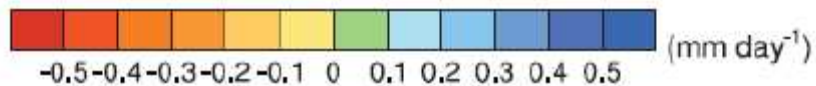
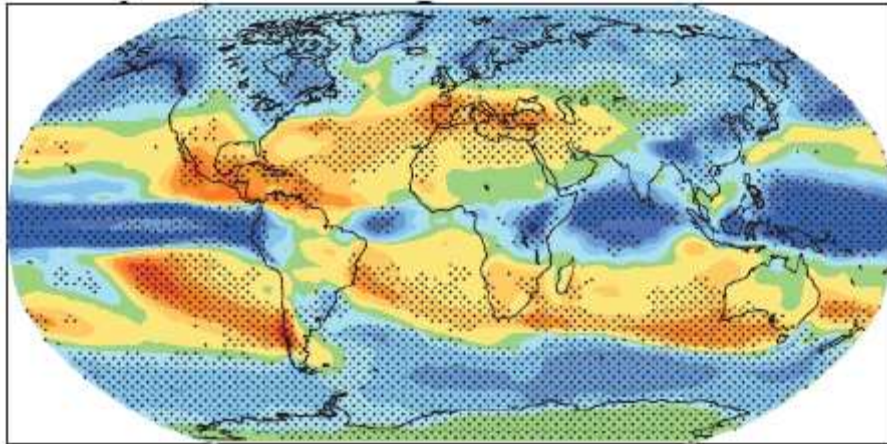




## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος



### ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥΣ ΜΕ ΙΣΤΟΡΙΚΕΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΕΣ

Γρηγόρης Αναγνωστόπουλος

Επιβλέπων: Δημήτρης Κουτσογιάννης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2009

---

## Πρόλογος – Ευχαριστίες

---

Μετά από μια πενταετή πορεία στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, χρόνια κοπιαστικά αλλά και ευχάριστα ταυτόχρονα, έφτασε η στιγμή της ολοκλήρωσης της διπλωματικής μου εργασίας. Το κλίμα και η πολυσυζητημένη αλλαγή του είναι έννοιες πολύ οικείες τις τελευταίες δεκαετίες ακόμη και στους ανθρώπους που δεν έχουν σχέση με την επιστημονική κοινότητα. Διαπιστώνεται όμως ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης δεν έχουν ελεγχθεί επαρκώς. Μέσα από αυτήν την εργασία ευελπιστώ ότι θα συμβάλλω προς την κατεύθυνση της αύξησης της επάρκειας και της αποτελεσματικότητας των κλιματικών μοντέλων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της Ιτιάς για την πολύτιμη βοήθεια τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και κυρίως τους *Αντρέα Ευστρατιάδη*, Δρ Πολιτικό Μηχανικό του ΕΜΠ, που μου έδωσε τα απαραίτητα εφόδια για να ξεκινήσω αυτήν την εργασία, *Αντώνη Χριστοφίδη*, Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ, που οι γνώσεις του στο Unix και στον προγραμματισμό ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της εργασίας μου, *Νίκο Μαμάση*, Λέκτορα, που μου μετέδωσε τις γνώσεις του και την εμπειρία του στο ArcGIS. Τέλος, περισσότερο από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, *Δημήτρη Κουτσογιάννη*, για την αμέριστη βοήθεια και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, τις συμβουλές του καθώς και για τους δρόμους που άνοιξε για τις μετέπειτα σπουδές μου.

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στους γονείς μου, στον αδερφό μου και στη Βέρα, πρόσωπα πολύτιμα στη ζωή μου.

*Τρίτη, 3 Μαρτίου 2009*

---

## Περίληψη

---

Η αξιοπιστία των προβλέψεων για το κλίμα, που γίνονται με βάση τα κλιματικά μοντέλα, ελάχιστα έχει διερευνηθεί κυρίως σε χωρικές κλίμακες μικρότερες της ηπειρωτικής. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα αυτά ανάγονται σε μικρότερες γεωγραφικές κλίμακες και χρησιμοποιούνται άκριτα από υδρολόγους και άλλους επιστήμονες για να κάνουν τις αντίστοιχες εξειδικευμένες προβλέψεις. Σε αυτήν την εργασία γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων διάφορων μοντέλων με χρονοσειρές (100 ετών τουλάχιστον) θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων από 55 σταθμούς σε όλο τον κόσμο. Επίσης γίνεται επιφανειακή ολοκλήρωση στις ΗΠΑ με βάση ιστορικές χρονοσειρές από 70 σταθμούς και γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα κλιματικά μοντέλα προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο έλεγχός τους σε υπο-ηπειρωτική κλίμακα. Και στις δυο περιπτώσεις, της σημειακής και της επιφανειακής σύγκρισης, η επίδοση των μοντέλων είναι απογοητευτική, κυρίως σε 30-ετή (κλιματική) χρονική κλίμακα. Άρα οι προβλέψεις που γίνονται μέσω των κλιματικών μοντέλων δεν μπορεί να είναι αξιόπιστες και ένα συχνό επιχείρημα ότι τα μοντέλα λειτουργούν σωστά σε μεγαλύτερες γεωγραφικές κλίμακες καταρρίπτεται.

---

## Abstract

---

The credibility of climate predictions based on the outputs of climate models is an issue which has been disputed among the scientific community. Despite this, these geographically distributed predictions are widely used in hydrology and many other disciplines. Here, the outputs of various climatic models are compared to temperature and precipitation observations from 55 stations (at least 100 year long) from all around the globe. Furthermore, an areal integration of 70 stations in USA is carried out and the results are also compared to the outputs of climate models, in order to examine if the models give satisfactory results in sub - continental scale. In both cases the models perform poorly, even at a climatic (30-year) scale. Thus, local model projections cannot be credible, whereas a common argument that models can perform better at larger spatial scales is falsified.

## Περιεχόμενα

---

<b>i. Πρόλογος – Ευχαριστίες</b> .....	<b>1</b>
<b>ii. Περίληψη</b> .....	<b>2</b>
<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>4</b>
<b>1.1 Αντικείμενο</b> .....	<b>5</b>
<b>1.2 Διάθρωση</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Μεθοδολογία</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 Σταθμοί και δεδομένα ελέγχου για τη σημειακή σύγκριση</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2 Σταθμοί και δεδομένα ελέγχου για την επιφανειακή σύγκριση</b> ...	<b>10</b>
<b>2.3 Κλιματικά μοντέλα</b> .....	<b>16</b>
<b>2.4 Εξαγωγή σημειακών και επιφανειακών τιμών από μοντέλα</b> .....	<b>19</b>
<b>2.5 Μύθοι και πραγματικότητα για τα κλιματικά μοντέλα</b> .....	<b>25</b>
<b>2.6 Τρόπος σύγκρισης</b> .....	<b>26</b>
<b>2.7 Φαινόμενο Hurst και η σημασία του</b> .....	<b>33</b>
<b>3. Αποτελέσματα</b> .....	<b>42</b>
<b>3.1 Σημειακή σύγκριση</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2 Επιφανειακή σύγκριση</b> .....	<b>60</b>
<b>3.3 Συμπεράσματα</b> .....	<b>79</b>
<b>4. Βιβλιογραφικές Αναφορές</b> .....	<b>80</b>
<b>5. Παράρτημα</b> .....	<b>83</b>

## 1. Εισαγωγή

---

Τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα και κατ' επέκταση οι κλιματικές διεργασίες είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα κάτι που κάνει την περιγραφή τους μέσω ντετερμινιστικών μοντέλων πρακτικά ανέφικτη. Παρόλα αυτά, τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια στροφή στις κλιματικές επιστήμες αλλά και στην υδρολογία προς την κατεύθυνση του ντετερμινιστικού τρόπου περιγραφής των κλιματικών φαινομένων. Πίσω από αυτήν την τάση βρίσκεται η αλματώδης πρόοδος της υπολογιστικής ισχύος που έδωσε νέα ώθηση στις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων. Οι πολύπλοκες εξισώσεις Navier – Stokes της ρευστομηχανικής μπορούν να επιλυθούν πλέον για τις πολύπλοκες συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα, κάτι που παλαιότερα ήταν απαγορευτικό από άποψη υπολογιστικού χρόνου. Βέβαια αυτή η εγγενής πολυπλοκότητα των κλιματικών διεργασιών καθιστά αυτές τις λύσεις ιδιαίτερα ασταθείς, αφού μια πολύ μικρή αλλαγή των αρχικών συνθηκών μπορεί να οδηγήσει σε τελείως διαφορετικά αποτελέσματα. Ακόμη και ένα πολύ απλό ντετερμινιστικό μοντέλο δύο παραμέτρων (*Koutsoyiannis, D., 2006b*) αναπαράγει κλιματικές μεταβολές και δείχνει να δημιουργούνται ανοδικές και καθοδικές τάσεις χωρίς συγκεκριμένο λόγο, ενώ η εξέλιξη αυτών των τάσεων δεν μπορεί να προβλεφτεί ντετερμινιστικά, παρόλη την απλότητα του μοντέλου.

Την τελευταία δεκαετία τεράστια ποσά έχουν επενδυθεί για τη διερεύνηση της κλιματικής αλλαγής. Οι επιστήμες της κλιματολογίας και της υδρολογίας επωφελήθηκαν πάρα πολύ, αλλά παρόλα αυτά η πρόοδος που έχει επιτευχθεί είναι δυσανάλογα μικρή με τη χρηματοδότηση που έχει δοθεί (*Koutsoyiannis D. et al., 2008c*). Αυτό μάλλον οφείλεται στο ότι η επιστήμη σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται σαν «εργαλείο» στη βιομηχανία της κλιματικής αλλαγής με αποτέλεσμα να επικεντρώνει την προσοχή της στο δέντρο (εκπομπή αερίων θερμοκηπίου) και όχι στο δάσος (εξάρτηση της παγκόσμιας οικονομίας από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας). Η ανάγκη της στροφής προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (υδροηλεκτρική, αιολική, ηλιακή), που όλες έχουν σαν πηγή τους την ενέργεια που φτάνει στη γη από τον ήλιο, είναι επιτακτική προκειμένου να αποφευχθεί μια σοβαρή κοινωνικοοικονομική κρίση στο μέλλον (*Koutsoyiannis D. et al., 2008c*).

## 1.1 Αντικείμενο

Η επαλήθευση των επιστημονικών θεωριών από εμπειρικά δεδομένα αποτελεί έναν από τους ακρογωνιαίους λίθους της επιστήμης. Σε αυτήν την εργασία συγκρίνουμε τα αποτελέσματα διάφορων κλιματικών μοντέλων με ιστορικές χρονοσειρές (100 ετών τουλάχιστον) θερμοκρασίας και βροχόπτωσης. Ήδη από την τρίτη έκθεση αξιολόγησης (Third Assessment Report - TAR) του IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) υπάρχουν μοντέλα που κάνουν προβλέψεις για το κλίμα ξεκινώντας από το 1990, δίνοντας έτσι ένα παράθυρο 19 ετών τουλάχιστον για σύγκριση με ιστορικά δεδομένα. Βέβαια, υπάρχουν αρκετά αποτελέσματα μοντέλων του TAR που εκτείνονται σε παλαιότερες χρονικές περιόδους. Η κατάσταση με τα μοντέλα της τέταρτης έκθεσης αξιολόγησης (Fourth Assessment Report - AR4) του IPCC είναι διαφορετική, αλλά πάλι υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης με ιστορικές παρατηρήσεις.

Η αξιοπιστία των προβλέψεων για το κλίμα, που γίνονται με βάση τα κλιματικά μοντέλα, ελάχιστα έχει διερευνηθεί κυρίως σε χωρικές κλίμακες μικρότερες της ηπειρωτικής. Βασικός στόχος αυτής της εργασίας είναι, εκμεταλλευόμενη το παράθυρο στο παρελθόν που δίνουν κάποιες από τις εκτελέσεις των κλιματικών μοντέλων του TAR και του AR4, να συγκρίνει αρχικά σε σημειακή και στη συνέχεια σε επιφανειακή κλίμακα τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων σε σχέση με μακρές ιστορικές χρονοσειρές. Η σύγκριση σε σημειακή κλίμακα κρίθηκε απαραίτητο να γίνει καθώς τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων ανάγονται σε μικρότερες γεωγραφικές κλίμακες και χρησιμοποιούνται άκριτα από υδρολόγους και άλλους επιστήμονες για να κάνουν τις αντίστοιχες εξειδικευμένες προβλέψεις. Έπειτα, μέσω της σύγκρισης σε επιφανειακή υπό-ηπειρωτική κλίμακα επιδιώκεται να καταρριφθεί ένα σύνηθες επιχείρημα των κλιματολόγων ότι τα κλιματικά μοντέλα αναπαράγουν ορθά το κλίμα σε μεγαλύτερες χωρικές κλίμακες.

Στα πλαίσια της σημειακής σύγκρισης εξετάστηκαν δεδομένα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης από συνολικά 55 σταθμούς από όλο τον κόσμο. Για καθένα από αυτούς, η ιστορική χρονοσειρά συγκρίνεται με μια χρονοσειρά που αντιστοιχεί σε κάθε κλιματικό μοντέλο. Στην επιφανειακή σύγκριση ολοκληρώνουμε επιφανειακά (χρησιμοποιώντας μια διαδοδομένη μέθοδο επιφανειακής ολοκλήρωσης) τα δεδομένα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης από 70 σταθμούς, που είναι ομοιόμορφα γεωγραφικά

κατανομημένοι στις ΗΠΑ. Στη συνέχεια εξάγουμε την επιφανειακή χρονοσειρά από τον κάρναβο του κάθε μοντέλου και κάνουμε τη μεταξύ τους σύγκριση. Η σύγκρισή και στις δύο περιπτώσεις (σημειακής και επιφανειακής) γίνεται εξετάζοντας διάφορες στατιστικές παραμέτρους σε τρεις χρονικές κλίμακες (μηνιαία, ετήσια, 30-ετής). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων και πινάκων απ' όπου εξάγονται τα τελικά αποτελέσματα.

## 1.2 Διάθρωση της εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Αρχικά παρουσιάζονται οι σταθμοί και τα δεδομένα ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν. Επιπρόσθετα, γίνεται μια ανασκόπηση των κλιματικών μοντέλων, των παραδοχών και των σεναρίων σύμφωνα με τα οποία τρέχουν, δίνονται στοιχεία για τον κάρναβό τους και αναλύεται για ποιο λόγο επιλέχθηκε το καθένα ως κατάλληλο για σύγκριση σε αυτήν την εργασία. Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος εξαγωγής των σημειακών και επιφανειακών τιμών από τα μοντέλα και γίνεται η σύγκριση με αυτά των σταθμών. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου γίνεται ειδική μνεία στο φαινόμενο Hurst που έχει ιδιαίτερη σημασία για τη μελέτη και την ορθή αξιολόγηση των κλιματικών διεργασιών.

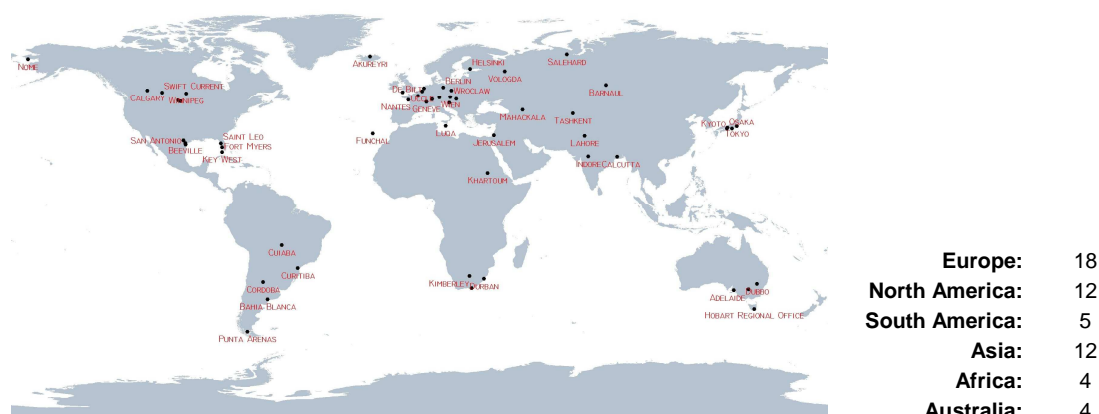
Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τη σημειακή και την επιφανειακή σύγκριση, αξιολογούνται και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα περί της αξιοπιστίας των κλιματικών μοντέλων.

Στο παράρτημα δίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα σε μορφή γραφημάτων από την σημειακή σύγκριση σε 5 από τους σταθμούς που εξετάστηκαν. Όλα τα αποτελέσματα σε μορφή πινάκων και γραφημάτων παρουσιάζονται στο προσάρτημα της εργασίας, που λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων διατίθεται μόνο σε ηλεκτρονική μορφή (<http://itia.ntua.gr/el/docinfo/893/>).

## 2. Μεθοδολογία

### 2.1 Σταθμοί και δεδομένα ελέγχου για τη σημειακή σύγκριση

Για τη σημειακή σύγκριση επιλέχθηκαν 55 σταθμοί από όλο τον κόσμο με τα εξής κριτήρια: (α) οι σταθμοί να είναι κατανεμημένοι σε όλες τις ηπείρους και σε διαφορετικούς τύπους κλίματος, (β) η διαθεσιμότητα των δεδομένων στο διαδίκτυο σε μηνιαία κλίμακα και (γ) η ύπαρξη χρονοσειρών που να έχουν τουλάχιστον 100 χρόνια παρατηρήσεων χωρίς καθόλου κενά (ή με όσο το δυνατό λιγότερα κενά τα οποία συμπληρώθηκαν με τον μηνιαίο μέσο όρο). Επειδή ήταν πολύ δύσκολο να βρεθούν για τόσους πολλούς σταθμούς ταυτόχρονα (ιδιαίτερα στην Αφρική και τη Νότια Αμερική) χρονοσειρές θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων που να ικανοποιούν τα παραπάνω κριτήρια, δεν έχουν χρησιμοποιηθεί οι ίδιοι σταθμοί για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση. Οι σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στους πίνακες 2.1 και 2.2 και η γεωγραφική τους κατανομή στις εικόνες 2.1 και 2.2. Στους πίνακες με αστερίσκο σημειώνονται οι σταθμοί στους οποίους εξετάστηκε και η θερμοκρασία και η βροχόπτωση. Η πηγή των δεδομένων είναι η ολλανδική ιστοσελίδα <http://climexp.knmi.nl>. Η ιστοσελίδα αυτή, εκτός από τα δεδομένα θερμοκρασίας και βροχόπτωσης περιέχει δεδομένα και άλλων κλιματικών μεταβλητών, όπως π.χ. της ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια της θάλασσας. Επιπρόσθετα, προσφέρει δεδομένα και σε άλλες χρονικές κλίμακες εκτός από τη μηνιαία (6-ωρή, ημερήσια κλπ), ενώ περιέχει εργαλεία επεξεργασίας των χρονοσειρών.



Εικόνα 2.1 –Γεωγραφική κατανομή σταθμών που εξετάστηκε η θερμοκρασία.



Πίνακας 2.1 – Σταθμοί που εξετάστηκε η θερμοκρασία.

Temperature							
	City	Country	Continent	Period of Data	Latitude	Longitude	Elevation
1	Adelaide (*)	Australia	Australia	1857-2007	-34.93	138.52	4
2	Akureyri	Iceland	Europe	1882-2007	65.68	-18.08	27
3	Bahia Blanca (*)	Argentina	South America	1896-2007	-38.73	-62.25	83
4	Barnaul	Russian Federation	Asia	1850-2004	53.43	83.52	184
5	Beeville (*)	USA	North America	1895-2006	28.45	-97.70	78
6	Berlin	Germany	Europe	1851-2007	52.47	13.40	49
7	Bismarck (*)	USA	North America	1875-2007	46.80	-100.80	506
8	Budapest (*)	Hungary	Europe	1851-1991	47.50	19.00	130
9	Calcutta (*)	India	Asia	1878-2007	22.53	88.33	6
10	Calgary (*)	Canada	North America	1884-1990	51.12	-114.02	1084
11	Cordoba	Argentina	South America	1873-1986	-31.40	-64.20	425
12	Corpus Christ (*)	USA	North America	1887-2005	27.77	-97.50	13
13	Cuiaba (*)	Brazil	South America	1901-2007	-15.60	-56.10	165
14	Curitiba (*)	Brazil	South America	1885-2007	-25.43	-49.27	924
15	De Bilt (*)	Netherlands	Europe	1851-2007	52.10	5.18	15
16	Dubbo	Australia	Australia	1872-1992	-32.20	148.57	275
17	Durban	South Africa	Africa	1885-2007	-29.97	30.95	14
18	Fort Myers (*)	USA	North America	1892-2005	26.60	-81.87	4
19	Funchal	Madeira Islands	Europe	1865-2007	32.63	-16.90	56
20	Geneve	Switzerland	Europe	1851-2007	46.25	6.13	416
21	Hamamatsu	Japan	Asia	1883-1990	34.70	137.72	32
22	Hay Miller	Australia	Australia	1881-1992	-34.52	144.85	94
23	Helsinki (*)	Finland	Europe	1851-2007	60.30	25.00	58
24	Hobart	Australia	Australia	1882-1992	-42.88	147.33	55
25	Indore	India	Asia	1878-2007	22.72	75.80	567
26	Jerusalem (*)	Israel	Asia	1861-1995	31.78	35.22	757
27	Key West (*)	USA	North America	1870-2005	24.55	-81.75	6
28	Khartoum (*)	Sudan	Africa	1901-2007	15.60	32.50	380
29	Kimberley (*)	South Africa	Africa	1897-2007	-28.80	24.77	1250
30	Kyoto	Japan	Asia	1881-1990	35.02	135.73	41
31	Lahore (*)	Pakistan	Asia	1876-2007	31.60	74.30	214
32	Luqa (*)	Malta	Europe	1865-2007	35.85	14.48	91
33	Mahackala	Russian Federation	Asia	1882-1990	42.83	47.55	32
34	Munchen	Germany	Europe	1851-2007	48.10	11.70	529
35	Nantes	France	Europe	1851-1991	47.17	-1.60	27
36	Napoleon (*)	USA	North America	1889-2005	46.51	-99.77	604
37	Nome (*)	USA	North America	1907-2007	64.50	-165.43	7
38	Osaka(*)	Japan	Asia	1883-2007	34.68	135.52	83
39	Paris	France	Europe	1851-1995	48.80	2.50	53
40	Plymouth	England	Europe	1865-1995	50.35	-4.12	50
41	Port Elizabeth	South Africa	Africa	1885-2007	-33.98	25.60	61
42	Punta Arenas (*)	Chile	South America	1888-2007	-53.00	-70.85	37
43	Saint Leo	USA	North America	1895-2005	28.33	-82.27	57
44	Salehard	Russian Federation	Asia	1883-2007	66.53	66.67	16
45	San Antonio	USA	North America	1885-2005	29.53	-98.47	242
46	Swift Current	Canada	North America	1886-1990	50.28	-107.68	818
47	Tashkent	Uzbekistan	Asia	1881-2007	41.27	69.27	488
48	Tokyo (*)	Japan	Asia	1876-2007	35.68	139.77	36
49	Uccle (*)	Belgium	Europe	1851-2007	50.80	4.35	104
50	Vologda	Russian Federation	Europe	1891-2007	59.32	39.92	130
51	Wien (*)	Austria	Europe	1851-2007	48.25	16.37	209
52	Winnipeg	Canada	North America	1872-2001	49.90	-97.23	239
53	Wroclaw	Poland	Europe	1851-2007	51.10	16.88	121
54	Zagreb	Croatia	Europe	1862-1995	45.85	15.98	162
55	Zurich	Switzerland	Europe	1864-2007	47.38	8.57	569



Εικόνα 2.2 – Γεωγραφική κατανομή σταθμών που εξετάστηκε η βροχόπτωση.

Πίνακας 2.2 – Σταθμοί που εξετάστηκε η βροχόπτωση.

Precipitation							
	City	Country	Continent	Period of Data	Latitude	Longitude	Elevation
1	Addis Abeba	Ethiopia	Africa	1898-2007	9.03	38.75	2408
2	Adelaide (*)	Australia	Australia	1857-2007	-34.93	138.52	4
3	Bahia Blanca (*)	Argentina	South America	1860-2007	-38.73	-62.25	83
4	Beeville (*)	USA	North America	1895-2005	28.45	-97.70	78
5	Beirut (*)	Lebanon	Asia	1888-2002	33.90	35.50	24
6	Bismarck (*)	USA	North America	1875-2007	46.80	-100.80	506
7	Bistrita	Romania	Europe	1853-2007	47.10	24.50	366
8	Budapest (*)	Hungary	Europe	1850-2000	47.50	19.00	130
9	Calcutta (*)	India	Asia	1850-2007	22.50	88.30	6
10	Calgary (*)	Canada	North America	1885-2000	51.12	-114.02	1077
11	Casablanca	Cuba	North America	1859-1997	23.17	-82.35	50
12	Constantine	Algeria	Africa	1850-2007	36.30	6.60	704
13	Corpus Christ (*)	USA	North America	1887-2005	27.77	-97.50	13
14	Corrientes	Argentina	South America	1875-2006	-27.50	-58.80	62
15	Cuiaba (*)	Brazil	South America	1901-2007	-15.60	-56.10	165
16	Curitiba (*)	Brazil	South America	1885-2007	-25.40	-49.30	949
17	De Bilt (*)	Netherlands	Europe	1851-2007	52.10	5.18	15
18	Entebbe (airport)	Uganda	Africa	1896-2000	0.10	32.50	1146
19	Farina	Australia	Australia	1879-2005	-30.07	138.27	91
20	Fort Myers (*)	USA	North America	1891-2005	26.61	-81.87	5
21	Gabes	Tunisia	Africa	1901-2007	33.90	10.10	4
22	Gauhati	India	Asia	1850-2007	26.10	91.60	54
23	Gavle	Sweden	Europe	1861-2000	60.70	17.10	32
24	Helsinki (*)	Finland	Europe	1851-2007	60.30	25.00	58
25	Henbury	Australia	Australia	1897-2005	-24.55	133.25	432
26	Hiroshima	Japan	Asia	1879-2000	34.40	132.40	30
27	Jakarta	Indonesia	Asia	1864-1995	-6.17	106.82	7
28	Jerusalem (*)	Israel	Asia	1851-1995	31.80	35.20	809
29	Key West (*)	USA	North America	1850-2005	24.55	-81.75	1
30	Khartoum (*)	Sudan	Africa	1899-2007	15.60	32.50	380
31	Kimberley (*)	South Africa	Africa	1877-2007	-28.80	24.77	1250
32	Kzyl-Orda	Kazakhstan	Europe	1891-2004	44.77	65.53	128
33	Lagos	Nigeria	Africa	1886-1997	6.60	3.40	19
34	Lahore (*)	Pakistan	Asia	1861-2007	31.60	74.30	214
35	Luqa (*)	Malta	Europe	1850-2007	35.80	14.50	91

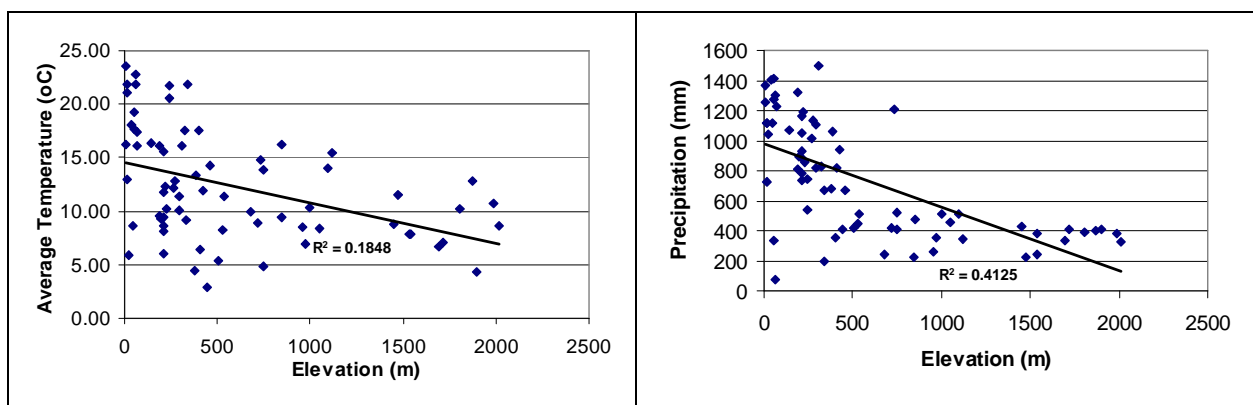
36	Madrid	Spain	Europe	1859-2004	40.40	-3.70	657
37	Manaus	Brazil	South America	1901-2007	-3.10	-60.60	60
38	Manchester	England	Europe	1850-2004	53.40	-2.30	75
39	Maree Post Office	Australia	Australia	1885-2005	-29.65	138.05	50
40	Napoleon (*)	USA	North America	1889-2005	46.51	-99.77	604
41	Nome (*)	USA	North America	1906-2007	64.50	-165.40	7
42	Obs Met Nacional	Colombia	South America	1866-2007	4.40	-74.10	2556
43	Osaka (*)	Japan	Asia	1883-2007	34.70	135.50	50
44	Philipstown	South Africa	Africa	1878-1996	-30.43	24.47	1356
45	Posadas	Argentina	South America	1903-2007	-27.40	-56.00	133
46	Punta Arenas (*)	Chile	South America	1888-2007	-53.00	-70.90	37
47	Rio Branca	Brazil	South America	1892-2007	-10.00	-67.80	136
48	Strasbourg	France	Europe	1850-2007	48.60	7.60	154
49	Stuttgart	Germany	Europe	1850-1999	48.80	3.20	315
50	Tartu	Estonia	Europe	1891-2004	58.30	26.72	66
51	Timisoara	Romania	Europe	1873-2007	45.80	21.30	88
52	Tokyo (*)	Japan	Asia	1876-2007	35.80	139.80	36
53	Uccle (*)	Belgium	Europe	1851-2007	50.80	4.35	104
54	Valdivia	Chile	South America	1900-2000	-39.80	-73.10	53
55	Wien (*)	Austria	Europe	1851-2007	48.25	16.37	209

## 2.2 Σταθμοί και δεδομένα ελέγχου για την επιφανειακή σύγκριση

Για την επιφανειακή ολοκλήρωση επιλέχθηκαν 70 σταθμοί στις ΗΠΑ (Πηγή: <http://climexp.knmi.nl>), έτσι ώστε να καλύπτεται ομοιόμορφα όλη η έκτασή τους. Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχτηκε λόγω της αφθονίας των δεδομένων, που ξεπερνά κάθε άλλη περιοχή που εξετάστηκε. Οι σταθμοί περιλαμβάνουν χρονοσειρές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο επιφανειακής ολοκλήρωσης Thiessen εξάγουμε μια επιφανειακή χρονοσειρά από τη σχέση  $T(t) = \sum_{i=1}^n w(i) \cdot T(i,t)$ , όπου  $T(t)$  η τιμή του επιφανειακού μεγέθους (θερμοκρασία ή βροχόπτωση) το μήνα  $t$ ,  $T(i,t)$  η τιμή του μεγέθους στο σταθμό  $i$  το μήνα  $t$  και  $w(i)$  ο συντελεστής Thiessen του σταθμού  $i$ . Αυτή η χρονοσειρά θα συγκριθεί με τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων προκειμένου να εξαχθούν τα συμπεράσματα περί της αξιοπιστίας των μοντέλων. Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι σταθμοί και στην εικόνα 2.4 τα πολύγωνα Thiessen. Για την υλοποίηση της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS.

Το μέσο σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών είναι  $H_m=668,7\text{m}$  ενώ το μέσο υψόμετρο των ΗΠΑ είναι  $H=746,8\text{m}$ . Το μέσο σταθμισμένο υψόμετρο προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το υψόμετρο του κάθε σταθμού με τον αντίστοιχο συντελεστή Thiessen, ενώ το μέσο υψόμετρο των ΗΠΑ προέκυψε παίρνοντας το μέσο όρο του υψόμετρου κάθε πολιτείας σταθμισμένο ως προς την έκτασή της. Για τα δεδομένα της

θερμοκρασίας προέκυψε ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της θερμοκρασίας και του υψόμετρου, η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό της θερμοβαθμίδας  $\theta = -0,0038 \text{ }^\circ\text{C/m}$ , όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3. Έτσι λοιπόν θα πραγματοποιήσουμε υψομετρική αναγωγή των δεδομένων, για την οποία εργαζόμαστε ως εξής: (α) Υπολογίζουμε τη μέση επιφανειακή θερμοκρασία των ΗΠΑ,  $T_m$ , ως σταθμισμένο άθροισμα της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας κάθε σταθμού,  $T(i)$ , επί τον αντίστοιχο συντελεστή Thiessen, δηλαδή  $T_m = \sum_{i=1}^n w(i) \cdot T(i)$ , (β) υπολογίζουμε το συντελεστή αναγωγής από τη σχέση  $\lambda = 1 + \theta(H - H_m)/T_m$  (προκύπτει  $\lambda = 0,97$ ), (γ) Οι τιμές της επιφανειακής χρονοσειράς διορθώνονται πολλαπλασιάζοντας επί τον συντελεστή  $\lambda$ . Για τα δεδομένα της βροχόπτωσης δε φαίνεται να προκύπτει συσχέτιση μεταξύ βροχόπτωσης και υψόμετρου για τους συγκεκριμένους σταθμούς, κάτι που είναι λογικό αφού η βροχόπτωση επηρεάζεται πολύ περισσότερο από διάφορους άλλους τοπογραφικούς παράγοντες (γεωγραφικό πλάτος, γειτνίαση με τη θάλασσα κ.ά.) παρά από το υψόμετρο. Πάντως το μέσο υψόμετρο των ΗΠΑ δε διαφέρει πολύ από το μέσο σταθμισμένο υψόμετρο των σταθμών, και κατά συνέπεια δεν κάνουμε κάποια υψομετρική διόρθωση στα δεδομένα της βροχής. Το υπολογιστικό σφάλμα που θα προκύψει λόγω του γεγονότος αυτού δε θα είναι σημαντικό.



Εικόνα 2.3 – Σχέση υψόμετρου - θερμοκρασίας (αριστερά),  
υψόμετρου – βροχόπτωσης (δεξιά)



Εικόνα 2.4 – Πολύγωνα Thiessen για τις ΗΠΑ.

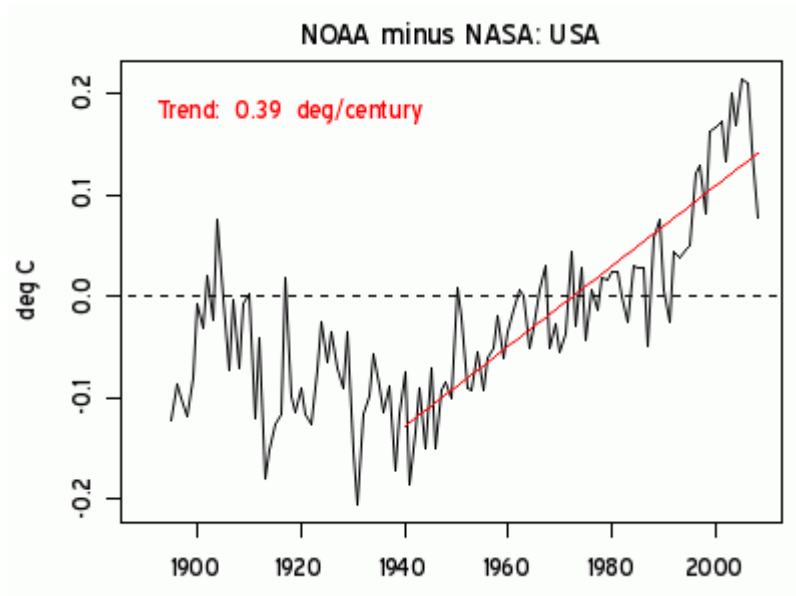
Πίνακας 2.3 – Σταθμοί στις ΗΠΑ όπου έγινε επιφανειακή ολοκλήρωση.

Areal Integration						
	City	Period of Data	Latitude	Longitude	Elevation	Thiessen Weight
1	Albany	1890-2006	31.53	-84.13	54	0.0185
2	Alpena	1873-2004	45.07	-83.57	211	0.0081
3	Amarillo	1892-2007	35.22	-101.72	1098	0.0142
4	Amherst	1836-2006	42.38	-72.53	45	0.0243
5	Ashland	1889-2006	42.22	-122.72	533	0.0136
6	Aurora	1883-2006	41.75	-88.35	195	0.0038
7	Austin	1888-2006	39.50	-117.08	2013	0.0163
8	Beaver	1899-2006	36.82	-100.53	751	0.0101
9	Bismarck	1875-2007	46.77	-100.75	506	0.0095
10	Buffalo	1858-2006	42.93	-78.73	215	0.0112
11	Cincinnati	1873-2007	39.05	-84.67	267	0.0165
12	Colfax	1870-2006	39.10	-120.95	734	0.0211
13	Corpus Christ	1887-2006	27.77	-97.50	13	0.0064
14	Dale	1880-2006	38.45	-78.93	426	0.0087
15	Des Moines	1878-2007	41.53	-93.65	294	0.0118
16	Detroit	1836-2007	42.40	-83.00	191	0.0101
17	Dickinson	1892-2006	46.88	-102.80	749	0.0209
18	Dixon	1892-2006	41.83	-89.52	213	0.0074
19	Eagle Pass	1889-2006	28.70	-100.48	245	0.0109
20	Eastport	1871-2006	44.92	-67.00	23	0.0096
21	Edenton	1896-2006	36.05	-76.62	6	0.0079
22	Elko	1870-2006	40.83	-115.78	1539	0.0154
23	Farmington	1878-2006	37.78	-90.40	274	0.0149
24	Fort Bayard	1886-2006	32.80	-108.15	1872	0.0141
25	Fort Myers	1892-2006	26.20	-81.87	4	0.0046
26	Fort Smith	1883-2007	35.33	-94.37	141	0.0143
27	Galveston	1873-2007	29.30	-94.80	16	0.0113
28	Glenville	1893-2006	38.93	-80.82	219	0.0102
29	Grand Junction	1892-2007	39.12	-108.53	1475	0.0227
30	Grand Meadow	1887-2006	43.70	-92.57	411	0.0163
31	Greenwood	1892-2006	38.83	-75.58	13	0.0111
32	Heber	1893-2006	40.50	-111.42	1716	0.0177
33	Imperial	1890-2003	40.52	-101.63	999	0.0090
34	Kimball	1888-2006	41.25	-103.67	1450	0.0161
35	Lakeview	1884-2006	42.20	-120.37	1536	0.0107
36	Lander	1892-2007	42.82	-108.73	1694	0.0209
37	Los Angeles	1878-2007	33.72	-118.27	55	0.0074
38	Medicine Lodge	1895-1997	37.28	-98.58	457	0.0190

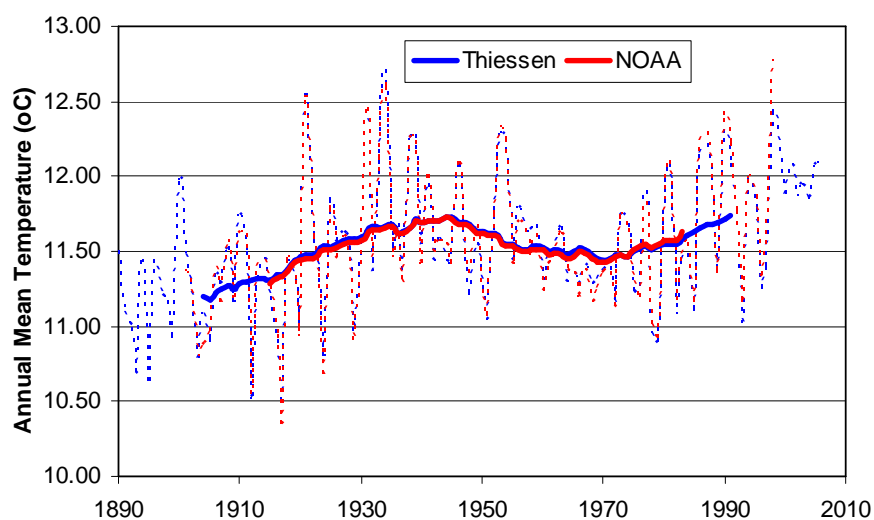
39	Milwaukee	1873-2007	42.95	-87.90	211	0.0153
40	Missoula	1886-2006	46.92	-114.08	972	0.0204
41	Mountainair	1902-2006	34.52	-106.25	1987	0.0113
42	Newport	1888-2006	35.60	-91.28	69	0.0107
43	North Platte	1875-2007	41.13	-100.68	849	0.0115
44	Phoenix	1877-2007	33.43	-112.02	337	0.0173
45	Pierre	1869-2006	44.38	-100.28	526	0.0143
46	Pine Bluff	1888-2006	34.22	-92.02	65	0.0087
47	Pine River Dam	1887-2006	46.67	-94.12	381	0.0266
48	Port Gibson	1890-2006	31.97	-91.00	36	0.0235
49	Prineville	1897-2005	44.35	-120.90	956	0.0250
50	Rapid City	1888-2006	44.12	-103.28	1051	0.0159
51	Redlands	1892-2006	34.05	-117.18	401	0.0120
52	Rockville	1888-2006	39.77	-87.23	210	0.0134
53	Rome	1893-2006	34.25	-85.15	188	0.0200
54	Roswell	1893-2006	33.30	-104.53	1118	0.0186
55	Saint George	1889-2006	37.12	-113.57	844	0.0213
56	Saint Leo	1895-2006	28.33	-82.77	57	0.0070
57	Salisbury	1882-2006	35.68	-80.48	213	0.0168
58	San Antonio	1885-2006	29.53	-98.47	242	0.0097
59	Sioux City	1889-2007	42.40	-96.38	336	0.0206
60	Spokane	1881-2006	47.63	-117.53	718	0.0181
61	Springer	1891-2006	36.37	-104.58	1805	0.0159
62	Springfield	1888-2007	37.23	-93.38	387	0.0140
63	Toccoa	1892-2006	34.58	-83.32	310	0.0133
64	Uniontown	1889-2006	39.92	-79.72	291	0.0086
65	Vale	1892-2006	43.98	-117.25	682	0.0168
66	Washington	1882-2006	41.28	-91.68	230	0.0089
67	Weatherford	1890-2006	32.77	-97.82	324	0.0211
68	Willow City	1892-2006	48.62	-100.30	445	0.0086
69	Yellowstone Park	1886-2006	44.97	-110.70	1898	0.0313
70	Yuma - Arizona	1878-1995	32.73	-114.62	63	0.0069

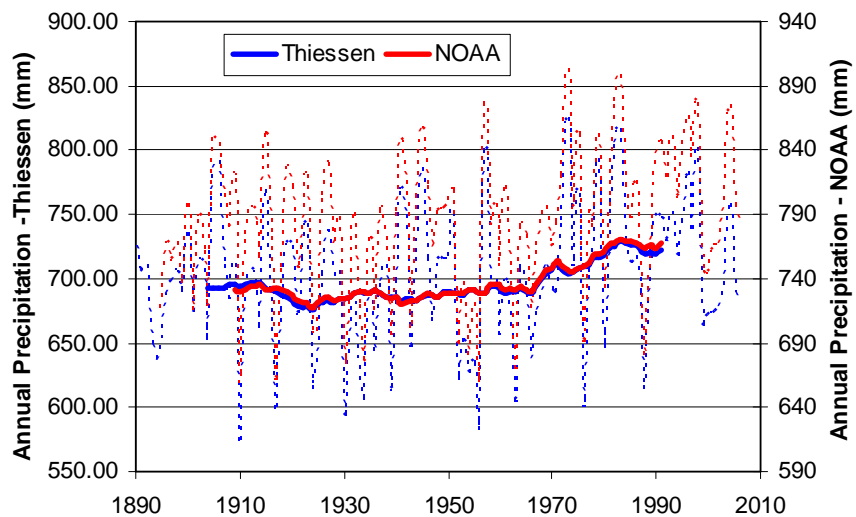
Μετά την εξαγωγή των επιφανειακών χρονοσειρών θεωρήθηκε αναγκαία η σύγκριση τους με επιφανειακά δεδομένα άλλων φορέων προκειμένου να διαπιστωθεί η αξιοπιστία τους. Οι μόνοι φορείς που προσφέρουν επιφανειακά στοιχεία για τις ΗΠΑ είναι η NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) και η NASA (National Aeronautics and Space Administration). Παρά το γεγονός ότι και οι δύο φορείς είναι αμερικάνικοι παρατηρούνται διαφορές στις χρονοσειρές λόγω της διαφορετικής μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε προκειμένου να εξαχθεί κάθε χρονοσειρά (εικόνα 2.5). Κάθε φορέας έχει τροποποιήσει τα πρωτογενή δεδομένα χρησιμοποιώντας διάφορα φίλτρα και μεθόδους ομογενοποίησης με αποτέλεσμα οι χρονοσειρές που εξάγονται να παρουσιάζουν συστηματικές διαφορές (πηγή: <http://www.climateaudit.org/?p=4852>). Για αυτό ακριβώς το λόγο, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας εξάγαμε τις δικές μας επιφανειακές χρονοσειρές καθώς επιθυμούσαμε η σύγκριση με τα κλιματικά μοντέλα να γίνει με βάση πρωτογενή δεδομένα, που δεν θα έχουν υποστεί κανενός είδους προσαρμογή. Παρακάτω παρατίθεται η σύγκριση των επιφανειακών χρονοσειρών που εξήχθησαν με τη μέθοδο Thiessen σε σχέση με τα

επιφανειακά δεδομένα της NOAA για τις ΗΠΑ (πηγή: *National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center*, <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/cag3/cag3.html>). Παρατηρώντας την εικόνα 2.6 βλέπουμε ότι για τη θερμοκρασία οι χρονοσειρές ουσιαστικά ταυτίζονται, ενώ για τη βροχόπτωση η χρονοσειρά της NOAA είναι μετατοπισμένη κατά 40mm προς τα επάνω σε σχέση με τη δικιά μας χρονοσειρά. Επομένως, παρόλη την αναντιστοιχία που υπάρχει στα υπάρχοντα επιφανειακά δεδομένα για τις ΗΠΑ έχουμε μια επαλήθευση των χρονοσειρών που εξάγαμε.



