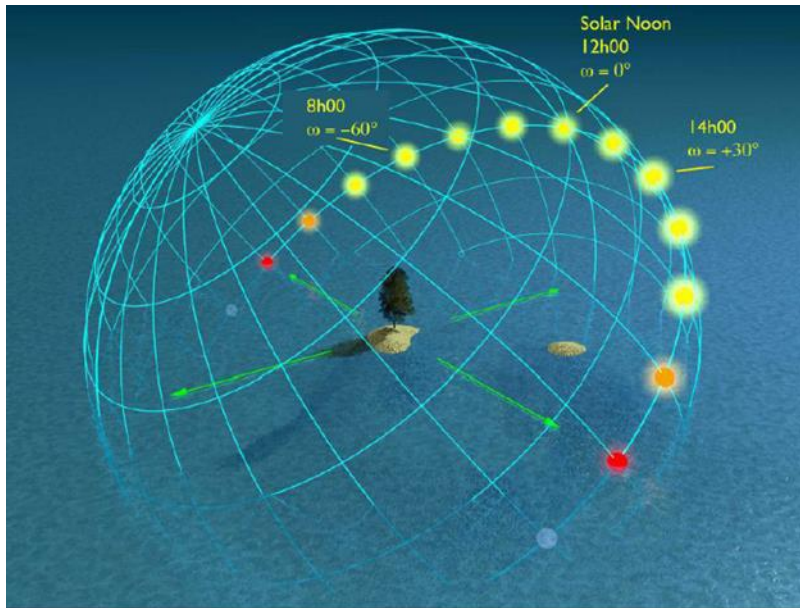
2.3.3 Ωριαία γωνία (ω)

Η **ωριαία γωνία (ω)**, είναι απολύτως χρήσιμη, για να καταφέρουμε να προσδιορίσουμε πλήρως την τροχιά του ήλιου στην ουράνια σφαίρα.

Η (ω) ορίζεται ως η γωνία εκείνη, ανάμεσα στην νοητή γραμμή που ενώνει την εκάστοτε θέση του ηλίου στην ουράνια σφαίρα με τον παρατηρητή και την νοητή γραμμή που ενώνει τον παρατηρητή με το ζενίθ του ηλίου για τον κάθε τόπο. Η ηλιακή ώρα θεωρείται μηδέν όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ του $\omega=0$ και μεταβάλλεται ανά 15° κάθε ώρα αφού η γη κινείται με $15^\circ/h$. Η (ω) δίνεται από τον τύπο:

$$\omega = \frac{(st - 12)h}{24 \cdot h} 360 \leftrightarrow \omega = 15(St - 12) \quad (3)$$

Όπου $St=0,1,2, \dots, 23$ για ευκολία αλλιώς αναλυτικά στο (2.3.4)



Σχήμα 2.7 : Σχηματική επεξήγηση της ωριαίας γωνίας

2.3.4 Ο τοπικός ηλιακός χρόνος – ηλιακή ώρα (St)

Ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας στη μελέτη της κίνησης του ήλιου είναι η ηλιακή ώρα δηλαδή η ώρα που αναφέρεται στον ήλιο. Η ηλιακή ώρα St (solar time) διαφέρει από την ώρα του εκάστοτε τόπου, αφού η τοπική ώρα Lt (local time) εξαρτάται από το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του κάθε τόπου όπως επίσης και από την ημέρα του έτους στην οποία αναφέρεται ο υπολογισμός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζονται διορθώσεις στην τοπική ώρα ώστε να προσεγγίσουμε την St δεδομένου ότι η Lt δεν λαμβάνει υπόψη, (α), την αλλαγή της χρονικής διάρκειας της ηλιακής ημέρας κατά τη διάρκεια του χρόνου και (β), λόγω των χρονικών ζωνών από τις οποίες εξάγεται η τοπική ώρα.

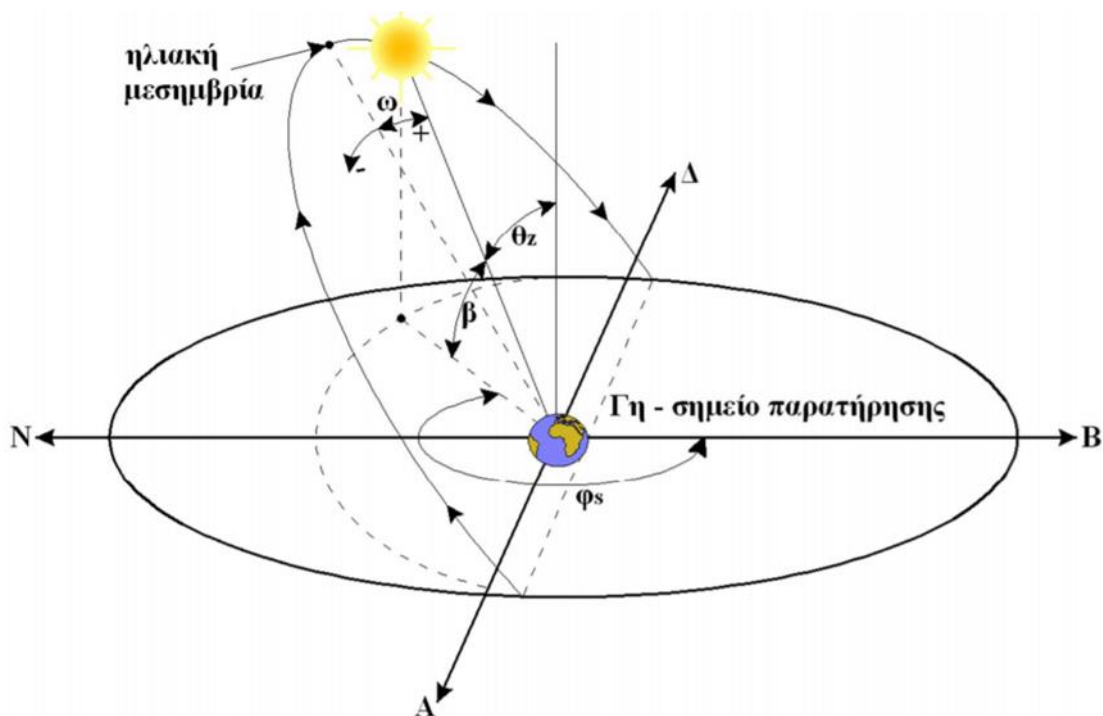
Η St υπολογίζεται από τον τύπο:

$$St = Lt + \frac{\pm 4(L_{st} - L_{loc}) - C + ET}{60} \quad (4)$$

Όπου :

- Στον όρο $\pm 4(L_{st} - L_{loc})$ για περιοχές δυτικά του Greenwich λαμβάνεται θετικό και για περιοχές ανατολικά λαμβάνεται αρνητικός.
- $L_{st}=15$ επί (διαφορά ώρας μεταξύ της εκάστοτε χώρας και του Greenwich) πχ για την Ελλάδα η διαφορά ισούται με 2 ώρες
- L_{loc} = ο τοπικός μεσημβρινός του σημείου αναφοράς
- $C=1$ για τους θερινούς μήνες, η διόρθωση λόγω της θερινής ώρας
- $ET = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B)$ όπου $B = \frac{360}{365}(J - 81)$

2.4 Βασικές γωνίες της εκλειπτικής τροχιάς του ήλιου



Σχήμα 2.8 : Σχηματική απεικόνιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ήλιου

2.4.1 Ύψος του ήλιου (β)

Το ηλιακό ύψος β του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο, είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα, στην ευθεία που ενώνει το εν λόγω γεωγραφικό σημείο, με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στην προβολή της ανωτέρω ευθείας στην επιφάνεια της γης (βλέπετε σχήμα 2.8). Το ηλιακό ύψος θεωρητικά παίρνει τιμές από 0° έως 90° . Υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sin(\beta) = \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) \quad (5)$$

Όπου (φ) το γεωγραφικό πλάτος του υπό μελέτη γεωγραφικού σημείου, (δ) η απόκλιση του άξονα της γης και (ω) η ωριαία γωνία του ήλιου την χρονική στιγμή μελέτης.

Προσοχή !

Οι αρνητικές τιμές του ηλιακού ύψους σε ένα γεωγραφικό σημείο εμφανίζονται σε χρονικές στιγμές πριν την ανατολή και μετά την δύση του ήλιου, δηλαδή όσο ακόμα επικρατεί νύχτα.

2.4.2 Ζενίθια γωνία (θ_z)

Η γωνία ζενίθ (θ_z) του ήλιου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην ευθεία, που ενώνει το εν λόγω γεωγραφικό σημείο με τη θέση του ήλιου, στον ορίζοντα και στην κατακόρυφη ως προς την επιφάνεια της γης από το εν λόγω σημείο. Η ζενίθια γωνία και το ηλιακό ύψος αποτελούν συμπληρωματικές γωνίες δηλαδή:

$$\beta + \theta_z = 90^\circ \quad (6)$$

2.4.3 Αζιμούθιο (φ_s ή Az)

Το αζιμούθιο (φ_s) του ηλίου ως προς συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή στο οριζόντιο επίπεδο, της ευθείας που ενώνει το εν λόγω σημείο με τη θέση του ήλιου στον ορίζοντα και στην διεύθυνση βορρά - νότου. Επίσταται προσοχή, για γωνίες δυτικά από τον νότο λαμβάνει θετικές τιμές ενώ για γωνίες ανατολικά από τον νότο λαμβάνει αρνητικές τιμές. Υπολογίζεται από την σχέση :

$$\sin(\varphi_s) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(\beta)} \quad (7)$$

2.4.4 Το επίπεδο πρόσπτωσης των ακτινών του ηλίου περιγράφεται με τις εξής γωνίες

- Κλίση της επιφάνειας (β') : Η γωνία που σχηματίζεται στη διεύθυνση του επιπέδου και του ορίζοντα. Μετριέται από τον ορίζοντα, $0 \leq \beta \leq 180$ ο. Για $\beta > 90$ ο το επίπεδο βλέπει το έδαφος.
- Αζιμούθια γωνία ή γωνία διεύθυνσης της επιφάνειας (γ ή Azs) : η οριζόντια γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της οριζόντιας προβολής της καθέτου του πλαισίου και της κατεύθυνσης του νότου.
- Ορίζεται η γωνία πρόσπτωσης (θ) της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία ισούται με :

$$\cos(\theta) = \cos(\alpha_s) \sin(\beta') \cos(-\gamma) + \sin(\alpha_s) \cos(\beta') \quad (8)$$

Προσοχή !

Στην περίπτωση που το επίπεδο, είναι παράλληλο στο επίπεδο της επιφάνειας της γης σε εκείνο το σημείο θα το ονομάζουμε οριζόντιο επίπεδο (horizontal plane) και ισχύει ότι η ζενίθια γωνία (θ_z) θα είναι ίση με την γωνία πρόσπτωσης.

2.5 Εξωγήινη Ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας

Με βάση όλα τα παραπάνω δεδομένα ορίζουμε την εξωγήινη ακτινοβολία η οποία θα έφθανε στην επιφάνεια της γης στην περίπτωση που υπήρχε έλλειψη ατμόσφαιρας. Την συγκεκριμένη

εξωγήινη ακτινοβολία μπορούμε να την χαρακτηρίσουμε και ως μέγιστη δυναμική ακτινοβολία. Η ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ή πυκνότητα ισχύος (solar irradiance), έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα και σε επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση των ηλιακών ακτίνων, ονομάζεται «ηλιακή σταθερά» (solar constant) και ισούται με 1.367 W/m^2 . Μεταβαλλόμενη κατά ποσοστό $\pm 3\%$ λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$G_o = G_{sc}d \quad (9)$$

Όπου $G_s=1.367 \text{ w/m}^2$ και d ορίζεται η ηλιακή εκκεντρότητα που ισούται με :

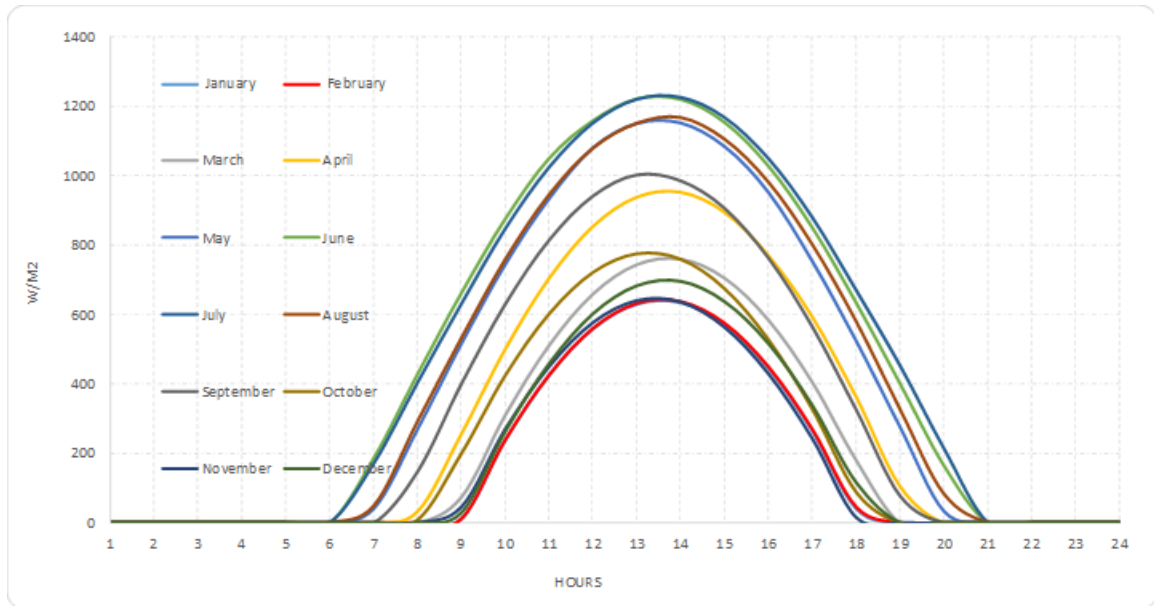
$$d = 1 + 0,0034 \cos\left(\frac{2\pi J}{365} - 0,05\right) \quad (10)$$

Έτσι προκύπτει ότι, αν ολοκληρώσουμε την σχέση (7) ως προς την αντίστοιχη χρονική κλίμακα, μπορούμε να υπολογίσουμε την δυναμική εξωτερική ακτινοβολία σε ωριαία κλίμακα για κάθε πιθανό σημείο πάνω στην επιφάνεια της γης δεδομένου των συντεταγμένων του. Προκύπτει ότι η ωριαία εξωτερική ακτινοβολία ισούται με:

$$I_o = \frac{12}{\pi} G_{sc}d \left[\frac{180}{\pi} (\omega_2 - \omega_1) \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1)) \right] \quad (11)$$

Όπου I_o σε Wh/m^2 και η ηλιακή σταθερά G_{sc} σε W/m^2

Παραθέτουμε ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα ωριαίας εξωτερικής ακτινοβολίας υπολογισμένο με τον ντετερμινιστικό τύπο (8) για τις γεωγραφικές συντεταγμένες της Αθήνας.

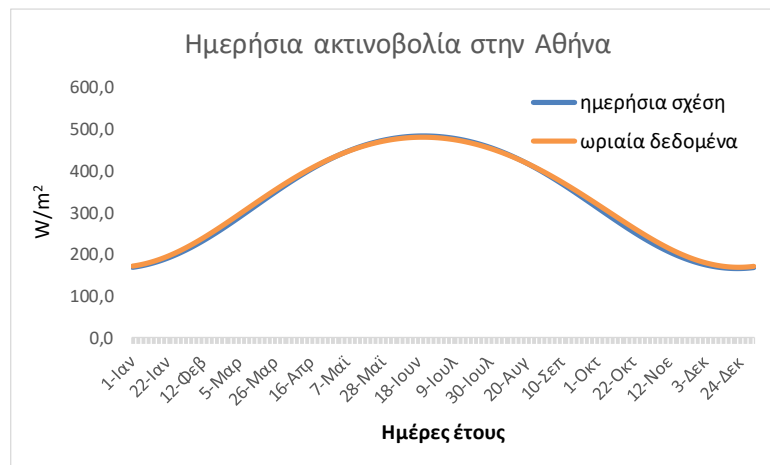


Διάγραμμα 2.3 Απεικόνιση της διπλής περιοδοτικότητας της εξωτερικής ωριαίας ακτινοβολίας

Παρατίθεται η αντίστοιχη σχέση υπολογισμού σε ημερήσια κλίμακα :

$$I_o = \frac{24G_{sc}d}{\pi} \left[\frac{180}{\pi} \sin(\varphi) \sin(\delta) + \sin(\omega) \cos(\varphi) \cos(\delta) \right] \quad (12)$$

Παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα της ημερήσιας εξωτερικής ακτινοβολίας το οποίο έχει προκύψει με δύο τρόπους. Αρχικά με εφαρμογή της σχέσης (12) και δεύτερο με αθροιστικό μέσο από την παραγόμενη χρονοσειρά σε ωριαία κλίμακα. Η μικρή διαφορά που παρατηρείται, οφείλεται στο χρονικό βήμα ολοκλήρωσης της σχέσης (9) (διακριτοποίηση). Αν είχαμε μικρότερο βήμα στην διακριτοποίηση για παράδειγμα σε κλίμακα λεπτού δεν θα εντοπίζαμε το συγκεκριμένο σφάλμα.



Διάγραμμα 2.4 Διαφορά ημερήσιας εξωτερικής ακτινοβολίας με δύο τρόπους

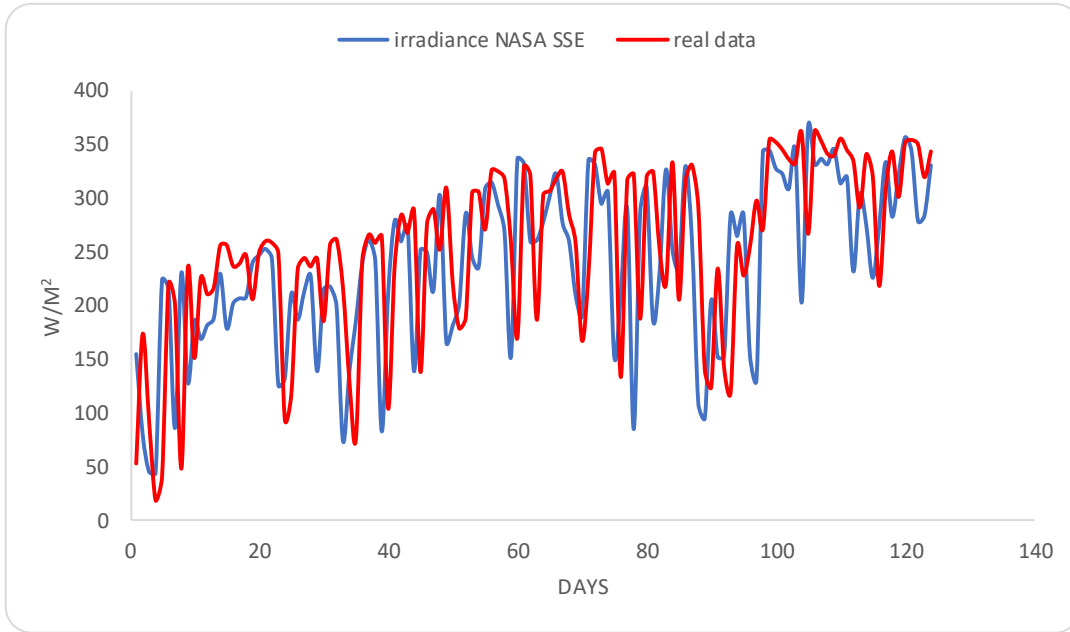
3 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Ημερήσια δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας

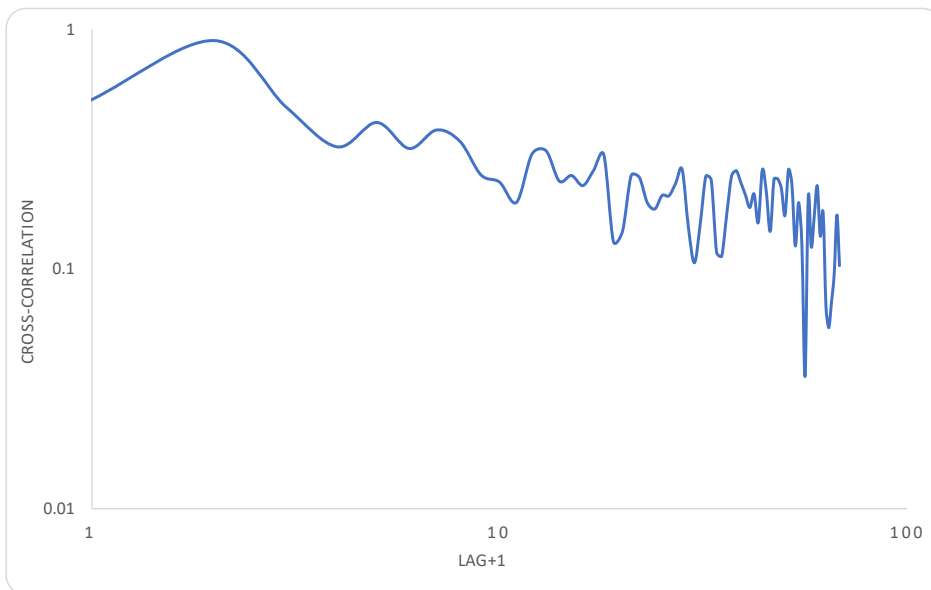
Αρχικά θα πρέπει να τονιστεί ότι η διεργασία της ηλιακής ακτινοβολίας, λόγω της πολυπλοκότητας της, είναι αρκετά δύσκολο να μετρηθεί . Ειδικότερα όσο πιο μικρό βήμα δεδομένων επιδιώκουμε, τόσο πιο δυσμενής είναι η αναζήτηση ελεύθερων δεδομένων.

Τα ημερήσια δεδομένα που αναλύθηκαν προέκυψαν με δύο τρόπους:

Η πρώτη περίπτωση αποτελείται από τις βάσεις δεδομένων της NASA-Surface meteorology and Solar Energy (<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>), οι οποίες δεν αποτελούνται από μετρημένες τιμές αλλά έχουν παραχθεί από ένα μοντέλο ανάλυσης εικόνων από δορυφόρους το οποίο είναι καλιμπραρισμένο με πραγματικές τιμές. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων, αποτελείται από ένα πλέγμα που αλλάζει ανά μια 1° και εκτείνεται σε όλη την επιφάνεια της Γης, ικανό να δώσει μετρήσεις για οποιοδήποτε σημείο, υπό την προϋπόθεση ότι γνωρίζουμε το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του σημείου μελέτης. Τα δεδομένα για όλο το πλέγμα, καλύπτουν ένα φάσμα μετρήσεων, από τον Ιούλιο του 1983 έως τον Ιούνιο του 2005 σύνολο 22 ετών και παραπάνω από 8000 ημερήσιων μετρήσεων. Προκειμένου να ελέγξουμε την αξιοπιστία των δεδομένων συγκρίναμε πραγματικές ημερήσιες μετρήσεις, στον σταθμό του Αγίου Κοσμά με αντίστοιχες μετρήσεις από την βάση. Καταλήξαμε ότι είναι αρκετά αξιόπιστες σε ημερήσιο επίπεδο, με την διαφορά ότι παρατηρείται να υπάρχει κάποια υστέρηση της τάξης της μίας ημέρας για την οποία, η ετεροσυσχέτιση μεταξύ της εμπειρικής και της μοντελοποιημένης υπολογίστηκε ίση με 0.9 . Παραθέτουμε ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα:



Διάγραμμα 3.1 Data comparison

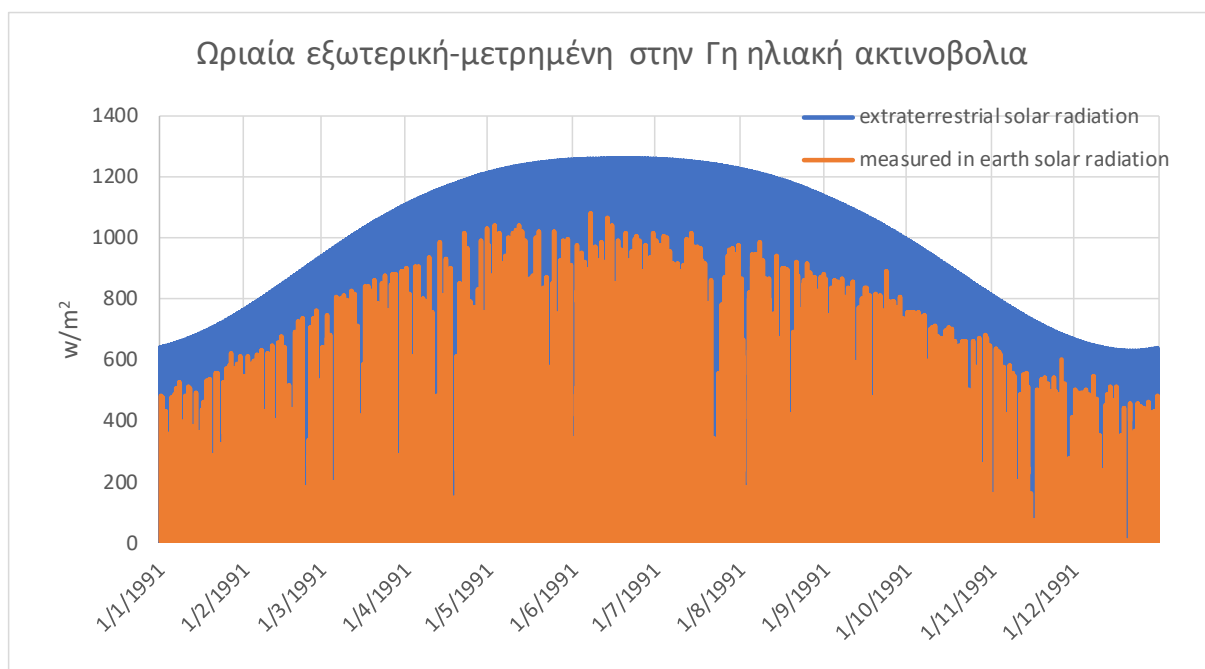


Διάγραμμα 3.2 Cross-correlation between Nasa-See & Observed

Στην δεύτερη περίπτωση, συμπεριλαμβάνουμε τα δεδομένα τα οποία είναι μετρημένα από σταθμούς στην επιφάνεια της Γης. Τα δεδομένα αυτά, μπορεί να είναι μετρημένα σε οποιαδήποτε χρονική υποδιαίρεση της μέρας. Συνήθως έχουν χρονικό βήμα, είτε ωριαίο είτε δεκάλεπτο. Στην συνέχεια τα συγκεκριμένα δεδομένα, με την βοήθεια ενός ανοιχτού λογισμικού στατιστικής ανάλυσης, που ονομάζεται Υδρογνώμων (hydrognomon.org) πραγματοποιείται το aggression της χρονοσειράς, από το μετρημένο βήμα είτε σε αθροιστικό ημερήσιο (Solar Irradiation) είτε σε μέση δυνητική ημερήσια ακτινοβολία (Solar irradiance).

3.2 Ωριαία δεδομένα Ηλιακής ακτινοβολίας

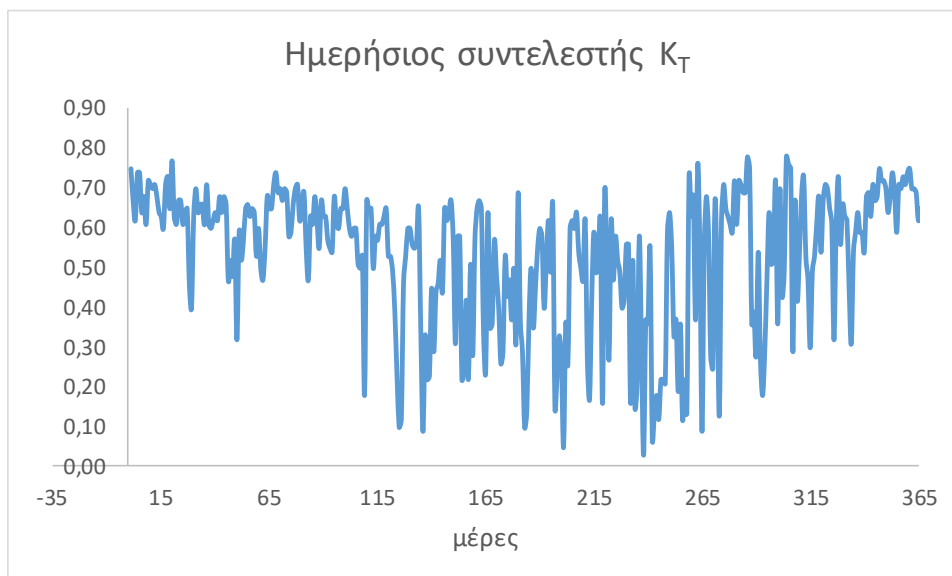
Αλλάζοντας κλίμακα ανάλυσης οδηγούμαστε, στην επιθυμητή ωριαία ανάλυση της Ηλιακής ακτινοβολίας. Αρχικά πραγματοποιήσαμε ανάλυση δεδομένων για τους σταθμούς της Αθήνας του δικτύου Hydrological Observatory of Athens (<http://hoa.ntua.gr>), οι οποίοι παρέχουν μετρήσεις δεκαλέπτου για τις χρονικές περιόδους 25 Φεβρουαρίου 2005 με 18 Σεπτεμβρίου του 2017. Συνολικά δηλαδή 12 χρόνια και πάνω από 100.000 ωριαίες μετρήσεις. Στην συνέχεια για να την επέκταση της μελέτης σε παγκόσμιο επίπεδο αντλήθηκαν δεδομένα από την βάση της NRLE (National Renewable Energy Laboratory)-NSRDB (National Solar Radiation Database). Η βάση της NRLE περιλαμβάνει πάνω από 1020 σταθμούς, οι οποίοι βρίσκονται σε όλη την περιοχή των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, εκ των οποίων όμως μόνο οι 40 έχουν πραγματικές μετρήσεις ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης και με μέγιστο μήκος χρονοσειράς τα 15 χρόνια, ήτοι από την 1 Ιανουαρίου 1991 έως 31 Δεκεμβρίου 2005. Από τους 40 αυτούς σταθμούς λόγω του μικρού μήκους χρονοσειράς δεδομένων απορρίψαμε 4, θεωρώντας καλούς όσους είχαν πάνω από 11 χρόνια μετρήσεις με ελάχιστες κενές. Αξίζει να σημειωθεί, ότι όλοι οι σταθμοί έχουν μοντελοποιημένη ωριαία ακτινοβολία, που προέρχεται από την επεξεργασία εικόνων από δορυφόρους, καθώς και μετρημένη ωριαία εξωτερική ακτινοβολία η οποία επαληθεύεται ότι ακολουθεί την ντετερμινιστική σχέση (11), πάντα για τις εκάστοτε συντεταγμένες του σημείου αναφοράς. Παραθέτουμε ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα.



Διάγραμμα 3.3 Χαρακτηριστικό διάγραμμα μετρημένης ακτινοβολίας στην εξωτερική ατμόσφαιρα και στην επιφάνεια της γης, μήκος δεδομένων ενός χρόνου για τον σταθμό του Denver (από την βάση της NRLE- NSRDB)

3.3 Ημερήσια δεδομένα συντελεστή αιθριότητας K_T

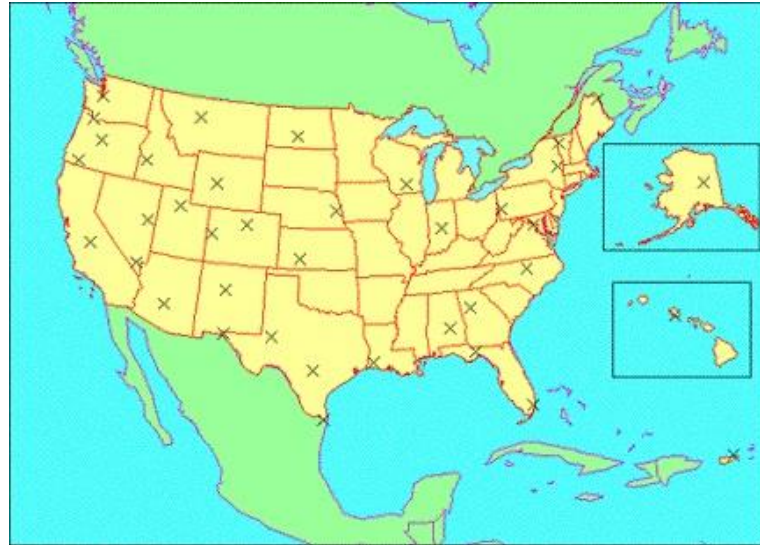
Ο συντελεστής αιθριότητας, ορίζεται ως το πηλίκο της μετρημένης ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης, ως προς την αντίστοιχη ακτινοβολία που παρατηρείται στα όρια της ατμόσφαιρας (βλέπετε σχέση 1). Αρχικά μελετήθηκαν οι ημερήσιοι συντελεστές K_T για ορισμένες μεγάλες πρωτεύουσες (Παρίσι, Όσλο, Μόσχα, Αθήνα, Ανταρκτική, Πεκίνο, Καμπάλα), με σκοπό την ανάλυση σε μία παγκόσμια κλίμακα με διαφορετική εποχικότητα και άλλες τυχόν διεργασίες. Τα δεδομένα προήλθαν από την βάση της NASA-Surface meteorology and Solar Energy. Όμοια, με τα ημερήσια δεδομένα, πραγματοποιήσαμε έναν έλεγχο αξιοπιστίας των δεδομένων σε σχέση με πραγματικά μετρημένα δεδομένα. Επίσης, ένας δεύτερος τρόπος απόκτησης δεδομένων, ήταν η παραγωγή ημερήσιου συντελεστή K_T διαιρώντας την μετρημένη ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (Solar Irradiance) των βάσεων (βλέπετε ενότητα 3.2) με την μοντελοποιημένη ημερήσια εξωτερική ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας, η οποία προέκυψε από την σχέση (12). Με βάση την πληρότητα πληροφοριών για την εξωτερική ακτινοβολία των σταθμών της βάσης (NRLE- NSRDB), με aggregation των δεδομένων από τους σταθμούς, υπολογίστηκε η ημερήσια εξωτερική ακτινοβολία η οποία διαιρούμενη με την μετρημένη έδωσε τον ημερήσιο συντελεστή αιθριότητας.