Εικόνα 2.5 – Διαφορά των αποκλίσεων από το μέσο για την επιφανειακή θερμοκρασία των ΗΠΑ ανάμεσα στη NOAA και τη NASA. (πηγή: <http://www.climateaudit.org/?p=4852>)



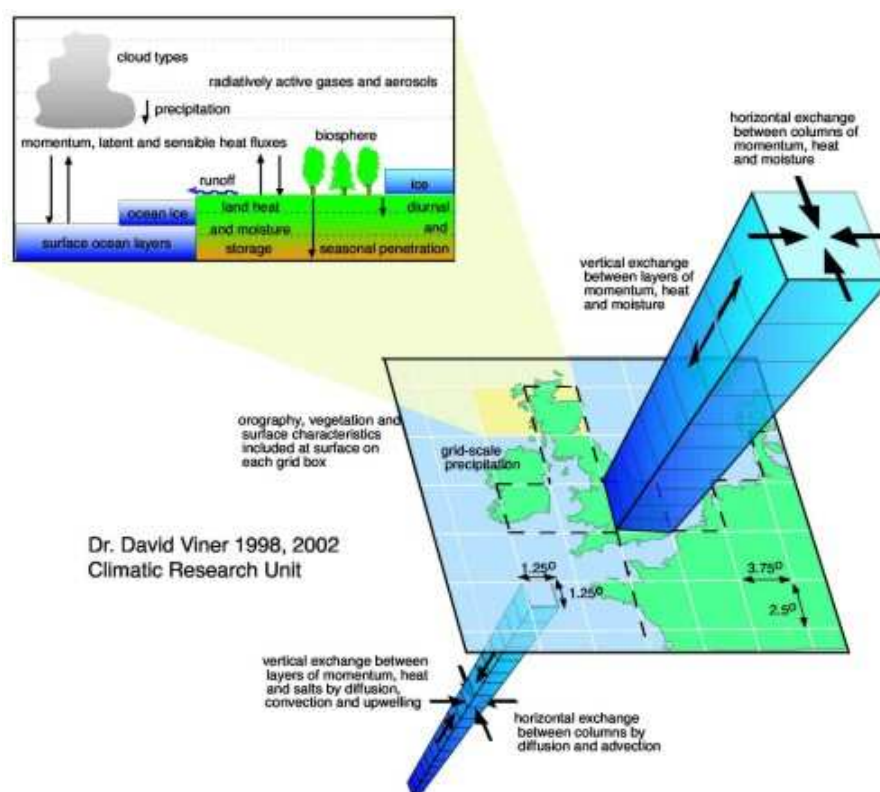


Εικόνα 2.6 – Διαγράμματα σύγκρισης των επιφανειακών χρονοσειρών που προκύπτουν από τη μέθοδο Thiessen με τα δεδομένα της NOAA.



## 2.3 Κλιματικά μοντέλα

Τα κλιματικά μοντέλα είναι αλγόριθμοι που λύνουν συστήματα διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν από τους θεμελιώδεις νόμους της φυσικής, της μηχανικής των ρευστών και της χημείας. Κατά τη διαδικασία εκτέλεσης ενός μοντέλου η υδρόγειος διακριτοποιείται με ένα τρισδιάστατο κάνναβο, ορίζονται οι συνοριακές και οι αρχικές συνθήκες και εφαρμόζοντας τις βασικές εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα λαμβάνονται τα αποτελέσματα σε κάθε σημείο του καννάβου.



Εικόνα 2.6 - Σχηματική λειτουργία GCMs (πηγή: [http://www.ipcc-data.org/ddc\\_gcm\\_guide.html](http://www.ipcc-data.org/ddc_gcm_guide.html)).

Τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Models – GCMs) είναι αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα για την πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην αριθμητική ολοκλήρωση των εξισώσεων Navier-Stokes της ρευστομηχανικής και λόγω της πολυπλοκότητάς τους απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ προκειμένου να εκτελεστούν. Υπάρχουν ατμοσφαιρικά CGMs και ωκεάνια CGMs αλλά και μοντέλα σύζευξης ατμόσφαιρας-ωκεανών (Coupled General Circulation Models - CGCMs). Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα προσομοιώνουν τις ατμοσφαιρικές διεργασίες και επιβάλλουν θερμοκρασίες στην επιφάνεια της θάλασσας ως συνοριακές συνθήκες λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα μεταφοράς

ενέργειας και θερμότητας από την επιφάνεια της γης και τη θάλασσα, ενώ τα ωκεάνια μοντέλα προσομοιώνουν τους ωκεανούς, επιβάλλοντας βέβαια κάποιες ροές μεγεθών στην επιφάνεια της θάλασσας από την ατμόσφαιρα. Τα μοντέλα σύζευξης ατμόσφαιρας – ωκεανών συνδυάζουν τα δύο προηγούμενα με αποτέλεσμα να εξαλείφεται η ανάγκη εξωτερικής επιβολής ροής μεγεθών στη διεπιφάνεια ατμόσφαιρας – ωκεανών. Αυτού του τύπου τα μοντέλα χρησιμοποιούνται από την IPCC για την πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν 3 μοντέλα του TAR και 3 μοντέλα του AR4, το καθένα από τα οποία τρέχει με βάση ένα σενάριο το οποίο δίνει μια πιθανή εικόνα του κλίματος στο μέλλον. Η επιλογή των σεναρίων έγινε με το κριτήριο της κάλυψης παλαιότερων ιστορικών περιόδων, δεδομένου ότι η εκτίμηση της αξιοπιστίας των κλιματικών μοντέλων μπορεί να γίνει μόνο στη βάση της σύγκρισής τους με τα δεδομένα παλαιότερων ιστορικών περιόδων. Στο TAR όλα τα σεναρία έχουν τρέξει για παλαιότερες ιστορικές περιόδους, οπότε η επιλογή του σεναρίου δεν έχει τόσο μεγάλη σημασία. Έτσι επιλέγεται το SRES A2 το οποίο καλύπτει τον 20<sup>ο</sup> αιώνα. Εξαίρεση αποτελεί το μοντέλο ECHAM4 του οποίου οι εκτελέσεις με το SRES A2 δεν καλύπτουν τον 20<sup>ο</sup> αιώνα και για αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται το σενάριο IS92a το οποίο ξεκινάει από το 1860. Από τα σεναρία του AR4 το μόνο που είναι κατάλληλο για αυτήν την εργασία είναι το 20C3M. Στους πίνακες 2.4 και 2.5 (*Koutsoyiannis D. et al. 2008b*) παρουσιάζονται αναλυτικά τα κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται τα σεναρία σύμφωνα με τα όποια τρέχουν και ελέγχεται η καταλληλότητα τους για χρήση σε αυτήν την εργασία.

Πίνακας 2.4 – Χαρακτηριστικά των GCMs που χρησιμοποιήθηκαν.

IPCC Report	Name	Developped by	Resolution (°) in latitude and longitude	Grid points, latitudes x longitudes
TAR	ECHAM4/OPYC3	Max-Planck-Institute for Meteorology & Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg, Germany	2.8 × 2.8	64 × 128
TAR	CGCM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	3.7 × 3.7	48 × 96
TAR	HadCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research	2.5 × 3.7	73 × 96
AR4	CGCM3-T47	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	3.7 × 3.7	48 × 96
AR4	ECHAM5-OM	Max-Planck-Institute for Meteorology & Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg, Germany	1.9 × 1.9	96 × 192
AR4	PCM	National Center for Atmospheric Research, USA	2.8 × 2.8	64 × 128

Πηγή: [www.mad.zmaw.de/IPCC\\_DDC/html/SRES\\_TAR/](http://www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_TAR/), [www.mad.zmaw.de/IPCC\\_DDC/html/SRES\\_AR4/](http://www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_AR4/).

Πίνακας 2.5 – Σενάρια της IPCC και η σχέση τους με την εργασία.

	Σενάριο	Χαρακτηριστικά	Λόγος που χρησιμοποιήθηκε ή δεν χρησιμοποιήθηκε
TAR	SRES,IS92a	Πολλά τρεξίματα έχουν βασιστεί σε ιστορικά δεδομένα εισόδου GCM για τα έτη πριν το 1989, ενώ έχουν επεκταθεί για μετά το 1990 χρησιμοποιώντας διάφορα σενάρια.	Η επιλογή σεναρίου για πριν το 1989 δεν έχει νόημα. Από το 1990 και μετά δεν υπάρχει ιδιαίτερη διαφορά μεταξύ των σεναρίων για το ίδιο μοντέλο.
AR4	SRES	Διάφορα υποθετικά σενάρια για το μέλλον.	Δίνουν αποτελέσματα για τον 21 <sup>ο</sup> αιώνα (έξω από την περίοδο μελέτης).
	COMMIT	Τα αέρια του θερμοκηπίου σταθερά στα επίπεδα του 2000.	Δίνουν αποτελέσματα για τον 21 <sup>ο</sup> αιώνα (έξω από την περίοδο μελέτης).
	1%-2X, 1%-4X	Υποθέτουν αύξηση του CO <sub>2</sub> κατά 1% κάθε χρόνο, ξεκινώντας συνήθως το έτος 1850.	Η συγκέντρωση του CO <sub>2</sub> είναι σύμφωνα με αυτό το μοντέλο 570 cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (ppm), ενώ στην πραγματικότητα ήταν 379 cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (ppm) το 2005. Απαιτούνται πραγματικές συγκεντρώσεις CO <sub>2</sub> .
	PI-cntrl	Χρησιμοποιεί τις συγκεντρώσεις	Απαιτούνται πραγματικές

		CO2 της προβιομηχανικής εποχής.	συγκεντρώσεις CO <sub>2</sub> .
	20C3M	Προέκυψε από τα αποτελέσματα του τρεξίματος συζευγμένων μοντέλων ατμόσφαιρας – ωκεανών για τον 19 <sup>ο</sup> και 20 <sup>ο</sup> αιώνα, προκειμένου να πάρουμε μια εικόνα της αλλαγής του κλίματος στο παρελθόν.	Είναι το μόνο σενάριο του AR4 που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την εργασία και επομένως τα τρεξίματα των μοντέλων χρησιμοποιούν αυτό το σενάριο.

Πηγή: Leggett et al. (1992); Nakicenovic & Swart (1999), Carter et al. (1999), Hegerl et al. (2003), [www.mad.zmaw.de/IPCC\\_DDC/html/SRES\\_AR4/](http://www.mad.zmaw.de/IPCC_DDC/html/SRES_AR4/).

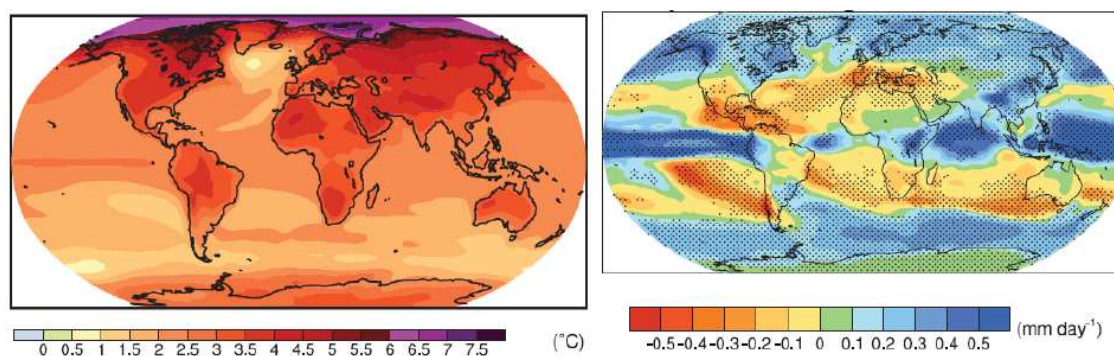
## 2.4 Εξαγωγή σημειακών και επιφανειακών τιμών από τα μοντέλα

### 2.4.1 Σημειακές τιμές

Για κάθε σταθμό και για κάθε μοντέλο εξάγονται οι μηνιαίες χρονοσειρές από τα τέσσερα πιο κοντινά σημεία του καννάβου και εκτιμάται η χρονοσειρά του μοντέλου που προσεγγίζει καλύτερα τα δεδομένα του σταθμού. Η ίδια διαδικασία έχει χρησιμοποιηθεί από τους Koutsoyiannis D. et al. (2008b). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι χρονοσειρές από τα τέσσερα κοντινότερα σημεία του καννάβου και κατασκευάζεται η χρονοσειρά του μοντέλου που αντιστοιχεί στο σταθμό με βάση το βέλτιστο αμερόληπτο γραμμικό συνδυασμό (BLUE; π.χ. Kitanidis, 1993)  $\tilde{x} = \lambda_1 \cdot x_1 + \lambda_2 \cdot x_2 + \lambda_3 \cdot x_3 + \lambda_4 \cdot x_4$ , βελτιστοποιώντας τους συντελεστές βάρους  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  (υποθέτοντας θετικές τιμές για να έχουν φυσικό νόημα και  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$ ), όπου  $\tilde{x}$  η βέλτιστη γραμμική εκτίμηση της ιστορικής χρονοσειράς  $x$  ( $\tilde{x} - x$  είναι το σφάλμα πρόβλεψης) και  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  είναι τα αποτελέσματα των μοντέλων για τα τέσσερα κοντινότερα στο σταθμό σημεία του καννάβου.

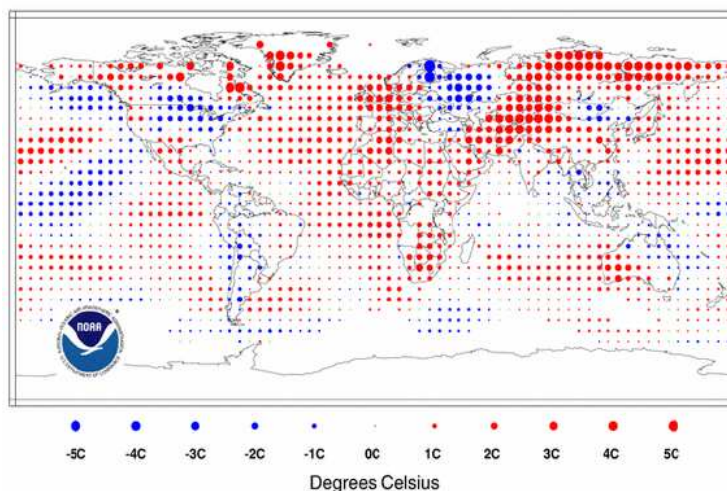
Η βελτιστοποίηση έγινε με βάση το συντελεστή αποτελεσματικότητας (coefficient of efficiency), που ορίζεται ως  $\text{Eff} = 1 - \frac{e^2}{\sigma^2} = 1 - \frac{\sum (\tilde{x} - x)^2}{\sum (x - \bar{x})^2}$ , όπου  $e^2$  είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και  $\sigma^2$  είναι η διασπορά των ιστορικών

παρατηρήσεων. Εάν  $\tilde{x} = \bar{x}$  τότε  $\text{Eff}=0$ , ενώ εάν  $\tilde{x} = x$  τότε  $\text{Eff}=1$ . Σε κάθε σταθμό η διασπορά των ιστορικών δεδομένων είναι σταθερή, οπότε μεγιστοποιώντας το συντελεστή αποτελεσματικότητας ουσιαστικά ελαχιστοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Με αυτή τη μέθοδο η χρονοσειρά που προκύπτει από τα μοντέλα αφήνεται να προσαρμοστεί όσο το δυνατόν καλύτερα στα ιστορικά δεδομένα. Άλλες μέθοδοι με σταθερά βάρη, που προκύπτουν π.χ. με βάση την απόσταση των σημείων του καννάβου από τον προς εξέταση σταθμό, θα δώσουν προφανώς μεγαλύτερα σφάλματα πρόβλεψης και μικρότερους συντελεστές αποτελεσματικότητας από τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν ότι η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε ευνοεί τα κλιματικά μοντέλα αφού τους δίνει τη δυνατότητα να προσαρμοστούν όσο το δυνατόν καλύτερα στις ιστορικές παρατηρήσεις. Είναι ενδιαφέρον ότι σε πολλές περιπτώσεις (ιδιαίτερα στην θερμοκρασία), τα προκύπτοντα βάρη είναι μηδέν για τα τρία από τα τέσσερα σημεία και ένα για το τέταρτο, κάτι που δείχνει ότι ένα σημείο είναι πιο αντιπροσωπευτικό για το συγκεκριμένο σταθμό από τον γραμμικό συνδυασμό των τεσσάρων σημείων του καννάβου.



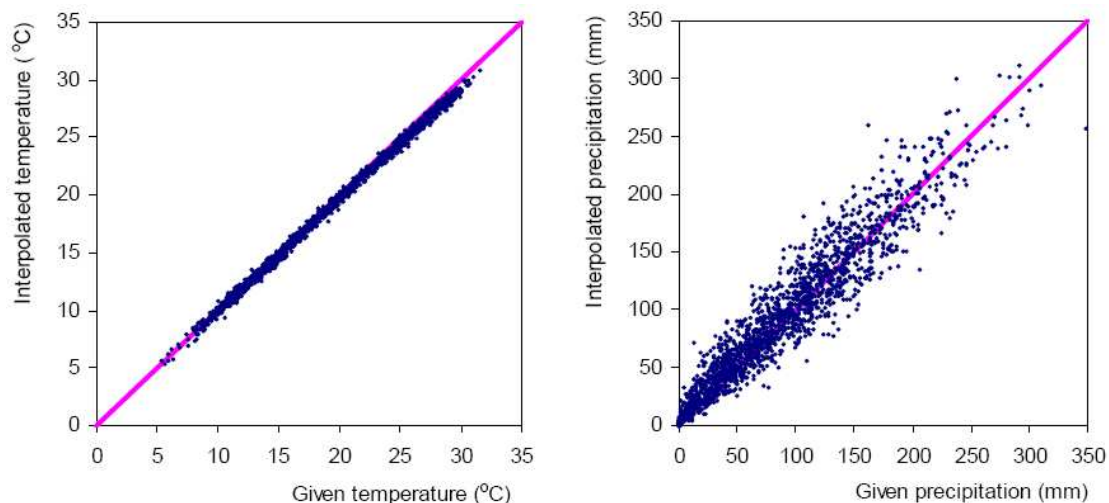
Εικόνα 2.7 – Οι προβλεπόμενες αλλαγές από την IPCC για τη θερμοκρασία (αριστερά) και για τη βροχόπτωση (δεξιά) για τα έτη 2080-2099 σε σχέση με τα έτη 1980-1999 για το σενάριο SRES A1B (πηγή: Meehl et al., 2007).

Στόχος αυτής της εργασίας είναι η χρησιμοποίηση πρωτογενών ιστορικών δεδομένων προκειμένου να γίνει η επαλήθευση των κλιματικών μοντέλων. Για αυτό το λόγο έχει αποκλειστεί οποιαδήποτε επεξεργασία των δεδομένων ώστε να δημιουργηθεί μια πλασματική ταύτιση με τα αποτελέσματα των μοντέλων. Θα μπορούσαμε σαν εναλλακτική μέθοδο να ανάγουμε τη χρονοσειρά των ιστορικών δεδομένων στα σημεία του καννάβου, εκτιμώντας μια χρονοσειρά παρατηρήσεων για κάθε σημείο του καννάβου. Βέβαια αυτή η μέθοδος δεν είναι τόσο εφικτή και φυσική όσο αυτή που εφαρμόσαμε και θα οδηγούσε σε αλλοίωση των στατιστικών χαρακτηριστικών της ιστορικής χρονοσειράς.



Εικόνα 2.8 – Οι αποκλίσεις της θερμοκρασίας ξηράς και θάλασσας από το μέσο όρο της περιόδου 1961-1990 το Μάιο του 2008 (πηγή: US National Climatic Data Center, [www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2008/may/global.html](http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2008/may/global.html)).

Η μέθοδος χωρικής παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκε είναι πολύ εύκολη στην εφαρμογή της και χρησιμοποιείται πολύ συχνά ακόμα και σε πεδία μεταβλητών που υπάρχει έντονη διακύμανση των τιμών τους, πόσο μάλλον στα πεδία των αποτελεσμάτων των GCM της θερμοκρασία και της βροχόπτωσης που από ότι φαίνεται στην εικόνα 2.7 έχουν μια πολύ ομαλή κατανομή χωρίς απότομες διακυμάνσεις, κυρίως στην κλιματική κλίμακα. Αυτή η ομαλότητα παρατηρείται ακόμη και σε μικρότερες χρονικές κλίμακες (εικόνα 2.8). Είναι προφανές ότι η μέθοδος που χρησιμοποιούμε παράγει ακριβέστερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται σε σταθμούς που βρίσκονται σε επίπεδο έδαφος, ενώ όταν η τοπογραφία γίνεται πιο πολύπλοκη (όπως σε ορεινές περιοχές) η μέθοδος δεν είναι πλέον τόσο ακριβής. Βέβαια, ακόμη και σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να εφαρμοστεί τουλάχιστον σε κλιματικές κλίμακες, όπου τα τυχαία σφάλματα εξαλείφονται. Έτσι λοιπόν, παρόλο που η μέθοδος αυτή είναι εξ' ορισμού αμερόληπτη, το ενδεχόμενο μεροληψίας δεν μπορεί να αποκλειστεί σε σταθμούς με υψηλό υψόμετρο που έχουν χαμηλή θερμοκρασία λόγω του υψομέτρου. Γι' αυτό το λόγο, οι συγκρίσεις δεν έχουν γίνει μόνο ως προς το συντελεστή αποτελεσματικότητας, που επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη αυτής της μεροληψίας, αλλά και ως προς το συντελεστή συσχέτισης, που είναι εξ' ορισμού αμερόληπτος.

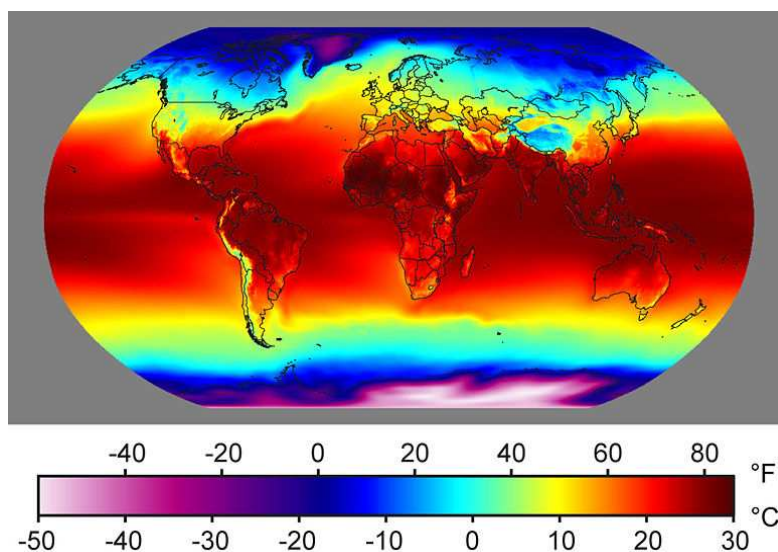


Εικόνα 2.9 – Εκτιμώμενη και πραγματική τιμή θερμοκρασίας και βροχόπτωσης για ένα σημείο του καννάβου του GCM. (πηγή: Koutsoyiannis D. et al. 2008b).

Όπως περιγράφηκε πιο πάνω η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε πραγματοποιεί μια χωρική παρεμβολή των αποτελεσμάτων των GCM για να εκτιμήσει την τιμή τους στο σταθμό ενδιαφέροντος και χρησιμοποιεί τις ιστορικές παρατηρήσεις μόνο για να εκτιμήσει τους βέλτιστους συντελεστές βάρους. Τη δυνατότητα αυτής της παρεμβολής μας τη δίνει το γεγονός ότι τα εξεταζόμενα πεδία (θερμοκρασίας και βροχόπτωσης) είναι ομαλά. Μια επιπλέον επιβεβαίωση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε δίνεται από ένα παράδειγμα που δείχνει ότι τέσσερα σημεία του καννάβου (ή ακόμα και τρία) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια επιτυχή παρεμβολή. Το παράδειγμα αναφέρεται στα τέσσερα κοντινότερα σημεία στο σταθμό Albany για το μοντέλο ECHAM5-OM για το σενάριο 20C3M (Koutsoyiannis D. et al. 2008b). Η θερμοκρασία και η βροχόπτωση του ενός από τα τέσσερα σημεία θεωρήθηκε άγνωστο και εκτιμήθηκε από τις χρονοσειρές των υπόλοιπων τριών σημείων χρησιμοποιώντας την παραπάνω μέθοδο (αλλά με τρεις συντελεστές βάρους). Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.9 η συμφωνία μεταξύ εκτιμώμενης και πραγματικής τιμής είναι εντυπωσιακή καλή ειδικά για τη θερμοκρασία (συντελεστές αποτελεσματικότητας 0.99 και 0.91 για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση αντίστοιχα). Κατά μείζονα λόγο, με τέσσερα σημεία αντί για τρία η συμφωνία θα είναι καλύτερη.

## 2.4.2 Επιφανειακές τιμές

Για την εξαγωγή των επιφανειακών τιμών δε χρειάζεται να κάνουμε κανενός είδους στατιστικής βελτιστοποίησης όπως απαιτείται στη σημειακή σύγκριση. Στη σημειακή σύγκριση η χρονοσειρά των κλιματικών μοντέλων για κάθε σταθμό προέκυπτε από το βέλτιστο γραμμικό συνδυασμό των χρονοσειρών των τεσσάρων κοντινότερων στο σταθμό σημείων του καννάβου. Αυτό, όπως εξηγήθηκε και παραπάνω, ευνοεί τα κλιματικά μοντέλα αφού αφήνονται να προσαρμοστούν όσο το δυνατόν καλύτερα (με βάση το συντελεστή αποτελεσματικότητας) πάνω στις παρατηρήσεις. Κατά την εξαγωγή της επιφανειακής χρονοσειράς υπολογίζεται ένας σταθμισμένος μέσος όρος των χρονοσειρών των σημείων του καννάβου που βρίσκονται μέσα στα γεωγραφικά όρια των ΗΠΑ. Έτσι λοιπόν, τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων αυτούσια (χωρίς κανενός είδους στατιστικής βελτιστοποίησης) συγκρίνονται με τα πρωτογενή ιστορικά δεδομένα και τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από αυτή τη σύγκριση θα είναι πιο ρεαλιστικά και ουσιαστικά.



Εικόνα 2.10 – Ετήσια μέση επιφανειακή θερμοκρασία για το 1961-1990. Φαίνεται καθαρά ότι η θερμοκρασία εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος. (πηγή: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Annual\\_Average\\_Temperature\\_Map.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Annual_Average_Temperature_Map.jpg))

Ο συντελεστής στάθμισης θα είναι συνάρτηση μόνο του γεωγραφικού πλάτους, καθώς οι κλιματικές μεταβλητές (θερμοκρασία, βροχόπτωση κτλ) εξαρτώνται μόνο από το γεωγραφικό πλάτος (βλέπε εικόνα 2.10, όπου παρουσιάζεται ενδεικτικά η εξάρτηση της θερμοκρασίας από το γεωγραφικό πλάτος). Για να υπολογίσουμε το συντελεστή στάθμισης υπολογίζουμε το εμβαδόν επιρροής κάθε σημείου του καννάβου. Στην εικόνα 2.11 απεικονίζεται ένα τμήμα του καννάβου και το εμβαδό



επιρροής ενός από τα σημεία. Επειδή τα σημεία του καννάβου είναι πολύ κοντά μεταξύ τους θα αγνοήσουμε την καμπυλότητα της σφαιρικής επιφάνειας γύρω από το εξεταζόμενο σημείο του καννάβου. Οι διαστάσεις του ορθογωνίου που περιβάλλει το

εξεταζόμενο σημείο είναι  $h = \left(\frac{\varphi_2 - \varphi}{2} + \frac{\varphi - \varphi_1}{2}\right) \cdot \frac{\pi}{180} \cdot R = \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \cdot \frac{\pi}{180} \cdot R$ ,

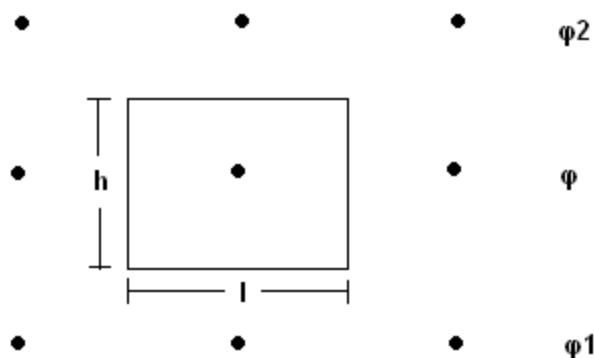
$l = \frac{2\pi r}{N} = \frac{2\pi(R \cos \varphi)}{N}$ , όπου  $R$  είναι η ακτίνα της γης,  $\varphi$  είναι το γεωγραφικό πλάτος

του εξεταζόμενου σημείου του καννάβου,  $\varphi_1$  και  $\varphi_2$  τα γεωγραφικά πλάτη των σημείων πλησίον του εξεταζόμενου σημείου,  $r$  είναι η ακτίνα του δευτερεύοντα κύκλου της σφαίρας που διέρχεται από το εξεταζόμενο σημείο και είναι παράλληλος προς τον ισημερινό και  $N$  το πλήθος των σημείων του καννάβου κατά την κατεύθυνση του γεωγραφικού μήκους. Το εμβαδό επιρροής είναι

$E = h \cdot l = \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \cdot \cos \varphi \cdot \left[\frac{(\pi R)^2}{90}\right]$ . Ο συντελεστής στάθμισης είναι λοιπόν

$\cos \varphi \cdot \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right)$ , αφού ο σταθερός όρος που βρίσκεται μέσα στην αγκύλη

απαλείφεται κατά τον υπολογισμό του σταθμισμένου μέσου όρου.



Εικόνα 2.11 – Τμήμα του καννάβου που παρουσιάζεται το εμβαδό επιρροής ενός σημείου.

## 2.5 Μύθοι και πραγματικότητα για τα κλιματικά μοντέλα

Μια πολύ διαδεδομένη άποψη στους επιστημονικούς κύκλους, κυρίως των κλιματολόγων, είναι ότι η απόδοση των GCMs σε σημειακή κλίμακα είναι χαμηλή λόγω του «θορύβου» από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, ενώ σε μεγαλύτερες κλίμακες τα αποτελέσματά τους είναι πιο αξιόπιστα. Σύμφωνα με τους *Randall et al. (2007)*, τα αποτελέσματα των GCM για την αλλαγή του κλίματος είναι κοντά στην πραγματικότητα μόνο σε κλίμακα ηπείρου και πάνω, και οι προβλέψεις για τη θερμοκρασία είναι περισσότερο αξιόπιστες σε σχέση με τις άλλες κλιματικές μεταβλητές (πχ βροχόπτωση). Σύμφωνα με αυτήν την άποψη τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα αποτελούνται από δύο συνιστώσες: «το κλίμα», που είναι χαμηλής συχνότητας και έναν υψηλής συχνότητας «θόρυβο». Το επιχείρημα που προτάσσεται από τους υποστηρικτές των μοντέλων είναι ότι τα GCMs μπορούν να προβλέψουν το κλίμα μόνο σε μεγάλες κλίμακες, παρόλο που στην ουσία τα GCMs προσομοιώνουν το «θόρυβο» και το μικροκλίμα αφού ολοκληρώνουν αριθμητικά διαφορικές εξισώσεις με ένα μικρό χρονικό και χωρικό βήμα (*Koutsoyiannis D. et al. 2008b*).

Παρόλα αυτά, οι προβλέψεις που γίνονται δεν περιορίζονται σε ηπειρωτική ή παγκόσμια κλίμακα, αλλά δίνονται από την IPCC γεωγραφικά κατανεμημένες προβλέψεις του κλίματος (πχ εικόνα 2.7). Αυτές οι γεωγραφικά κατανεμημένες πληροφορίες χρησιμοποιούνται, μετά από κατάλληλη επεξεργασία, από πολλούς επιστήμονες για να προβλέψουν ανεξαρτήτως χωρικής κλίμακας τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε διάφορες πτυχές της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Αυτή η αμφιλεγόμενη λογική έχει αντικρουστεί από τους *Koutsoyiannis and Montanari (2007)* που τονίζουν ότι η φασματική απεικόνιση των στοχαστικών διεργασιών του κλίματος είναι συνεχής και δεν κυριαρχεί κάποια συγκεκριμένη συχνότητα. Αυτό εκφράζεται από το φαινόμενο Hurst ή Hurst – Kolmogorov (HK) (μακροχρόνια εμμονή) που χαρακτηρίζει τις περισσότερες υδροκλιματικές διεργασίες για το οποίο περισσότερες πληροφορίες θα δοθούν στην ενότητα 2.7. Οι *Koutsoyiannis and Montanari*, καθώς και ο *Koutsoyiannis (2003,2005,2006a,b)* και ο *Koutsoyiannis et al. (2007)* επιβεβαίωσαν πειραματικά και τεκμηρίωσαν θεωρητικά το φαινόμενο HK δείχνοντας ότι η αβεβαιότητα στην κλιματική (30-ετή) κλίμακα είναι ελάχιστα μικρότερη απ' ό,τι στην ετήσια κλίμακα, σε αντίθεση με την κλασσική θεωρία στην οποία υπάρχει σημαντική μείωση της αβεβαιότητας καθώς προχωρούμε

από την ετήσια στην κλιματική κλίμακα. Αυτή η θεώρηση οδηγεί σε μια διαφορετική θεώρηση των κλιματικών διεργασιών, όπου οι προβλέψεις σε μεγάλη χρονική κλίμακα ενέχουν πολύ μεγάλη αβεβαιότητα. Επιπρόσθετα, ο *Koutsoyiannis (2006b)* απέδειξε, χρησιμοποιώντας ένα απλό ντετερμινιστικό μοντέλο δύο παραμέτρων που μπορούσε να αναπαράγει χρονοσειρές με διατήρηση της εμμονής, ότι μια μικρή μεταβολή των παραμέτρων οδηγεί σε μεγάλες αποκλίσεις όχι μόνο σε μικρές χρονικές κλίμακες αλλά κυρίως στην κλιματική κλίμακα.

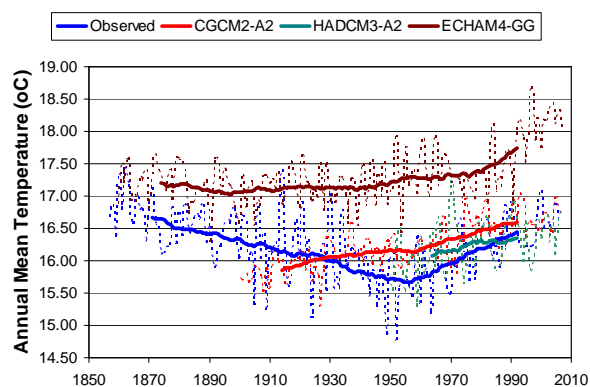
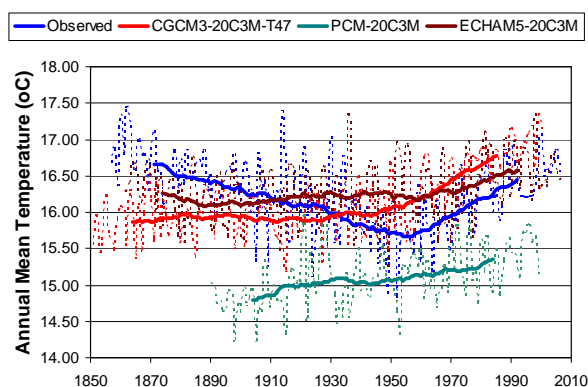
Είναι λογικό, λοιπόν, να γεννιούνται δύο ερωτήματα: (1) Είναι δυνατόν οι προβλέψεις σε κλίμακα ηπείρου και πάνω να είναι αξιόπιστες όταν οι γεωγραφικά κατανεμημένες πληροφορίες από τις οποίες προκύπτουν με χωρική ολοκλήρωση δεν είναι οι ίδιες αξιόπιστες; (2) Οι γεωγραφικά κατανεμημένες προβλέψεις είναι αρκετά αξιόπιστες προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε περαιτέρω μελέτες; Αυτή η εργασία προσπαθεί να απαντήσει και στα δύο αυτά καίρια ερωτήματα που αφορούν την αξιοπιστία των κλιματικών προβλέψεων. Πραγματοποιούμε σύγκριση των μοντέλων σε επιφανειακή κλίμακα για να απαντήσουμε στο 1<sup>ο</sup> ερώτημα, ενώ με την σύγκριση σε σημειακή κλίμακα προσπαθούμε να απαντήσουμε στο 2<sup>ο</sup> ερώτημα.

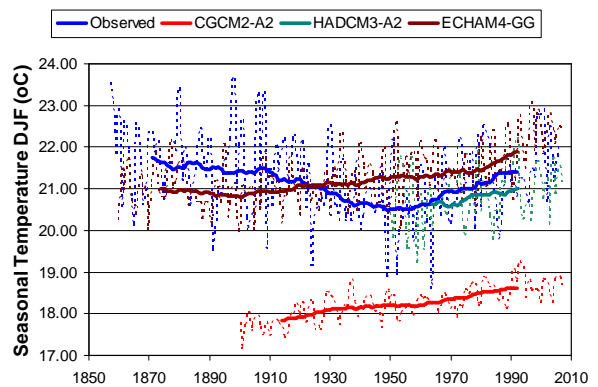
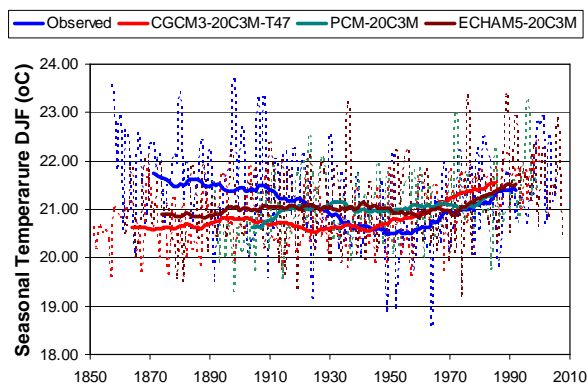
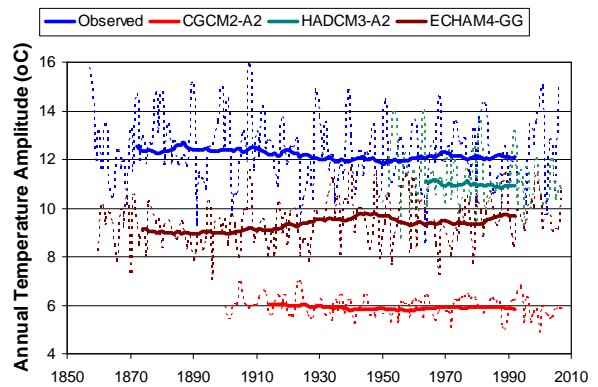
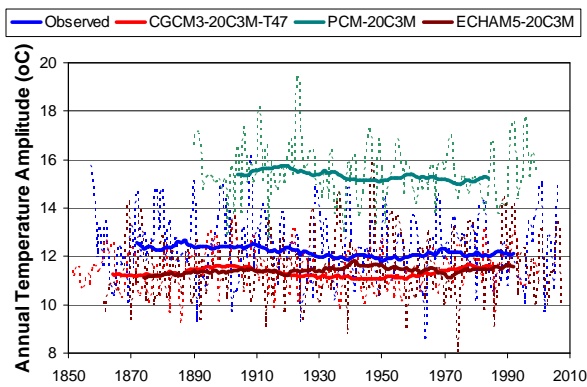
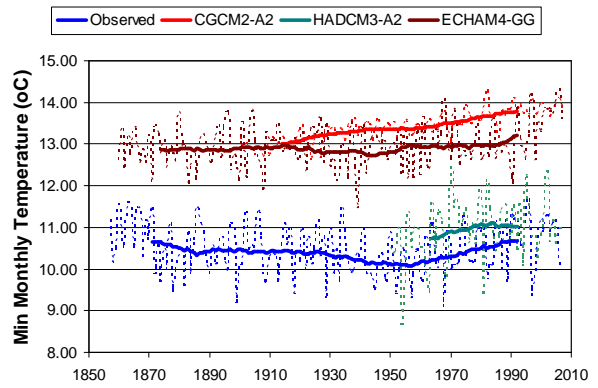
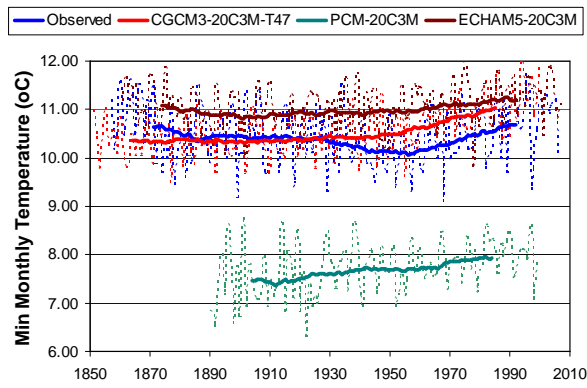
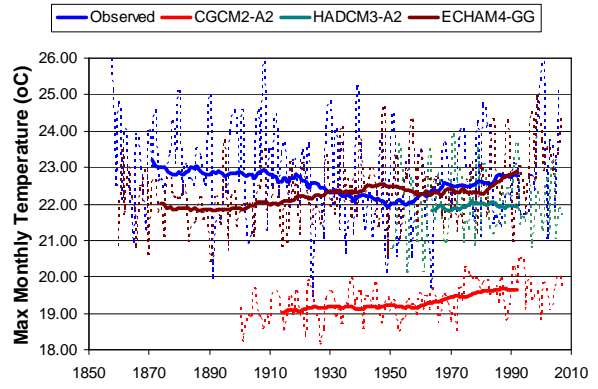
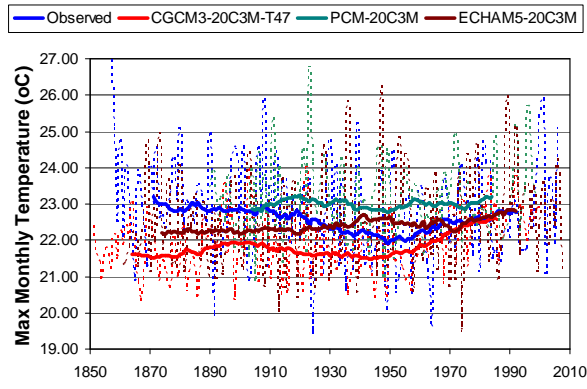
## 2.6 Τρόπος σύγκρισης

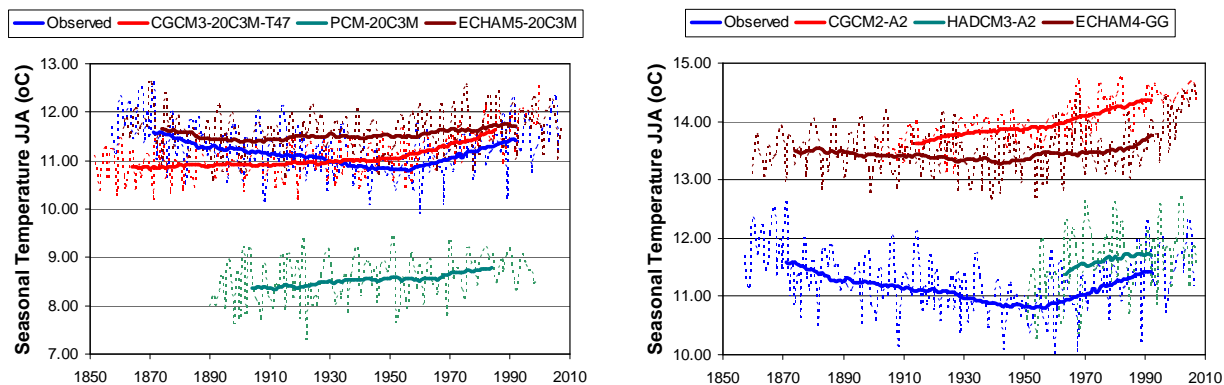
Μετά την εξαγωγή των δεδομένων από τα μοντέλα το τελευταίο στάδιο είναι η σύγκρισή τους με τις ιστορικές χρονοσειρές, η οποία γίνεται γραφικά και αριθμητικά χρησιμοποιώντας διάφορους στατιστικούς δείκτες. Η σύγκριση γίνεται σε τρεις χρονικές κλίμακες: μηνιαία, ετήσια, κλιματική, όπου η τελευταία προκύπτει από τον 30-ετή (κινούμενο) μέσο όρο. Στην ετήσια και στην κλιματική κλίμακα εξετάζονται για κάθε μεταβλητή τα στατιστικά χαρακτηριστικά διαφόρων χρονοσειρών: Για τη θερμοκρασία οι χρονοσειρές είναι: (α) μέση ετήσια θερμοκρασία, (β) μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία ανά έτος, (γ) ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία ανά έτος, (δ) ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος (μέγιστη μηνιαία τιμή – ελάχιστη μηνιαία τιμή, για τη βροχόπτωση δεν έχει νόημα αυτή η παράμετρος), (ε) εποχιακή θερμοκρασία Ιουνίου – Ιουλίου – Αυγούστου, (ζ) εποχιακή θερμοκρασία Δεκεμβρίου – Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου. Για τη βροχόπτωση οι χρονοσειρές είναι: (α) συνολική ετήσια βροχόπτωση, (β) μέγιστη μηνιαία βροχόπτωση ανά έτος, (γ) ελάχιστη μηνιαία

βροχόπτωση ανά έτος, (δ) εποχιακή βροχόπτωση Ιουνίου – Ιουλίου – Αυγούστου, (ε) εποχιακή βροχόπτωση Δεκεμβρίου – Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου.