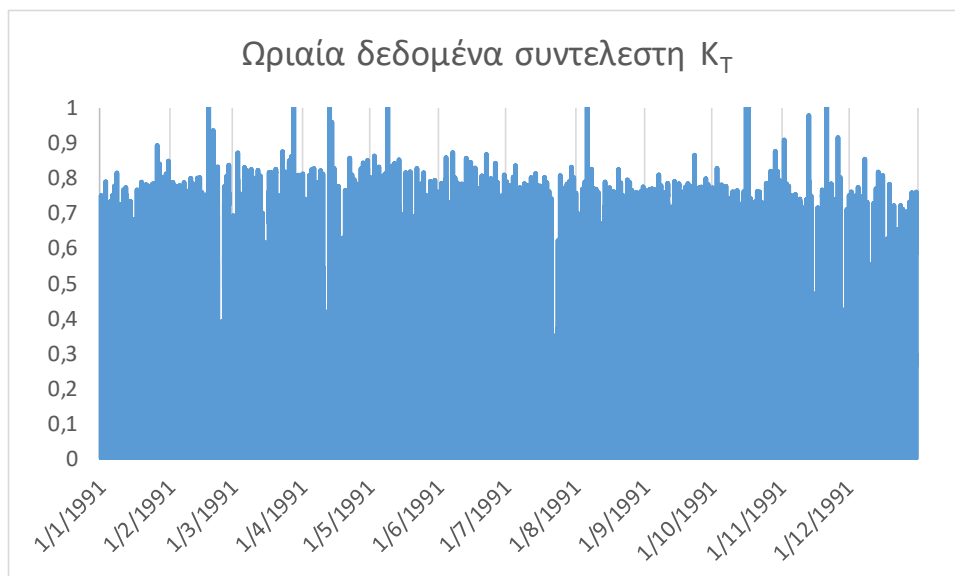
Διάγραμμα 3.4 Ημερήσιος συντελεστής K_T για Αθήνα

3.4 Ωριαία δεδομένα συντελεστή αιθριότητας K_T

Ο ωριαίος συντελεστής αιθριότητας K_T , ο οποίος αποτελεί και τον γνώμονα ανάλυσης της παρούσας εργασίας, υπολογίστηκε από τα ωριαία δεδομένα όπως απαριθμούνται στις παραπάνω ενότητες. Όμως όπου είχαμε έλλειψη δεδομένων μέτρησης της εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα υπολογίστηκε με την χρήση της ντετερμινιστικής σχέσης (11). Γενικότερα πραγματοποιήθηκε ανάλυση του συντελεστή στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής μέσω του δικτύου της Hydrological Observatory of Athens (HOA) βλέπετε (ενότητα 3.2). Επίσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση σε όλο το δίκτυο των βάσεων της NRLE- NSRDB για τους 40 σταθμούς, που περιέχουν μετρήσεις ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας και οι οποίοι βρίσκονται διασκορπισμένοι σε όλη την έκταση των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής.



Σχήμα 3.1 Χάρτης με τους 40 σταθμούς της NRLE- NSRDB

Διάγραμμα 3.5 Ωριαία διακύμανση K_T μέσα στον χρόνο για τον σταθμό του Denver

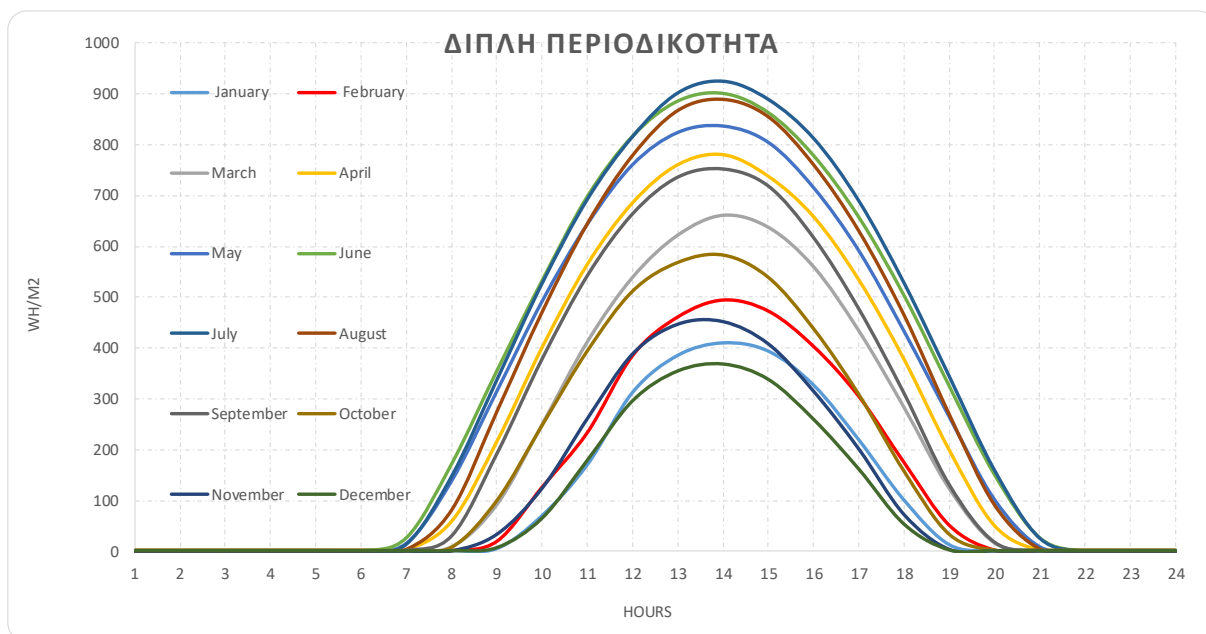
4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΚΑΙ ΩΡΙΑΙΑΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΙΘΡΙΟΤΗΤΑΣ

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία ανάλυσης και συλλογιστική πορεία όλων των χρονικών κλιμάκων

Αρχικά η ανάλυση ξεκίνησε μελετώντας την διεργασία της ακτινοβολίας σε ημερήσια κλίμακα και στην συνέχεια προχωρήσαμε σε ωριαίο επίπεδο. Οι ημερήσιες χρονοσειρές της Αθήνας χωρίστηκαν με βάση το μήνα και έτσι δημιουργήσαμε ένα σύνολο από 12 χρονοσειρές με ημερήσιο βήμα για την κάθε μια. Τον συγκεκριμένο διαχωρισμό τον πραγματοποιήσαμε, με σκοπό να αφαιρέσουμε την πρώτη εμφανή περιοδικότητα, την οποία παρατηρήσαμε και δεν είναι άλλη από την εποχικότητα. Γενικότερα αξίζει να σημειωθεί ότι, μελετώντας την διεργασία σε παγκόσμια κλίμακα και σε όλα τα επίπεδα χρονικής διακριτοποίησης της διεργασίας συμπεραίνουμε ότι, η εμφανής εποχικότητα δεν είναι παντού εξίσου έντονη. Αυτό οφείλεται σε αρκετούς παράγοντες και άλλες διεργασίες, πχ νεφοκάλυψη, που επηρεάζουν, την ηλιακή ακτινοβολία αφού εισέλθει στην ατμόσφαιρα. Στην συνέχεια σκοπός μας ήταν η εύρεση και προσαρμογή, μίας κατάλληλης περιθώριας συνάρτησης κατανομής (marginal distribution function) ικανής να περιγράψει όλο το φάσμα και των 12 μηνιαίων χρονοσειρών με ημερήσιο βήμα. Με την βοήθεια του ανοιχτού λογισμικού πακέτου στατιστικής ανάλυσης του Υδρογνώμων (hydrognomon.org), δοκιμάσαμε πληθώρα γνωστών κατανομών που αναφέρονται στην γενική βιβλιογραφία όπως (Gamma, Pareto, Lognormal, Pearson κλπ). Ορισμένες κατανομές με βάση τα κριτήρια Kolmogorov-Smirnov test και χ^2 έδειχναν ικανοποιητική προσαρμογή υστερούσαν όμως στην φυσική ερμηνεία της διεργασίας. Αυτό προκύπτει διότι, η Ηλιακή ακτινοβολία σε ετήσιο, μηνιαίο, ημερήσιο και ωριαίο επίπεδο είναι διπλά φραγμένη γνωρίζοντας πάντα την μέγιστη και ελάχιστη τιμή την οποία μπορεί να μετρηθεί σε οποιαδήποτε σημείο ενδιαφέροντος πάνω στην επιφάνεια της Γης. Αυτό συμβαίνει διότι η πηγή της διεργασίας-αιτιατικότητα δηλαδή ο Ηλιός, έχει καθορισμένο κύκλο εκπομπής ακτινοβολίας, ο οποίος μεταβάλλεται ελάχιστα κάθε 13 χρόνια. Δεδομένου όλων των παραπάνω, οποιαδήποτε κατανομή η οποία δεν είναι δεξιά φραγμένη δηλαδή $[0, \infty)$, όπως οι προηγούμενες, δεν μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά την διεργασία της ηλιακής ακτινοβολίας σε καμία χρονική κλίμακα και κρίνεται ακατάλληλη να δώσει μια φυσική

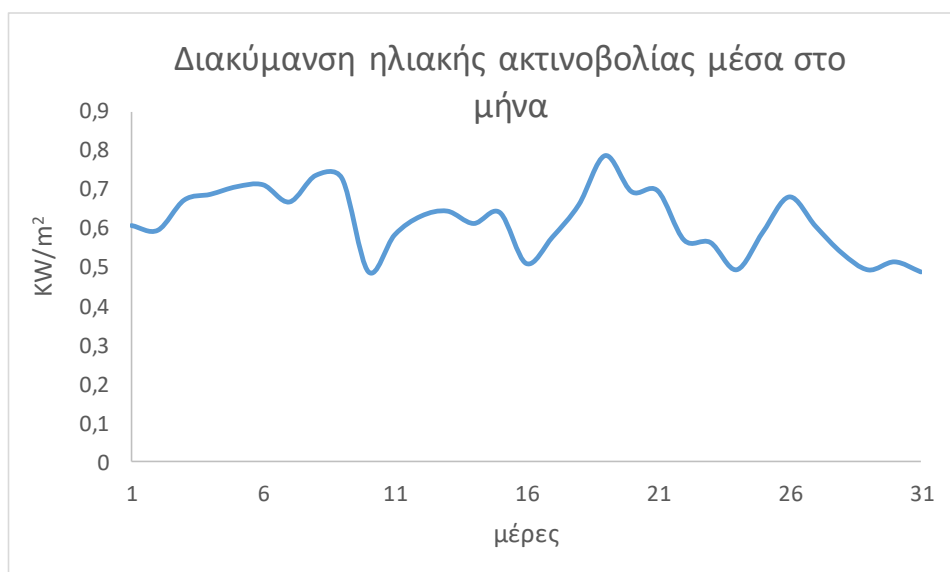
ερμηνεία. Έτσι το ενδιαφέρον και η ανάλυσή στράφηκε σε περιθώριες κατανομές με κλειστά πεδία τιμών. Στην βιβλιογραφία ο Ettoumi et al το 2003, πραγματοποίησε έρευνα για την ημερήσια και ωριαία ακτινοβολία της Αλγερίας και προσπάθησε να την αναλύσει με την περιθώρια κατανομή Beta. Εμείς λόγω της πολυπλοκότητας της κατανομής Beta (βλέπετε 4.1.2) εισαγάγαμε και χρησιμοποιούμε την περιθώρια κατανομή Kumaraswamy, η οποία ανήκει στην οικογένεια των κατανομών Beta αλλά έχει αρκετά περισσότερα πλεονεκτήματα τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

Μετά την εφαρμογή της κατανομής Kumaraswamy στο ημερήσιο επίπεδο, προχωρήσαμε την ανάλυσή σε ωριαία κλίμακα. Επιλέγουμε να διαχωρίσουμε την εκάστοτε χρονοσειρά σε 12×24 , δηλαδή 12 μήνες εκ των οποίων ο κάθε μήνας αναλύεται σε 24 ώρες σύνολο δηλαδή 288 χρονοσειρές. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι ανάλογα με το σημείο μελέτης, άλλοτε περισσότερες και άλλοτε λιγότερες χρονοσειρές προκύπτουν μηδέν. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την διάρκεια της νύχτας είναι αδύνατο να μετρηθεί στην Γη η διεργασία και επομένως δεν υπάρχει κάποιο φυσικό νόημα για να εφαρμόσουμε την περιθώρια κατανομή. Για παράδειγμα για την Αθήνα περίπου 120 χρονοσειρές είναι μηδενικές. Ο διαχωρισμός σε 12×24 κρίνεται αναγκαίος διότι παρατηρείται διπλή περιοδικότητα δηλαδή ημερήσια και εποχιακή διακύμανση της διεργασίας για την ώρα για τον εκάστοτε μήνα και όχι απλά εποχικότητα όπως στο ημερήσιο επίπεδο (βλέπετε διάγραμμα 4.1).



Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα διπλής περιοδικότητας για την χρονοσειρά από τον σταθμό της Ψυττάλειας

Βέβαια θα μπορούσαμε να προχωρήσουμε σε πιο ακριβή ανάλυση και να πραγματοποιήσουμε την διαδικασία προσαρμογής της περιθώριας κατανομής σε χρονοσειρές που θα προέκυπταν από διαχωρισμό 31×24 (μέρες και ώρες). Όμως όπως παρατηρείται από το παρακάτω διάγραμμα 4.2 διαπιστώνεται, ότι σε επίπεδο μήνα η αντίστοιχη ωριαία χρονοσειρά της διεργασίας, δεν έχει τεράστιες και σημαντικές διακυμάνσεις, για αυτό και συνεχίσαμε όλες τις αναλύσεις του ωριαίου βήματος, σε μηνιαίο επίπεδο και όχι ημερήσιο.



Διάγραμμα 4.2 Ημερήσια διακύμανση της ωριαίας ακτινοβολίας για την δέκατη ώρα του Αυγούστου της χρονοσειράς από τον σταθμό της Ψυττάλειας

Προσοχή !

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο, με τον διαχωρισμό που πραγματοποιούμε δεν συμπεριλαμβάνουμε την εποχικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας στην ανάλυσή, παρατηρούμε, ότι εμφανίζονται και άλλες διεργασίες που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα και δεν ακολουθούν την αντίστοιχη εποχικότητα και οι οποίες επηρεάζουν έντονα την διεργασία της ηλιακής ακτινοβολίας. Διαπιστώνεται από την βιβλιογραφία ότι η κυριότερη από αυτές είναι η νέφωση. Λόγω των παραπάνω υιοθετούμε την χρήση του συντελεστή αιθριότητας K_T . Με την δημιουργία του κλάσματος του συντελεστή αιθριότητας, πρακτικά προσεγγιστικά αφαιρούμε την εποχικότητα της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας και αδιαστασιοποιούμε την μεταβλητή μας σε $[0,1]$. Όμως λόγω της στοχαστικής διεργασίας της νέφωσης η οποία παρουσιάζει επίσης περιοδικότητα όπου εξαρτάται από τις υπόλοιπες διεργασίες (πχ το σημείο δρόσου, θερμοκρασίας) οι οποίες λαμβάνουν χώρα και πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα αλλά και του πάχους της ατμόσφαιρας (air mass), επιλέγουμε προς αποφυγή της περιοδικότητας, να πραγματοποιήσουμε την ωριαία ανάλυση του συντελεστή αιθριότητας με τον διαχωρισμό 12×24 . Επιπλέον γενικεύουμε την μεταβλητή σε παγκόσμια κλίμακα και λαμβάνουμε υπόψη, ένα μεγάλο μέρος των διεργασιών που επηρεάζουν την ηλιακή ακτινοβολία. Τέλος δεδομένου, ότι η εξωτερική ακτινοβολία ακολουθεί την ντετερμινιστική σχέση (11) μπορούμε εύκολα και αναλυτικά να σχηματίζουμε το γινόμενο του συντελεστή αιθριότητας επί της εξωτερικής ακτινοβολίας και να υπολογίζουμε την ωριαία ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης, η οποία είναι προσπίπτουσα σε οριζόντιο επίπεδο.

Έτσι συνεχίζουμε την ανάλυσή πλέον του Ημερήσιου συντελεστή K_T για επτά μεγάλες πρωτεύουσες σε όλο τον κόσμο, προκειμένου να ελέγξουμε την επίδραση των λοιπών διεργασιών που επηρεάζουν τον συντελεστή.

Τέλος πραγματοποιείται πλέον η ανάλυση του ωριαίου συντελεστή K_T για τους σταθμούς της Αθήνα και τους 40 σταθμούς της βάσης NRLE- NSRDB, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία

όμοια με την ανάλυση της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον υπολογίζουμε τις ετεροσυσχετίσεις μεταξύ διαδοχικών ωρών καθώς και τον υπολογισμό της παραμέτρου Hurst για την διεργασία.

Στις παρακάτω ενότητες παραθέτουμε και αναλύουμε όλα τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την διαδικασία προσαρμογής της περιθώριας κατανομής σε όλα τα επίπεδα μελέτης της ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης εισάγουμε μια νέα σύνθετη κατανομή για περιγραφή του ωριαίου συντελεστή K_T . Τέλος υπολογίζουμε αναλυτικά την στοχαστική δομή της διεργασίας.

4.1.1 Η κατανομή Beta

Η κατανομή Beta είναι δημοφιλής κατανομή, της οικογένειας συνεχόμενων κατανομών πιθανότητας που ορίζονται στο διάστημα $[0, 1]$. Διαθέτει δύο παραμέτρους θετικού σχήματος, συμβολισμένες με a και β , που εμφανίζονται σαν εκθέτες της τυχαίας μεταβλητής και ελέγχουν το σχήμα της διανομής. Η κατανομή λόγω του πεδίου ορισμού της έχει χρησιμοποιηθεί στην μοντελοποίηση συμπεριφοράς πληθώρας τυχαίων διεργασιών που ορίζονται στο $[0, 1]$. Παραθέτουμε αναλυτικούς τύπους της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Pdf) και της συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας (Cdf).

Beta Cumulative density function:

$$F(z; a, b) = \frac{B(z; a, b)}{B(a, b)} \quad (13)$$

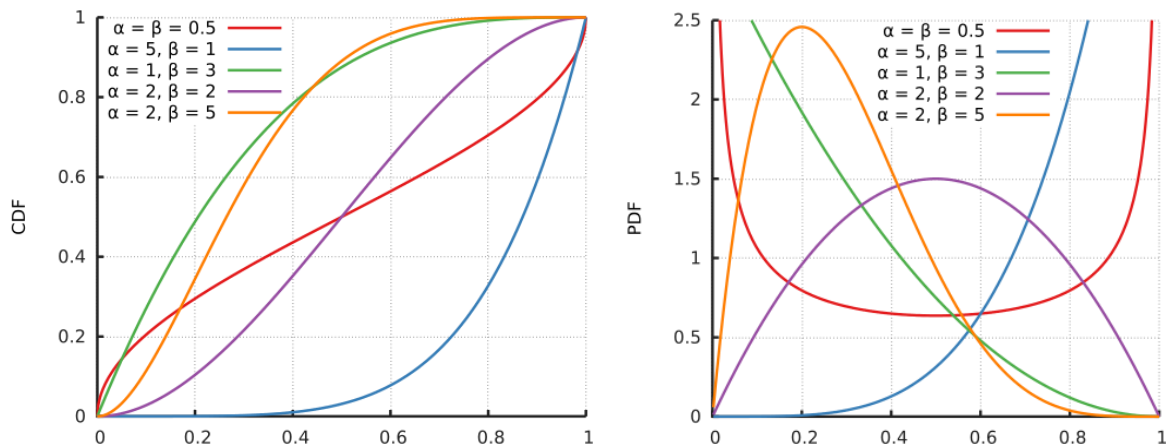
Όπου $B(z; a, b)$ είναι η incomplete Beta function $B(z; a, b) = \int_0^z t^{a-1}(1-t)^{b-1} dt$ και η $B(a, b)$ είναι η Beta function $B(a, b) = \int_0^1 t^{a-1}(1-t)^{b-1} dt$

Beta Propability density function:

$$f(z; a, b) = \frac{1}{B(a, b)} x^{(a-1)}(1-x)^{(b-1)} \quad (14)$$

Όμοια με πριν η $B(a,b)$ είναι η Beta function.

Επίσης τα πιθανά σχήματα που μπορεί να λάβει η Cdf και η Pdf ανάλογα με τις τιμές των συντελεστών a, b



Σχήμα 4.1 Μορφές Cdf, Pdf της κατανομής Beta για διαφορετικές παραμέτρους a,b

4.1.2 Η κατανομή Kumaraswamy

Η κατανομή Kumaraswamy είναι αρκετά ποιο καινούργια σε σχέση, με την Beta αλλά ανήκει στην ίδια οικογένεια κατανομών και το πεδίο ορισμού της είναι [0, 1] . Χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην μοντελοποίηση υδρολογικών διεργασιών και πλέον χρησιμοποιείται και σε υπόλοιπες φυσικές διεργασίες. Παραθέτουμε τους αναλυτικούς τύπους της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (Pdf) και της συνάρτησης αθροιστικής πιθανότητας (Cdf).

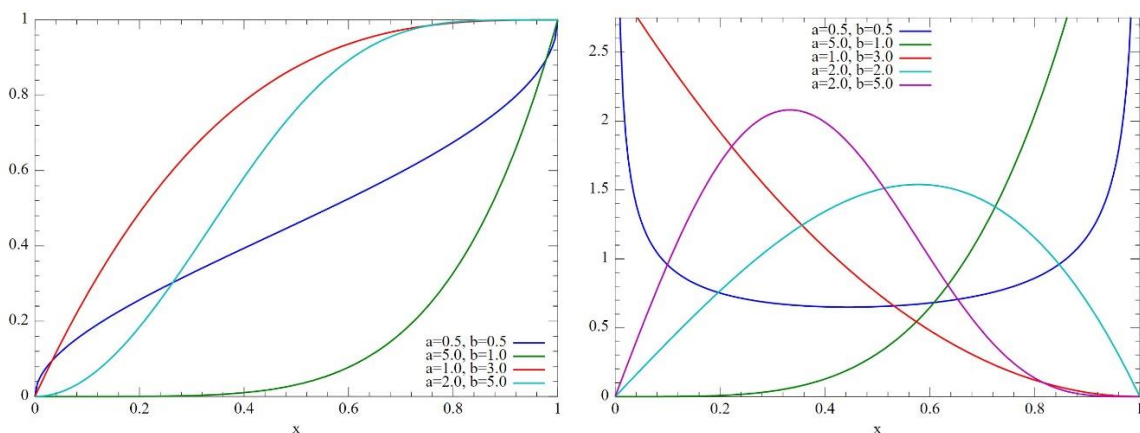
Όπου η Cumulative density function δίνεται από τον τύπο:

$$F(x; a, b) = \int_0^x f(\xi; a, b)d\xi = 1 - (1 - z^a)^b \tag{15}$$

Επίσης η Probability density function υπολογίζεται από τον τύπο :

$$f(x; a, b) = abx^{(a-1)}(1 - z^a)^{b-1} \tag{16}$$

Όπου $z \in [0,1]$ το οποίο προκύπτει ύστερα από τυποποίηση σύμφωνα με $z = \frac{z - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}$ με z_{min} και z_{max} είναι η ελάχιστη και μέγιστη τιμή της εμπειρικής χρονοσειράς.



Σχήμα 4.2 Μορφές Cdf, Pdf της κατανομής Kumaraswamy για διαφορετικές παραμέτρους a,b

4.1.3 Σύγκριση Kumaraswamy με Beta και επιλογή κατανομής

Παρατηρώντας τις ιδιότητες της Kumaraswamy και ειδικότερα την σχέση (15), δηλαδή την συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας παρατηρούμε ότι ο τύπος μπορεί εύκολα να αντιστραφεί και να επιλυθεί ως προς την μεταβλητή x . Έτσι προκύπτει η quantile function της κατανομής (βλέπετε τύπο 17). Αυτή η ιδιότητα της κατανομής την καθιστά ίσως μοναδική στην οικογένεια περιθωρίων κατανομών αντιστροφής στο διάστημα $[0,1]$, τόσο απλά ορισμένης χωρίς πεπλεγμένες σχέσεις με μεγάλη ποικιλία σχημάτων κατανομής που βοηθούν στην ακριβέστατη περιγραφή πολλών φυσικών διεργασιών.

$$Q(y) = F^{-1}(y) = \{1 - (1 - y)^{1/a}\}^{1/b} \quad (17)$$

Η παραπάνω ιδιότητα είναι απαραίτητη και διευκολύνει την μοντελοποίηση και προσομοίωση των φυσικών διεργασιών δεδομένου ότι δεν απαιτούνται εξελιγμένες αριθμητικές μεθόδους αντιστροφής κατανομών οι οποίες επιβαρύνουν το υπολογιστικό χρόνο.

Συμπερασματικά και για λόγους πληρότητας θα πρέπει να τονίσουμε και το μειονέκτημα της Kumaraswamy έναντι της Beta κατανομής, το οποίο είναι η δύσκολη εκτίμηση των κεντρικών ροπών της αυτής. Πιο συγκεκριμένα (βλέπετε στους τύπους 18,19), η μέση τιμή και τυπική απόκλιση εμπεριέχουν την συνάρτηση Beta

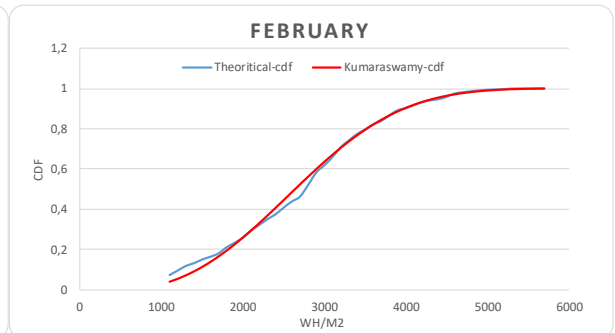
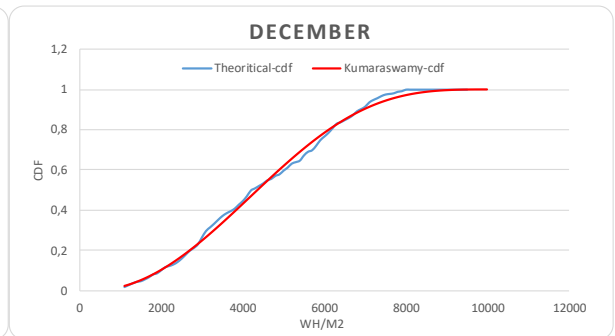
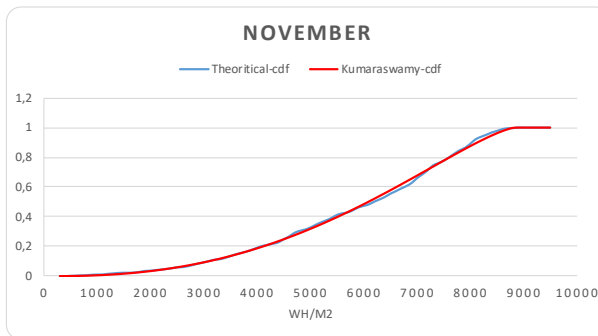
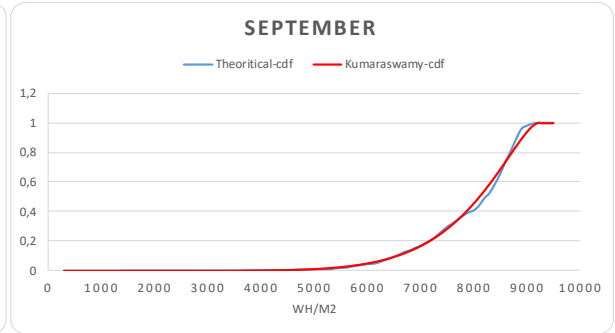
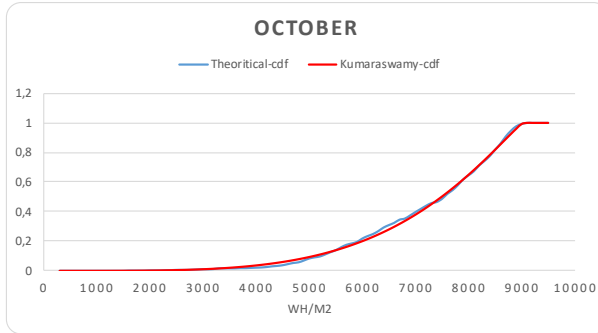
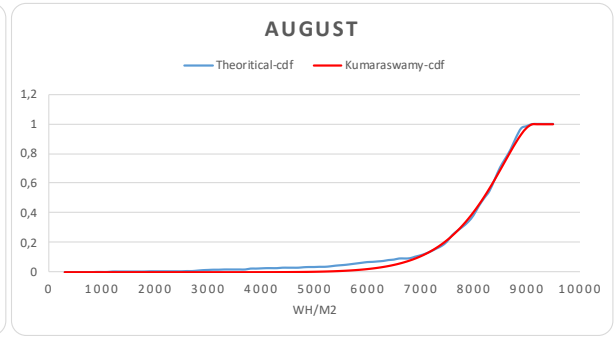
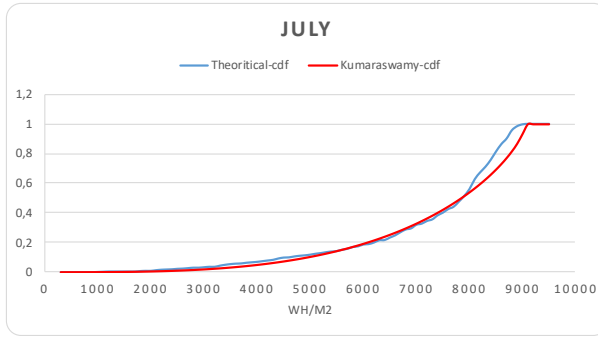
$$E(x) = \mu = \mu'_1(x) = \alpha B\left(1 + \frac{1}{\alpha}, b\right) \quad (18)$$

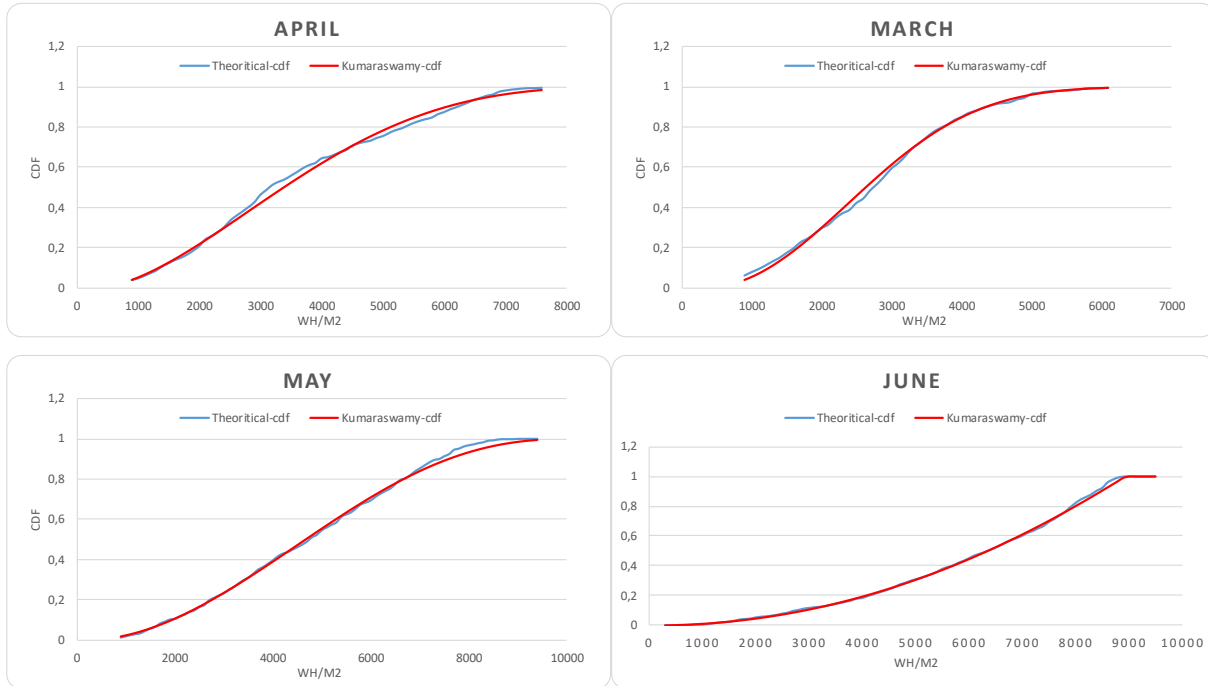
$$Var(x) = \mu_2 = \mu'_2(x) - \mu^2 = \alpha B\left(1 + \frac{1}{\alpha}, b\right) - \left[\alpha B\left(1 + \frac{1}{\alpha}, b\right)\right]^2 \quad (17)$$

Τέλος η κατανομή Kumaraswamy όντως προσφέρει μια εναλλακτική επιλογή σε σχέση με την κατανομή Beta, παρόλα αυτά σε καμία περίπτωση δεν μπορούμε να εισάγουμε ότι η μία κατανομή είναι ανώτερη της άλλης. Η κάθε μία έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της και στην συγκεκριμένη εργασία οι ιδιότητες της Kumaraswamy μας επιτρέπουν, να διευκολύνουμε τον τρόπο ανάλυσής μας και να μειώσουμε το υπολογιστικό κόστος λόγω της εύκολης αντιστροφής της η οποία βοηθάει στην διαδικασία προσομοίωσης και μοντελοποίησης.