Δύο βασικοί δείκτες χρησιμοποιούνται σε όλες τις χρονικές κλίμακες: ο συντελεστής αποτελεσματικότητας (coefficient of efficiency), και ο συντελεστής συσχέτισης (correlation coefficient). Επιπρόσθετα, για όλες τις χρονικές κλίμακες και για όλες τις χρονοσειρές υπολογίζουμε και συγκρίνουμε τη μέση τιμή (που προφανώς είναι ίδια για όλες τις χρονικές κλίμακες) και την τυπική απόκλιση. Ειδικότερα στην ετήσια κλίμακα εξετάζονται ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης 1<sup>ης</sup> τάξης και ο συντελεστής Hurst (περισσότερα γι' αυτόν το συντελεστή στην ενότητα 2.7). Για την κλιματική κλίμακα εξετάζονται τρεις επιπλέον δείκτες: (1) η διακύμανση του 30-ετούς κινούμενου μέσου για τη θερμοκρασία ή τη βροχόπτωση στον 20<sup>ο</sup> αιώνα (που είναι η περίοδος που καλύπτουν τα περισσότερα μοντέλα εκτός από το HadCM3-A2, που ξεκινά από το 1950), υπολογιζόμενη ως η διαφορά των 30-ετών μέσων όρων κεντραρισμένων το 1985 και το 1915, (2) η διαφορά μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους κάθε χρονοσειράς, (3) η μέγιστη διακύμανση κατά την εξεταζόμενη περίοδο, η οποία υπολογίζεται ως η διαφορά της μέγιστης από την ελάχιστη τιμή, όπου θετικό πρόσημο σημαίνει ότι η ελάχιστη τιμή προηγείται της μέγιστης (χρονικά), ενώ αρνητικό πρόσημο σημαίνει το αντίθετο. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία για το σταθμό της Αδελαΐδας στην Αυστραλία.







Εικόνα 2.12 – Γραφική σύγκριση των ιστορικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων των μοντέλων σε ετήσια και κλιματική (30-ετή) κλίμακα για όλες τις χρονοσειρές που εξετάστηκαν (ετήσια μέση θερμοκρασία, μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία ανά έτος, ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία ανά έτος, ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος, εποχιακή θερμοκρασία Δεκεμβρίου-Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου, μέση, εποχιακή θερμοκρασία Ιουνίου-Ιουλίου-Αυγούστου για την πόλη της Αδελαΐδας στην Αυστραλία.

Πίνακας 2.6 – Στατιστικά στοιχεία σε μηνιαία κλίμακα για την πόλη της Αδελαΐδας.

Χρονοσειρές - Μοντέλα	Period	Average (°C)	St Dev (°C)	Correlation	Efficiency
Observed	1857-2007	16.22	4.08		
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	16.13	3.99	0.933	0.884
PCM-20C3M	1890-2007	15.08	5.28	0.906	0.603
ECHAM5-20C3M	1860-2007	16.28	3.92	0.913	0.846
CGCM2-A2	1900-2007	16.20	2.13	0.799	0.564
HADCM3-A2	1950-2007	16.20	3.74	0.939	0.880
ECHAM4-GG	1860-2007	17.28	3.19	0.918	0.764

Πίνακας 2.7 – Στατιστικά στοιχεία σε ετήσια κλίμακα για όλες τις χρονοσειρές που εξετάστηκαν για την πόλη της Αδελαΐδας.

Χρονοσειρές - Μοντέλα	Period	Average (°C)	St Dev (°C)	Autocorrel	Correlation	Efficiency	Hurst
<b>Annual Mean Temperature</b>							
Observed	1857-2007	16.22	0.51	0.429			0.884
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	16.14	0.46	0.590	0.002	-0.816	0.920
PCM-20C3M	1890-2007	15.08	0.38	0.347	0.057	-4.933	0.824
ECHAM5-20C3M	1860-2007	16.28	0.40	0.166	0.052	-0.577	0.645
CGCM2-A2	1900-2007	16.20	0.36	0.695	0.312	-0.169	0.925
HADCM3-A2	1950-2007	16.21	0.41	0.334	0.288	-0.323	0.757

ECHAM4-GG	1860-2007	17.28	0.43	0.442	0.088	-4.991	0.843
<b><u>Max Monthly Temperature</u></b>							
Observed	1857-2007	22.67	1.35	0.120			0.613
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	21.89	0.84	0.288	-0.013	-0.748	0.746
PCM-20C3M	1890-2007	23.01	1.03	-0.012	0.080	-0.676	0.568
ECHAM5-20C3M	1860-2007	22.41	1.21	-0.052	-0.054	-0.995	0.446
CGCM2-A2	1900-2007	19.29	0.48	0.369	0.033	-5.993	0.762
HADCM3-A2	1950-2007	21.86	0.92	-0.114	-0.066	-0.916	0.388
ECHAM4-GG	1860-2007	22.29	0.90	0.117	-0.007	-0.559	0.632
<b><u>Min Monthly Temperature</u></b>							
Observed	1857-2007	10.45	0.59	0.068			0.636
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	10.54	0.49	0.229	0.000	-0.725	0.764
PCM-20C3M	1890-2007	15.08	0.38	0.347	0.057	-4.933	0.824
ECHAM5-20C3M	1860-2007	16.28	0.40	0.166	0.052	-0.577	0.645
CGCM2-A2	1900-2007	16.20	0.36	0.695	0.312	-0.169	0.925
HADCM3-A2	1950-2007	16.21	0.41	0.334	0.288	-0.323	0.757
ECHAM4-GG	1860-2007	17.28	0.43	0.442	0.088	-4.991	0.843
<b><u>Annual Temperature Amplitude</u></b>							
Observed	1857-2007	12.23	1.41	0.087			0.565
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	11.35	0.82	0.141	-0.032	-0.784	0.564
PCM-20C3M	1890-2007	15.34	1.15	0.087	-0.065	-6.312	0.619
ECHAM5-20C3M	1860-2007	11.39	1.29	-0.034	-0.094	-1.397	0.424
CGCM2-A2	1900-2007	5.90	0.42	0.190	-0.080	-20.377	0.550
HADCM3-A2	1950-2007	10.98	1.12	-0.284	-0.011	-1.351	0.292
ECHAM4-GG	1860-2007	9.35	0.95	0.052	0.011	-4.730	0.602
<b><u>Seasonal Temperature DJF</u></b>							
Observed	1857-2007	21.22	0.97	0.206			0.728
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	20.88	0.64	0.426	-0.064	-0.618	0.841
PCM-20C3M	1890-2007	21.00	0.69	0.204	-0.084	-0.663	0.704
ECHAM5-20C3M	1860-2007	21.05	0.84	0.034	-0.111	-1.008	0.532
CGCM2-A2	1900-2007	18.22	0.40	0.681	0.070	-9.515	0.923
HADCM3-A2	1950-2007	20.80	0.68	0.198	0.185	-0.379	0.671
ECHAM4-GG	1860-2007	21.24	0.67	0.334	0.040	-0.457	0.801
<b><u>Seasonal Temperature JJA</u></b>							
Observed	1857-2007	11.22	0.52	0.198			0.761
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	11.10	0.45	0.323	-0.037	-0.864	0.847
PCM-20C3M	1890-2007	8.53	0.46	-0.080	-0.115	-31.756	0.579
ECHAM5-20C3M	1860-2007	11.57	0.42	0.111	0.133	-0.906	0.489

CGCM2-A2	1900-2007	13.97	0.38	0.599	0.260	-35.032	0.921
HADCM3-A2	1950-2007	11.55	0.59	0.086	0.222	-1.272	0.675
ECHAM4-GG	1860-2007	13.49	0.42	0.178	0.049	-19.946	0.631

Πίνακας 2.8 – Στατιστικά στοιχεία σε κλιματική (30-ετής κινούμενος μέσος όρος) κλίμακα για όλες τις χρονοσειρές που εξετάστηκαν για την πόλη της Αδελαΐδας.

Χρονοσειρές - Μοντέλα	Period	St. Dev (°C)	Efficiency	Correlation	DT (20 <sup>th</sup> Century) (°C)	DT (All data) (°C)	maxDT (°C)
<b><u>Annual Mean Temperature</u></b>							
Observed	1857-2007	0.28			0.15	-0.22	0.99
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	0.24	-1.20	-0.226	0.87	0.90	0.90
PCM-20C3M	1890-2007	0.12	-23.73	-0.192	0.36	0.56	0.56
ECHAM5-20C3M	1860-2007	0.11	-0.48	-0.035	0.33	0.34	0.49
CGCM2-A2	1900-2007	0.20	-1.35	0.455	0.64	0.74	0.74
HADCM3-A2	1950-2007	0.08	0.22	0.936		0.28	0.28
ECHAM4-GG	1860-2007	0.15	-17.71	-0.013	0.37	0.54	0.71
<b><u>Max Monthly Temperature</u></b>							
Observed	1857-2007	0.31			0.01	-0.42	1.29
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	0.29	-6.35	0.125	0.86	1.08	1.12
PCM-20C3M	1890-2007	0.11	-5.01	0.385	0.05	0.33	0.44
ECHAM5-20C3M	1860-2007	0.17	-1.10	-0.452	0.43	0.60	0.67
CGCM2-A2	1900-2007	0.20	-159.25	0.503	0.60	0.61	0.66
HADCM3-A2	1950-2007	0.07	-22.57	0.276		0.11	0.27
ECHAM4-GG	1860-2007	0.26	-3.12	-0.597	0.52	0.89	1.07
<b><u>Min Monthly Temperature</u></b>							
Observed	1857-2007	0.16			0.12	0.04	0.61
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	0.19	-2.96	-0.104	0.69	0.69	0.72
PCM-20C3M	1890-2007	0.15	-402.86	-0.084	0.45	0.47	0.58
ECHAM5-20C3M	1860-2007	0.10	-15.88	0.357	0.33	0.11	0.44
CGCM2-A2	1900-2007	0.21	-339.90	0.432	0.71	0.78	0.78
HADCM3-A2	1950-2007	0.11	-10.46	0.866		0.31	0.38
ECHAM4-GG	1860-2007	0.08	-271.36	0.500	0.02	0.34	0.48
<b><u>Annual Temperature Amplitude</u></b>							
Observed	1857-2007	0.19					
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	0.17	-19.55	0.473			



PCM-20C3M	1890-2007	0.19	-390.72	0.482			
ECHAM5-20C3M	1860-2007	0.14	-17.53	-0.601			
CGCM2-A2	1900-2007	0.07	-2573.51	0.674	-		
HADCM3-A2	1950-2007	0.08	-246.35	-0.181			
ECHAM4-GG	1860-2007	0.25	-233.10	-0.804			
<b><u>Seasonal Temperature DJF</u></b>							
Observed	1857-2007	0.37			0.08	-0.35	1.28
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	0.26	-1.23	-0.125	0.82	0.95	1.01
PCM-20C3M	1890-2007	0.13	-0.63	-0.353	0.28	0.66	0.66
ECHAM5-20C3M	1860-2007	0.15	-0.17	0.048	0.34	0.73	0.74
CGCM2-A2	1900-2007	0.21	-89.69	0.294	0.70	0.80	0.80
HADCM3-A2	1950-2007	0.13	-1.36	0.850		0.36	0.41
ECHAM4-GG	1860-2007	0.26	-1.05	-0.358	0.68	0.89	1.08
<b><u>Seasonal Temperature JJA</u></b>							
Observed	1857-2007	0.21			0.20	-0.16	0.78
CGCM3-20C3M-T47	1857-2007	0.20	-1.37	-0.190	0.71	0.78	0.78
PCM-20C3M	1890-2007	0.12	-316.07	0.034	0.34	0.41	0.44
ECHAM5-20C3M	1860-2007	0.09	-4.16	0.331	0.30	0.07	0.39
CGCM2-A2	1900-2007	0.21	-274.36	0.632	0.67	0.75	0.75
HADCM3-A2	1950-2007	0.10	-6.72	0.950		0.33	0.35
ECHAM4-GG	1860-2007	0.08	-132.43	0.682	0.12	0.27	0.49

## 2.7 Το φαινόμενο Hurst και η σημασία του

### 2.7.1 Εισαγωγή

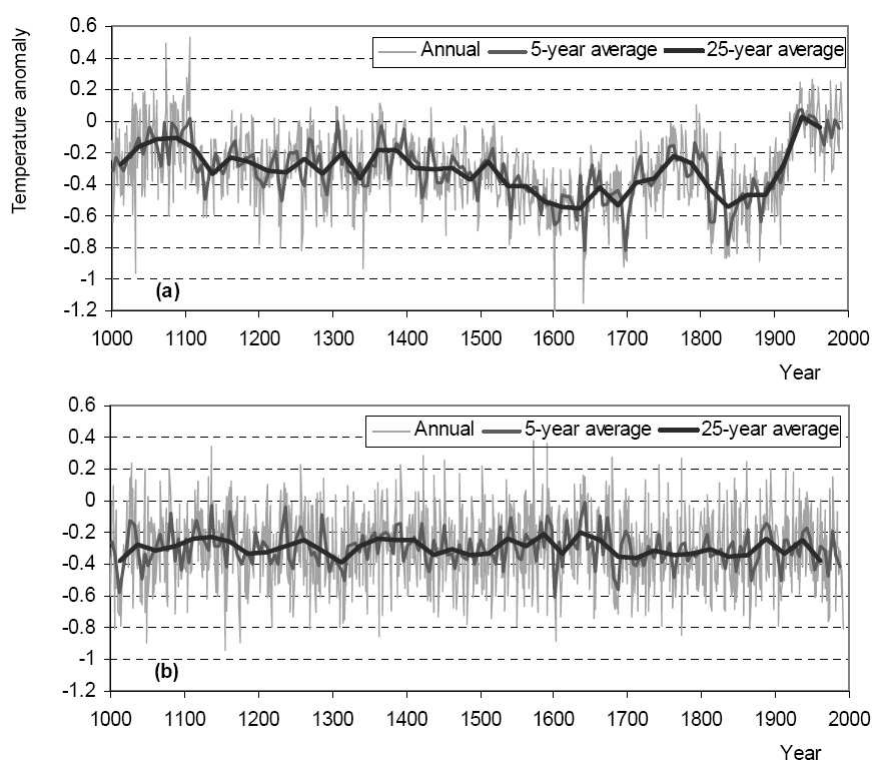
Όλες οι ιστορικές χρονοσειρές εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις σε όλες τις χρονικές κλίμακες, ακόμη και στη 30-ετή κλίμακα, ανεξάρτητα της τοποθεσίας και του κλίματος του σταθμού. Αυτές οι διακυμάνσεις (κυρίως στις μεγάλες χρονικές κλίμακες) είναι ένα βασικό στοιχείο αυτής της εργασίας καθώς είναι καθοριστικής σημασίας η επιτυχής πρόβλεψή τους από τα κλιματικά μοντέλα. Έτσι λοιπόν, είναι κατανοητό ότι κανένα μοντέλο δε μπορεί να παράγει ρεαλιστικές απεικονίσεις του μελλοντικού κλίματος άμα δεν αναπαράγει αυτές τις μακροχρόνιες τάσεις. Ένας δείκτης που δείχνει την ύπαρξη ή μη μακροχρόνιας εμμονής στις χρονοσειρές είναι ο συντελεστής Hurst, που εκτιμάται για την ετήσια χρονική κλίμακα και άνω.

Σε αντίθεση με τις χρονοσειρές που παρατηρούνται σε ένα πείραμα τύχης, όπου η μια παρατήρηση είναι ανεξάρτητη από την άλλη, στη φύση υπάρχει συσχέτιση μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών μιας χρονοσειράς. Είναι εύκολα κατανοητό ότι σε ένα πλημμυρογράφημα ενός ποταμού ένας μήνας με μεγάλη παροχή θα ακολουθηθεί από ένα μήνα με επίσης μεγάλη παροχή. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από την αλληλεξάρτηση της παροχής του ποταμού με την αποθηκευτικότητα του υπόγειου υδροφορέα. Υψηλή παροχή του ποταμού υποδεικνύει ότι και η υπόγεια παροχή θα είναι υψηλή και δεδομένου ότι η υπόγεια ροή είναι μια αργή διαδικασία αναμένεται ότι η συμβολή της στην παροχή του ποταμού τον επόμενο μήνα θα είναι σημαντική. Το παραπάνω είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα βραχυχρόνιας εμμονής (*Koutsoyiannis D., 2005a*).

Στη φύση όμως παρατηρείται και ένα άλλο είδος αλληλεξάρτησης σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, που ονομάζεται μακροχρόνια εμμονή. Η μακροχρόνια εμμονή στις ιστορικές χρονοσειρές των υδρολογικών και άλλων γεωφυσικών μεγεθών παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Hurst το 1951 καθώς μελετούσε το πλημμυρογράφημα του ποταμού Νείλου, στο πλαίσιο της κατασκευής του φράγματος του Ασσουάν. Το φαινόμενο Hurst, όπως ονομάστηκε έκτοτε προς τιμή του, είναι ουσιαστικά η τάση των υγρών ετών να συσσωρεύονται σε υγρές περιόδους, ή των θερμών ετών να συσσωρεύονται σε θερμές περιόδους. Αυτό που ξεχωρίζει μια χρονοσειρά με μακροχρόνια εμμονή από μια χρονοσειρά λευκού θορύβου (διαδοχικές

ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν την ίδια κατανομή) είναι οι έντονες διακυμάνσεις στις μεγάλες χρονικές κλίμακες (Εικόνα 2.13). Από την ανακάλυψη του, η παρουσία του φαινομένου Hurst έχει επιβεβαιωθεί σε πολλές περιβαλλοντικές διεργασίες και σήμερα έχει αποκτήσει νέο ενδιαφέρον αφού έχει συσχετιστεί με την κλιματική αλλαγή (Koutsoyiannis D., 2005a).

Τα κλιματικά μοντέλα είναι απλοποιημένες αναπαραστάσεις ενός τρομερά πολύπλοκου συστήματος με συνέπεια τα αποτελέσματα που παράγουν να είναι αμφιβόλου αξίας (Koutsoyiannis D., 2003). Όπως επισημαίνουν οι von Storch et al (2001) το κλίμα πρέπει να θεωρηθεί σαν ένα στοχαστικό σύστημα και τα κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα δεν είναι τίποτα περισσότερο από γεννήτριες τυχαίων αριθμών.



Εικόνα 2.13 – (a) Γράφημα των αποκλίσεων από το μέσο της περιόδου 1961-1990 της θερμοκρασίας του βορείου ημισφαιρίου που έχει ανακατασκευαστεί από τους Jones et al (1998b), (b) για σύγκριση, μια χρονοσειρά λευκού θορύβου με την με τον ίδιο μέσο όρο και τυπική απόκλιση (Koutsoyiannis D., 2003)

Παρατηρώντας την εικόνα 2.13 βλέπουμε τις έντονα ανοδικές και πτωτικές τάσεις που παρατηρούνται και σε πολλές άλλες μακρινές χρονοσειρές πολλών υδρολογικών και κλιματικών μεταβλητών. Αυτές οι τάσεις έχουν θεωρηθεί από πολλούς ερευνητές ως ντετερμινιστικές συνιστώσες στις χρονοσειρές. Βέβαια, λόγω της απουσίας ενός ακριβούς ντετερμινιστικού μοντέλου που να περιγράφει και να προβλέπει την ακριβή εξέλιξή τους στο μέλλον, αυτές οι τάσεις περιγράφονται αποτελεσματικότερα ως

στοχαστικές διακυμάνσεις σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Αυτές οι ακανόνιστες διακυμάνσεις σε διάφορες χρονικές κλίμακες δεν είναι τίποτα περισσότερο από το φαινόμενο Hurst (*Koutsoyiannis D., 2003,2006a*).

## 2.7.2 Μαθηματική περιγραφή του φαινομένου Hurst

Το φαινόμενο Hurst μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας την θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων. Έστω  $X_i$  μια στοχαστική ανέλιξη που αναπαριστά μια υδρολογική μεταβλητή, όπου  $i = 1, 2, \dots$ , είναι το διακριτό χρονικό βήμα (ετήσιο ή υπερετήσιο). Η ανέλιξη θεωρείται ότι είναι στάσιμη, κάτι που δεν εμποδίζει τη μεταβλητότητα της σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Η υπόθεση της στασιμότητας επιβάλλει ότι οι στατιστικές παράμετροι της ανελίξης δεν είναι συναρτήσεις του χρόνου. Άρα η μέση τιμή  $\mu := E[X_i]$ , η συνδιακύμανση  $\gamma_j := Cov[X_i, X_{i+j}]$  ( $j=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης  $\rho_j := Corr[X_i, X_{i+j}] = \gamma_j / \gamma_0$ , και η τυπική απόκλιση  $\sigma := \sqrt{\gamma_0}$  είναι ανεξάρτητες του χρόνου. Επιπρόσθετα, γίνεται η υπόθεση της εργοδικότητας, σύμφωνα με την οποία αυτές οι παράμετροι μπορούν να προσδιοριστούν από μια απλή δειγματοσυνάρτηση της ανελίξης, αντικαθιστώντας τους χρονικούς μέσους με τους συνολικούς μέσους (*Koutsoyiannis D., 2003,2005a*).

Έστω  $k$  ένας θετικός ακέραιος ο οποίος αναπαριστά μια χρονική κλίμακα μεγαλύτερη από τη βασική χρονική κλίμακα της ανελίξης  $X_i$  (ετήσια). Η αθροιστική στοχαστική ανέλιξη σε αυτήν τη χρονική κλίμακα συμβολίζεται ως:

$$Z_i^{(k)} := \sum_{l=(i-1)k+1}^{ik} X_l, \quad (1)$$

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της  $Z_i^{(k)}$  για κάθε χρονική κλίμακα  $k$  προκύπτουν από τα αντίστοιχα της  $X_i$ . Για παράδειγμα, η μέση τιμή δίνεται από την:

$$E[Z_i^{(k)}] = k\mu, \quad (2)$$

και η διακύμανση και η συνδιακύμανση (ή ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης) εξαρτώνται από την ειδική μορφή της  $\gamma_j$  (ή του  $\rho_j$ ). Σε μια ανέλιξη που παρουσιάζει το φαινόμενο Hurst, η διακύμανση  $\gamma_0^{(k)}$  για τη χρονική κλίμακα  $k$  σχετίζεται με αυτήν της βασικής χρονικής κλίμακας  $\gamma_0$  με τη σχέση:

$$\gamma_0^{(k)} := Var[Z_i^{(k)}] = k^{2H} \cdot \gamma_0, \quad (3)$$

Όπου  $H$  είναι μία σταθερά, γνωστή ως συντελεστής Hurst το πεδίο τιμών της οποίας είναι το διάστημα  $[0.5,1]$ . Η τιμή  $H=0.5$  αντιστοιχεί στο λευκό θόρυβο, ενώ οι τιμές στο διάστημα  $[0,0.5]$  είναι μαθηματικά αποδεκτές αλλά δεν έχουν κανένα φυσικό νόημα. Συνεπώς, η τυπική απόκλιση δίνεται από την εξής σχέση:

$$\sigma^{(k)} := (\gamma_0^{(k)})^{1/2} = k^H \cdot \sigma, \quad (4)$$

Η γραφική παράσταση σε διπλό λογαριθμικό χαρτί με άξονες την τυπική απόκλιση  $\sigma^{(k)}$  και τη χρονική κλίμακα  $k$  είναι ευθεία γραμμή με κλίση το συντελεστή Hurst. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3) μπορεί ναδειχτεί ότι ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης για οποιαδήποτε χρονική κλίμακα  $k$  είναι ανεξάρτητος της χρονικής κλίμακας  $k$  και δίνεται από την σχέση:

$$\rho_j^{(k)} = \rho_j = (1/2)(|j+1|^{2H} + |j-1|^{2H}) - |j|^{2H} \approx H(2H-1)|j|^{2H-2}, \quad (5)$$

Συνεπώς, η συνδιακύμανση δίνεται από την:  $\gamma_j^{(k)} = \gamma_0^{(k)} \rho_j^{(k)}$

Το φάσμα ισχύος της ανέλιξης δίνεται από την σχέση:

$$s_\gamma^{(k)} := 2 \sum_{j=-\infty}^{\infty} \gamma_j^{(k)} \cos(2\pi j\omega) \approx 4(1-H)\gamma_0^{(k)}(2\omega)^{1-2H}, \quad (6)$$

Όλα τα προηγούμενα μπορούν να γενικευτούν αν υποθέσουμε ότι η ανέλιξη  $Z_i^{(k)}$  εμφανίζει ιδιότητες ανεξάρτητες της χρονικής κλίμακας στην (πεπερασμένης διάστασης από κοινού) κατανομή και ορίζεται από τη σχέση:

$$(Z_i^{(k)} - k\mu) \stackrel{d}{=} \left(\frac{k}{l}\right)^H (Z_i^{(k)} - l\mu), \quad (7)$$

Όπου το σύμβολο  $\stackrel{d}{=}$  σημαίνει ισότητα ως προς την κατανομή. Σε αυτήν την περίπτωση η εξίσωση (3) μπορεί να εξαχθεί από την εξίσωση (7) για  $i=j=l$  και παίρνοντας τη διακύμανση των δύο μελών. Η στοχαστική ανέλιξη που ορίζεται από την εξίσωση (8) είναι μια ανέλιξη απλής ομοιοθεσίας (Simple Scaling Stochastic process – SSS). Αν η  $X_i$  (και επομένως και η  $Z_i^{(k)}$ ) ακολουθεί κανονική κατανομή τότε η  $X_i$  (και επομένως και η  $Z_i^{(k)}$ ) καλείται κλασματικός γκαουσιανός θόρυβος (fractional Gaussian noise) και εισήχθη από το Mandelbrot το 1965 (Koutsoyiannis D, 2003,2005a,2005b).

Η παρουσία του φαινομένου Hurst αυξάνει δραματικά την αβεβαιότητα των κλιματικών και υδρολογικών ανελιξεων. Αν μια τέτοια ανέλιξη ήταν τυχαία και

είχαμε ένα δείγμα μεγέθους  $n$ , τότε η αβεβαιότητα σε μεγάλη κλίμακα που μπορεί να εκφραστεί με τη διακύμανση της εκτιμήτριας του μέσου όρου  $\bar{X}$  :

$$\text{var}[\bar{X}] = \frac{\sigma^2}{n}, \quad (8)$$

Αυτή η σχέση προσφέρει, επίσης, μια καλή προσέγγιση για μια ανέλιξη με βραχυχρόνια εμμονή αλλά δεν είναι κατάλληλη για μια ανέλιξη που εμφανίζει μακροχρόνια εμμονή. Στην τελευταία περίπτωση, ισχύει η επόμενη εξίσωση:

$$\text{var}[\bar{X}] = \frac{\sigma^2}{n^{2-2H}}, \quad (9)$$

Η διαφορά στις σχέσεις (8) και (9) γίνεται αισθητή για μεγάλες τιμές του συντελεστή Hurst. Για παράδειγμα, σε μια χρονοσειρά  $n=100$  ετών και τυπικής απόκλισης  $\sigma$ , σύμφωνα με την εξίσωση της κλασσικής στατιστικής, το τυπικό σφάλμα εκτίμησης, δηλαδή η τετραγωνική ρίζα της  $\text{var}[\bar{X}]$  είναι  $\sigma/10$ . Για  $H=0.8$  η σωστή τιμή που δίνεται από την (9) είναι  $\sigma/2.5$ , δηλαδή τέσσερις φορές μεγαλύτερη. Για να έχουμε σφάλμα εκτίμησης  $\sigma/10$ , το απαιτούμενο μέγεθος της χρονοσειράς θα έπρεπε να είναι 100.000 χρόνια! Προφανώς αυτή η ουσιώδης διαφορά επηρεάζει και τις άλλες συνήθεις στατιστικές παραμέτρους (Koutsoyiannis D., 2005a).

### 2.7.3 Στατιστική εκτίμηση και πρόβλεψη στις ανεπίξεις απλής ομοιοθεσίας (Simple Scaling Stochastic Processes – SSS)

Σε αυτήν την ενότητα θα μελετηθούν οι εκτιμήτριες των πιο διαδομένων στοχαστικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στη μελέτη του κλίματος κάτω από την υπόθεση της SSS (Koutsoyiannis D., 2003). Γίνεται η υπόθεση ότι ένα δείγμα είναι μια χρονοσειρά μήκους  $n$  της οποίας τα στοιχεία αντιστοιχούν στις τυχαίες μεταβλητές  $X_1, X_2, \dots, X_n$ .

**Εκτίμηση του μέσου:** Η πιο απλή στατιστική παράμετρος που εκτιμάται είναι ο μέσος όρος:

$$\bar{X} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (10)$$

η οποία είναι αμερόληπτη ανεξάρτητα από τον τύπο της στοχαστικής ανέλιξης, δηλαδή  $E[\bar{X}] = \mu$ . Όπως είδαμε παραπάνω στην κλασική στατιστική  $\text{var}[\bar{X}] = \frac{\sigma^2}{n}$

ενώ στην περίπτωση της SSS  $\text{var}[\bar{X}] = \frac{\sigma^2}{n^{2-2H}}$ .

**Εκτίμηση της διακύμανσης και της τυπικής απόκλισης για γνωστό H:** Η γνωστή εκτιμήτρια της διακύμανσης:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (11)$$

δεν είναι πλέον αμερόληπτη για την περίπτωση της SSS. Αποδείχτηκε (Beran, 1994, p. 156) ότι μια συνεπής SSS εκτιμήτρια, που είναι αμερόληπτη για γνωστό H είναι η:

$$\bar{S}^2 := \frac{n-1}{n-n^{2H-1}} S^2 = \frac{1}{n-n^{2H-1}} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (12)$$

Η παράμετρος  $\tilde{S} = \sqrt{\bar{S}^2}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως η εκτιμήτρια της τυπικής απόκλισης  $\sigma$ . Αλλά, αφού η τετραγωνική ρίζα είναι μη γραμμικός τελεστής, η αμεροληψία δε διατηρείται. Μια συνεπής εκτιμήτρια (περίπου αμερόληπτη για γνωστό H και για κανονική κατανομή της  $X_i$ ) είναι:

$$\bar{\bar{S}} := \sqrt{\frac{n-1/2}{n-n^{2H-1}}} S = \sqrt{\frac{n-1/2}{n-n^{2H-1}}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (13)$$

Αυτή η σχέση προέκυψε από συστηματικές προσομοιώσεις Monte Carlo. Είναι μια καλή προσέγγιση της πραγματικής αμερόληπτης εκτιμήτριας, η οποία για ανεξάρτητη γκαουσιανή  $X_i$  είναι:  $\bar{\bar{S}} = \{[(n-1)/2]^{0.5} \Gamma[(n-1)/2] / \Gamma(n/2)\} S$ .

Η διακύμανση της S για κανονική κατανομή της  $X_i$  στην κλασική στατιστική είναι:

$$\text{var}[S] = \frac{\sigma^2}{2(n-c)}, \quad (14)$$

όπου το c λαμβάνεται τυπικά 0 ή 1, αλλά για μεγαλύτερη ακρίβεια λαμβάνεται 0,75 (η ακριβής διακύμανση είναι  $\{1 - [2/(n-1)]\} \Gamma^2(n/2) / \Gamma^2[(n-1)/2] \sigma^2$ ). Στην περίπτωση της SSS βρέθηκε ότι:

$$\text{var}[\bar{\bar{S}}] \approx \frac{(0.1n+0.8)^{\lambda(H)}}{2(n-1)} \sigma^2, \quad \text{όπου } \lambda(H) := 0.088(4H^2 - 1)^2, \quad (15)$$

Η σχέση (15) δίνει μεγαλύτερη διακύμανση από την (14). Τονίζεται ότι και οι δύο εξισώσεις (13) και (15) αναφέρονται σε ανεξίτηλες  $X_i$  που ακολουθούν την κανονική κατανομή. Έχει δειχθεί ότι η εξίσωση (13) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και όταν η  $X_i$  ακολουθεί κατανομή Γάμμα, αλλά η διακύμανση σε αυτήν την περίπτωση είναι υψηλότερη από αυτήν που δίνεται από την (15).

**Ταυτόχρονος υπολογισμός της διακύμανσης και του συντελεστή H:** Όταν ο συντελεστής Hurst είναι άγνωστος, που είναι η συνήθης περίπτωση όταν επεξεργαζόμαστε χρονοσειρές, οι εξισώσεις (12) και (13) δεν μπορούν να εφαρμοστούν γιατί ο συντελεστής H είναι άγνωστος. Έτσι λοιπόν προτείνεται ένας αλγόριθμος, συνεπής με τη SSS θεώρηση (Koutsoyiannis, 2003). Ο αλγόριθμος αυτός στηρίζεται στην κλασσική εκτίμηση  $s^{(k)}$  (εξίσωση (13)) της τυπικής απόκλισης  $\sigma^{(k)}$  για χρονικές κλίμακες που κυμαίνονται από 1 έως  $k' := \lfloor n/10 \rfloor$ . Η μέγιστη τιμή διαλέχθηκε έτσι ώστε η  $s^{(k)}$  να εκτιμηθεί από τουλάχιστον 10 παρατηρήσεις. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4) και (13) έχουμε:

$$s^{(k)} \approx c_k(H) k^H \sigma, \text{ όπου } c_k(H) := \sqrt{\frac{n/k - (n/k)^{2H-1}}{n/k - 1/2}}, \quad (16)$$

Αγνοώντας τον  $c_k(H)$  στην εξίσωση (16), μπορεί να εκτιμηθεί ο H και η  $\sigma$  με γραμμική παλινδρόμηση της  $\ln s^{(k)}$  με το  $\ln k$ . Αυτή η παλινδρόμηση εισάγει ένα σφάλμα στην εκτίμηση και του H και του  $\sigma$  όταν οι τιμές του H είναι μεγάλες. Για να μειωθεί αυτό το σφάλμα, σε μια δεύτερη επανάληψη, η εκτίμηση του H από την παλινδρόμηση χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί ο  $c_k(H)$  και τότε εκτελείται μια δεύτερη παλινδρόμηση του  $\ln s^{(k)}$  με το  $\ln [c_k(H) k]$ . Αυτή η διαδικασία ακολουθείται μέχρι να υπάρξει σύγκλιση.

Μία άλλη προσέγγιση είναι η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος:

$$e^2(\sigma, H) := \sum_{k=1}^{k'} \frac{[\ln \sigma^{(k)} - \ln s^{(k)}]^2}{k^p} = \sum_{k=1}^{k'} \frac{[\ln \sigma + H \ln k + \ln c_k(H) - \ln s^{(k)}]^2}{k^p}, \quad (17)$$

Όπου ένα βάρος  $1/k^p$  αντιστοιχεί στο σφάλμα κάθε χρονικής κλίμακας. Για  $p=0$  τα βάρη είναι ίσα, ενώ για  $p=1, 2, \dots$ , μειούμενα βάρη αντιστοιχούν στις αυξανόμενες κλίμακες. Αυτό είναι λογικό αφού στις μεγαλύτερες κλίμακες το μέγεθος του δείγματος είναι μικρότερο και η αβεβαιότητα μεγαλύτερη. Από τις εξισώσεις (17) και (18) παρατηρούμε ότι όταν το  $\sigma$  τείνει στο 0 ή στο άπειρο, ή όταν το H τείνει στο 1 τότε και το  $e^2(\sigma, H)$  τείνει στο άπειρο. Έτσι λοιπόν είναι σίγουρο ότι ένα ολικό ελάχιστο υπάρχει, όπου  $\sigma > 0$  και  $H < 1$ . Αναλυτικά βέβαια είναι πολύ δύσκολο να



ευρεθεί για αυτό χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι. Μια επαναληπτική διαδικασία προτείνεται από τον *Koutsoyiannis (2003)*

**Εκτίμηση ποσοστημορίων ορίων εμπιστοσύνης:** Στην κλασσική στατιστική, για μια τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κανονική κατανομή, η εκτιμήτρια του  $u$ -ποσοστημορίου (η τιμή της μεταβλητής της οποίας η πιθανότητα μη υπέρβασης είναι  $u$ ):

$$\widehat{X}_u = \bar{X} + \zeta_u S, \quad (18)$$

Όπου  $\zeta_u$  είναι το  $u$ -ποσοστημόριο της κανονικοποιημένης κανονικής κατανομής. Τα όρια εμπιστοσύνης δίνονται από την σχέση:

$$\widehat{x}_{u,2} = \widehat{x}_u \pm \zeta_{(1+\gamma/2)} \varepsilon_u, \quad \text{όπου } \varepsilon_u = \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{\zeta_u^2}{2}}, \quad (19)$$

Για την περίπτωση της SSS, υποθέτοντας ότι ο  $H$  είναι σταθερός, η εκτιμήτρια του  $u$ -ποσοστημορίου για οποιαδήποτε χρονική κλίμακα γίνεται:

$$\widehat{Z}_u^{(k)} = k\bar{X} + \zeta_u k^H \bar{S}, \quad (20)$$

Τα όρια εμπιστοσύνης μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (9) και (15) και υποθέτοντας ότι για κανονικά κατανομημένα  $X_i$  οι  $\bar{X}$  και  $\bar{S}$  είναι ανεξάρτητες (όπως στην κλασσική περίπτωση), κάτι που επιβεβαιώνεται από προσομοιώσεις Monte Carlo. Μετά από αλγεβρική επεξεργασία η σχέση γίνεται:

$$\widehat{z}_{u,2}^{(k)} = \widehat{z}_u^{(k)} \pm \zeta_{(1+\gamma/2)} \varepsilon_u^{(k)}, \quad \text{όπου } \varepsilon_u^{(k)} = k \frac{\bar{s}}{n^{1-H}} \sqrt{1 + \frac{\zeta_u^2 (0.1n + 0.8)^{\lambda(H)}}{2(k/n)^{2-2H} (n-1)}}, \quad (21)$$

Τα όρια αυτά προκύπτουν ότι είναι πολύ πιο ευρεία από αυτά της κλασσικής στατιστικής κάτι που δείχνει την αυξημένη αβεβαιότητα στην περίπτωση της SSS.

**Εκτίμηση συνδιακύμανσης και συντελεστή συσχέτισης:** Η κλασσική εκτιμήτρια της συνδιακύμανσης είναι:

$$G_l := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-l} (X_i - \bar{X})(X_{i+l} - \bar{X}), \quad (22)$$

η οποία δεν είναι αμερόληπτη για την περίπτωση της SSS. Μια περίπου αμερόληπτη εκτιμήτρια της σε αυτήν την περίπτωση είναι η:

$$\bar{G}_l := G_l + \frac{1}{n^{2-2H}} \bar{S}^2 = G_l + \frac{n-1}{n^{3-2H} - n} S^2, \quad (23)$$

Ενώ ο συντελεστής συσχέτισης δίνεται από την:

$$\bar{R}_l := \frac{\bar{G}_l}{S^2} = R_l \left(1 - \frac{1}{n^{2-2H}}\right) + \frac{1}{n^{2-2H}}, \quad (24)$$

Όπου  $R_l$  είναι η εκτιμήτρια της κλασσικής στατιστικής:

$$R_l := \frac{n}{n-1} \frac{G_l}{S^2}, \quad (25)$$

### 3. Αποτελέσματα

#### 3.1 Σημειακή σύγκριση

Η απόδοση των μοντέλων ποικίλλει ανάλογα με τη χρονική κλίμακα που εξετάζεται. Στη μηνιαία χρονική κλίμακα τα μοντέλα γενικά αναπαράγουν την ακολουθία θερμών – ψυχρών και ξηρών – υγρών περιόδων σε όλους τους σταθμούς που εξετάστηκαν, αν και παρατηρούνται κάποια σφάλματα. Ο μέσος συντελεστής συσχέτισης (για τους 55 σταθμούς και τα 6 μοντέλα) είναι 0.909 και 0.256 για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση αντίστοιχα, ενώ ο μέσος συντελεστής αποτελεσματικότητας είναι 0.721 και -0.433 για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση αντίστοιχα.

Η εικόνα των μοντέλων αλλάζει δραματικά καθώς αφήνουμε τη μηνιαία κλίμακα και εξετάζουμε τους στατιστικούς δείκτες στην ετήσια κλίμακα. Όπως φαίνεται από τους πίνακες 3.1, 3.2 στη θερμοκρασία και στη βροχόπτωση οι μέσοι συντελεστές συσχέτισης είναι αισθητά μικρότεροι από τη μηνιαία κλίμακα, ενώ ο μέσος συντελεστής αποτελεσματικότητας είναι αρνητικός ανεξάρτητα της στατιστικής παραμέτρου που εξετάζεται. Στα διαγράμματα 3.2 και 3.3, που παρατίθενται παρακάτω, παρουσιάζεται αναλυτικά η σύγκριση του συντελεστή Hurst και της τυπικής απόκλισης των ιστορικών χρονοσειρών με τους αντίστοιχους στατιστικούς δείκτες των χρονοσειρών των μοντέλων. Όπως γίνεται φανερό από τον πίνακα 3.3 τα μοντέλα υποεκτιμούν συστηματικά το συντελεστή Hurst και την τυπική απόκλιση.