4.2 Ημερήσια ανάλυση ηλιακής ακτινοβολίας

Αρχικά ξεκινήσαμε με περιοχή μελέτης την Αστυπάλαια και διευρύνουμε την μελέτη μας στην Αθήνα. Αφού χωρίσαμε τις χρονοσειρές μας σε μηνιαίο βήμα για αποφυγή της εποχικότητας, προσπαθήσαμε να εφαρμόσουμε την Kumaraswamy κατανομή, σε όλες τις εμπειρικές κατανομές που προέκυψαν από τον διαχωρισμό. Έτσι παραθέτουμε ενδεικτικά τα παρακάτω διαγράμματα προσαρμογής:





Διάγραμμα 4.3 Διαγράμματα προσαρμογής της κατανομής Kumaraswamy στην εμπειρική κατανομή για τον σταθμό της Αστυπάλαιας σε ημερήσια χρονική κλίμακα με μηνιαίο βήμα.

Παρατηρούμαι ότι η κατανομή, εφαρμόζει με αρκετή ακρίβεια πάνω στην εμπειρική κατανομή, όμως σε ορισμένους μήνες κυρίως τους καλοκαιρινούς, παρατηρείται ένα απότομο σπάσιμο στις ουρές της εμπειρικής κατανομής, το οποίο δεν μπορεί να περιγραφεί επαρκώς με την κατανομή Kumaraswamy.

Για τον παραπάνω λόγο προκειμένου να διερευνήσουμε εάν η Kumaraswamy περιγράφει επαρκώς την εμπειρική κατανομή της ημερήσιας αθροιστικής ακτινοβολίας, εφαρμόσαμε τρία test ελέγχου καλής προσαρμογής (goodness of fit test) και ένα κριτήριο επιλογής κατανομής (model selection criterion) προκειμένου να ελέγξουμε εάν η κατανομή Beta υπερισχύει της Kumaraswamy στην περιγραφή της εμπειρικής κατανομής.

4.2.1 Δοκιμή προσαρμογής και κριτήριο επιλογής μοντέλου για την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία.

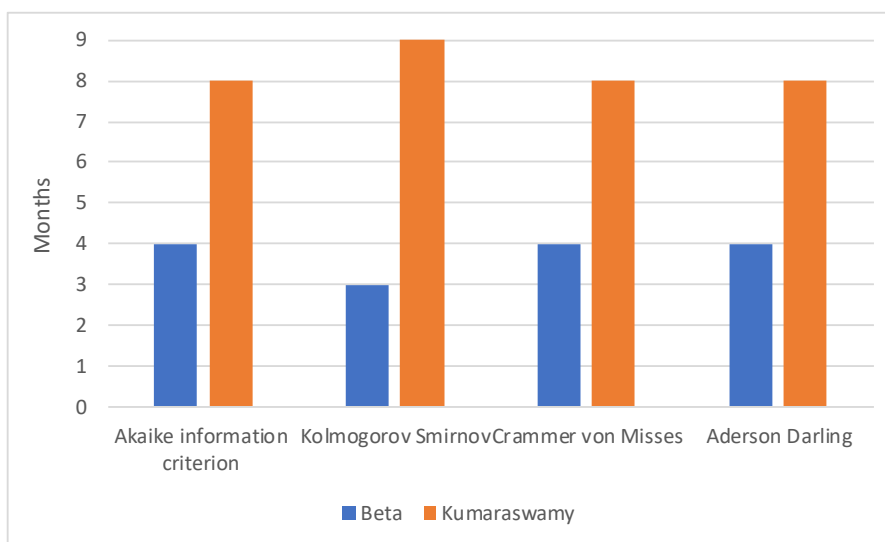
Εφαρμόζουμε το κριτήριο επιλογής μοντέλου AIC, (Akaike information criterion) το οποίο σχετίζεται με τούς αριθμούς των παραμέτρων των εκάστοτε κατανομών λαμβάνοντας υπόψη τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της λογαριθμικής συνάρτησης της πιθανοφάνειας (log-likelihood value). Όμως, αφού και οι δύο περιθώριες κατανομές έχουν δύο παραμέτρους, συμπεραίνουμε ότι το κριτήριο επιλέγει την βέλτιστη κατανομή μόνο με βάση τα αποτελέσματα της συνάρτησης πιθανοφάνειας. Στην συνέχεια εφαρμόσαμε τα τρία test καλής προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov, Cramer von Misses and the Anderson Darling tests. Όλες οι παραπάνω διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν στο υπολογιστικό περιβάλλον της R.

Συμπερασματικά προκύπτει ύστερα από την εφαρμογή του AIC για την ηλιακή ακτινοβολία σε μηνιαία κλίμακα, χρησιμοποιώντας χρονοσειρές ημερήσιου βήματος, ότι η Kumaraswamy κατανομή κρίνεται καταλληλότερη από την κατανομή Beta. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο κριτήριο δεν μας δίνει καμία πληροφορία για την προσαρμογή των

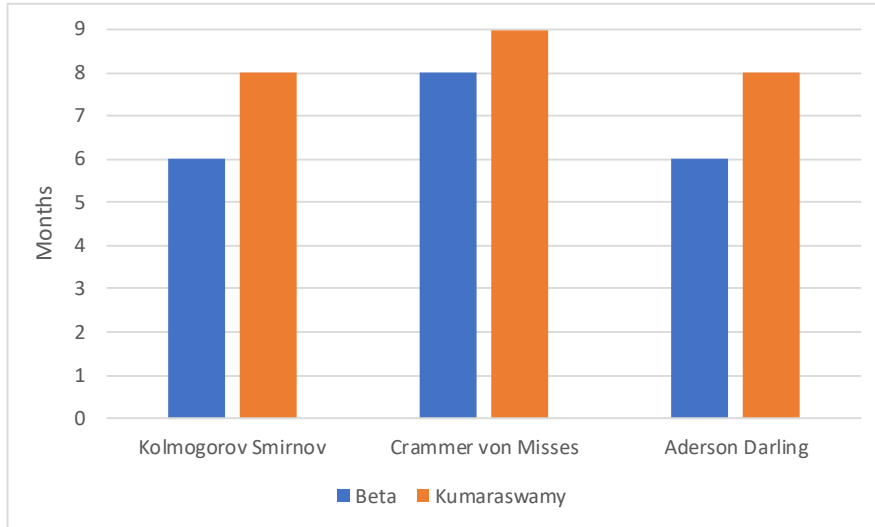
υποψήφιων μοντέλων στην εμπειρική κατανομή. Υιοθετώντας τον ισχυρισμό, ότι συγκρίνοντας τις τιμές του AIC, η οποιαδήποτε διαφορά της τάξεως των δύο μονάδων, μας δείχνει εξίσου από κοινού καταλληλόλητα χρήσης των μοντέλων, προκύπτει ότι για τους 9 μήνες του χρόνου η κατανομή Kumaraswamy υπερिशχει της Beta και για τους μήνες Απρίλιος, Μάιος και Δεκέμβριος και οι δύο κρίνονται κατάλληλες. (βλέπετε διάγραμμα 4.4)

Για τα test καλής προσαρμογής θέσαμε το επίπεδο εμπιστοσύνης στο 5%. Σύμφωνα με τα Kolmogorov-Smirnov test, Crammer von Misses and the Anderson & Darling test η Kumaraswamy κατανομή απορρίπτεται σε λιγότερους μήνες σε σχέση με την Beta κατανομή. Πάρα ταύτα όλα τα test υπόθεσης απόρριψαν και τις δύο κατανομές για τους καλοκαιρινούς μήνες (βλέπετε διαγράμματα 4.3 διαφορά προσαρμογής Νοεμβρίου και Αυγούστου). Επίσης τα παραπάνω test προσαρμογής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν κριτήρια επιλογής μοντέλου όπως το AIC, συγκρίνοντας τις αντίστοιχες P-values (τιμές στατιστικής σημαντικότητας). Η στατιστική σημαντικότητα (P-values) ενός αποτελέσματος, αντιπροσωπεύει την πιθανότητα του λάθους που περιλαμβάνεται στην αποδοχή του παρατηρηθέντος αποτελέσματός μας, τόσο έγκυρου όσο "η αντιπροσώπευση του πληθυσμού". Παραδείγματος χάριν, μια p-value του 0.05 (δηλ., 1/20), δείχνει ότι υπάρχει μια πιθανότητα 5% ότι η σχέση μεταξύ των μεταβλητών που βρίσκονται στο δείγμα μας να είναι "ψευδής". Με άλλα λόγια, υποθέτοντας ότι στον πληθυσμό δεν υπήρξε καμία σχέση μεταξύ εκείνων των μεταβλητών και επαναλαμβάνοντας τα πειράματα θα μπορούσαμε να αναμείνουμε ότι περίπου σε κάθε 20 επαναλήψεις θα υπήρχε ένα πείραμα στον οποίο η σχέση μεταξύ των εν λόγω μεταβλητών θα ήταν ίση ή ισχυρότερη απ'ό,τι στους δικούς μας υπολογισμούς.

Πρακτικά όσο πιο μικρή είναι η τιμή της στατιστικής σημαντικότητας τόσο καλύτερη προσαρμογή έχει η κατανομή μας. Συγκεντρωτικά φαίνονται όλα τα παραπάνω συμπεράσματα στα παρακάτω διαγράμματα.



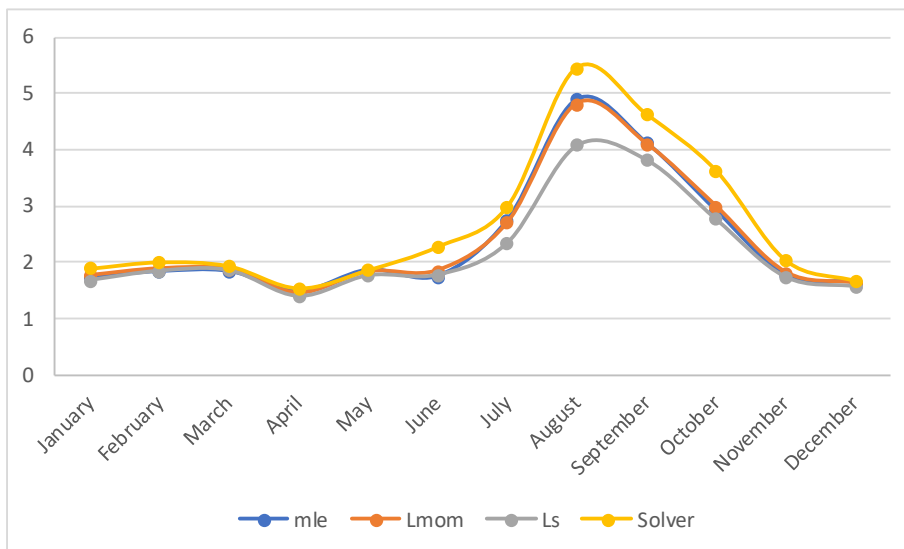
Διάγραμμα 4.4 Επιλογή μοντέλου για περιθώρια συνάρτηση με σκοπό την περιγραφή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε μηνιαίο επίπεδο σύμφωνα με τα AIC, KS, CvM και AD test



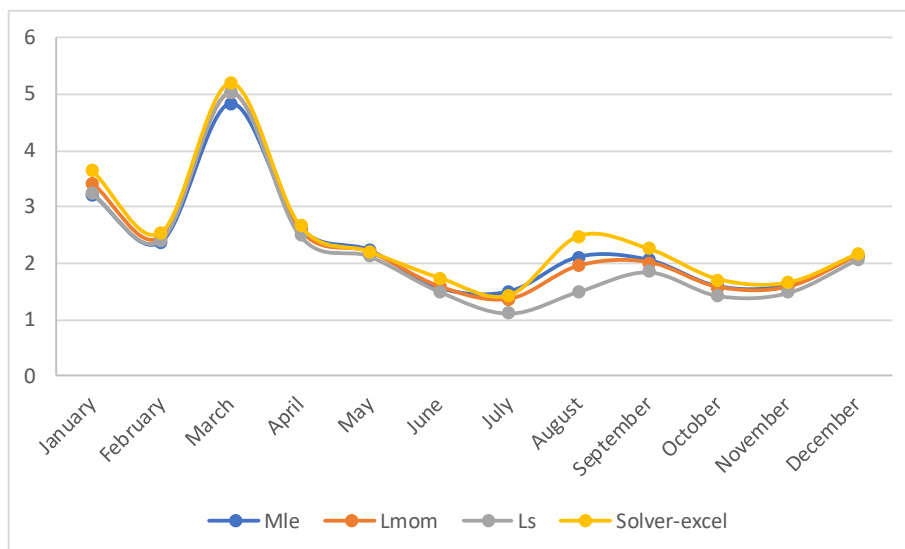
Διάγραμμα 4.5 Αποτελέσματα από τα test καλής προσαρμογής κατανομής για την περιγραφή της ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε μηνιαίο επίπεδο.

4.2.2 Υπολογισμός παραμέτρων κατανομής Kumaraswamy για την ημερήσια ακτινοβολία

Για να υπολογίσουμε τις τιμές των παραμέτρων της κατανομής εφαρμόσαμε 4 μεθόδους οι οποίες μας έδωσαν σχετικά πολύ κοντινές τιμές. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήσαμε είναι της μέγιστης πιθανοφάνειας, των ελαχίστων τετραγώνων, των 1 moments και τέλος τον solver του excel. Παραθέτουμε συνοπτικά τα αποτελέσματα στα παρακάτω δυο διαγράμματα.



Διάγραμμα 4.6 Διάγραμμα των παραμέτρων a της κατανομής Kumaraswamy με τέσσερις διαφορετικές μεθόδους.

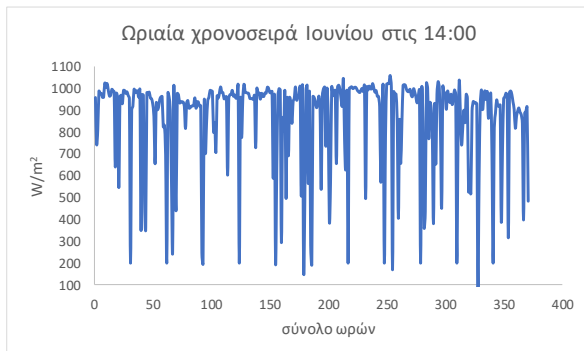


Διάγραμμα 4.7 Διάγραμμα των παραμέτρων b της κατανομής Kumaraswamy με τέσσερις διαφορετικές μεθόδους.

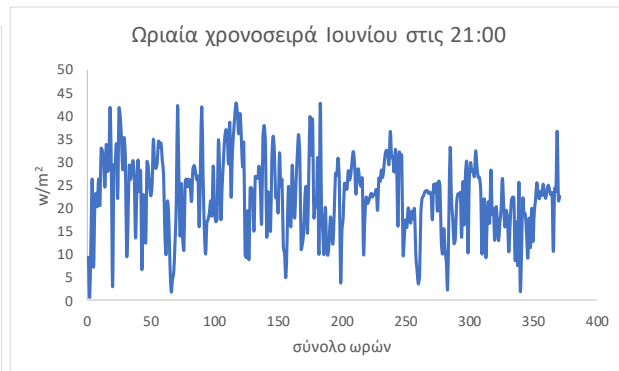
4.3 Ωριαία ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας

Όπως αναφέραμε και στην αρχή της ενότητας, αναλύουμε την εκάστοτε χρονοσειρά για τους σταθμούς της Αθήνας σε 12×24 (μήνες και ώρες), με σκοπό την αποφυγή της διπλής περιοδικότητας η οποία παρατηρείται (βλέπετε διάγραμμα 4.1). Ύστερα, σε κάθε μία από τις 288 χρονοσειρές που προκύπτουν (πλην των μηδενικών χρονοσειρών λόγω απώλειας ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια της νύχτας) εφαρμόσαμε, την κατανομή Kumaraswamy με σκοπό να ελέγξουμε την προσαρμογή της σε σχέση με την εκάστοτε εμπειρική κατανομή. Όμοια με την παράγραφο 4.2.1 χρησιμοποιήσαμε τα τρία test καλής υπόθεσης για να ελέγξουμε την προσαρμογή των δύο περιθωρίων κατανομών. Όμως παρατηρήσαμε, ότι και οι δυο κατανομές τόσο η Beta όσο και η Kumaraswamy απορρίπτονταν από και τα τρία test, σε περίπου 40 από τις 170 χρονοσειρές, κυρίως κατά την διάρκεια των μεσημεριανών ωρών (τα αποτελέσματα αφορούν τον σταθμό της Ψυττάλειας στην Αθήνα). Αυτός μας οδήγησε στο να αναζητήσουμε τους πιθανούς παράγοντες που επηρεάζουν την διεργασία σε ωριαία κλίμακα. Παρόλο που με τον μετασχηματισμό αποφύγαμε την διπλή περιοδικότητα, υπάρχουν και άλλες διεργασίες που επηρεάζουν την ηλιακή ακτινοβολία, το οποίο δεν ήταν τόσο εμφανές στην ημερήσια ανάλυση δεδομένου ότι η ημερήσια τιμή προκύπτει από μέση τιμή της ωριαίας ή αθροιστικά της ωριαίας ακτινοβολίας, στο εκάστοτε σημείο ενδιαφέροντος στην επιφάνεια της Γης. Γνωρίζοντας ήδη από την βιβλιογραφία, ότι η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζεται κυρίως από την νέφωση αλλά και από τις υπόλοιπες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα, κρίθηκε αναγκαίο η εύρεση ενός τρόπου απομάκρυνσης όλων των θορύβων από τα δεδομένα μας. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται στα επόμενα διαγράμματα η επίδραση της νέφωσης στην ωριαία κλίμακα.

α



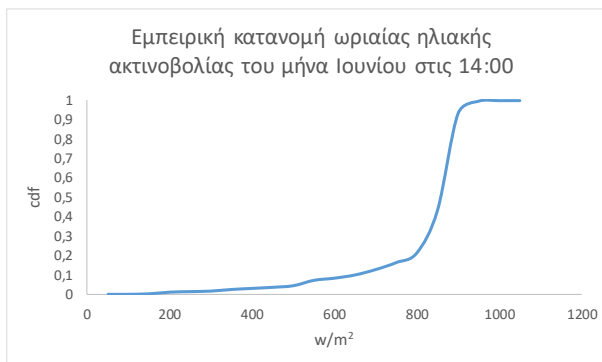
β



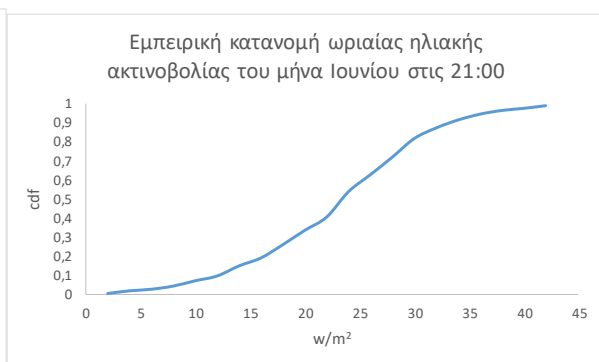
Διάγραμμα 4.8 Διαγράμματα (α,β) ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας με σκοπό τον εντοπισμό της νέφωσης

Προκύπτει συμπερασματικά ότι, τις ώρες όπου παρατηρούνται υψηλές τιμές ακτινοβολίας, η εμφάνιση νέφωσης επηρεάζει σε σημαντικότατο βαθμό την διεργασία. Για παράδειγμα στο διάγραμμα (α) κατά την διάρκεια των θερινών μηνών τις μεσημεριανές ώρες πιθανή εμφάνιση νέφωσης μπορεί να μειώσει απότομα την τιμή από 1000 w/m^2 σε 200 w/m^2 . Ενώ αντίστοιχα στο διάγραμμα (β) τις βραδινές ώρες, λόγω της χαμηλής εκπομπής ακτινοβολίας, η εμφάνιση νέφωσης δεν επηρεάζει στον ίδιο βαθμό. Επομένως κατά την δημιουργία της εμπειρικής κατανομής παρατηρούμε, ότι εμφανίζονται δύο κοίλα (βλέπετε τα επόμενα διαγράμματα 4.10 α,β) τα οποία καθιστούν αδύνατο την προσαρμογή οποιασδήποτε μονής κατανομής. Με όλα τα παραπάνω δεδομένα η μελέτη στράφηκε προς διαφορετική κατεύθυνση στην προσπάθεια εύρεσης μίας νέα κατάλληλης κατανομής και κάνοντας πλέον χρήση και του συντελεστή αιθριότητας K_T όπως αναφέραμε αρχικά (βλέπετε παράγραφο 4.1).

α



β

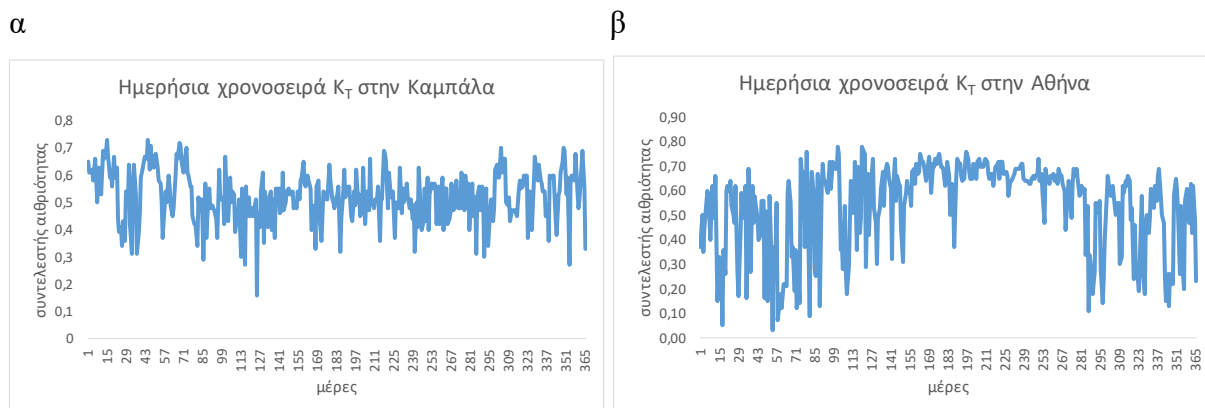


Διάγραμμα 4.9 Διαγράμματα εμπειρικής κατανομής ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας

4.4 Ημερήσια ανάλυση συντελεστή αιθριότητας K_T σε ετήσια κλίμακα.

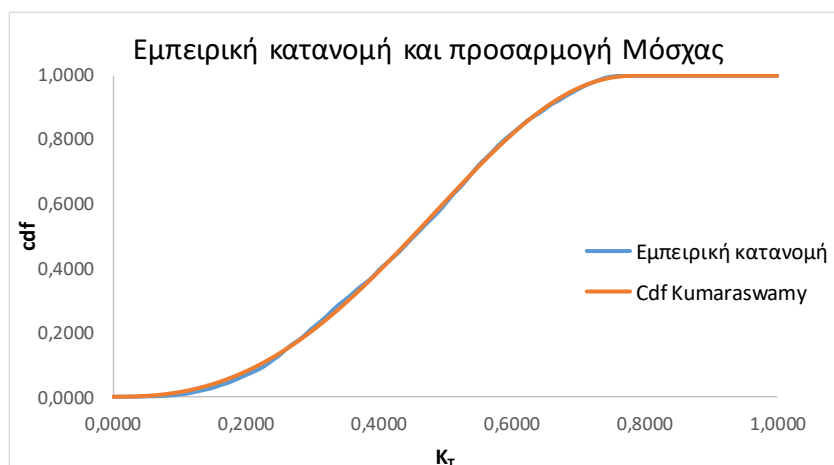
Με την χρήση του συντελεστή αιθριότητας επιτυγχάνουμε την αδιαστασιοποίηση της διεργασίας. Πλέον οι τιμές της κυμαίνονται από $[0,1]$ και ισχύει, για το σημείο ενδιαφέροντος μας πάνω στην επιφάνεια της Γης, το οποίο ορίζεται από τις εκάστοτε συντεταγμένες. Όταν ο συντελεστής $K_T \rightarrow 1$ η ατμόσφαιρα παρουσιάζεται διαμπερής ενώ αντίστοιχα όταν ο συντελεστής $K_T \rightarrow 0$ η ατμόσφαιρα εμφανίζει έντονη νέφωση.

Ενδεικτικά αναλύσαμε τις χρονοσειρές του ημερήσιου συντελεστή αιθριότητας σε ετήσια κλίμακα για επτά μεγάλες πρωτεύουσες που παρουσιάζουν διαφορετική εποχικότητα για να ελέγξουμε την επίδραση της ατμόσφαιρας. Παρατηρούμε από τα επόμενα διαγράμματα άμεσα την επίδραση της νέφωσης.

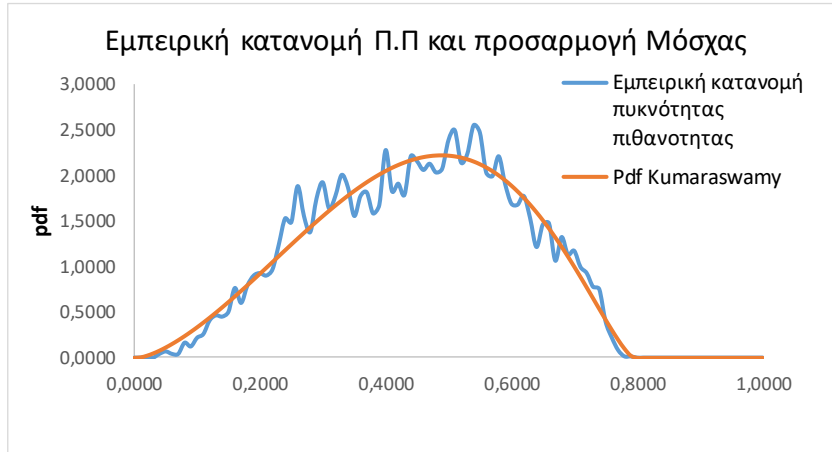


Διάγραμμα 4.10 Ενδεικτικές ημερήσιες χρονοσειρές K_T για Αθήνα και Καμπάλα

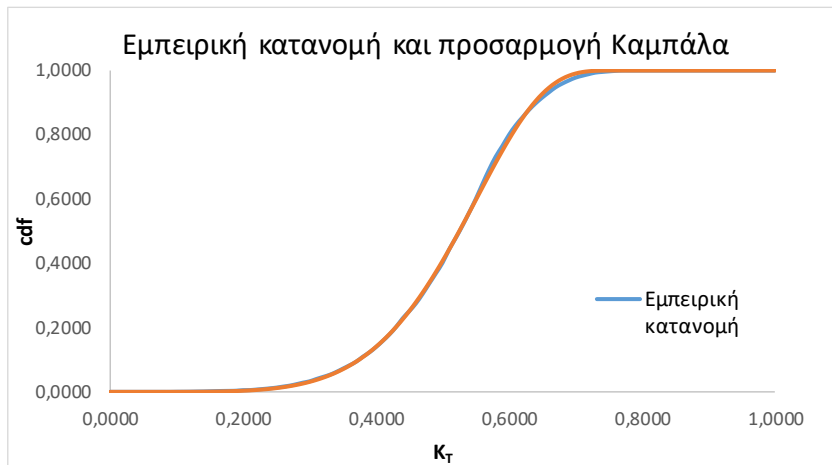
Όμοια με τις προηγούμενες ενότητες χρησιμοποιήσαμε την κατανομή της Kumaraswamy για να περιγράψουμε την στοχαστική φύση της διεργασίας. Παρατηρούμε, ότι η κατανομή στις περιοχές όπου η νέφωση δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις όπως για παράδειγμα στα σημεία ενδιαφέροντος κοντά στον ισημερινό ή στην ανταρκτική η Kumaraswamy, εμφανίζει πολύ καλή προσαρμογή στην αντίστοιχη εμπειρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας. Αντίθετα στις περιοχές όπως η Αθήνα όπου η νέφωση, παρουσιάζει σποραδικές διακυμάνσεις, η Kumaraswamy δεν προσαρμόζεται πάνω στην εμπειρική κατανομή. Παραθέτουμε αναλυτικά τα παρακάτω διαγράμματα σύγκρισης.



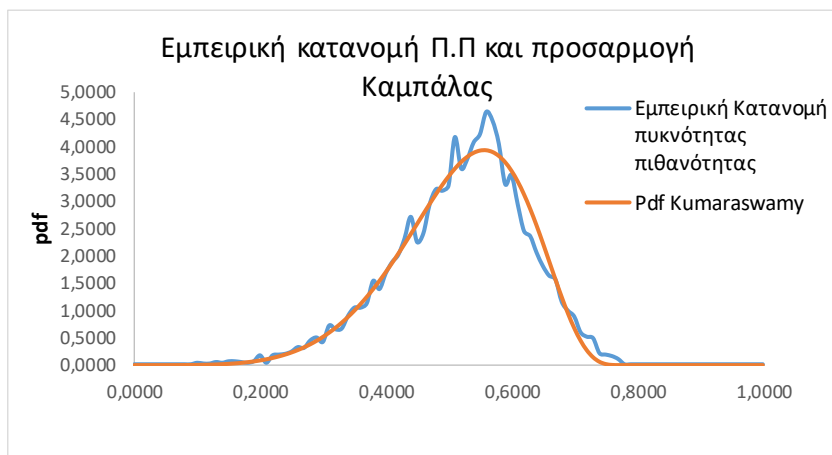
Διάγραμμα 4.11 Εμπειρική κατανομή ημερήσιου K_T σε ετήσια χρονική κλίμακα και Cdf Kumaraswamy για σταθμό Μόσχας



Διάγραμμα 4.12 Εμπειρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας ημερήσιου σε ετήσια χρονική κλίμακα K_T και Pdf Kumaraswamy για σταθμό Μόσχας

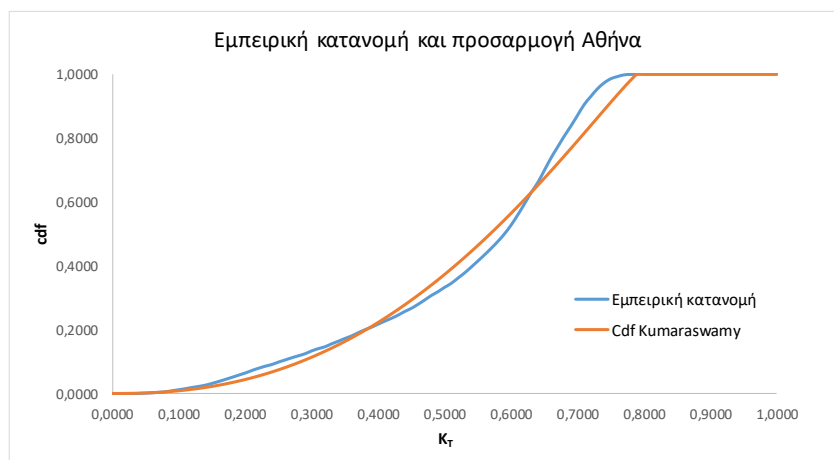


Διάγραμμα 4.13 Εμπειρική κατανομή ημερήσιου K_T σε ετήσια χρονική κλίμακα και Cdf Kumaraswamy για σταθμό Καμπάλας

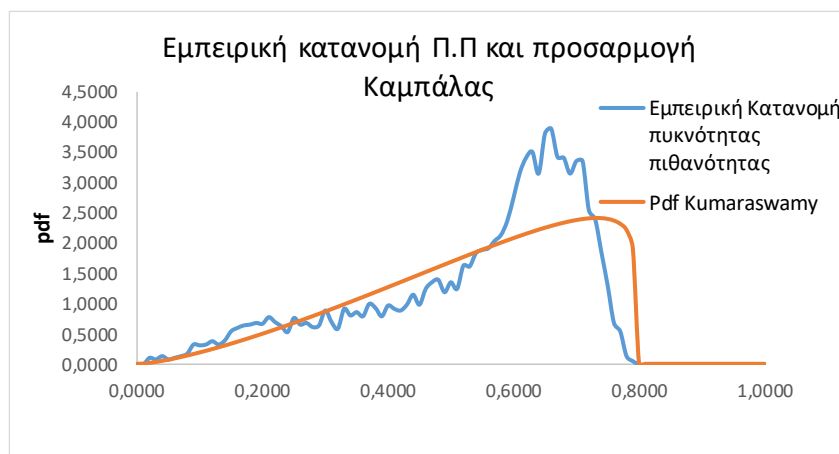


Διάγραμμα 4.14 Εμπειρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας ημερήσιου σε ετήσια χρονική κλίμακα K_T και Pdf Kumaraswamy για σταθμό Καμπάλας

Σε αντίθεση με τα επόμενα διαγράμματα που αφορούν την ημερήσια χρονοσειρά K_T σε ετήσια κλίμακα για την Αθήνα, όπου παρατηρείται έντονα η αδυναμία της κατανομής Kumaraswamy για καλή προσαρμογή στην εμπειρική κατανομή.



Διάγραμμα 4.15 Εμπειρική κατανομή ημερήσιου K_T σε ετήσια χρονική κλίμακα και Cdf Kumaraswamy για σταθμό Αθήνας

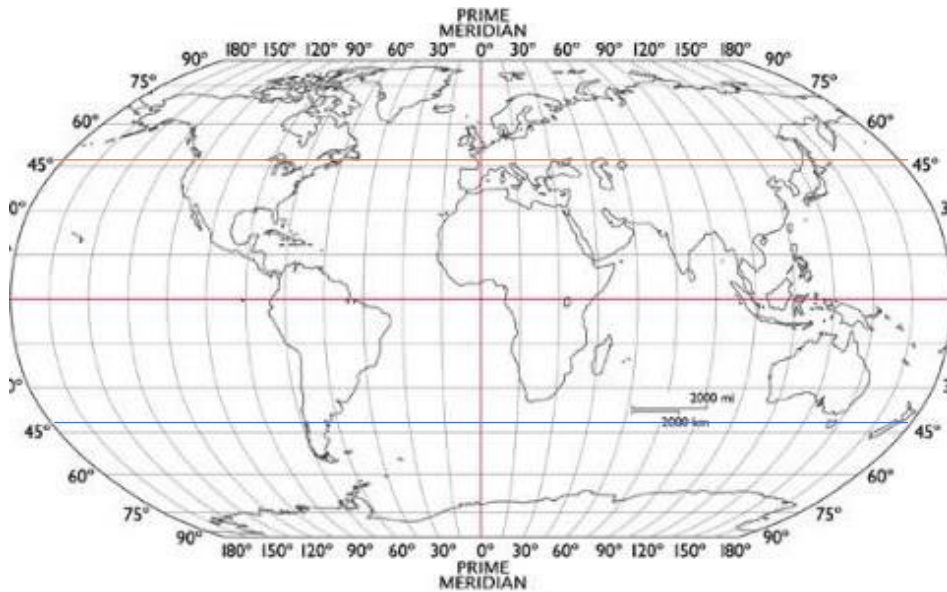


Διάγραμμα 4.16 Εμπειρική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας ημερήσιου σε ετήσια χρονική κλίμακα K_T και Pdf Kumaraswamy για σταθμό Αθήνας

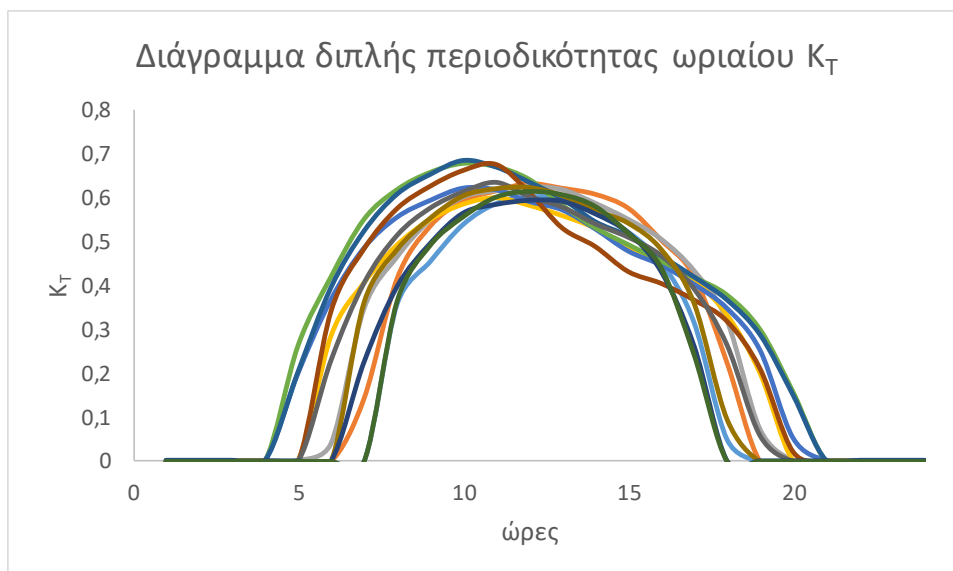
4.5 Ωριαία ανάλυση του συντελεστή αιθριότητας K_T

Όμοια με τις προηγούμενες ενότητες προσπαθήσαμε να προσαρμόσουμε την Kumaraswamy κατανομή στην εμπειρική αρχικά για τους σταθμούς της Αθήνας. Ήδη γνωρίζοντας ότι με την χρήση του συντελεστή αιθριότητας εξαλείφουμε την εποχικότητα της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας, κατεύθυνση της μελέτης μας ήταν η εύρεση ενός τρόπου εξάλειψης ή αποφυγής της διεργασίας της νέφωσης, η οποία παρουσιάζει έντονη εποχικότητα, ιδιαίτερα στις περιοχές ενδιαφέροντος, ενδιάμεσα στον ισημερινό και στην ανταρτική (σχήμα 4.3). Δημιουργώντας το διάγραμμα διπλής περιοδικότητας (διάγραμμα 4.17) παρατηρούμε όμοια με την ωριαία ηλιακή ακτινοβολία την συνέχιση ύπαρξης διπλής περιοδικότητας όχι λόγω της εποχικότητας της ακτινοβολίας, αλλά λόγω της στοχαστικής διεργασίας της νέφωσης και λοιπών διεργασιών καθώς και του πάχους της ατμόσφαιρας. Το πάχος της ατμόσφαιρας, αποτελεί μία στοχαστική διεργασία, αλλά μπορεί απλά να οριστεί ως το πηλίκο της μονάδας προς το συνημίτονο της ζενίθιας γωνίας για την εκάστοτε ώρα. Για αυτό τον λόγο επιλέγουμε την ανάλυση της

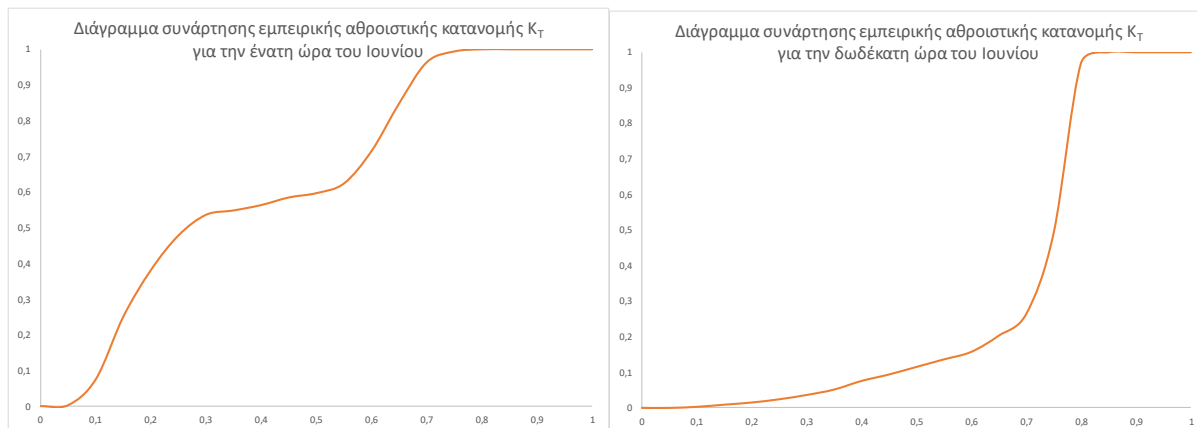
εκάστοτε χρονοσειράς ενδιαφέροντος σε 12×24 (μήνες ώρες) επιμέρους χρονοσειρές. Όμως παράγοντας τις εμπειρικές κατανομές αθροιστικής πιθανότητας για τις 288 χρονοσειρές, διαπιστώνουμε την εμφάνιση δύο κοίλων (διάγραμμα 4.18), το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα, αδυναμίας προσαρμογής της Kumaraswamy, με σκοπό την περιγραφή της διεργασίας.



Σχήμα 4.3 Γεωγραφικό μήκος και πλάτος για την εκάστοτε περιοχή ενδιαφέροντος



Διάγραμμα 4.17 Διάγραμμα διπλής περιодικότητας για τον ωριαίο συντελεστή K_T στον σταθμό της Αθήνας



Διάγραμμα 4.18 Χαρακτηριστικό παράδειγμα ανεπάρκειας προσαρμογής της Kumaraswamy κατανομής (Cdf) στην εμπειρική (δεδομένα σταθμού Αθήνας).

Επίσης παρατηρήσαμε ότι, από τις 288 εκάστοτε χρονοσειρές ανάλυσης σε συγκεκριμένες ώρες εμφανίζονταν εμπειρικές αθροιστικές συναρτήσεις κατανομών που δεν ακολουθούσαν την προηγούμενη συμπεριφορά και ήταν δυνατόν να μοντελοποιηθούν με μόνο μία κατανομή Kumaraswamy. Για αυτό τον λόγο προχωρήσαμε στην δημιουργία μιας νέας κατανομής ικανής να περιγράψει και να μοντελοποιήσει όλες τις παραπάνω περιπτώσεις δίχως τεράστιο υπολογιστικό φόρτο. Πρακτικά η καινούργια σύνθετη κατανομή (διμοδική κατανομή) που χρησιμοποιήσαμε και εφαρμόσαμε στην υπόλοιπη μελέτη για την ανάλυση του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας αποτελείται από ένα άθροισμα δύο περιθώριων κατανομών Kumaraswamy με συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας (Cdf) (18) και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Pdf) (19) που ορίζονται ως :

$$F = \lambda F_1 + (1 - \lambda)F_2 \Leftrightarrow F(x; \lambda, a_1, b_1, a_2, b_2) = \lambda F(x; a_1, b_1) + (1 - \lambda)F(x; a_2, b_2) \Leftrightarrow$$

$$F(x; \lambda, a_1, b_1, a_2, b_2) = \lambda \int_0^x f(\xi; a_1, b_1) d\xi + (1 - \lambda) \int_0^x f(\xi; a_2, b_2) d\xi \Leftrightarrow$$

$$F(x; \lambda, a_1, b_1, a_2, b_2) = \lambda [1 - (1 - x^{a_1})^{b_1}] + (1 - \lambda) [1 - (1 - x^{a_2})^{b_2}] \quad (18)$$

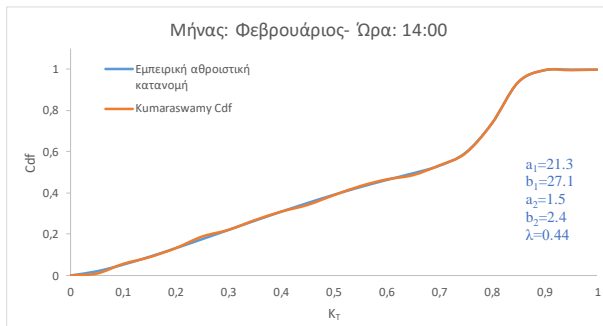
Όμοια ορίζεται και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας :

$$f = \lambda f_1 + (1 - \lambda)f_2 \Leftrightarrow f(x; \lambda, a_1, b_1, a_2, b_2) = \lambda f(x; a_1, b_1) + (1 - \lambda)f(x; a_2, b_2) \Leftrightarrow$$

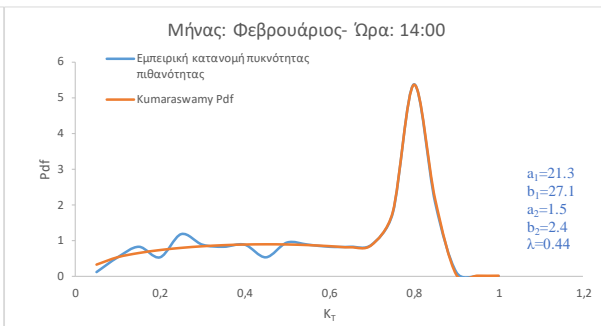
$$f(x; \lambda, a_1, b_1, a_2, b_2) = \lambda [\alpha_1 b_1 x^{(a_1-1)} (1 - x^{a_1})^{b_1}] + (1 - \lambda) [\alpha_2 b_2 x^{(a_2-1)} (1 - x^{a_2})^{b_2}] \quad (19)$$

Η νέα σύνθετη συνάρτηση κατανομής, παρατηρούμε ότι έχει 5 παραμέτρους, εκ των οποίων η παράμετρος λ καθορίζει σε ποιες περιπτώσεις, είναι αναγκαία η χρήση του διπλού αθροίσματος κατανομών Kumaraswamy. Προχωρήσαμε στην ανάλυση για τους σταθμούς της Αθήνας με την χρήση πληθώρας υπολογιστικών φύλλων και με την βοήθεια του εργαλείου Solver υπολογίσαμε τις παραμέτρους της κατανομής. Εκ των αποτελεσμάτων κρίνουμε ότι η σύνθετη κατανομή, προσαρμόζει αρκετά ικανοποιητικά στην εμπειρική αθροιστική κατανομή, καθώς και στην κατανομή πυκνότητας πιθανότητας. Παρουσιάζουμε στην συνέχεια ενδεικτικά ορισμένα διαγράμματα καλής και κακής προσαρμογής για τον σταθμό της Ψυττάλειας στην Αθήνα.

α

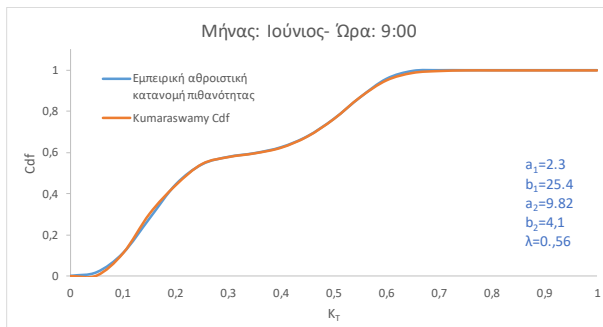


β

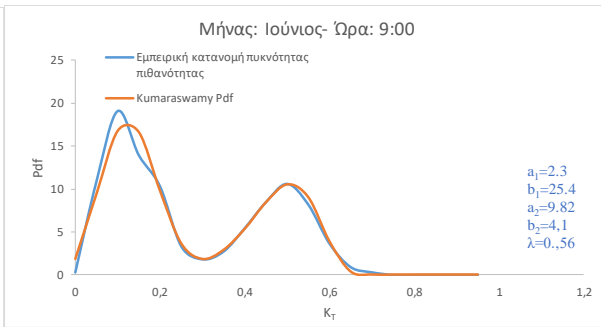


Διάγραμμα 4.19 Διαγράμματα ωριαίας χρονοσειράς K_T , Εμπειρικής-Kumaraswamy, Cdf-Pdf για 14:00/2 σταθμός Ψυττάλειας

δ

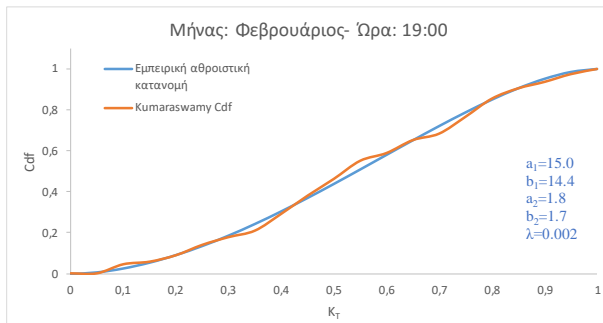


γ

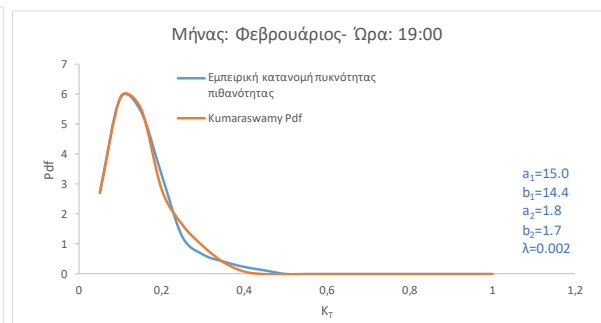


Διάγραμμα 4.20 Διαγράμματα ωριαίας χρονοσειράς K_T , Εμπειρικής-Kumaraswamy, Cdf-Pdf για 9:00/6 σταθμός Ψυττάλειας

ε

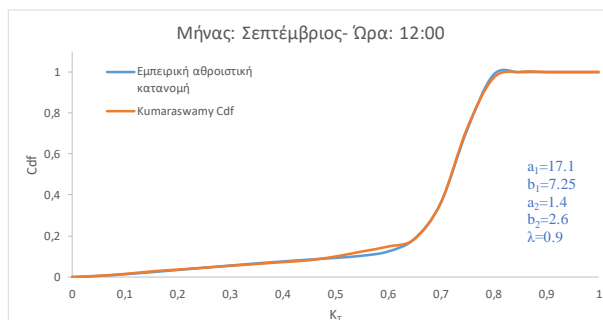


ζ

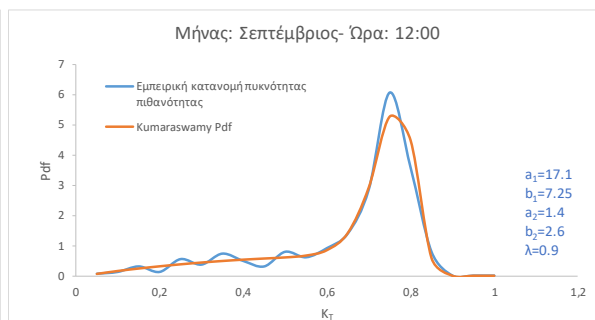


Διάγραμμα 4.21 Διαγράμματα ωριαίας χρονοσειράς K_T , Εμπειρικής-Kumaraswamy, Cdf-Pdf για 19:00/2 σταθμός Ψυττάλειας

η



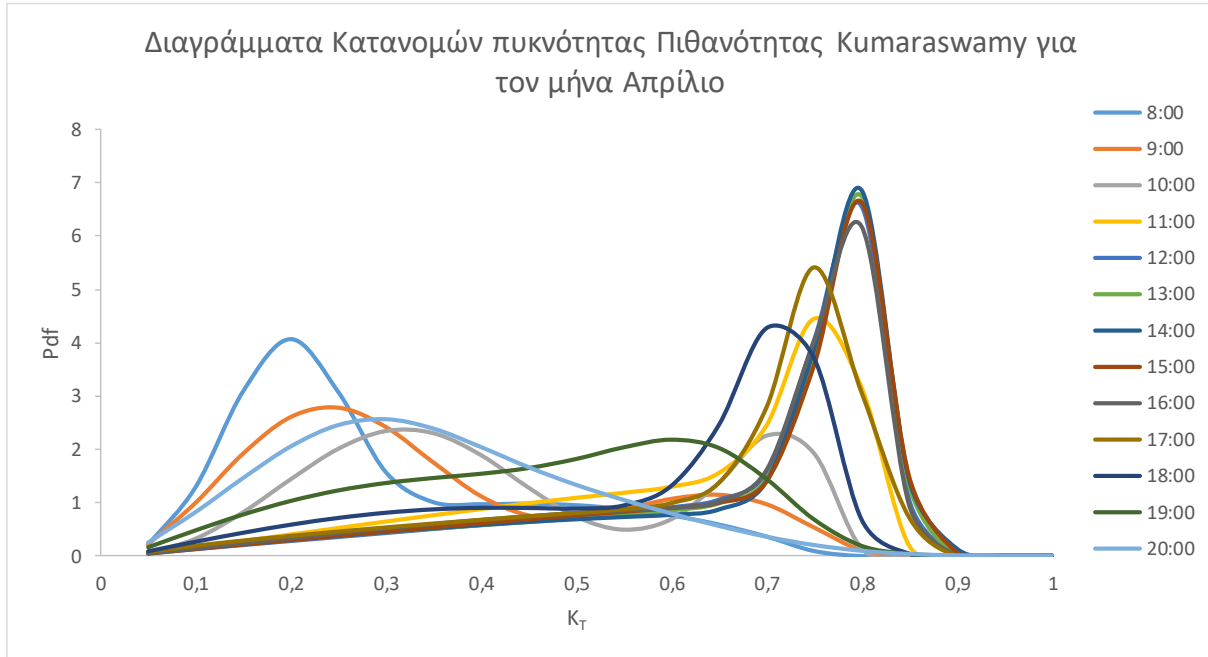
θ



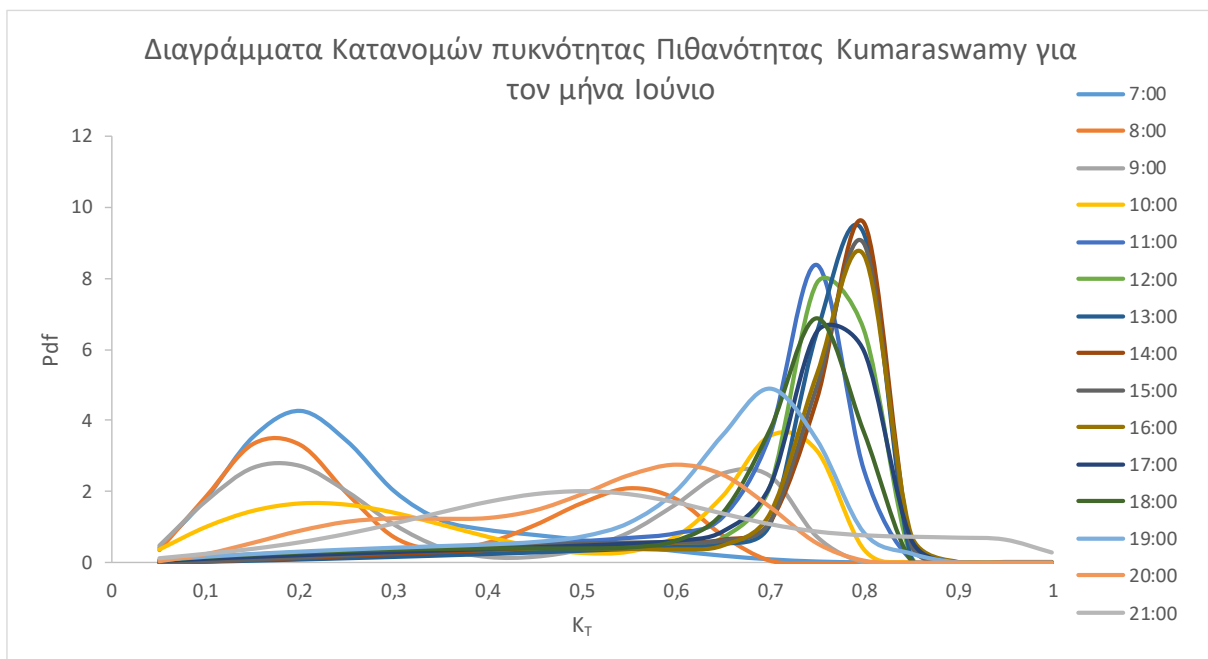
Διάγραμμα 4.22 Διαγράμματα ωριαίας χρονοσειράς K_T , Εμπειρικής-Kumaraswamy, Cdf-Pdf για 12:00/9 σταθμός Ψυττάλειας

Από τα παραπάνω ενδεικτικά, διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι η σύνθετη κατανομή των δύο περιθώριων κατανομών Kumaraswamy, είναι ικανή να λάβει πληθώρα σχημάτων και μορφών και προσαρμόζεται ικανοποιητικά στην εμπειρική κατανομή. Επίσης από τα διαγράμματα 4.21 (ε,ζ) φαίνεται, ότι όπου δεν εμφανίζεται η ανάγκη για ύπαρξη διπλού αθροίσματος κατανομών ο συντελεστής λ τείνει στο μηδέν ή κοντά στην μονάδα.

Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει το επόμενο διάγραμμα 4.23 το οποίο δικαιολογεί την φυσική ερμηνεία και κατ' επέκταση την σωστή μοντελοποίηση της διεργασίας, με την χρήση της σύνθετης κατανομής, σκεπτόμενοι όπως έχουμε προαναφέρει ότι ο συντελεστής αιθριότητας K_T ορίζεται ως το πηλίκο της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης, προς την αντίστοιχη ωριαία εξωτερική ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας. Συμπεραίνουμε ότι για μικρές τιμές του συντελεστή η ατμόσφαιρα παρουσιάζει υψηλή νέφωση ενώ αντίθετα για μεγαλύτερες τιμές που τείνουν στην μονάδα η ατμόσφαιρα κρίνεται διαμπερής. Εύκολα από το διάγραμμα 4.23 και 4.24 παρατηρούμε ότι κατά της πρωινές ώρες καθώς και τις απογευματινές η κατανομή εμφανίζει έντονη αρνητική ασυμμετρία ενώ αντίθετα κατά την διάρκεια της ημέρας παρουσιάζει θετική. Το φαινόμενο δικαιολογείται δικαιολογείται αν αναλογιστούμε τον ορισμό της νέφωσης και γενικά την γενεσιουργό αιτία των σύννεφων ή και της ομίχλης ακόμη. Κατά της πρωινές ώρες, καθώς και τις απογευματινές, από την βιβλιογραφία γνωρίζουμε ότι είναι ποιο πιθανή η εμφάνιση σύννεφων. Αυτό συμβαίνει διότι τα σύννεφα σχηματίζονται όταν θερμότερες κι ελαφρύτερες αέριες μάζες, ανεβαίνουν προς τα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα, με συνέπεια να ψύχονται (αδιαβατικά) και όταν φθάσουν στο σημείο συμπύκνωσης, οι υδρατμοί που περιέχουν να σχηματίζονται μικροσκοπικά υδροσταγονίδια που συνθέτουν το σύννεφο. Συμπερασματικά, δεδομένου ότι κατά τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες, παρατηρείται μείωση της θερμοκρασίας και με βάση την γενεσιουργό αιτία ευνοείται ο σχηματισμός των σύννεφων, ο οποίος οδηγεί σε χαμηλές τιμές του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας K_T , λογική είναι η εμφάνιση αρνητικής ασυμμετρίας της κατανομής πυκνότητας πιθανότητας. Όμοια συμπεριφορά με την προηγούμενη παρουσιάζουν όλοι οι μήνες ανεξαιρέτως της εποχικότητας της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι επαληθεύουμε για μια ακόμη φορά ότι με την χρήση του συντελεστή αιθριότητας απαλείφουμε προσεγγιστικά την διπλή περιοδικότητα της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας και μοντελοποιούμε τις διεργασίες που εξελίσσονται στην ατμόσφαιρα.



Διάγραμμα 4.23 Διαγράμματα κατανομών Pdf Kumaraswamy ωριαίου συντελεστή K_T για τον μήνα Απρίλιο με σκοπό τον εντοπισμό ασυμμετρίας



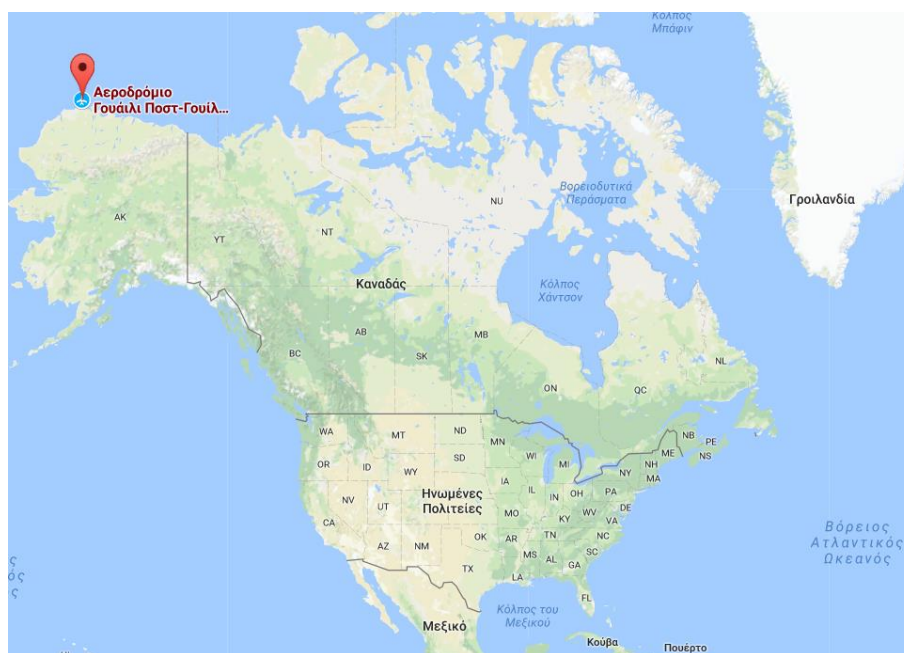
Διάγραμμα 4.24 Διαγράμματα κατανομών Pdf Kumaraswamy ωριαίου συντελεστή K_T για τον μήνα Ιούνιο με σκοπό τον εντοπισμό ασυμμετρίας

Γνωρίζοντας πλέον, ότι ο ωριαίος συντελεστής αιθριότητας για την Αθήνα, ακολουθεί την σύνθετη κατανομή δύο περιθωρίων κατανομών Kumaraswamy, επόμενο βήμα ήταν η επαλήθευση όλων των προηγούμενων συμπερασμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο. Έχοντας πρόσβαση στην βάση δεδομένων της NRLE- NSRDB, που περιέχει 40 σταθμούς οι οποίοι καλύπτουν όλη την έκταση των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (βλέπετε σχήμα 3.1) και

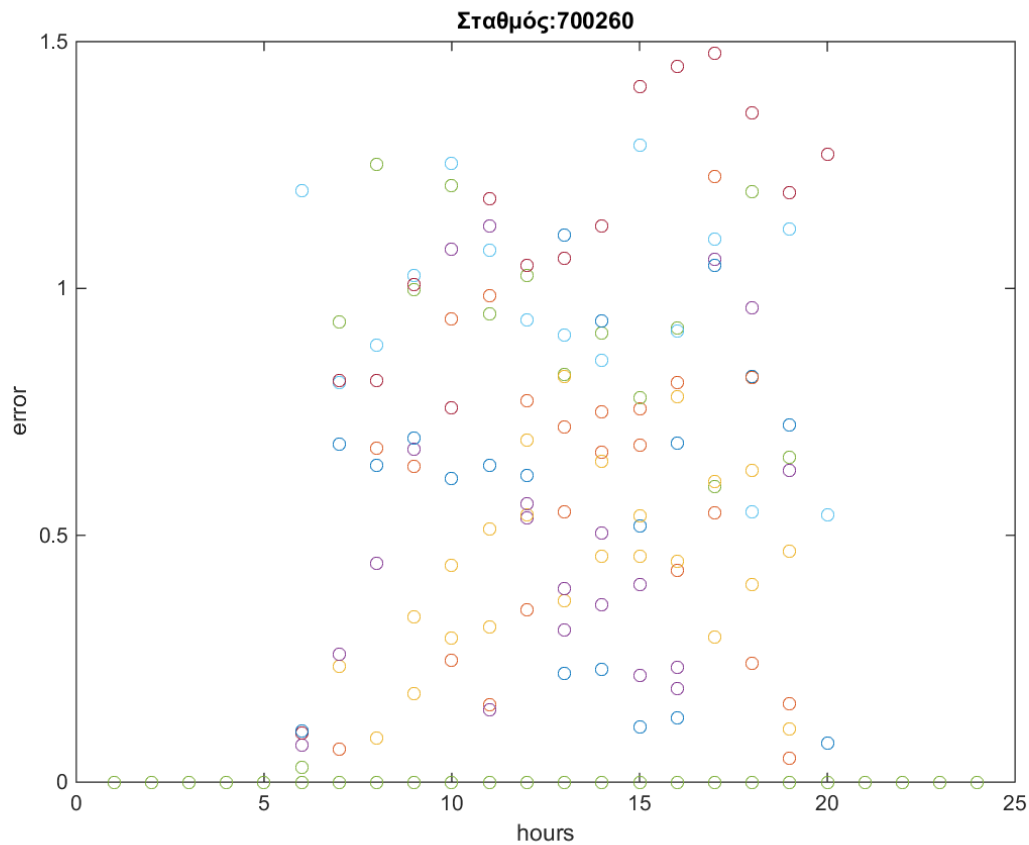
χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρήσαμε ότι καλύπτουν σχεδόν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ατμοσφαιρικών διεργασιών οι οποίοι επηρεάζουν την διεργασία του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας. Λόγω της πληθώρας των δεδομένων και των πολλαπλών σταθμών, όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς για την ανάλυση των δεδομένων, τους υλοποιήσαμε στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab. Όλοι οι κώδικες (Scripts) που γράφτηκαν και χρησιμοποιήθηκαν, υπάρχουν αναλυτικά στο παράρτημα. Επίσης αναλυτικά στοιχεία για τους σταθμούς πχ τοποθεσία, χρόνια μετρήσεων όργανα μετρήσεων κλπ, δίνονται αναλυτικά από την NRLE (Βιβλιογραφία 4.3, Ιστοσελίδες) .