*Πίνακας 3.1 – Μέσος συντελεστής συσχέτισης και αποτελεσματικότητας για τη θερμοκρασία σε ετήσια κλίμακα για τους 55 σταθμούς.*

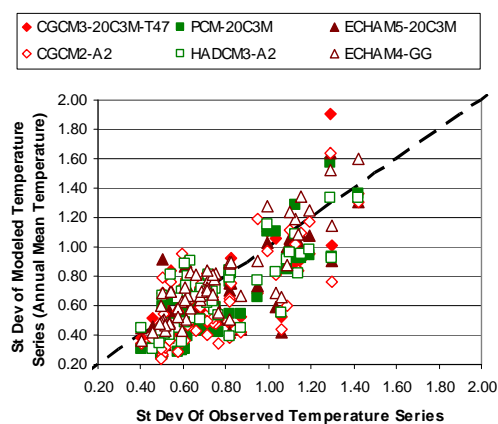
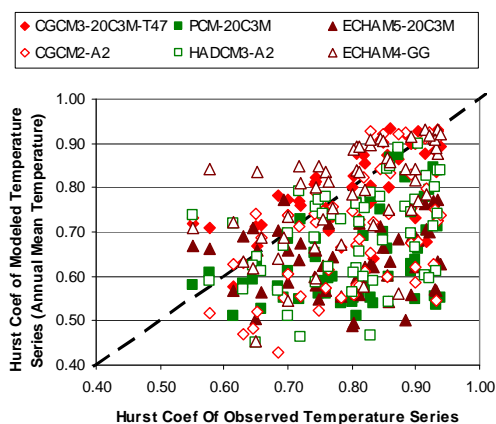
<b>Ετήσια Κλίμακα/ Θερμοκρασία</b>	<b>Μέσος συντελεστής συσχέτισης</b>	<b>Μέσος συντελεστής αποτελεσματικότη τας</b>
<b>Μέση θερμοκρασία</b>	0.122	-5.157
<b>Μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία</b>	0.062	-5.254
<b>Ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία</b>	0.033	-3.748
<b>Ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος</b>	0.008	-4.068
<b>Εποχιακή θερμοκρασία ΔΙΦ</b>	0.051	-3.865
<b>Εποχιακή θερμοκρασία ΠΑ</b>	0.073	-7.495

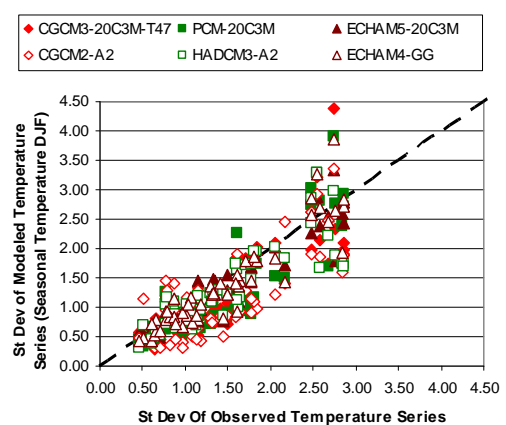
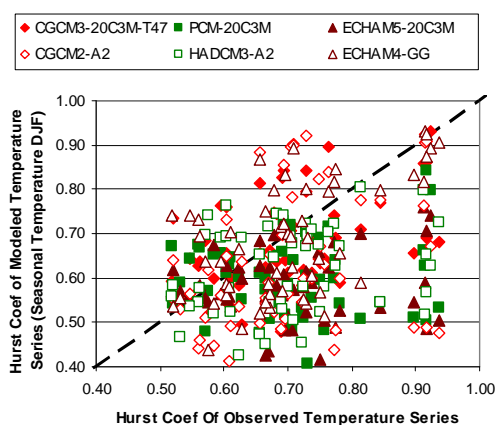
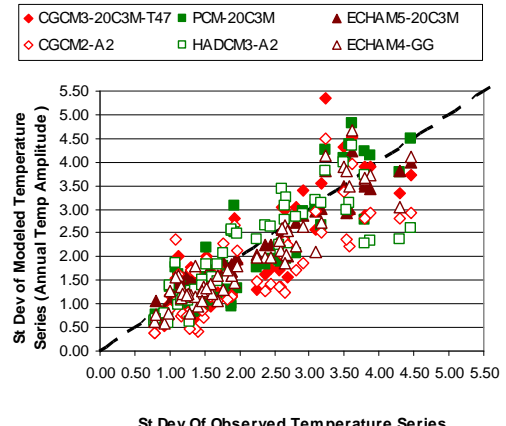
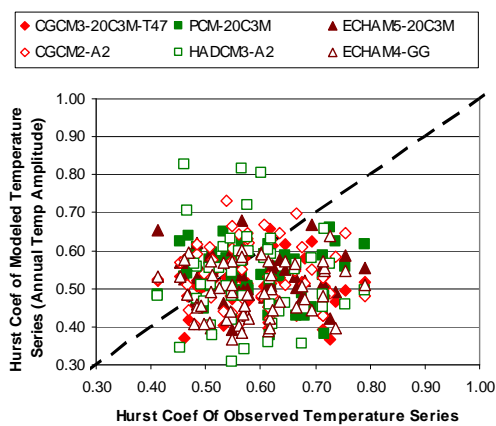
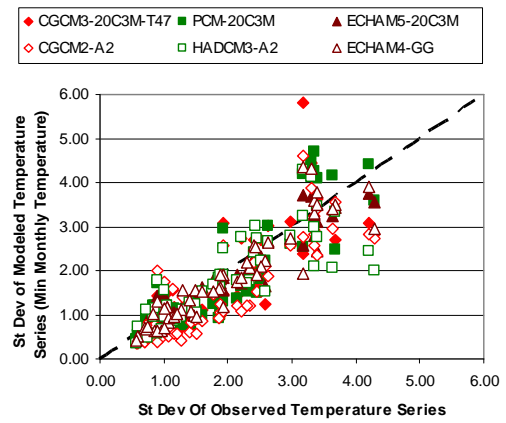
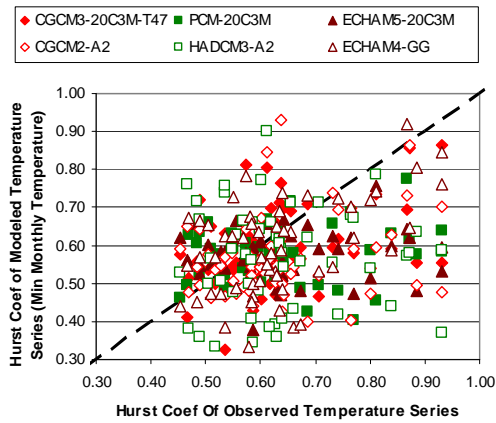
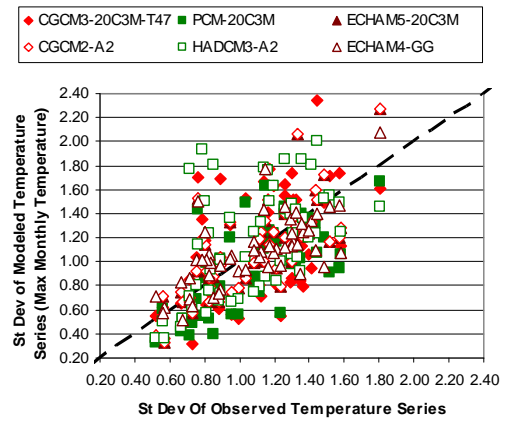
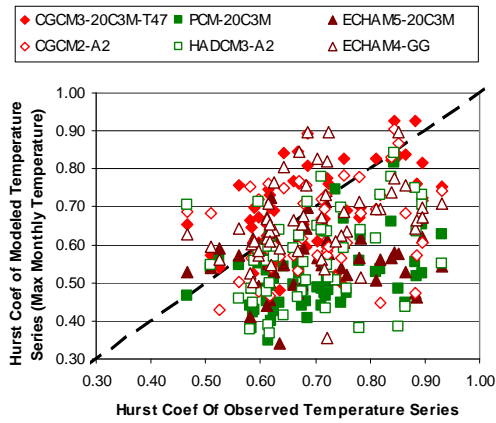
Πίνακας 3.2 – Μέσος συντελεστής συσχέτισης και αποτελεσματικότητα για τη βροχόπτωση σε ετήσια κλίμακα για τον 55 σταθμούς.

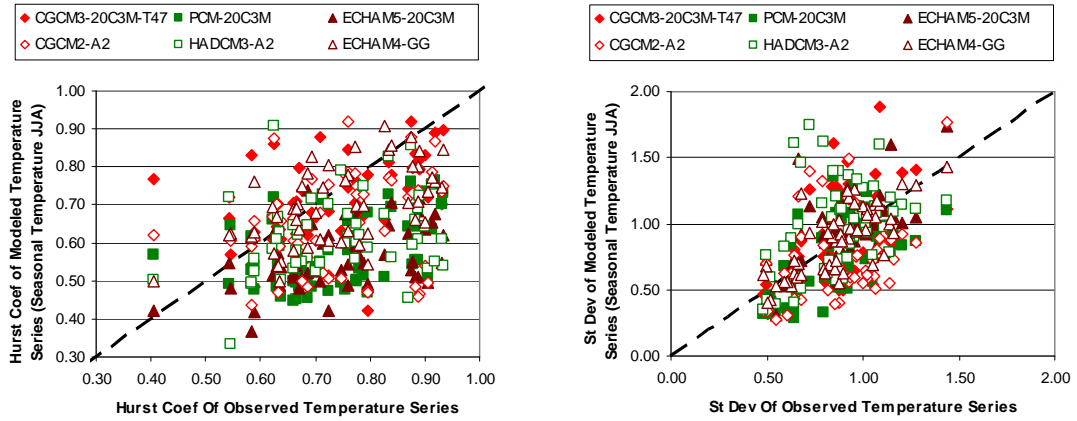
Ετήσια Κλίμακα/ Βροχόπτωση	Μέσος συντελεστής συσχέτισης	Μέσος συντελεστής αποτελεσματικότη τας
Συνολική βροχόπτωση	0.003	-3.008
Μέγιστη μηνιαία βροχόπτωση	0.007	-1.266
Ελάχιστη μηνιαία βροχόπτωση	0.004	-167.368
Εποχιακή βροχόπτωση ΔΙΦ	0.002	-3.750
Εποχιακή βροχόπτωση ΠΑ	-0.001	-12.168

Πίνακας 3.3 – Ποσοστό υποεκτίμησης συντελεστή Hurst και τυπικής απόκλισης για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση για τους 55 σταθμούς

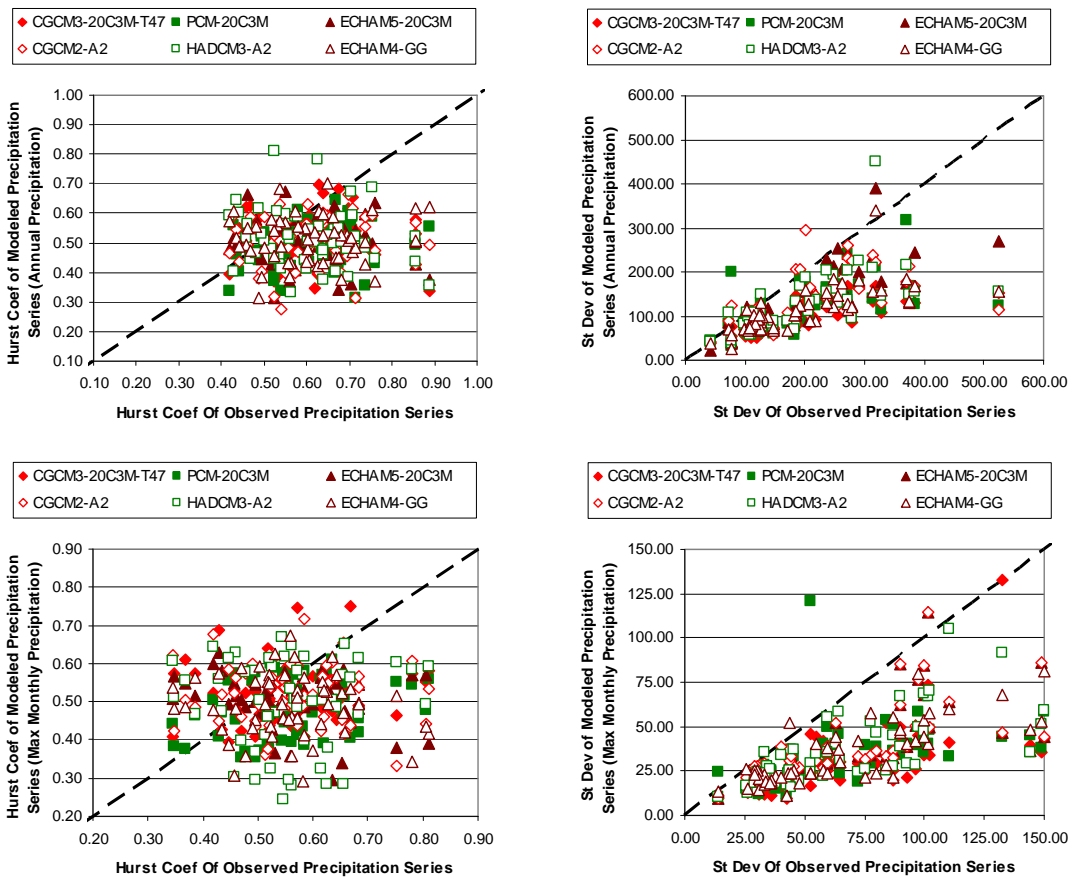
Ποσοστό περιπτώσεων υποεκτίμησης συντελεστή Hurst και τυπικής απόκλισης	Θερμοκρασία		Βροχόπτωση	
	Hurst (%)	St Dev (%)	Hurst (%)	St Dev (%)
Μέση θερμοκρασία/συνολική βροχόπτωση	74.24	70.30	79.09	89.39
Μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία/βροχόπτωση	72.12	59.70	67.27	95.45
Ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία/βροχόπτωση	66.36	72.42	67.58	35.45
Ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος	68.79	68.48	-	-
Εποχιακή Θερμοκρασία/βροχόπτωση ΔΙΦ	68.79	70.00	66.97-	77.27
Εποχιακή Θερμοκρασία/βροχόπτωση ΠΑ	76.97	58.18	59.09	84.24

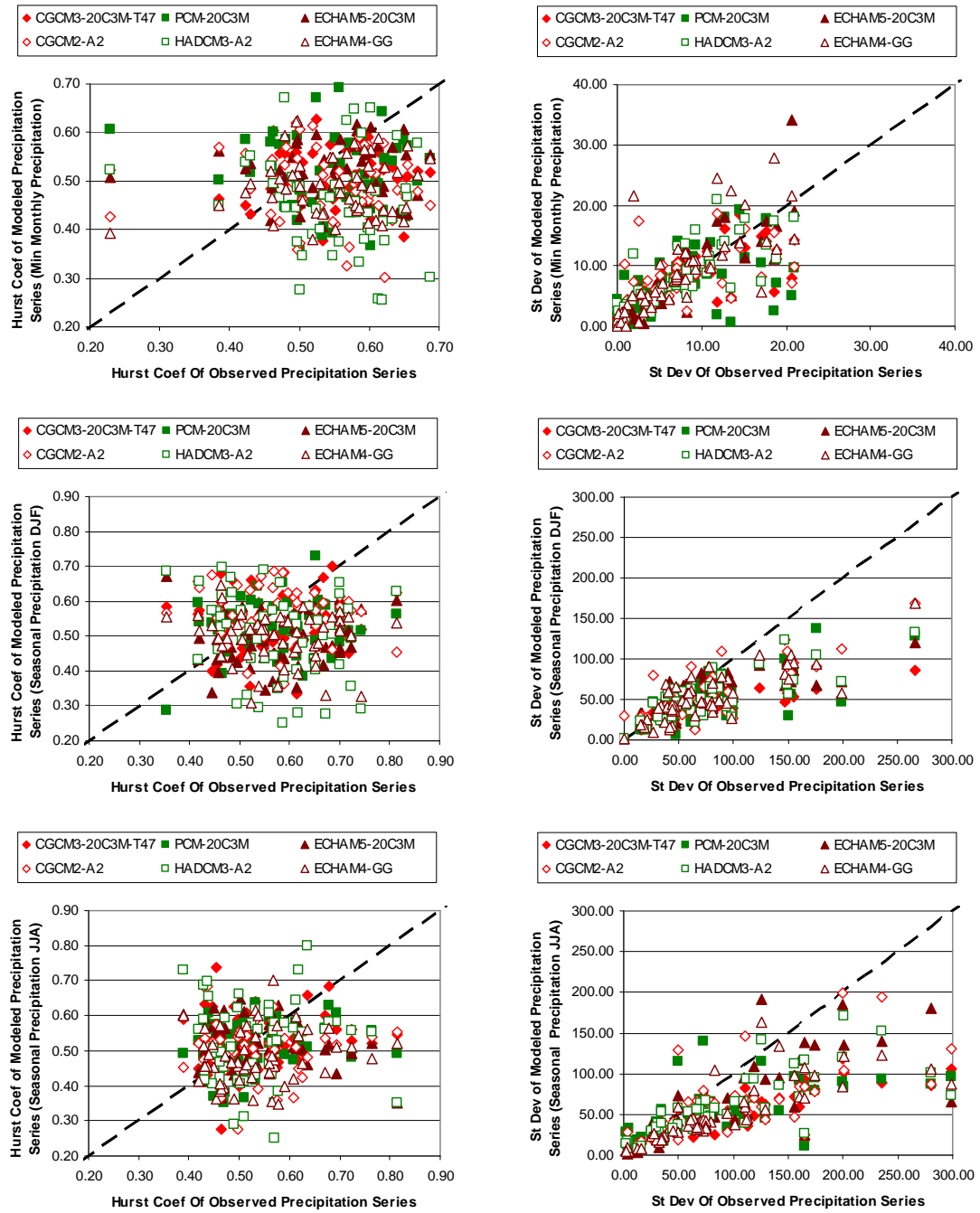




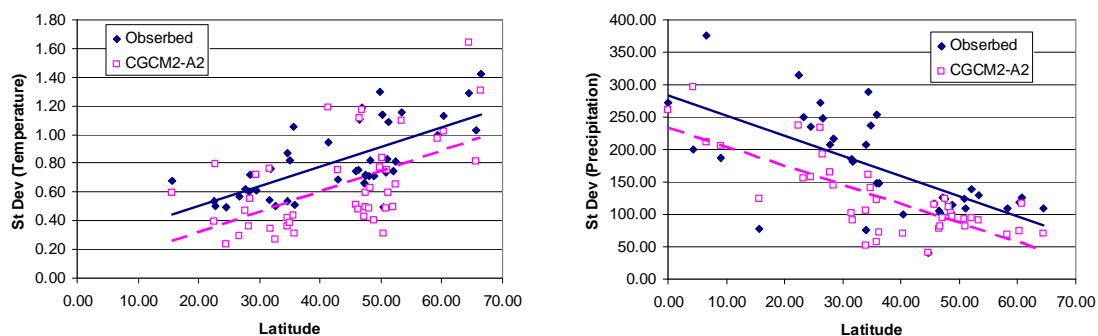


Εικόνα 3.1 – Συντελεστής Hurst και τυπική απόκλιση για την ετήσια μέση θερμοκρασία, τη μέγιστη μηνιαία, την ελάχιστη μηνιαία, το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος, την εποχιακή θερμοκρασία ΔΙΦ και ΙΙΑ.





Εικόνα 3.2 – Συντελεστής Hurst και τυπική απόκλιση για την ετήσια βροχόπτωση, τη μέγιστη μηνιαία, την ελάχιστη μηνιαία, την εποχιακή βροχόπτωση ΔΙΦ και ΙΙΑ



Εικόνα 3.3 – Η τυπική απόκλιση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (αριστερά) και της συνολικής βροχόπτωσης (δεξιά) σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος για τις ιστορικές παρατηρήσεις και για το μοντέλο CGCM2-A2 (για το βόρειο ημισφαίριο).

Στα διαγράμματα 3.1 και 3.2 όπου συγκρίνεται η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής Hurst των παρατηρούμενων χρονοσειρών και των μοντέλων παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων δίνουν καλύτερη εικόνα για την τυπική απόκλιση σε σύγκριση με το συντελεστή Hurst. Αυτό είναι λογικό αφού, όπως προαναφέρθηκε, τα μοντέλα έχουν τη δυνατότητα να αναπαράγουν την εποχιακή μεταβλητότητα της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης καθώς και τη μεταβλητότητα των μεγεθών αυτών με το γεωγραφικό πλάτος. Εξάλλου, η τυπική απόκλιση τόσο της θερμοκρασίας όσο και της βροχόπτωσης μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος, αλλά εξαρτάται επίσης από το αν ο σταθμός είναι ηπειρωτικός ή παραθαλάσσιος. Και οι δύο αυτοί παράγοντες (επίδραση γεωγραφικού πλάτους, γειτνίαση με τη θάλασσα) φαίνεται ότι γενικά αντιπροσωπεύονται ικανοποιητικά από τα μοντέλα και εφόσον η τυπική απόκλιση εξαρτάται από αυτούς είναι λογικό παρατηρείται αυτή η σχετικά καλύτερη εικόνα. Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζονται διαγραμματικά η τυπική απόκλιση της ετήσιας μέσης θερμοκρασίας και της ετήσιας βροχόπτωσης σε σχέση με το γεωγραφικό πλάτος για τις παρατηρούμενες χρονοσειρές καθώς και για τις χρονοσειρές των αποτελεσμάτων του μοντέλου CGCM2-A2 (παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν και τα υπόλοιπα μοντέλα). Όπως φαίνεται ξεκάθαρα τα μοντέλα προσεγγίζουν τη μεταβλητότητα της τυπικής απόκλισης των χρονοσειρών με το γεωγραφικό πλάτος.

Στην 30-ετή κλίμακα η συσχέτιση αυξάνεται ελαφρώς για την θερμοκρασία και την βροχόπτωση σε όλες τις χρονοσειρές που εξετάστηκαν σε αντίθεση με το συντελεστή αποτελεσματικότητας που παίρνει έντονα αρνητικές τιμές. Γίνεται άμεσα φανερό ότι τα κλιματικά μοντέλα αδυνατούν να αναπαραστήσουν με επιτυχία τις



διακυμάνσεις μεγάλης κλίμακας (φαινόμενο Hurst) και δε μπορούν να αναπαράγουν τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης.

Πίνακας 3.4 – Μέσος συντελεστής συσχέτισης και αποτελεσματικότητας για τη θερμοκρασία σε 30-ετή κλίμακα για τους 55 σταθμούς.

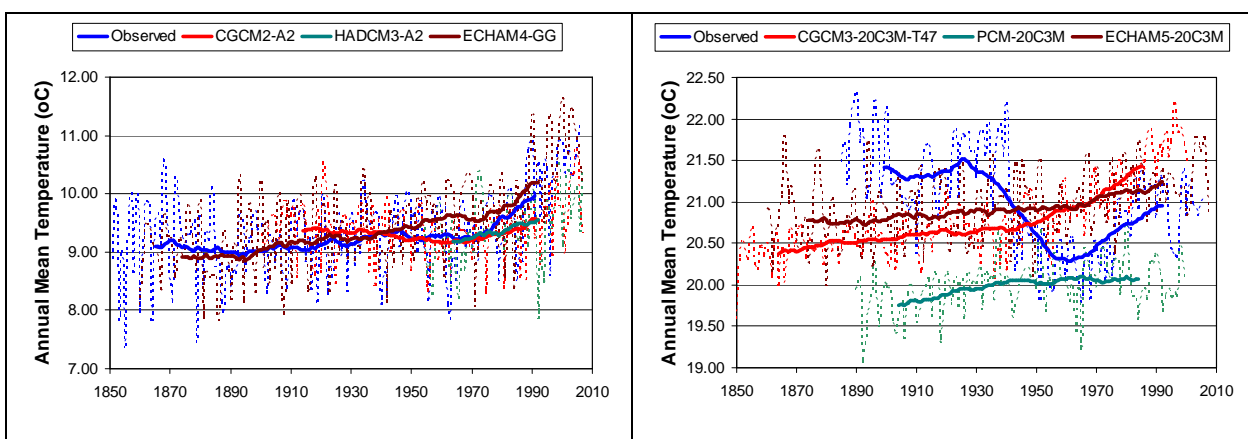
<b>30-ετής Κλίμακα/ Θερμοκρασία</b>	<b>Μέσος συντελεστής συσχέτισης</b>	<b>Μέσος συντελεστής αποτελεσματικότη τας</b>
<b>Ετήσια Μέση θερμοκρασία</b>	0.328	-89.001
<b>Μέγιστη Μηνιαία θερμοκρασία</b>	0.207	-118.499
<b>Ελάχιστη Μηνιαία θερμοκρασία</b>	0.177	-117.408
<b>Ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος</b>	0.027	-107.350
<b>Εποχιακή θερμοκρασία ΔΙΦ</b>	0.243	-91.957
<b>Εποχιακή θερμοκρασία ΙΑ</b>	0.208	-180.427

Πίνακας 3.5 – Μέσος συντελεστής συσχέτισης και αποτελεσματικότητας για τη βροχόπτωση σε 30-ετή κλίμακα για τους 55 σταθμούς.

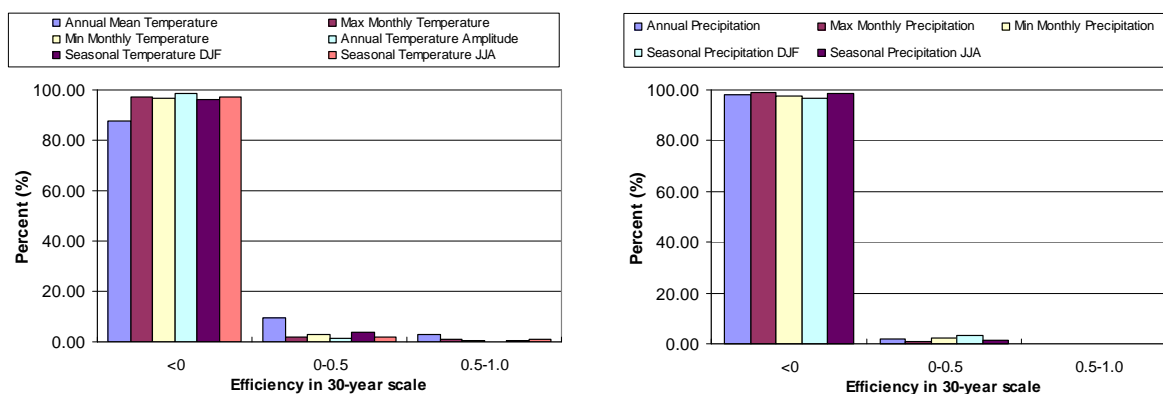
<b>30-ετής Κλίμακα/ Βροχόπτωση</b>	<b>Μέσος συντελεστής συσχέτισης</b>	<b>Μέσος συντελεστής αποτελεσματικότη τας</b>
<b>Συνολική βροχόπτωση</b>	0.020	-125.911
<b>Μέγιστη Μηνιαία βροχόπτωση</b>	-0.024	-51.444
<b>Ελάχιστη Μηνιαία βροχόπτωση</b>	0.006	-5456.748
<b>Εποχιακή βροχόπτωση ΔΙΦ</b>	0.053	-207.966
<b>Εποχιακή βροχόπτωση ΙΑ</b>	-0.041	-1064.091

Η απόδοση των μοντέλων ποικίλει ανάλογα με το σταθμό που εξετάστηκε. Σε μερικούς σταθμούς τα μοντέλα δίνουν σχετικά ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε άλλους είναι τελείως εκτός πραγματικότητας. Στην επόμενη εικόνα δίνονται ενδεικτικά τα διαγράμματα της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας δύο σταθμών: του De Bilt στην Ολλανδία και του Durban στη Νότια Αφρική. Ο σταθμός του De Bilt είναι ένας από τους σταθμούς που τα μοντέλα του TAR δίνουν αρκετά καλά αποτελέσματα για τη μέση ετήσια θερμοκρασία. Μόνο και μόνο το γεγονός ότι τα παλαιότερα μοντέλα του TAR είναι πιο αποτελεσματικά από τα μεταγενέστερα μοντέλα του AR4 είναι αξιοσημείωτο. Βέβαια ενώ τα μοντέλα αναπαριστούν ικανοποιητικά τη χρονοσειρά της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας, δε μπορούν να αναπαραστήσουν το

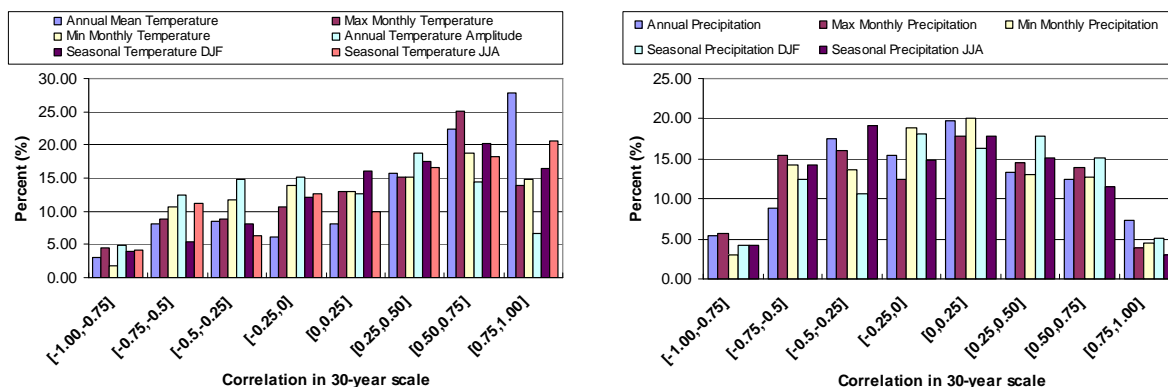
ίδιο ικανοποιητικά τις χρονοσειρές των άλλων στατιστικών παραμέτρων που εξετάστηκαν, όπως π.χ. του ετήσιου θερμοκρασιακού εύρους. Στο σταθμό του Durban κανένα από τα μοντέλα δε μπορεί να αναπαραστήσει την πτώση της θερμοκρασίας κατά 1.5 βαθμό κατά τα έτη 1920-1960 και όλα προβλέπουν μια μονοτονική αύξηση της μέσης θερμοκρασίας. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε κανέναν από τους σταθμούς που εξετάστηκαν δεν υπάρχει κάποιο μοντέλο που να αναπαριστά με επιτυχία τις χρονοσειρές όλων των παραμέτρων που εξετάστηκαν.



Εικόνα 3.4 – Διαγράμματα της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας για το De Bilt (αριστερά) και για το Durban (δεξιά)

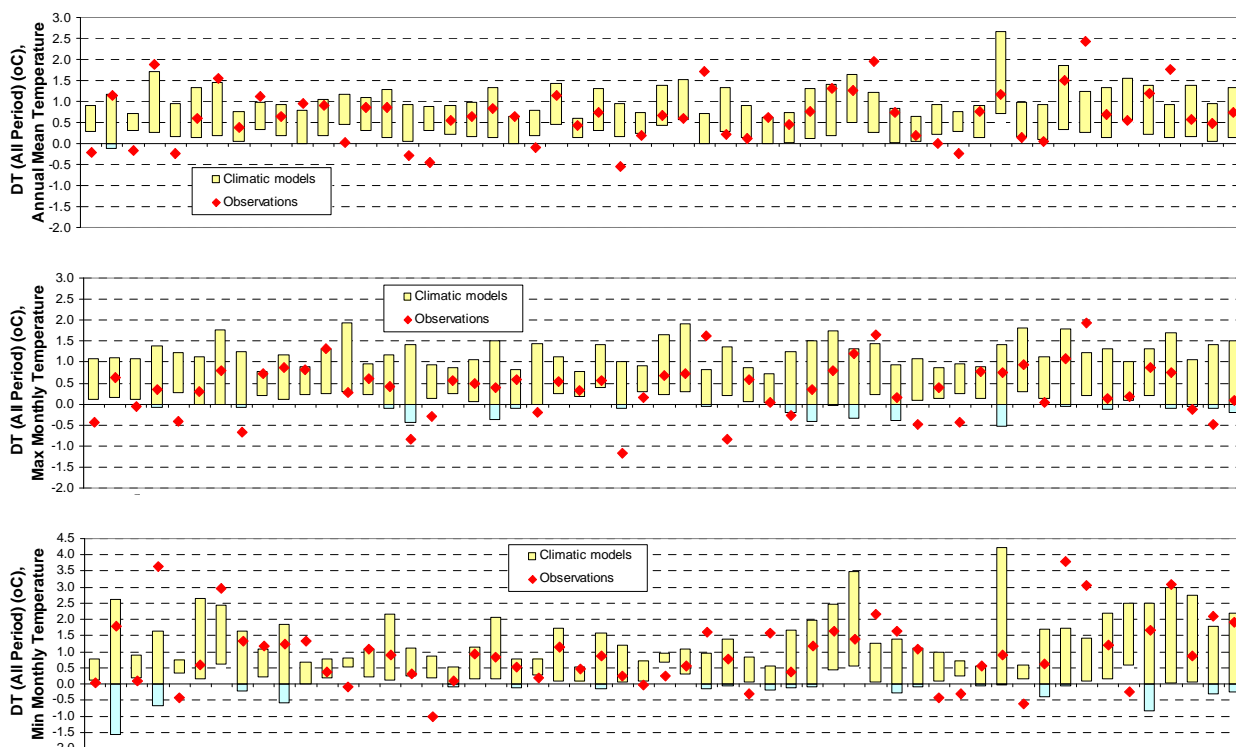


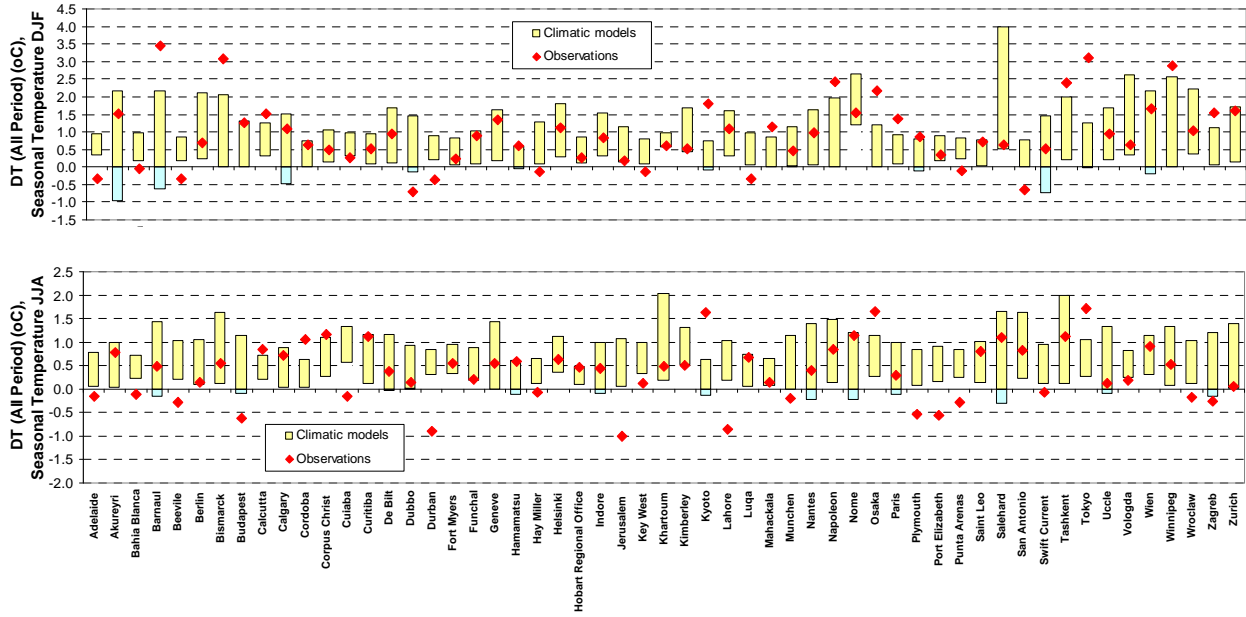
Εικόνα 3.5 – Συντελεστής αποτελεσματικότητας για τη θερμοκρασία (αριστερά) και τη βροχόπτωση (δεξιά) σε 30-ετή κλίμακα για τους 55 σταθμούς.



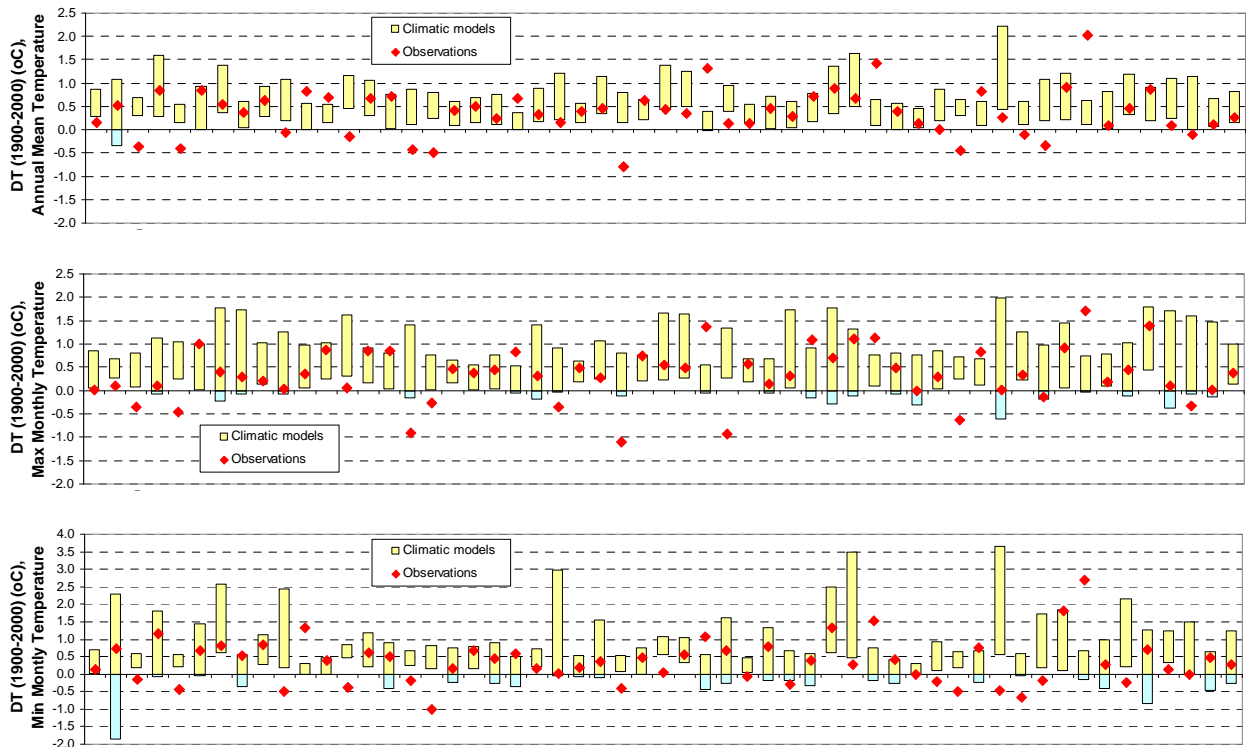
Εικόνα 3.6 – Συντελεστής συσχέτισης για τη θερμοκρασία (αριστερά) και τη βροχόπτωση (δεξιά) σε 30-ετή κλίμακα για τους 55 σταθμούς.

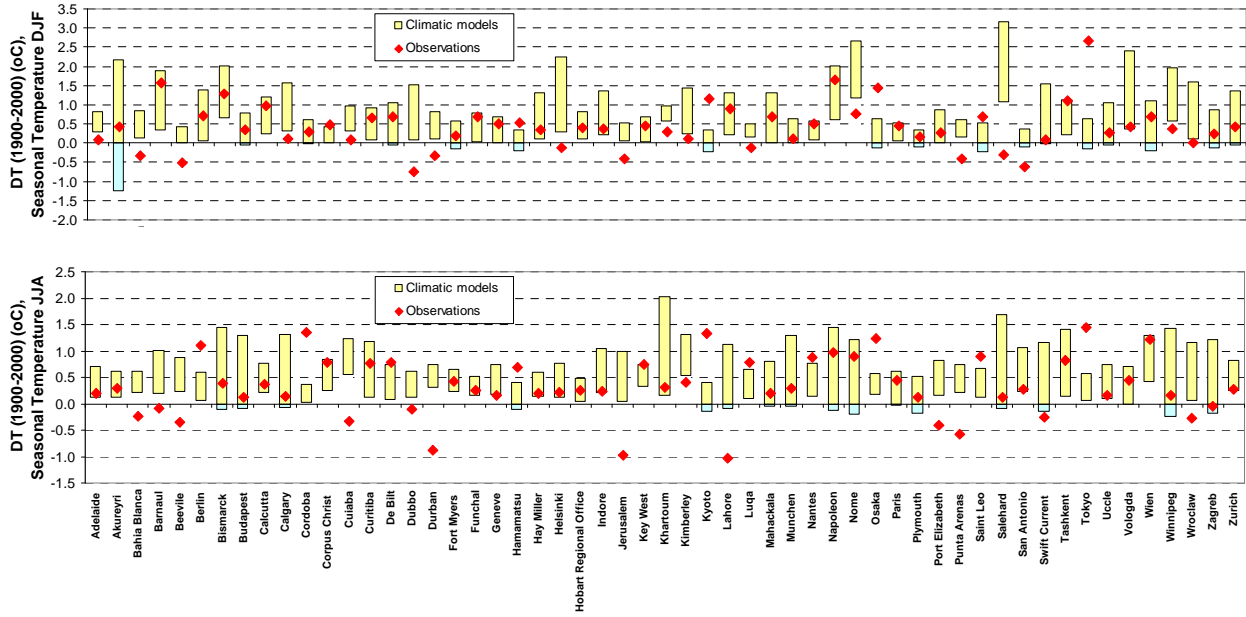
Στο διάγραμμα 3.5 γίνεται έκδηλη η αναποτελεσματικότητα των κλιματικών μοντέλων, όπου η πλειονότητα των εξεταζόμενων σταθμών παρουσιάζει αρνητικό συντελεστή αποτελεσματικότητας. Αυτό σημαίνει ότι η πρόβλεψη της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης μέσω του μέσου όρου θα είχε μεγαλύτερο συντελεστή αποτελεσματικότητας από τα κλιματικά μοντέλα. Στο διάγραμμα 3.6, όπου η απεικονίζεται η ποσοστιαία κατανομή του συντελεστή συσχέτισης, φαίνεται ότι μεγάλο ποσοστό των σταθμών έχει χαμηλές τιμές, ακόμη και αρνητικές, στη θερμοκρασία και στη βροχόπτωση κάνοντας σαφές ότι τα κλιματικά μοντέλα αδυνατούν να αναπαραστήσουν τις μεταβολές μεγάλης κλίμακας.





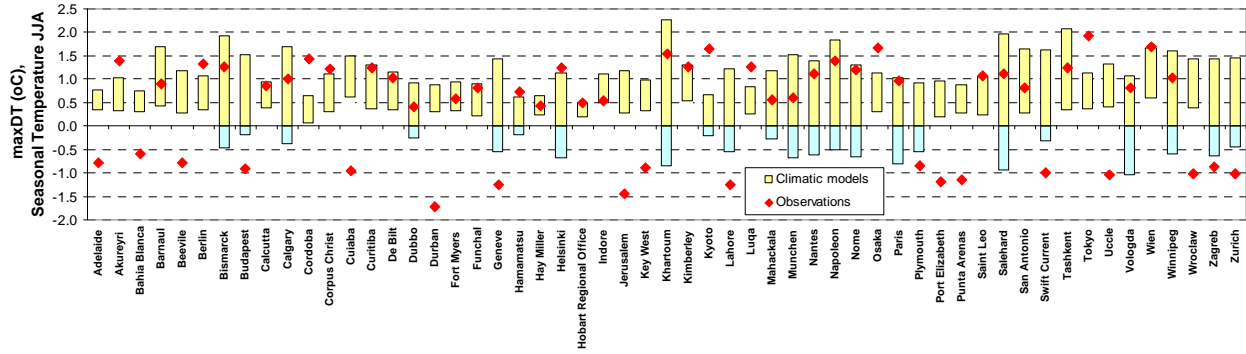
Εικόνα 3.7 – Η διαφορά μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους κάθε χρονοσειράς για τη θερμοκρασία για όλες τις εξεταζόμενες χρονοσειρές και τους 55 σταθμούς.



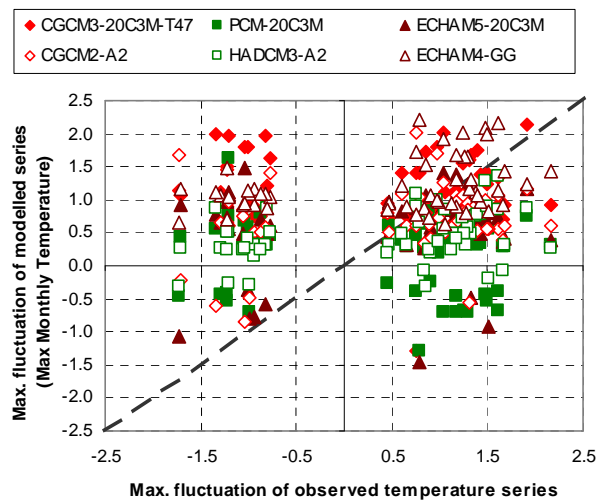
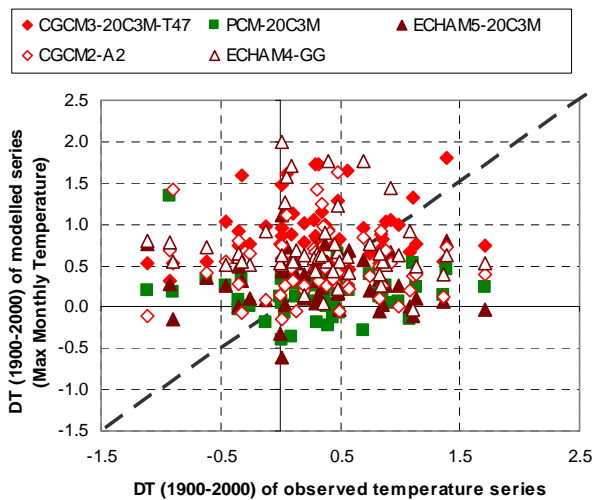
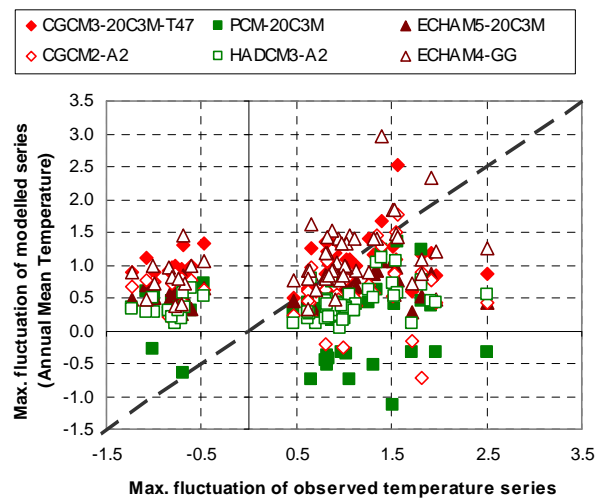
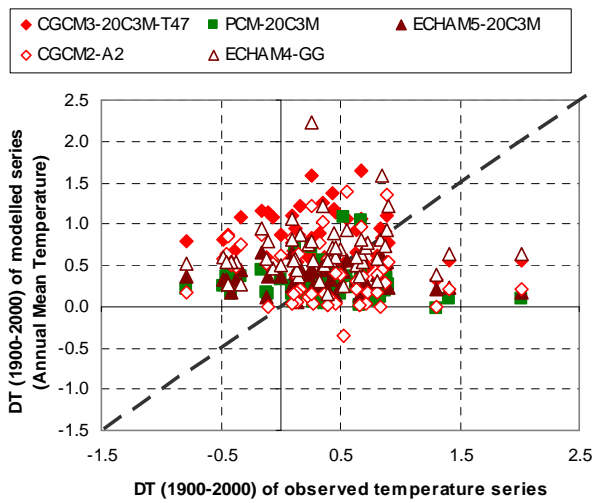


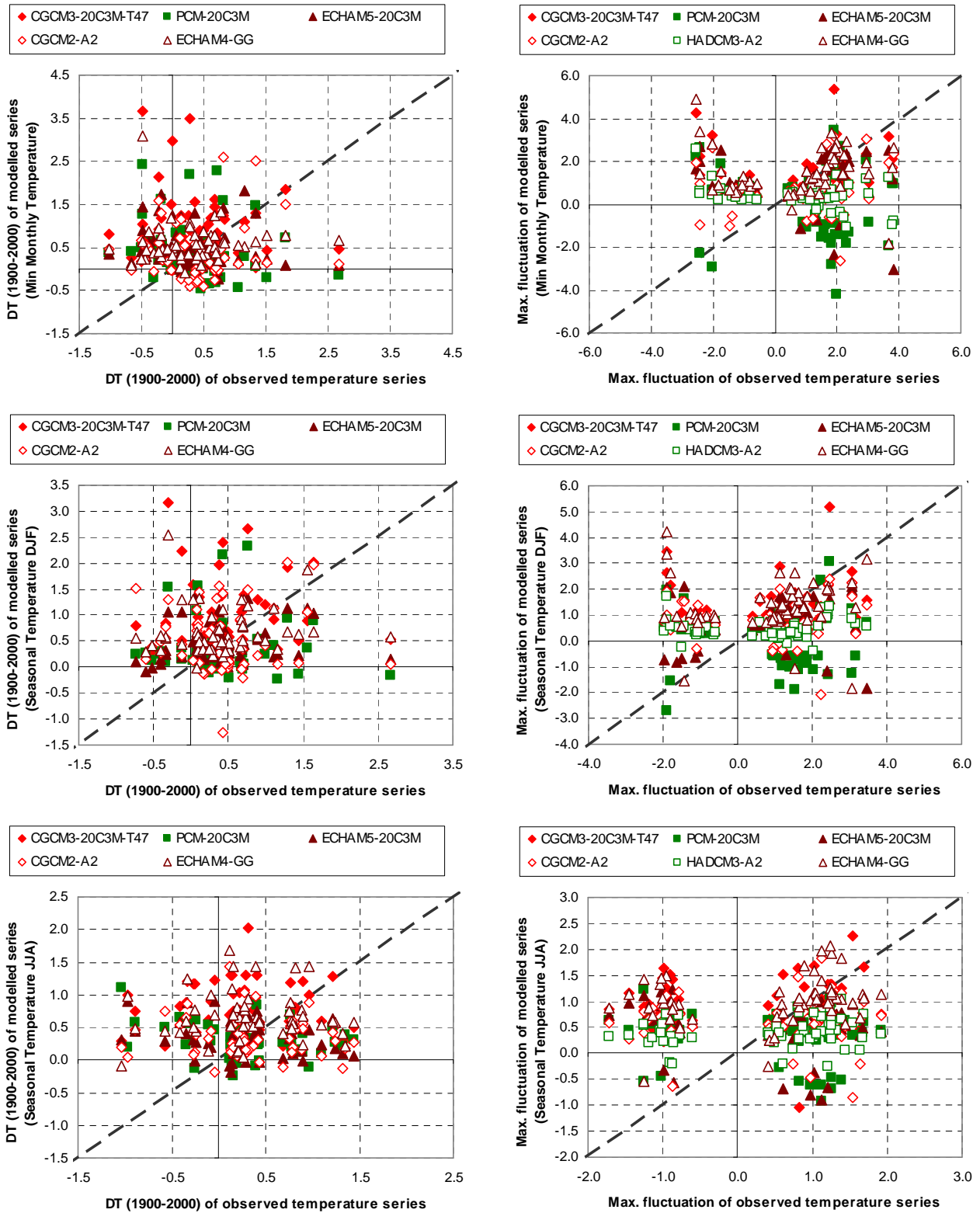
Εικόνα 3.8 – Η διακύμανση του 30-ετούς κινούμενου μέσου στον 20<sup>ο</sup> αιώνα για τη θερμοκρασία για όλες τις εξεταζόμενες χρονοσειρές και τους 55 σταθμούς.