Αρχικά συνεχίσαμε με όμοια ανάλυση με του σταθμούς της Αθήνας. Αφού χωρίσαμε τις 40 χρονοσειρές των σταθμών σε ανάλυση 12×24 (μήνες και ώρες) , θεωρώντας όσες εμπειρείχαν λιγότερο από 11 χρόνια μετρήσεων ως μη αξιόπιστες εφαρμόσαμε την σύνθετη κατανομή Kumaraswamy. Στην συγκεκριμένη ανάλυση δεδομένων λόγω της μεγάλης ταχύτητας επεξεργασίας δεδομένων για τον υπολογισμό των παραμέτρων της κατανομής, δεν προσαρμόσαμε τον τύπο της αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας (τύπος 18), αλλά την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (τύπος 19). Επίσης για επαλήθευση αποτελεσμάτων και σύγκριση διαφορών ανάμεσα στην χρήση Solver του excel και Solver Matlab, εφαρμόσαμε για συγκεκριμένους σταθμούς της βάσης NRLE όμοια ανάλυση με εκείνης της Αθήνας. Παρατηρούμε ύστερα από την προσαρμογή, ότι η σύνθετη κατανομή δύο περιθωρίων κατανομών Kumaraswamy, λόγω της ιδιότητάς της να λαμβάνει πληθώρα μορφών είναι ικανή να περιγράψει επαρκώς και τις 288 χρονοσειρές των 40 σταθμών. Παραθέτουμε παρακάτω επιγραμματικά στο τεύχος ορισμένα διαγράμματα καλής και κακής προσαρμογής λόγω της πληθώρας των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.

Πραγματοποιώντας διακριτοποίηση στο Κτ από 0 έως 1 ανά 0,1 εκτιμήσαμε το αντίστοιχο σφάλμα προσαρμογής της σύνθετης κατανομής στην εμπειρική, χαρακτηρίζοντας τις τιμές μεγαλύτερες των δύο μονάδων ως μη επαρκώς προσαρμοσμένες στην κατανομή. Για παράδειγμα στον σταθμό με κωδικό 700260, ο οποίος βρίσκεται στο αεροδρόμιο BARROW της Αλάσκας (βλέπετε επόμενο σχήμα 4.4) δεν εμφανίζει σε καμία προσαρμογή σφάλματα μεγαλύτερα από 1.5 (βλέπετε επόμενα διάγραμμα 4.25) .



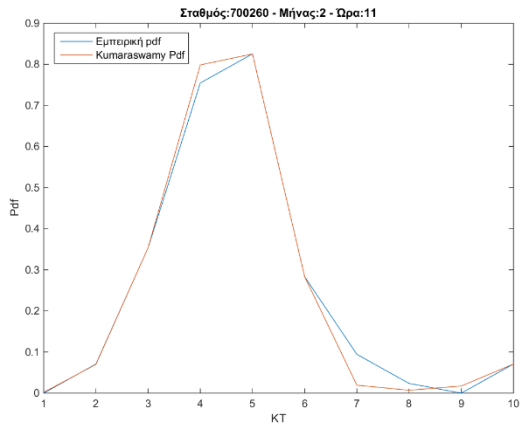
Σχήμα 4.4 Τοποθεσία σταθμού Barrow στην Αλάσκα



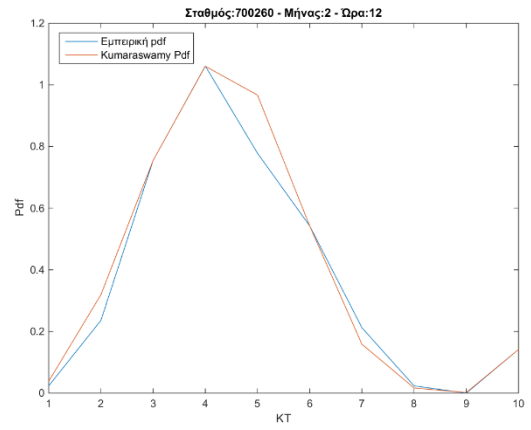
Διάγραμμα 4.25 Διάγραμμα σφαλμάτων των 288 χρονοσειρών της χρονοσειράς για τον σταθμό Barrow (Αλάσκα)

Επίσης, ο Σταθμός Barrow αποτελεί αρκετά ενδιαφέρον κομμάτι της μελέτης, διότι βρίσκεται κοντά στον βόρειο πόλο. Έτσι γνωρίζουμε ότι σε αρκετές μέρες, είτε δεν θα παρατηρείται νέφωση, είτε θα έχουμε μεγάλη συγκέντρωση σύννεφων. Με αποτέλεσμα ο ωριαίος συντελεστής αιθριότητας να μην παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις μέσα στην διάρκεια της ημέρας (βλέπετε ενότητα 4.4 διάγραμμα 4.10). Η συγκεκριμένη παρατήρηση έχει αντίκτυπο στην κατανομή διότι γνωρίζουμε ότι, στην περίπτωση που ο συντελεστής λ είτε πλησιάζει την μονάδα είτε κυμαίνεται κοντά στο μηδέν τότε δεν κρίνεται απαραίτητη η χρήση της σύνθετης κατανομής δύο περιθωρίων Kumaraswamy (διμοδική κατανομή), αφού πλέον η εμπειρική δεν εμφανίζεται ως δικόρυφη, και το οποίο επιβεβαιώνεται από τα επόμενα παραδείγματα.

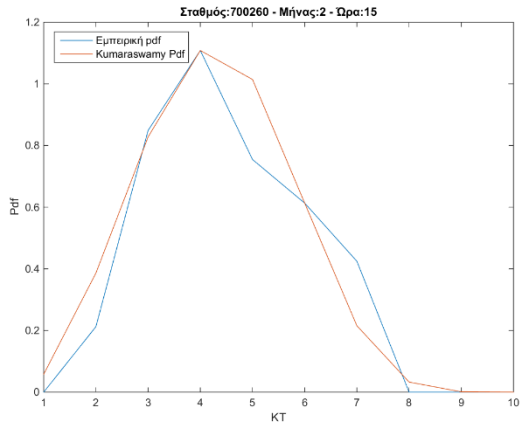
α



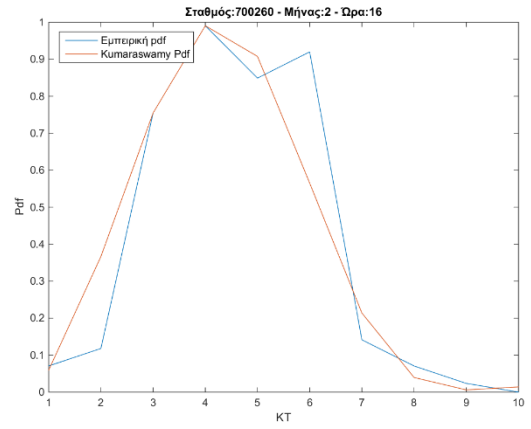
β



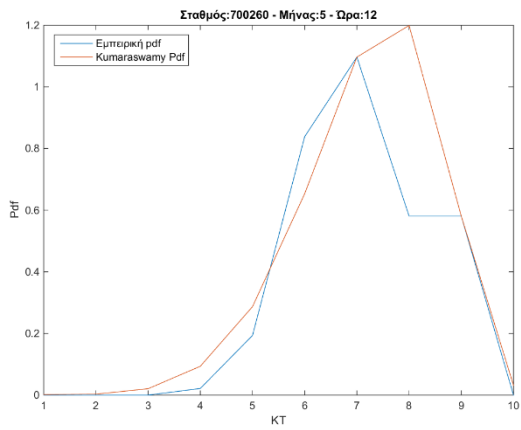
γ



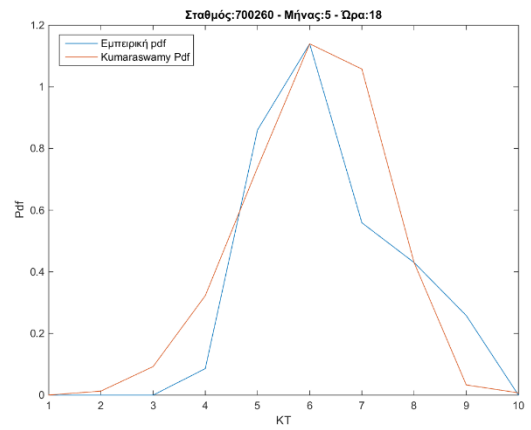
δ



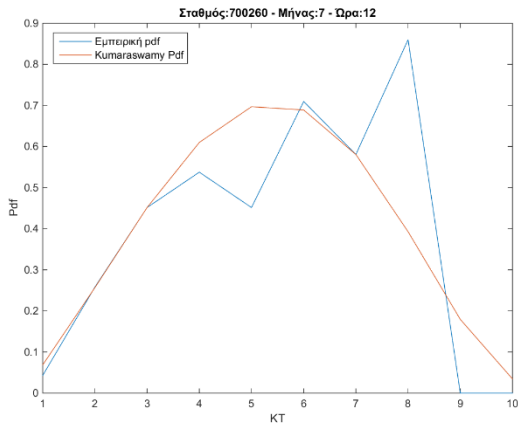
ε



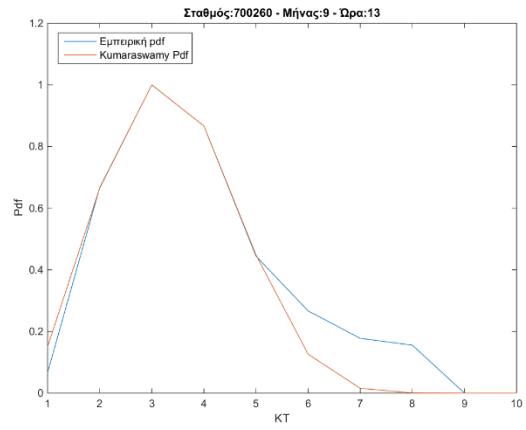
ζ



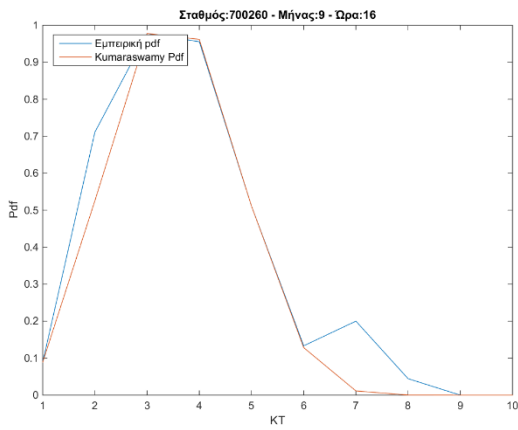
η



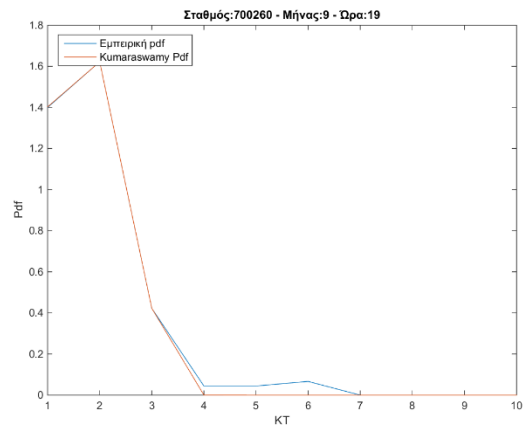
θ



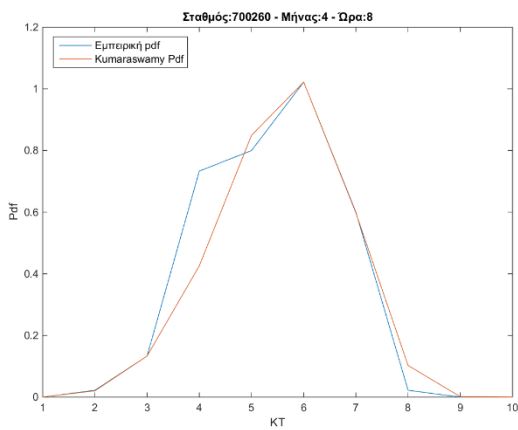
ι



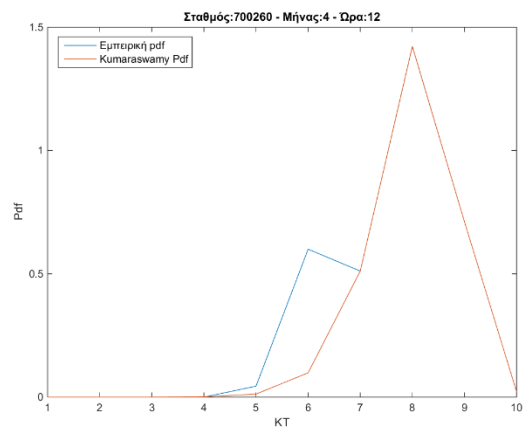
κ



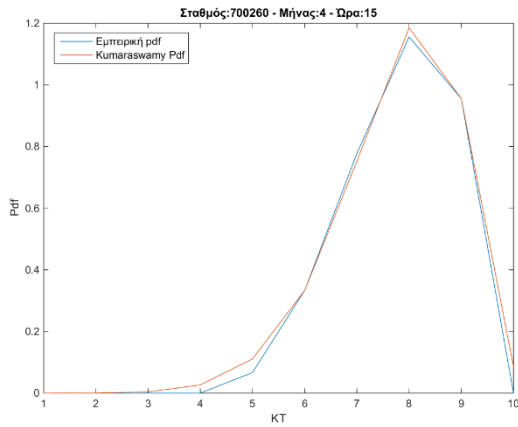
λ



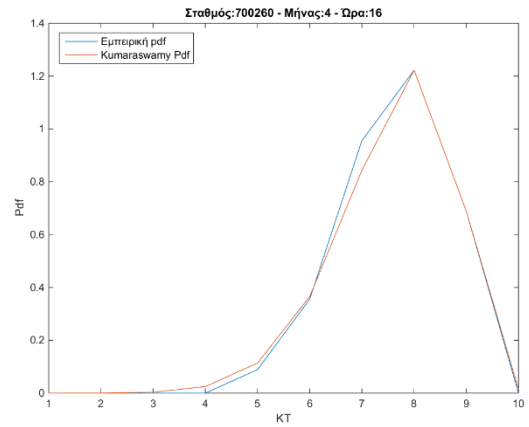
μ



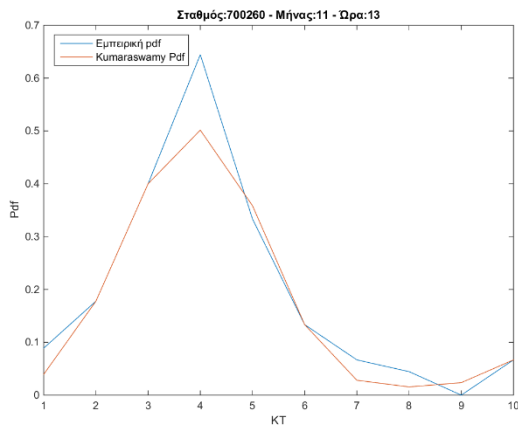
ν



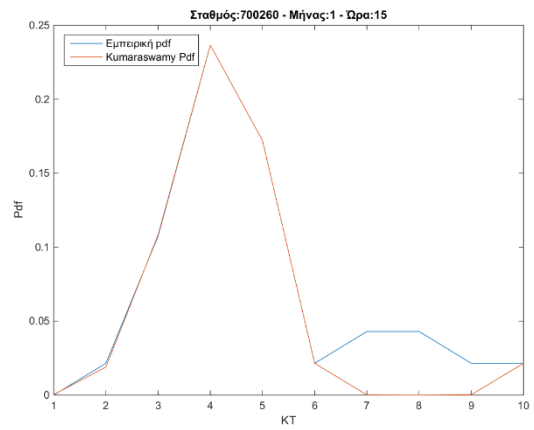
ξ



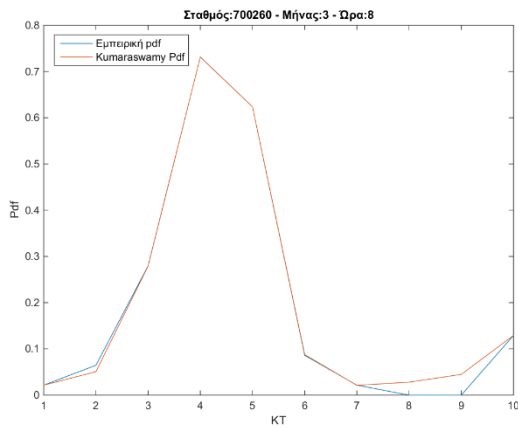
ο



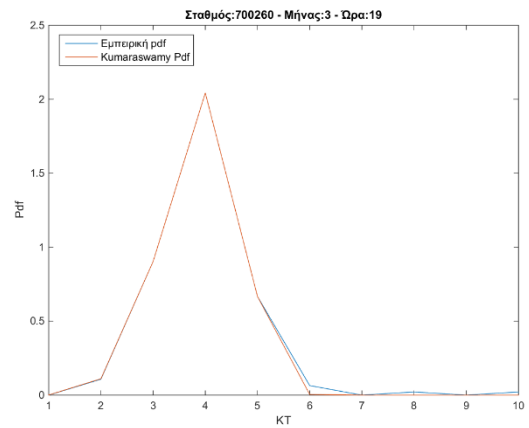
π



ρ

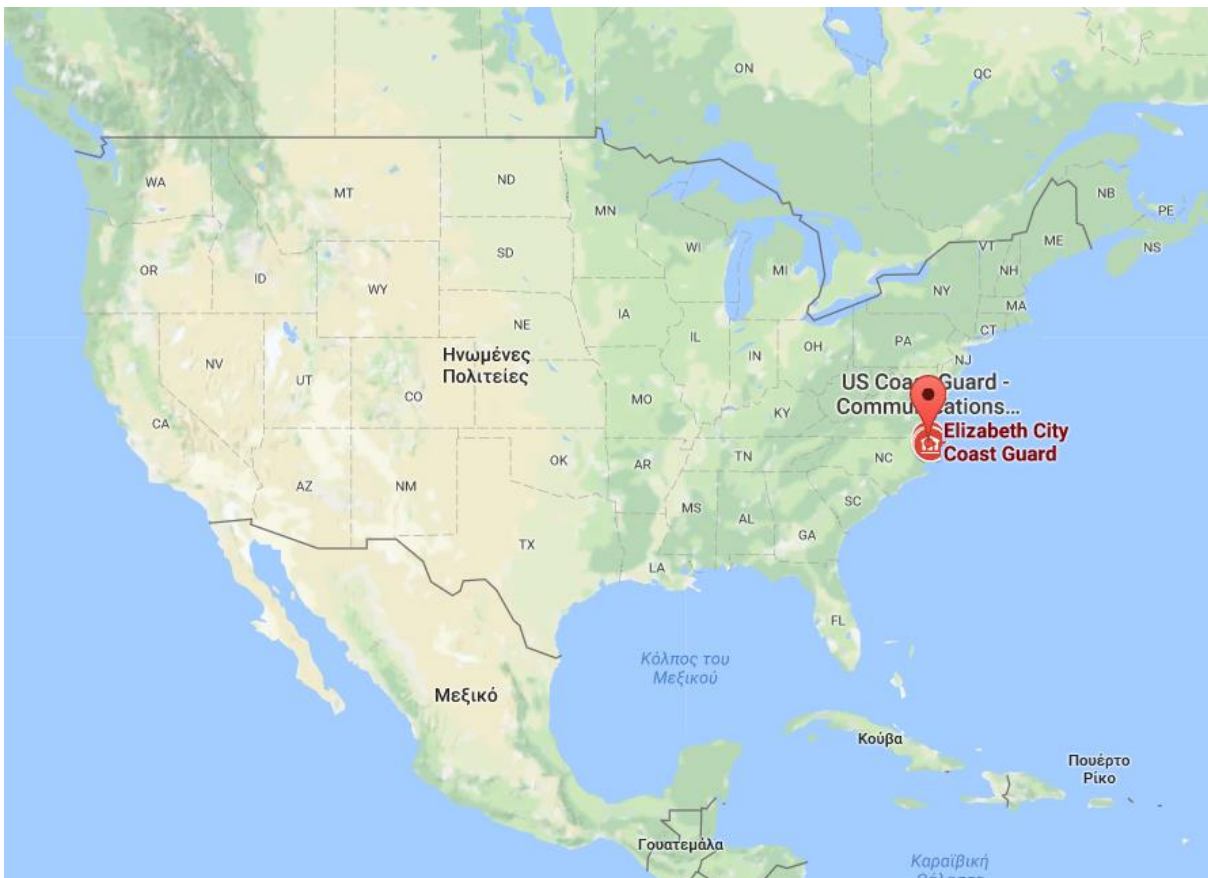


σ



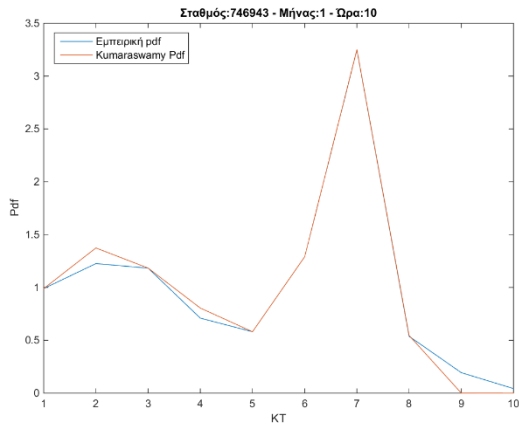
Διάγραμμα 4.26 Χαρακτηριστικά διαγράμματα καλής και κακή προσαρμογής της σύνθετης κατανομής διπλού αθροίσματος Kumaraswamy για τον σταθμό Barrow (Αλάσκα)

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζουμε ενδεικτικά διαγράμματα για τον σταθμό Elizabeth city με κωδικό 746943, ο οποίος βρίσκεται στην πολιτεία της βόρειας Καρολίνας. Η περιοχή είναι παραλιακή και μπορούμε να χαρακτηρίσουμε χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι η διεργασία του συντελεστή αιθριότητας είναι όμοια με αυτή της Αθήνας. Έτσι αναμένουμε έντονη την εμφάνιση δικόρυφων κατανομών της εμπειρικής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας κατά της μεσημεριανές ώρες, το οποίο επιβεβαιώνεται από τα επόμενα ενδεικτικά διαγράμματα (βλέπετε 4.27). Επίσης ο συγκεκριμένος σταθμός διαθέτει 15 χρόνια ωριαίων μετρήσεων εξωτερικής και μετρημένης στην επιφάνεια της Γης ηλιακής ακτινοβολίας και ελάχιστες κενές, μετρήσεις οπότε άμεσα τον θεωρούμε αξιόπιστο.

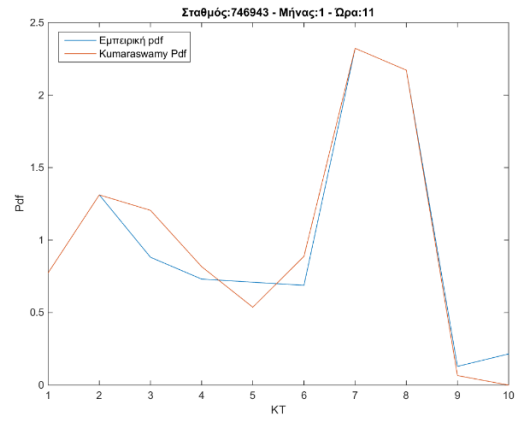


Σχήμα 4.5 Τοποθεσία σταθμού Elizabeth City

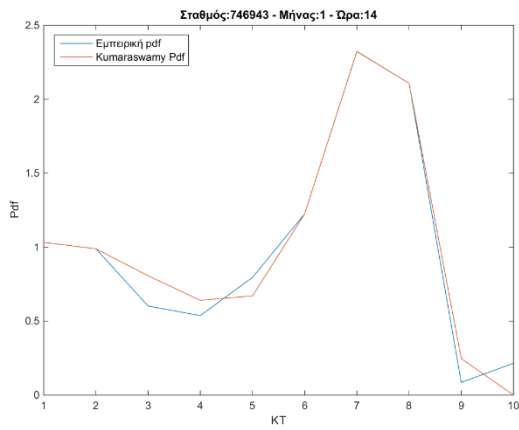
α



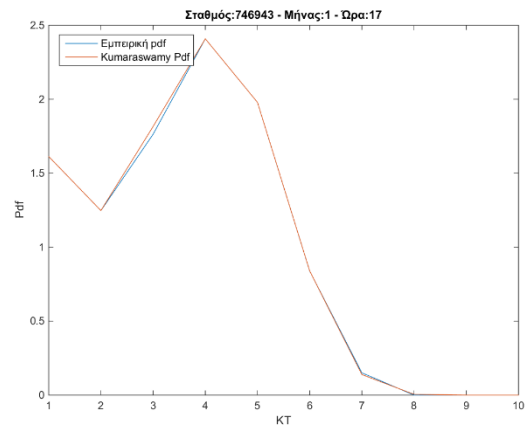
β



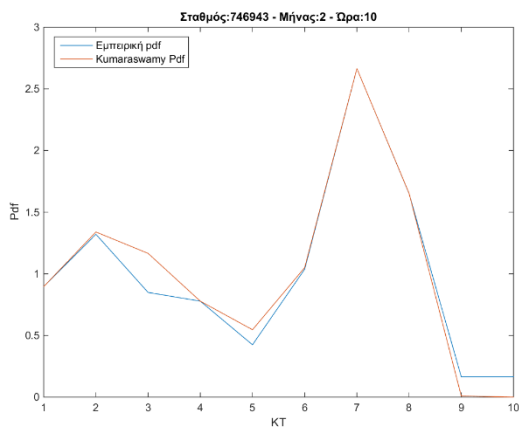
γ



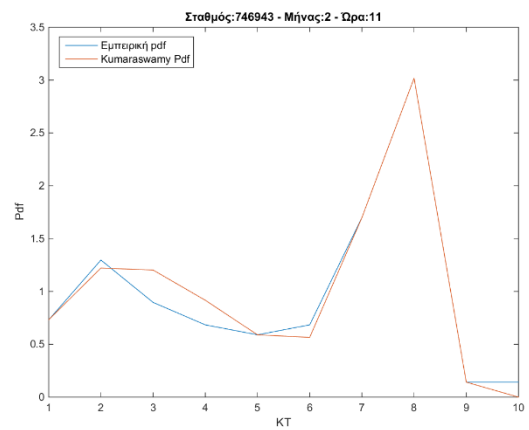
δ



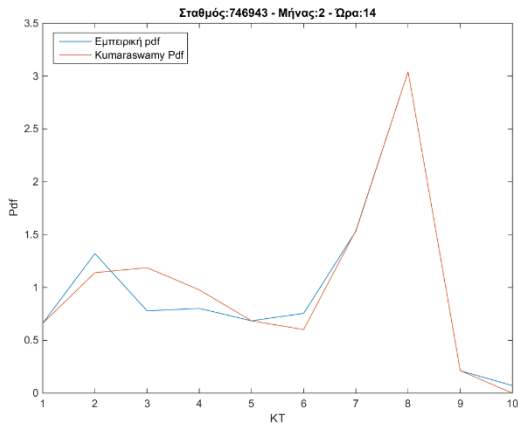
ε



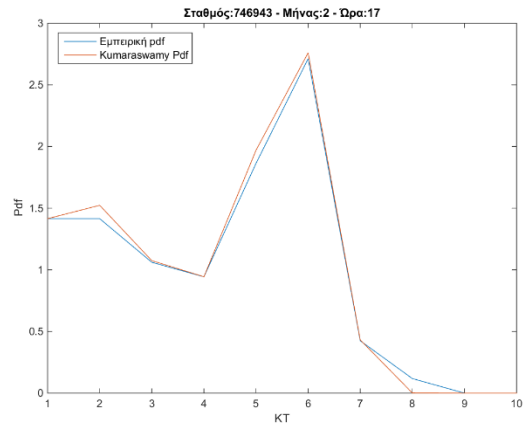
ζ



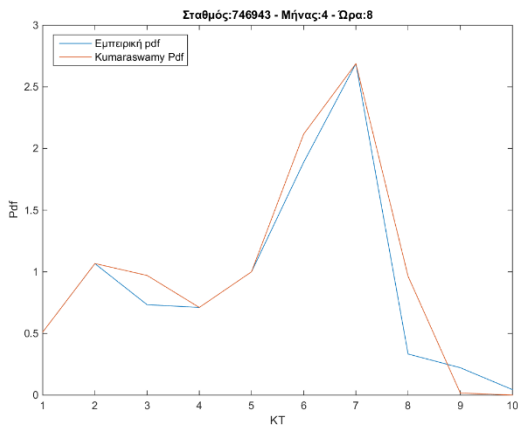
η



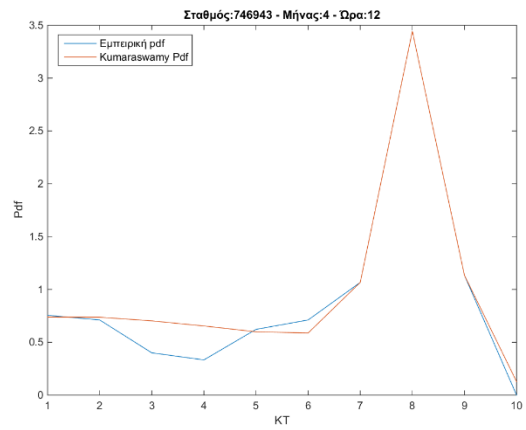
θ



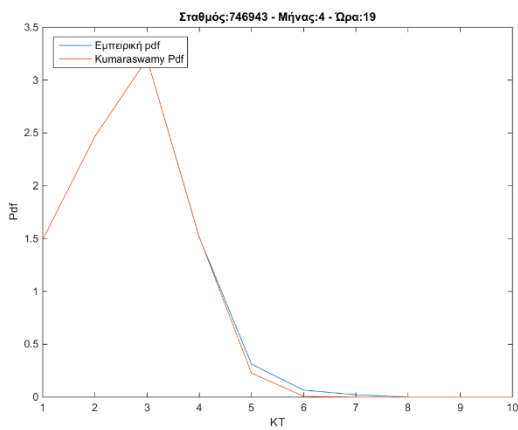
ι



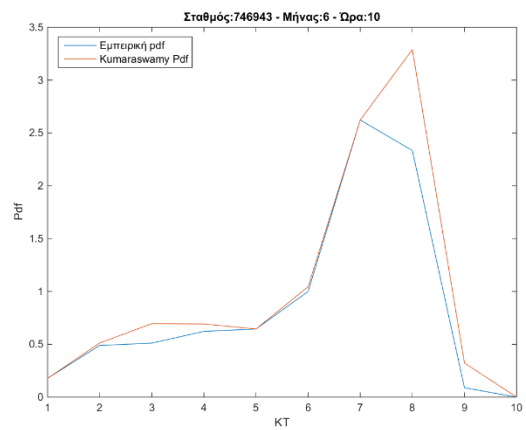
κ



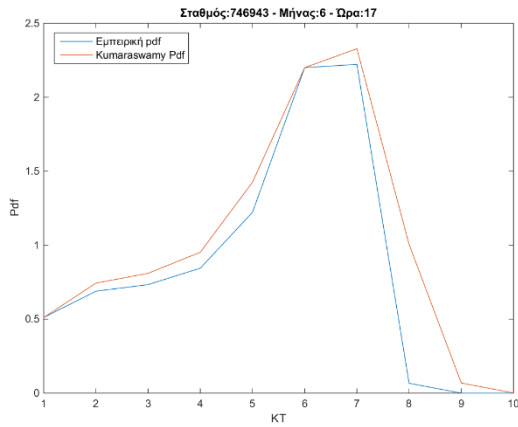
λ



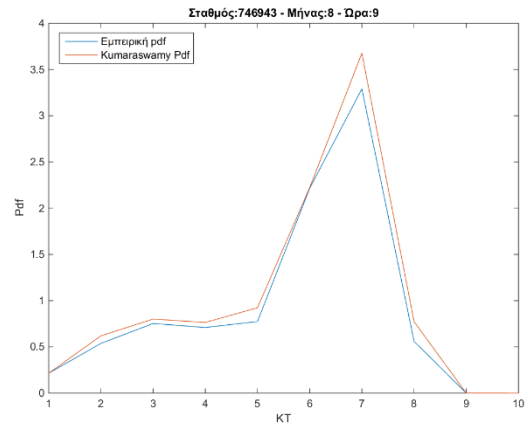
μ



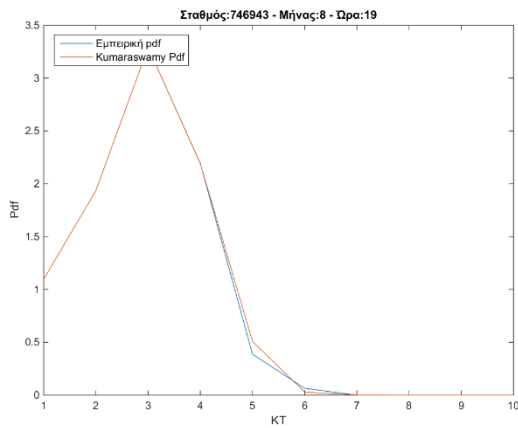
ν



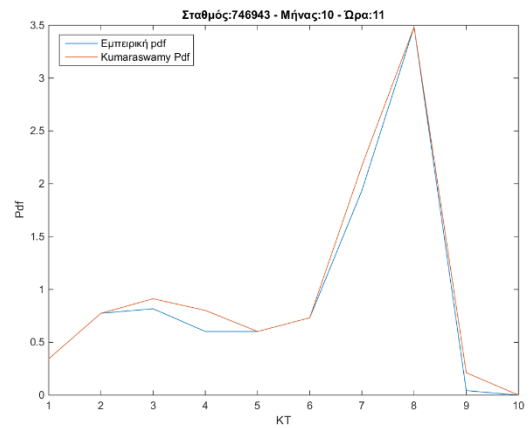
ξ



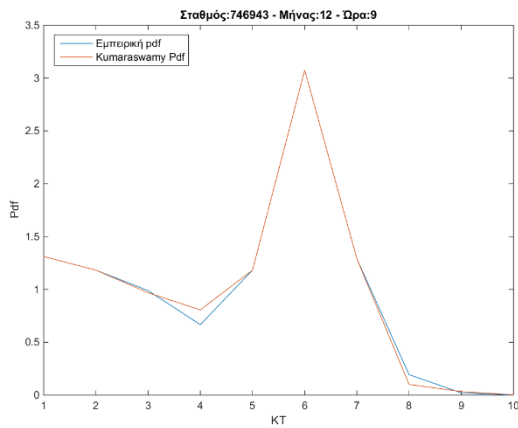
ο



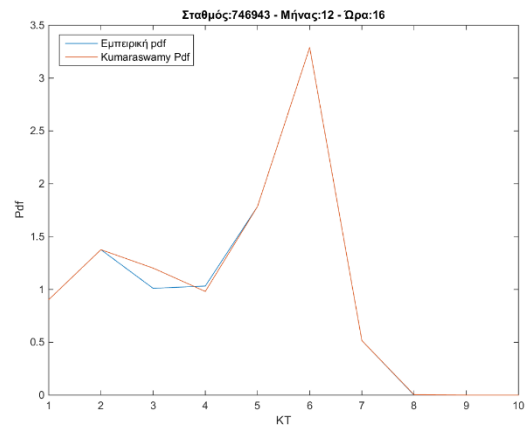
π



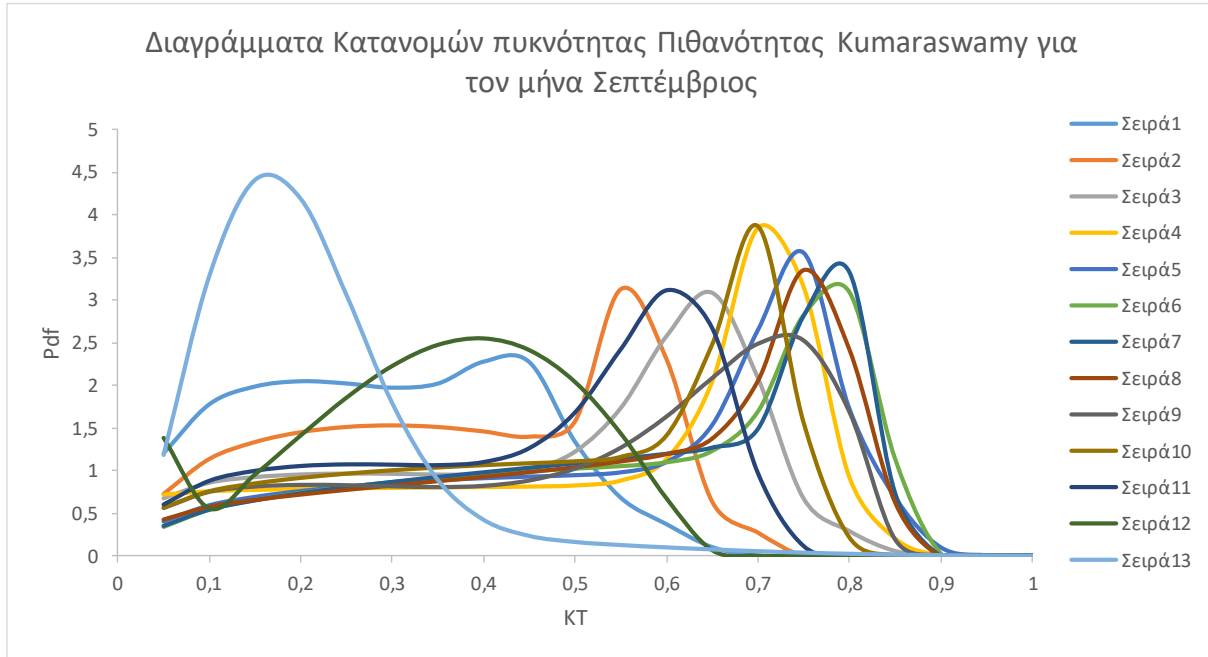
ρ



σ



Διάγραμμα 4.27 Χαρακτηριστικά διαγράμματα καλής και κακής προσαρμογής της σύνθετης κατανομής διπλού αθροίσματος Kumaraswamy στην εμπειρική δικόρυφη κατανομή για τον σταθμό Elizabeth City (Βόρεια Καρολίνα)



Διάγραμμα 4.28 Διαγράμματα κατανομών Pdf Kumaraswamy ωριαίου συντελεστή ΚΤ για τον μήνα Σεπτέμβριο με σκοπό τον εντοπισμό ασυμμετρίας για τον σταθμό Elizabeth city (Βόρεια Καρολίνα)

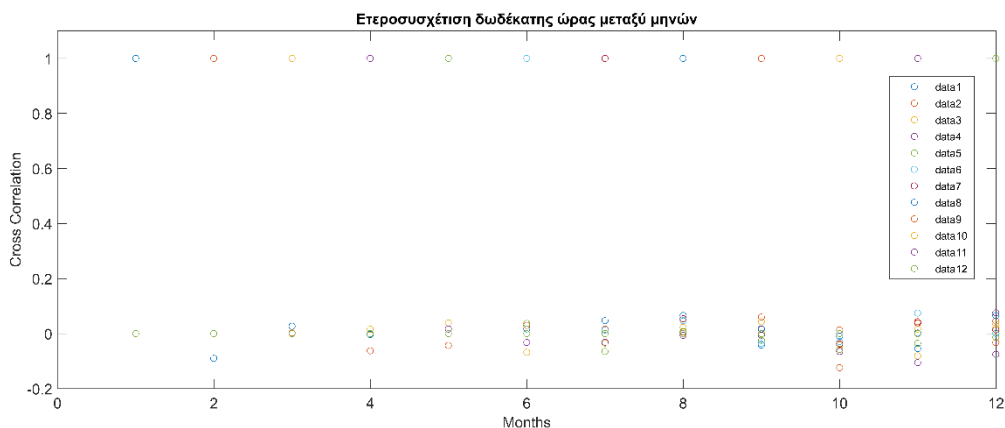
Κατά προσέγγιση με την Αθήνα παρατηρούμε την ύπαρξη αρνητικής ασυμμετρίας τόσο τις πρωινές ώρες όσο και τις απογευματινές ώρες η οποία οφείλεται στις χαμηλές τιμές του συντελεστή αιθριότητας. Επίσης από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την έντονη εμφάνιση δικόρυφων κατανομών σε σχέση με τον σταθμό της Αλάσκας.

4.5.1 Μελέτη ετεροσυσχετίσεων μεταξύ ωριαίων συντελεστών ΚΤ

Ένα κομμάτι το οποίο δεν είχαμε την δυνατότητα να ελέγξουμε στην ανάλυση της Αθήνας λόγω του μεγάλου υπολογιστικού φόρτου με την χρήση των υπολογιστικών φύλλων, αποτελεί το κομμάτι των ετεροσυσχετίσεων μεταξύ διαδοχικών ωρών, για τον ωριαίο συντελεστή ΚΤ. Λόγω της γρήγορης επεξεργασίας δεδομένων υπολογίσαμε τις ετεροσυσχετίσεις για τους 40 σταθμούς της NRLE μεταξύ όλων των ωρών. Αρχικά αποδεικνύεται ότι δεν υφίσταται ετεροσυσχέτιση μεταξύ ίδιων ωρών σε διαφορετικούς μήνες πχ 12^η ώρα του Σεπτέμβριου με 12^η ώρα Οκτωβρίου. Ακολουθεί το ενδεικτικό διάγραμμα 4.29 ύστερα, από ανάλυση των δεδομένων του σταθμού με κωδικό 72466 στην περιοχή Denver του Κολοράντο (σχήμα 4.6)

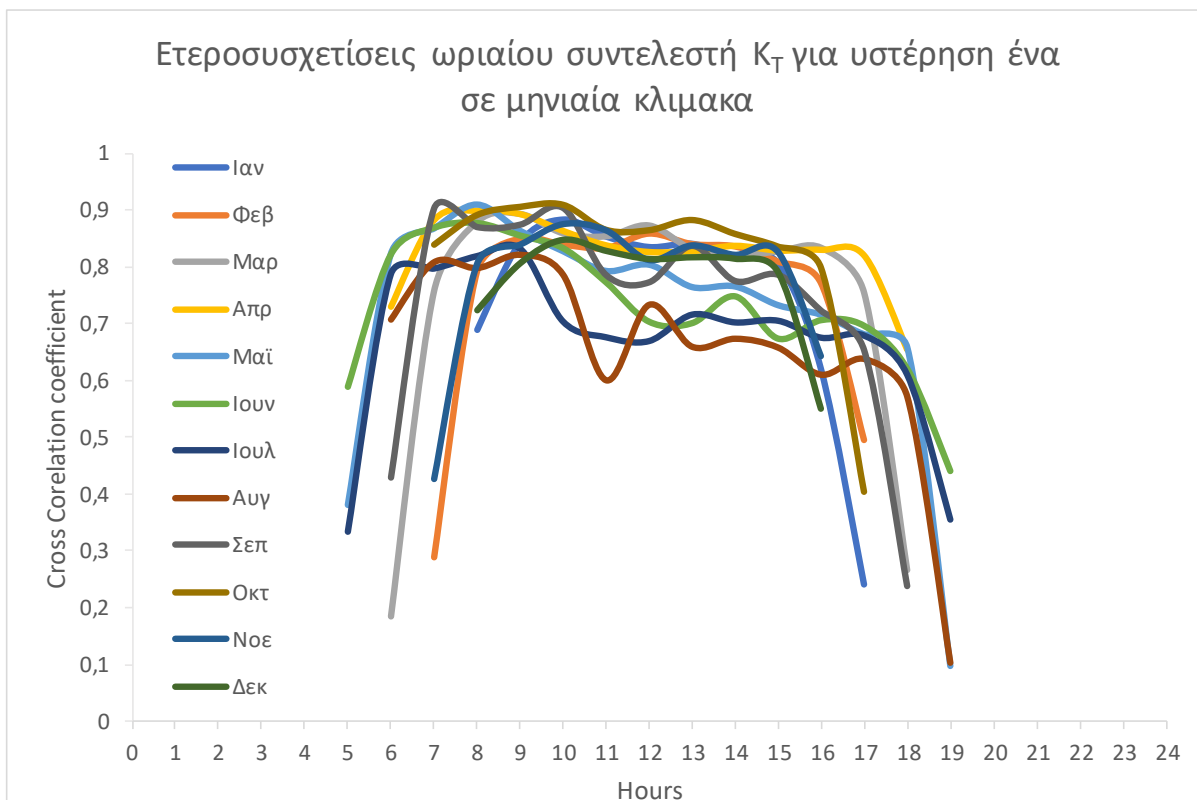


Σχήμα 4.6 Τοποθεσία σταθμού DENVER/CENTENNIAL

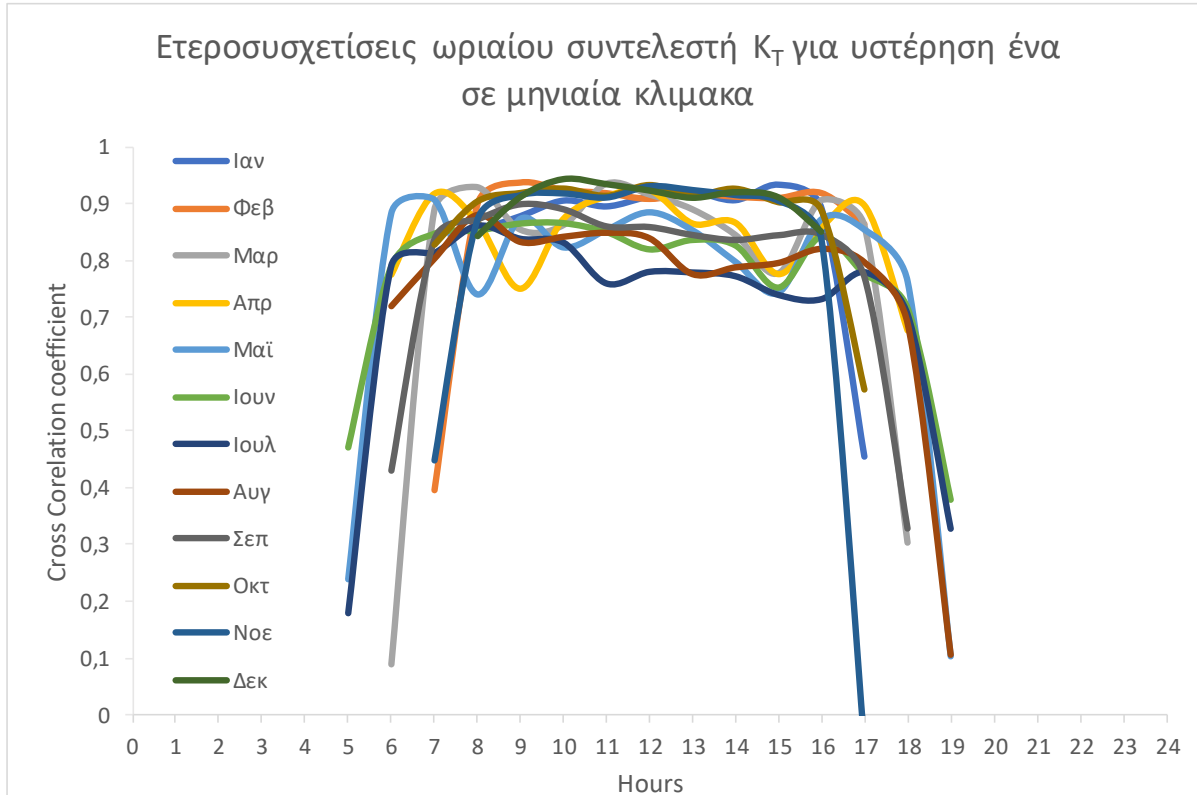


Διάγραμμα 4.29 Διάγραμμα ετεροσυσχετίσεων για τον σταθμό του Denver δωδέκατης ώρας όλων των μηνών για υστέρηση από 1εως12

Παρατηρούμε ότι, όπου εμφανίζεται συσχέτιση ίση με την μονάδα συμβαίνει λόγω υστέρησης μηδέν, ενώ αντίθετα παρατηρούμε μηδενική συσχέτιση μεταξύ των μηνών. Στο επόμενο βήμα πραγματοποιήθηκε η μελέτη ετεροσυσχετίσεων του ωριαίου συντελεστή K_T σε μηνιαία κλίμακα με υστέρηση 1 δηλαδή (διαδοχικών ωρών) πχ η 8^η ώρα του Μαρτίου με την 9^η και στην συνέχεια η 9^η με την 10^η κλπ και με την ίδια διαδικασία για τους 12 μήνες του έτους. Παραθέτουμε τα επόμενα διάγραμμα που αφορούν τις συσχετίσεις μεταξύ ωρών για υστέρηση 1, σε μηνιαία κλίμακα για τον σταθμό του Denver και Elizabeth City



Διάγραμμα 4.30 Ετεροσυσχετίσεις ωριαίου συντελεστή K_T για υστέρηση ένα σε μηνιαία κλίμακα , για τον σταθμό Denver



Διάγραμμα 4.31 Ετεροσυσχετίσεις ωριαίου συντελεστή K_T για υστέρηση ένα σε μηνιαία κλιμακα , για τον σταθμό Elizabeth City

Από τα παραπάνω δύο διαγράμματα,ζ τα οποία είναι όμοια με τα παραχθέντα αποτελέσματα που αφορούν τους υπόλοιπους 38 σταθμούς συμπεραίνουμε ότι η συσχέτιση μεταξύ των ωρών για υστέρηση ένα (1) φαίνεται να μην παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις ή να εμφανίζει κάποιον ορατό κύκλο (πχ θυμηθείτε αντίστοιχο διάγραμμα διπλής περιοδικότητας). Επίσης οι μικρές ετεροσυσχετίσεις που τείνουν στο μηδέν δικαιολογούνται διότι τις ώρες που δεν έχουμε ηλιοφάνεια ο συντελεστής K_T είναι περίπου ίσος με μηδέν, με την επόμενη ώρα να έχει ανατείλει ο ήλιος και να υπάρχουν μετρήσεις για υστέρηση ένα, με αποτέλεσμα να παρατηρείται σχεδόν μηδενική τιμή ετεροσυσχετίσης. Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα για τις ετεροσυσχετίσεις, επιλέγουμε στη συνέχεια να δημιουργήσουμε και να εφαρμόσουμε ένα ψευδο-κυκλοστάσιμο μοντέλο, αφού η ανάγκη για αναπαραγωγή ετεροσυσχετίσεων μεταξύ των ωρών δεν υφίσταται στην συγκεκριμένη διεργασία του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας.

4.6 Στοχαστική δομή του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας K_T

4.6.1 Εισαγωγικά στοιχεία δυναμικής φαινομένου Hurst Kolmogorov

Το φαινόμενο της μακροπρόθεσμης εμμονής, ή αλλιώς φαινόμενο Hurst, ανακαλύφθηκε πρώτη φορά από τον υδρολόγο Harold Edwin Hurst (1880-1978), ο οποίος μελέτησε την διακύμανση της στάθμης του νερού του ποταμού Νείλου και μετέπειτα το φαινόμενο μελετήθηκε και από τον Andrey Kolmogorov (1903-1987). Εδώ αξίζει να σκεφτούμε την διαφορά πρόβλεψης των αποτελεσμάτων μίας ρουλέτας, σε σχέση με την πρόβλεψη του κλίματος. Η ρουλέτα προφανώς είναι απρόβλεπτη βραχυπρόθεσμα, αλλά σε μεγάλες χρονικές κλίμακες (μακροπρόθεσμα), μπορούμε να φανταστούμε τις διάφορες πιθανές εκβάσεις, σαν ένα τυχαίο θόρυβο πάνω σε ένα

γνωστό σήμα. Αντίθετα το κλίμα, άλλοτε έχει μια αιτιοκρατική αιτία και άλλοτε οι αιτίες είναι χαοτικές. Ένα κλασικό παράδειγμα συναφές με την παρούσα εργασία είναι οι εποχές, τις οποίες αντιλαμβανόμαστε στην Αθήνα, σε αντίθεση με έναν πιθανό παρατηρητή στην Ανταρκτική, διότι οι ακτίνες του ήλιου πέφτουν υπό διαφορετική γωνία καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Συνεπώς προκύπτει ότι το κλίμα είναι ιδιαίτερα αβέβαιο σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Έτσι ορίζουμε την μεγιστοποίηση της αβεβαιότητας σε όλες τις χρονικές κλίμακες ως συμπεριφορά Hurst-Kolmogorov. Ορίζουμε ως παράμετρο Hurst, το μέτρο μακροπρόθεσμης μνήμης μίας χρονοσειράς, που δείχνει τον ρυθμό μεταβολής των αυτοσυσχετίσεων της χρονοσειράς καθώς η υστέρηση μεταξύ ζευγών τιμών αυξάνεται και λαμβάνει τιμές η παράμετρος μεταξύ $[0,1]$. Προκύπτει ότι, αν μία χρονοσειρά παρουσιάζει τιμές του συντελεστή μεγαλύτερες του 0.5 ($H > 0.5$) τότε θα εμφανίζει μια μακροπρόθεσμη θετική αυτοσυσχέτιση. Αυτό υποδεικνύει ότι στην εμφάνιση μία υψηλής τιμής, ακολουθεί μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης επόμενης υψηλής τιμής. Στην περίπτωση που η παράμετρος Hurst είναι ίση με 0.5 τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα δεδομένα είναι χρονικά ανεξάρτητα μεταξύ τους και υπάρχει μία τυχαία αύξηση ή μείωση τιμών γνωστή από την βιβλιογραφία ως λευκός θόρυβος.

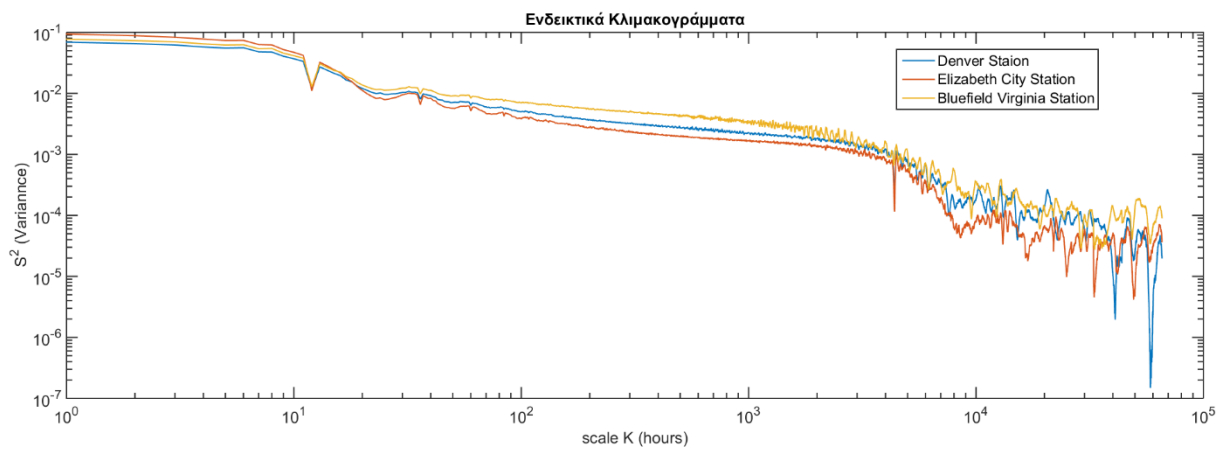
4.6.2 Το κλιμακόγραμμα ως εργαλείο και τα αποτελέσματα των 40 σταθμών.

Η αναζήτηση και ο εντοπισμός της μακροπρόθεσμης εμμονής, μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλά εργαλεία από τα πιο διαδεδομένα είναι η χρήση φάσματος, της αυτοσυνδιασποράς και η χρήση του κλιμακογράμματος. Το κλιμακόγραμμα (Koutsoyiannis et al) είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για να διακρίνει και να υπολογίζει την μακροπρόθεσμη εμμονή και κατ' επέκταση την παράμετρο Hurst. Συσχετίζει την διασπορά του μέσου όρου της ανέλιξης με τον μέσο όρο της κλίμακας του χρόνου. Σε διάγραμμα διπλά λογαριθμικών αξόνων η κλίση της ευθείας διαιρεμένη με 2 προσθέτοντας ένα υπολογίζει την τιμή της παραμέτρου Hurst. Ενδεικτικά αν λύσουμε τον (τύπο 20) ως προς H προκύπτει η τιμή της παραμέτρου.

$$StD[\bar{X}_n] = \frac{\sigma}{n^{1-H}} \quad (20)$$

Επόμενο βήμα ήταν ο υπολογισμός της H με την βοήθεια των κλιμακογραμμάτων για τον ωριαίο συντελεστή K_T για την βάση δεδομένων της NRLE και της Αθήνας. Από τα επόμενα ενδεικτικά κλιμακογράμματα (διάγραμμα 4.32) παρατηρούμε τρία ήδη κλίσεων τα οποία δικαιολογούνται αφού μεταβαίνουμε από την ωριαία κλίμακα στην ημερήσια και τέλος για τιμές του άξονα κλίμακας μεγαλύτερες του 8765/2 βρισκόμαστε στην ετήσια. Βέβαια ο υπολογισμός της παραμέτρου Hurst προκύπτει από την κλίση της ετήσιας κλίμακας, για αυτό και χρονοσειρές με λίγα χρόνια δεδομένων δεν μελετήθηκαν (βλέπετε Παράρτημα δεδομένα NRLE). Για λόγους πληρότητας και χωρίς βλάβη της γενικότητας, υπολογίσαμε τους μέσους όρους όλων των κλίσεων, για τις εκάστοτε χρονικές κλίμακες. Έτσι προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- Ο μέσος όρος των κλίσεων της ωριαίας κλίμακας ισούται με 0.91
- Ο μέσος όρος των κλίσεων της ημερήσιας κλίμακας ισούται με 0.96
- Ο μέσος όρος των κλίσεων της ετήσιας κλίμακας και ο εντοπισμός του συντελεστή Hurst ισούται με 0.75



Διάγραμμα 4.32 Ενδεικτικά εμπειρικά κλιμακογράμματα για σταθμούς της Αμερική οι οποίοι διευθετούν πάνω από 14 χρόνια μετρήσεων

5 ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

5.1 Σύνθεση στοχαστικού μοντέλου

Πλέον έχοντας πραγματοποιήσει, όλες τις προηγούμενες αναλύσεις που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία, διαθέτουμε τα απαραίτητα, στοιχεία ώστε να προσπαθήσουμε να συνθέσουμε ένα ψευδο-κυκλοστάσιμο μοντέλο αναπαραγωγής ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας. Αναφέρουμε επιγραμματικά τα βήματα της μελέτης, τα οποία ήταν απαραίτητα να πραγματοποιηθούν, για να αποκτήσουμε όλα τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Αρχικά, με την υιοθέτηση και χρήση του συντελεστή αιθριότητας K_T προσεγγιστικά αφαιρούμε από την διεργασία την εποχικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της αδιαστατοποίησης της με τελικό πεδίο τιμών σε $[0,1]$. Πρακτικά, πλέον με τον ωριαίο συντελεστή αιθριότητας περιγράφουμε τη στοχαστική δομή της ατμόσφαιρας, η οποία όπως παρατηρήθηκε παρουσιάζει ακόμα διπλή περιοδικότητα, λόγω διαφόρων παραγόντων, με τους πιο σημαντικούς αυτόν της νέφωσης (cloudness), της πυκνότητας και του πάχους της ατμόσφαιρας (air mass). Συνεπώς, με σκοπό την αποφυγή της προαναφερόμενης περιοδικότητας επιλέγουμε τον διαχωρισμού της εκάστοτε χρονοσειράς μελέτης, σε ανάλυση 12×24 (μήνες \times ώρες), δηλαδή στη δημιουργία 288 χρονοσειρών, εκ των οποίων ανάλογα με την τοποθεσία ενδιαφέροντος έχουμε διαφορετικό αριθμό περίπου μηδενικών χρονοσειρών λόγω της δύσης του ηλίου. Στη συνέχεια για τις παραπάνω χρονοσειρές προσαρμόσαμε την εμπειρική κατανομή με μια σύνθετη κατανομή αθροίσματος δύο κατανομών Kumaraswamy (εξίσωση 19) με συνολικά 5 παραμέτρους. Επίσης μελετήσαμε τις ετεροσυσχέτισεις μεταξύ των διαδοχικών ωρών και δείξαμε ότι δεν εμφανίζεται κάποιος κύκλος (διάγραμμα 4.31) ο οποίος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην μοντελοποίηση. Τέλος υπολογίσαμε την παράμετρο Hurst για την διεργασία του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας και κατ' επέκταση της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας ο οποίος προέκυψε ως μέσος όρο όλων των σταθμών ίσος με $H=0.75$.

Αρχικά, ο σκοπός μας είναι η παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών που ακολουθούν την γκαουσιανή κατανομή. Στην περίπτωση που η διεργασία μας δεν εμφάνιζε κάποιο είδος μακροπρόθεσμης εμμονής θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε μια γεννήτρια ασυσχέτιστων τυχαίων αριθμών ($H=0.5$, λευκός θόρυβος) με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση ένα (δείτε διαγράμματα 5.1 5.2), που θα ακολουθούσαν την γκαουσιανή κατανομή. Δεδομένου όμως, ότι

η διεργασία εμφανίζει $H=0.75$, δηλαδή ακολουθεί μια συμπεριφορά δυναμικής Hurst Kolmogorov, επιλέξαμε ένα μοντέλο συσχέτισης gHK για την συνθετική χρονοσειρά x που στοχεύει στην έκφραση της εμπειρικής διεργασίας. Η έκφραση του θεωρητικού κλιμακογράμματος για το συγκεκριμένο μοντέλο δίνεται από τον τύπο (21) όπου m η χρονική υστέρηση, ο συντελεστής q ισούται με ένα και H είναι ίσος με την υπολογισμένη παράμετρο Hurst από το κλιμακόγραμμα ελάχιστα προσαναξημένος λόγω της μεροληψίας (bias) $H=0.8$:

$$\gamma(m) = \frac{1}{\left(1 + \frac{m}{q}\right)^{2-2H}} \quad (21)$$

Η συνθετική χρονοσειρά x που θα ακολουθεί την γκαουσιανή κατανομή με τυπική απόκλιση 1 και μέση τιμή μηδέν επιτυγχάνεται με την τεχνική των τυχαίων διακυμάνσεων πολλαπλής κλίμακας δηλαδή με το άθροισμα επτά Markov μοντέλων AR(1) (SAR; Dimitriadis and Koutsoyiannis, 2015). Το μοντέλο AR(1) αποτελεί ένα από τα πιο απλά στοχαστικά μοντέλα ανελίξεων το οποίο διατηρεί ορισμένη μνήμη στις μικρές κλίμακες. Επιλέξαμε επτά AR(1) διότι θέλουμε να δημιουργήσουμε μία ωριαία συνθετική χρονοσειρά 15 χρόνων δηλαδή πάνω 131.000 τιμές και δεδομένου ότι από την βιβλιογραφία, (Koutsoyiannis, 2002) γνωρίζουμε ότι με την χρήση τριών AR(1) μπορούμε να μοντελοποιούμε μέχρι χρονική υστέρηση 1000, προχωρήσαμε λοιπόν στην αύξηση του αθροίσματος. Όμως παρατηρούμε ότι με την προσθήκη κάθε AR(1) αυξάνουμε εκθετικά το βήμα της δυνατότητας υστέρησης, έτσι καταλήγουμε στον αριθμό επτά. Η έκφραση του θεωρητικού κλιμακογράμματος για ένα μοντέλο Markov δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\gamma(m) = \frac{2\lambda}{\left(\frac{m}{q}\right)^2} \left(\frac{m}{q} + e^{-\frac{m}{q}} - 1\right) \quad (22)$$

Στόχος μας είναι τα Markov κλιμακογράμματα όταν αθροιστούν να μας δίνουν την έκφραση του θεωρητικού κλιμακογράμματος (τύπος 21) που υποθέτουμε ότι περιγράφει το εμπειρικό κλιμακόγραμμα της διεργασίας. Με αυτόν τον τρόπο παράγουμε την νέα συνθετική χρονοσειρά η οποία ακολουθεί μεν γκαουσιανή κατανομή αλλά έχει και συσχέτιση Hurst. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την χρήση του μοντέλου SAR και την εύρεση των συντελεστών αυτοσυσχέτισης και των εκάστοτε τυπικών αποκλίσεων των επτά AR(1) δείτε στην βιβλιογραφία (Dimitriadis and Koutsoyiannis, 2015).