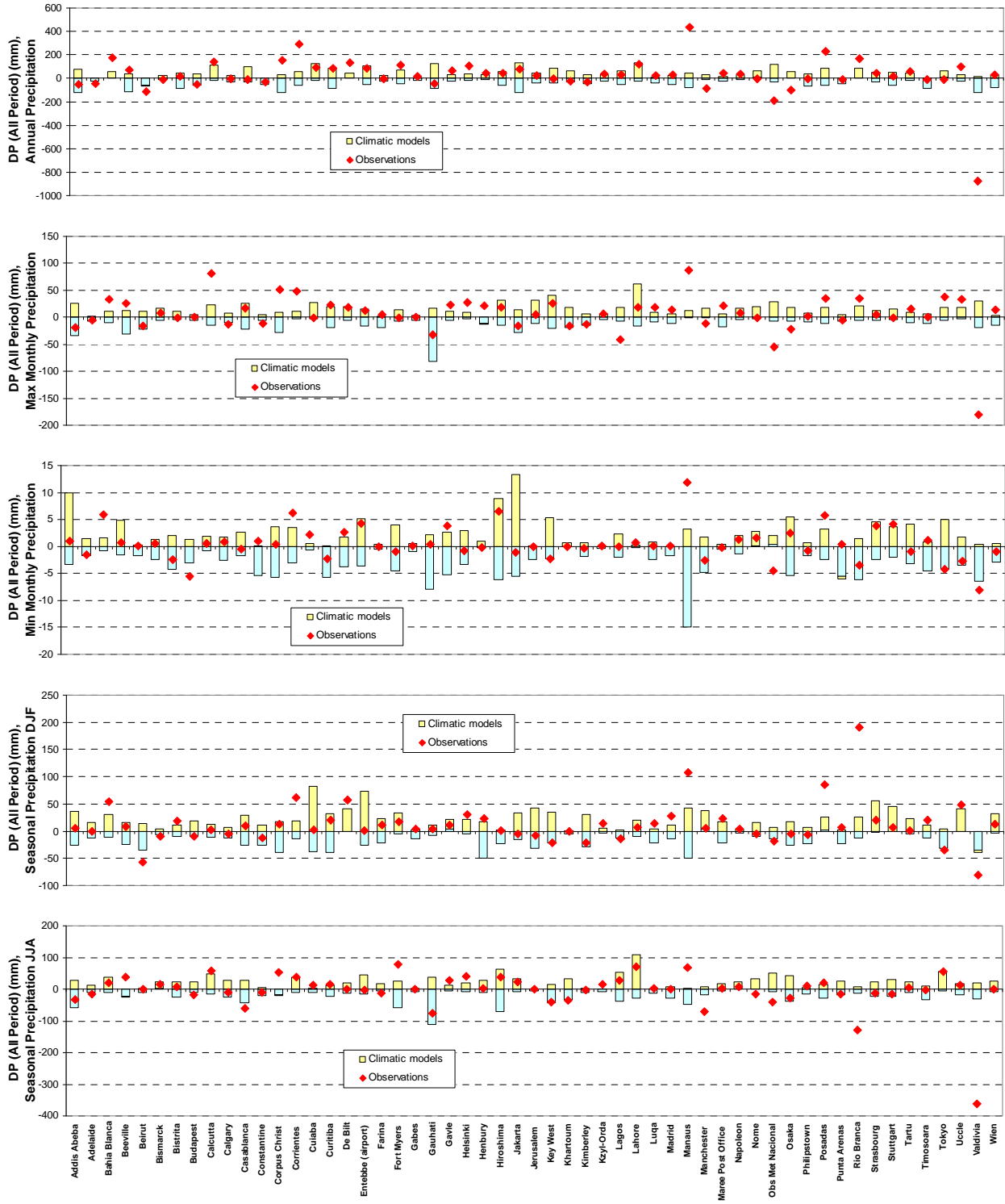


Εικόνα 3.9 – Η μέγιστη διακύμανση του 30-ετούς κινούμενου μέσου κατά την εξεταζόμενη περίοδο για τη θερμοκρασία για όλες τις εξεταζόμενες χρονοσειρές και τους 55 σταθμούς.



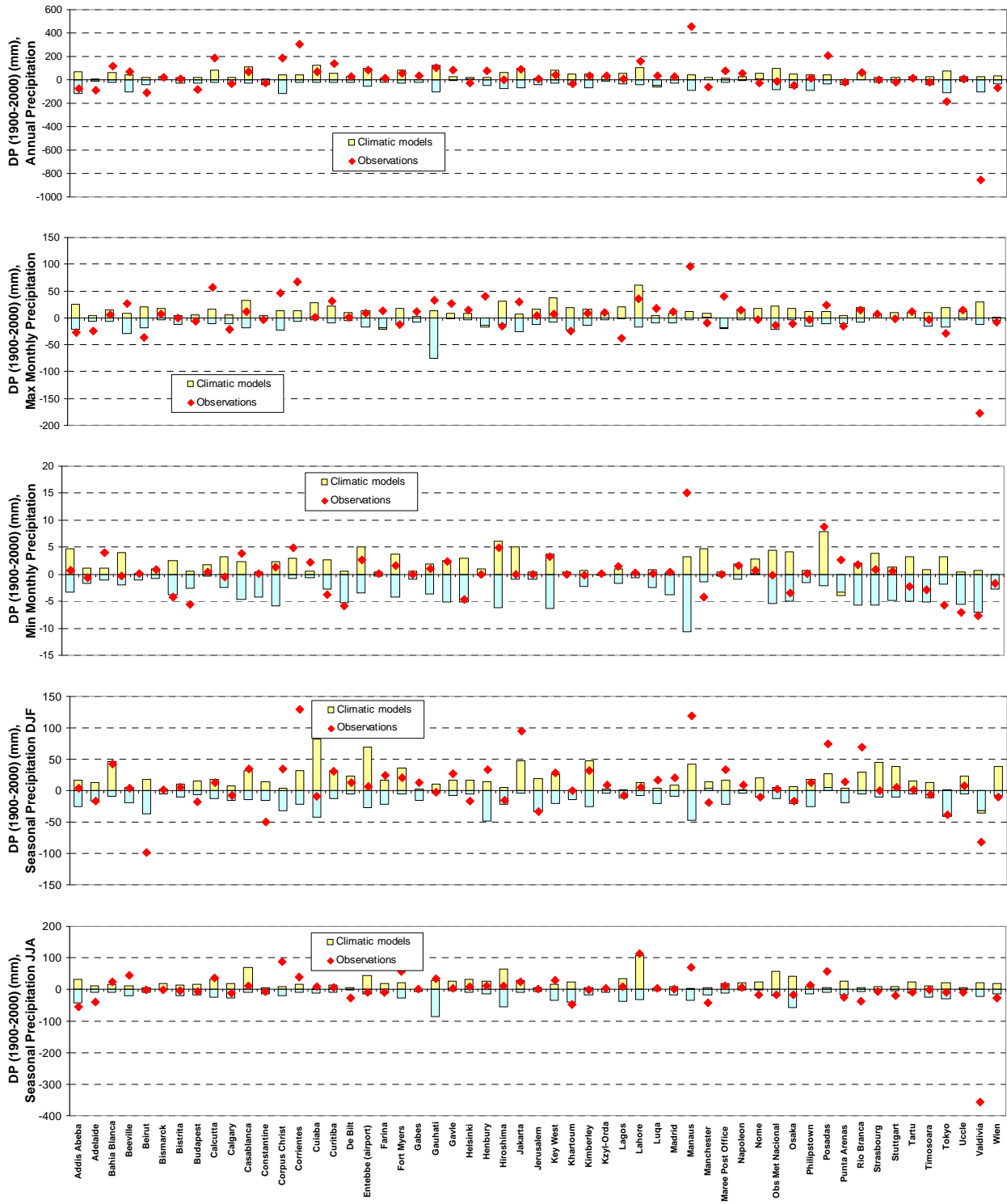


Εικόνα 3.10 – Η συσχέτιση της διακύμανσης του 30-ετούς μέσου μοντέλων και παρατηρήσεων κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα και της μέγιστη διακύμανσης του 30-ετούς κινούμενου μέσου μοντέλων και παρατηρήσεων κατά την εξεταζόμενη περίοδο για τη θερμοκρασία για όλες τις εξεταζόμενες χρονοσειρές και τους 55 σταθμούς.

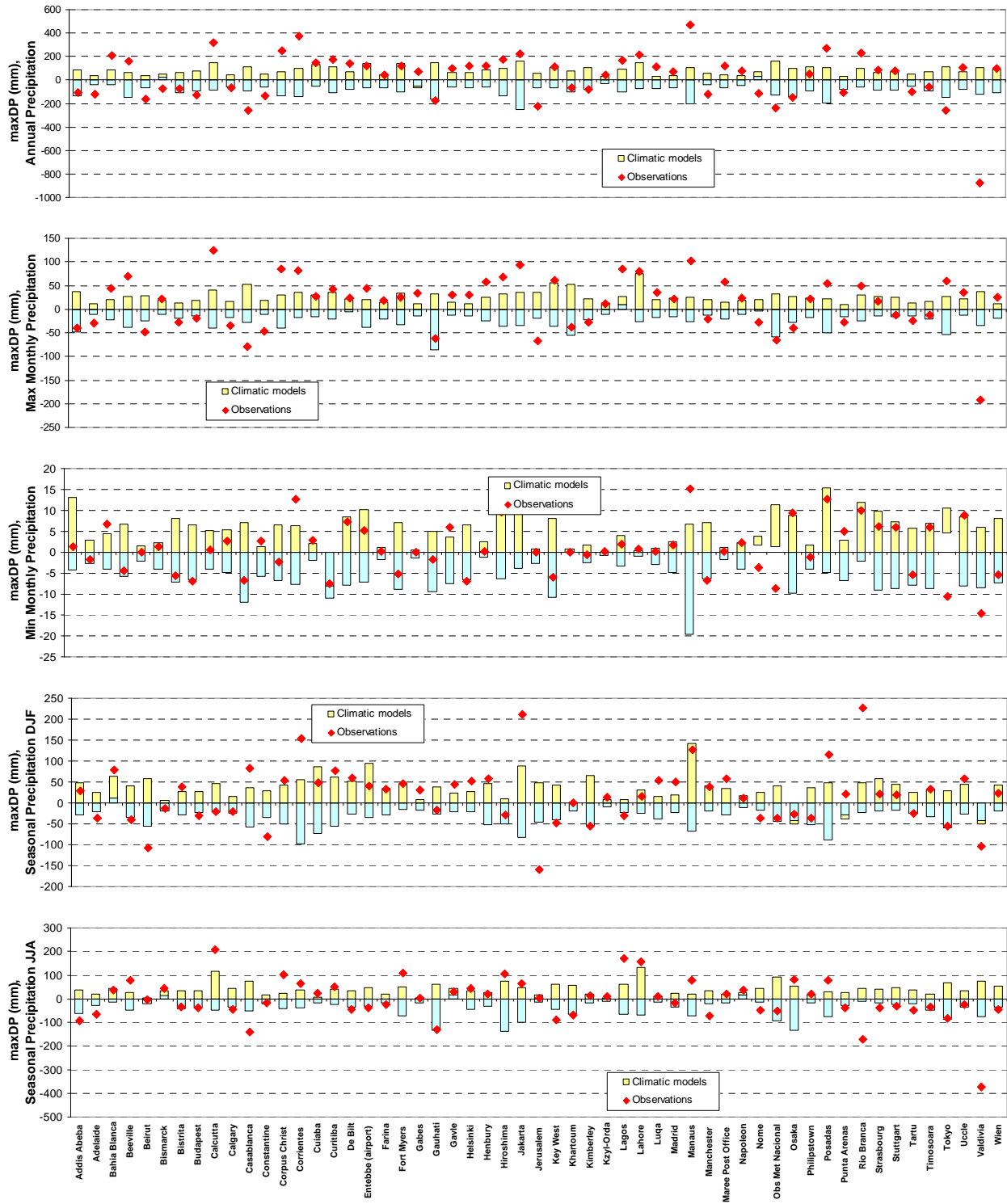


Εικόνα 3.11 – Η διαφορά μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους κάθε χρονοσειράς για τη βροχοπτώση για όλες τις εξεταζόμενες χρονοσειρές και τους 55 σταθμούς.

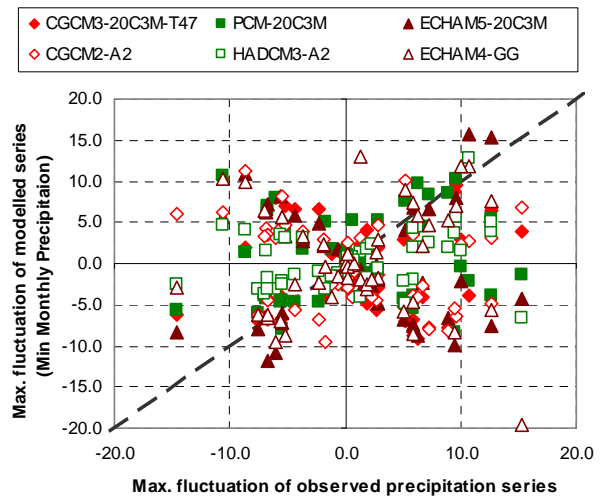
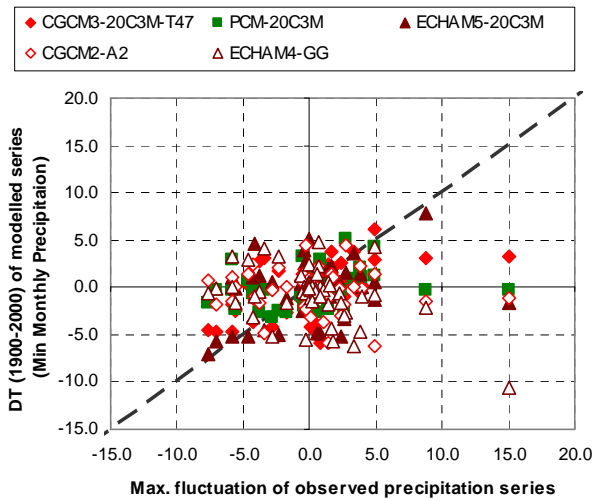
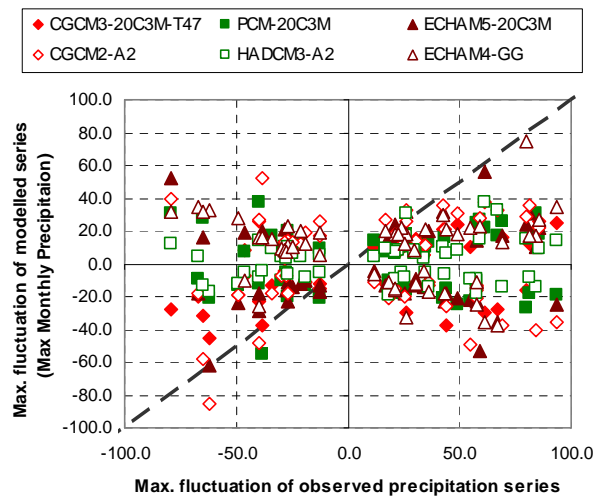
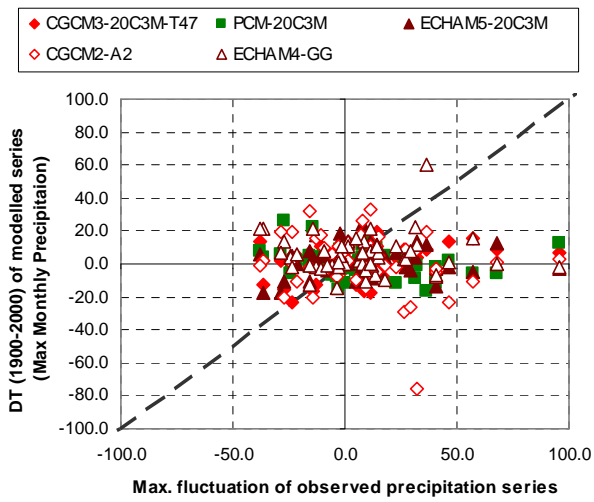
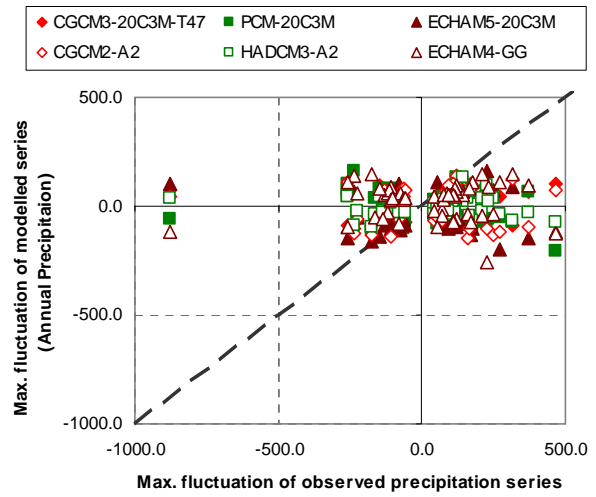
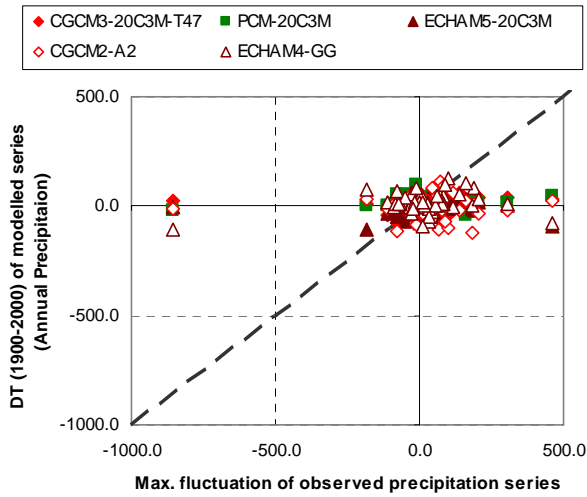


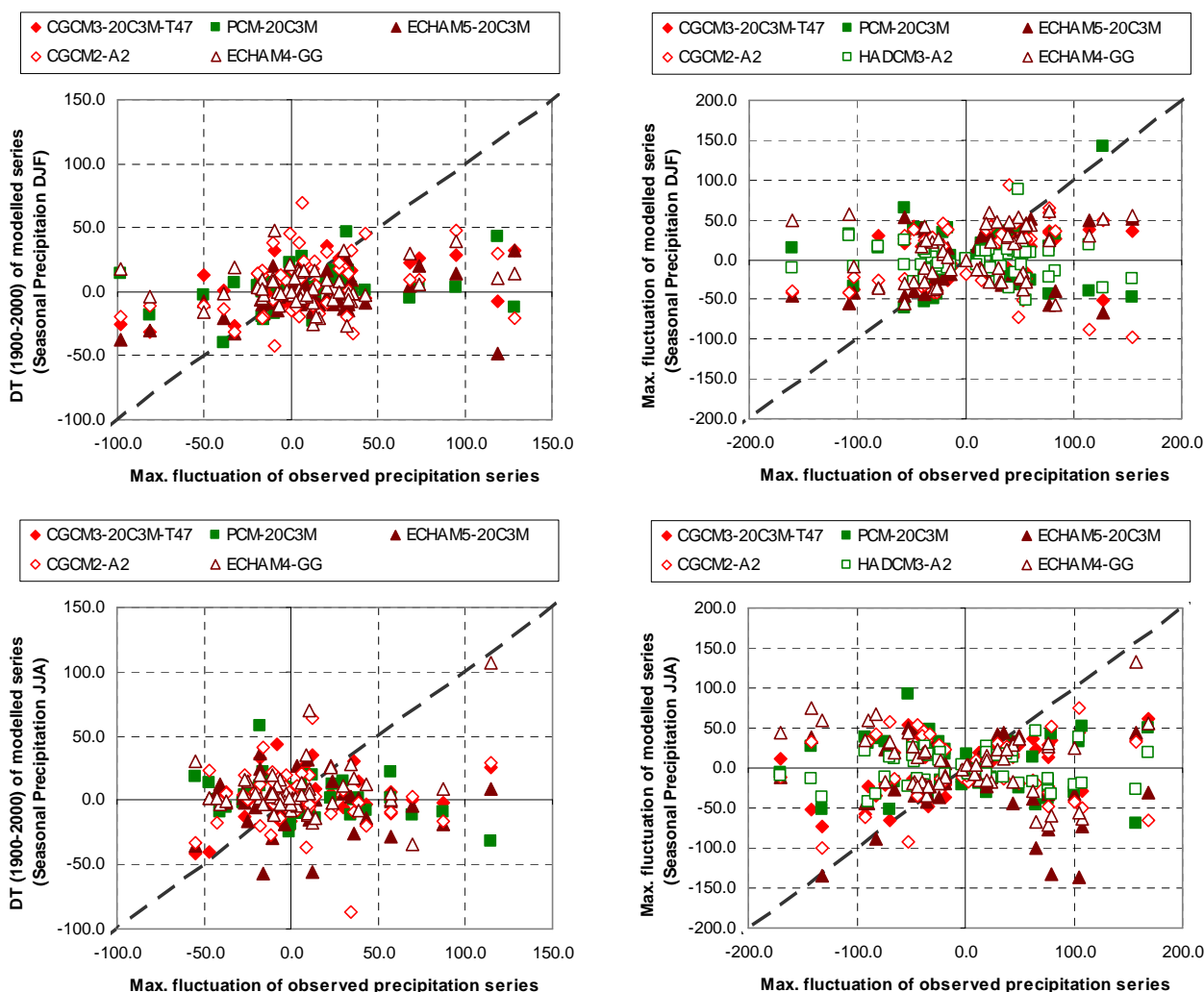


Εικόνα 3.12 – Η διακύμανση του 30-ετούς κινούμενου μέσου στον 20<sup>ο</sup> αιώνα για τη βροχόπτωση για όλες τις εξεταζόμενες χρονοσειρές και τους 55 σταθμούς.



Εικόνα 3.13 – Η μέγιστη διακύμανση του 30-ετούς κινούμενου μέσου κατά την εξεταζόμενη περίοδο για τη βροχόπτωση για όλες τις εξεταζόμενες χρονοσειρές και τους 55 σταθμούς.





Εικόνα 3.14 – Η συσχέτιση της διακύμανσης του 30-ετούς μέσου μοντέλων και παρατηρήσεων και της μέγιστης διακύμανσης του 30-ετούς κινούμενου μέσου μοντέλων και παρατηρήσεων κατά την εξεταζόμενη περίοδο για τη βροχόπτωση για όλες τις εξεταζόμενες χρονοσειρές και τους 55 σταθμούς.

Όπως γίνεται φανερό από τα διαγράμματα 3.7 έως 3.14 τα κλιματικά μοντέλα στην πλειονότητα των σταθμών που εξετάστηκαν αδυνατούν να προβλέψουν τη διακύμανση του 30-ετούς μέσου στον 20<sup>ο</sup> αιώνα, τη διακύμανση του 30-ετούς μέσου μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους κάθε χρονοσειράς καθώς και τη μέγιστη διακύμανση του 30-ετούς μέσου καθ' όλη την περίοδο μελέτης. Μάλιστα, είναι χαρακτηριστικό ότι σε πολλές περιπτώσεις τα μοντέλα προβλέπουν αντίθετη μεταβολή από αυτήν που στην πραγματικότητα έχει συμβεί (δηλαδή π.χ. προβλέπουν αύξηση της θερμοκρασίας ενώ στην πραγματικότητα έχει συμβεί μείωση).

Αυτή η ασυμφωνία μεταξύ των ιστορικών χρονοσειρών και των αποτελεσμάτων των μοντέλων μπορεί να έχει τρεις πιθανές αιτίες: (1) τα μοντέλα είναι αναποτελεσματικά, (2) οι ιστορικές χρονοσειρές έχουν συστηματικά σφάλματα, (3) η

μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι λανθασμένη, δηλαδή δεν είναι δυνατή η σύγκριση της χρονοσειράς του σταθμού με τις χρονοσειρές των τεσσάρων γειτονικών σημείων του καννάβου (*Koutsoyiannis D. et al., 2008b*). Η περίπτωση (3), όπως αναλύθηκε διεξοδικά στην ενότητα 2.4.1, δεν είναι αποδεκτή και πιθανότερη αιτία της ασυμφωνίας είναι η περίπτωση (1). Η περίπτωση (2) έχει τη δικιά της σημασία: τα συστηματικά σφάλματα μπορεί να προέρχονται είτε χρησιμοποιώντας μια λανθασμένη μέθοδο μέτρησης είτε οι τοπικές κλιματικές συνθήκες μπορεί να επηρεάζουν σημαντικά τις μετρήσεις. Αυτό το φαινόμενο είναι έντονο τις τελευταίες δεκαετίες κυρίως στις αστικές περιοχές όπου παρατηρούνται, λόγω της αυξανόμενης αστικοποίησης, έντονες ανοδικές τάσεις στη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση κάτι που μπορεί να αλλοιώσει τις ιστορικές χρονοσειρές. Βέβαια, αυτό το φαινόμενο εφόσον υπάρχει στις μετρήσεις του εκάστοτε σταθμού μόνο θετικά λειτουργεί υπέρ των κλιματικών μοντέλων, εφόσον χωρίς αυτό η θερμοκρασία των τελευταίων δεκαετιών θα ήταν χαμηλότερη ενώ τα κλιματικά μοντέλα προβλέπουν αύξηση της θερμοκρασίας (*Koutsoyiannis D. et al., 2008b*). Τα υπόλοιπα συστηματικά σφάλματα είναι απίθανο να εμφανίζονται σε όλους τους σταθμούς που εξετάστηκαν.

### 3.2 Επιφανειακή σύγκριση

Τα αποτελέσματα ποικίλλουν πάλι, όπως ακριβώς και στη σημειακή σύγκριση, ανάλογα με τη χρονική κλίμακα. Στη μηνιαία χρονική κλίμακα τα μοντέλα γενικά αναπαράγουν την ακολουθία θερμών – ψυχρών και ξηρών – υγρών περιόδων. Ο μέσος συντελεστής συσχέτισης είναι 0.976 και 0.169 για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση αντίστοιχα, ενώ ο μέσος συντελεστής αποτελεσματικότητας είναι 0.876 και -2.072 για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση αντίστοιχα.

Η εικόνα βέβαια αλλάζει δραματικά καθώς μεταβαίνουμε από τη μηνιαία στην ετήσια κλίμακα για όλες τις χρονοσειρές που εξετάζονται καθώς ο μέσος συντελεστής συσχέτισης και αποτελεσματικότητας πέφτει δραματικά σε σχέση με τη μηνιαία κλίμακα. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά ο μέσος συντελεστής συσχέτισης και ο μέσος συντελεστής αποτελεσματικότητας για όλες τις χρονοσειρές. Ο μέσος συντελεστής συσχέτισης για όλες τις χρονοσειρές που εξετάστηκαν είναι κοντά στα μηδέν ενώ ο συντελεστής αποτελεσματικότητας παίρνει αρνητικές τιμές και για τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση. Σημαντική απόκλιση παρατηρείται

επίσης στην εκτίμηση του συντελεστή Hurst και της τυπικής απόκλισης όπως φαίνεται στις εικόνες 3.15 και 3.16. Ένα χαρακτηριστικό συμπέρασμα που προκύπτει από αυτές τις εικόνες είναι ότι υπάρχει μια συστηματική υποεκτίμηση της τυπικής απόκλισης της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης από τα περισσότερα μοντέλα.

Στην 30-ετή κλίμακα, ο μέσος συντελεστής συσχέτισης αυξάνεται ελαφρώς, αλλά ο μέσος συντελεστής αποτελεσματικότητας είναι έντονα αρνητικός ενώ παράλληλα υπάρχει μεγάλη απόκλιση στην εκτίμηση της διακύμανσης του 30-ετούς μέσου κατά τον 20<sup>ο</sup> αιώνα, της διακύμανση του 30-ετούς μέσου μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους των παρατηρήσεων καθώς και της μέγιστης διακύμανσης του 30-ετούς μέσου καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης, όπως φαίνεται στα διαγράμματα 3.17 και 3.18. Όπως και στην περίπτωση της σημειακής σύγκρισης παρατηρείται ότι μερικά μοντέλα προβλέπουν αντίθετη μεταβολή από αυτήν που έχει πραγματικά συμβεί, παρά το γεγονός ότι η σύγκριση γίνεται σε υπο-ηπειρωτική κλίμακα.

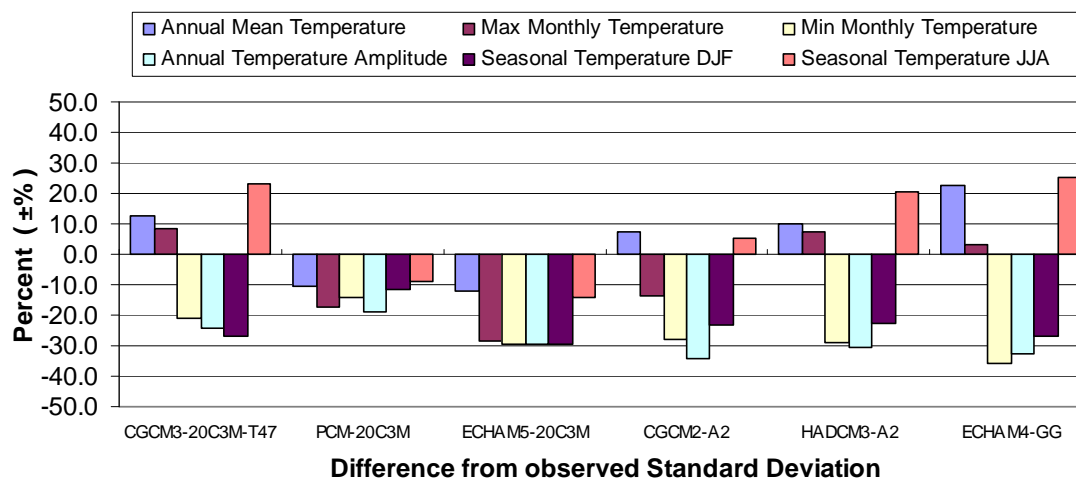
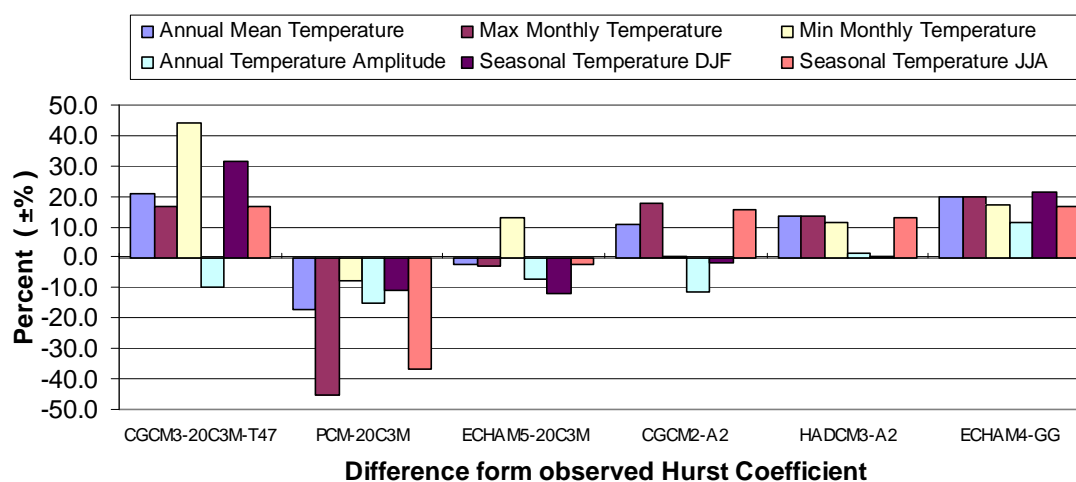
Πίνακας 3.6 – Μέσος συντελεστής συσχέτισης και αποτελεσματικότητας για τη θερμοκρασία σε ετήσια κλίμακα για τα επιφανειακά δεδομένα.

<b>Ετήσια Κλίμακα/ Θερμοκρασία</b>	<b>Μέσος συντελεστής συσχέτισης</b>	<b>Μέσος συντελεστής αποτελεσματικότη ας</b>
<b>Ετήσια Μέση θερμοκρασία</b>	0.294	-23.55
<b>Μέγιστη Μηνιαία θερμοκρασία</b>	0.108	-3.52
<b>Ελάχιστη Μηνιαία θερμοκρασία</b>	0.000	-7.98
<b>Ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος</b>	-0.045	-6.13
<b>Εποχιακή θερμοκρασία ΔΙΦ</b>	0.114	-14.58
<b>Εποχιακή θερμοκρασία ΠΑ</b>	0.196	-5.60

Πίνακας 3.7 – Μέσος συντελεστής συσχέτισης και αποτελεσματικότητας για τη βροχόπτωση σε ετήσια κλίμακα για τα επιφανειακά δεδομένα.

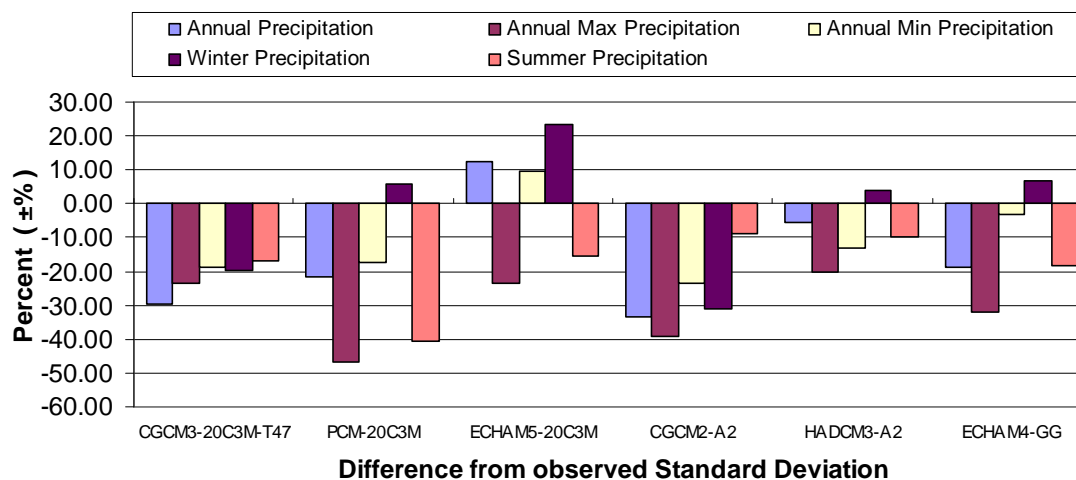
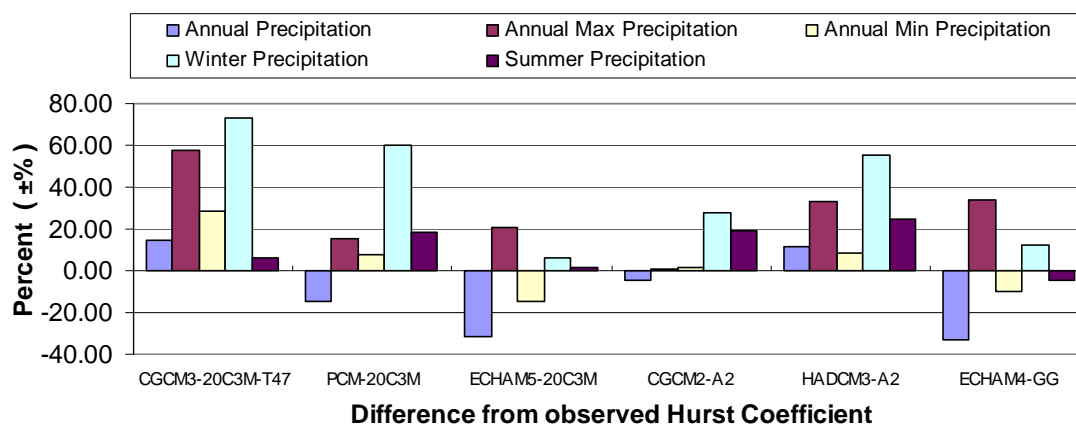
<b>Ετήσια Κλίμακα/ Βροχόπτωση</b>	<b>Μέσος συντελεστής συσχέτισης</b>	<b>Μέσος συντελεστής αποτελεσματικότη ας</b>
<b>Συνολική βροχόπτωση</b>	0.021	-18.63
<b>Μέγιστη Μηνιαία βροχόπτωση</b>	-0.016	-3.42
<b>Ελάχιστη Μηνιαία βροχόπτωση</b>	0.011	-11.95
<b>Εποχιακή βροχόπτωση ΔΙΦ</b>	-0.036	-12.85
<b>Εποχιακή βροχόπτωση ΠΑ</b>	0.072	-7.64

Ετήσια Κλίμακα/ Θερμοκρασία	Συντελεστής Hurst	Τυπική απόκλιση
Ετήσια Μέση Θερμοκρασία	0.765	0.442
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	0.762	0.621
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	0.515	1.450
Ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος	0.555	1.519
Εποχιακή θερμοκρασία ΔΙΦ	0.662	0.990
Εποχιακή θερμοκρασία ΙΙΑ	0.787	0.500



Εικόνα 3.15 –Η ποσοστιαία διαφορά του συντελεστή Hurst και της τυπικής απόκλισης των ιστορικών παρατηρήσεων από τα αποτελέσματα των μοντέλων για τη θερμοκρασία για τα επιφανειακά δεδομένα.

Ετήσια Κλίμακα/ Βροχόπτωση	Συντελεστής Hurst	Τυπική απόκλιση
Συνολική βροχόπτωση	0.628	52.175
Μέγιστη Μηνιαία βροχόπτωση	0.420	8.897
Ελάχιστη Μηνιαία βροχόπτωση	0.469	7.252
Εποχιακή βροχόπτωση ΔΙΦ	0.412	20.666
Εποχιακή βροχόπτωση ΙΑ	0.522	19.414



Εικόνα 3.16 – Η ποσοστιαία διαφορά του συντελεστή Hurst και της τυπικής απόκλισης των ιστορικών παρατηρήσεων από τα αποτελέσματα των μοντέλων για τη βροχόπτωση για τα επιφανειακά δεδομένα.



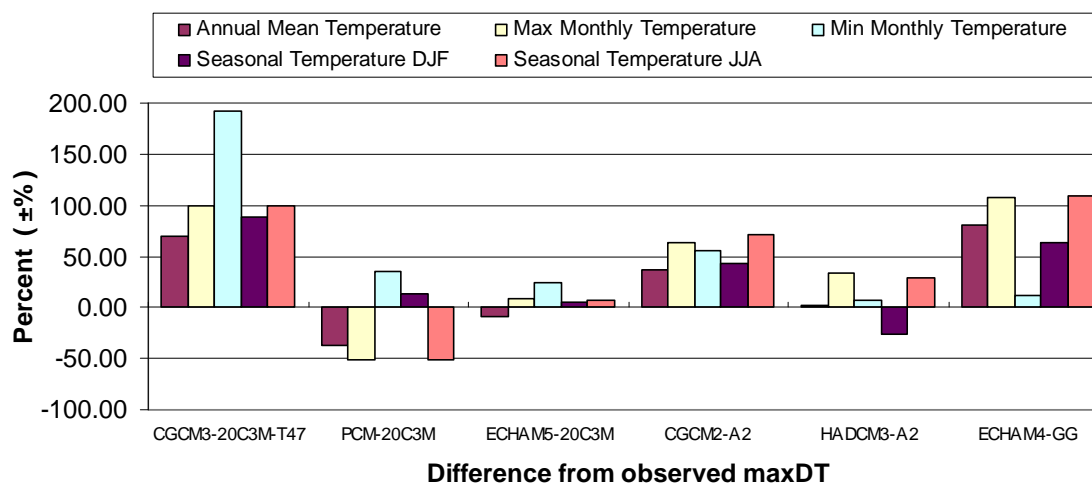
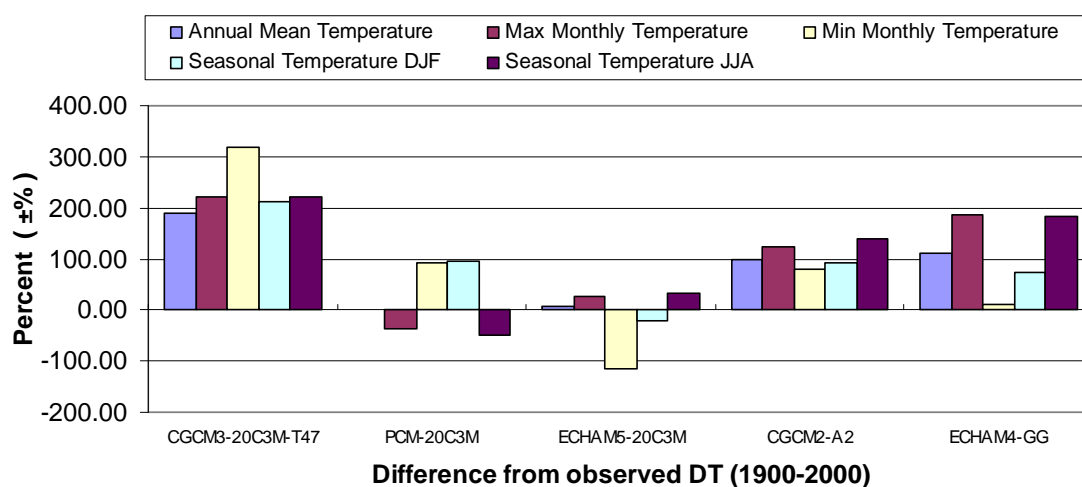
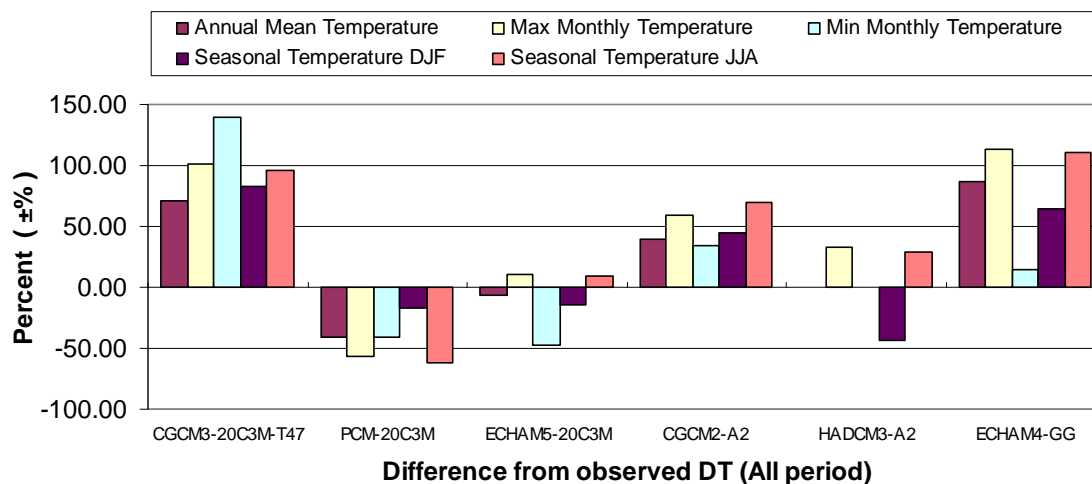
Πίνακας 3.8 – Μέσος συντελεστής συσχέτισης και αποτελεσματικότητας για τη θερμοκρασία σε 30-ετή κλίμακα για τα επιφανειακά δεδομένα.

<b>30-ετής Κλίμακα/ Θερμοκρασία</b>	<b>Μέσος συντελεστής συσχέτισης</b>	<b>Μέσος συντελεστής αποτελεσματικό τητας</b>
Ετήσια Μέση θερμοκρασία	0.474	-252.03
Μέγιστη Μηνιαία θερμοκρασία	0.379	-34.68
Ελάχιστη Μηνιαία θερμοκρασία	0.075	-346.80
Ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος	-0.015	-334.69
Εποχιακή θερμοκρασία ΔΙΦ	0.292	-311.76
Εποχιακή θερμοκρασία ΠΑ	0.471	-49.85

Πίνακας 3.9 – Μέσος συντελεστής συσχέτισης και αποτελεσματικότητας για τη βροχόπτωση σε 30-ετή κλίμακα για τα επιφανειακά δεδομένα.

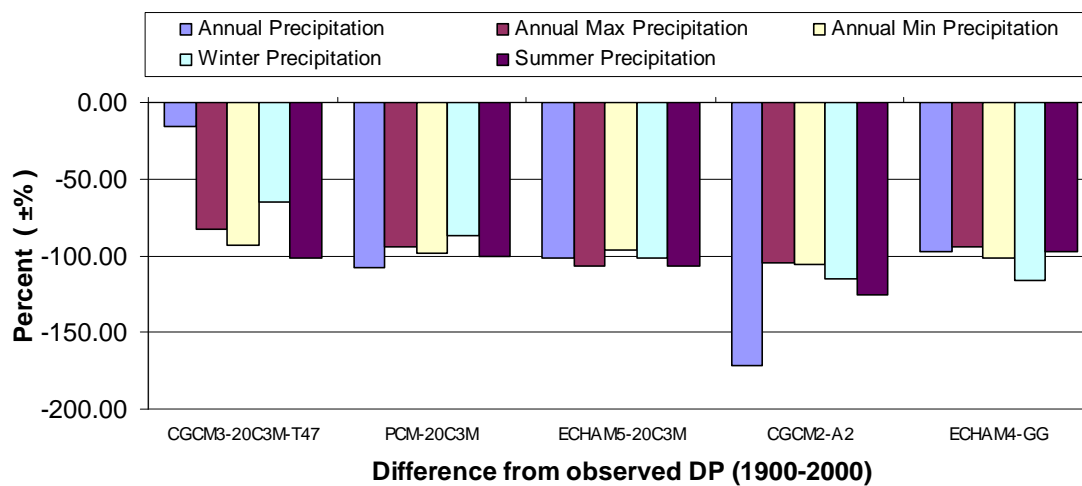
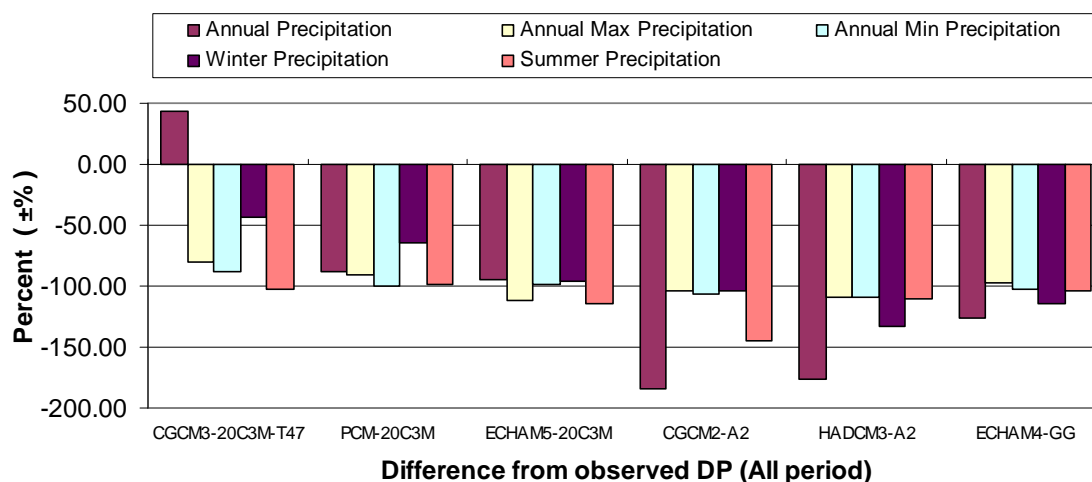
<b>30-ετής Κλίμακα/ Βροχόπτωση</b>	<b>Μέσος συντελεστής συσχέτισης</b>	<b>Μέσος συντελεστής αποτελεσματικό τητας</b>
Συνολική βροχόπτωση	-0.162	-306.87
Μέγιστη Μηνιαία βροχόπτωση	0.054	-145.09
Ελάχιστη Μηνιαία βροχόπτωση	-0.301	-816.56
Εποχιακή βροχόπτωση ΔΙΦ	-0.309	-2253.70
Εποχιακή βροχόπτωση ΠΑ	-0.310	-258.70

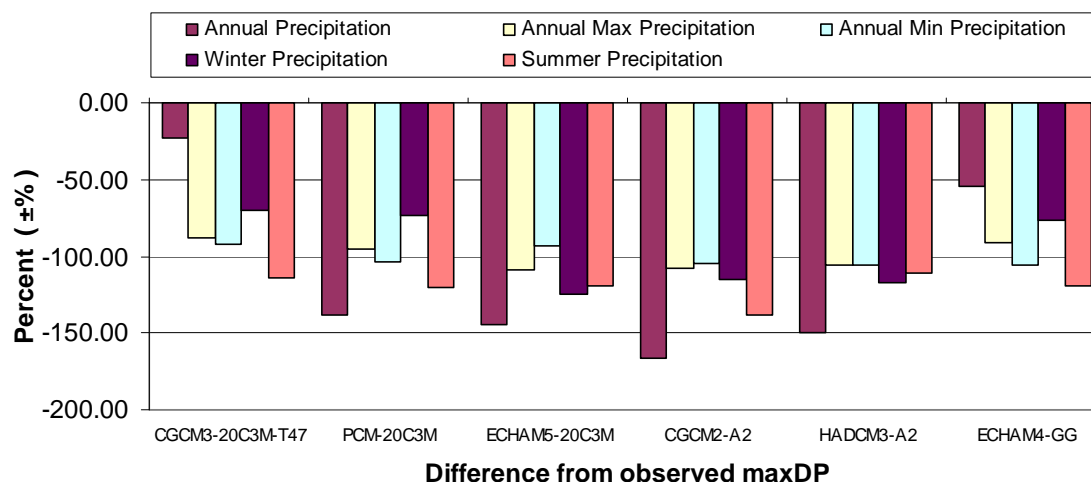
<b>30-ετής Κλίμακα/ Θερμοκρασία</b>	<b>DT (All Period)</b>	<b>DT (1900-2000)</b>	<b>maxDT</b>
Ετήσια Μέση θερμοκρασία	0.55	0.32	0.56
Μέγιστη Μηνιαία θερμοκρασία	0.64	0.37	0.73
Ελάχιστη Μηνιαία θερμοκρασία	0.38	0.19	-0.81
Εποχιακή θερμοκρασία ΔΙΦ	0.75	0.45	0.89
Εποχιακή θερμοκρασία ΠΑ	0.56	0.43	0.58



Εικόνα 3.17 – Η ποσοστιαία διαφορά της διακύμανσης του 30-ετούς μέσου μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους, της διακύμανσης του 30-ετούς μέσου τον 20<sup>ο</sup> αιώνα και της μέγιστης διακύμανσης του 30-ετούς μέσου των ιστορικών παρατηρήσεων από τα αποτελέσματα των μοντέλων για τη θερμοκρασία για τα επιφανειακά δεδομένα.

30-ετής Κλίμακα/ Βροχόπτωση	DP (All Period)	DP (1900-2000)	maxDP
Συνολική βροχόπτωση	28.17	34.68	53.72
Μέγιστη Μηνιαία βροχόπτωση	2.57	3.96	4.89
Ελάχιστη Μηνιαία βροχόπτωση	2.12	1.34	3.70
Εποχιακή βροχόπτωση ΔΙΦ	-5.58	1.41	-8.75
Εποχιακή βροχόπτωση ΠΑ	3.32	5.51	13.63





Εικόνα 3.18 – Η ποσοστιαία διαφορά της διακύμανσης του 30-ετούς μέσου μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου έτους, της διακύμανσης του 30-ετούς μέσου τον 20<sup>ο</sup> αιώνα και της μέγιστης διακύμανσης του 30-ετούς μέσου των ιστορικών παρατηρήσεων από τα αποτελέσματα των μοντέλων για τη βροχόπτωση για τα επιφανειακά δεδομένα.

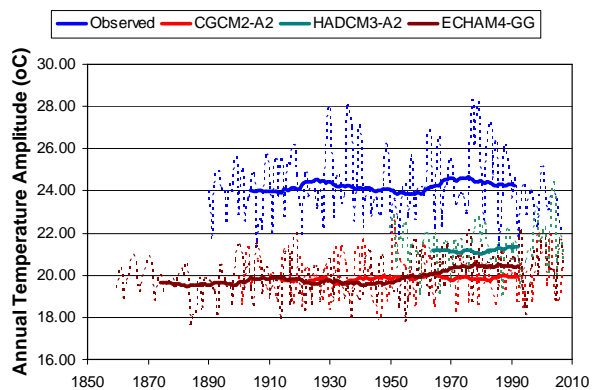
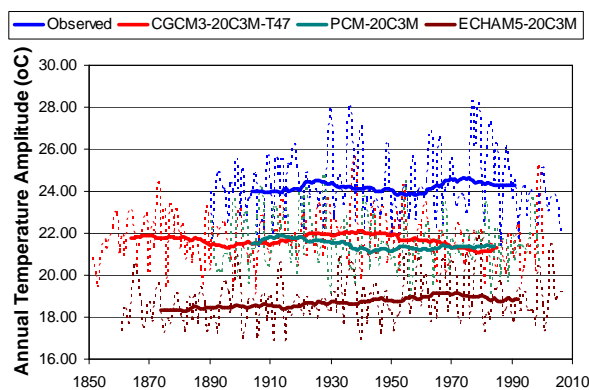
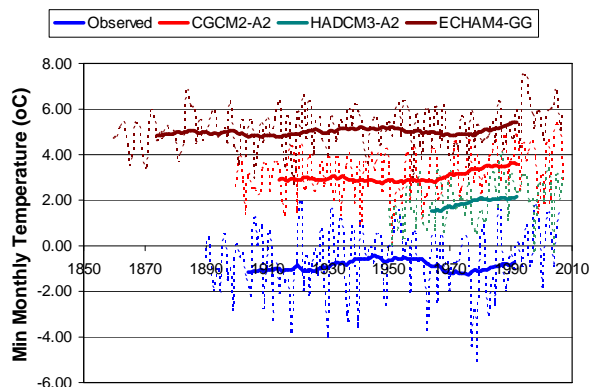
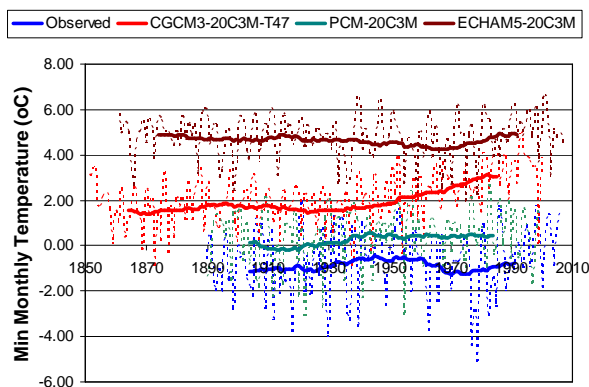
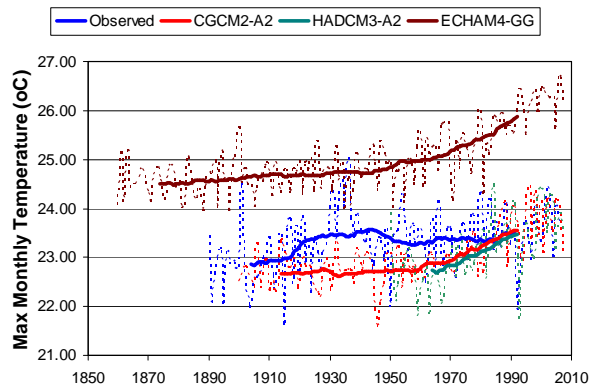
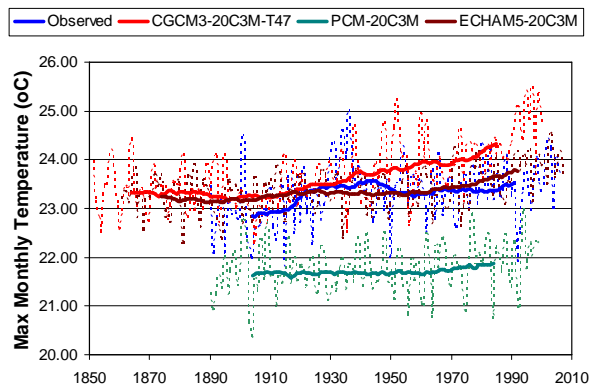
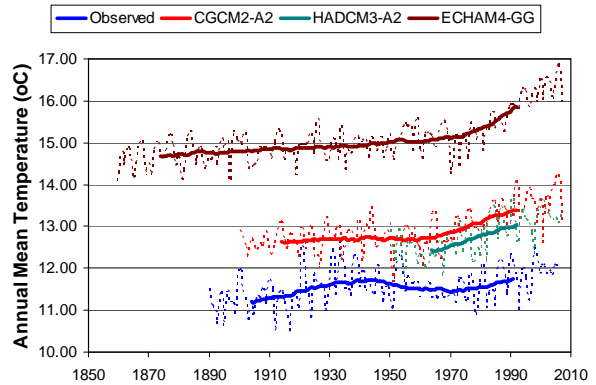
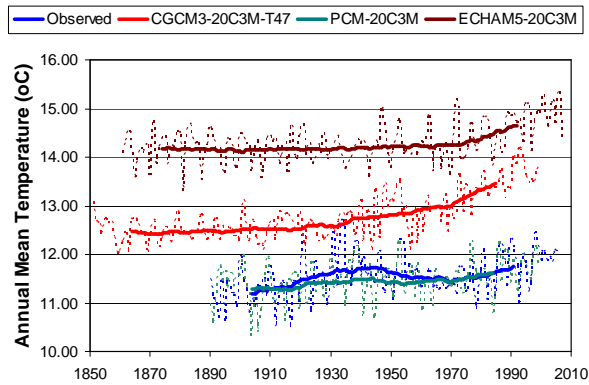
Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό, ακόμα και στην υπο-ηπειρωτική χωρική κλίμακα των ΗΠΑ, τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων αποκλίνουν σημαντικά από τις ιστορικές παρατηρήσεις. Όπως φαίνεται από την εικόνα 3.19 η παρατηρούμενη μέση θερμοκρασία των ΗΠΑ αυξάνεται σταδιακά από το 1890 μέχρι το 1940, στη συνέχεια ακολουθεί μια πτώση μέχρι το 1970 και από το 1970 μέχρι σήμερα ακολουθεί μια ελαφρώς ανοδική πορεία. Αυτές τις διακυμάνσεις της μέσης θερμοκρασίας κανένα μοντέλο δεν μπορεί να τις αναπαραστήσει. Τα περισσότερα μοντέλα προβλέπουν μια μονοτονική αύξηση της θερμοκρασίας η οποία εντείνεται στις τελευταίες δεκαετίες του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Το μόνο μοντέλο που δίνει αποτελέσματα σχετικά κοντά στην πραγματικότητα για τη μέση θερμοκρασία είναι το PCM-20C3M, που είναι αμερικάνικο (National Center for Atmospheric Research, USA), αλλά και αυτό βέβαια έχει πολύ χαμηλό συντελεστή αποτελεσματικότητας στην 30-ετή κλίμακα (μόλις 0.05). Βέβαια, αυτή η σχετικά καλή εικόνα του μοντέλου στη χρονοσειρά της μέσης θερμοκρασίας εξανεμίζεται αμέσως όταν παρατηρήσει κανείς τις χρονοσειρές της μέγιστης και ελάχιστης μηνιαίας θερμοκρασίας, του ετήσιου θερμοκρασιακού εύρους και της εποχιακής θερμοκρασίας ΔΙΦ και ΙΑ. Υποεκτιμά τη μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία, το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος και την εποχιακή θερμοκρασία ΙΑ ,ενώ υπερεκτιμά τις υπόλοιπες χρονοσειρές χωρίς να μπορεί να αναπαραστήσει τις υπερετήσιες διακυμάνσεις (κάτι που φαίνεται και στην εικόνα 3.14, όπου παρουσιάζονται οι αποκλίσεις του συντελεστή Hurst των χρονοσειρών των μοντέλων από τον συντελεστή Hurst των παρατηρούμενων χρονοσειρών).

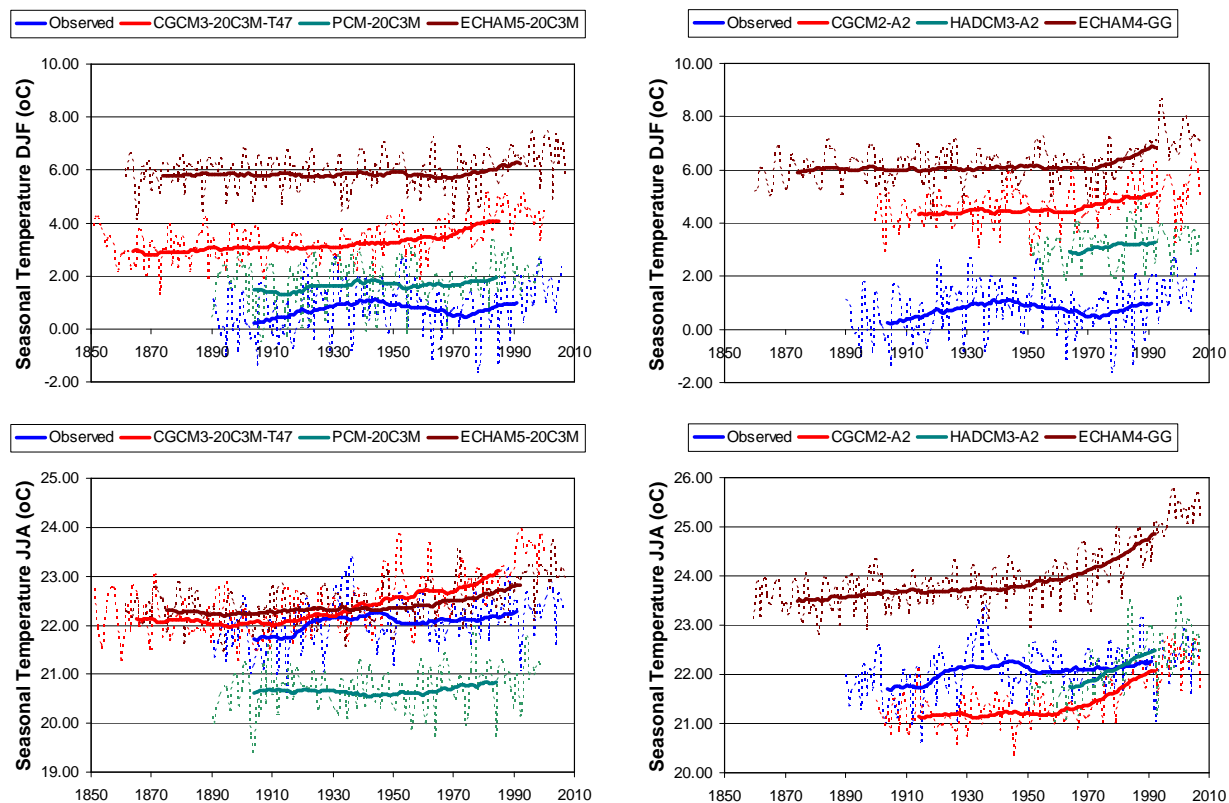
Η κατάσταση στα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι ακόμη χειρότερη από τη θερμοκρασία. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.20, η συνολική ετήσια βροχόπτωση υπερεκτιμάται σε όλα τα μοντέλα του TAR και του AR4 μέχρι 300mm. Το μοντέλο που πλησιάζει περισσότερο τις ιστορικές χρονοσειρές είναι το CGCM3-20C3M-T47. Στην χρονοσειρά της ετήσιας βροχόπτωσης τα αποτελέσματά του είναι απογοητευτικά καθώς ο συντελεστής αποτελεσματικότητας είναι -5.11 και ο συντελεστής συσχέτισης 0.171. Ελαφρώς καλύτερη εικόνα παρουσιάζει το μοντέλο στις χρονοσειρές της μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας (συντελεστής αποτελεσματικότητας -0.57 και συντελεστής συσχέτισης 0.038) και της εποχιακής θερμοκρασίας ΗΑ (συντελεστής αποτελεσματικότητας -0.58, συντελεστής συσχέτισης 0.057). Ακόμη και σε αυτές τις χρονοσειρές όπου το μοντέλο πλησιάζει περισσότερο τα ιστορικά δεδομένα βλέπουμε ότι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας είναι αρνητικός και ο συντελεστής συσχέτισης κοντά στο μηδέν. Είναι ακόμη αξιοπρόσεκτο ότι όλα τα μοντέλα υποεκτιμούν συστηματικά τη διακύμανση της βροχόπτωσης στον 20<sup>ο</sup> αιώνα καθώς και τη μέγιστη διακύμανση της κατά την περίοδο μελέτης, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.17.

Παρόλη την υποτιθέμενη βελτίωση των μοντέλων παρατηρούμε ότι η εικόνα τους δεν βελτιώνεται καθόλου για τα δεδομένα της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης καθώς μεταβαίνουμε από τα μοντέλα του TAR στα μοντέλα του AR4. Ενδεικτικά, κατά την μελέτη των χρονοσειρών της θερμοκρασίας υπάρχουν μοντέλα του TAR (ECHAM4-GG/CGCM3-A2) και του AR4 (ECHAM5-20C3M) που υπερεκτιμούν τη μέση θερμοκρασία των ΗΠΑ κατά 4 έως 5 βαθμούς και τη συνολική ετήσια βροχόπτωση των ΗΠΑ κατά 300 έως 400 χιλιοστά ετησίως, πράγμα που δείχνει ότι η προσπάθεια πρόβλεψης του κλίματος με νεότερα μοντέλα είναι πλέον ατελέσφορη.

Στη σημειακή σύγκριση η χρονοσειρά των μοντέλων προκύπτει από το βέλτιστο γραμμικό συνδυασμό των τεσσάρων πλησιέστερων σημείων του καννάβου στον εξεταζόμενο σταθμό, ώστε να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα την ιστορική χρονοσειρά (μεγιστοποίηση του συντελεστή αποτελεσματικότητας). Στην επιφανειακή σύγκριση κανένα είδος βελτιστοποίησης (που μόνο τα μοντέλα ευνοεί) δεν πραγματοποιείται, απλά γίνεται επιφανειακή ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων των μοντέλων και για αυτό το λόγο είναι πιο ρεαλιστική η συσχέτιση τους με τις ιστορικές χρονοσειρές, με τις αδυναμίες πρόγνωσης των μοντέλων να γίνονται ακόμα πιο έκδηλες. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της

επιφανειακής σύγκρισης τόσο με την μορφή γραφημάτων, όσο και με τη μορφή πινάκων που περιέχουν τους στατιστικούς δείκτες όλων των χρονοσειρών που εξετάστηκαν.





Εικόνα 3.19 – Γραφήματα των ιστορικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων των μοντέλων σε ετήσια και κλιματική (30-ετή) κλίμακα για όλες τις χρονοσειρές που εξετάστηκαν (ετήσια μέση θερμοκρασία, μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία, ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία, ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος, εποχιακή θερμοκρασία ΔΙΦ και ΙΙΑ) για τις ΗΠΑ.

Πίνακας 3.10 – Στατιστικά στοιχεία για τη θερμοκρασία σε μηνιαία κλίμακα για τα επιφανειακά δεδομένα.

Χρονοσειρές - Μοντέλα	Period	Average (°C)	St Dev (°C)	Correlation	Efficiency
Observed	1890-2006	11.53	8.34		
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	12.87	7.56	0.976	0.922
PCM-20C3M	1890-2006	11.44	7.60	0.977	0.951
ECHAM5-20C3M	1890-2006	14.30	6.52	0.982	0.813
CGCM2-A2	1900-2006	12.89	6.91	0.955	0.872
HADCM3-A2	1950-2006	12.74	7.49	0.984	0.945
ECHAM4-GG	1890-2006	15.15	7.02	0.982	0.753

Πίνακας 3.11 – Στατιστικά στοιχεία σε ετήσια κλίμακα για τη θερμοκρασία για όλες τις χρονοσειρές για τα επιφανειακά δεδομένα.

Χρονοσειρές - Μοντέλα	Period	Average (°C)	St Dev (°C)	Autocorrel	Correlation	Efficiency	Hurst
<b><u>Annual Mean Temperature</u></b>							
Observed	1890-2006	11.51	0.44	0.295			0.766
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	12.87	0.50	0.671	0.188	-10.95	0.925
PCM-20C3M	1890-2006	11.44	0.40	0.207	0.304	-0.28	0.634
ECHAM5-20C3M	1890-2006	14.30	0.39	0.307	0.311	-41.00	0.745
CGCM2-A2	1900-2006	12.89	0.47	0.532	0.191	-10.53	0.848
HADCM3-A2	1950-2006	12.74	0.49	0.445	0.368	-9.35	0.867
ECHAM4-GG	1890-2006	15.15	0.54	0.686	0.399	-70.13	0.917
<b><u>Max Monthly Temperature</u></b>							
Observed	1890-2006	23.16	0.61	0.217			0.763
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	23.75	0.67	0.483	0.023	-2.22	0.889
PCM-20C3M	1890-2006	21.71	0.51	0.024	0.170	-5.87	0.419
ECHAM5-20C3M	1890-2006	23.40	0.44	0.324	0.087	-0.55	0.740
CGCM2-A2	1900-2006	22.96	0.53	0.587	0.169	-0.63	0.898
HADCM3-A2	1950-2006	23.10	0.67	0.509	0.117	-1.41	0.866
ECHAM4-GG	1890-2006	25.06	0.64	0.598	0.085	-10.54	0.914
<b><u>Min Monthly Temperature</u></b>							
Observed	1890-2006	-0.70	1.43	0.040			0.517
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	2.14	1.15	0.151	-0.046	-4.90	0.744
PCM-20C3M	1890-2006	0.28	1.24	-0.018	-0.132	-1.52	0.475
ECHAM5-20C3M	1890-2006	4.64	1.02	0.160	0.095	-14.37	0.582
CGCM2-A2	1900-2006	3.11	1.04	0.028	-0.087	-7.34	0.517
HADCM3-A2	1950-2006	1.86	1.03	0.008	0.109	-3.02	0.575
ECHAM4-GG	1890-2006	5.08	0.93	0.121	0.060	-16.76	0.603
<b><u>Annual Temperature Amplitude</u></b>							
Observed	1890-2006	23.86	1.50	0.023			0.556
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	21.61	1.15	-0.015	-0.078	-2.96	0.500
PCM-20C3M	1890-2006	21.43	1.23	-0.041	-0.187	-3.55	0.471
ECHAM5-20C3M	1890-2006	18.76	1.07	0.133	0.128	-11.97	0.515
CGCM2-A2	1900-2006	19.86	1.00	0.030	-0.126	-7.48	0.493
HADCM3-A2	1950-2006	21.24	1.05	-0.041	0.014	-3.27	0.561
ECHAM4-GG	1890-2006	19.97	1.03	0.118	-0.022	-7.27	0.619
<b><u>Seasonal Temperature DJF</u></b>							
Observed	1890-2006	0.84	0.98	0.162			0.663

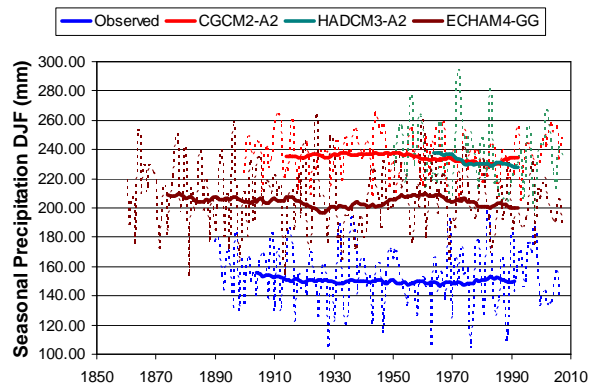
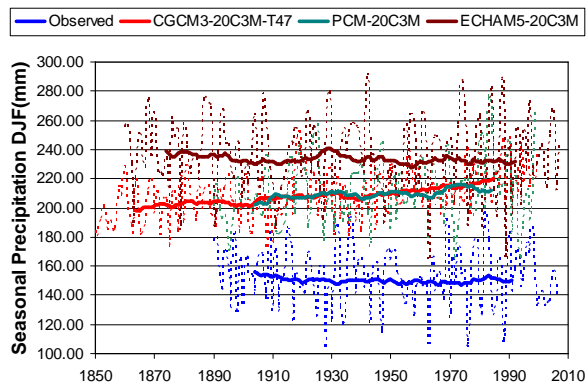
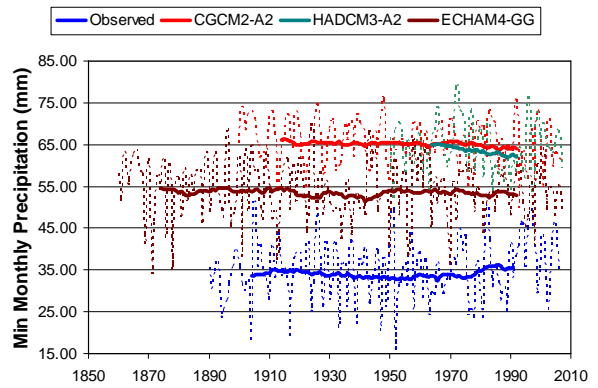
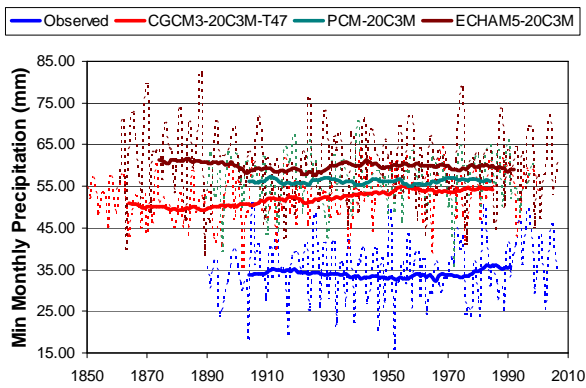
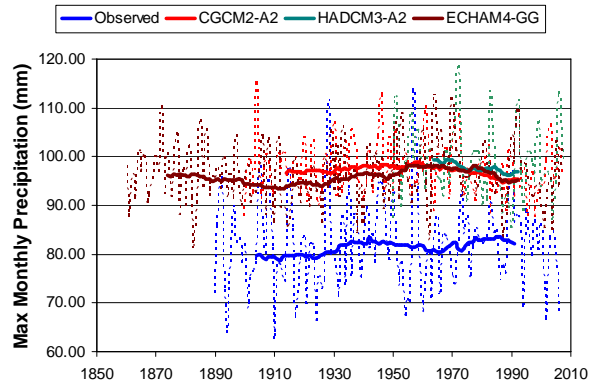
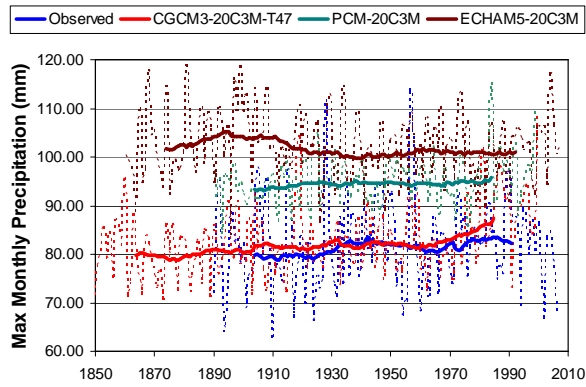
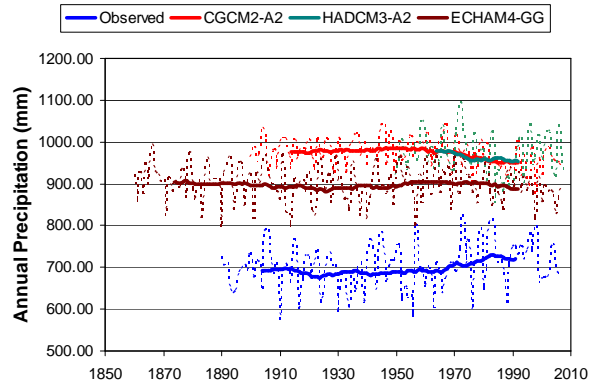
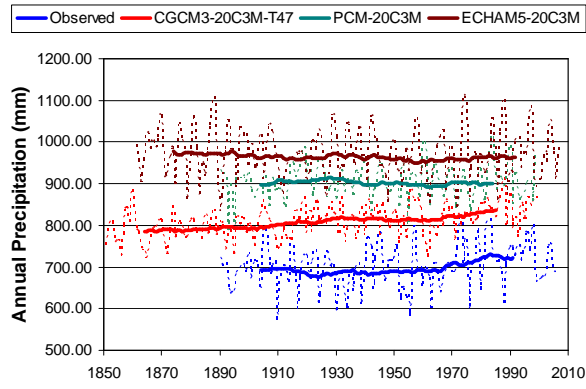


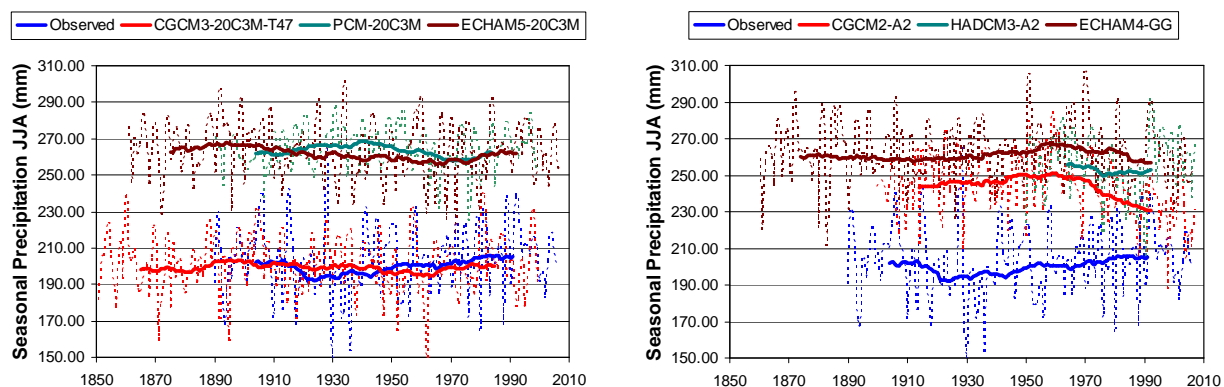
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	3.41	0.72	0.417	0.032	-7.59	0.869
PCM-20C3M	1890-2006	1.68	0.88	0.093	0.022	-1.54	0.591
ECHAM5-20C3M	1890-2006	5.93	0.70	0.069	0.187	-27.47	0.584
CGCM2-A2	1900-2006	4.60	0.76	0.223	-0.040	-15.16	0.650
HADCM3-A2	1950-2006	3.11	0.77	0.182	0.278	-4.79	0.664
ECHAM4-GG	1890-2006	6.25	0.73	0.412	0.205	-30.99	0.804
<b><u>Seasonal Temperature JJA</u></b>							
Observed	1890-2006	21.94	0.49	0.315			0.787
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	22.51	0.61	0.616	0.149	-2.68	0.917
PCM-20C3M	1890-2006	20.67	0.46	0.082	0.195	-7.02	0.500
ECHAM5-20C3M	1890-2006	22.45	0.43	0.400	0.130	-1.59	0.768
CGCM2-A2	1900-2006	21.45	0.53	0.662	0.323	-1.53	0.912
HADCM3-A2	1950-2006	22.11	0.60	0.502	0.190	-1.53	0.888
ECHAM4-GG	1890-2006	24.05	0.63	0.637	0.189	-19.49	0.917

Πίνακας 3.12 – Στατιστικά στοιχεία σε κλιματική (30-ετής κινούμενος μέσος όρος) κλίμακα για τη θερμοκρασία για όλες τις χρονοσειρές για τα επιφανειακά δεδομένα.

Χρονοσειρές - Μοντέλα	Period	St. Dev (°C)	Efficiency	Correlation	DT (20 <sup>th</sup> Century) (°C)	DT (All data) (°C)	maxDT (°C)
<b><u>Annual Mean Temperature</u></b>							
Observed	1890-2006	0.14			0.32	0.54	0.56
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	0.27	-96.47	0.282	0.93	0.93	0.96
PCM-20C3M	1890-2006	0.09	0.05	0.651	0.33	0.32	0.35
ECHAM5-20C3M	1890-2006	0.12	-397.09	0.369	0.34	0.51	0.51
CGCM2-A2	1900-2006	0.22	-157.93	0.244	0.64	0.76	0.77
HADCM3-A2	1950-2006	0.20	-190.96	0.880		0.54	0.57
ECHAM4-GG	1890-2006	0.25	-669.79	0.416	0.68	1.02	1.02
<b><u>Max Monthly Temperature</u></b>							
Observed	1890-2006	0.19			0.37	0.64	0.72
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	0.31	-7.90	0.579	1.03	1.10	1.13
PCM-20C3M	1890-2006	0.06	-59.57	0.202	0.20	0.24	0.28
ECHAM5-20C3M	1890-2006	0.15	-0.84	0.399	0.40	0.61	0.61
CGCM2-A2	1900-2006	0.27	-12.51	0.159	0.72	0.87	0.92
HADCM3-A2	1950-2006	0.25	-38.66	0.600		0.73	0.75
ECHAM4-GG	1890-2006	0.35	-88.62	0.332	0.92	1.16	1.17

<b><u>Min Monthly Temperature</u></b>							
Observed	1890-2006	0.22			0.19	0.37	-0.81
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	0.45	-156.79	-0.275	1.34	1.31	1.65
PCM-20C3M	1890-2006	0.23	-20.67	0.395	0.62	0.33	0.76
ECHAM5-20C3M	1890-2006	0.18	-589.27	-0.131	-0.05	0.29	0.70
CGCM2-A2	1900-2006	0.25	-289.93	-0.436	0.58	0.73	0.87
HADCM3-A2	1950-2006	0.21	-338.87	0.256		0.55	0.60
ECHAM4-GG	1890-2006	0.14	-685.30	0.642	0.35	0.63	0.63
<b><u>Annual Temperature Amplitude</u></b>							
Observed	1890-2006	0.22					
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	0.26	-104.64	-0.328			
PCM-20C3M	1890-2006	0.21	-123.74	0.005			
ECHAM5-20C3M	1890-2006	0.24	-555.37	0.436			
CGCM2-A2	1900-2006	0.10	-367.18	-0.122	-		
HADCM3-A2	1950-2006	0.10	-520.74	-0.555			
ECHAM4-GG	1890-2006	0.32	-336.44	0.474			
<b><u>Seasonal Temperature DJF</u></b>							
Observed	1890-2006	0.22			0.44	0.74	0.88
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	0.32	-132.79	-0.038	1.00	1.00	1.06
PCM-20C3M	1890-2006	0.15	-13.51	0.583	0.63	0.45	0.64
ECHAM5-20C3M	1890-2006	0.11	-519.07	0.347	0.25	0.47	0.59
CGCM2-A2	1900-2006	0.22	-430.15	-0.011	0.62	0.79	0.80
HADCM3-A2	1950-2006	0.14	-195.90	0.520		0.31	0.41
ECHAM4-GG	1890-2006	0.19	-579.13	0.348	0.55	0.90	0.92
<b><u>Seasonal Temperature JJA</u></b>							
Observed	1890-2006	0.16			0.43	0.56	0.58
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	0.31	-12.30	0.603	1.03	1.07	1.12
PCM-20C3M	1890-2006	0.07	-68.31	-0.046	0.16	0.21	0.28
ECHAM5-20C3M	1890-2006	0.15	-8.37	0.509	0.42	0.60	0.60
CGCM2-A2	1900-2006	0.28	-36.09	0.416	0.77	0.93	0.96
HADCM3-A2	1950-2006	0.25	-11.06	0.873		0.71	0.72
ECHAM4-GG	1890-2006	0.33	-162.98	0.472	0.91	1.15	1.17





Εικόνα 3.20 – Γραφήματα των ιστορικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων των μοντέλων σε ετήσια και κλιματική (30-ετή) κλίμακα για όλες τις χρονοσειρές που εξετάστηκαν (ετήσια βροχόπτωση, μέγιστη μηνιαία βροχόπτωση, ελάχιστη μηνιαία βροχόπτωση, εποχιακή βροχόπτωση ΔΙΦ και ΙΙΑ) για τις ΗΠΑ.

Πίνακας 3.13 – Στατιστικά στοιχεία για τη βροχόπτωση σε μηνιαία κλίμακα για τα επιφανειακά δεδομένα.

Χρονοσειρές - Μοντέλα	Period	Average (°mm)	St Dev (°mm)	Correlation	Efficiency
Observed	1890-2006	58.19	14.33		
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	67.93	9.38	0.077	-0.776
PCM-20C3M	1890-2006	75.10	12.20	0.287	-1.589
ECHAM5-20C3M	1890-2006	80.16	13.31	0.155	-2.925
CGCM2-A2	1900-2006	80.92	9.65	0.159	-2.720
HADCM3-A2	1950-2006	80.57	10.67	0.123	-2.695
ECHAM4-GG	1890-2006	74.52	12.94	0.214	-1.729

Πίνακας 3.14 – Στατιστικά στοιχεία σε ετήσια κλίμακα για τη βροχόπτωση για όλες τις χρονοσειρές που εξετάστηκαν για τα επιφανειακά δεδομένα.

Χρονοσειρές - Μοντέλα	Period	Average (mm)	St Dev (mm)	Autocorrel	Correlation	Efficiency	Hurst
<b>Annual Precipitation</b>							
Observed	1890-2006	698.31	52.18	0.204			0.628
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	815.16	36.75	0.312	0.171	-5.11	0.720
PCM-20C3M	1890-2006	901.17	40.96	0.079	0.113	-14.97	0.538
ECHAM5-20C3M	1890-2006	961.87	58.75	0.171	-0.041	-27.10	0.429
CGCM2-A2	1900-2006	971.08	34.83	0.034	-0.104	-26.40	0.601
HADCM3-A2	1950-2006	966.80	49.23	0.208	0.019	-23.28	0.700

ECHAM4-GG	1890-2006	894.25	42.38	-0.058	-0.035	-14.94	0.420
<b><u>Max Monthly Precipitation</u></b>							
Observed	1890-2006	81.09	8.90	0.115			0.420
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	83.18	6.79	0.192	0.038	-0.57	0.661
PCM-20C3M	1890-2006	94.59	4.75	0.036	-0.050	-2.57	0.483
ECHAM5-20C3M	1890-2006	101.67	6.80	0.171	-0.030	-5.98	0.507
CGCM2-A2	1900-2006	96.95	5.42	-0.047	-0.054	-3.61	0.424
HADCM3-A2	1950-2006	97.93	7.11	0.099	-0.120	-4.77	0.558
ECHAM4-GG	1890-2006	95.62	6.06	-0.0004	0.085	-3.04	0.562
<b><u>Min Monthly Precipitation</u></b>							
Observed	1890-2006	34.31	7.25	-0.065			0.469
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	52.94	5.89	0.160	0.109	-7.35	0.604
PCM-20C3M	1890-2006	56.20	5.98	0.128	0.072	-9.95	0.506
ECHAM5-20C3M	1890-2006	59.46	7.94	-0.045	0.112	-13.09	0.401
CGCM2-A2	1900-2006	65.20	5.54	0.014	-0.077	-18.05	0.477
HADCM3-A2	1950-2006	63.67	6.29	0.011	0.019	-15.00	0.509
ECHAM4-GG	1890-2006	53.41	7.01	-0.127	-0.169	-8.26	0.422
<b><u>Seasonal Precipitation DJF</u></b>							
Observed	1890-2006	150.95	20.67	-0.052			0.412
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	210.95	16.61	0.145	-0.019	-8.75	0.712
PCM-20C3M	1890-2006	208.67	21.90	0.281	-0.067	-8.65	0.660
ECHAM5-20C3M	1890-2006	232.29	25.53	0.023	0.089	-16.93	0.437
CGCM2-A2	1900-2006	235.24	14.20	0.048	-0.064	-17.68	0.528
HADCM3-A2	1950-2006	233.11	21.44	0.211	0.020	-17.08	0.639
ECHAM4-GG	1890-2006	203.49	22.11	-0.015	-0.178	-8.04	0.464
<b><u>Seasonal Precipitation JJA</u></b>							
Observed	1890-2006	200.78	19.41	0.054			0.522
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	199.57	16.16	0.081	0.057	-0.58	0.553
PCM-20C3M	1890-2006	263.12	11.56	0.170	0.007	-10.27	0.617
ECHAM5-20C3M	1890-2006	261.57	16.42	0.131	-0.021	-10.64	0.530
CGCM2-A2	1900-2006	241.87	17.71	0.121	-0.029	-5.36	0.622
HADCM3-A2	1950-2006	253.68	17.50	0.125	0.336	-9.00	0.651
ECHAM4-GG	1890-2006	260.29	15.87	-0.056	0.080	-10.01	0.496

Πίνακας 3.15 – Στατιστικά στοιχεία σε κλιματική (30-ετής κινούμενος μέσος όρος) κλίμακα για τη βροχόπτωση για όλες τις χρονοσειρές που εξετάστηκαν για τα επιφανειακά δεδομένα.