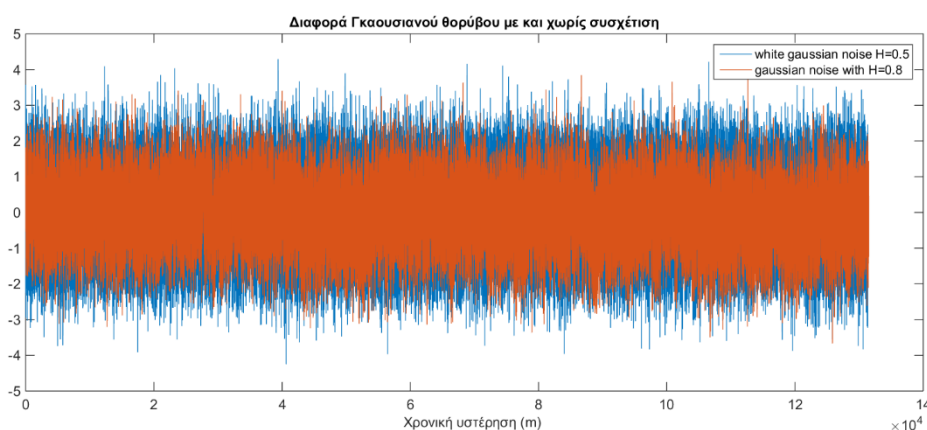
Έχοντας πλέον παράγει την συνθετική χρονοσειρά x (διάγραμμα 5.1) υπολογίζουμε την αντίστοιχη Γκαουσιανή αθροιστική κατανομή πιθανότητας. Σε αυτό το σημείο αναλύεται η Γκαουσιανή χρονοσειρά σε ανάλυση χρονοσειρών 12×24 με σκοπό την προσθήκη των κύκλων της εμπειρικής διεργασίας. Αυτό επιτυγχάνεται εξισώνοντας την εκάστοτε χρονική υστέρηση των 288 χρονοσειρών με την αθροιστική σύνθετη συνάρτηση κατανομής των δύο περιθώριων κατανομών Kumaraswamy. Όμως γνωρίζοντας ότι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της Kumaraswamy είναι γνησίως αύξουσα στο διάστημα $[0,1]$ αποδεικνύεται ότι και το άθροισμα των κατανομών θα είναι γνησίως αύξουσα συνάρτηση (εξίσωση 19). Έτσι μπορούμε να συνεχίσουμε υπολογίζοντας το εκάστοτε x , δηλαδή πλέον την μοντελοποιημένη τιμή του συντελεστή αιθριότητας K_T , αντιστρέφοντας την κατανομή και λαμβάνοντας υπόψη, από την ανάλυση, τις πέντε ήδη υπολογισμένες παραμέτρους. Όμως επειδή η εξίσωση 19 αποτελεί διπλό άθροισμα κατανομών δεν επιδέχεται αναλυτική λύση η αντιστροφή για αυτό πραγματοποιούμε αριθμητική αντιστροφή κατανομής. Τελευταίο βήμα, επειδή το μοντέλο παράγει 12×24 χρονοσειρές πραγματοποιούμε μία αναδιάταξη των τιμών έτσι ώστε να προκύψει ολόκληρη η συνθετική χρονοσειρά.

Η μαθηματική έκφραση του μοντέλου ορίζεται ως :

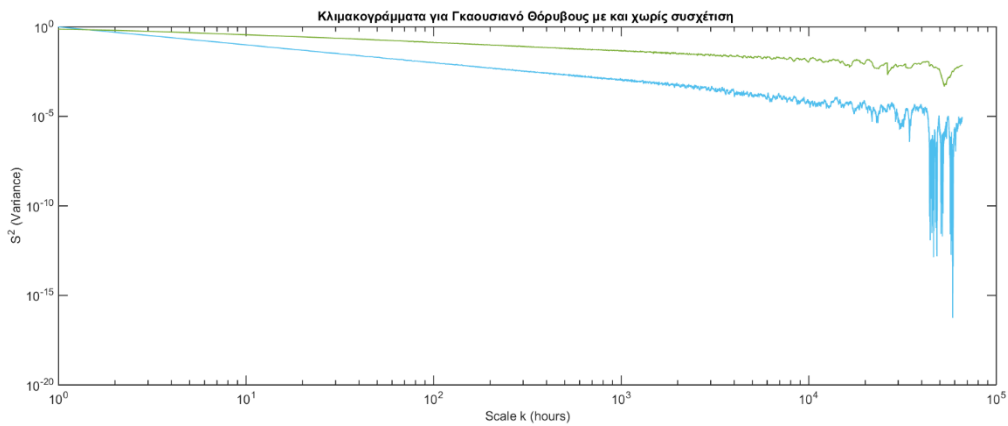
$$x_{model}^{(m)} = F_k^{(-1)} \left(F_g \left(x_{g,H}^{(m)} \right); \lambda, \alpha_1, b_2, \alpha_2, b_2 \right) \quad (21)$$

- Όπου (m) συμβολίζουμε την χρονική υστέρηση.
- Με δείκτες k,g τις κατανομές Kumaraswamy και Gaussian.
- Με δείκτη H την παράμετρο Hurst

Με το συγκεκριμένο μοντέλο αποδεικνύεται ότι διατηρούμε την κατανομή πυκνότητας πιθανότητας συνεπώς και την κατανομή αθροιστικής πιθανότητας, τις τέσσερις πρώτες κεντρικές ροπές (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία και κύρτωση) και τον συντελεστή Hurst δηλαδή την μακροχρόνια συσχέτιση. Όμως είναι αναμενόμενο να μην έχουμε ακριβή ταύτιση μεταξύ των ετεροσυσχετίσεων διαδοχικών ωρών. Μάλιστα όπως φαίνεται από το διάγραμμα 5.5 όχι μόνο διατηρούμε την παράμετρο Hurst αλλά και την κλίση του κλιμακογράμματος για όλες τις κλίμακες (ώρες μέρες χρόνια) καθώς και τα αντίστοιχα σπασίματα εμφάνισης περιοδικότητας. Επίσης θεωρώντας ότι η τιμή του συντελεστή K_T δεν είναι αποδεκτή να ισούται με την μονάδα και αποδίδεται σε λανθασμένες μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας πιθανώς λόγω σφάλματος του οργάνου. Συνεπώς, επιλέγουμε να μην την μοντελοποιούμε σαν τιμή. Για αυτό τον λόγο μέγιστη τιμή του μοντέλου μας είναι 0.98. Προκύπτει λοιπόν ότι η συνθετική χρονοσειρά (βλέπετε διάγραμμα 5.3) να είναι ελαφρά αυξημένη κατά 1-2% δεδομένου ότι προσπαθεί το μοντέλο να κρατήσει σταθερά τα προηγούμενα μεγέθη, όμως λαμβάνοντας την ηλιακή σταθερά 1.367 w/m^2 που αποτελεί την μέγιστη δυνητική τιμή μέτρησης το σφάλμα θα αντιστοιχεί σε $14\text{-}28 \text{ w/m}^2$ το οποίο θεωρείται αμελητέο. Για παράδειγμα ένα μέσο πυρόμετρο έχει σφάλμα μετρήσεων $\pm 10 \text{ w/m}^2$.



Διάγραμμα 5.1 Σύγκριση μεταξύ γκαουσιανού θορύβου με συσχέτιση και χωρίς

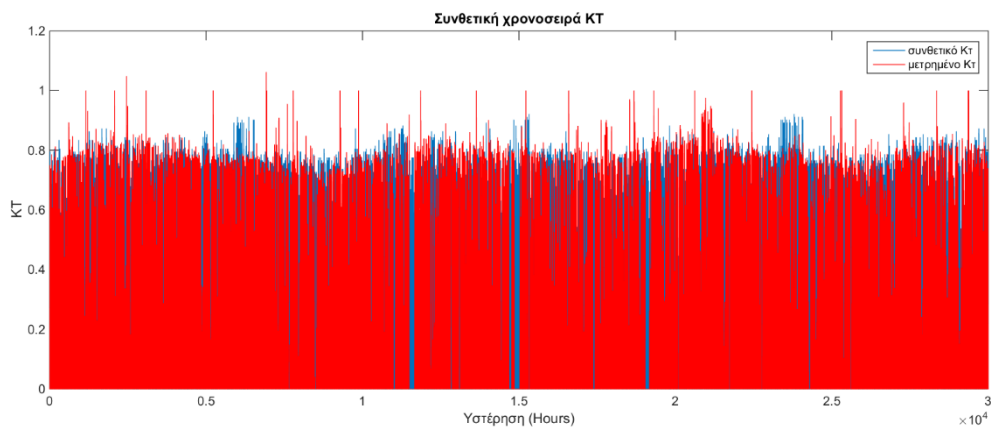


Διάγραμμα 5.2 Σύγκριση κλίσης κλιμακογράμματος μεταξύ γκαουσιανού θορύβου με και χωρίς συσχέτιση

5.2 Εφαρμογή του μοντέλου

5.2.1 Σταθμός Denver

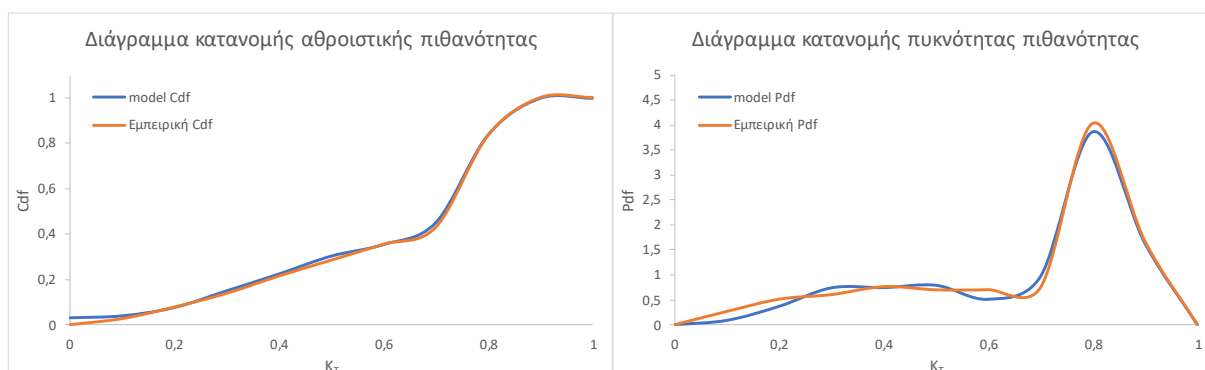
Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για όλους τους σταθμούς της βάσης NRLE εμείς παραθέτουμε τα απαραίτητα διαγράμματα εφαρμογής για τον σταθμό του Denver.



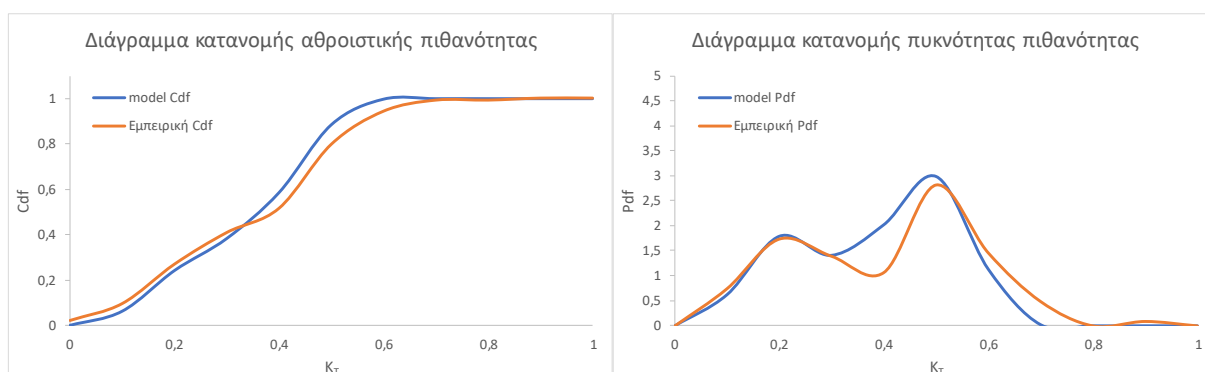
Διάγραμμα 5.3 Συνθετική χρονοσειρά συντελεστή αιθριότητας για τον σταθμό Denver

Παραθέτουμε τα ενδεικτικά στοιχεία για τις κεντρικές ροπές και τα ορισμένα διαγράμματα καλής και κακής προσαρμογής των κατανομών πυκνότητας πιθανότητας και αθροιστικής πιθανότητας.

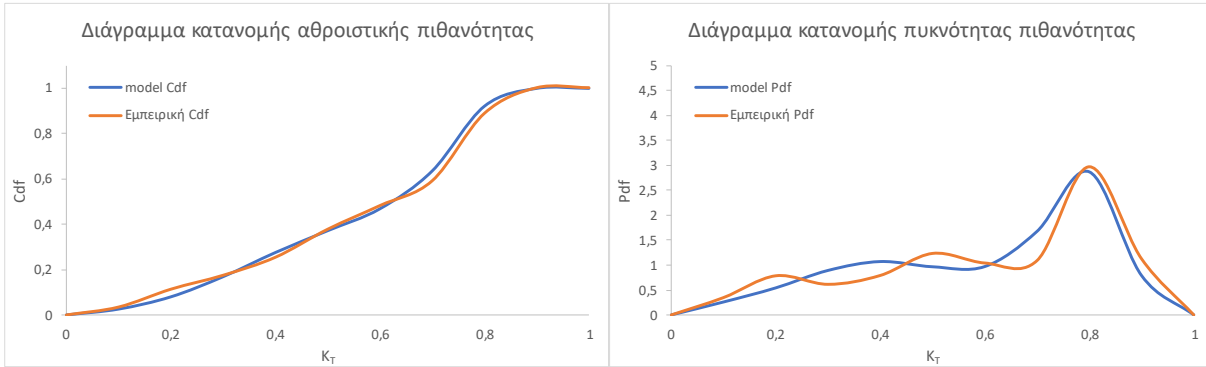
9 ^{ος} μήνας ώρα 13:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,609	0,236	-1,043	-0,113
Εμπειρική	0,615	0,226	-0,999	-0,356



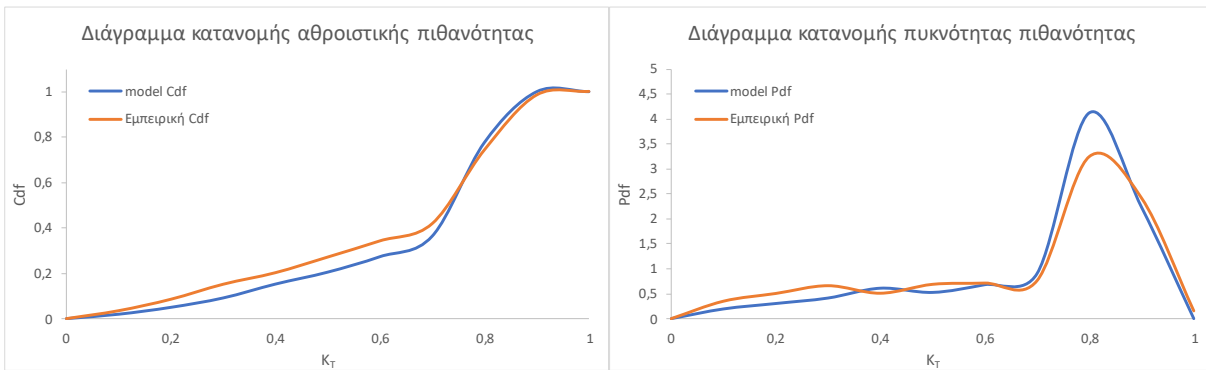
3 ^{ος} μήνας ώρα 7:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,339	0,145	-0,308	-1,021
Εμπειρική	0,349	0,180	-0,091	-0,844



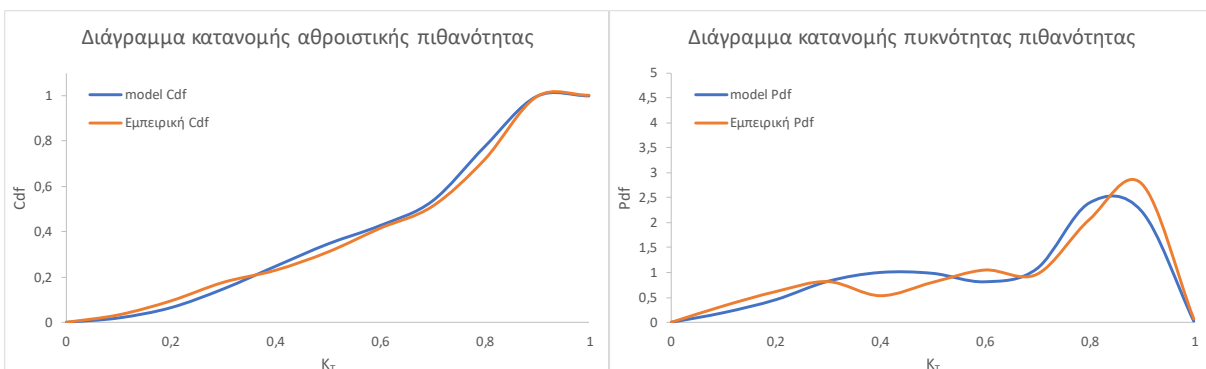
8 ^{ος} μήνας ώρα 13:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,558	0,219	-0,596	-0,825
Εμπειρική	0,559	0,234	-0,611	-0,885



5 ^{ος} μήνας ώρα 10:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,662	0,208	-1,372	0,836
Εμπειρική	0,629	0,236	-1,018	-0,315

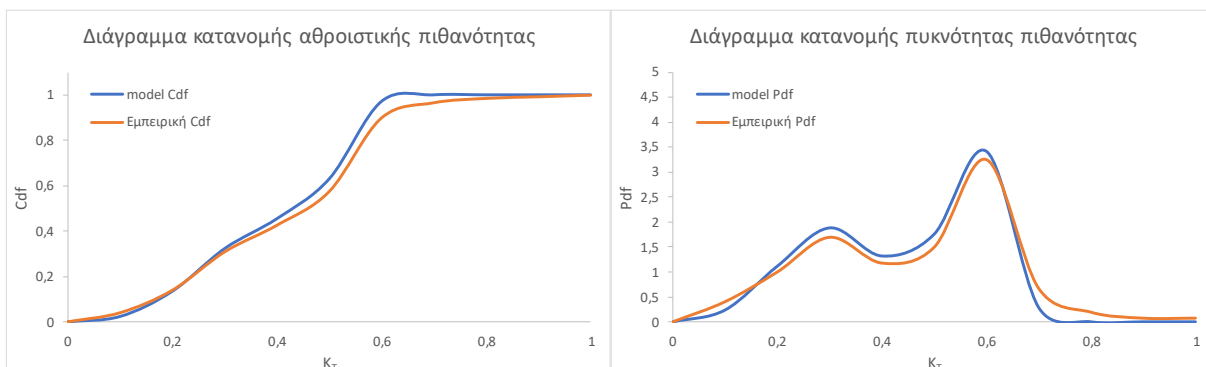


5 ^{ος} μήνας ώρα 12:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,599	0,231	-0,609	-0,901
Εμπειρική	0,600	0,242	-0,748	-0,738

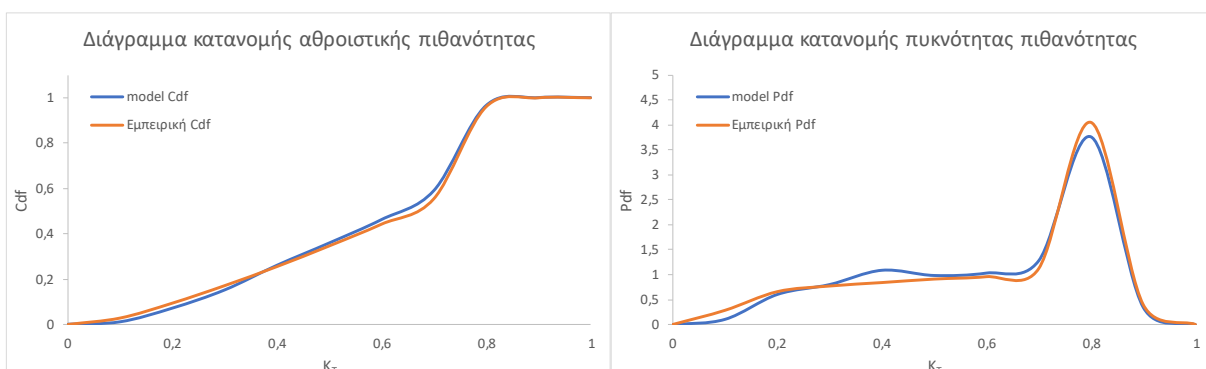


9 ^{ος} μήνας ώρα 8:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
-----------------------------------	-----------	--------------------	------------	---------

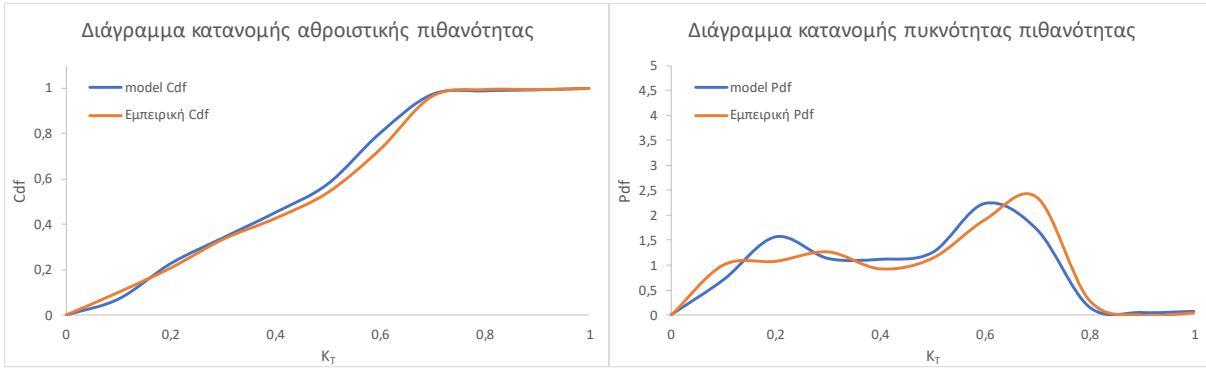
Μοντέλου	0,402	0,154	-0,388	-1,150
Εμπειρική	0,417	0,182	-0,086	-0,368



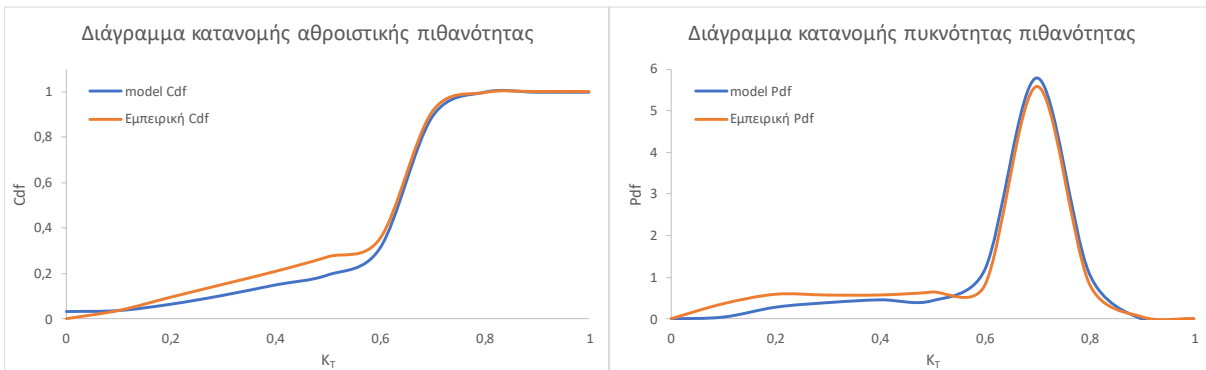
3 ^{ος} μήνας ώρα 9:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,570	0,212	-0,645	-0,861
Εμπειρική	0,562	0,221	-0,752	-0,701



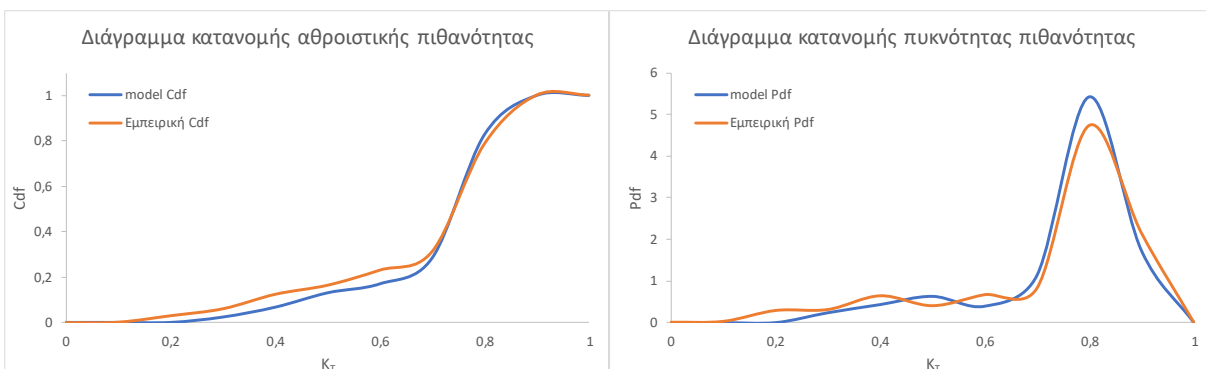
4 ^{ος} μήνας ώρα 7:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,411	0,205	-0,100	-0,948
Εμπειρική	0,421	0,212	-0,302	-1,157



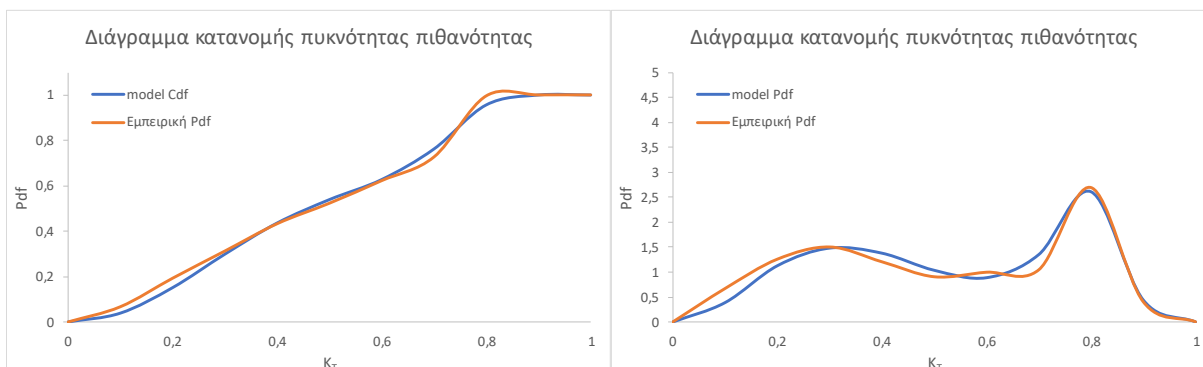
6 ^{ος} μήνας ώρα 7:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,582	0,176	-1,928	2,892
Εμπειρική	0,553	0,188	-1,307	0,442



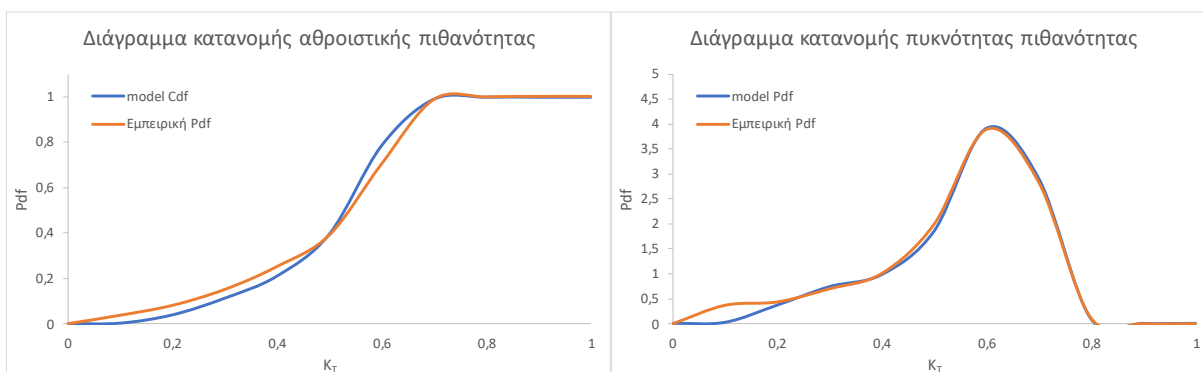
7 ^{ος} μήνας ώρα 11:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,705	0,140	-1,666	1,939
Εμπειρική	0,684	0,181	-1,557	1,341



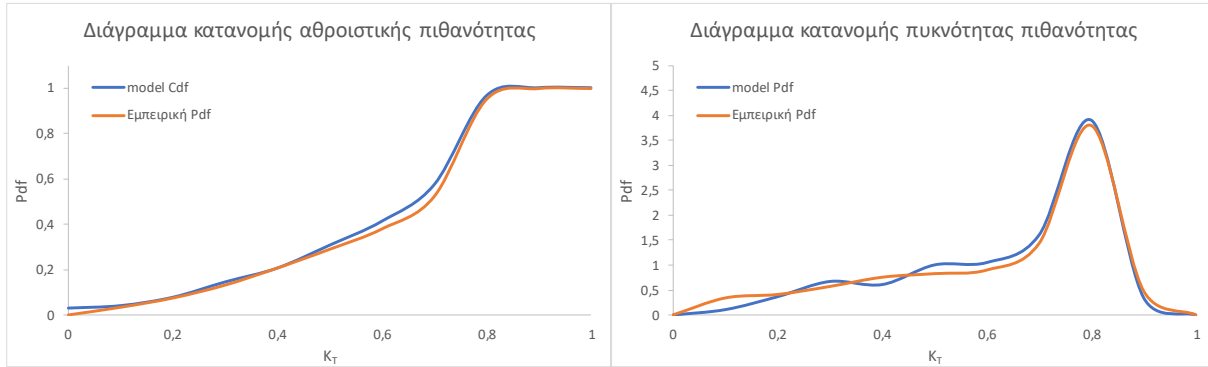
7 ^{ος} μήνας ώρα 16:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,473	0,230	-0,069	-1,345
Εμπειρική	0,463	0,239	-0,199	-1,352



8 ^{ος} μήνας ώρα 7:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,499	0,129	-0,918	0,229
Εμπειρική	0,493	0,165	-1,112	0,306

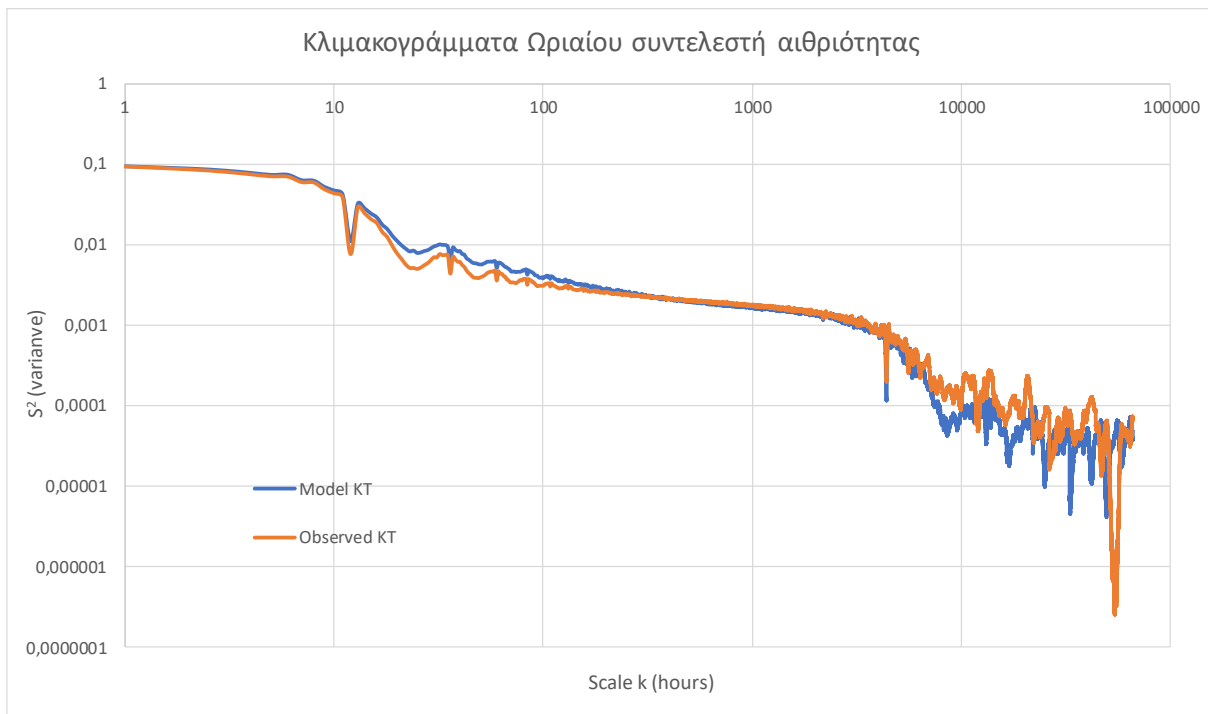


11 ^{ος} μήνας ώρα 14:00	μέση τιμή	τυπική απόκλιση	ασυμμετρία	κύρτωση
Μοντέλου	0,580	0,216	-1,049	0,147
Εμπειρική	0,587	0,210	-1,023	-0,127



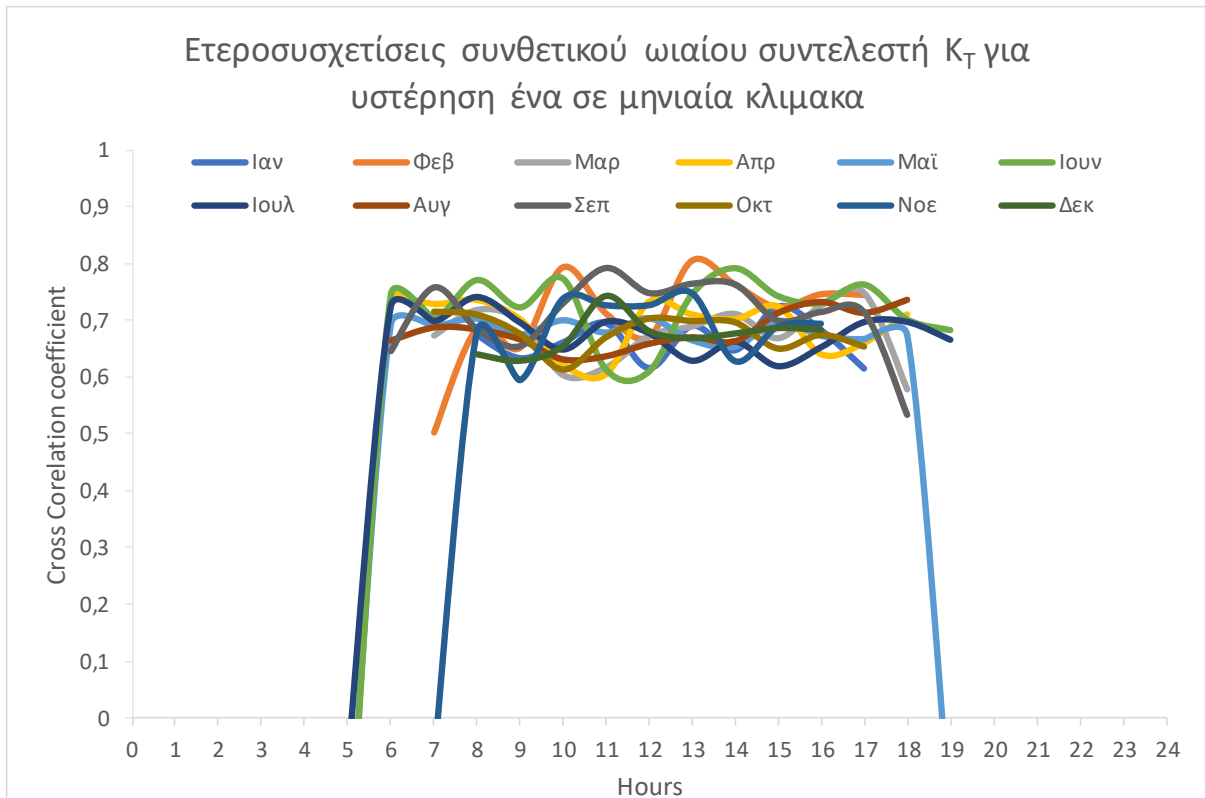
Διάγραμμα 5.4 Ενδεικτικά συγκριτικά στοιχεία για τις κεντρικές ροπές και διαγράμματα καλή και κακής προσαρμογής των κατανομών πυκνότητας πιθανότητας και αθροιστικής πιθανότητας για τον σταθμό Denver.