Χρονοσειρές - Μοντέλα	Period	St. Dev (mm)	Efficiency	Correlation	DP (20 <sup>th</sup> Century) (mm)	DP (All data) (mm)	maxDP (mm)
<b><u>Annual Precipitation</u></b>							
Observed	1890-2006	13.80			34.68	28.17	53.72
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	13.47	-97.34	0.672	29.25	40.38	41.33
PCM-20C3M	1890-2006	5.33	-319.05	-0.265	-2.59	3.27	-20.77
ECHAM5-20C3M	1890-2006	6.29	-375.08	0.035	-0.69	1.65	-23.89
CGCM2-A2	1900-2006	10.80	-366.85	-0.899	-24.95	-23.63	-35.98
HADCM3-A2	1950-2006	8.94	-471.32	-0.821		-21.54	-26.59
ECHAM4-GG	1890-2006	5.77	-211.58	0.304	0.81	-7.45	24.66
<b><u>Max Monthly Precipitation</u></b>							
Observed	1890-2006	1.34			3.96	2.57	4.89
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	1.63	-0.68	0.603	5.86	5.50	6.35
PCM-20C3M	1890-2006	0.48	-104.09	0.664	1.97	2.45	2.55
ECHAM5-20C3M	1890-2006	1.48	-223.14	-0.691	-2.21	-3.20	-4.73
CGCM2-A2	1900-2006	0.95	-170.28	-0.184	-1.71	-1.21	-4.18
HADCM3-A2	1950-2006	0.98	-252.20	-0.635		-2.42	-3.20
ECHAM4-GG	1890-2006	1.35	-120.17	0.567	1.89	0.86	4.86
<b><u>Min Monthly Precipitation</u></b>							
Observed	1890-2006	0.87			1.34	2.12	3.70
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	1.75	-636.08	-0.250	2.44	3.41	4.46
PCM-20C3M	1890-2006	0.50	-929.59	0.124	0.70	0.03	-2.15
ECHAM5-20C3M	1890-2006	0.89	-881.87	-0.343	1.12	0.44	3.52
CGCM2-A2	1900-2006	0.51	-1224.79	-0.492	-1.97	-1.90	-2.45
HADCM3-A2	1950-2006	0.98	-719.11	-0.807		-2.45	-3.07
ECHAM4-GG	1890-2006	0.66	-507.90	-0.037	-0.66	-0.63	-2.98
<b><u>Seasonal Precipitation DJF</u></b>							
Observed	1890-2006	1.72			1.41	-5.58	-8.75
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	5.00	-1191.77	-0.303	12.08	16.01	16.01
PCM-20C3M	1890-2006	3.05	-1157.76	-0.579	4.61	10.06	14.16
ECHAM5-20C3M	1890-2006	2.66	-2351.66	-0.134	-0.56	1.24	-13.02
CGCM2-A2	1900-2006	2.36	-5000.81	-0.176	-5.41	-1.20	-8.32
HADCM3-A2	1950-2006	3.30	-2827.15	-0.463		-9.36	-9.54
ECHAM4-GG	1890-2006	3.10	-993.07	-0.199	-5.70	-4.10	12.66

---

<b>Seasonal Precipitation JJA</b>							
Observed	1890-2006	3.79			5.51	3.32	13.63
CGCM3-20C3M-T47	1890-2006	2.05	-0.24	0.037	-0.72	-0.57	-7.45
PCM-20C3M	1890-2006	2.99	-325.72	-0.792	-0.23	0.39	-10.83
ECHAM5-20C3M	1890-2006	3.24	-259.79	0.109	-2.39	-3.98	-10.22
CGCM2-A2	1900-2006	5.54	-137.69	-0.570	-8.99	-12.50	-20.55
HADCM3-A2	1950-2006	1.82	-558.91	-0.742		-2.94	-6.14
ECHAM4-GG	1890-2006	2.65	-269.83	0.098	0.89	-0.96	-10.39

### 3.3 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Η επιστήμη της κλιματολογίας κυριαρχείται σήμερα πλήρως από ντετερμινιστικά στερεότυπα τα οποία υπαγορεύουν ότι τα GCM μπορούν να προβλέψουν με αξιοπιστία το μελλοντικό κλίμα. Πάνω σε αυτό το μονοπάτι κινείται και η υδρολογία που χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα των GCM για να κάνει προβλέψεις σε θέματα διαχείρισης των υδατικών πόρων χωρίς να υπάρχει η αναγκαία επαλήθευση των αποτελεσμάτων των κλιματικών μοντέλων. Έτσι λοιπόν, αυτή η εργασία κινείται προς την κατεύθυνση της αποτίμησης της αξιοπιστίας των κλιματικών μοντέλων συγκρίνοντας σε σημειακή αλλά και επιφανειακή βάση τα αποτελέσματα τους με μακρές ιστορικές χρονοσειρές. Από την αρχή της εργασίας αυτής τέθηκαν τα εξής ερωτήματα: (1) επιβεβαιώνεται το επιχείρημα των υποστηρικτών των κλιματικών μοντέλων ότι τα μοντέλα δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε ηπειρωτική κλίμακα και άνω; (2) Οι γεωγραφικά κατανεμημένες προβλέψεις είναι αρκετά αξιόπιστες προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε περαιτέρω μελέτες;

Η απάντηση στην πρώτη ερώτηση επιχειρήθηκε να δοθεί πραγματοποιώντας επιφανειακή ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων των μοντέλων και των ιστορικών δεδομένων. Η απάντηση στην δεύτερη ερώτηση επιχειρήθηκε να δοθεί συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων με ιστορικές χρονοσειρές 55 σταθμών από όλο τον κόσμο. Και στις δύο περιπτώσεις η επίδοση των μοντέλων είναι απογοητευτική και η χρήση τους για την πρόβλεψη του μελλοντικού κλίματος είναι επισφαλής, αφού τα μοντέλα αδυνατούν να αναπαραστήσουν με επιτυχία το παρελθόν. Βέβαια, η επίδοση των μοντέλων ποικίλλει ανάλογα με τη χρονική κλίμακα στην οποία γίνεται η σύγκριση.

Στη μηνιαία χρονική κλίμακα τα κλιματικά μοντέλα αναπαράγουν αποτελεσματικά την ακολουθία υγρών/ξηρών ή θερμών/ψυχρών περιόδων σε όλους τους σταθμούς που εξετάστηκαν αλλά και στην επιφανειακή σύγκριση που πραγματοποιήθηκε στις ΗΠΑ, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης αλλά και ο συντελεστής αποτελεσματικότητας παίρνουν ικανοποιητικές τιμές.

Στην ετήσια και την κλιματική (30-ετή) κλίμακα όμως τα πράγματα είναι απογοητευτικά. Τα κλιματικά μοντέλα αδυνατούν να αναπαράγουν τις διακυμάνσεις μεγάλης κλίμακας των ιστορικών χρονοσειρών και στις περισσότερες περιπτώσεις υποεκτιμούν το συντελεστή Hurst και την τυπική απόκλιση τους. Επιπρόσθετα, στις



περισσότερες περιπτώσεις που τα αποτελέσματα των μοντέλων έχουν συντελεστή Hurst μεγαλύτερο από 0,5 αυτό προκύπτει από μια μονοτονική αύξηση, ενώ στις ιστορικές χρονοσειρές αυτό είναι αποτέλεσμα διακυμάνσεων μεγάλης κλίμακας (διαδοχή ανοδικών και καθοδικών τάσεων). Οι έντονα αρνητικές τιμές του συντελεστή αποτελεσματικότητας υποδεικνύουν ότι οι προβλέψεις των μοντέλων είναι πολύ χειρότερες ακόμη και από μία πολύ στοιχειώδη πρόβλεψη βασισμένη στη μέση τιμή. Αυτά ισχύουν τόσο στη σημειακή σύγκριση στην πλειονότητα των 55 σταθμών που εξετάστηκαν αλλά και στην επιφανειακή σύγκριση, κάνοντας εμφανή την αναξιοπιστία των κλιματικών μοντέλων ακόμη και στην υπο-ηπειρωτική κλίμακα.

Κανένα από τα μοντέλα δε φαίνεται να αποδίδει καλύτερα από το άλλο σε κανέναν από τους στατιστικούς δείκτες και παραδόξως τα μοντέλα του AR4 δεν αποδίδουν καλύτερα από αυτά του TAR. Αυτή η ασυμφωνία μοντέλων και ιστορικών χρονοσειρών δημιουργεί ερωτηματικά για την κατεύθυνση που έχει ακολουθηθεί στην κλιματολογία. Το κλίμα στη γη μεταβαλλόταν, μεταβάλλεται και θα συνεχίσει να μεταβάλλεται όπως γίνεται τα τελευταία 4.5 δισεκατομμύρια χρόνια. Τα κλιματικά μοντέλα αδυνατούν να αναπαραστήσουν το παρελθόν και δεν μπορούμε να τους έχουμε καμία εμπιστοσύνη όσον αφορά την πρόβλεψη του μελλοντικού κλίματος. Οι κλιματικές διεργασίες είναι πολύ πολύπλοκες και μπορούν να περιγραφούν αποτελεσματικότερα κάτω από ένα πιθανοτικό – στοχαστικό πλαίσιο παρά με ντετερμινιστικά μοντέλα που αδυνατούν να προσομοιώσουν τις χαοτικές αλληλεπιδράσεις των κλιματικών συνιστωσών.

## 4. Βιβλιογραφικές Αναφορές

---

- Beran, J. (1994) *Statistics for Long-Memory Processes*, vol. 61 of *Monographs on Statistics and Applied Probability*. Chapman & Hall, New York, USA.
- Carter, T. R., Hulme, M. & Lal, M. (1999) *Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*, task group on scenarios for climate impact assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change (ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/ggm\_no1\_v1\_12-1999.pdf).
- Hegerl, G., Meehl, G., Covey, C., Latif, M., McAvaney, B. & Stouffer, R. (2003) 20C3M: CMIP collecting data from 20th century coupled model simulations. *Exchanges* 26, 8(1), Int. CLIVAR Project Office. ([www.clivar.org/publications/exchanges/exchanges.php](http://www.clivar.org/publications/exchanges/exchanges.php)).
- Hurst, H. E. (1951) Long term storage capacities of reservoirs. *Trans. Am. Soc. Civil Engrs* 116, 776–808 (Published in 1950 as *Proceedings Separate no. 11*).
- Jones, P. D., Briffa, K. R., Barnett, T. P. & Tett, S. F. B (1998a) *Millennial Temperature Reconstructions*. IGBP PAGES/World Data Center-A for Paleoclimatology Data Contribution Series 1998-039, NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, Colorado, USA ([ftp.ngdc.noaa.gov/paleo/contributions\\_by\\_author/jones1998/](ftp.ngdc.noaa.gov/paleo/contributions_by_author/jones1998/))
- Jones, P. D., Briffa, K. R., Barnett, T. P. & Tett, S. F. B. (1998b) High-resolution paleoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures. *Holocene* 8(4), 455–471.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC (ed. by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell & C. A. Johnson). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kitanidis, P. K. (1993) *Geostatistics*. In: *Handbook of Hydrology* (ed. by D. R Maidment). McGraw-Hill, New York, USA.
- Kolmogorov, A. N. (1940) *Wienersche Spiralen und einige andere interessante Kurven in Hilbertschen Raum*. *Dokl. Akad. Nauk URSS* 26, 115–118.
- Koutsoyiannis, D. (2002) The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy. *Hydrol. Sci. J.* 47(4), 573–595.
- Koutsoyiannis, D. (2003) Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics. *Hydrol. Sci. J.* 48(1), 3–24.
- Koutsoyiannis, D., (2005a) Hydrologic persistence and the Hurst phenomenon, *Water Encyclopedia*, Vol. 4, *Surface and Agricultural Water*, edited by J. H. Lehr and J. Keeley, 210–221, Wiley, New York.
- Koutsoyiannis, D. (2005b) Uncertainty, entropy, scaling and hydrological stochastics. 2, Time dependence of hydrological processes and time scaling. *Hydrol. Sci. J.* 50(3), 405–426.
- Koutsoyiannis, D. (2006a) Nonstationarity versus scaling in hydrology. *J. Hydrol.* 324, 239–254.

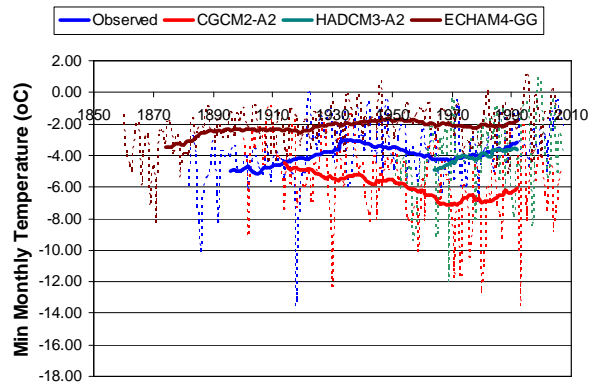
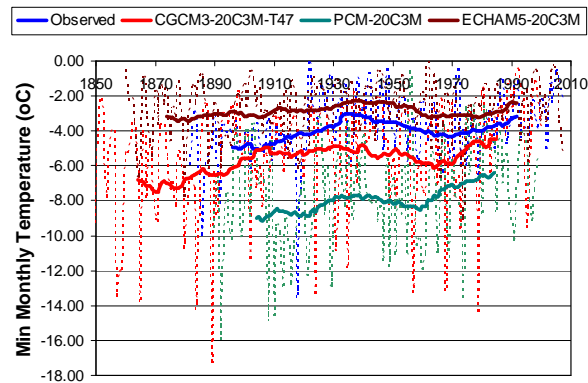
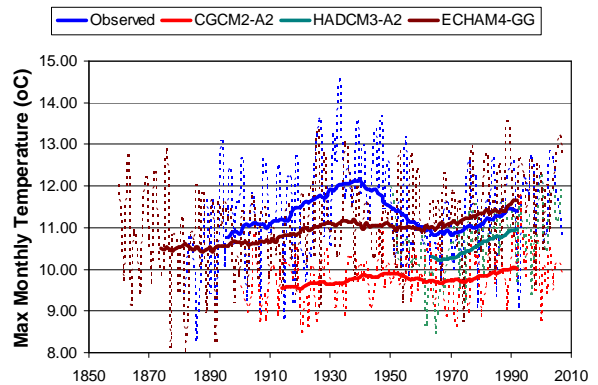
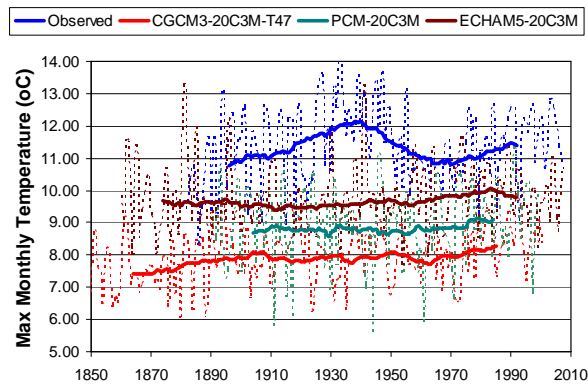
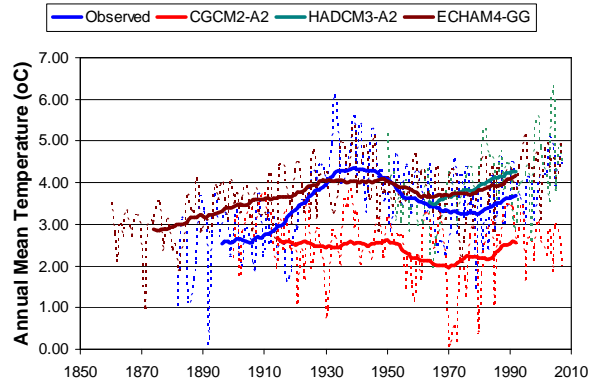
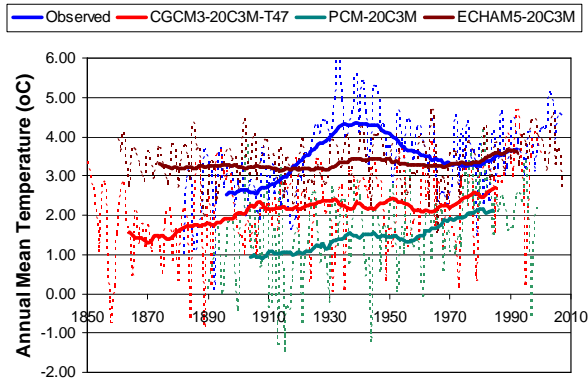
- Koutsoyiannis, D. (2006b) A toy model of climatic variability with scaling behaviour. *J. Hydrol.* 322, 25–48.
- Koutsoyiannis, D. & Cohn, T. A. (2008) The Hurst phenomenon and climate. EGU General Assembly 2008, *Geophys. Res. Abstracts*, vol. 10, Vienna, 11804. European Geosciences Union ([www.itia.ntua.gr/en/docinfo/849/](http://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/849/)).
- Koutsoyiannis, D. & Montanari, A. (2007) Statistical analysis of hydroclimatic time series: Uncertainty and insights. *Water Resour. Res.* 43 (5), W05429.1–9.
- Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A. & Georgakakos, K. (2007) Uncertainty assessment of future hydroclimatic predictions: a comparison of probabilistic and scenario-based approaches. *J. Hydromet.* 8(3), 261–281.
- Koutsoyiannis, D., Mamassis, N., Christofides, A., Efstratiadis, A. & Papalexiou, S. M. (2008a) Assessment of the reliability of climate predictions based on comparisons with historical time series. EGU General Assembly 2008, *Geophys. Res. Abstracts*, vol. 10, Vienna, 09074. European Geosciences Union ([www.itia.ntua.gr/en/docinfo/850/](http://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/850/)).
- Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A., Mamassis N. & Christofides, A. (2008b) On the credibility of climatic predictions: Additional information. Report ([www.itia.ntua.gr/e/docinfo/864/](http://www.itia.ntua.gr/e/docinfo/864/)).
- Koutsoyiannis, D., Efstratiadis, A., Mamassis N. & Christofides, A. (2008c) On the credibility of climate predictions. *Hydrol. Sci. J.* 53(4), 671–684.
- Koutsoyiannis D., Makropoulos C., Langousis A., Baki S., Efstratiadis A., Christofides A., Karavokiros G., and Mamassis N. (2009) Climate, hydrology, energy, water: recognizing uncertainty and seeking sustainability. *HESSD* 5, 2927–2949, 2008.
- Leggett, J., Pepper, W. J. & Swart, R. J. (1992) Emissions scenarios for the IPCC: an update. In: *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* (ed. by J. T. Houghton, B. A. Callander & S. K. Varney), 75–95. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Mandelbrot, B.B., (1965), Une classe de processus stochastiques homothétiques à soi: application à la loi climatologique de H.E. Hurst. *C.R. Acad. Sci.* 260, 3274–3277.
- Meehl, G. A., Stocker, T. F., Collins, W. D., Friedlingstein, P., Gaye, A. T., Gregory, J. M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J. M., Noda, A., Raper, S. C. B., Watterson, I. G., Weaver, A. J. & Zhao, Z.-C. (2007) Global climate projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller), 747–845. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Nakicenovic, N. & Swart, R. (eds) (1999) IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change. Available online at: <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/>.
- Papoulis A., (2002), *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, Fourth Edition, Mc-Graw Hill.
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fife, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer R. J., Sumi A. & Taylor, K. E, (2007) Climate models and

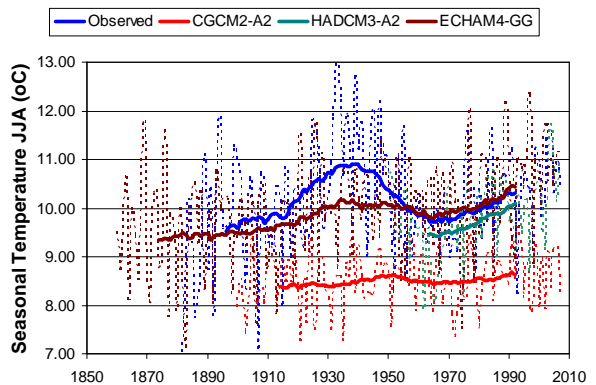
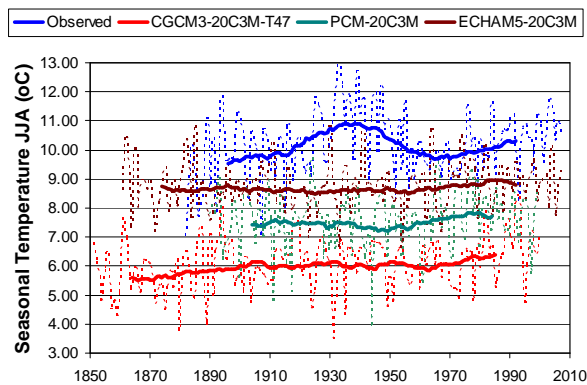
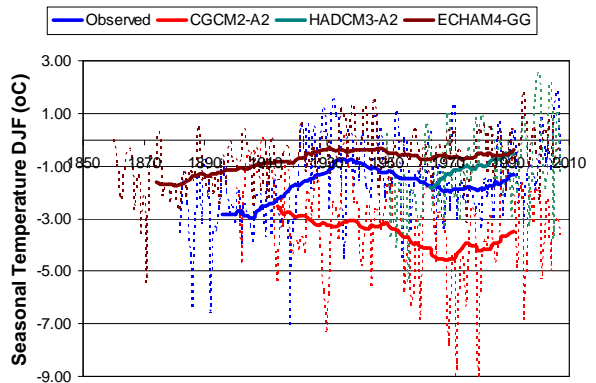
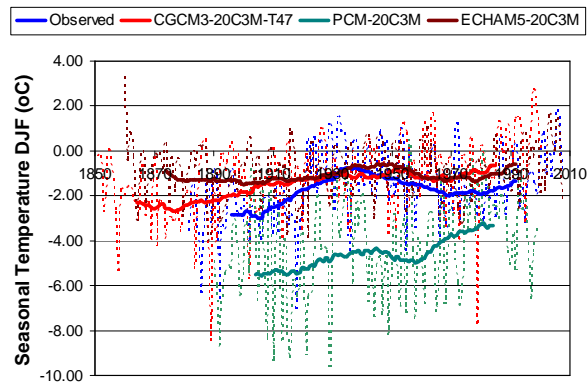
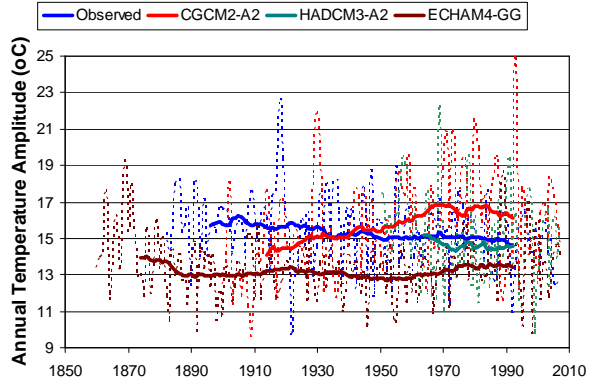
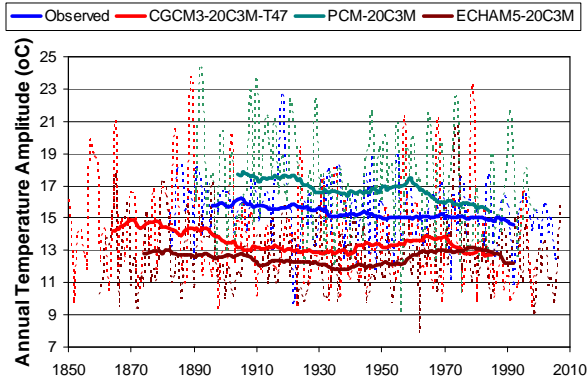
- their evaluation. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor & H. L. Miller), 589–662. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Von Storch H. & Zwiers F., (2003) *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, UK
- Von Storch, H., von Storch, J.-S., Müller, P., (2001), Noise in the climate system—ubiquitous, constitutive and concealing. In: Engquist, B., Schmid, W. (Eds.), *Mathematics Unlimited—2001 and Beyond*. Springer, Berlin.
- Κουτσογιάννης Δ., (1996), *Στατιστική Υδρολογία*, Έκδοση 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, (1999) *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, (<http://www.itia.ntua.gr/g/docinfo/115/>)
- Κουτσογιάννης Δ., (2008) *Σημειώσεις Στοχαστικών Μεθόδων στους Υδατικούς Πόρους*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (<http://www.itia.ntua.gr/el/docinfo/207/>).
- Μιμίκου Μ., (1994), *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*, β' έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Μιμίκου Μ., Μπαλτάς Ε., (2003), *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

## 5. Παράρτημα (Σύγκριση σε χαρακτηριστικούς σταθμούς).

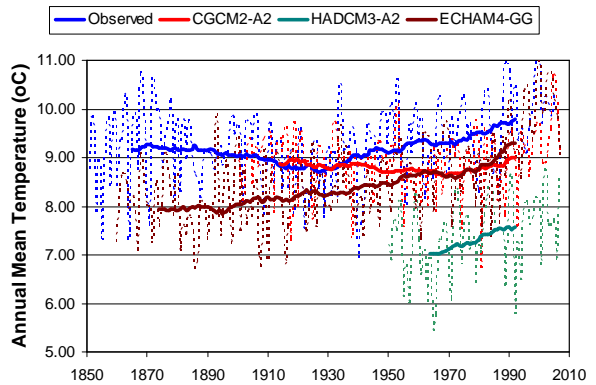
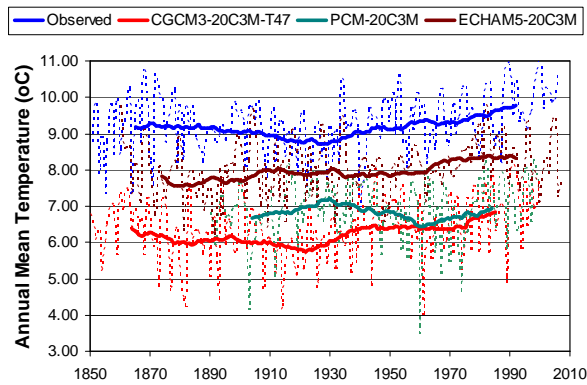
### 5.1: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

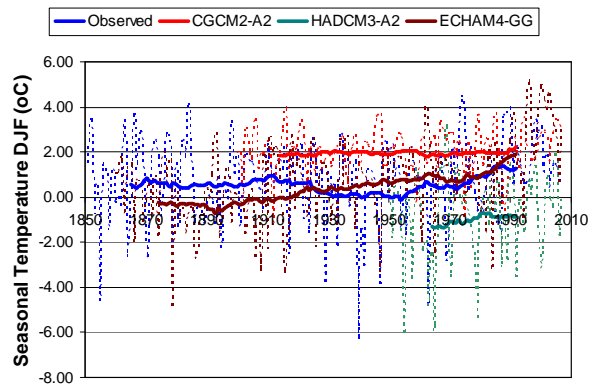
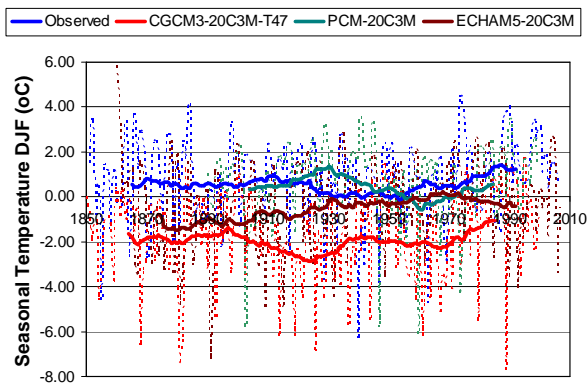
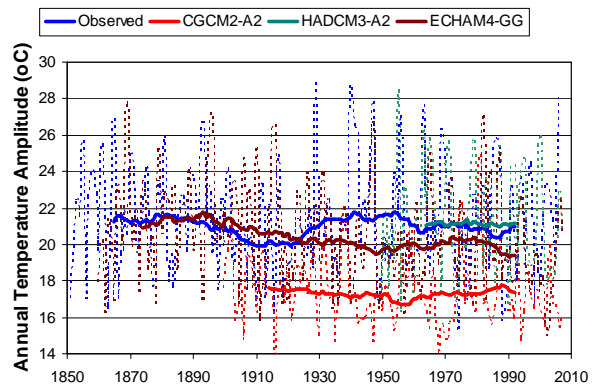
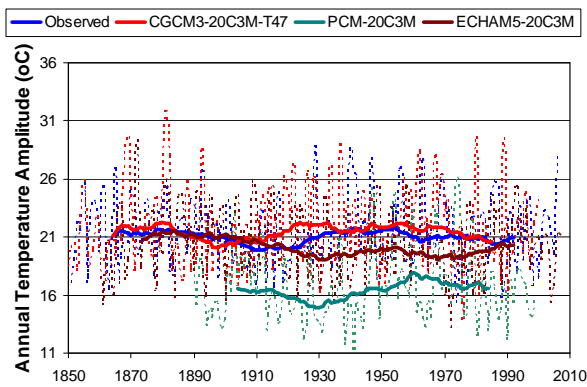
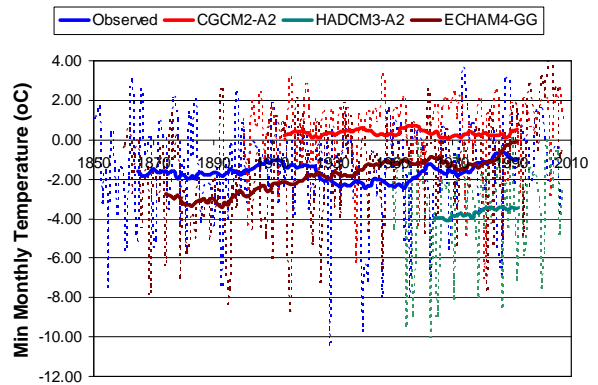
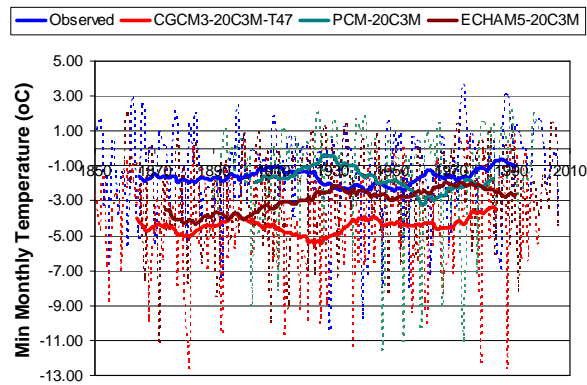
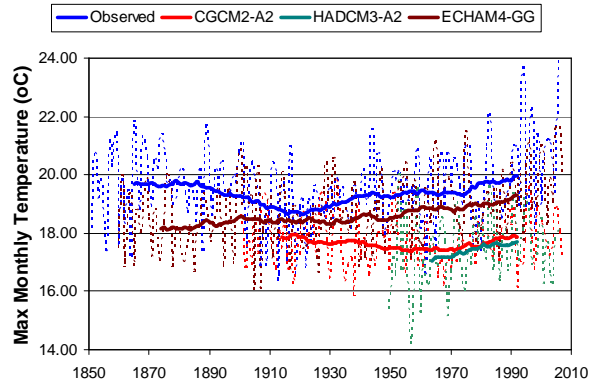
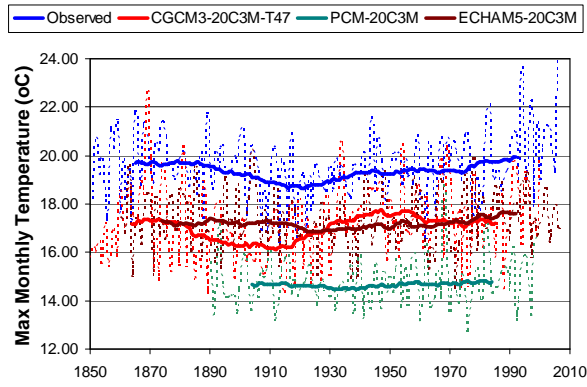
#### 1. Akureyri

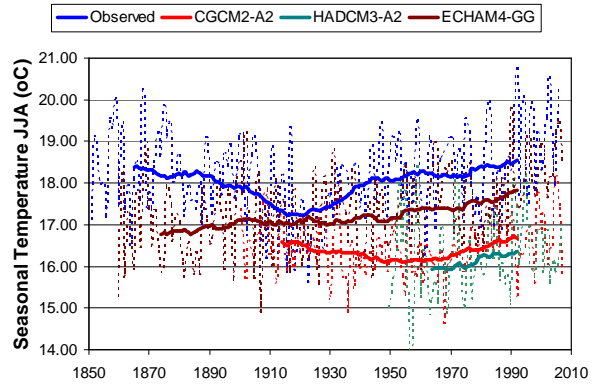
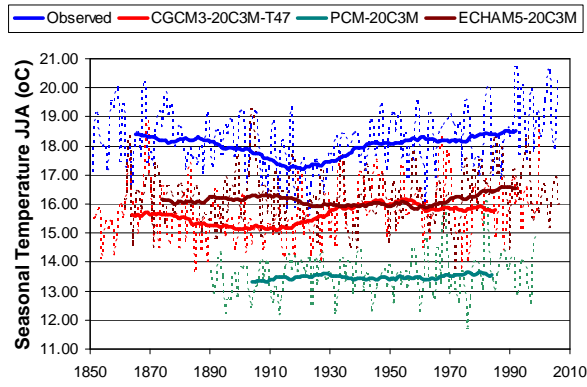




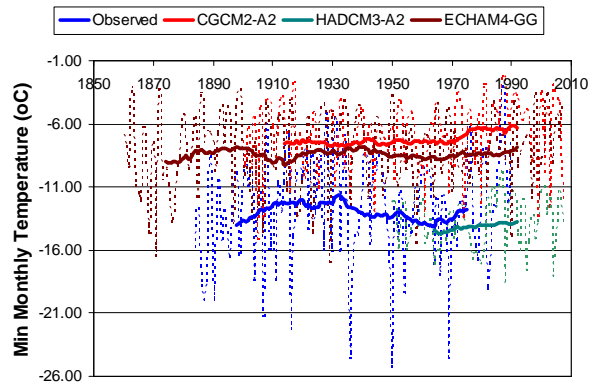
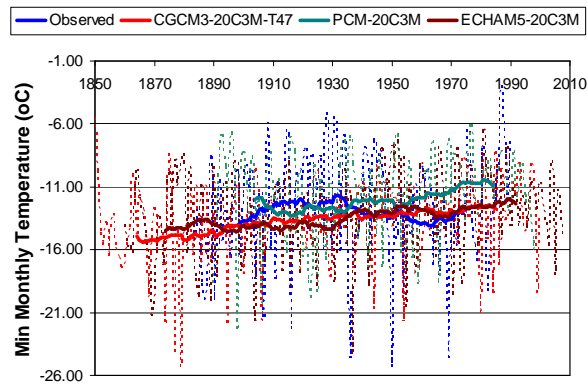
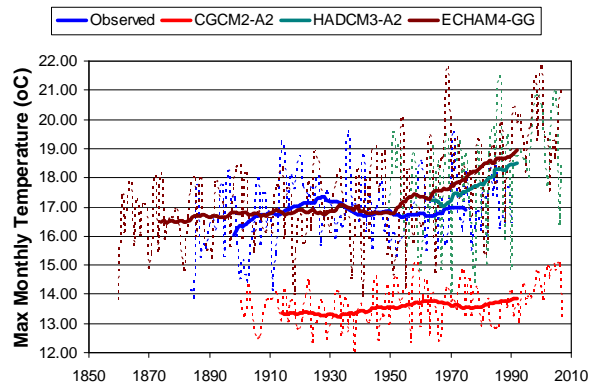
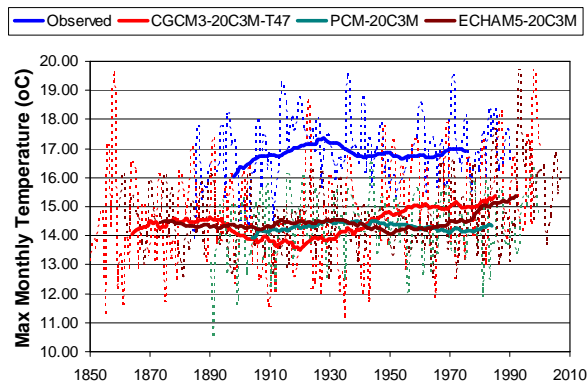
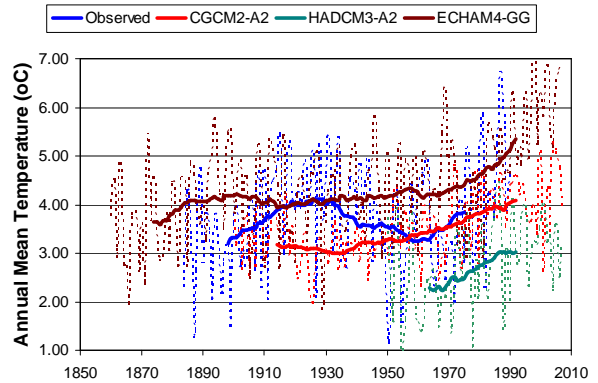
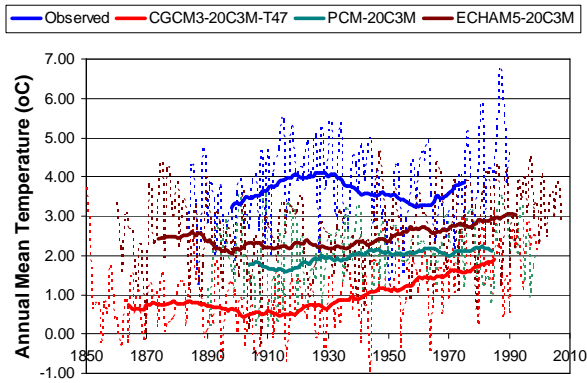
## 2. Berlin



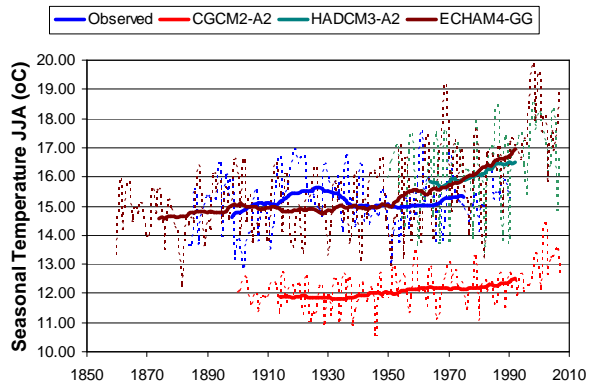
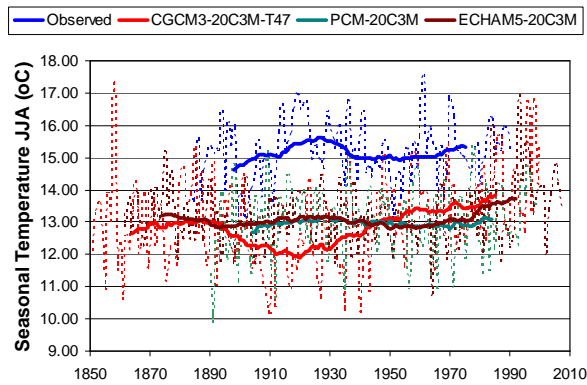
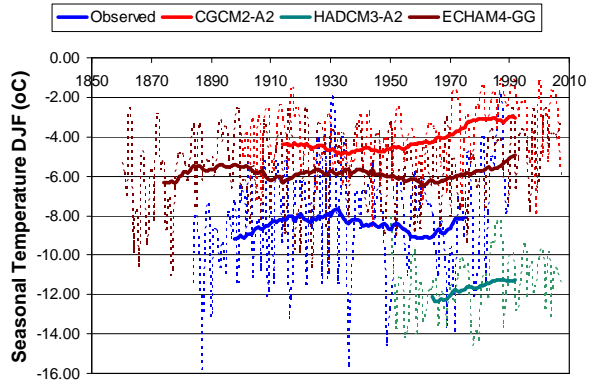
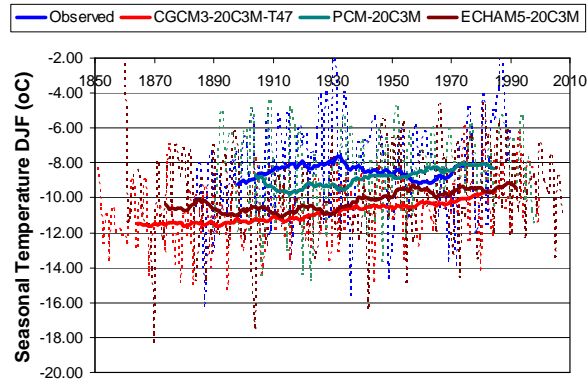
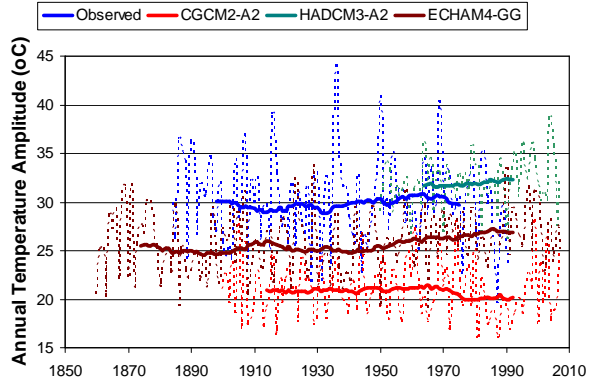
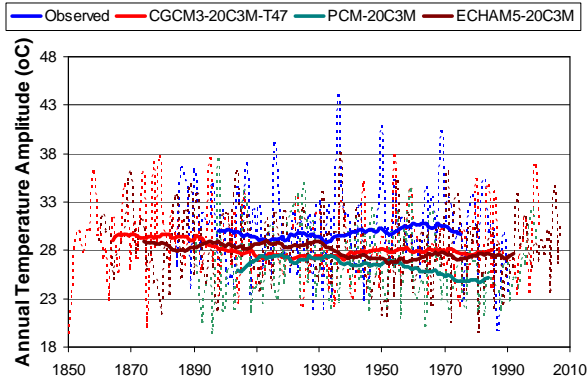




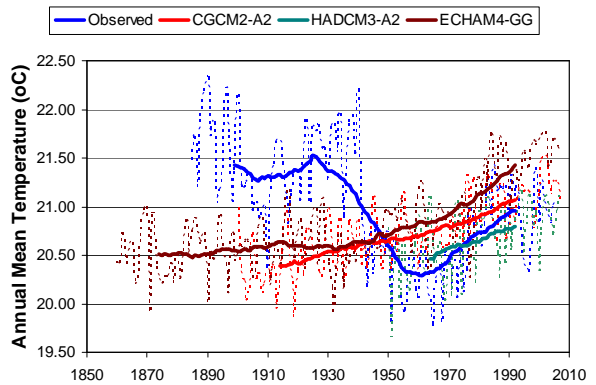
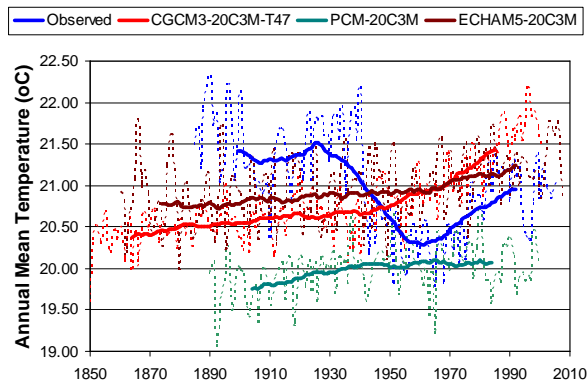
### 3. Calgary

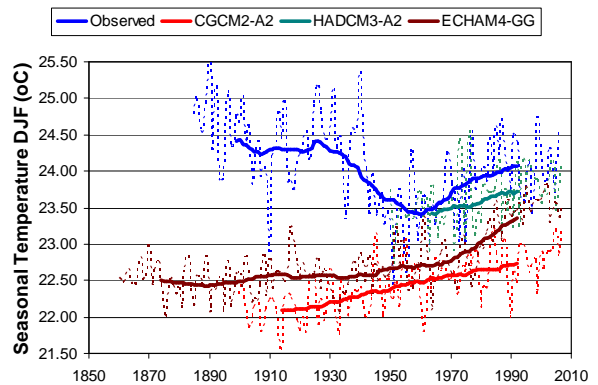
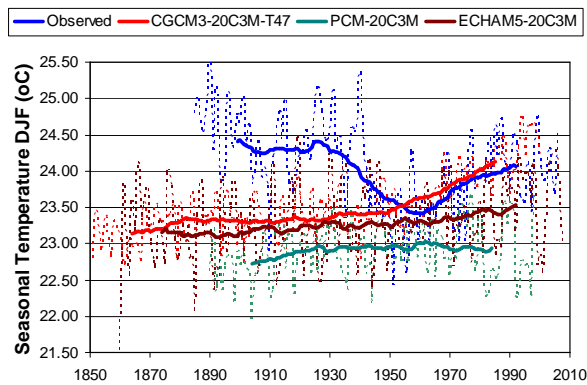
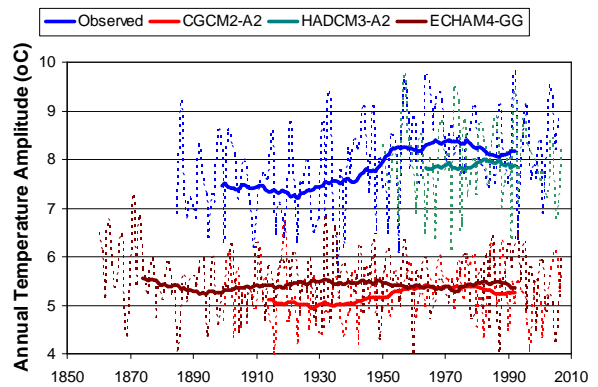
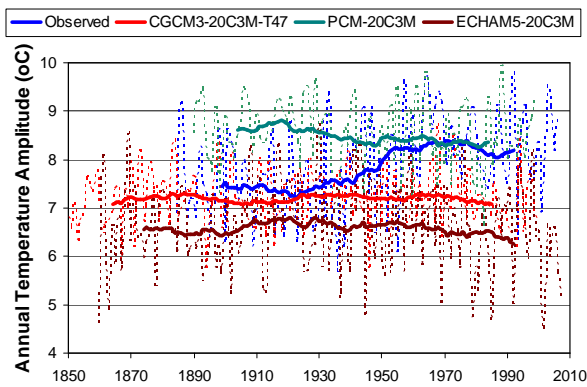
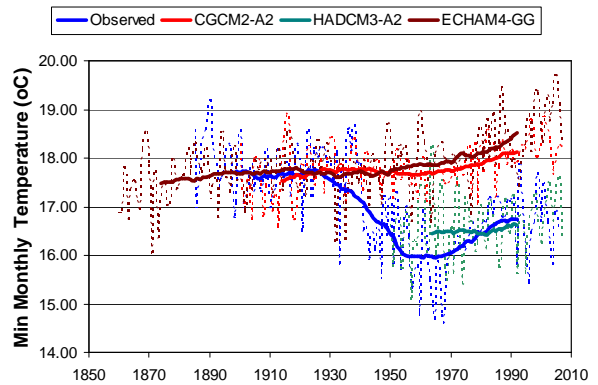
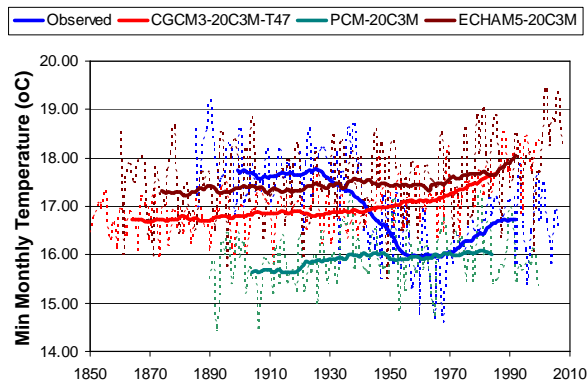
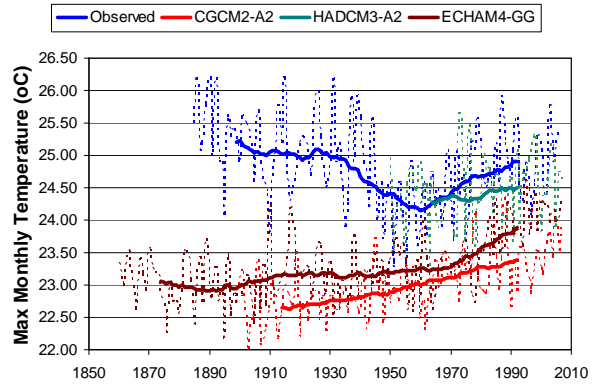
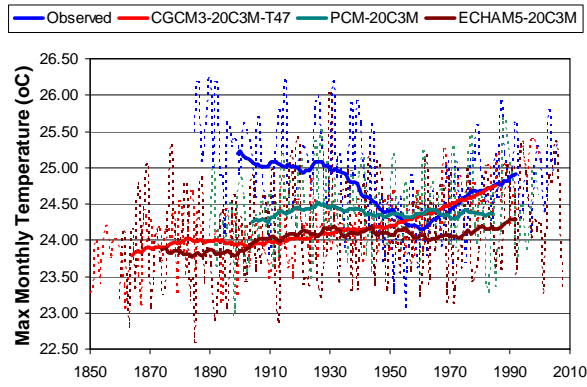


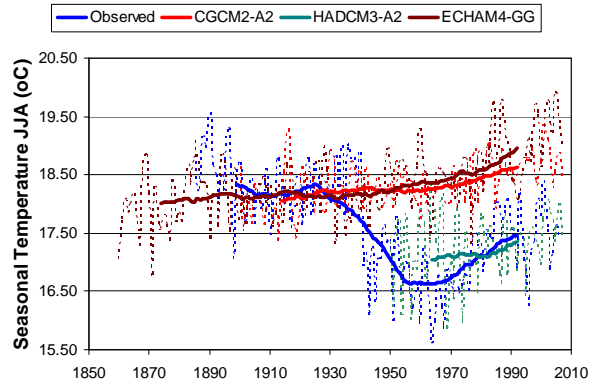
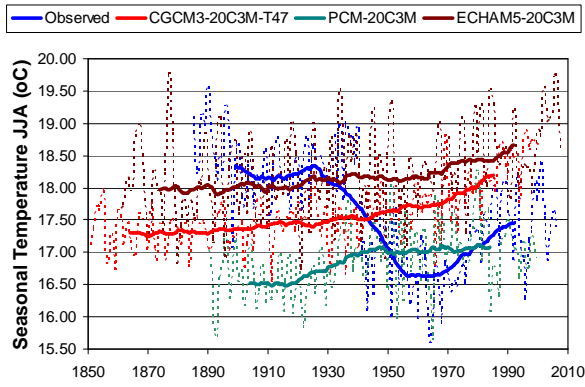




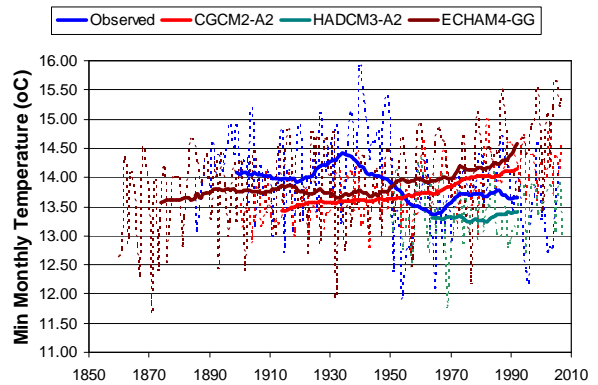
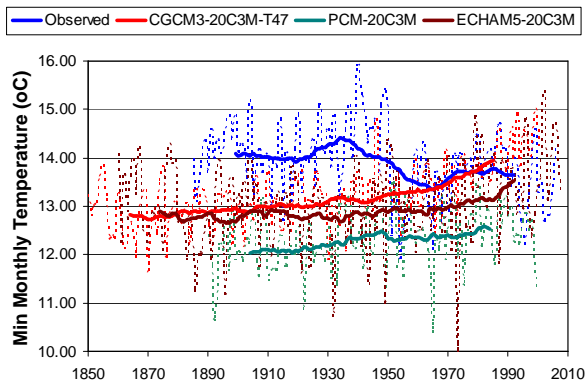
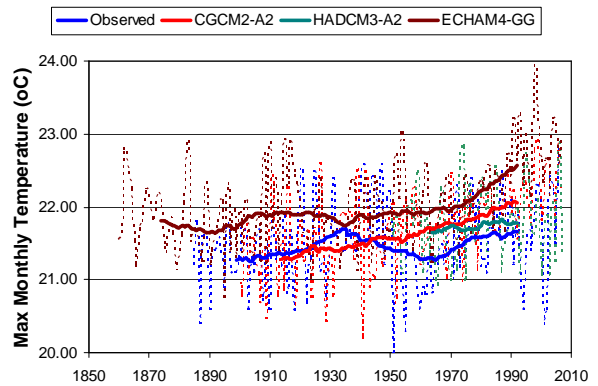
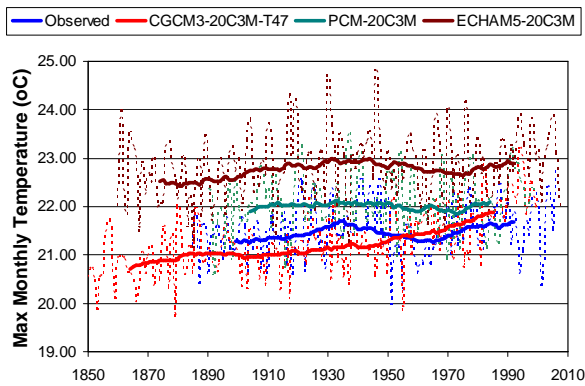
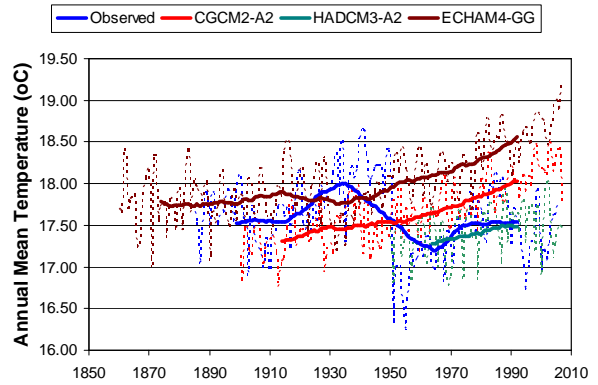
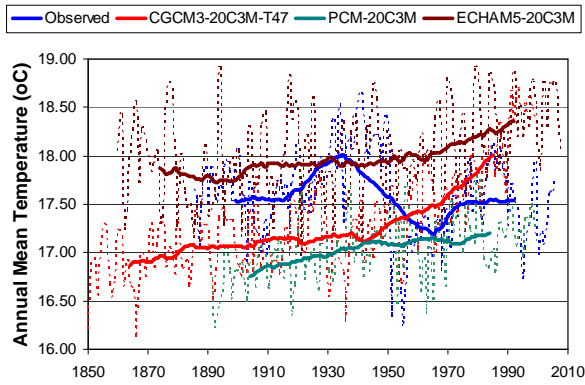
## 4. Durban

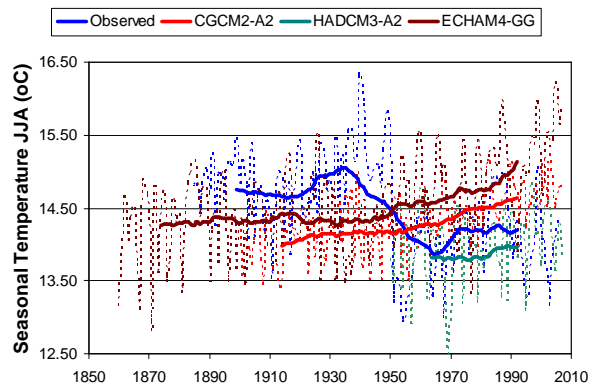
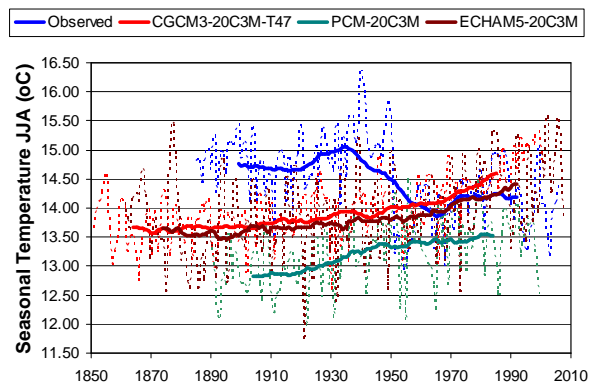
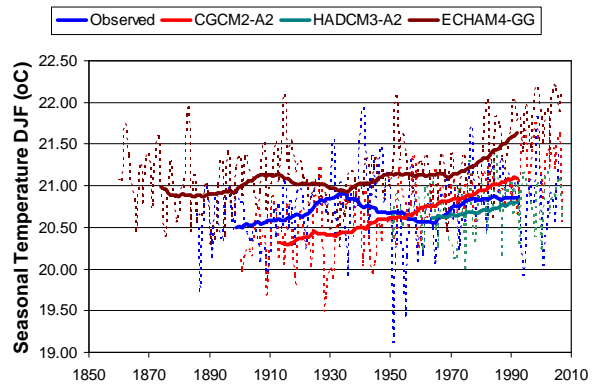
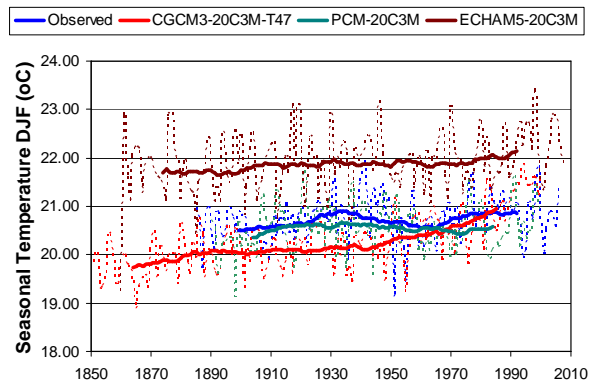
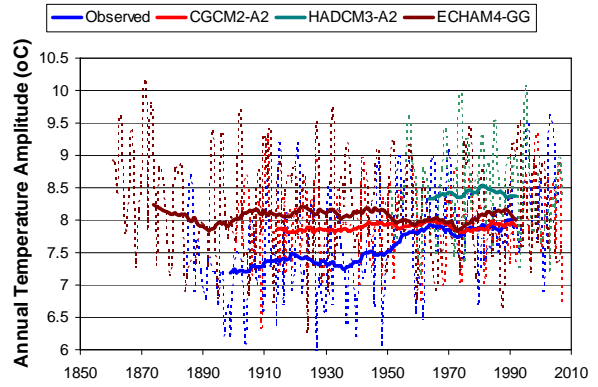
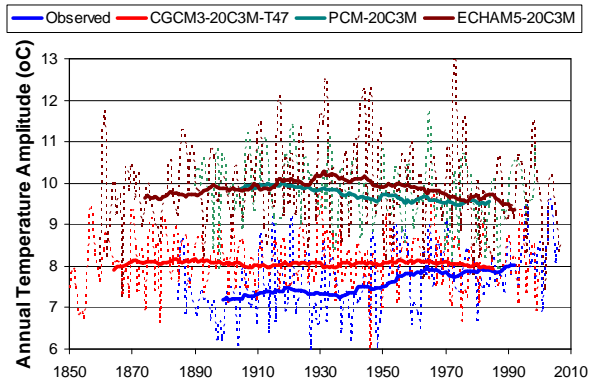






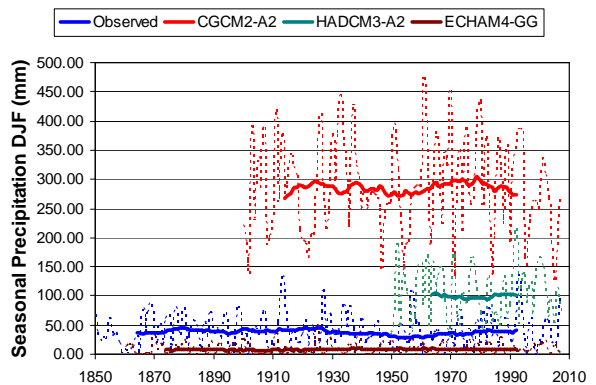
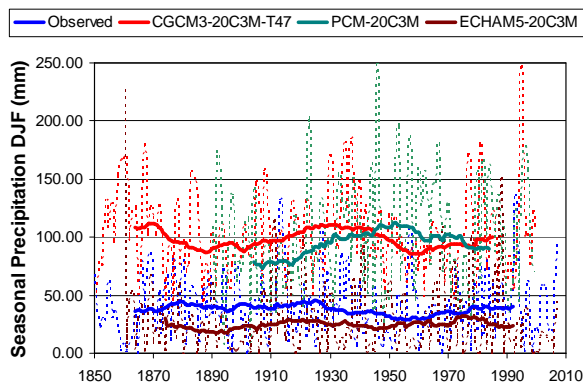
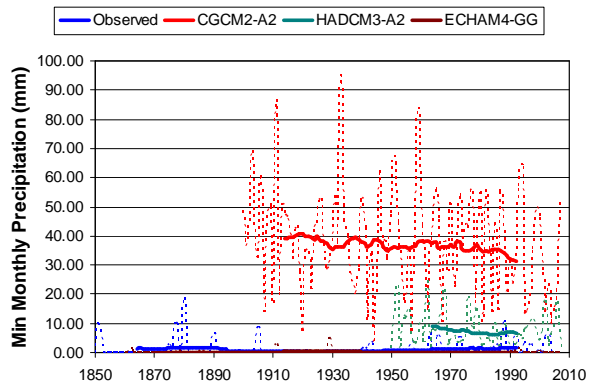
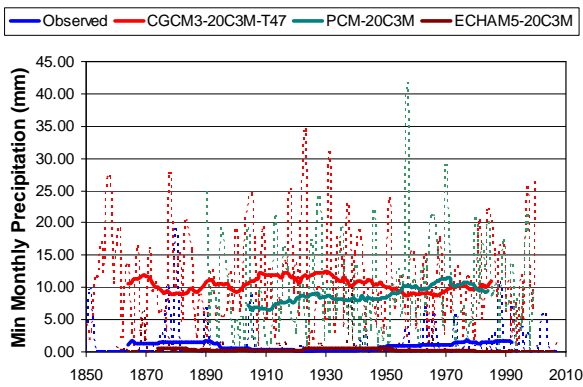
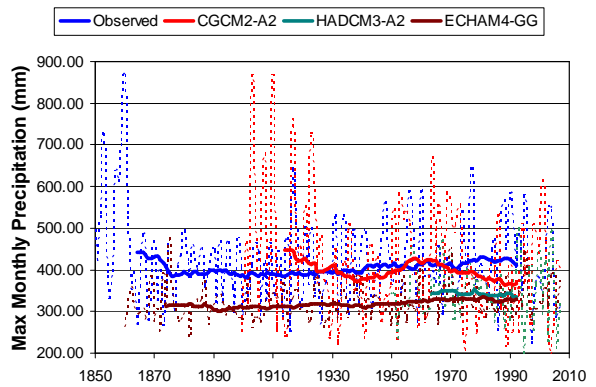
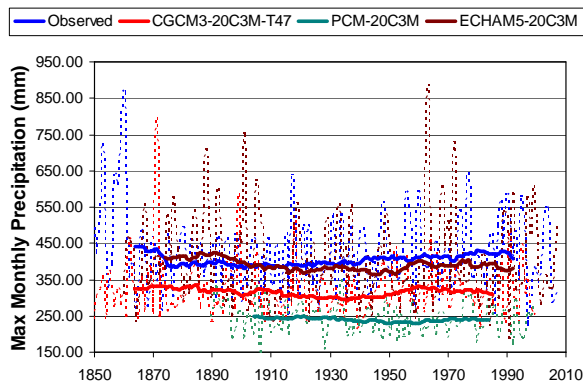
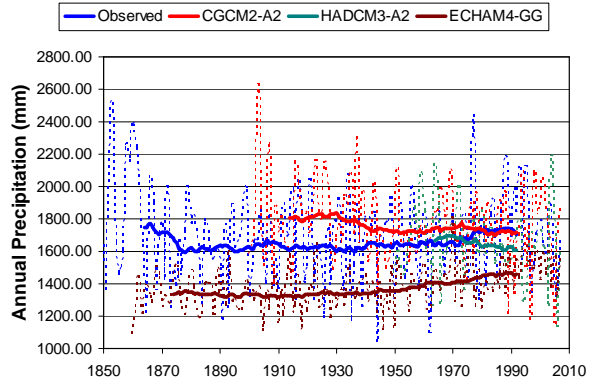
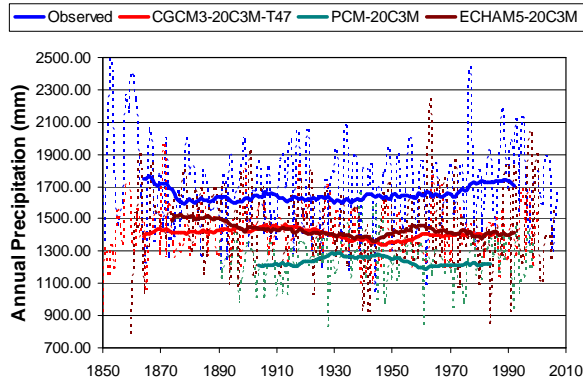
## 5. Port Elizabeth

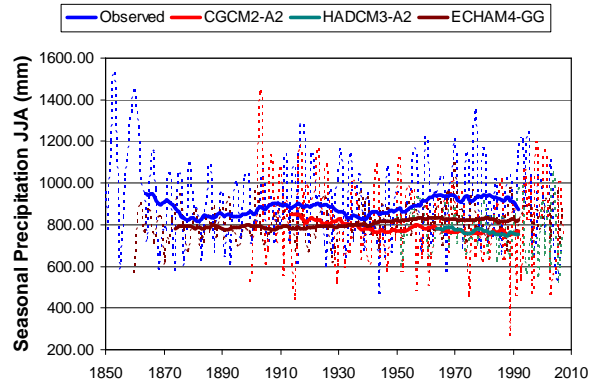
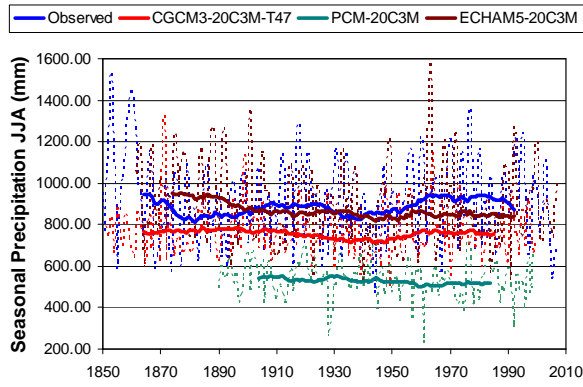




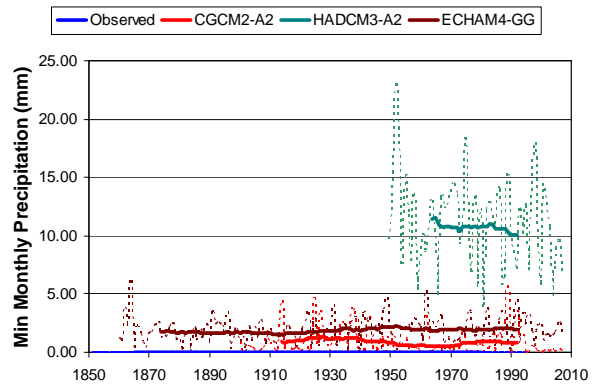
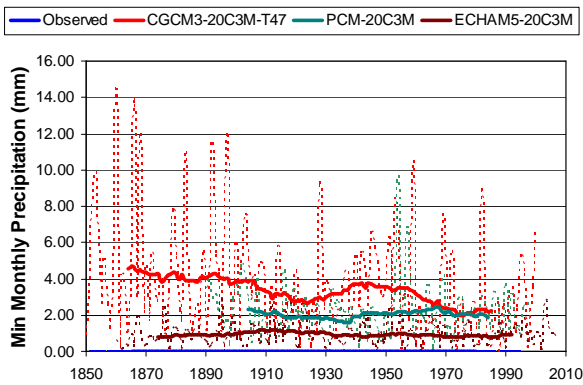
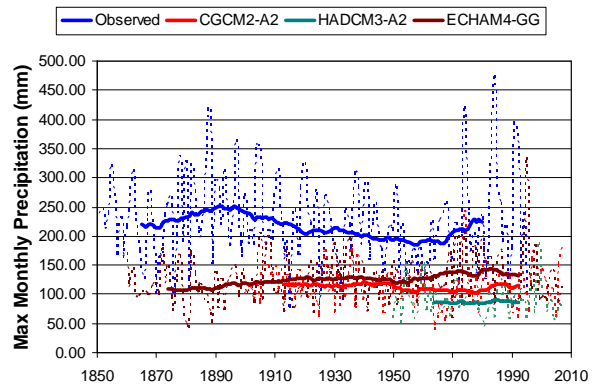
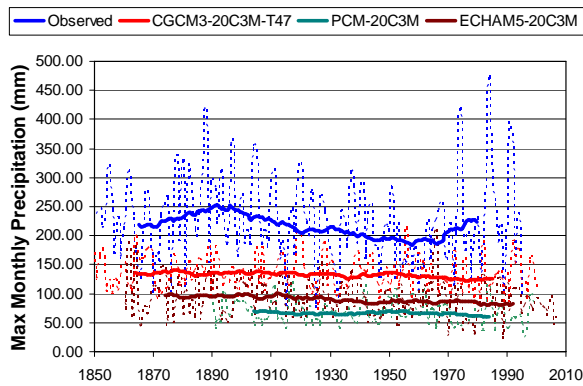
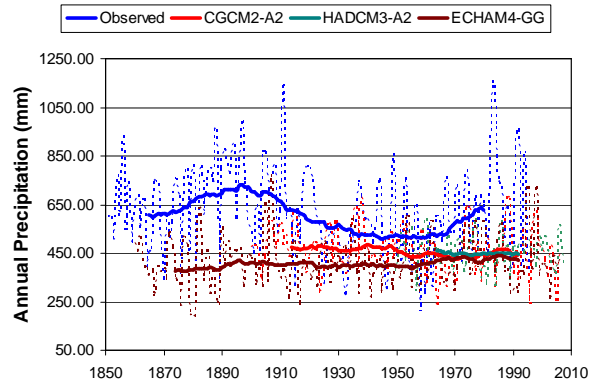
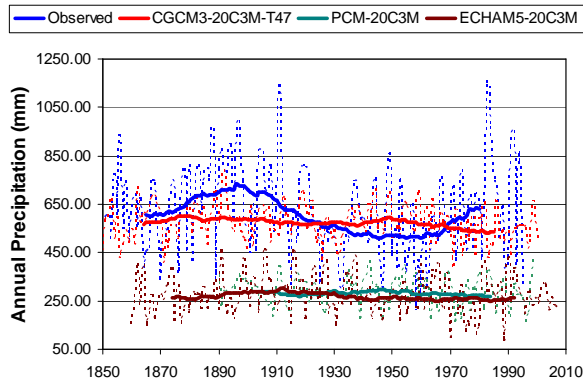
## 5.2 ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ

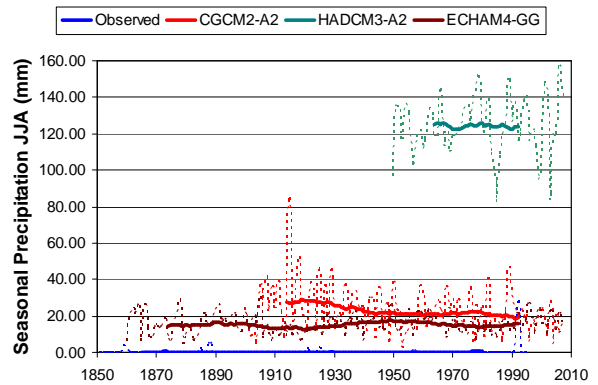
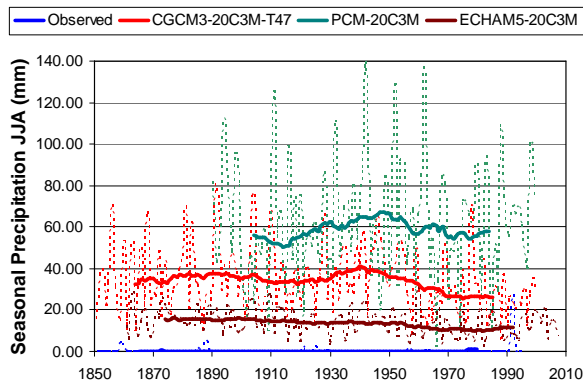
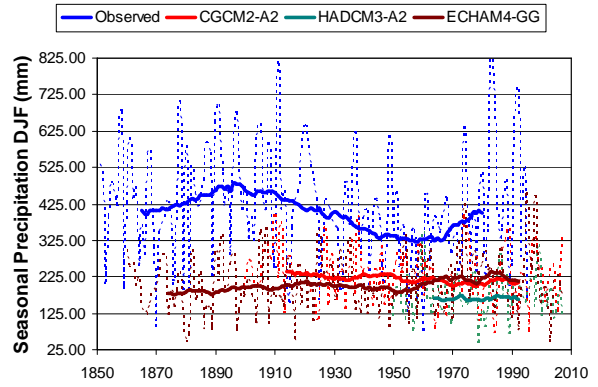
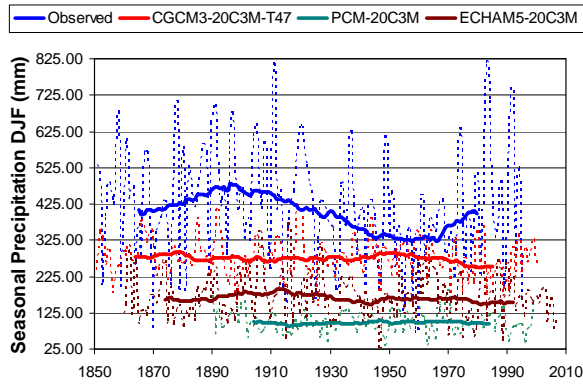
### 1.Gauhati



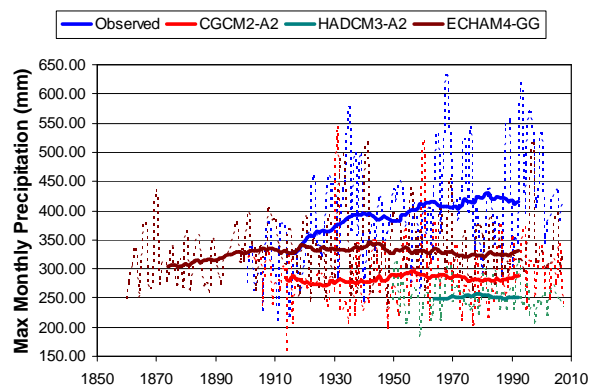
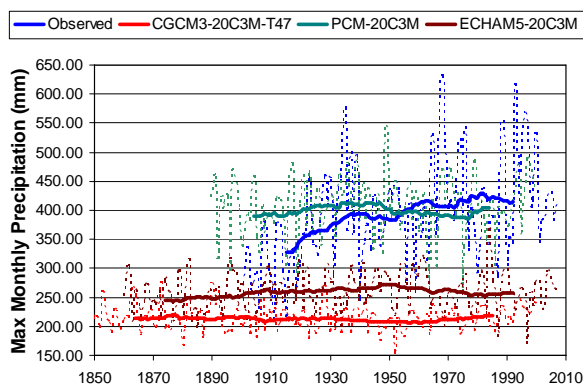
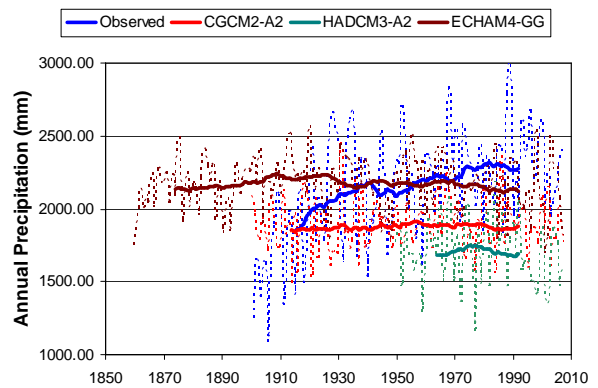
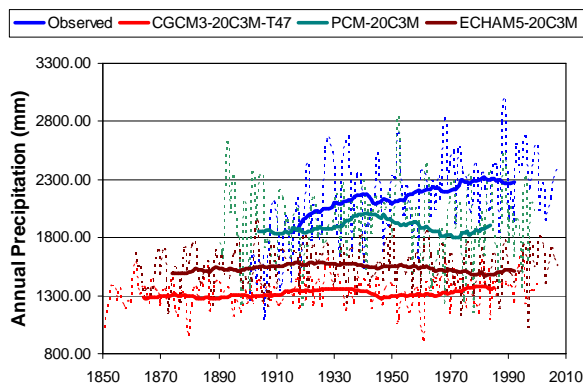


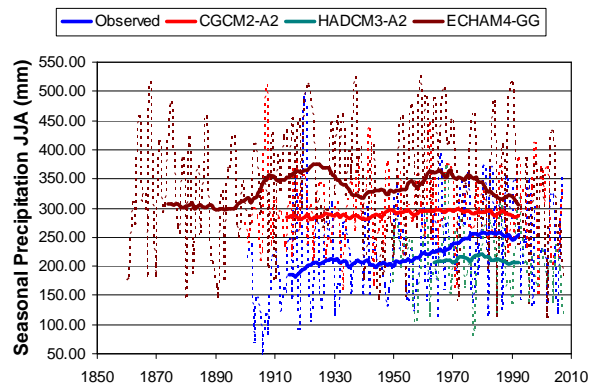
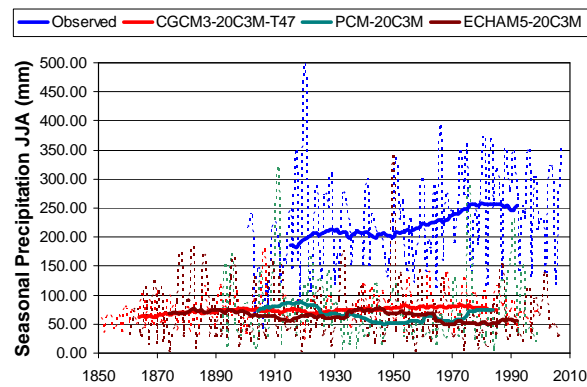
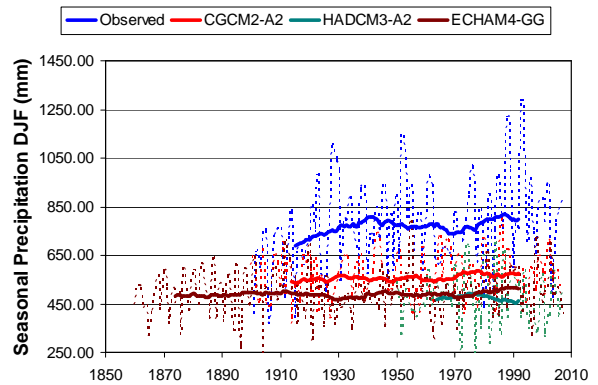
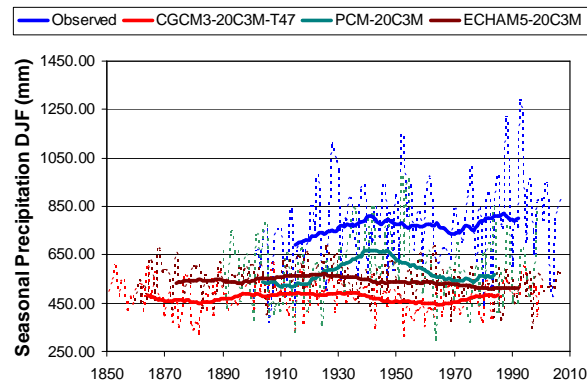
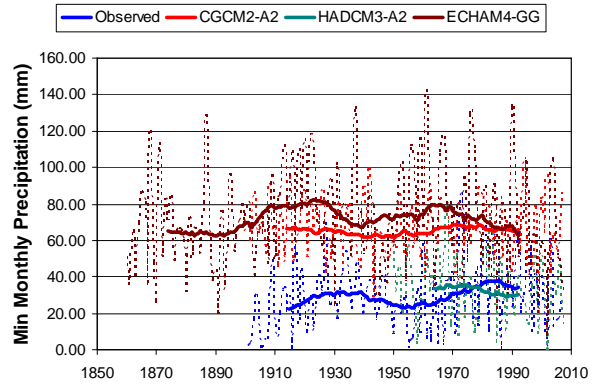
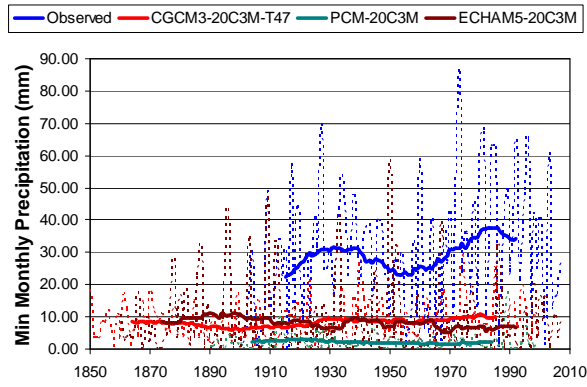
## 2. Jerusalem



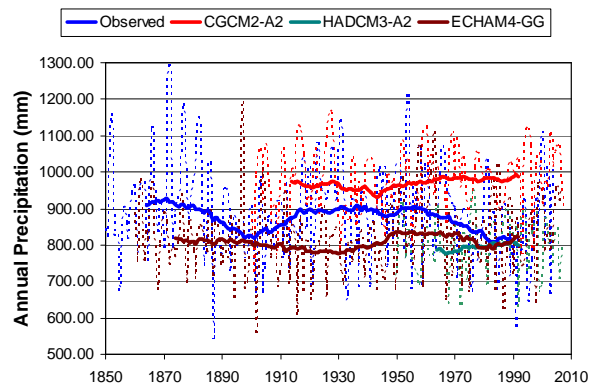
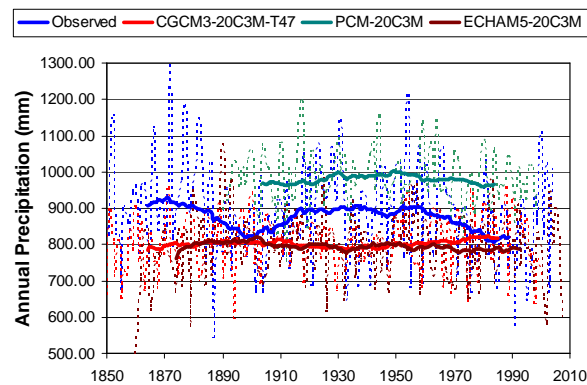


### 3. Manaus

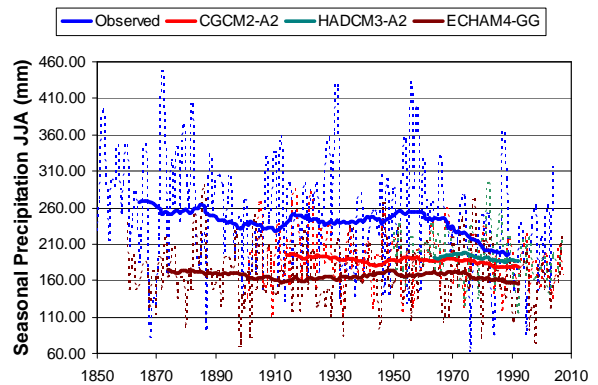
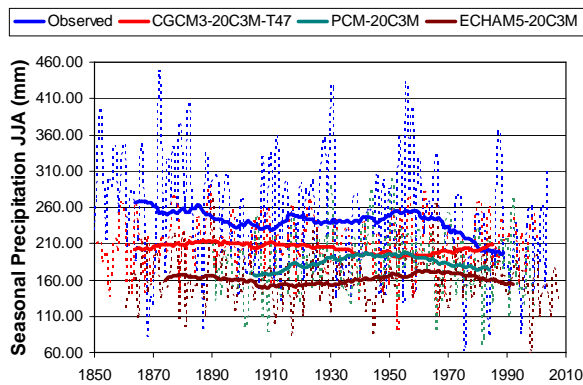
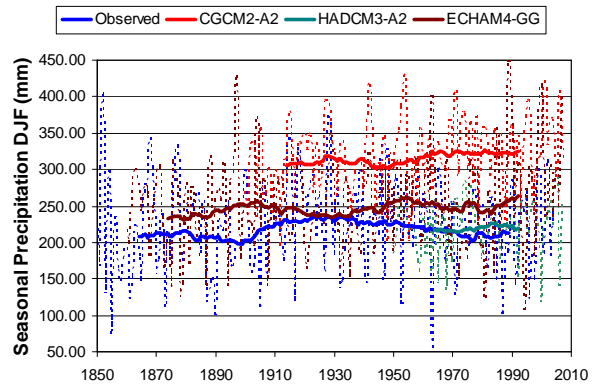
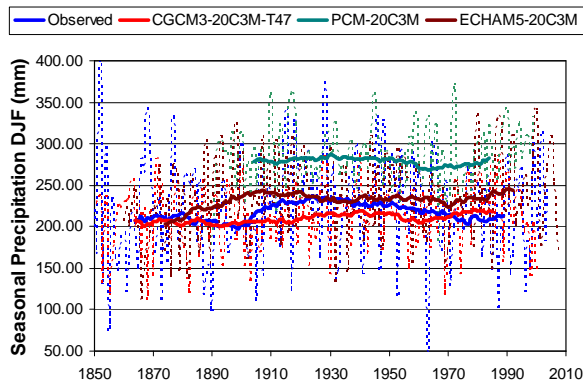
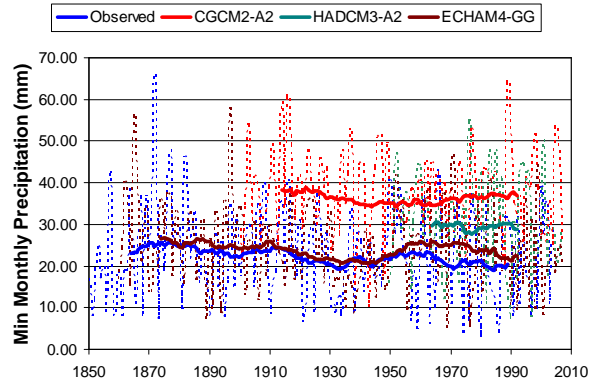
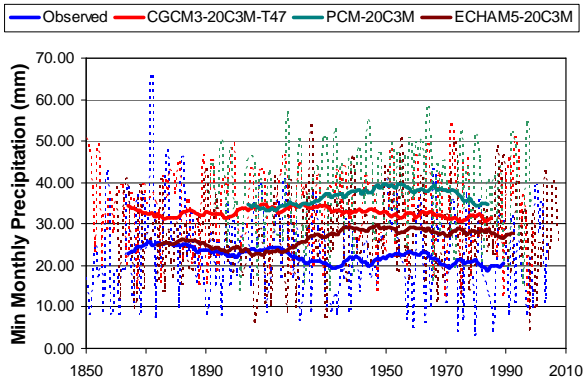
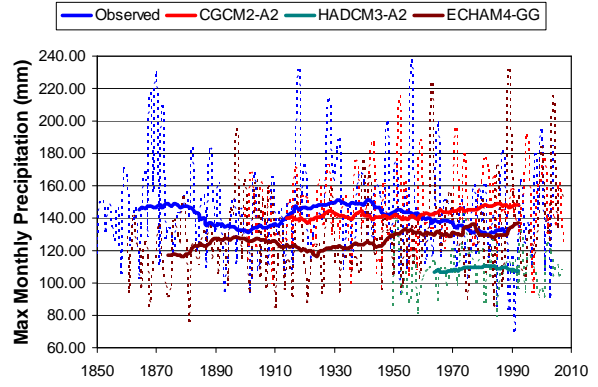
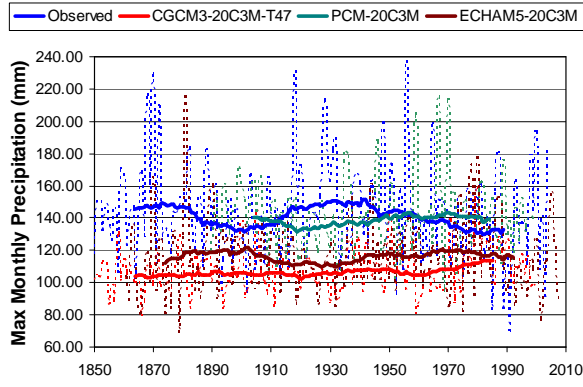




## 4. Manchester







## 5. Valdivia