Παρατηρούμε διατήρηση των κλίσεων του κλιμακογράμματος σε όλες τις χρονικές κλίμακες όπως φαίνεται από το επόμενο διάγραμμα 5.5 συνεπώς και διατήρηση της παραμέτρου Hurst περίπου με 0.75



Διάγραμμα 5.5 Σύγκριση κλιμακογράμματος μοντελοποιημένου και εμπειρικού συντελεστή αιθριότητας

Τέλος παραθέτουμε το διάγραμμα των ετεροσυσχετίσεων για τις διαδοχικές ώρες το οποίο δεν παρουσιάζει κάποιον εμφανή κύκλο, το οποίο είναι αναμενόμενο αφού δεν μοντελοποιούμε τις ετεροσυσχετίσεις. Συγκριτικά υπενθυμίζουμε το διάγραμμα 4.30.



Διάγραμμα 5.6 Διάγραμμα ετεροσυσχετίσεων συνθετικού ωριαίου συντελεστή αιθριότητας μεταξύ διαδοχικών ωρών lag(1) για τον σταθμό Denver

Στο παράρτημα παραθέτουμε αναλυτικά όλους τους κώδικες (Scripts) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελεύθερα σε περιβάλλον Matlab με σκοπό την αναπαραγωγή όλων των επιθυμητών πληροφοριών, οι οποίες, αφορούν αρχικά την ανάλυση χρονοσειρών και υπολογισμό παραμέτρων, εύρεση παραμέτρου Hurst, εύρεση ετεροσυσχετίσεων και τέλος μόντωση του μοντέλου με σκοπό την αναπαραγωγή του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την εργασία, διερευνώνται οι στατιστικές ιδιότητες της ηλιακής ακτινοβολίας σε μηνιαία κλίμακα, με ημερήσιο και ωριαίο βήμα και εισαγάγετε μια νέα κατανομή (Kumaraswamy), ικανή να περιγράψει επαρκώς, την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία. Η καλή προσαρμογή της κατανομής σε ημερήσιο επίπεδο, ελέγχεται με την χρήση και εφαρμογή τριών τεστ, Δοκιμών προσαρμογής και ένα κριτήριο επιλογής μοντέλου, για την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία. Σε ωριαίο επίπεδο κρίθηκε, ότι η ηλιακή ακτινοβολία, δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί με μία μόνο κατανομή, λόγω της εμφάνισης δικόρυφων κατανομών, οι οποίες οφείλονται κυρίως στο στοχαστικό παράγοντα της νέφωσης. Με στόχο την μοντελοποίηση της ωριαίας ακτινοβολίας, γίνεται χρήση του συντελεστή αιθριότητας K_T . Με την αξιοποίηση του συντελεστή αιθριότητας, γενικεύουμε την μεταβλητή μας σε παγκόσμια κλίμακα με πεδίο τιμών $[0,1]$ και γίνεται επίτευξη της περιγραφής των συνθηκών ατμόσφαιρας που επηρεάζουν την διεργασία της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας. Συνεπώς πραγματοποιείται ανάλυση του ημερήσιου και ωριαίου συντελεστή αιθριότητας. Σε ημερήσιο βήμα με ετήσια κλίμακα, η Kumaraswamy κατανομή, εμφανίζει πολύ καλή προσαρμογή στις περιοχές, όπου ο παράγοντας της νέφωσης δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Όμως σε ωριαίο βήμα, με μηνιαία κλίμακα, παρατηρούμε ακόμα την εμφάνιση διπλής περιοδικότητας, η οποία αποδίδεται στην ύπαρξη νέφωσης, καθώς και στο πάχος της ατμόσφαιρας (air mass). Λόγω των προηγούμενων παραγόντων, δημιουργήθηκε μια νέα σύνθετη κατανομή διπλού αθροίσματος Kumaraswamy κατανομών, συνολικά 5 παραμέτρων, ικανή να περιγράψει την εμπειρική διεργασία του ωριαίου συντελεστή αιθριότητας K_T σε παγκόσμια κλίμακα. Επίσης ελέγχεται η στοχαστική δομή της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας με την χρήση του κλιμακογράμματος και προκύπτει ότι η διεργασία, ακολουθεί μια δυναμική συμπεριφορά μακροπρόθεσμης εμμονής Hurst-Kolmogorov, αφού η παράμετρος Hurst υπολογίζεται κατά μέσο όρο ίση με 0.75. Τέλος γνωρίζοντας όλα τα προαναφερόμενα στοιχεία και τις δομές, που απαρτίζουν τον ωριαίο συντελεστή αιθριότητας K_T και κατ' επέκταση την ωριαία ηλιακή ακτινοβολία, δημιουργείται ένα ψεύδο-κυκλοστάσιμο μοντέλο αναπαραγωγής συνθετικών χρονοσειρών. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για 40 σταθμούς και αποδεικνύεται ότι διατηρεί, σταθερή την κατανομή της διεργασίας σε ωριαίο επίπεδο, τις τέσσερις πρώτες κεντρικές ροπές και την παράμετρο Hurst που εκφράζει την μακροπρόθεσμη εμμονή και συσχέτιση.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

7.1 Ξενόγλωσση

F. Youcef Ettoumi, A. Mefti, A. Adane and M. Y. Bouroubi. (2002) "Statistical analysis of solar measurements in Algeria using beta distributions", *Renew. Energy*, vol. 26, no. 1 May (2002): 47-67.

Giannis Koudouris, Panayiotis Dimitriadis, Theano Iliopoulou, Nikos Mamassis and Demetris Koutsoyiannis. Investigation of the stochastic nature of solar radiation for renewable resources management. At: Vienna, Austria, Ordinal: Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, EGU2017-10189-4 04/2017

Mitnik, P.A. (2013). "New properties of the Kumaraswamy distribution." *Commun. Stat. – Theory Methods* 42.5 (2013):741–755

Jones, M. C. (2009) : "Kumaraswamy's distribution: A beta-type distribution with some tractability advantages." *Statistical Methodology* 6.1: 70-81.

Sakamoto, Y., Ishiguro, M. and Kitagawa G. (1986). Akaike Information Criterion Statistics. D. Reidel Publishing Company.

Durbin, J. (1973), Distribution theory for tests based on the sample distribution function. SIAM
George Marsaglia, Wai Wan Tsang and Jingbo Wang. (2003) "Evaluating Kolmogorov's distribution" *Journal of Statistical Software* (2013): 8/18

Csörgo, S. and Faraway, J.J. (1996) "The exact and asymptotic distributions of Cramér-von Mises statistics." *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 58 (1996): 221–234

Marsaglia, G. and Marsaglia, J. (2004) "Evaluating the Anderson-Darling Distribution." *Journal of Statistical Software* 9.2 February (2004):1–5.

Burnham, K.P. and Anderson, D.R. (2002). Information and likelihood theory: a basis for model selection and inference. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach (2002): 49–97.

Koutsoyiannis D. (2010) "A random walk on water." *Hydrology and Earth System Sciences* 14 (2010): 585–601

Dimitriadis, P. and Koutsoyiannis, D. (2015). "Climacogram versus autocovariance and power spectrum in stochastic modelling for Markovian and Hurst–Kolmogorov processes." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 29.6 (2015): 1649–1669.

Markonis, Yannis, and Demetris Koutsoyiannis. (2013). "Climatic variability over time scales spanning nine orders of magnitude: Connecting Milankovitch cycles with Hurst–Kolmogorov dynamics." *Surveys in Geophysics* 34.2 : 181-207.

P. Dimitriadis, and D. Koutsoyiannis. (2015) "Application of stochastic methods to double cyclostationary processes for hourly wind speed simulation." *Energy Procedia* 76 (2015): 406–411

E. Deligiannis, P. Dimitriadis, O. Daskalou, Y. Dimakos, and D. Koutsoyiannis. (2016) "Global investigation of double periodicity of hourly wind speed for stochastic simulation; application in Greece." *Energy Procedia* 97 (2016): 278–285.

R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Thomas W. Yee (2015). *Vector Generalized Linear and Additive Models: With an Implementation in R*. New York, USA: Springer.

Marie Laure Delignette-Muller and Christophe Dutang (2015). *fitdistrplus: "An R Package for Fitting Distributions."* *Journal of Statistical Software* 64.4 (2015): 1-34

Adrian Baddeley (2017). Cramer-Von Mises and Anderson-Darling tests of goodness-of-fit for continuous univariate distributions, using efficient algorithms. R package 1.1-1

Asquith, W.H., 2017, *lmomco---L-moments, censored L-moments, trimmed L-moments, L-comoments, and many distributions*. R package version 2.2.7, Texas Tech University, Lubbock, Texas.

Reno, M. J., Hansen, C. W., & Stein, J. S. (2012). "Global horizontal irradiance clear sky models: Implementation and analysis". SANDIA report SAND2012-2389.

Koutsoyiannis, D. (2002). "The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy". *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), 573-595

Arabali, A., Ghofrani, M., Etezadi-Amoli, M., Fadali, M. S., & Baghzouz, Y. (2013). Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(1), 162-170.

Fernández-Peruchena, Carlos M., and Ana Bernardos. (2015) "A comparison of one-minute probability density distributions of global horizontal solar irradiance conditioned to the optical air mass and hourly averages in different climate zones." *Solar Energy* 112: 425-436.

Sung, Taehong, Sang Youl Yoon, and Kyung Chun Kim. (2015) "A mathematical model of hourly solar radiation in varying weather conditions for a dynamic simulation of the solar organic rankine cycle." *Energies* 8.7: 7058-7069.

7.2 Ελληνόγλωσση

Κουτσογιάννης Δ., *Σημειώσεις Στοχαστικών Μεθόδων στους Υδατικούς Πόρους*, Έκδοση 4, 100 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013

Η. Δεληγιάννης, "Διερεύνηση διπλής κυκλοστασιμότητας ανέμου για εφαρμογή σε στοχαστικά μοντέλα πρόβλεψης", Διπλωματική εργασία, 119 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2016.

Μ. Καραναστάση, "Διερεύνηση δυνατοτήτων βέλτιστης αξιοποίησης υδρο-ενεργειακών πόρων περιοχής Αχελώου-Θεσσαλίας", Μεταπτυχιακή εργασία, 240 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Φεβρουάριος 2017.

Φ. Μαλτέζος, "Αποτίμηση λειτουργίας φωτοβολταϊκών σταθμών", Διπλωματική εργασία, 121 pages, Οκτώβριος 2013.

Δ. Κουτσογιάννης, *Σημειώσεις Υδρομετεωρολογίας - Μέρος 1*, Έκδοση 2, 157 pages, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.

Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδας "Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων ", Θεσσαλονίκη Απρίλιος 2011.

7.3 Ηλεκτρονικές Ιστοσελίδες

<http://www.ftexploring.com/solar-energy/direct-and-diffuse-radiation.htm> (Direct, Diffuse and Reflected Radiation)

<http://itouchmap.com/latlong.html> (Latitude and Longitude of a Point)

<http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/nasa-sse> (Solar radiation data)

https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/6163/1/02_chapter_5.pdf (Ηλιακή γεωμετρία και ακτινοβολία)

https://www.nrel.gov/rredc/solar_data.html (Solar Resource Data)

http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/noaa/ (Solar Data)

http://matlab.wikia.com/wiki/MATLAB_Wiki

<https://www.rstudio.com/products/rpackages>

<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse> (Surface meteorology and Solar Energy)

<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/nsrdb-solar/> (NRLE-NSRDB database)

<https://isccp.giss.nasa.gov/role.html> (International Satellite Cloud Climatology Project)

<http://hoa.ntua.gr> (Hydrological Observatory of Athens)

8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

8.1 Acknowledgments

Όλες οι αναλύσεις που αφορούν τους σταθμούς της Αθήνας πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια υπολογιστικών φύλλων (excel) και με την χρήση του Solver. Ακόμα στο προγραμματιστικό περιβάλλον της matlab πραγματοποιήθηκαν όλες οι απαραίτητες αναλύσεις καθώς και η εφαρμογή του μοντέλου για τις βάσεις δεδομένων της NRLE- NSRDB. Εδώ αξίζει να σχολιάσουμε για λόγους πληρότητας ότι ενώ ο solver της matlab θεωρείται σίγουρα ταχύτερος και πιο ακριβής σε σχέση με του excel, εμείς παρατηρήσαμε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις υπολογισμού παραμέτρων φαίνεται να υστερούσε. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα το αποδίδουμε στην πληθώρα δεδομένων που καλείται να επεξεργαστεί. Τέλος όλα τα στατιστικά test που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο της καλής προσαρμογής (Goodness of fit test and Selection criterion) υπολογίστηκαν στο στατιστικό περιβάλλον της R με την χρήση των πακέτων VGAM, fitdistrplus, goftest and lmomco.

8.2 Κώδικες (Scripts) σε περιβάλλον matlab

Παραθέτουμε με την σειρά τους κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία, ανάλυση και τέλος την εφαρμογή του μοντέλου.

8.2.1 Δημιουργία και σύνθεση ενιαίων βάσεων δεδομένων

```
clc; clear all; format long;
Dir='C:\Users\koudo\Desktop\vaseis_ameriki';
load('Names.txt'); for I=1:40; Name{I}=Names(I,:); end
DH{I}=[]; GDM{I}=[];
for I=1:40
for Y=1991:2005
file=fopen([Dir '\ ' num2str(Name{I}) '\nsrdb_solar\' ' num2str(Name{I}) '\ ' num2str(Name{I}) '_' num2str(Y)
'.csv'],'r');
A=textscan(file,'%s','Delimiter',';'); fclose(file);
clear GDd GDn
for J=1: numel(A{1})/26-1;
GDd(J,1)=A{1}(26*J+1);
GDd(J,2)=A{1}(26*J+2);
GDn(J,1)=str2double(A{1}(26*J+5)); if GDn(J,1)<0; GDn(J,1)=NaN; end
```

```

GDn(J,2)=str2double(A{1}(26*J+16)); if GDn(J,2)<0; GDn(J,2)=NaN; end
GDn(J,3)=GDn(J,2)/GDn(J,1); if GDn(J,1)==0; GDn(J,3)=0; end
end
DH{I}=[DH{I};GDd]; GDM{I}=[GDM{I};GDn]; [I Y]
end
GDMall(:,I)=GDM{I}(:,3);
xlswrite(['GDM_' num2str(Name{I}) '.xlsx'],DH{I},num2str(Name{I}),'B2');
xlswrite(['GDM_' num2str(Name{I}) '.xlsx'],GDM{I},num2str(Name{I}),'D2');
end
xlswrite('GDM.xlsx',DH{20},'GDM','A2');
xlswrite('GDM.xlsx',GDMall,'GDM','C2');
DHall=DH{20}; save('GDM.mat','DHall','GDMall');

```

8.2.2 Προσαρμογή της κατανομής, εύρεση παραμέτρων και υπολογισμός του κλιμακογράμματος

```

clc; clear all; format long;
load('Names.txt'); for I=1:40; Name{I}=Names(I,:); end
load('GDM.mat','DHall','GDMall'); load('YMH.txt');
X=(0:0.01:1); Y=(X(1:end-1,1)+X(2:end,1))/2;
C0=[0 0.001 0.001 2 2]; LB=[0,10^-3,10^-3,10^-3,10^-3]; UB=[1,10^2,10^2,10^2,10^2];
for I=1:40;
for M=1:12;
for H=1:24;
HM=GDMall(((YMH(:,2)==M)&(YMH(:,3)==H)),I);
for J=1:numel(X); CDF(J,H,M,I)=numel(find(HM<=X(J)))/numel(HM); end
PDF(:,H,M,I)=(CDF(2:end,H,M,I)-CDF(1:end-1,H,M,I))./(X(2:end)-X(1:end-1));
Fmin=@(C) sum(abs(PDF(:,H,M,I)-(C(1)*(C(2)*C(3)).*(Y.^C(2)-1)).*(1-Y.^C(2)).^C(3)-1)+(1-
C(1))*(C(4)*C(5)).*(Y.^C(4)-1)).*(1-Y.^C(4)).^C(5)-1));
C=fmincon(Fmin,C0,[],[],[],[],LB,UB);
Er(H,M,I)=sum(abs(PDF(:,H,M,I)-(C(1)*(C(2)*C(3)).*(Y.^C(2)-1)).*(1-Y.^C(2)).^C(3)-1)+(1-
C(1))*(C(4)*C(5)).*(Y.^C(4)-1)).*(1-Y.^C(4)).^C(5)-1));
L(H,M,I)=C(1); A1(H,M,I)=C(2); B1(H,M,I)=C(3); A2(H,M,I)=C(4); B2(H,M,I)=C(5);
KUM(:,H,M,I)=(C(1)*(C(2)*C(3)).*(Y.^C(2)-1)).*(1-Y.^C(2)).^C(3)-1)+(1-C(1))*(C(4)*C(5)).*(Y.^C(4)-
1)).*(1-Y.^C(4)).^C(5)-1);
Par(:,H,M,I)=[Er(H,M,I) A1(H,M,I) B1(H,M,I) A2(H,M,I) B2(H,M,I)];
[I M H Er(H,M,I) A1(H,M,I) B1(H,M,I) A2(H,M,I) B2(H,M,I)]
end
end
Pars=[L(:,:,I) A1(:,:,I) B1(:,:,I) A2(:,:,I) B2(:,:,I)];
xlswrite(['PDF' num2str(Name{I}) '.xlsx'],Pars,'PDF_Param','A1')
for J=1:15; GDMY(J,I)=nanmean(GDMall((YMH(:,1))==J+1990),I); end
for J=1:7; clear Sy; for K=1:floor(numel(GDMY(:,I))/J); Sy(K,1)=nanmean(GDMY(J*(K-1)+1:J*K,I)); end;
Cly(J,I)=nanvar(Sy); end
for J=1:131496/2; clear Sa; for K=1:floor(numel(GDMall(:,I))/J); Sa(K,1)=nanmean(GDMall(J*(K-
1)+1:J*K,I)); end; Cla(J,I)=nanvar(Sa); end
end
xlswrite('Hurst.xlsx',Cly,'xronou_var','B2'); xlswrite('Hurst.xlsx',Cla,'Hour_var','B2');
save('PDFall2.mat','CDF','PDF','KUM','Er','Par','L','A1','B1','A2','B2','GDMY','Cly','Cla');

```

8.2.3 Έυρεση της μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης και κανονικοποίηση των χρονοσειρών

```

clc; clear all; format long;
load('Names.txt'); for I=1:40; Name{I}=Names(I,:); end
load('GDM.mat','DHall','GDMall'); load('YMH.txt');
GDMallU=numel(GDMall(:,1)),numel(GDMall(1,:));
for I=1:40;
for M=1:12;
for H=1:24;

```

```

HM=GDMall(((YMH(:,2)==M)&(YMH(:,3)==H)),I);
Mesi(H,M,I)=nanmean(HM);
Standard(H,M,I)=nanstd(HM);
GDMallU(((YMH(:,2)==M)&(YMH(:,3)==H)),I)=(GDMall(((YMH(:,2)==M)&(YMH(:,3)==H)),I)-
Mesi(H,M,I))/Standard(H,M,I);
[H M I]
end
end
end
save('MT.mat','Mesi','Standard','GDMallU')

```

8.2.4 Εύρεση κλιμακογράμματος κανονικοποιημένης χρονοσειράς

```

clc; clear all; format long;
load('Names.txt'); for I=1:40; Name{I}=Names(I,:); end
load('MT.mat','Mesi','Standard','GDMallU'); load('YMH.txt');
for I=1:40;
for J=1:131496/2; clear Sa;
for K=1:floor(numel(GDMallU(:,I))/J); Sa(K,1)=nanmean(GDMallU(J*(K-1)+1:J*K,I)); end;
Cla(J,I)=nanvar(Sa);
[I]
end
end
save('adiastatoklima.mat','Cla');
xlswrite('Hurstadiastato.xlsx',Cla,'Hour_var','B2');

```

8.2.5 Διαγράμματα κατανομών προσαρμογής

```

clc; clear all; format long;
load('Names.txt'); for I=1:40; Name{I}=Names(I,:); end
load('PDFFall.mat','CDF','PDF','KUM','Er','Par','L','A1','B1','A2','B2','GDMY','Cly','Cla')
load('New.mat','New','G'); load('YMH.txt');
load('analisi.mat','GDanalisi');
for I=40:40;
for M=5:5;
for H=10:10;
figure(1)
%clc(1)
figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
plot(PDF(:,H,M,I)); hold on;
plot(KUM(:,H,M,I));
title(['Σταθμός:',num2str(Name{I}),' - Μήνας:',num2str(M),' - Όρα:',num2str(H)]);
xlabel('KT'); % x-axis label
ylabel('Pdf'); % y-axis label
f=legend('Εμπειρική pdf','Kumaraswamy Pdf','Location','northwest');
set(f,'FontSize',10);
saveas(gcf,['PLOT' num2str(Name{I}) '_' num2str(M) '_' num2str(H),'.png']);
close all
end
end
end

```

8.2.6 Υπολογισμός ετεροσυσχετίσεων μεταξύ όλων των ωρών και δημιουργία διαγραμμάτων με χρονική υστέρηση ένα (lag 1)

```

clc; clear all; format long;
load('Names.txt'); for I=1:40; Name{I}=Names(I,:); end
load('analisi.mat','GDanalisi'); load('YMH.txt');
for I=40:40;

```

```

for M=1:12;
for H=1:24;
for L=M:12
for P=H:24
X1=GDanalisi(:,H,M,I); X2=GDanalisi(:,P,L,I);
X(P,L,H,M,I)=(numel(find(isnan(X1)==0))+numel(find(isnan(X2)==0)))/2/sqrt((numel(find(isnan(X1)==0))-
1)*(numel(find(isnan(X2)==0))-1))*nanmean((X1-nanmean(X1)).*(X2-nanmean(X2)))/nanstd(X1)/nanstd(X2);
end
end
[H M I]
end
end
end
end
save('etero.mat','X');
for I=40:40
for M=1:12
for K=1:23; Y(K)=X(K+1,M,K,M,I); hold on;
F(K,M)=Y(K);
plot(Y)
end
[M K]
xlswrite('eterosixetiseis.xlsx',F);
end
end

```

8.2.7 Υπολογισμός κλιμακογράμματος θορύβων και εύρεση παραμέτρου Hurst

```

clc; clear all; format long;
load('Names.txt'); for I=1:40; Name{I}=Names(I,:); end
load('MT.mat','Mesi','Standard','GDMallU'); load('YMH.txt');
load('PDFFall2.mat','CDF','PDF','KUM','Er','Par','L','A1','B1','A2','B2','GDMy','Cly','Cla');
load('SAR.mat','S');
P=normrnd(0,1,8760*15,1);
for I=1:40;
Sk(:,I)=P;
for J=1:131496/2; clear Sa;
for K=1:floor(numel(Sk(:,I))/J); Sa(K,1)=nanmean(Sk(J*(K-1)+1:J*K,I)); end;
Clk1(J,I)=nanvar(Sa);
[I]
end
K(:,I)=1:(131496/2);
Climac(:,I)=log(Cla(:,I));
Scale(:,I)=log(K(:,I));
loglog(Cla(:,I)); hold on;
HK{I}=polyfit(Scale(:,I),Climac(:,I),1);
%xlswrite('Hurst_model.xlsx',Clk,'Hour_var','B2');
end

save('8orivoi2.mat','Clk1');

```

8.2.8 Εφαρμογή μοντέλου και αναδιάταξη συνθετικής χρονοσειράς

```

clc; clear all; format long;
load('PDFFall.mat','CDF','PDF','KUM','Er','Par','L','A1','B1','A2','B2','GDMy','Cly','Cla');
load('YMH.txt'); load('analisi.mat','GDanalisi');
load('SAR.mat','S');

```

```

load('GDM.mat','DHall','GDMall');
% Year=15; %xronia prosomioshs
% P=normrnd(0,1,8760*(Year+1),1);
G=cdf('Normal',S,0,1);
X(:,1)=(0:0.01:1);
Sk=NaN(numel(S),1);
for I=1:40;
for M=1:12;
for H=1:24;
Di=G((YMH(:,2)==M)&(YMH(:,3)==H));
for B=1:numel(Di) %loupa adistrofis
K=L(H,M,I).*(1-(1-X(:,1)).^A1(H,M,I)).^B1(H,M,I)+(1-L(H,M,I)).*(1-(1-X(:,1)).^A2(H,M,I)).^B2(H,M,I));
E(:,1)=abs(Di(B)-(L(H,M,I).*(1-(1-X(:,1)).^A1(H,M,I)).^B1(H,M,I)+(1-L(H,M,I)).*(1-(1-
X(:,1)).^A2(H,M,I)).^B2(H,M,I)))));
O=find(E(:,1)==min(E(:,1)));
if O>=98; New(B,H,M,I)=0; else; New(B,H,M,I)=X(O(1)); end
end
S0=New(:,H,M,I);
Sk((YMH(:,2)==M)&(YMH(:,3)==H),I)=S0(1:numel(Di));
[I M H]
%plot(New(:,H,M,I));
save('New.mat','New','G','Sk');
end
end
end

```

8.2.9 Υπολογισμός κατανομών αθροιστικής πιθανότητας, πυκνότητας πιθανότητας και κλιμακογραμμάτος για την συνθετική χρονοσειρά.

```

load('PDFFall.mat','CDF','PDF','KUM','Er','Par','L','A1','B1','A2','B2','GDMY','Cly','Cla')
load('New.mat','New','G','Sk'); load('YMH.txt');
load('analisi.mat','GDanalisi');
load('SAR.mat','S')
X=(0:0.01:1);
for I=19:19;
for J=1:131496/2; clear Sa;
for K=1:floor(numel(Sk(:,I))/J); Sa(K,1)=nanmean(Sk(J*(K-1)+1:J*K,I)); end;
Clk(J,I)=nanvar(Sa);
[I]
end
xlswrite('Hurst_model.xlsx',Clk,'Hour_var','B2');
end
save('ghkklimko.mat','Clk');
for I=1:40
for M=1:12;
for H=1:24;
Di=G((YMH(:,2)==M)&(YMH(:,3)==H));
for J=1:numel(X); CDF(J,H,M,I)=numel(find(HM<=X(J)))/numel(HM); end
PDF(:,H,M,I)=(CDF(2:end,H,M,I)-CDF(1:end-1,H,M,I))./(X(2:end)-X(1:end-1));
O=New(:,H,M,I);
V=GDanalisi(:,H,M,I);
P=KUM(:,H,M,I);
plot(New(:,H,M,I),'o'); hold on;
plot(GDanalisi(:,H,M,I),'o');
Nm=nanmean(New(:,H,M,I))
Ngd=nanmean(GDanalisi(:,H,M,I))
xlswrite('paixnidi.xlsx',O,'model'); xlswrite('paixnidi.xlsx',V,'metrimeni');xlswrite('paixnidi.xlsx',P,'Kum_pdf');
end
end

```

end

8.2.10 Υπολογισμός Ετεροσυσχετίσεων συνθετικής χρονοσειράς μεταξύ διαδοχικών ωρών και δημιουργία διαγραμμάτων

```

clc; clear all; format long;
load('Names.txt'); for I=1:40; Name{I}=Names(I,:); end
load('analisi.mat','GDanalisi'); load('YMH.txt');
load('New.mat','New','G','Sk');
for I=40:40;
for M=1:12;
for H=1:24;
for L=M:12
for P=H:24
X1=New(:,H,M,I); X2=New(:,P,L,I);
XM(P,L,H,M,I)=(numel(find(isnan(X1)==0))+numel(find(isnan(X2)==0)))/2/sqrt((numel(find(isnan(X1)==0))-1)*(numel(find(isnan(X2)==0))-1))*nanmean((X1-nanmean(X1)).*(X2-nanmean(X2)))/nanstd(X1)/nanstd(X2);
end
end
[H M I]
end
end
end
end
save('etero_model.mat','XM');
for I=40:40
for M=1:12
for K=1:23; Y(K)=XM(K+1,M,K,M,I); hold on;
F(K,M)=Y(K);
plot(Y,'o')
end
[M K]
xlswrite('eterosixetiseis_model.xlsx',F);
end
end

```